

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
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



**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention des diplômes  
d'ingénieur d'état et de master en hydrobiologie marine et continentale**

**Spécialité : Ingénierie de l'environnement marin et côtier**

**Présentés par :**

**DIF Safa et TIDAFI Wissal**

**Thème**

**Evaluation et impact de la pollution par les métaux traces  
sur l'environnement marin :  
Cas de l'embouchure de l'Oued Beni Messous**

Mémoire Soutenu le **9/7/2024** devant le jury composé de :

|                        |                     |                              |         |
|------------------------|---------------------|------------------------------|---------|
| Mr. DAHMANI Abdel Alim | <b>Président</b>    | <b>MCB</b>                   | ENSSMAL |
| Mr. ZERROUKI Mohamed   | <b>Examineur</b>    | <b>MAA</b>                   | ENSSMAL |
| Mr. AROUA Mohamed      | <b>Promoteur</b>    | <b>Docteur Enseignant/C.</b> | ENSSMAL |
| Mr. BOULAHIDID Mostefa | <b>Co-promoteur</b> | <b>Professeur</b>            | ENSSMAL |

**Année universitaire : 2023- 2024**



## REMERCIEMENT

Nous tenons à exprimer ma profonde gratitude et nos sincères remerciements tout d'abord à Allah le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté pour effectuer ce modeste travail « Elhamdouli Allah ». Et à tous ceux qui nous avons soutenu tout au long de mon parcours universitaire.

Tout d'abord, nous tenons à remercier notre promoteur, **Mr. AROUA Mohamed**, et notre co-promoteur **Mr. BOULAHID Mostefa** pour les conseils d'expert et les engagements tout au long du projet. Leur patience, leur expertise et pour leur disponibilité ont grandement facilité la réalisation du travail.

En particulier, nous tenons à remercier chaleureusement **Mr. DAHMANI Abdel Alim** qui nous a fait l'honneur de présider ce jury. Nous tenons également à remercier le membre de jury, **Mr. ZERROUKI Mohamed** Pour avoir bien accepté d'examiner ce travail, pour leur temps précieux, leurs commentaires constructifs et leurs suggestions qui ont grandement amélioré la qualité de notre mémoire.

Notre énorme appréciation est adressée à **Mr. Malik AIT KACI**, responsable du laboratoire des méthodes analytiques à l'ENSSMAL de nous avoir accueilli au sein de son laboratoire dans de bonnes conditions de travail pendant toute la période des Analyses des métaux.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à l'incubateur bleu, à Mme. **MAOUEL Djamila** pour les formations exceptionnelles que vous avez offertes et pour les formateurs talentueux que vous avez mis à notre disposition. Grâce à vos formations de qualité, nous avons pu acquérir les connaissances, les compétences et les outils nécessaires pour réussir dans nos parcours entrepreneuriaux.

## DEDICASE

*Avec une reconnaissance sincère, je dédie cette réalisation à tous ceux qui m'ont accompagné, soutenu et encouragé. Votre amour, votre patience et votre soutien infailible ont été une source continue d'inspiration tout au long de ce chemin académique.*

*En ce moment de réflexion, je souhaite exprimer ma gratitude envers moi-même. Merci d'avoir fait preuve de patience et de persévérance durant les moments difficiles, et d'avoir gardé le cap malgré les obstacles rencontrés.*

*A mon père **LAKHDAR**, je te remercie du fond du cœur pour ta présence dans ma vie, pour ton amour et pour les sacrifices que tu as consentis pour mon bonheur et ma réussite. À toi maman **OURIDA**, ma source d'inspiration tu as été là à chaque étape de ma vie,*

*En soutenant mes rêves, en essuyant mes larmes et en célébrant mes réussites, ta patience infinie a toujours été présente. Je t'aime plus que les mots ne puissent l'exprimer. Que Dieu veille sur toi pour moi et mes frères.*

*Je souhaite également remercier ma grande Je t'aime beaucoup grand mère **HAMAMA** mes frères **Abdellah, Aboubaker El Seddik, Mohammed, Ali et Omar.***

*Je tiens à remercier notre promoteur, **Mr. AROUA M**, pour ses conseils d'expert et son engagement tout au long du projet. Sa patience, son expertise et sa disponibilité ont grandement facilité la réalisation du travail.*

*Un grand merci à **Mr. Abdallah Elshamyh (Geomatics engineering)** Pour son assistance inestimable et sa présence chaque fois que j'en avais besoin,*

*Son oublié mon binôme **WISSAL** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet,*

*Que Dieu les bénisse et leur offre une longue vie pleine de prospérité et de bonheur.*

*SAFA...*

## DEDICASE

Avec une profonde gratitude, je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont entouré, soutenu et encouragé. Votre amour, votre patience et votre soutien indéfectible ont été une source constante d'inspiration tout au long de ce parcours académique.

En cet instant de réflexion, je veux exprimer ma profonde gratitude envers moi-même. Merci d'avoir fait preuve de patience et de persévérance dans les moments difficiles, d'avoir maintenu le cap malgré les obstacles qui se sont dressés sur ma route.

A mon père **KAMEL**, je te remercie du fond du cœur pour ta présence dans ma vie, pour ton amour ton encouragement et pour les sacrifices que tu as consentis pour mon bonheur et ma réussite. JE TAIME PAPICHKOU

À toi maman **KHOULOUD**, ma source d'inspiration tu as été là à chaque étape de ma vie, encourageant mes rêves, essuyant mes larmes et célébrant mes réussites, ta patience infinie, Je t'aime plus que les mots ne puissent l'exprime. Que Dieu vos garde pour moi.

Je souhaite également remercier mes sœurs **RANIME et TAIMAA** pour votre amour et votre soutien et votre présence précieuse

Je te remercie pour tas présence.

**Wissal**

## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| REMERCIEMENT   |    |
| DEDICASE   |    |
| DEDICASE   |    |
| Liste des figures  |    |
| Liste des abréviations   |    |
| Introduction.....  | 2  |
| Chapitre I : Généralités .....   | 5  |
| I.1. Les éléments traces métalliques « ETM ».....  | 5  |
| I.1.1. Définition et classification des ETM .....  | 5  |
| I.1.2. Origine et propriétés des éléments traces métalliques .....                           | 6  |
| I.1.3. Présentation des principaux métaux lourds étudiés .....                               | 9  |
| I.1.4. Devenir des éléments traces métalliques et métalloïdes dans le milieu aquatique ..... | 17 |
| I.1.5. Les ETM dans les sédiments .....  | 18 |
| I.2. Le Sédiment .....   | 21 |
| I.2.1. Origine .....   | 21 |
| I.2.2. Composition.....  | 21 |
| I.2.3. Diagenèse précoce du sédiment.....  | 24 |
| I.2.4. Granulométrie .....   | 24 |
| I.2.5. Les polluants dans les sédiments .....  | 25 |
| Chapitre II : Zone d'étude .....   | 28 |
| II.1. PRESENTATION DE LA ZONE DETUDE (bassin versant de Beni Messous).....                   | 28 |
| II.1.1. Situation géographique .....   | 28 |
| II.1.2. L'Oued Béni Messous .....  | 29 |
| II.1.3. La plage (El Bahdja) .....   | 30 |
| II.1.4. Bassin versant de Beni Messous .....   | 30 |
| II.1.5. Etude démographique de la zone d'étude.....  | 31 |
| II.1.6. Facteurs climatiques de la zone d'étude.....   | 31 |
| II.2. La station d'épuration de Beni Messous .....   | 33 |
| Chapitre III : MATÉRIELS ET MÉTHODES .....   | 35 |
| III.1. Choix et localisation des stations de prélèvement.....                                | 35 |
| III.2. Echantillonnage des sédiments de surface.....   | 36 |
| III.3. Les travaux et le traitement au laboratoire .....                                     | 37 |
| III.3.1. Conditionnement et préparation du matériel .....                                    | 37 |
| III.4. Analyses des paramètres des sédiments .....   | 37 |

|  |    |
|--|----|
| III.4.1. Détermination du taux de la matière organique (MO) dans les sédiments .....                   | 37 |
| III.4.2. Détermination du taux des carbonates de calcium (CaCO <sub>3</sub> ) dans les sédiments ..... | 38 |
| III.5. Analyse des éléments traces métalliques (ETM).....  | 39 |
| III.5.1. Nettoyage des instruments.....  | 39 |
| III.5.2. Traitement des sédiments .....  | 39 |
| III.6. Analyse des métaux traces et du fer dans les sédiments.....                                     | 42 |
| III.6.1. La spectrométrie absorption atomique.....   | 42 |
| III.6.2. Assurance Qualité .....   | 44 |
| III.6.3. Calcul des concentrations des métaux dans les sédiments .....                                 | 45 |
| III.6.4. Calcul du poids sec corrigé de sédiment .....   | 45 |
| III.6.5. Calcul des concentrations corrigées des métaux dans le sédiment.....                          | 46 |
| III.7. Analyse granulométrique.....  | 46 |
| III.7.1. Domaine d'application .....   | 46 |
| III.7.2. Principe et théorie.....  | 46 |
| III.7.3. Présentation des résultats .....  | 47 |
| III.7.4. La fraction pélitique .....   | 47 |
| III.8. Évaluation de la contamination et des risques écologiques des métaux.....                       | 47 |
| Traces dans les sédiments .....  | 47 |
| ☐ Fond géochimique .....   | 47 |
| III.8.1. Facteur de contamination (FC).....  | 48 |
| III.8.2 Facteur d'enrichissement.....  | 49 |
| III.8.3 Indice de la charge polluante (PLI) .....  | 49 |
| Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION.....   | 52 |
| IV.1. La Granulométrie .....   | 52 |
| IV.2. La matière organique (MO) .....  | 54 |
| IV.4. Les Carbonates de calcium (CaCO <sub>3</sub> ) dans les sédiments.....                           | 56 |
| IV.5. Les éléments traces métalliques (ETM).....   | 59 |
| IV.5.1. Analyse du Cadmium (Cd) .....  | 59 |
| IV.5.2. Analyse du Plomb (Pb) .....  | 60 |
| IV.5.3. Analyse du cuivre (Cu).....  | 62 |
| IV.5.4. Analyse du ZINC.....   | 62 |
| IV.5.5. Analyse du Nickel (Ni).....  | 63 |
| IV.5.6. Analyse du Fer .....   | 64 |
| IV.6. Evaluation environnementale.....   | 66 |

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| IV.6.1 Facteur d'enrichissement (FE).....         | 66                                  |
| IV.6.2. Indice de la charge polluante (PLI) ..... | 69                                  |
| Conclusion.....                                   | 72                                  |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....                 | 75                                  |
| Les Annexe.....                                   | 83                                  |
| Annexe 1 : .....                                  | 83                                  |
| Annexe 2 : .....                                  | 84                                  |
| Annexe 3 : .....                                  | 85                                  |
| Annexe 4 : .....                                  | 86                                  |
| Annexe 5 : .....                                  | 87                                  |
| ☐ Le Business Modèle Canva.....                   | 89                                  |
| Introduction.....                                 | 89                                  |
| Problématique.....                                | 89                                  |
| Approche de la solution avec le produit.....      | 89                                  |
| ESTIMATION ANUELLE : .....                        | 90                                  |
| Le revenu annuel : .....                          | 91                                  |
| Le marché .....                                   | 91                                  |
| Résumé.....                                       | 91                                  |
| Les besoins de la réalisation du projet .....     | 92                                  |
| Activités clés .....                              | 92                                  |
| Les valeurs ajoutées : .....                      | 92                                  |
| Partenariats clés.....                            | 93                                  |
| Le segment client : .....                         | 93                                  |
| Relations clients : .....                         | 93                                  |
| Résumé : .....                                    | 95                                  |
| Abstracts .....                                   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| الملخص .....                                      | 95                                  |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 1</b> : Représentation schématique des voies d'échange entre les compartiments atmosphère/eau/sédiments et des processus biogéochimiques contrôlant la mobilité des ETM (d'après Achard, 2013 ; Burdige, 2002 ; Mason, 2013 ; Rigaud, 2011)..... | 17 |
| <b>Figure 2</b> : Illustration des différents constituants d'un sédiment marin adapté de (Rusch, 2010).....  | 22 |
| <b>Figure 3</b> : Degré de décontamination en fonction de la granulométrie du matériau.....  | 25 |
| <b>Figure 4</b> Comportement des polluants rejetés dans les cours d'eau (Marchandise et Robbe 1978 in Achour, 2013).....   | 26 |
| <b>Figure 5</b> : Carte de la zone d'étude (ArcMap10.8).....   | 28 |
| <b>Figure 6</b> . Situation du bassin versant de l'oued du Beni Messous (ArcMap10.8).....  | 30 |
| <b>Figure 7</b> : Profil de variation des températures moyennes de l'air (ONM 1995-2004)..   | 31 |
| <b>Figure 8</b> : Profil de l'ensoleillement moyen des mois de Mars à Juin dans .....  | 32 |
| <b>Figure 9</b> . Fréquence annuelle des vents de la région de Béni-Messous (ONM, moyenne sur l'intervalle [1960-2004]) .....  | 33 |
| <b>Figure 10</b> . Localisation des stations de prélèvements de sédiment (ArcMap10.8).....   | 35 |
| <b>Figure 11</b> . SAA Perkin Elmer Analyst 700 (plateau technique, ENSSMAL) .....   | 42 |
| <b>Figure 12</b> . Instruments de base pour la spectrométrie d'absorption atomique.....  | 44 |
| <b>Figure 13</b> . Distribution spatiale du taux de limon (%) au niveau de l'embouchure de l'Oued Beni Messous.....  | 54 |
| <b>Figure 14</b> . Distribution spatiale du taux de MO% au niveau de l'embouchure beni messous. ....   | 55 |
| <b>Figure 16</b> . Distribution spatiale de CaCO <sub>3</sub> % au niveau de l'embouchure de Beni Messous. ....  | 57 |
| <b>Figure 17</b> . Distribution spatiale de cadmium Cd (mg/g) au niveau de l'embouchure Beni Messous .....   | 60 |
| <b>Figure 18</b> . Distribution spatiale de plomb Pb (mg/g) au niveau de l'embouchure de beni Messous. ....  | 61 |
| <b>Figure 19</b> . Distribution spatiale de cuivre Cu (mg/g) au niveau de l'embouchure de l'oued Beni Messous.....   | 62 |
| <b>Figure 20</b> . Distribution spatiale de zinc (mg/g) au niveau de l'embouchure ben Messous .....  | 63 |
| <b>Figure 21</b> . Distribution spatiale du nickel (mg/g) au niveau de l'embouchure de l'oued beni Messous. ....   | 64 |
| <b>Figure 22</b> . Distribution spatiale du Fer (mg/g) au niveau de l'embouchure de l'oued Beni Messous.....   | 65 |
| <b>Figure 23</b> : Facteur d'enrichissement des métaux traces .....  | 67 |
| <b>Figure 24</b> : facteur d'enrichissement par rapport au fond de WEDEPOHL (1995).....  | 68 |
| <b>Figure 25</b> . Pli des métaux traces .....   | 70 |
| <b>Figure 26</b> . Pli des métaux traces dans la zone d'étude .....  | 70 |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau 1:</b> Sources principales des contaminants métalliques étudiés ( <b>d'après Adriano (2001); Boucheseiche et al, (2002) et Meybeck et al, (2007)</b> ).....  | 9  |
| <b>Tableau 2:</b> les principaux métaux lourds étudiés.....   | 9  |
| <b>Tableau 3:</b> Teneur moyenne des ETMM dans la croûte continentale supérieure (CCS) + en ppm sauf l'Al et le Fe en %, dans des fleuves et dans l'océan en µg. L-1 ( <b>Bruland and Lohan, 2003 ; Gaillardet et al., 2003 ; Morley et al., 1997 ; Wedepohl, 1995</b> ). ..... | 19 |
| <b>Tableau 4:</b> Les phases porteuses de certains éléments traces métalliques dans les fractions sédimentaires ( <b>Eggleton and Thomas, 2004 ; Shaw et al., 1990 ; Wedepohl, 1995</b> ). .....  | 20 |
| <b>Tableau 5:</b> Classes et dénominations granulométriques ( <b>d'après Chamley et Deconinck, 2011</b> ) .....   | 25 |
| <b>Tableau 6:</b> Les caractéristiques des eaux usées de l'oued Béni-Messous ( <b>DHEEWA, 2004</b> ).....   | 29 |
| <b>Tableau 7:</b> Nombre d'habitants par commune ( <b>OMEIRI, 2016</b> ).....   | 31 |
| <b>Tableau 8:</b> niveau d'enrichissement métallique en fonction des valeurs de l'indice (Igeo). .....  | 49 |
| <b>Tableau 9:</b> La fraction de classification granulométriques.....   | 53 |
| <b>Tableau 10:</b> Valeurs du facteur d'enrichissement (FE), fond local Algérien .....  | 67 |
| <b>Tableau 11:</b> Facteur enfranchisement par rapport au fond établie par ( <b>WEDEPOHL, 1995</b> ).....   | 68 |
| <b>Tableau 12:</b> Résultats de PLI des métaux traces .....   | 69 |

## Liste des abréviations

**ENSSMAL** : Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et Aménagement du Littoral.

**ETM** : Eléments Trace Métalliques.

**AIEA** : International Atomic Energy Agency (Agence Internationale de l'Energie Atomique).

**GPS** : Global Positioning System.

**IC** : Indice de Contamination.

**MO** : Matière Organique.

**SAA** : Spectrométrie d'Absorption Atomique.

### Symboles

**Pb** : Plomb.

**Ni** : Nickel.

**Fe** : Fer.

**Cu** : Cuivre.

**Cd** : Cadmium.

**Zn** : Zinc.

**μmol** : micromole.

**Cm<sup>3</sup>** : centimètre cube.

**GESAMP** : Groupe des Experts Scientifiques et Aspect de Protection de l'environnement  
Marin.

**HCL** : l'acide chlorhydrique.

**l** : litre.

**m** : mètre.

**ml** : millilitre.

**mm** : millimètre.

**mS** : milli-Siemens

**SiO<sub>2</sub>** : La silice dissoute.

**T** : Température.

# **INTRODUCTION**

## Introduction

Un écosystème marin est un système complexe qui comprend tous les organismes vivants et leur environnement physique dans l'eau de mer, qu'il s'agisse d'océans, de mers, de zones côtières ou d'estuaires. Cet écosystème est composé de deux matrices principales qui sont l'eau et les sédiments, ces deux matrices sont essentielles pour la stabilité et le fonctionnement des écosystèmes marins.

Les sédiments marins sont des matériaux qui se déposent au fond des océans, des mers, et des autres étendues d'eau. Ces sédiments peuvent être composés de particules minérales, de matières organiques, de débris biologiques, et de polluants provenant des activités humaines. Les sédiments marins jouent un rôle crucial dans les écosystèmes marins car ils fournissent des habitats pour de nombreuses espèces et servent de réservoirs de nutriments.

Les sédiments sont étudiés grâce à leur rôle d'indicateur de contamination du milieu, à cause de leur pouvoir de fixation des polluants. Selon **Calmano et al., (1994)**, plus de 90% des polluants rejetés dans les écosystèmes sont piégés dans la matrice sédimentaire. Les sédiments sont reconnus comme porteurs et, sous certaines conditions, peuvent devenir des sources de contaminants dans les systèmes aquatiques (**Tremblay et al., 1992 ; Rousseau et Suaudeau, 2008**). Les sédiments reflètent la qualité de l'eau et peuvent enregistrer les effets de l'activité humaine à l'échelle locale ou globale (**Loizeau, 1994**).

La pollution marine est un sérieux problème qui menace l'écosystème marin est de deux sortes : des macro-éléments (« ordures »), que les animaux peuvent ingérer au risque de s'étouffer, et des microéléments dissous (métaux traces, pesticides, médicaments, produits industriels...), qui se retrouvent dans le milieu d'alimentation et peuvent être bio accumulés par les animaux situés au sommet de la chaîne alimentaire (**bourgheda et al 2020**).

La Méditerranée voit aussi passer 18% du trafic pétrolier mondial et a déjà connu plusieurs marées noires. Environ 400 000 tonnes d'hydrocarbures sont déversées en Méditerranée chaque année. (**Medpan2016**)

Les importantes activités humaines des 21 pays qui bordent la méditerranée (urbanisation, tourisme, agriculture, industrie, transport maritime aquaculture) y induisent des apports significatifs de polluants par les fleuves et rivières, mais aussi par les effluents directs, les eaux souterraines, les dépôts atmosphériques et les activités maritimes ou encore le lessivage des zones littorales par les pluies. Les éléments traces métalliques (ETM) ont une place particulièrement importante dans le grand nombre de polluants organiques et inorganiques déjà observé en Méditerranée, car ils comptent parmi les plus souvent détectés, à cause de leur utilisation sur l'ensemble du pourtour méditerranéen et de l'historique de leur extraction et traitement qui remontent aux premières civilisations.

Cette pollution est préoccupante par ses possibles conséquences sanitaires, environnementales et socioéconomiques.

En 1976, les 21 pays qui bordent cette mer ont ratifié la Convention pour la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée (aussi appelée « **Convention de Barcelone** ») visant à prévenir et réduire la pollution marine en mer Méditerranée et assurer le développement durable des socio-écosystèmes qui en dépendent. Elle constitue le cadre juridique du Plan d'action pour la Méditerranée (**approuvé en 1975**), élaboré dans le cadre du Programme pour les mers régionales du Programme des Nations unies pour l'environnement

L'objectif de ce mémoire est de réaliser pour la première fois un état des lieux de la contamination par les éléments traces métalliques dans les sédiments de l'embouchure de l'Oued de Beni Messous situé dans la Baie d'El Djamila. L'environnement côtier de cette zone situé dans un cadre fortement urbanisé est devenu un enjeu majeur pour les autorités publique, Cette problématique est l'objet pour le quel qu'on s'est fixé dans le cadre de ce travail qui est L'évaluation de l'impact de la pollution par les métaux traces (Cd, Pb, Zn, Cu et Ni) sur l'environnement marin.

Ce travail est structuré en 4 chapitres :

- Une étude bibliographique est réalisée dans un premier chapitre, elle présente des Rappels sur les métaux traces et les sédiments marins,
- Le deuxième chapitre permet la présentation de notre zone d'étude,
- Le troisième chapitre est consacré aux réalisations expérimentales ainsi aux méthodes d'analyses en développant les principaux protocoles et les outils utilisés au cours de ce travail,
- Le quatrième chapitre est dédié aux résultats et discussions de la distribution spatiale des différents éléments et paramètres analysés (Métaux traces, matière organique, carbonates de calcium, eau totale, et la distribution granulométrique), le calcul des différents indices géochimiques qui permettront d'évaluer les risques environnementaux liés à la présence des métaux traces dans l'environnement.

Enfin, ce mémoire sera clôturée par une conclusion générale et des perspectives qu'ouvre ce travail dans les domaines méthodologiques et appliqués.

# **GÉNÉRALITÉS**

# Chapitre I : Généralités

## I.1. Les éléments traces métalliques « ETM »

### I.1.1. Définition et classification des ETM

Un métal est un élément chimique, souvent extrait d'un minerai, caractérisé par un éclat distinctif, une bonne conductivité thermique et électrique, ainsi que des propriétés de dureté et de malléabilité. Les métaux se combinent facilement avec d'autres éléments pour former des alliages utilisés depuis l'Antiquité. Le terme « métaux lourds » est fréquemment utilisé pour désigner les métaux et métalloïdes associés à la contamination et à un potentiel toxique et écotoxique. Cependant, ce terme est couramment employé sans base scientifique ni reconnaissance juridique (**Miquel, 2001**), et n'a jamais été défini par un organisme tel que l'I.U.P.A.C. (**Duffus, 2002**).

Généralement, les métaux lourds sont définis comme des éléments ayant une densité supérieure à 5 g/cm<sup>3</sup> et précipitant avec les sulfures (**Alloway et al., 1995**). Cependant, certains métaux toxiques, comme le zinc, ne sont pas particulièrement lourds, et certains éléments toxiques, tels que l'arsenic, ne sont pas des métaux. C'est pourquoi de nombreux scientifiques préfèrent utiliser les termes « éléments traces métalliques » (ETM) ou « éléments traces » (**Miquel, 2001**).

En pédologie, les éléments traces sont des constituants de la croûte terrestre au nombre de 68, dont la concentration est inférieure à 0,1 % chacun, représentant seulement 0,6 % du total des éléments chimiques (**Alloway, 1995 ; Baize, 1997**). Depuis la formation de la Terre, ils suivent un cycle géochimique, conduisant à une distribution hétérogène de leur concentration à la surface du globe (**Garret, 2000**). Comme tous les composants chimiques de la croûte terrestre, les éléments traces participent aux grands cycles biogéochimiques (**Nriagu et Pacyna, 1988 ; Pacyna, 1986**).

Les métaux lourds sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais généralement en très faibles quantités, d'où leur qualification de « traces » (**Nriagu, 1979, 1991 ; Blackmore, 1998 ; De Wolf et al., 2001, in El Namr et al., 2006**). En dehors de ce contexte naturel, leur présence à des concentrations élevées est généralement due à des rejets d'origine anthropique (**Fox et al., 1993**).

Dans le tableau périodique des éléments de Mendeleïev, tous les éléments des blocs s (sauf l'hydrogène et l'hélium), d et f, ainsi que sept éléments du bloc p, sont des métaux. De nombreux métaux possèdent deux propriétés chimiques caractéristiques : la formation d'oxydes et d'hydroxydes basiques aux degrés d'oxydation I et II, et la formation de cations simples hydratés en solution aqueuse acide (**Shriver et Atkins, 2001**). Ces propriétés sont essentielles pour comprendre les formes sous lesquelles les ETM se présentent dans les sédiments et les sols, telles que les oxydes et les sulfures métalliques.

Selon leur nécessité pour les organismes vivants, les ETM peuvent être classés en deux groupes : les éléments essentiels ou oligo-éléments (comme le Zn, le Mn, le Cu et le Ni), indispensables à faibles concentrations mais toxiques à fortes concentrations, et les éléments non nécessaires (comme le Cd, le Pb et le Hg), pour lesquels aucune fonction physiologique n'a été identifiée et qui sont toxiques à de très faibles concentrations (**Bliefert et Perraud, 2001 ; Sigg et al., 2001**).

### **I.1.2. Origine et propriétés des éléments traces métalliques**

Les métaux traces se caractérisent par leur faible abondance dans la croûte terrestre. Le terme « éléments traces » ou « éléments traces métalliques et métalloïdes » est préféré à celui de « métaux lourds », une expression ancienne et obsolète basée sur la densité volumique des éléments. Ces éléments sont persistants et non dégradables dans l'environnement. Certains métaux traces sont des oligo-éléments essentiels à l'activité biologique et à la croissance cellulaire, mais deviennent dangereux lorsqu'ils dépassent une certaine concentration (**Rigaud, 2011**). D'autres, comme le cadmium, le plomb et le mercure, sont nocifs même à faible dose et n'ont aucun effet bénéfique (**Lesven et al., 2008**). Le cuivre et le zinc, bien que nécessaires à de faibles concentrations, présentent une menace sérieuse à haute concentration en raison de leur toxicité, de leur persistance et de leur capacité à s'accumuler dans la chaîne trophique (**Rigaud, 2011**).

Ces éléments sont naturellement présents à l'état de traces dans la croûte terrestre (< 100 ppm) et existent sous diverses formes chimiques, notamment les oxydes, les carbonates, les silicates et les sulfates. Ils peuvent parfois atteindre des concentrations extrêmement élevées. Les ETMM peuvent être libérés dans les environnements aquatiques et atmosphériques par des mécanismes naturels tels que l'érosion et l'altération des roches, les émissions volcaniques, les incendies de forêt et les sources biogènes (**Charriau, 2009 ; Sigg et al., 2001**). Les activités humaines, telles que l'exploitation minière, la métallurgie, l'utilisation d'insecticides et d'engrais, les centrales électriques, la fabrication de batteries, et certains processus industriels comme les tanneries, les papeteries et les cimenteries, ainsi que les rejets d'eaux usées non traitées, contribuent également à l'émission d'ETMM (**Mason, 2013 ; Miller and Orbock Miller, 2007 ; Qian et al., 2018**).

Les ETMM peuvent provenir de sources diffuses ou ponctuelles et exister sous forme particulière, volatile, dissoute ou solide (**Bradl, 2005**). Les principales sources d'ETM dans l'eau douce (rivières et lacs) sont les dépôts atmosphériques, les activités anthropiques ponctuelles (comme les rejets d'effluents industriels non traités ou d'eaux usées) et le lessivage des sols. Dans les zones marines, en particulier les zones côtières, les sources anthropiques incluent les activités portuaires, le trafic maritime et l'aquaculture (sources focales) ainsi que les apports des rivières, le ruissellement et les dépôts atmosphériques (sources diffuses) (**Mason, 2013 ; Oursel et al., 2013**).

Les métaux traces, présents naturellement dans la croûte terrestre à de faibles concentrations, sont des éléments chimiques essentiels pour de nombreux organismes vivants. Cependant, leur présence excessive dans l'environnement peut avoir des conséquences néfastes sur la santé humaine et les écosystèmes.

### **a. Comportement des métaux traces dans l'environnement**

- **Persistance et non-dégradabilité** : Les métaux traces ne se décomposent pas naturellement dans l'environnement. Ils peuvent persister pendant de longues périodes et se déplacer sur de grandes distances.
- **Bioaccumulation** : Certains métaux traces peuvent s'accumuler dans les organismes vivants, augmentant leur concentration à chaque niveau de la chaîne alimentaire.
- **Changement de forme chimique** : Les métaux traces peuvent changer de forme chimique dans l'environnement, ce qui peut affecter leur mobilité, leur toxicité et leur biodisponibilité.

### **b. Impacts des métaux traces sur l'environnement et la santé humaine**

- **Toxicité** : Les métaux traces peuvent être toxiques pour les plantes et les animaux, perturbant les écosystèmes et entraînant des problèmes de reproduction, de croissance et de développement.
- **Contamination de l'eau potable et de la nourriture** : Les métaux traces peuvent contaminer l'eau potable et la nourriture, provoquant des problèmes de santé chez les humains, tels que des maladies neurologiques, des cancers et des problèmes rénaux.
- **Perturbation des équilibres écologiques** : Les métaux traces peuvent perturber les équilibres écologiques en affectant les populations de micro-organismes, d'invertébrés et d'autres animaux.

### **c. Mesures pour réduire la pollution par les métaux traces**

- **Prévention à la source** : Réduire les émissions de métaux traces des activités industrielles et agricoles.
- **Traitement des eaux usées** : Mettre en place des systèmes de traitement des eaux usées efficaces pour éliminer les métaux traces avant qu'ils ne soient rejetés dans l'environnement.
- **Sensibilisation et éducation** : Sensibiliser le public aux dangers des métaux traces et promouvoir des pratiques durables pour réduire leur utilisation et leur rejet dans l'environnement.

Les métaux traces constituent un enjeu majeur pour la protection de l'environnement et de la santé humaine. Il est essentiel de mettre en œuvre des mesures efficaces pour réduire leur émission et leur contamination dans l'environnement.

#### **d. L'impact des activités humaines sur la contamination des milieux aquatiques par les éléments traces métalliques (ETM)**

L'exploitation minière et la métallurgie, l'agriculture, la production d'énergie et de nombreuses industries manufacturières contribuent de manière significative à la pollution des eaux par les ETM. Ces activités rejettent des ETM dans l'environnement sous diverses formes : particules, gaz volatiles, composés dissous et solides.

#### **c. Sources majeures d'ETM dans les eaux douces (rivières et lacs)**

- **Dépôts atmosphériques** : Les polluants atmosphériques, tels que les poussières et les gaz émis par les industries et les véhicules, se déposent à la surface des plans d'eau et contaminent le sédiment et l'eau.
- **Rejets ponctuels** : Le rejet direct d'effluents industriels non traités ou d'eaux usées domestiques constitue une source importante de contamination localisée.
- **Lessivage des sols** : Les pratiques agricoles intensives, l'utilisation excessive d'engrais et de pesticides, ainsi que l'érosion des sols peuvent entraîner le lessivage des ETM vers les rivières et les lacs.

#### **d. Sources d'ETM dans les eaux marines (en particulier les zones côtières)**

- **Sources focales** : Les activités portuaires, le trafic maritime et l'aquaculture génèrent des rejets directs d'ETM dans les eaux marines.
- **Sources diffuses** : Les rivières, le ruissellement des terres agricoles et les dépôts atmosphériques contribuent à la contamination marine de manière plus diffuse.

#### **e. Conséquences de la contamination par les ETM sur les milieux aquatiques**

- **Toxicité pour les organismes aquatiques** : Les ETM peuvent s'accumuler dans les tissus des poissons, des crustacés et d'autres organismes aquatiques, provoquant des problèmes de reproduction, de croissance et de survie.
- **Perturbation des chaînes alimentaires** : La bioaccumulation des ETM dans les chaînes alimentaires aquatiques peut avoir des effets néfastes sur les prédateurs ultimes, tels que les oiseaux et les mammifères marins.

Les ETM sont présents à l'état naturel dans les roches et minerais de la croûte terrestre, généralement sous la forme d'oxydes, de carbonates, de silicates ou de sulfures. Une partie des métaux présents dans les sédiments provient donc de l'altération de ces roches et de l'érosion du bassin versant. Ils constituent le « fond géochimique », c'est à dire la teneur naturelle en ETM dans le sédiment (Baize, 2002 ; Adler et al, 2001 et Feix et Tremel -Schaub, 2005). D'autres phénomènes, tels que le volcanisme, les feux de biomasse et les sources

thermales, contribuent au rejet de métaux dans l'environnement (**Novotny, 1995 et Rocher, 2003**). A ces apports naturels se sont ajoutés les métaux émis à la suite des activités anthropiques : exploitation des gisements et utilisation des métaux dans de nombreux secteurs d'activité (**Tableau 1**)

**Tableau 1:** Sources principales des contaminants métalliques étudiés (**d'après Adriano (2001); Boucheseiche et al, (2002) et Meybeck et al, (2007)**).

| ELEMENT METALLIQUE | ORIGINES ANTHROPIQUES  |
|--------------------|--|
| Cadmium (Cd)       | Métallurgie, traitement de surface, céramique, colorants, usure des pneumatiques, incinération des déchets, engrais phosphatés |
| Cuivre (Cu)        | Métallurgie, électricité, photographie, traitement de surface, industrie textile, fongicide                                    |
| Plomb (Pb)         | Batteries, imprimerie, métallurgie, canalisations, raffinage   |
| Zinc (Zn)          | Galvanisation, imprimerie, teintures, insecticides, usure des pneumatiques, bâtiments et toitures                              |
| Nickel (Ni)        | Fabrication d'acier et d'alliages, dépôts chimiques et électrolytiques   |

### I.1.3. Présentation des principaux métaux lourds étudiés

**Tableau 2:** les principaux métaux lourds étudiés

| Eléments       | Symbole | Numéro atomique Z (NA) | Masse molaire (g/mol) |
|----------------|---------|------------------------|-----------------------|
| <b>Cadmium</b> | Cd      | 48                     | 112.4                 |
| <b>Plomb</b>   | Pb      | 82                     | 207.2                 |
| <b>Cuivre</b>  | Cu      | 29                     | 63.54                 |
| <b>Fer</b>     | Fe      | 26                     | 55.847                |
| <b>Zinc</b>    | Zn      | 30                     | 65.38                 |
| <b>Nickel</b>  | Ni      | 28                     | 58.69                 |

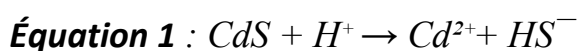
#### I.1.3.1. Le cadmium (Cd)

##### a. Généralités et sources

Le cadmium est un élément chimique de symbole Cd et de numéro atomique 48 (**Mahan, 1987**). Le cadmium fut découvert en 1808 par Magnus Martin of Pontin, mais c'est en 1817

que l'allemand Friedrich Stromeyer le prépara pour la première fois (**Mahan, 1987**). Le nom de Cadmium vient du latin *cadmia*, « calamine », ancien nom donné au carbonate de zinc – le cadmium était extrait de ce minerai aux environs de la ville de Thèbes, qui fut fondée par Cadmos, et dont la citadelle porte le nom de *kadmeia*, en français Cadmée (**Anonyme, 2007**). Le cadmium est un métal blanc, mou et malléable. Il ternit au contact de l'air (**Callender, 2003**).

Le cadmium n'existe pas à l'état natif. Son minerai, la greenockite (**CdS, Eq.1**), est très rare et inexploité (**Hurlbut Jr. et Klein, 1982 ; Wedepohl, 1995**). Le cadmium est présent dans presque tous les minerais de zinc (la teneur en cadmium varie de 0.01 à 0.05%). Le cadmium est également présent dans des minerais de plomb et de cuivre, ainsi que dans des phosphates naturels (**Hurlbut Jr. et Klein, 1982**). Dans les eaux naturelles l'ion  $Cd^{2+}$  prédomine au-dessous de pH 8 (Eq.1),  $CdCO_3$  est prédominant entre les pH de 8 à 10 unités (Hem, 1972). Dans sa spéciation, il est généralement considéré comme dissous, seules les rivières très riches en matières en suspension ou des eaux proches du fond des rivières, peuvent présenter du Cd adsorbé à la fraction solide (**Li et al., 1984**). L'adsorption du Cd dans la fraction solide est considérée comme étant un enjeu majeur pour expliquer la concentration de cet élément dans les eaux naturelles (**Lum, 1987**).



### **b. l'utilisation du Cd par l'homme et sa toxicité**

Le cadmium a de multiples utilisations : notamment dans les écrans de télévision, les barres de contrôles des réacteurs nucléaires, les colorants (**émail, glaçure**). Il entre dans la composition de nombreux alliages à bas point de fusion (**soudures, brasures**) et sert à la fabrication de certaines batteries d'accumulateurs (**Anonyme, 2007**). Mais ses principales utilisations sont celles de ces composés qui concernent les revêtements anticorrosion (appliqué sur l'acier par cadmiage, le cadmium protège contre la corrosion, en particulier saline) ou encore la fabrication de pigments de couleurs (jaune et rouge).

Sa toxicité est connue depuis les années 50. Très toxique sous toutes ses formes (métal, vapeur, sels, composés organiques), le cadmium est l'un des rares éléments n'ayant aucune fonction connue dans le corps humain ou chez l'animal. Il faut éviter son contact avec des aliments. Chez l'Homme, il provoque notamment des problèmes rénaux et l'augmentation de la tension (**Plumlee et Ziegler, 2003**). Les effets toxiques du Cd ne le sont pas seulement pour l'homme, mais aussi pour les végétaux et les animaux (**Benito et al., 1999**).

### **1.3.1.2 Le plomb (Pb)**

#### **a. Généralités et sources**

Le plomb est un élément chimique de la famille des cristallogènes, de symbole Pb et de numéro atomique 82. Le plomb est un produit naturel de la désintégration de l'uranium

**(Mahan, 1987)**. Le Pb natif est rare, et dû à son caractère chalcophile il est associé au gisement de sulfures ; on l'extrait de sa source minérale principale, la galène (PbS) qui en contient 86.6% en poids, mais aussi des minerais associés aux Zn (la sphalérite), à l'argent et le plus abondamment au cuivre **(Hurlbut Jr. et Klein, 1982)**. D'autres variétés communes sont la cérusite (PbCO<sub>3</sub>) et l'anglésite (PbSO<sub>4</sub>).

La stabilité de ces minéraux est régie par les conditions environnementales

Le plomb est un métal dense, de couleur gris bleuâtre (82ème élément appartenant au groupe IVa du tableau périodique), de configuration électronique : [Xe] 4f<sup>14</sup> 5d<sup>10</sup> 6s<sup>2</sup> 6p<sup>4</sup> et de masse molaire : 207,2 g.mol<sup>-1</sup> **(Callender et al., 2003)**. Le plomb est un élément chimique de la famille des cristallogènes, ce qui signifie qu'il a la caractéristique d'avoir une forme cristalline. Il possède deux états d'oxydation +II et +IV. Dans l'environnement l'état bivalent est le plus stable. Le plomb n'existe pas à l'état natif dans l'environnement.

Cependant il est généralement présent sous forme de galène PbS, en raison de son caractère chalcophile, d'anglésite (PbSO<sub>4</sub>), de cérusite (PbCO<sub>3</sub>), ou encore lié à des (oxy)hydroxydes et à des phosphates **(Callender et al., 2003 ; Laperche et al., 2004 ; Salvarredy Aranguren, 2008)**.

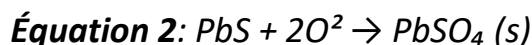
En milieu marin, le plomb se trouve principalement sous forme de carbonates PbCO<sub>3</sub> (40 à 80 %), de chlorures PbCl<sub>2</sub> (1 à 40 %) et de PbCl<sup>+</sup> (2 à 19 %) **(Navarro et al., 2008 ; Ramarosan, 2008)**.

En milieu acide, le plomb aura tendance à s'associer avec les sulfates alors que pour des pH plus élevés, il se trouvera associé avec des hydroxydes et pourra même former des ions complexes pouvant contenir jusqu'à 6 atomes de plomb **(Callender et al., 2003 ; Deschamps et al., 2006 ; Rendek, 2006)**. L'affinité du plomb, pour les différentes phases porteuses, est décroissante des (oxy)hydroxydes de fer et de manganèse, aux argiles et à la MO **(Baize, 1997 ; Callender et al., 2003)**.

L'origine anthropique du plomb dans les sédiments proviendrait des canalisations d'eau, mais aussi des bacs de batteries, des peintures, des additifs pour l'essence, des eaux de ruissellements des voies de circulations, des industries pharmaceutiques et sidérurgiques, et des téléviseurs.

Pb a deux états d'oxydation 2+ et 4+. L'état tétravalent est un très fort oxydant, mais il n'est pas fréquent dans l'environnement, en revanche l'état divalent est le plus stable dans l'environnement **(Callender, 2003)**. Pb<sup>2+</sup> en solution dans les eaux naturelles va être complexé par les carbonates, parce que ces eaux se trouvent en général dans un domaine de pH entre 6 à 8 unités **(Hem, 1976)**. Toutefois dans les eaux acides, Pb sera associé aux sulfates (PbSO<sub>4</sub>, Eq.2), alors que pour des pH élevés (plus de 8 unités) Pb se trouvera sous forme complexe avec des hydroxydes.

Toutefois, la spéciation peut varier de manière importante en fonction des concentrations en chlore et phosphore (**Nriagu, 1974**).



Les apports naturels de plomb dans l'environnement ne représentent qu'environ 4% des émissions totales et se font essentiellement sous forme inorganique (**Nriagu, 1978 ; 1979**). Les émissions de cet élément sont donc notamment liées à des activités anthropiques, l'industrie minière, la métallurgie et la sidérurgie représentant environ 80% des émissions de Pb dans l'environnement (**Nriagu, 1979 ; Fergusson, 1990 ; Nriagu, 1991 ; Bouchereau, 1992 ; Nriagu, 1996**).

#### **b. L'utilisation du Pb par l'homme dans les cycles biologiques et sa toxicité**

L'homme utilise le plomb depuis plus de 7000 ans en raison de sa grande diffusion, sa facilité d'extraction, sa grande malléabilité et son bas point de fusion. Il était utilisé lors de l'âge du bronze avec l'antimoine et l'arsenic. Très facile à fondre et mettre en forme, il a notamment été utilisé pour la plomberie dans l'Antiquité. Lors du Moyen Âge, les alchimistes croyaient que le plomb était le métal le plus ancien et l'associaient à la planète Saturne.

A la différence de Zn, Pb n'est pas un oligo-élément et il possède un caractère toxique bien connu (**Nriagu, 1978**). Les formes organiques et inorganiques du Pb ont des effets toxiques chez l'homme. Cependant, la toxicité des espèces organiques est beaucoup plus grande que celle des espèces inorganiques, son passage privilégié chez l'homme l'est par la chaîne alimentaire (**Grandjean, 1984**). L'Organisation Mondiale de la Santé signale aussi le risque grave produit par la forme de Pb inorganique introduite dans l'homme par la voie de la consommation de l'eau (**O.-P.-S., 1987**).

### **I.1.3.3 Le Cuivre (Cu)**

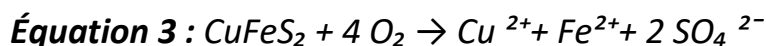
#### **a. Généralités et sources**

Le cuivre est un élément chimique de symbole Cu et de numéro atomique 29. Métal de couleur rougeâtre, il possède une haute conductivité thermique et électrique à température ambiante, le seul métal pur ayant une meilleure conductivité électrique est l'argent (**Hurlbut Jr. et Klein, 1982 ; Mahan, 1987**). Sa couleur rougeâtre le diffère au même titre que l'or par la couleur généralement grise des métaux. Le cuivre est un des rares métaux qui existe à l'état natif. L'occurrence du cuivre natif est cependant assez faible (**Hurlbut Jr. et Klein, 1982**).

Cu est moyennement abondant dans la croûte terrestre pour être un métal lourd (**Wedepohl, 1995**) ; on le trouve le plus fréquemment sous forme de sulfure ou de sulfosel (**Hurlbut Jr. et Klein, 1982**).

Les modèles chimiques pour les eaux naturelles montrent que Cu reste à l'état d'ion 2+ jusqu'à un pH de 6 unités (Eq.3). Pour la plupart des eaux neutres,  $\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{2-}$  et  $\text{CuCO}_3^0$  sont également importants (Miller, 1975), le second est plus important entre pH 7 et 8.

Ensuite, à pH au-dessus de 8 le complexe de dihydroxyde de cuivre (2+) prédomine. Le cuivre forme aussi plusieurs complexes avec des ligands organiques (Callender, 2003).



Dans le cycle sédimentaire, Cu est associé aux minéraux argileux, et spécialement associé au carbone et manganèse. En conditions acides, Cu est plus soluble que dans les milieux tamponnés. La malachite précipite dès que le pH est supérieur à 7 (Garrels et Christ, 1965). Toutefois, dans un milieu réducteur la phase minérale prédominante est le sulfure cuivreux ou chalcosine ( $\text{Cu}_2\text{S}$ )

#### **b. L'utilisation du Cu par l'homme dans les cycles biologiques et sa toxicité :**

Le cuivre pourrait bien être le premier métal à avoir été utilisé, étant donné que des pièces datant de 8700 avant J.-C. ont été trouvées. En 2004, la production mondiale de cuivre est de 16.015 millions de tonnes. Les principaux producteurs sont le Chili (37.3%), les États-Unis (8%, dont 62 % en Arizona), le Pérou (7.1%) et l'Indonésie (5.7%). En Europe, le principal producteur est la Pologne avec 585 000 t an<sup>-1</sup> (Anonyme, 2007).

Le cuivre, à très faible dose est un oligo-élément indispensable à la vie (Fergusson, 1990 ; Alloway et Ayres, 1997). Il est notamment nécessaire à la formation de l'hémoglobine et remplace même le fer pour le transport de l'oxygène chez une espèce d'arthropode, le limule, dont le sang est bleu (Fergusson, 1990 ; Alloway et Ayres, 1997). Chez l'homme et les mammifères, régulé par le foie, le cuivre intervient dans la fonction immunitaire et contre le stress oxydant, son manque cause le syndrome de Menke (Plumlee et Ziegler, 2003). Le cuivre est aussi, à dose plus élevée et sous ses formes oxydées, un puissant poison pour l'Homme, causant la maladie de Wilson (Plumlee et Ziegler, 2003). Le cuivre contamine les eaux environnantes à des doses et concentrations infimes ( $10 \mu\text{g l}^{-1}$ , Leckie et Davis, 1975) pour de nombreux organismes : algues, mousses, microorganismes marins, champignons microscopiques (Fergusson, 1990 ; Alloway et Ayres, 1997).

#### **I.1.3.4 Le fer (Fe)**

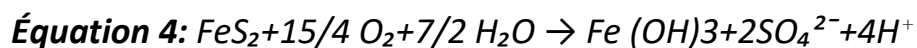
##### **a. Généralités et sources :**

Le fer est un élément chimique, de symbole Fe et de numéro atomique 26. Le noyau de l'atome de fer 56 est l'isotope le plus stable de tous les éléments chimiques, car il possède l'énergie de liaison par nucléon la plus élevée (Mahan, 1987). Le fer est ferromagnétique : les moments magnétiques des atomes s'alignent sous l'influence d'un champ magnétique extérieur et conservent leur nouvelle orientation après la disparition de ce champ (Mahan, 1987).

Laissé à l'air libre en présence d'humidité, il se corrode en formant de l'hématite Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (**Hurlbut Jr. et Klein, 1982**). L'hématite étant un matériau poreux, la réaction d'oxydation peut se propager jusqu'au cœur du métal, contrairement, par exemple, à l'aluminium, qui forme une couche fine d'oxyde imperméable. En solution, il présente deux valences principales :

- Fe<sup>2+</sup> (le fer ferreux) qui présente une pale couleur verte ;
- Fe<sup>3+</sup> (le fer ferrique) qui possède une couleur rouille caractéristique.

La source principale de Fe dans les gisements du gisement El Bahdja est la pyrite qui en contact de l'oxygène s'oxyde et au contact de l'eau libre en solution le fer ferrique ainsi que des sulfates et génère de l'acidité (Eq.4) :



Cette réaction est au cœur de la génération des drainages acides (**Rimstidt et Vaughan, 2003**). En effet, la génération des drainages acides produit des eaux des très enrichies en fer et sulfates. Ces solutions très concentrées débouchent selon les paramètres physico-chimiques sur plusieurs types de minéraux tertiaires : goéthite ; jarosite ; schwertmannite ; roznite ; copiapite (**Bigham et Nordstrom, 2000 ; Jambor et al., 2000 ; Stoffregen et al., 2000 ; Velasco et al., 2005**).

## **b. L'utilisation du Fe par l'homme et dans les cycles biologiques**

Les premières preuves de l'utilisation du fer remontent à environ 4000 av. J.-C., chez les Égyptiens et Sumériens. Quelques objets comme des pointes de lances, des dagues et des ornements étaient forgés de fer provenant de météorites (**Mahan, 1987**). L'utilisation du fer est largement appliquée sous forme d'acier dans la construction. Mais, Fe est aussi utilisé dans l'industrie technologique sous forme de fer métallique et d'oxydes depuis des décennies pour fixer des informations analogiques ou numériques sur des supports appropriés. Le fer est un des nutriments qu'on retrouve dans les aliments, car il est essentiel pour l'homme (et les autres organismes) notamment dans la composition de l'hémoglobine du sang qui permet aux globules rouges la fixation et le transport de l'oxygène dans le corps humain (**Anonyme, 2007**). Toutefois, l'Organisation Mondiale de la Santé recommande de ne pas dépasser 0.3 g/l, car c'est mauvais pour le système digestif (**O.-P.-S., 1987**).

### **I.1.3.5. Le zinc (Zn)**

#### **a. Généralités et sources**

Le zinc est un élément chimique, de symbole Zn et de numéro atomique 30. Le zinc est un métal, moyennement réactif, qui se combine avec l'oxygène et d'autres non-métaux, et qui

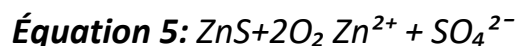
réagit avec des acides dilués en dégageant de l'hydrogène (**Mahan, 1987**). L'état d'oxydation unique du zinc est +2 (appelé ion zincique), ainsi la géochimie du zinc est relativement peu complexe et l'on note un comportement chalcophile assez marqué par une association fréquente avec le soufre (**S, Mahan, 1987**). Les sources naturelles de zinc dans l'environnement sont l'altération de roches (56%), le volcanisme (22%) et la végétation (**Lantzy et Mc Kenzie, 1979 ; Phelan et al., 1982 ; Horowitz, 1985**). Cependant, Nriagu (**1991 ; 1996**) a calculé que ces sources naturelles ne représentent qu'environ 7% des émissions totales de cet élément dans l'environnement, étant donné que la production et le traitement de minerai et les activités industrielles représenteraient 75% et 18% respectivement, des émissions du Zn dans le milieu naturel

Sa toxicité pour les organismes marins n'est pas prouvée, sauf à de fortes Concentrations, il agit sur la reproduction des moules et la croissance larvaire (**Belabad, 2010**).

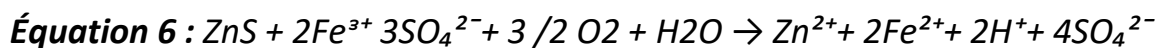
Il entre naturellement dans l'atmosphère à partir du transport par le vent de particules du sol, des éruptions volcaniques, des feux de forêts et d'émission d'aérosols marins.

Les apports anthropiques de zinc dans l'environnement résultent des sources minières industrielles (traitement minerai, raffinages, galvanisation du fer, gouttières de toitures, piles électriques, pigments, matières plastiques, caoutchouc), des épandages agricoles (alimentation animaux, lisiers) et des activités urbaines (trafic routier, incinération ordures) (**Noppe, 1996 ; Casas, 2005**).

Le minerai le plus utilisé est le sulfure de zinc appelé blende ou sphalérite (ZnS). L'altération des sulfures par oxydation produit la libération de l'ion zincique (Eq.5) Le cation libre Zn<sup>2+</sup> prévaut dans les eaux de surface pour les conditions environnementales de pH au-dessous 8.



L'oxydation de la sphalérite (Eq. 1.4) ne génère théoriquement pas d'acidité (**Jennings et al., 2000**), cependant Zn est très souvent substitué par Fe dans les sphalérites. Dans ce cas, leur oxydation, libère de l'acidité (**Dold, 1999**). D'autres cas de génération d'acidité peuvent provenir des oxydations par des drainages acides (Eq.6)



Cette réaction est au cœur de la génération des drainages acides (**Rimstidt et Vaughan, 2003**). En effet, la génération des drainages acides produit des eaux des très enrichies en fer et sulfates.

Ces solutions très concentrées débouchent selon les paramètres physico-chimiques sur plusieurs types de minéraux tertiaires : goethite ; jarosite ; schwertmannite ; rozénite ; copiapite (**Bigham et Nordstrom, 2000 ; Jambor et al., 2000 ; Stoffregen et al., 2000 ; Velasco et al., 2005**).

## **b. l'utilisation du Zn par l'homme dans les cycles biologiques et sa toxicité :**

La principale utilisation du zinc est la galvanisation des aciers : le dépôt d'une mince couche de zinc en surface de l'acier le protège de la corrosion (**Anonyme, 2007**). La galvanisation consomme 47 % du zinc exploité dans le monde. L'acier galvanisé est utilisé dans l'automobile, la construction, l'électroménager, les équipements industriels, etc. Le laiton – alliage de cuivre et de zinc – et le bronze – alliage de cuivre et d'étain, auquel on ajoute parfois du zinc – consomment 19 % du zinc. Les alliages de zinc, tel le zamac, pour pièces moulées (automobile, équipements ménagers, pièces industrielles...) représentent 14 % de sa consommation, les produits chimiques, 9 %, et les autres applications (dont les plaques et pièces pour toiture), 11 % (**Anonyme, 2007**). Il est aussi utilisé en agriculture comme apport d'oligo-élément, essentiellement en zone de sols fortement calcaires. La culture la plus sensible à la carence ou l'insuffisance en zinc est probablement le maïs. Des symptômes d'insuffisance apparaissent aussi sur la plupart des arbres fruitiers (**Anonyme, 2007**). Les apports, préventifs ou curatifs, se font sur le sol ou par pulvérisation foliaire. Pour exemple, les besoins annuels pour le maïs se situent autour de 300 à 500 grammes de zinc par hectare.

Le zinc possède également un effet toxique chez les animaux et chez l'homme, dans les poissons la dose létale est comprise entre 0,5 et 5 mg l<sup>-1</sup> en Zn (**Moore et Ramamoorthy, 1984**). A la dose de 150 et 650 mg, Zn est toxique chez l'homme, mais si cette dose descend au-dessous le 6 g, elle est létale (**Emsley, 1991**). Les troubles physiologiques humains causés par ce type d'intoxications dans un cas primaire, vont comprendre des nausées et des troubles du système gastro-intestinal, et seront suivis de complications dans le système respiratoire ainsi que par des affections cutanées (**Yong et al., 1993**). Enfin, Zn est soupçonné être cancérigène pour l'homme (**Emsley, 1991 ; Yong et al., 1993**).

### **I.1.3.6 Le nickel (Ni)**

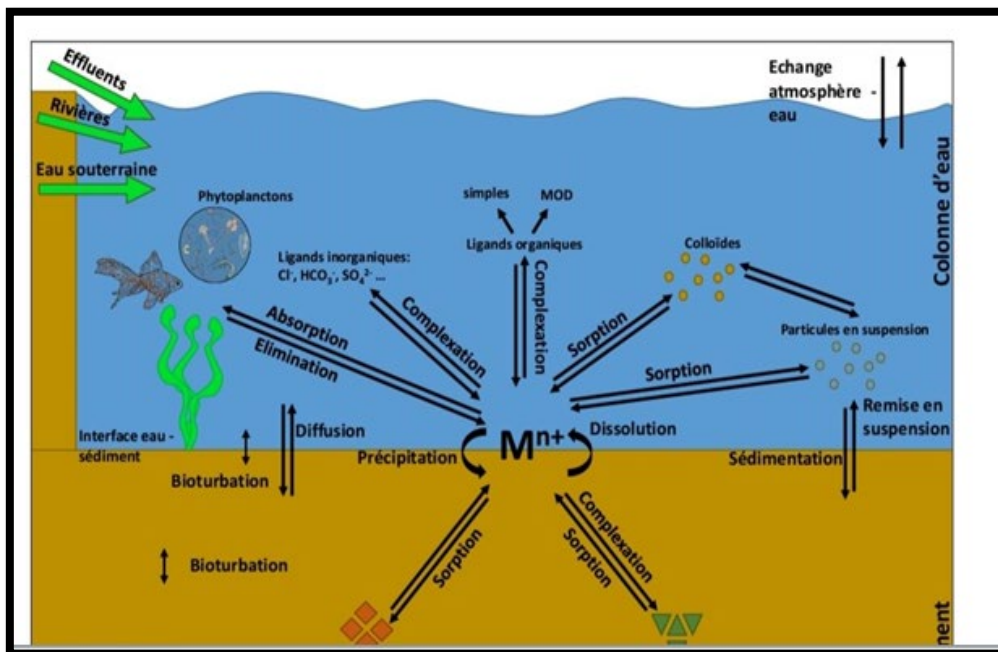
#### **a. Généralités et sources :**

Le nickel est souvent associé à Fe, Cu, Cr et Co dans les minerais de zinc. On le retrouve particulièrement dans les minerais sulfures (65% de la production mondiale) extrait des sous-sols (teneur en nickel de 0,7% à 3%) et dans les minéraux silicates se trouvant en surface. Couramment utilise pour former des alliages de métaux solides et durables, on le retrouve dans de nombreux objets courant comme les casseroles inoxydables, les pièces de monnaie ou encore les piles rechargeables.

Les apports de nickel (essentiellement sous forme particulaire) au milieu aquatique proviennent de phénomènes naturels comme le volcanisme ou les incendies de forêt mais aussi de la combustion du pétrole et de l'industrie des métaux non ferreux. Le nickel à faible concentration est un élément essentiel pour les organismes aquatiques. Néanmoins, des effets sur la reproduction de certains bivalves ont été observés à des concentrations très élevées (rarement observées dans l'environnement), supérieures à 300g/L (**Chiffolleau, 2001 et Fairbrother et al, 2007**).

### I.1.4 Devenir des éléments traces métalliques et métalloïdes dans le milieu aquatique

Dans les systèmes aquatiques, les ETMM se répartissent dans tous les compartiments (sédiment, eau, faune et flore). Les différentes voies d'acheminement des ETMM des continents vers l'océan dépendent de leur spéciation chimique et de la matrice dans laquelle ils se trouvent (**Figure 1**). Les milieux aquatiques, et particulièrement la mer Méditerranée (**Martin et al., 1989 ; Nicolau et al., 2012**), reçoivent une grande quantité d'ETMM provenant de différentes sources. Les ETMM sont transportés et rejetés dans l'océan par les rivières, le lessivage des bassins versants, l'érosion, les effluents (urbains, agricoles et industriels), les eaux souterraines (**Chester, 1990 ; Kalnejais, 2005 ; Symader et al., 2007**) et l'atmosphère (**Dumas et al., 2015 ; Seritti et al., 1990**)



**Figure 1 :** Représentation schématique des voies d'échange entre les compartiments atmosphère/eau/sédiments et des processus biogéochimiques contrôlant la mobilité des ETMM (d'après Achard, 2013 ; Burdige, 2002 ; Mason, 2013 ; Rigaud, 2011).

Selon Jain et Sharma (**2001**), plus de 97 % des éléments traces métalliques et métalloïdes (ETM) transportés vers les zones côtières sont associés aux sédiments des rivières. Une fois dans le milieu côtier, les ETM se répartissent dans divers compartiments sous différentes formes : colloïdales, particulaires et dissoutes (**Kennish, 2002 ; Mason, 2013 ; Pan et Wang,**

**2012 ; Rigaud et al., 2013 ; Shaw et al., 1990**). Les transferts entre ces compartiments définissent en partie leur cycle biogéochimique.

Dans le milieu côtier, les ETM peuvent être adsorbés sur de fines particules et ensuite se déposer dans les sédiments (**Buccolieri et al., 2006**). Cette présence transforme les sédiments en un puits ultime, mais aussi en une source secondaire de contaminants pour l'écosystème, via des processus de diffusion et des perturbations physiques naturelles ou anthropiques (**Pan et Wang, 2012 ; Rigaud et al., 2013 ; Shaw et al., 1990 ; Singh et al., 2005**). La répartition, la mobilité et les formes chimiques des ETMM sont contrôlées par des processus physiques (diffusion, remise en suspension, advection), chimiques (dissolution/précipitation, complexation, sorption) et biologiques (bioirrigation, bioturbation, respiration) (**Elbaz-Poulichet, 2005 ; Rigaud et al., 2013 ; Scholz et Neumann, 2007 ; Tankere-Muller et al., 2007**).

### **I.1.5 Les ETM dans les sédiments**

Les sédiments marins forment un ensemble varié et complexe. Un dépôt sédimentaire, composé de matériaux détritiques minéraux et organiques, peut être classé en deux types selon son origine : allochtone et autochtone. Les dépôts allochtones proviennent de l'érosion des roches et des sols dans l'ensemble du bassin versant adjacent, représentant ainsi un apport horizontal. En revanche, les dépôts autochtones résultent de la précipitation de composés minéraux comme les carbonates ou de composés organiques tels que les algues planctoniques mortes, constituant un apport vertical (**Bonnet, 2000**).

Le transport et le dépôt d'éléments traces métalliques (ETM) issus des rivières, associés à des matières particulaires, conduisent à leur accumulation dans les sédiments marins. Ce processus peut entraîner des concentrations élevées d'ETM dans les écosystèmes côtiers pollués. Dans le milieu marin, les sédiments jouent un double rôle, à la fois comme puits et comme source secondaire de contamination, influencés par les conditions physico-chimiques (**Kalnejs et al., 2010 ; Vdović et al., 2006**).

Les sédiments se composent de deux phases distinctes : une phase solide, qui correspond au sédiment proprement dit, et une phase liquide, appelée eau interstitielle. Ces deux phases échangent continuellement de la matière, atteignant ainsi un état d'équilibre. Les éléments traces métalliques (ETM) sont présents dans les sédiments sous différentes formes, associées à diverses fractions sédimentaires. Ces formes incluent la liaison avec des carbonates, des oxydes et hydroxydes de fer ou de manganèse, des silicates, la complexation avec des matières organiques telles que les acides humiques, ou sous forme d'ions libres. Dans les sédiments anoxiques, les ETM sont partiellement liés aux sulfures (**Eggleton et Thomas, 2004 ; Leleyter et al., 2012 ; Li et al., 2001 ; Peng et al., 2009**).

Les différents composants présents dans les dépôts sédimentaires sont couramment appelés phases porteuses.

**Tableau 3:** Teneur moyenne des ETMM dans la croûte continentale supérieure (CCS) + en ppm sauf l'Al et le Fe en %, dans des fleuves et dans l'océan en  $\mu\text{g. L}^{-1}$  (Bruland and Lohan, 2003 ; Gaillardet et al., 2003 ; Morley et al., 1997 ; Wedepohl, 1995).

| <b>Élément</b> | <b>Concentration dans la CCS (<math>\mu\text{g/g}</math>)</b> | <b>Concentration moyenne des rivières (<math>\mu\text{g/L}</math>)</b> |
|----------------|---|--|
| <b>Al</b>      | <b>7.74%</b>  | <b>32</b>  |
| <b>Fe</b>      | <b>3.08%</b>  | <b>66</b>  |
| <b>Mn</b>      | <b>527</b>  | <b>34</b>  |
| <b>As</b>      | <b>2</b>  | <b>0.62</b>  |
| <b>Cd</b>      | <b>0.102</b>  | <b>0.08</b>  |
| <b>Co</b>      | <b>11.6</b>   | <b>0.15</b>  |
| <b>Cr</b>      | <b>35</b>   | <b>0.7</b>   |
| <b>Cu</b>      | <b>14.3</b>   | <b>1.5</b>   |
| <b>Ni</b>      | <b>18.6</b>   | <b>0.8</b>   |
| <b>Pb</b>      | <b>17</b>   | <b>0.08</b>  |
| <b>V</b>       | <b>53</b>   | <b>0.71</b>  |
| <b>Zn</b>      | <b>52</b>   | <b>0.6</b>   |
| <b>Hg</b>      | <b>0.056</b>  | <b>–</b>   |

Le tableau 4 offre une vue d'ensemble des phases porteuses des éléments traces métalliques (ETM) dans les fractions sédimentaires. La répartition des ETM parmi les différentes fractions de sédiments joue un rôle crucial dans la dynamique globale des ETM au sein de l'écosystème. En effet, la modification de ces phases porteuses peut entraîner la libération ou la capture des ETM qui y sont liés. L'identification des phases porteuses dans les sédiments permet de mieux comprendre les processus biogéochimiques se déroulant dans un environnement aquatique (Clark et al., 2000).

**Tableau 4:** Les phases porteuses de certains éléments traces métalliques dans les fractions sédimentaires (Eggleton and Thomas, 2004 ; Shaw et al., 1990 ; Wedepohl, 1995).

| <b>Éléments traces métalliques<br/>&amp;Métalloïdes</b> | <b>Phases porteuses</b>   |
|---|---|
| As  | Les sulfures, Oxydes de manganèse et fer et matière organique               |
| Cd  | Matière organique, Oxydes de manganèse et fer                               |
| Cr  | Oxydes de manganèse et fer  |
| Cd  | Les sulfures, Oxydes de manganèse et fer et matière<br><br>Organique        |
| Mo  | Sulfure (en milieu anoxique), associé au Mn et Fe<br><br>(En milieu oxique) |
| Pb  | Les sulfures, Oxydes de manganèse et fer et matière<br><br>Organique        |
| Ni  | Les sulfures, Oxydes de manganèse et fer et matière organique               |
| U   | Oxydes de fer, phosphate, carbonates  |
| Zn  | Oxydes de manganèse et sulfure  |
| Hg  | Matière organique et sulfure  |

## I.2. Le Sédiment

Le sédiment marin est un compartiment complexe et relativement hétérogène (**Power et Chapman, 1992**). Et sont des matériaux déposés au fond des océans, résultant de processus tels que l'érosion, le transport et la sédimentation. Leur composition et leur distribution offrent des informations précieuses sur l'histoire de la Terre, les changements environnementaux et les conditions océaniques. Il est considéré comme étant le réservoir extrême au quel est acheminé la plupart des contaminants.

### I.2.1. Origine

Les particules qui composent les sédiments marins sont plus ou moins grosses et sont constituées de composés organiques et inorganiques provenant de quatre sources distinctes:

- **Une source terrigène** : les particules proviennent de l'érosion des terres émergées et les côtes. Cette source est enrichie par divers apports tels que les apports éoliens, volcaniques, glaciaires, sans oublier les apports fluviaux et/ou de ruissellement qui constituent à eux seuls l'apport cumulé le plus important.
- **Une source endogène** : les particules proviennent de la production océanique interne comme les débris de macrophytes (plantes aquatiques, microphytes) ou encore les fragments de coquilles des organismes ;
- **Une source liée à la néoformation** : correspondant aux phénomènes d'altération, de transferts et de précipitations qui peuvent se produire dans le bassin de sédimentation ou à l'intérieur du sédiment durant la diagenèse ;
- **Une source anthropique** : qui peut être ex situ et in situ. Dans le premier cas, elle regroupe tous les rejets agricoles, industriels et domestiques qui se retrouvent dans les apports fluviaux. Ce fractionnement est riche en MO, en nutriments, et en micropolluants. Il peut également apporter des matières en suspension. Dans le second cas, elle englobe toutes les activités humaines et industrielles portuaires (chargement de marchandise, pêche, ravitaillement en carburant, entretien du matériel de navigation). Généralement, cette dernière source est fortement contaminée, ce qui conduit à l'augmentation du taux de sédimentation (**Loustau Cazalet, 2012 et Schneider, 2001**).

Les sédiments sont essentiellement caractérisés par leur granulométrie et leur composition.

### I.2.2. Composition

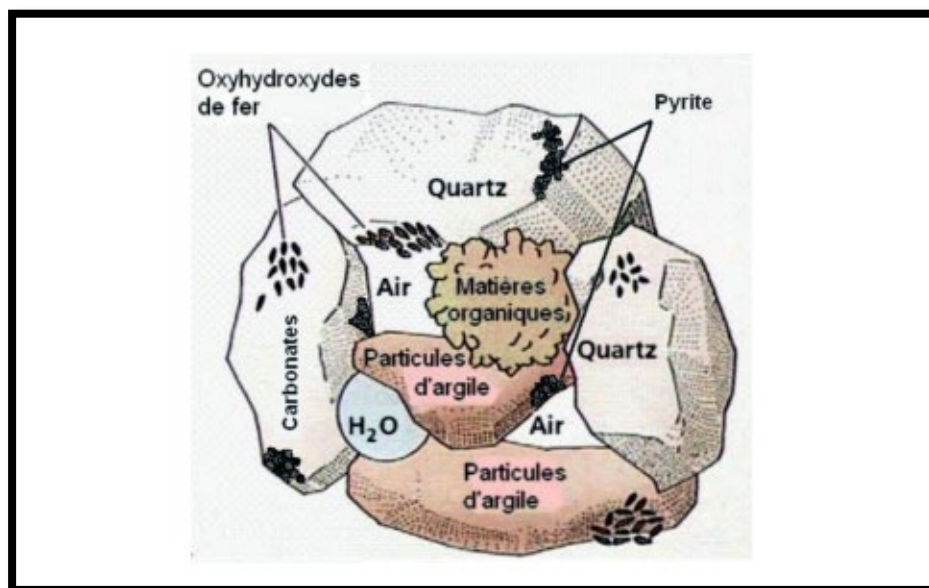
Un sédiment est un compartiment poreux constitué d'une matrice solide et de vide, appelés pores (**Rusch, 2010**). Ces derniers sont occupés par de l'eau de mer (eau interstitielle) et dans une moindre mesure par de l'air enrichi en CO<sub>2</sub> par l'activité biologique (micro-organismes).

L'eau interstitielle représente entre 20 et 90 % du volume des sédiments superficielles mais ses pourcentages diminuent généralement avec la profondeur suite à la compaction des particules sédimentaires (**Lesven, 2008**). La région d'origine et la nature du milieu aquatique

(rivières, estuaires, zones côtières, etc.) du sédiment ont un impact non négligeable sur la représentation de ses différentes fractions (**Cazalet, 2012**). Les sédiments sont donc des milieux poreux constitués de trois fractions présentes en proportions variables (Figure2) (**Rusch, 2010**).

La fraction solide des sédiments est un milieu complexe constitué de composés minéraux et des débris de squelettes et coquilles animales, qui représente la partie inorganique du sédiment.

Le quartz, les carbonates, les oxydes et hydroxydes métalliques et les argiles constituent les principales espèces minérales de cette matrice (**Mechaymech, 2002**) répartis selon différentes tailles de particules (de 0,1  $\mu\text{m}$  à plusieurs mm) (**Lesven, 2008**). L'autre phase solide du sédiment est constituée de la matière organique (micro-organismes, les débris animaux et végétaux et les colloïdes humiques/fulviques) qui est potentiellement présente dans les sédiments. Malgré le faible volume qu'elle occupe dans ce compartiment, elle ne joue pas un rôle nutritif essentiel pour les organismes vivants, mais elle peut contrôler en partie la biodisponibilité des contaminants métalliques (**Razak et al., 1996**).



**Figure 2 :** Illustration des différents constituants d'un sédiment marin adapté de (**Rusch, 2010**).

Globalement, deux phases coexistent distinctement dans la matrice sédimentaire : la phase solide et la phase liquide (l'eau interstitielle). Ces deux phases sont l'objet d'échanges permanents de matière qui tendent vers un régime stationnaire. En outre, Les sédiments sont caractérisés par la présence d'éléments majeurs comme le calcium dans les carbonates, le silicium dans l'opale (boue à base de diatomées, par exemple), l'aluminium (accompagné de Mg, Ti, K, Na) dans les aluminosilicates et le fer et manganèse dans les sédiments à nodules

polymétalliques. Les métaux traces quant à eux se trouvent liés aux fractions sédimentaires sous plusieurs formes : les formes liées aux oxydes et hydroxydes de fer ou de manganèse, aux silicates, aux carbonates, les formes complexées avec la matière organique (par exemple acides humiques) ou sous forme d'ions libres dans l'eau interstitielle. D'autres comme les éléments mineurs, les éléments nutritifs (nitrate, sulfate, phosphate, carbone organique...), les éléments métalliques présents à l'état de traces (naturels ou anthropiques) et les contaminants organiques (HAP, PCB, pesticides...) complètent la composition d'un sédiment **(Garrivier, 1995)**.

Les sédiments sont également caractérisés par leur pH, leur potentiel redox, leur salinité, leur teneur en oxygène et en sulfures. Ces paramètres gouvernent la répartition des contaminants entre les différentes phases d'un sédiment, ainsi que leur biodisponibilité **(Dahane, 2017)**. On résume, Le sédiment se compose principalement de trois éléments qui influencent ses caractéristiques physiques, mécaniques et environnementales :

#### **I.2.2.1. Eau interstitielle**

Il s'agit de l'eau qui occupe l'espace entre les particules sédimentaires. Cette eau représente une fraction importante du sédiment et joue un rôle crucial dans ses propriétés **(Forstner, 1987)**.

#### **I.2.2.2. Phase inorganique**

Cette phase est composée de minéraux issus de l'érosion de l'écorce terrestre ainsi que de débris coquilliers. Les minéraux, principalement des argiles, des carbonates et des silicates, influencent essentiellement les caractéristiques physiques et mécaniques des sédiments.

Les principales particules inorganiques présentes en milieu aquatique sont :

- Les oxydes métalliques ;
- Les argiles (phyllosilicates) ;
- Les aluminosilicates non argileux (feldspaths, ...) ;
- La silice (opale, quartz,...) ;
- Les carbonates (calcite, dolomite) ;
- Les phosphates (vivianites, ...) ;
- Les sulfures (pyrite, ...).

#### **I.2.2.3. Phase organique**

Les particules organiques proviennent du métabolisme et de la dégradation des organismes vivants. C'est un ensemble très varié et assez mal connu. Elles se décomposent en deux fractions : fraction organique vivante (microflore, faune et racine), et fraction organique morte

: débris organiques d'origines animale ou végétale, plus ou moins décomposés en humus sous l'action des microorganismes (**Devallois, 2009**). La MO n'occupe qu'un faible volume du sédiment (quelques %), mais joue un rôle primordial, puisqu'elle régule la mobilité et donc la biodisponibilité d'un grand nombre de contaminants, en particulier les composés organiques non ioniques (**Power et Chapman, 1992**). Selon sa taille la matière organique peut être classée en carbone organique dissous, colloïdal et particulaire (**Bonnet, 2000, et Geffard, 2001**).

Les sédiments sont aussi également caractérisés par leur pH, leur potentiel redox, leur salinité, leur teneur en oxygène et en sulfures. Ces paramètres gouvernent la répartition des contaminants entre les différentes phases d'un sédiment, ainsi que leur biodisponibilité.

### **1.2.3. Diagenèse précoce du sédiment**

Les sédiments marins sont caractérisés par d'importants gradients bio-physico-chimiques. Ces gradients sont la conséquence de nombreuses transformations physiques, chimiques et biologiques qui conduisent à la transformation du sédiment en roche cohérente : c'est la diagenèse sédimentaire.

La diagenèse définit l'ensemble des processus physico-chimiques qui transforme le sédiment en roche cohérente (du grec « dia » : à travers et « genesis » : formation). La diagenèse précoce désigne les transformations qui commencent dès le dépôt des particules et qui sont prédominantes aux petites échelles géologiques (quelques dizaines d'années).

La diagenèse précoce mêle des mécanismes physiques (tassement et consolidation) et biogéochimiques (minéralisation de la matière organique). Ces derniers correspondent à une succession de réactions induites ou catalysées par les bactéries et les micro-organismes. Ainsi, la présence de bactéries et de matière organique sont les deux conditions sine qua non pour induire les réactions biogéochimiques de la diagenèse précoce (**Devallois, 2009**).

### **1.2.4. Granulométrie**

#### **a. Composition granulométrique**

Un grain de sédiment est caractérisé par sa dimension, sa forme, son état de surface et sa masse volumique (**Chamley et Deconinck, 2011**). La répartition des sédiments est très variable, cette granulométrie varie en fonction de l'origine du point du prélèvement et la nature de la matière solide (**Burdige, 2006**). En effet, les particules grosses restent en amont tandis que les particules fines se trouvent en aval.

Les résultats de l'analyse granulométrique et la connaissance de la répartition des contaminants en fonction de la distribution granulométrique sont des indicateurs pour la décontamination (Figure3).

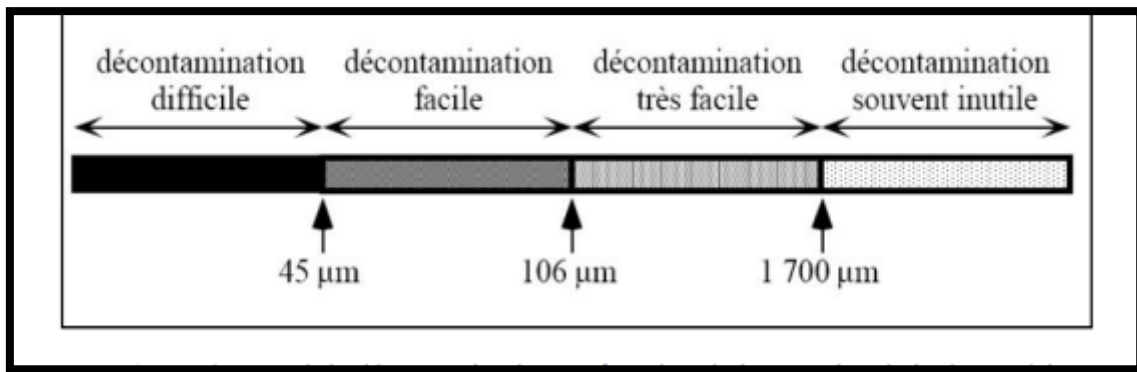


Figure 3 : Degré de décontamination en fonction de la granulométrie du matériau.

### b. Classement des particules

Les particules sont classées de la façon suivante, en fonction de leur diamètre :

Diverses dimensions de fractions granulométriques ont été proposées au cours du temps en fonctions des objectifs poursuivis. Selon **Chamley et Deconinck (2011)** ; les particules sont classées de la façon suivante, en fonction de leur diamètre :

Tableau 5: Classes et dénominations granulométriques (d'après Chamley et Deconinck, 2011)

|         |                            | Dénomination                       | Classe granulométrique en mm |
|---------|----------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| RUDITES |                            | BLOCS ( <i>Boulders</i> )          | > 250                        |
|         |                            | GROS CAILLOUX ( <i>Cobbles</i> )   | ] 63 – 250]                  |
|         |                            | GRAVIERS ( <i>Gravels</i> )        | ] 20 – 63]                   |
|         |                            | PETITS CAILLOUX ( <i>Pebbles</i> ) | ] 4 – 20]                    |
|         |                            | GRANULES                           | ] 2 – 4]                     |
| ARÉNITE | SABLES<br>( <i>Sand</i> )  | Très Grossier                      | ] 1,25 – 2]                  |
|         |                            | Grossier                           | ] 0,63 – 1,25]               |
|         |                            | Moyen                              | ] 0,315 – 0,63]              |
|         |                            | Fin                                | ] 0,125 – 0,315]             |
|         |                            | Très fin                           | ] 0,063 – 0,125]             |
| PÉLITES | LIMONS<br>( <i>Silts</i> ) | Grossier                           | ] 0,0400 – 0,063]            |
|         |                            | Moyen                              | ] 0,0200 – 0,0400]           |
|         |                            | Fin                                | ] 0,0100 – 0,0200]           |
|         |                            | Très Fin                           | ] 0,0040 – 0,0100]           |
|         |                            | ARGILES ( <i>Clays</i> )           | ] 0,0005 – 0,0040]           |

#### I.2.5. Les polluants dans les sédiments

Le sédiment, compartiment important de l'écosystème aquatique, sert d'habitat et de source de nourriture pour de nombreuses espèces écologiquement et économiquement importantes. Les dépôts sédimentaires littoraux qui font l'objet de la présente étude, se

forment à l'interface des zones continentales et marines. Ils constituent les réservoirs ultimes pour de nombreux composés chimiques (Chapman et al., 1998).

La plupart des polluants chimiques sont facilement adsorbés sur les particules les plus fines et ont par conséquent tendance à sédimenter (Marchand, 1985). De ce fait, le sédiment de surface peut constituer un bon indicateur de pollution.

L'analyse chimique des polluants dans les sédiments est, certes, un moyen d'investigation performant pour détecter les zones de dégradation de la qualité des eaux (Lacaze et Paquet, 1989).

Les contaminants n'ont pas le même pouvoir de fixation selon les conditions géochimiques et la nature des solides (Figure4).

En effet, le sédiment peut présenter des teneurs élevées de polluants qui ne sont pas remobilisables dans les conditions naturelles du milieu, mais il peut aussi devenir toxique lorsque les conditions physico-chimiques sont modifiées lors d'un dragage par exemple. Les sédiments ne constituent pas uniquement un simple réservoir pour les polluants, ce sont de véritables réacteurs biogéochimiques capables d'adsorber et de transformer les polluants, de modifier leur biodisponibilité, de les recycler ou de les transférer vers la colonne d'eau, vers le sol ou les nappes phréatiques (Achour, 2013).

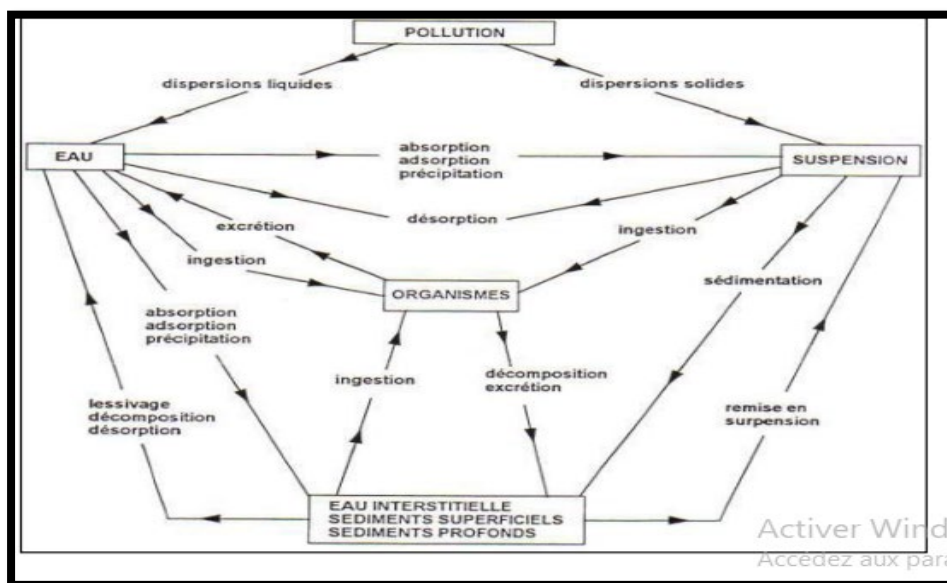


Figure 4 Comportement des polluants rejetés dans les cours d'eau (Marchandise et Robbe 1978 in Achour, 2013).

**ZONE D'ÉTUDE**

# Chapitre II : Zone d'étude

## II.1. PRESENTATION DE LA ZONE DETUDE (bassin versant de Beni Messous)

La connaissance des différents paramètres naturels et anthropique est indispensable pour la surveillance du milieu marin. L'analyse des sédiments à L'embouchure de l'Oued de Beni Messous fait l'objet de la présente étude. Ce chapitre est consacré à la présentation et la description de ce milieu physique, ainsi qu'aux facteurs anthropiques.

### II.1.1. Situation géographique

La zone d'étude se situe à l'embouchure de l'oued Béni-Messous (baie d'El Djamila) localisé à l'Ouest de la wilaya d'Alger (Fig. 5). Elle est délimitée :

- Au nord par la Mer Méditerranéen ;
- A l'ouest par club des pins ;
- Au sud par la Commune de Ain Benian ;
- A l'est par la plage el Bahdja.

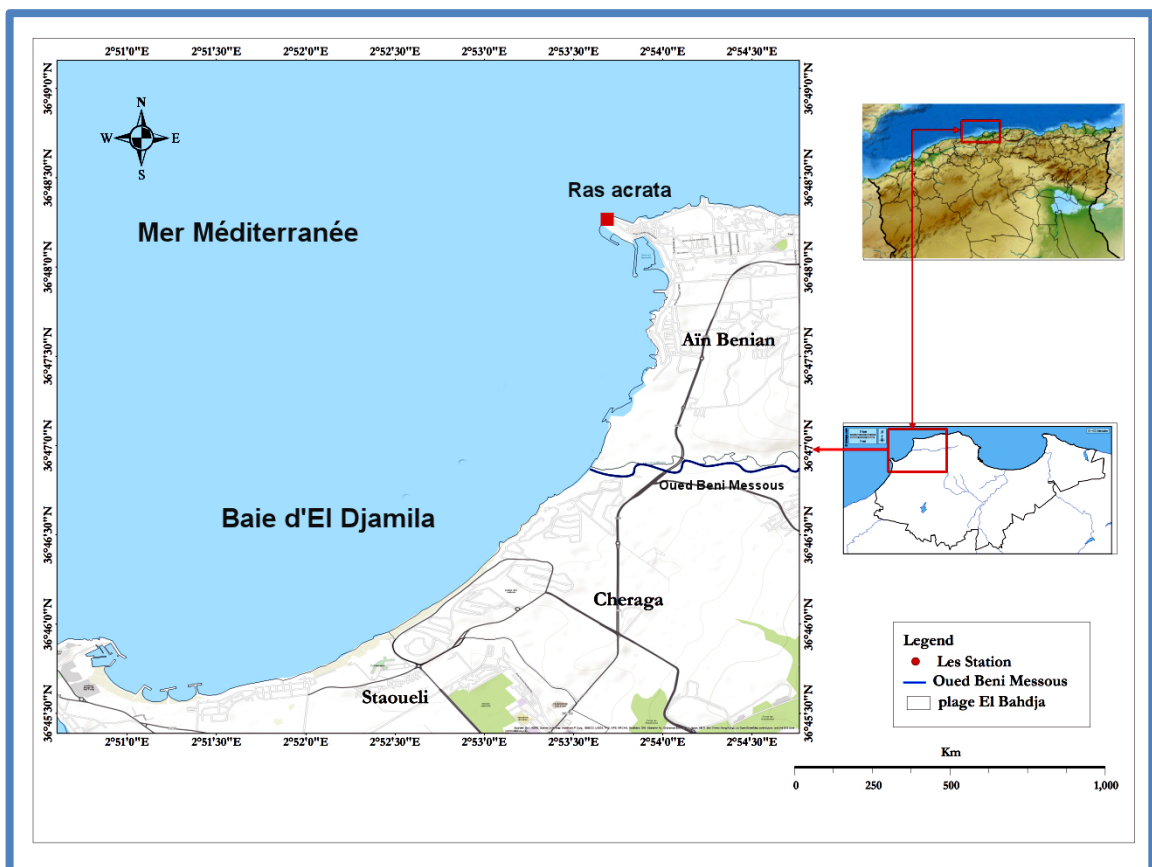


Figure 5 : Carte de la zone d'étude (ArcMap10.8)

## II.1.2. L'Oued Béni Messous

L'oued beni Messous couvre une zone de captage de 31 km<sup>2</sup> ; avec un débit moyen de 0.245m<sup>3</sup>/s .il traverse plusieurs communes (beni Messous ; Bouzareah ; Delly Brahim ; Hammamet ; Ain banian ; et Cheraga) et se jette en mer par l'intermédiaire de son embouchure au niveau de la plage el Bahdja (les dunes) située dans la baie el Djamila (DHEEHW.2011).

Il prend naissance dans les ravins de Bouzareah ; dans la partie sud ouest. Le bassin versant et montagneux dans sa partie amont forme essentiellement par la forêt de bainem dans la partie Nord-est avec un relief en pente ; qui s'adoucit vers l'aval et se transforme en un tapis végétal fortement agricoles.

L'oued béni Messous d'une longueur de 12km ; reçoit plusieurs affluents tout le long de son parcours ; qui définissent chacun un sous bassin versant ; comme il est un réceptacle d'eaux usées domestique et industrielles sans traitement au préalable.

Ces eaux canalisées par l'oued sont déversées directement en mer au niveau de la plage el Bahdja. Le fort degré de pollution de ces eaux est la principale cause de l'altération de sa qualité ce qui le rend impropre à la baignade (DHEEHW, 2011).

### Les caractéristiques des eaux usées de l'oued Béni-Messous

Selon la direction de l'hydraulique et de l'économie de l'eau de la wilaya d'Alger (DHEEWA, 2004), les caractéristiques des eaux usées de l'oued Béni-Messous sont :

**Tableau 6:** Les caractéristiques des eaux usées de l'oued Béni-Messous (DHEEWA, 2004)

| <i>caractéristiques</i>               | <i>Valeurs</i>          |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Débit moyen des eaux usées urbaines   | 8336 m <sup>3</sup> / j |
| Débit des eaux industrielles          | 940 m <sup>3</sup> /j   |
| Débit moyen total des eaux            | 9276 m <sup>3</sup> /j  |
| Débit moyen horaire des eaux          | 387 m <sup>3</sup> /h   |
| Débit de pointe des eaux usées        | 773 m <sup>3</sup> /j   |
| DBO <sub>5</sub> (charge journalière) | 5439 Kg / j             |
| DCO (charge journalière)              | 8640 Kg / j             |
| Phosphore                             | 174 Kg / j              |
| Azote                                 | 1571 Kg / j             |

### II.1.3. La plage (El Bahdja)

La plage (el Bahdja) est une plage sableuse (sable fin) de la commune côtière de Ain banian. Elle se localise plus exactement dans la rive ouest de la baie d'El Djamilia ; à 30 km à l'ouest de la wilaya d'Alger. D'une largeur de 33 m et d'une longueur de 900m ; elle peut accueillir jusqu'à 9000 estivants selon les statistiques de l'agence de promotion et de protection du littoral de la wilaya d'Alger (APPL.2015).

L'effluent de l'oued Beni Messous ; arrivant au niveau de la plage el Bahdja sans traitement ; à cause de la salubrité de ces eaux, avait conduit à la fermeture de la plage (el Bahdja) ainsi que les plages voisines. Pour remédier à ce problème ; un lagunage nature a été installé au début ; et par la suite il a cédé la place à la nouvelle station d'épuration par boues actives de béni Messous en 2006. Ce n'est pas qu'en 2010 que la plage el bahdja a été autorisée à la baignade après l'obtention de résultats satisfaisant de la qualité de ses eaux (APPL.2015)

### II.1.4. Bassin versant de Beni Messous

Le bassin versant de Beni Messous est situé dans la région d'Alger, en Algérie. Il se trouve dans le nord du pays, près de la côte méditerranéenne. La région est caractérisée par une topographie variée, comprenant des collines et des vallées, qui influent sur l'écoulement des eaux dans le bassin versant. La proximité de la côte méditerranéenne peut également avoir un impact sur le climat et les précipitations dans la région.

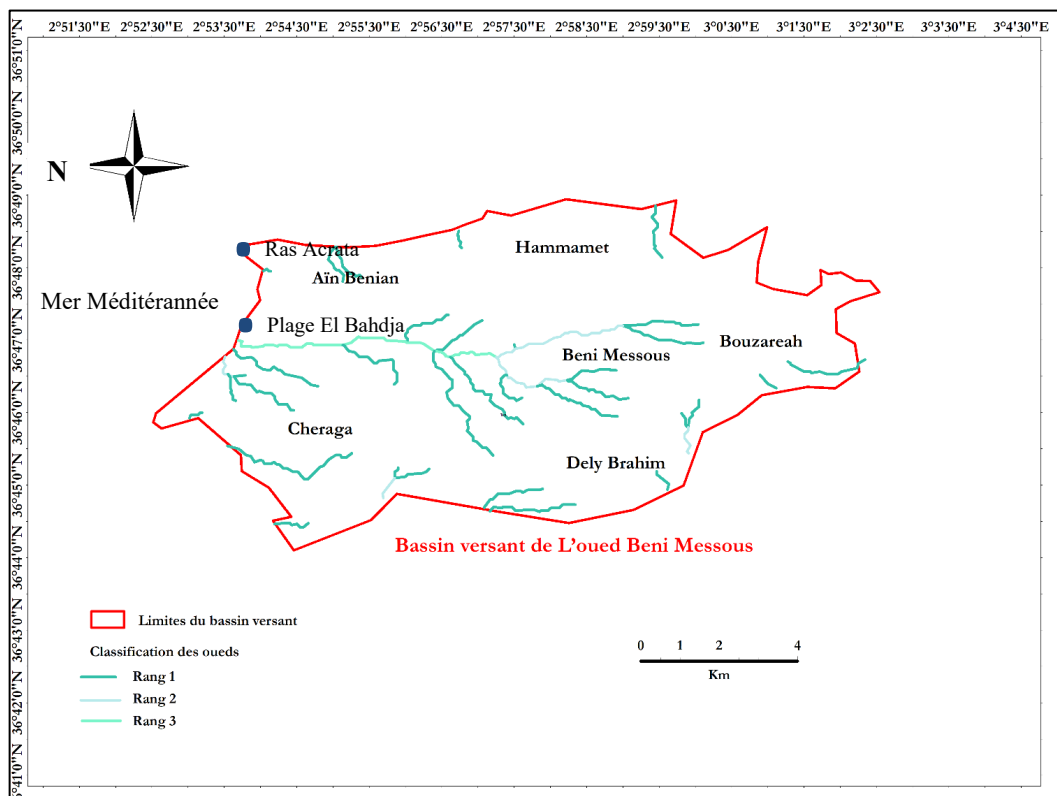


Figure 6. Situation du bassin versant de l'oued du Beni Messous (ArcMap10.8)

### II.1.5. Etude démographique de la zone d'étude

En se basant sur derniers recensements fait en 1998 (vu qu'on n'a pas pu obtenir les données de 2008), et d'après les statistiques de 2004 faites par l'office national de statistiques d'Alger concernant les quatre communes concernées par l'oued Béni-Messous le nombre d'habitant est (voir tableau ci-dessous) (Ait Kaci, 2008) :

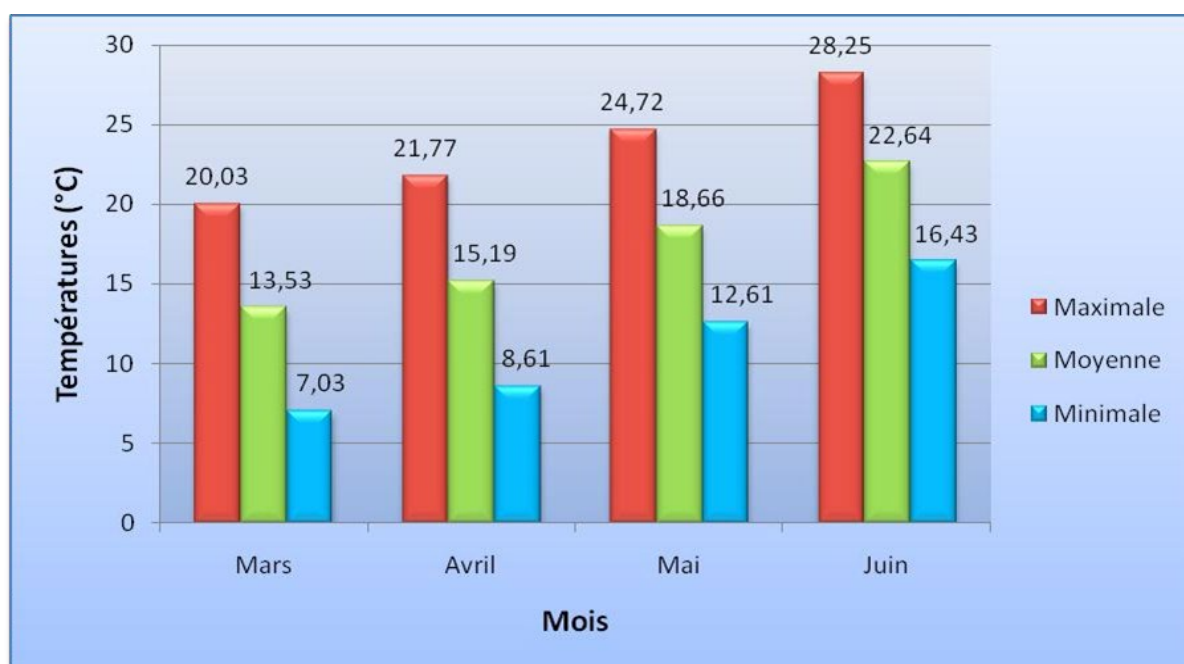
**Tableau 7:** Nombre d'habitants par commune (OMEIRI, 2016).

| COMMUNE      | ANNEE | NOMBRE DES HABITAS |
|--------------|-------|--------------------|
| Dely brahim  | 2008  | 35 230             |
| Cheraga      | 2020  | 39 557             |
| Ain Benian   | 2008  | 68 354             |
| Bouzareah    | 2016  | 102 670            |
| Beni messous | 2008  | 36 990             |
| Hammamet     | 2008  | 23 990             |

### II.1.6. Facteurs climatiques de la zone d'étude

#### II.1.6.1. La température

Les moyennes mensuelles des températures de l'air varient entre 11.7 C° et 26.3 C°. Le mois le plus chaud est le mois d'août et le mois le plus froid est le mois de janvier avec une moyenne de 11,7 C°. (ONM, 2004).



**Figure 7:** Profil de variation des températures moyennes de l'air (ONM 1995-2004).

Sur la figure suivante, on peut voir la variation moyenne des températures maximales et minimales des mois de Mars, Avril, Mai et Juin, (moyenne établie sur l'intervalle des années [1995 - 2004]) voir figure 7.

### II.1.6.2. L'Ensoleillement

La région est caractérisée par un été ensoleillé et un hiver nuageux.

La figure qui suit révèle l'existence de trois périodes où l'ensoleillement est :

- Fort en Juin et Août atteignant son maximum, 329 h en Juillet ;
- Faible en Novembre à Février avec une moyenne de 210 h ;
- Moyen réparti en deux phases, de Mars à Mai et de Septembre à Octobre.

Sur la figure suivante, on peut voir le profil de l'ensoleillement moyen des mois de Mars à Juin (moyenne établie sur l'intervalle des années [1995 - 2004]) :

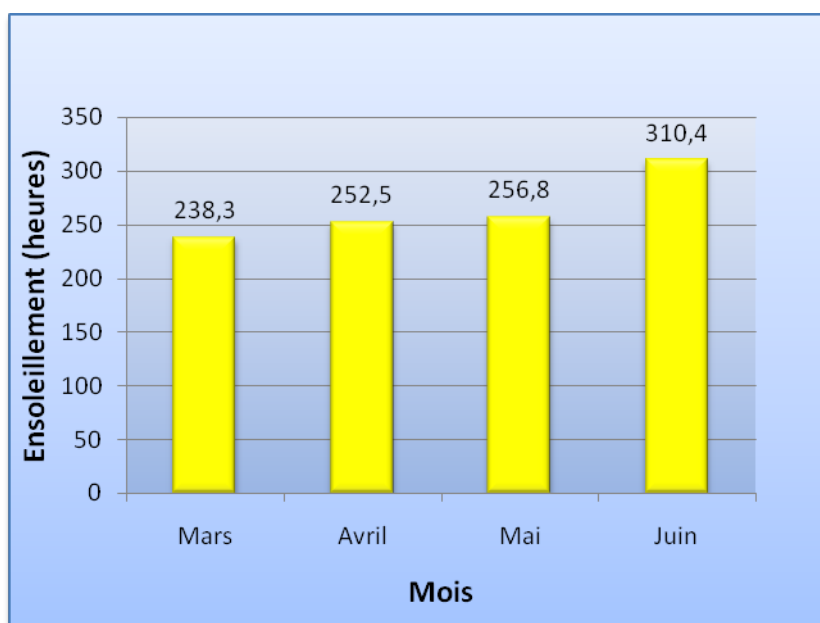
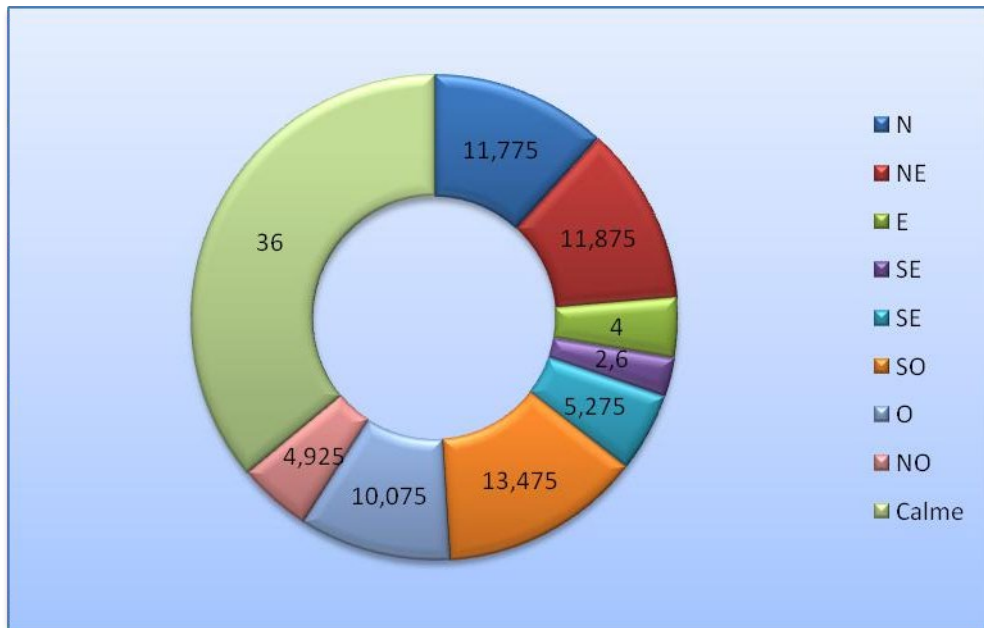


Figure 8: Profil de l'ensoleillement moyen des mois de Mars à Juin dans la région de Béni-Messous (ONM 1995-2004).

### II.1.6.3 Les vents

L'analyse des régimes des vents effectuée par l'ONM de Dar EL Beida sur une période de 44ans (1960 – 2004) a montré que les vents les plus fréquents par leur direction sont de secteur (Ouest, Sud-Ouest) et (Nord, Nord-Est) (tableau 21 annexe 2). Pendant la période estivale les vents les plus fréquents sont de secteurs Nord et Nord-Est. La figure suivante donne la fréquence annuelle des vents (moyenne établie sur une période de 44 ans par

l'ONM).



**Figure 9.** Fréquence annuelle des vents de la région de Béni-Messous (ONM, moyenne sur l'intervalle [1960-2004])

#### II.1.6.4 Les houles

En hiver, les houles les plus fréquentes dans la baie d'EL DJEMILA sont engendrées par les vents d'Ouest, avec des amplitudes situées généralement entre 2 et 2,5m et, des amplitudes maximales de 4 à 6m.

Par contre, en été, sous l'effet des vents Nord-Est, les houles sont de direction Nord et Nord-Est, avec des amplitudes généralement plus faibles, de 0.5 à 1m. (BAKI.M., 1981 in MAHIOU.M., 1989).

Pendant l'hiver, les houles de secteur Nord-Ouest donnent naissance à des dérives littorales, dominantes, allant d'Ouest Sud-Ouest vers l'Est Nord-Est.

En été, les houles (Nord, Nord-Est) engendrent des courants de surface, de sens dominant (Est, Nord-Est) vers (l'Ouest, Sud-Ouest). (BAKI.M., 1981 in MAHIOU.M., 1989).

#### II.2. La station d'épuration de Beni Messous

La station d'épuration de Béni Messous est située sur le territoire de la commune d'Aïn Benian à environ 15 km à l'ouest d'Alger, à proximité de l'embouchure d'Oued Beni Messous et qui se déverse dans la plage les dunes. Elle occupe une superficie de 13 hectares environ. (OMEIRI, 2016).

Cette station a une capacité épuratoire de 250.000équivalent habitants, pour un débit moyen théorique de 50.400 m<sup>3</sup> /j, et a été mise en service en 2007 (Djemil et al, 2016).

# **MATÉRIEL ET MÉTHODES**

## Chapitre III : MATÉRIELS ET MÉTHODES

Ce chapitre décrit la stratégie de prélèvement et le traitement des échantillons de sédiments de surface collectés dans la zone de l'embouchure de l'Oued Beni Messous. Ce chapitre présente également tous le matériel utilisé et les protocoles analytiques appliqués sur les échantillons. Enfin, nous détaillerons les différents indices calculés pour évaluer la contamination par les métaux traces.

### III.1. Choix et localisation des stations de prélèvement

L'une des principales sources de contamination de la plage « les dunes » est évidemment les eaux usées apportées par l'oued de Béni Messous, puisque ce dernier se déverse directement dans cette zone. Dans ce travail on a essayé d'étudier la propagation des rejets de l'oued de Béni-Messous en mer afin d'évaluer le taux de pollution de cette plage, et cela en analysant les contaminant chimique tel que les métaux traces.

La sortie en mer à été effectuer dans l'embouchure de l'oued Beni Messous à bord d'une embarcation privée le 22 février 2024. Seize stations ont été choisies dans la zone d'étude en fonction du point de rejet.

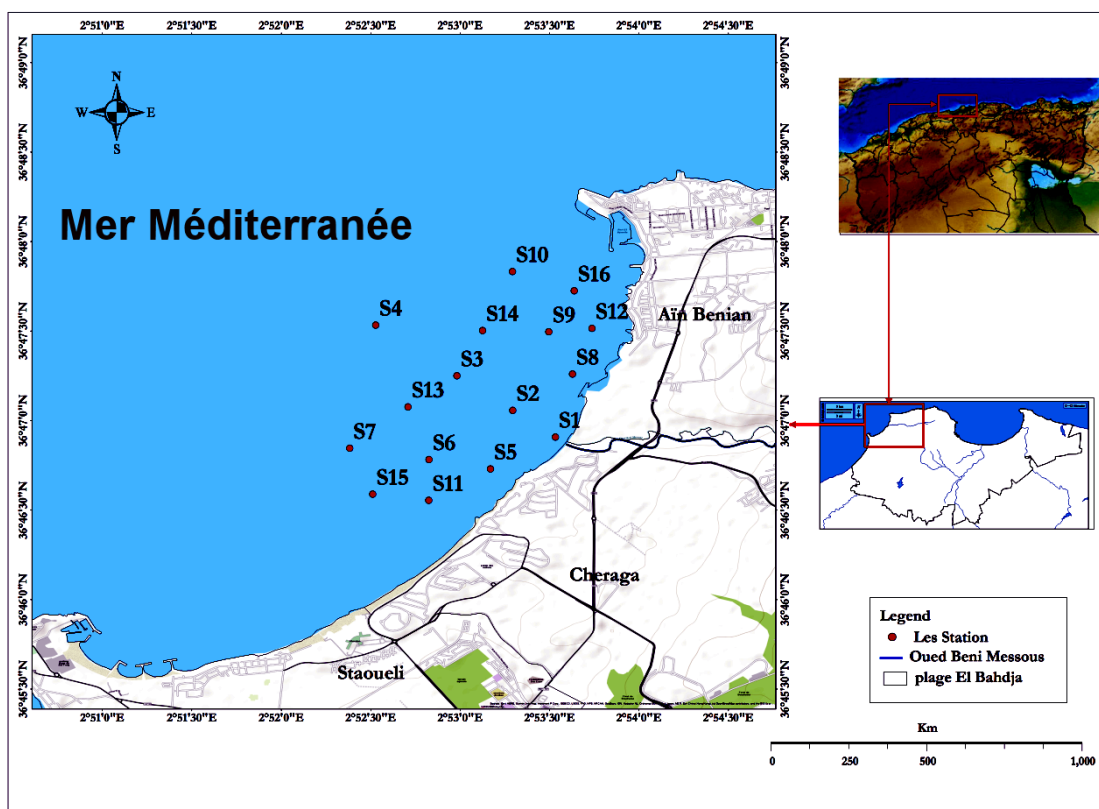


Figure 10. Localisation des stations de prélèvements de sédiment (ArcMap10.8)

Les conditions météorologiques et l'état de la mer étaient favorables, avec une mer calme et un temps ensoleillé. Les prélèvements ont été effectués entre 9h et 11h. La figure 10 illustre le positionnement des seize stations. Le tableau 1 en annexe 1 représente les coordonnées géographiques des 16 stations.

### **III.2. Echantillonnage des sédiments de surface**

Les prélèvements ont été réalisés à bord d'une embarcation d'un navire, entre 9h et 11h. le **22/02/2024**, le rythme d'échantillonnage était d'un prélèvement par une journée, le climat était conditionné par les conditions météorologiques.

Au niveau de chaque station un prélèvement de sédiment a été effectué pour l'analyse des métaux traces et la mesure des paramètres de sédiments tels que la matière organique, les carbonates, la granulométrie et l'humidité. Ces prélèvements ont été réalisés à bord d'une embarcation à la surface de chaque station.

Après prélèvement, Les échantillons destinés à l'analyse des métaux traces ont été conditionnés dans des sachets en nylon pour éviter la contamination. Les échantillons sont transportés par la suite dans une glacière pour un bon conditionnement durant le transport.

Le matériel utilisé pendant la sortie en mer était composé de :

- Une benne de type « VanVeen ».
- Un GPS avec lequel on tire les coordonnées des différentes stations.
- Sachets de congélation utilisés pour les prélèvements des sédiments.
- Spatule.
- Glacière pour la conservation et le transport des échantillons.

Ce prélèvement a été effectué au moyen d'une benne preneuse de type VanVeen. Cette dernière est constituée d'acier inoxydable. Avant l'envoi de la benne par gravité, les deux bras leviers sont écartés de chaque côté, avec les mâchoires ouvertes. Au contact du fond, le mécanisme de fermeture se déclenche et quand le câble est tiré pour remonter la benne, les mâchoires se referment. Une fois la benne remontée, les quantités d'échantillons sont récupérés :

- Pour les sédiments destinés à l'analyse des métaux traces et la matière organique les échantillons ont été mis dans des sacs en matière nylon conditionnés, évitant le sédiment en contact avec les parois de la benne.
- Pour les sédiments destinés à l'analyse granulométrique et calcimétrique les échantillons ont été mis dans des sacs en matière nylon aussi sur lesquels sont inscrites les coordonnées de chaque station, la date et la zone d'étude.

- Les échantillons étant étiquetés avec les coordonnées de chaque station, la date et la zone d'étude, doivent être aussi tôt mis dans la glacière puis transportés au laboratoire.

Les échantillons de sédiments marins superficiels, dans l'attente d'être traités au laboratoire, sont congelés à -18°C. La congélation permet de conserver pour l'essentiel les propriétés chimiques des échantillons, d'éviter une contamination avec le milieu ambiant et les pertes d'éléments volatils tel que le mercure (**Charlou et Joanny, 1983**).

### **III.3. Les travaux et le traitement au laboratoire**

La préparation du matériel et le traitement des échantillons ont été faites dans les laboratoires de l'ENSSMAL de Dely Ibrahim et des écosystèmes marins de Sidi Fredj.

#### **III.3.1. Conditionnement et préparation du matériel**

Ces opérations doivent être effectuées impérativement avant chaque utilisation du matériel.

Tout le flaconnage et les sacs ont été préparés et conditionnés comme suit :

- Lavage à l'eau de robinet.
- Rinçage à l'eau acidulée.
- Rinçage à l'eau bidistillée.
- Séchage à l'étuve.

### **III.4. Analyses des paramètres des sédiments**

#### **III.4.1. Détermination du taux de la matière organique (MO) dans les sédiments**

L'une des méthodes d'évaluation de la teneur de la matière organique dans le sédiment, est la perte au feu (**Rodier, 1996**).

##### **Mode opératoire**

- Décongeler le sédiment ;
- Sécher le sédiment à l'étuve à 70°C pendant 24 heures ;
- Peser le sédiment en utilisant une balance de précision, on obtient alors le poids  $P_1$  ;
- Placer les échantillons au four à moufle à 600°C pendant 2h ;
- Peser une deuxième fois le sédiment calciné  $P_2$  ;
- Calcul et expression des résultats

Le taux de matières organique est obtenu par l'expression suivante :

$$\text{Équation 7: MO (\%)} = (p_1 - p_2 / p_1) * 100$$

Où :

**MO (%)** : taux de la matière organique

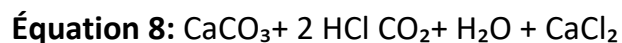
**P1** : Poids d'échantillon de sédiment.

**P2** : Poids de l'échantillon après calcination

### **III.4.2. Détermination du taux des carbonates de calcium (CaCO<sub>3</sub>) dans les sédiments**

Le calcaire total regroupe les carbonates insolubles des sédiments, ceux du calcium et du magnésium. Il est mesuré par l'intermédiaire du calcimètre de Bernard. Il peut également être apprécié par le test d'effervescence.

La méthode du calcimétrie de Bernard permet de connaître le taux des carbonates au niveau d'un sédiments par réaction avec l'acide Chlorhydrique (HCl).



#### **a. Principe**

Sous l'action d'un acide fort, l'acide chlorhydrique, les carbonates se décomposent. Il en résulte un dégagement de gaz carbonique. La méthode au calcimètre de Bernard permet la mesure du volume de CO<sub>2</sub> dégagé, recueilli dans un tube gradué.

Le test d'effervescence permet d'estimer, à l'œil nu, l'importance des bulles formées

#### **b. Mode opératoire**

- Préparer une solution saturée de NaCl (solution colorée en rose) ;
- Remplir l'ampoule à mi-hauteur de cette solution au même niveau de tube gradué on note le volume V<sub>1</sub> ;
- Peser 0,25 g de l'échantillon broyé dans l'erenmeyer (en premier, introduire 0,25 g de carbonate pur) ;
- Remplir une cuve (petit tube) avec de l'acide chlorhydrique (HCl) et l'introduire dans l'erenmeyer avec une pince et avec précaution pour ne pas le verser ;
- Boucher l'erenmeyer avec le bouchon relié au tube gradué de calcimétrie de Bernard
- Renverser l'acide contenu dans le tube sur l'échantillon ;
- Agiter de temps en temps l'erenmeyer pour activer la réaction ;
- A la fin de l'effervescence on note la division correspond au V<sub>2</sub> sur le tube gradué ;
- Le volume de CO<sub>2</sub> dégagé est la différence des volumes V<sub>2</sub>-V<sub>1</sub> (Vt pour le carbonate pur) ;

### c. Expression et calcul des résultats

Pour l'échantillon témoin en carbonate pur ou l'échantillon du sédiment, le volume CO<sub>2</sub> dégagé (ml) est donné par l'expression suivante :

$$\text{Équation 9: } V(\text{témoins})/V(\text{échantillon})=V_2-V_1$$

On obtient le pourcentage de CaCO<sub>3</sub> Par une simple opération :

$$\text{Équation 10 : } (\text{CaCO}_3\%) = (V \text{ échantillon} - V \text{ témoins}) * 100\%$$

## III.5. Analyse des éléments traces métalliques (ETM)

### III.5.1. Nettoyage des instruments

Le dosage des éléments métalliques en trace dans le milieu marin nécessite un contrôle rigoureux et constant à chaque étape, afin d'éviter la contamination des échantillons lors du prélèvement, du traitement et de l'analyse en laboratoire. Pour garantir cela, une attention particulière a été portée aux méthodes de prélèvement et de dosage des métaux. De plus, pour prévenir toute contamination, tous les instruments et la verrerie utilisés sont soigneusement nettoyés et conditionnés selon le protocole suivant (A.I.E.A., 1998) :

- Lavage avec des détergents commerciaux,
- Rinçage à l'eau courante (eau du robinet),
- Rinçage à l'eau bidistillée obtenue à l'aide d'un système Milli-Q (Millipore) avec une résistivité de 18 MΩ,
- Séchage en étuve à 70 °C pour le matériel en verre et en Téflon, et à 40 °C pour le matériel en polyéthylène (flacons) et en plastique (sachets),
- Rinçage à l'eau acidulée (5% ou 10%) préparée avec de l'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) concentré à 69% pour analyse,
- Rinçage à l'eau bidistillée,
- Séchage en étuve.

Ces opérations doivent être scrupuleusement réalisées avant chaque utilisation du matériel.

### III.5.2. Traitement des sédiments

Les échantillons de sédiments marins superficiels après une période de conservation d'environ 10 jours, ont été soumis à une série de traitements successifs. Les échantillons de sédiments marins prévus pour l'analyse des métaux traces sont congelés dans un congélateur. Ces échantillons ont ensuite été soumis à une série de traitements successifs pour l'analyse des métaux traces.

#### III.5.2.1. Lyophilisation

Après la congélation, les échantillons sont placés directement dans un lyophilisateur de type CHRIST pendant 72H sous pression réduite (10<sup>-1</sup> bar) et à très basse température (-50 °C à -60 °C).

La lyophilisation est la déshydratation par sublimation des échantillons à basse température et sous vide pour le passage de la phase solide vers la phase vapeur sans passer par la phase liquide (**Charlou and Joanny, 1983**).

C'est une technique plus appropriée par rapport au séchage à l'étuve qui présente un risque de perte de certains composés volatils et une source d'altération de l'échantillon. Les échantillons sont pesés après la lyophilisation afin d'obtenir le rapport (poids frais/poids sec) et calculer le taux d'humidité qui se calcule par la formule suivante :

$$\text{Taux d'humidité (\%)} = \frac{\text{Poids frais} - \text{Poids sec}}{\text{Poids frais}} * 100$$

### III.5.2.2. Broyage

Afin de préparer les échantillons pour l'analyse, les sédiments lyophilisés sont réduits en une poudre fine par broyage au mortier en porcelaine. La poudre obtenue est ensuite collectée dans des piluliers en plastique et conservée jusqu'à son utilisation pour les analyses ultérieures.

### III.5.2.3. Minéralisation (digestion) des échantillons de sédiments

Dans la littérature (**Added, 1981 ; Charlou et Joanny, 1983 ; Fernandez, 1984 et Rouibah, 1993**), diverses méthodes de minéralisation sont suggérées, regroupées en deux catégories : les méthodes d'extraction totale et les méthodes d'extraction sélective. Ces dernières comprennent principalement des extractions **séquentielles** (**Gupta et Chen, 1975 ; Tessier et al., 1979 ; Forstner et Salomons, 1980 ; Meguellati, 1982 ; Welté et al., 1983 ; Leleyter et Beraud, 2005 ; et Rauret et al., 2000**), ainsi que plus rarement des extractions parallèles (**Serne, 1975 et Lara-Cazenave, 1994**). Les schémas d'extraction varient en fonction du réactif utilisé pour chaque fraction, des conditions opératoires et du type d'échantillon traité.

Le protocole de **Meguellati (1982)** est conçu spécifiquement pour les échantillons riches en matière organique, tandis que celui de **Welté et al. (1983)** semble mieux adapté aux échantillons contenant principalement des métaux liés aux sulfures. L'attaque acide est essentielle dans le traitement des sédiments car les acides forts permettent une extraction des métaux totaux particuliers (**Flores-Rodriguez, 1992**).

La digestion utilisant de l'acide fluorhydrique est reconnue comme étant celle qui permet de récupérer les métaux associés à la fraction argileuse ou siliceuse.

Les concentrations obtenues par ce type d'extraction devraient normalement être les plus élevées (**Bourcier et Sharma, 1980**). Dans notre étude visant à évaluer la contamination métallique dans les échantillons de sédiments, nous avons appliqué une méthode permettant l'extraction des métaux biodisponible à la surface des grains par une digestion partielle réalisée à l'aide de l'eau régale ( $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ , 1/3 V/V), selon le protocole décrit par **l'A.I.E.A. (2001)**.

### **A. Principe de la digestion ou de la minéralisation**

La minéralisation vise à libérer les divers métaux adsorbés à la surface des particules de sédiment et/ou emprisonnés par la matière organique et les minéraux, en les extrayant et les mettant en solution. Les échantillons de sédiment sont traités dans des tubes en téflon scellés en utilisant l'eau régale pour récupérer les métaux biodisponible.

### **B. Protocole expérimental**

Le protocole choisit est celui décrit par l'**AIEA, (2001)**. Cependant, certaines étapes sont modifiées en fonction des réactifs et du matériel disponible au laboratoire.

### **C. Minéralisation à blanc**

Avant d'utiliser les godets, une minéralisation à blanc est réalisée. Dans chaque godet en téflon, 4 ml d'acide nitrique à 69% sont ajoutés, puis les godets sont hermétiquement fermés. Ils sont laissés à digérer toute la nuit, puis chauffés sur une plaque chauffante à 120 °C pendant 2h30. Après refroidissement des échantillons, la soupape de sécurité est ouverte délicatement, les godets sont ensuite ouverts, rincés à l'eau distillée et séchés dans une étuve.

### **D. Minéralisation des échantillons**

Conformément au protocole défini par l'**A.I.E.A. (2001)**, la minéralisation est réalisée sous une hotte aspirante, dans des godets en téflon. Environ 0,5 g de sédiment lyophilisé sont pesés, auxquels sont ajoutés 6 ml d'eau régale ( $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ , 1/3 V/V), puis les godets sont fermés hermétiquement. La digestion débute à température ambiante (pendant quelques heures) avant d'être placée dans un four à micro-onde ETHOS 900, microwave (plateau technique, ENSSMAL) voir **annexe 4**.

Après refroidissement des échantillons, la soupape de sécurité est ouverte délicatement, les godets sont ensuite ouverts et les minéralisés sont transférés dans les tubes en polypropylène de 50 ml. Les godets sont rincés avec de l'eau bidistillée au moins trois fois, en récupérant les rinçages dans les tubes en polypropylène. Ensuite, le volume est ajusté jusqu'au trait de jauge de 50 ml avec de l'eau bidistillée.

#### **III.5.2.4. Etalonnage**

La méthode utilisée repose sur celle des standards seuls. Pour chaque élément mesuré, nous avons préparé une série d'étalons à différentes concentrations (selon le type de métal) à partir d'une solution mère de 1000 ppm, dans des tubes de 50 ml, sous les mêmes conditions que les échantillons à analyser.

Les solutions standards ont été analysées par SAA afin de tracer la courbe d'étalonnage [absorbances = f(concentrations)]. En utilisant cette courbe et après avoir mesuré l'absorbance de chaque échantillon, l'ordinateur fournit la concentration du métal dans chaque échantillon analysé. Pour les faibles concentrations, la courbe est presque linéaire, respectant ainsi la loi de Beer-Lambert.

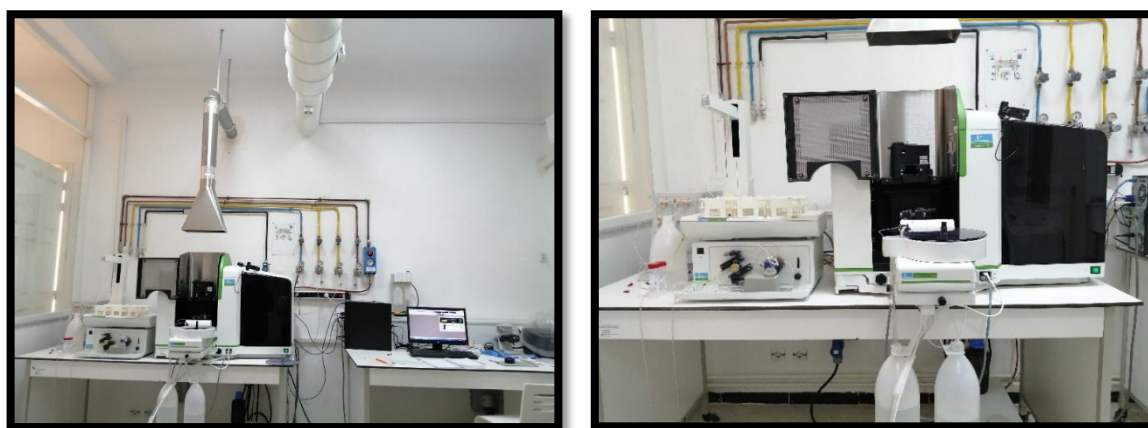
Cette analyse a porté sur un métal essentiel (fer), trois éléments en traces (cuivre, zinc, et nickel) et deux métaux toxiques (plomb et cadmium). La figure présente les courbes d'étalonnage pour les différents métaux analysés sont présentés en Annexe 4.

#### - Le blanc

Un blanc est inséré avec chaque série de 10 échantillons. On met 1 ml d'eau régale ( $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ , 1/3 V/V).

### III.6. Analyse des métaux traces et du fer dans les sédiments

L'analyse des ETM dans les sédiments a été effectuée par spectrométrie absorption atomique (SAA) au plateau technique de l'ENSSMAL (**Fig. 11**). Cette analyse nécessite une étape préliminaire de minéralisation, qui consiste à extraire les ETM de la matrice sédimentaire en la détruisant.



**Figure 11.** SAA Perkin Elmer Analyst 700 (plateau technique, ENSSMAL)

Diverses techniques de minéralisation existent, se basant sur les affinités des ETM avec les réactifs utilisés. Elles peuvent être classées en deux catégories principales : digestion humide et calcination sèche. Ces techniques peuvent être employées seules ou combinées.

Dans cette étude, la minéralisation par digestion humide a été choisie. Elle utilise deux acides forts (acide nitrique et acide chlorhydrique) à chaud et sous pression. Cette méthode permet d'obtenir une récupération des métaux biodisponible.

#### III.6.1. La spectrométrie absorption atomique

La méthode utilisée dans cette étude est la spectrométrie d'absorption atomique (SAA), permettant de doser environ soixante éléments à l'état de traces. Cette technique quantitative est sensible, fiable et comparative, nécessitant un étalonnage.

La spectrophotométrie d'absorption atomique est une méthode d'analyse largement utilisée, comme le soulignent **Forstner et Salomons (1980)**, et considérée comme bien adaptée, selon **Boust (1981)**, et recommandée par des experts pour le dosage des métaux traces, comme indiqué par **Asso (1982)**. De plus, d'après **Lajunen (1992)**, cité dans **Alloway et Ayres (1997)**,

cette méthode est principalement employée pour évaluer les niveaux de concentration en métaux traces dans l'environnement.

Les métaux adsorbés sur les sédiments marins sont analysés par spectrophotométrie, d'absorption atomique à l'aide d'un appareil de type Perkin Elmer Analyst 700, tel que présenté dans la **figure 11**, conformément aux protocoles expérimentaux décrits par **Charlou et Joanny (1983)** et **U.N.E.P/I.A.E. A (1985 a et b et 1986)**. Les principes, la description de la technique d'analyse et les composants du spectrophotomètre utilisé sont inspirés des travaux de **Pinta (1979)** et de **Perkin-Elmer (1982)**.

#### **a. Avantages**

Il s'agit d'une méthode très sélective (avec des interférences spectrales inexistantes ou bien connues), bien documentée, et relativement simple à utiliser à condition de savoir préparer les solutions initiales.

#### **b. Limites**

Les concentrations doivent être à l'échelle de traces pour respecter le domaine de Beer-Lambert. Le caractère non qualitatif de la technique exige de connaître les éléments présents en solution afin de choisir une source adaptée. Enfin, les réglages préliminaires reposent sur des paramètres souvent interdépendants.

#### **c. Principe**

L'absorption atomique se produit lorsqu'un atome à l'état fondamental absorbe de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique, le faisant passer à un état excité correspondant à une longueur d'onde spécifique. Une source de rayonnement discrète émet des radiations dont la longueur d'onde correspond à la différence d'énergie entre l'état fondamental et un état excité des atomes de l'échantillon à analyser. L'échantillon est ensuite atomisé par une flamme ou un four en graphite. Le rayonnement traverse l'atomiseur et est partiellement absorbé. Le rayonnement non absorbé passe ensuite par un monochromateur avant d'atteindre un photodétecteur et un système de traitement des données. L'absorption mesurée est une fonction linéaire de la concentration de l'analyte. L'équation de l'absorbance **A** d'un rayonnement monochromatique est une des expressions de la loi de Beer-Lambert et s'écrit comme suit :

$$\text{Équation 11 : } A = \epsilon bc$$

Où

**$\epsilon$**  : est un facteur constant appelé coefficient d'absorption,

**$b$**  : est la longueur du trajet d'absorption dans le milieu et

**$c$**  : est la concentration de l'espèce absorbante (**Brokaert, 2005**).

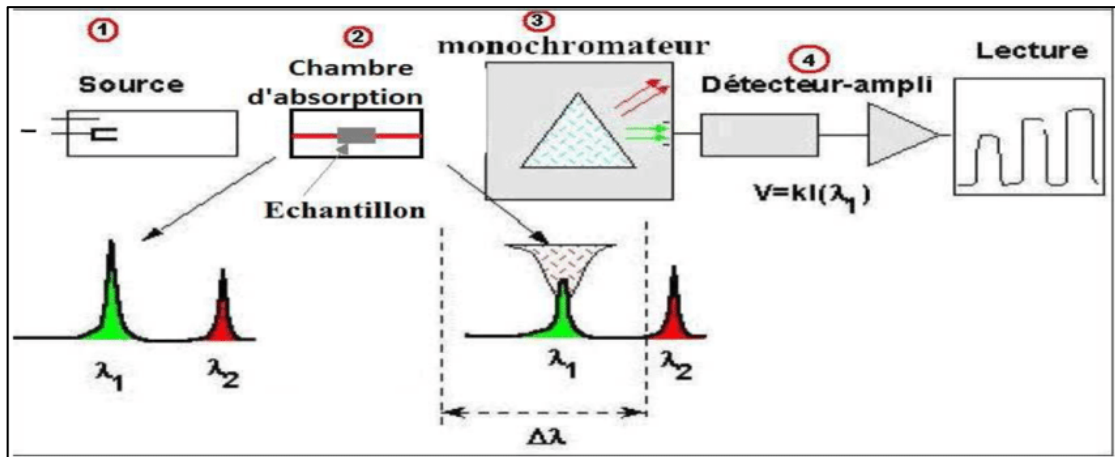


Figure 12. Instruments de base pour la spectrométrie d'absorption atomique (Source : Pradyt, 2004).

### III.6.2. Assurance Qualité

#### a. Répétabilité

Pour évaluer la fidélité de la SAA dans les conditions opératoires adoptées, trois analyses ont été effectuées pour chaque échantillon afin d'obtenir trois concentrations distinctes, permettant ainsi de calculer une moyenne et un écart-type.

Les lectures réalisées pour chaque métal sur le même échantillon démontrent une bonne répétabilité, avec un écart-type ne dépassant jamais 5%.

#### b. Reproductibilité ou contrôle de la qualité d'analyse

Dans le but d'améliorer la précision des résultats et de contrôler les conditions opératoires en laboratoire (produits chimiques, équipement, protocole, manipulation), l'échantillon d'intercalibration doit être utilisé.

Deux répliques de cet échantillon **AIEA 433** suivent les mêmes procédures expérimentales que les échantillons analysés. Cela permet de calculer la différence entre la moyenne des valeurs mesurées et la moyenne fournie par l'AIEA.

**NB. Dans la présente étude. L'incertitude des résultats n'a pas été vérifiée à cause du manque de l'échantillon d'intercalibration.**

Équation 12 :  $\Delta (\%) = (Valeur\ trouvée - valeur\ de\ référence) / (valeur\ de\ référence) * 100$

D'après le taux de variation  $\Delta (\%)$ , trois cas sont à distinguer ;

Si  $-10 \leq \Delta (\%) \leq 10$ , aucune correction n'est à apporter.

Si  $\Delta (\%) < -10$ , cas de perte.

Si  $\Delta (\%) > 10$ , cas de contamination.

### III.6.3. Calcul des concentrations des métaux dans les sédiments

Dans le sédiment, la concentration de l'élément métallique est calculée par la formule suivante (AIEA, 2001) :

$$\text{Équation 13 : } C = ((Cd - Cb) * V * F) / P$$

**C** : Concentration du métal dans le sédiment (ng/g) ;

**Cd** : Concentration du métal présent dans l'analyte (ng/ml) ;

**Cb** : Concentration du métal présent dans le blanc (ng/ml) ;

**V** : Volume de la solution finale après minéralisation ;

**F** : Facteur de dilution ;

**P** : Poids sec corrigé de l'échantillon de sédiment minéralisé (g).

### III.6.4. Calcul du poids sec corrigé de sédiment

Le poids du sédiment utilisé pour la minéralisation des échantillons ne représente pas le poids sec réel en raison de la rétention des particules d'eau par le sédiment pendant la période entre la lyophilisation et l'analyse. Par conséquent, la correction du poids est effectuée en calculant le taux d'humidité. Celui-ci est calculé selon la formule suivante (AIEA, 2001) :

$$A (\%) = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

**A** : Taux d'humidité (%).

**P<sub>1</sub>** : Poids du sédiment dans la coupelle (g)

**P<sub>2</sub>** : Poids du sédiment dans la coupelle après 24 heures à 105 °C (g).

Ainsi le poids sec corrigé est calculé par la formule suivante (AIEA, 2001) :

$$\text{Équation 16 : } Pc = P - \left[ \left( \frac{A(\%)}{100} \right) * P \right]$$

**Pc** : Poids de l'échantillon corrigé (g).

**P** : Poids de l'échantillon pesé pour la minéralisation (g).

**A** : Taux d'humidité (%).

### III.6.5. Calcul des concentrations corrigées des métaux dans le sédiment

En se basant sur l'écart calculé lors de l'analyse de l'échantillon de référence AIEA-433, des ajustements ont été apportés aux valeurs obtenues par l'analyse, que ce soit en cas de perte ou de contamination. La correction est effectuée selon la méthode suivante (**Asso, 1982**) :

$$\text{Équation 17 : Valeur corrigée} = \frac{(\text{valeur trouvée})}{1 \pm \left(\frac{\Delta(\%)}{100}\right)}$$

### III.7. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques.

La granulométrie est un procédé d'analyse qui permet d'étudier la répartition des sédiments et le pourcentage des gains consistant le sédiment marin.

L'étude granulométrique des particules permet de déterminer la taille des grains du sédiments, ce qui permet d'estimer sa capacité d'adsorption des métaux et des substances organiques. Elle permet aussi d'estimer la quantité de matières en suspension et la quantité de matières sédimentées lorsque des travaux de dragage sont effectués.

#### III.7.1. Domaine d'application

Cette méthode est utilisée pour déterminer la granulométrie dans les sols, les sédiments et les déchets solides. Le domaine d'application se situe entre 40 µm et 2 000 µm

#### III.7.2. Principe et théorie

##### a. Méthode par tamis :

Une portion d'échantillon est séchée et séparée par vibration sur une série de tamis superposés. Par la suite, le contenu de chaque tamis est pesé et la fraction d'échantillon recueillie par tamis est rapportée sur la quantité d'échantillon totale.

##### b. Mode opératoire

- Peser tous les tamis et la base.
- Monter la série de tamis en commençant par le bas dans la séquence suivante : base, tamis de (40 µm), de (63 µm), de (100 µm), de (160 µm), de (200 µm), de (250 µm), de (315 µm) et de (400 µm), de (500 µm), de (630 µm), de (800 µm), de (1000µm) et de (2000µm).
- Déposer les échantillons dans des boites de pétri en verre ;
- Séchage à 105 °C pendant 24h dans une étuve
- Prélèvement 200g de sédiment de chaque échantillon comme poids initial ;
- Faire passer sous un courant d'eau « robinet » dans un tamis de 40 µm de diamètre afin de soustraire la fraction fine ;
- Remettre les échantillons dans l'étuve à 105°C pendant 24h ;

- Peser deuxième fois ;
- Tamiser mécaniquement sur une tamiseuse électrique pendant 10 minutes ;
- Peser le refus de chaque tamis ;

### III.7.3. Présentation des résultats

Les résultats de la granulométrie sont présentés sous forme d'un tableau qui montre les différentes fractions (sable, limon...) selon la norme **ISO14688-1:2017**.

### III.7.4. La fraction pélitique

L'étude de la fraction fine consiste, d'abord à évaluer pour chaque échantillon, le pourcentage de cette fraction fine inférieure à 40 µm :

$$\text{Équation 14 : } Pp (\%) = [(P1-P2) / P1] * 100$$

**(PP)** : pourcentage des pélites.

**(P1)**: poids initial (g).

**(P2)**: poids final (g)

C : fraction de l'échantillon sur un tamis (%);

A : poids du tamis avec fraction (g);

B : poids du tamis vide (g);

D : poids d'échantillon total utilisé (g).

## III.8. Évaluation de la contamination et des risques écologiques des métaux

### Traces dans les sédiments

#### ➤ Fond géochimique

Une première étape dans l'évaluation de l'impact de la pollution des sédiments et du niveau de contamination d'une zone donnée consiste à sélectionner un fond de référence ou un échantillon de référence de composition métallique connue.

La mer Méditerranée est une zone où les sédiments ont une composition géochimique différente : les concentrations de métaux varient selon la zone et les différents apports du milieu côtier (**Buccolieri et al., 2006**). Le substrat géologique est la principale source naturelle d'espèces chimiques inorganiques dans l'écosystème (**Gasparon et Matschullat, 2006**), et différents facteurs, tels que la topographie et l'hydrologie du bassin versant, le climat et l'emplacement géographique, déterminent la libération de produits chimiques inorganiques dans l'environnement (**Morelli et al., 2012**). Cependant, les activités anthropiques peuvent introduire de grandes quantités de ces éléments dans la zone côtière, ce qui rend parfois difficile la différenciation des composants naturels des composants anthropiques (**Belhadj et al., 2017**). L'approche courante utilisée pour estimer l'impact anthropique sur la chimie des sédiments consiste à comparer la teneur en métaux d'un échantillon de sédiments avec le

schiste, la croûte continentale supérieure et les sédiments à grains fins (Guo et Yang, 2016). Si les valeurs moyennes de la croûte ou des schistes sont faciles à utiliser, on sait aussi qu'elles ne représentent pas correctement le substrat géologique local (Viers et al., 2009).

Pour l'évaluation de la contamination, compte tenu des caractéristiques minéralogiques et physico-chimiques de la zone d'étude qui peuvent impliquer un enrichissement ou un appauvrissement naturel pour certains éléments chimiques, l'utilisation des niveaux de fond mesurés dans les sédiments non contaminés de la même zone d'échantillonnage est préférable à la composition moyenne de la croûte (Abraham et Parker, 2008). De nombreuses études ont utilisé les niveaux profonds non pollués des carottes pour représenter la composition géochimique naturelle des sédiments (Guo et Yang, 2016 ; Morelli et al., 2012 ; Orani et al., 2019 ; Romano et al., 2018). Par conséquent, le fond géochimique établi par Aroua et al. (2023) est pris pour le calcul des différents indices d'évaluation de la pollution dans notre étude. Ces valeurs de fond local constituent une étape cruciale dans l'évaluation de la contamination des sédiments par les métaux traces et dans la quantification de l'impact humain sur l'écosystème dans l'embouchure de l'Oued Beni Messous.

Différents paramètres peuvent être calculés pour évaluer l'influence anthropique sur la teneur en éléments traces des sédiments. Ils sont basés sur la conversion des résultats analytiques en larges bandes descriptives de pollution allant de faible à forte intensité (Tomlinson et al. 1980 ; Salomons and Förstner, 1984 ; Chester and Stoner 1973 ; Håkanson, 1980). Dans ce travail, trois paramètres largement utilisés ont été évalués : les facteurs de contamination (FC) (Håkanson, 1980) et d'enrichissement (EF) (Chester and stoner, 1973), et l'indice de charge polluante (PLI ; Tomlinson et al., 1980). Lorsque le calcul de ces paramètres est appliqué à des carottes sédimentaires, il est possible d'évaluer d'éventuelles différences historiques liées à l'époque moderne. En fonction de la valeur obtenue pour tous ces indices, l'importance de la contamination et/ou de l'enrichissement des échantillons peut être classifiée, comme déjà rapporté dans de nombreuses études.

### III.8.1. Facteur de contamination (FC)

Le facteur de contamination (CF) est le rapport obtenu en divisant la concentration de chaque métal dans le sédiment par ses valeurs de fond (Håkanson, 1980) :

Le facteur de contamination (FC) qui est calculé selon l'équation suivante sera employé dans le calcul de PLI :

$$FC = \frac{\text{teneur de métal mesurée}}{\text{teneur de référence}} \quad \text{Eq19}$$

### III.8.2 Facteur d'enrichissement

Le facteur d'enrichissement (EF) est fréquemment utilisé pour identifier les métaux provenant de sources anthropiques et naturelles. Le FE peut être exprimé comme suit (**Sinex and Helz, 1981**) :

$$EF = \frac{(C_n/C_{Fe})_{\text{sediment}}}{(C_n/C_{Fe})_{\text{reference}}} \quad \text{Eq20}$$

Où  $(C_n/C_{Fe})$  est le rapport des concentrations mesurées de métaux traces dans les sédiments par les valeurs de fond géochimique. Dans cette étude, le fer (Fe) a été utilisé comme traceur conservateur (**Schiff and Weisberg, 1999**). Sept classes d'enrichissement basées sur les valeurs de EF (**Chen et al., 2007**) ont été considérées (Tab.12):

**Tableau 8:** niveau d'enrichissement métallique en fonction des valeurs de l'indice (Igeo).

| Valeur de FE | Niveau d'enrichissement            |
|--------------|------------------------------------|
| EF < 1       | Pas d'enrichissement (négligeable) |
| EF < 2       | Enrichissement mineur              |
| 2 < EF < 5   | Enrichissement modéré              |
| 5 < EF < 10  | Enrichissement modérément sévère   |
| 10 < EF < 25 | Enrichissement sévère              |
| 25 < EF < 50 | Enrichissement très sévère         |
| EF > 50      | Enrichissement extrêmement sévère  |

### III.8.3 Indice de la charge polluante (PLI)

L'indice de la charge polluante (PLI) introduit par **Tomlinson et al. (1980)**, constitue un moyen simple et comparatif d'évaluer la toxicité des matières en suspension (MES) et des sédiments contaminés par plusieurs métaux pour chaque site.

$$PLI = \sqrt[n]{CF1 \times CF2 \times CF3 \times \dots \times CFn} \quad \text{Eq21}$$

$$\text{Avec } CF = C_n/B_n$$

Où CF est le facteur de contamination (**Hakanson, 1980**), Cn est la concentration en métaux traces et Bn est la valeur de fond géochimique, Ainsi, une valeur de  $PLI > 1$  suggère que le site est contaminé, alors qu'un  $1 \leq PLI$  indique une absence de pollution (**Arienzo et al., 2020 ; Guendouzi et al., 2021**).

## **RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

## Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre IV, les concentrations moyennes et les cartes de répartition des éléments traces et majeurs dans les sédiments de surface situés à l'embouchure de l'oued Beni Messous seront exposés et discutés. Ainsi, dans ce chapitre, les résultats et les cartes de la distribution granulométrique, de la matière organique, des carbonates de calcium, et de l'humidité dans les sédiments seront analysés et employés dans la discussion du comportement des différents métaux analysés dans les sédiments superficiels.

Ensuite, Trois d'indices seront appliqués aux résultats des analyses chimiques (Facteur de contamination, facteur d'enrichissement et indice de la charge polluante) afin d'évaluer la qualité environnementale des sédiments de l'embouchure de l'oued Beni Messous.

### IV.1. La Granulométrie

L'analyse granulométrique par tamisage a pour objectif de mesurer la distribution de la taille des particules d'un échantillon de sol ou de sédiment. L'identification des différentes familles granulométriques (Fraction) qui constituent ces échantillons permet par ailleurs de déterminer sa texture.

Cette représentation de la taille des grains permet l'identification des différentes fractions granulométriques qui constituent l'échantillon de sédiment analysé selon la norme utilisée (ISO-14688). Les pourcentages des fractions obtenus pour les échantillons de sédiment sont rassemblés dans le Tableau 9. Le fractionnement granulométrique montre que celui-ci se partage en 3 fractions granulométriques majeures : Limon (2-63  $\mu\text{m}$ ), Sable fin (63-200  $\mu\text{m}$ ), sable moyen (200-630  $\mu\text{m}$ ) et sable grossier (630-2000  $\mu\text{m}$ ) et présente une variation dans la zone d'étude.

Cette variation dans la texture des sédiments dans La zone peut être expliquée par la nature des apports charriés par l'Oued beni messousi et l'hydrodynamisme affecte la répartition et la taille des grains des sédiments marins (**Liu et al., 2011**).

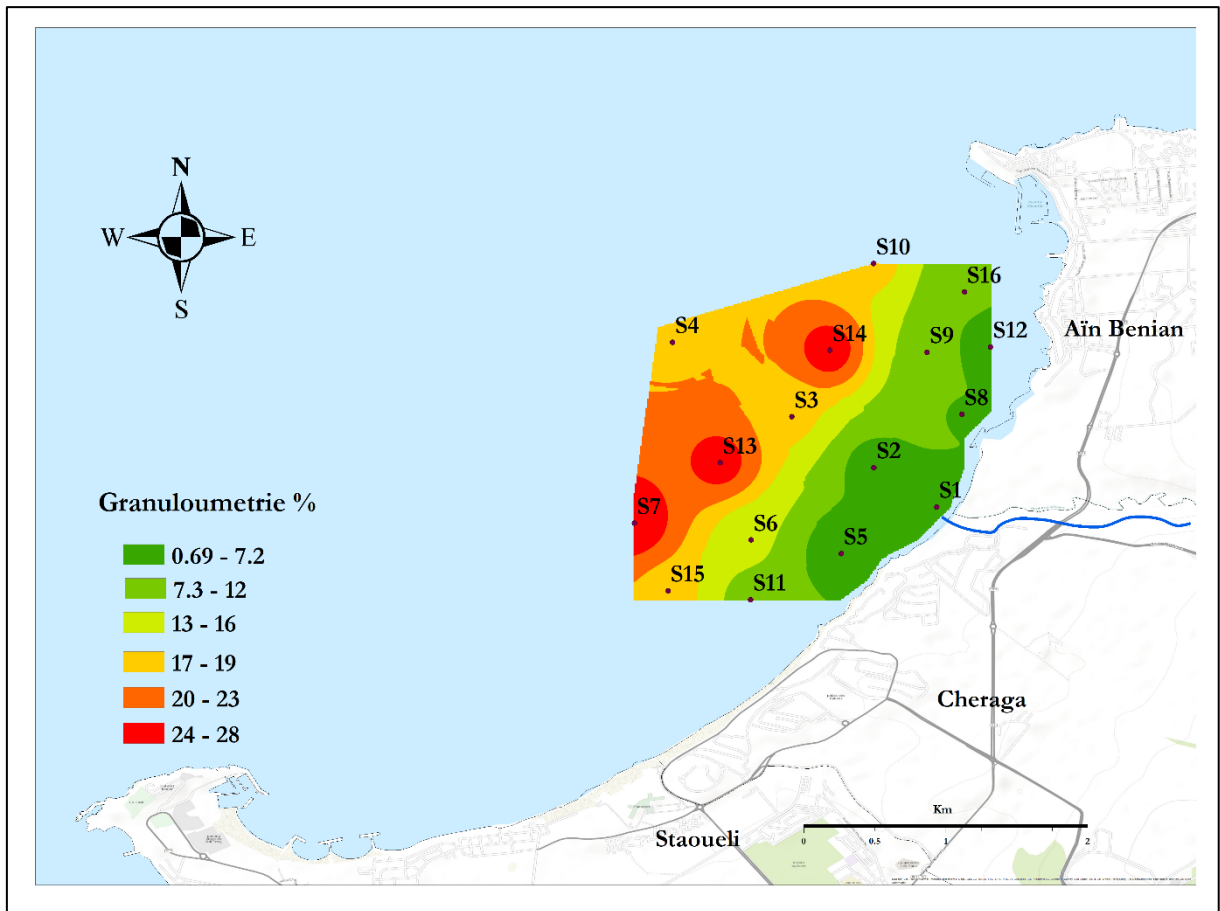
Selon les proportions de ces fractions granulométriques, la texture du sédiment peut être qualifiée de sableuse, limoneuse ou argileuse. Dans ce contexte, les résultats montrent que la fraction sableuse (sable fin) était prédominante dans toute la zone d'étude et représente plus

de 67 %. Vient ensuite le limon, avec un pourcentage massique moyen de 13.4 %, alors que le sable grossier forme la plus petite fraction dans les sédiments avec un pourcentage moyen de 0.16 %. Les résultats obtenus dans Figure 13 montrent que les pourcentages moyens des fractions granulométriques suivait l'ordre : Sable fin (79.76%) > limon (13.4%) > sable moyen (4.32%) > sable grossier (0.16%).

En détail, les sédiments de l'embouchure de l'oued sont donc dominées par le sable fin qui variait entre 67% (S7) à 90.14% (S10) de la fraction totale. D'autre part, la fraction limoneuse (limon) est abondante dans les stations S7 (28%), S13 (26.08%) et S14 (26.79%) (Figure 13). Ces résultats indiquent une stabilité dans l'environnement de dépôt des particules dans la zone d'étude (**Li and Li, 2017**). En plus, les sédiments dominés par des particule fine peuvent fournir de grandes zones réactives et des sites de liaison pour la sorption des métaux (**Elliott et al., 2012 ; Murray et al., 1999 ; Tam et Wong, 2000**) et ils peuvent jouer un rôle important dans la répartition des métaux et les paramètres de sédiments comme la matière organique (**Gao et al., 2015**).

**Tableau 9:** La fraction de classification granulométriques

| Les Stations | Sable grossier (%) | Sable Moyen (%) | Sable fin (%) | Limon (%) |
|--------------|--------------------|-----------------|---------------|-----------|
| Moyenne      | 0.16               | 4.32            | 79.76         | 13.4      |



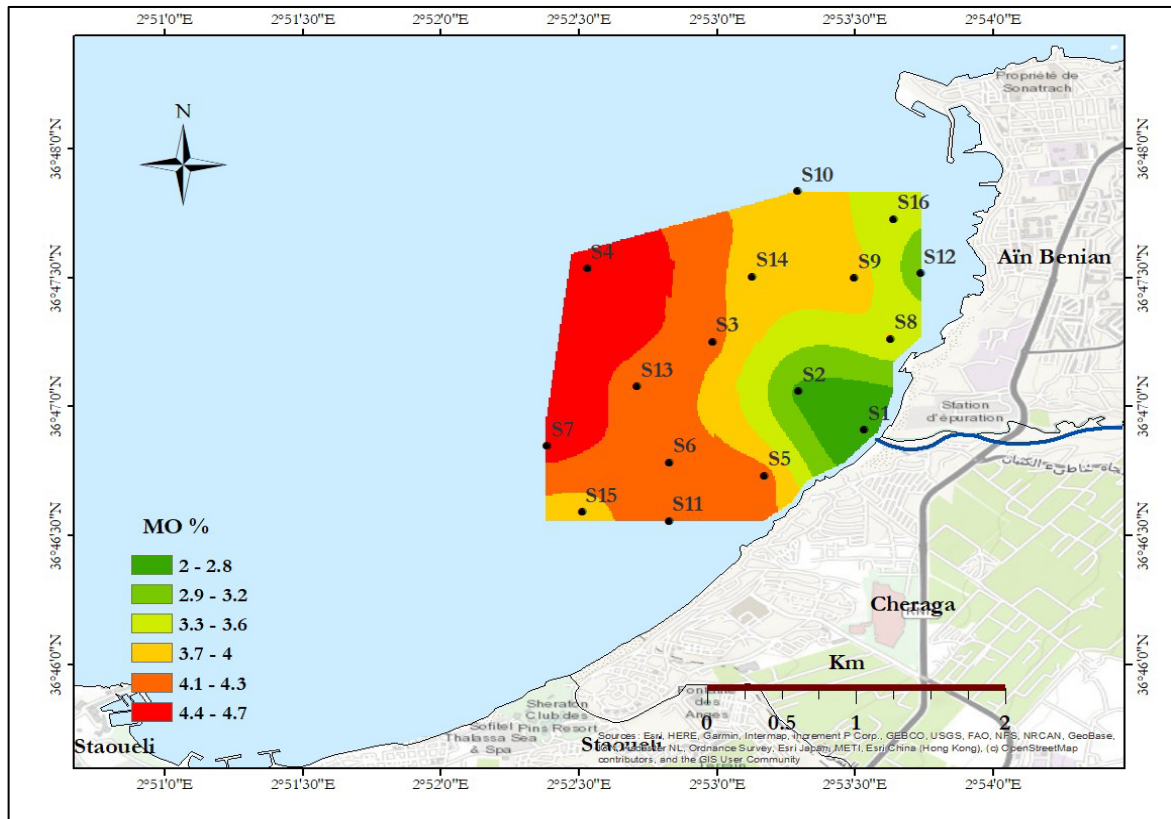
**Figure 14.** Distribution spatiale du taux de limon (%) au niveau de l'embouchure de l'Oued Beni Messous.

## IV.2. La matière organique (MO)

La matière organique (MO) est l'une des composantes du sédiment marin. Elle provient des ressources autochtone (production interne) et allochtone (origine continentale et/ou anthropique) (**Dahane, 2017**). La MO ne constitue qu'un faible taux du sédiment, mais elle joue un rôle fondamental dans le comportement de certains composés (ex. métaux traces), puisqu'elle régule la mobilité et la biodisponibilité d'un grand nombre de, contaminants (**Power et Chapman, 1992**). Ainsi, la matière organique avec une gamme de ligands ou de groupes Thèse Les métaux traces dans les sédiments des côtes Algériennes : Comportement géochimique et influence continentale fonctionnels actifs (par exemple,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{CH}_2$  et  $\text{C}=\text{O}$ ) peut agir comme un donneur de protons (**Aiken et Leenheer, 1993 ; Kyziol et al., 2006**), piégeant les cations métalliques via la formation de chélates hautement stables ou complexes de sphère interne (**Bradl, 2004 ; Senesiet al., 1986**). Cette forte capacité de complexation et

d'adsorption des ions métalliques fait de, la matière organique un important puits de métaux dans les sédiments (**Du Laing et al., 2009**).

Afin de déterminer l'influence de ce paramètre sur la répartition des métaux, les teneurs en MO dans les sédiments de surface ont été estimées et présente dans la figure 13.



**Figure 15.** Distribution spatiale du taux de MO% au niveau de l'embouchure beni messous.

Les teneurs en matière organique dans les sédiments superficielle après calcination à 550°C sont faible dans toutes les stations. Le taux de la MO variée entre 2 et 4,7 %, avec une moyenne  $3,75 \pm 0,68$ , et une accumulation de la MO plus élevée dans les stations situés au large de l'embouchure.

Cette distribution qui suit une pente raide (côte-large) a été mise en évidence dans les travaux **d'Inal (2020)**. Cela démontre le rôle crucial que joue la bathymétrie dans la distribution de la matière organique, car les sédiments profonds seraient différents de ceux trouvés dans les zones les plus côtières en apparence (**Leclaire, 1972**). Ainsi, cette répartition de la matière organique est contrôlée par la granulométrie. Cependant, dans Le bassin versant, les sédiments sableux sont caractérisés par un taux faible en matière organique entre 2 et 4,50

% . La station S7 a enregistré le taux le plus élevé en MO (4,7 %), tandis que la station S1 présente le taux le plus faible de MO (2%). La fraction fine (limon) présente un pourcentage élevée dans les stations situées au large . Ce pourcentage élevée du limon correspond à une forte teneur en matière organique.

Les zones côtières caractérisées par une haute productivité et un taux de sédimentation élevé résultant des apports directs des fleuves constituent un véritable piège de la matière organique (**Cauwet, 1985**). La fluctuation du taux de la matière organique varie faiblement avec une homogénéité dans toutes les stations .

D'autre part, la figure 13 montre que les teneurs en matière organique sont faible dans l'ensemble de la zone, conséquence de la présence d'une station dépuration (seeal) qui diminue la charge organique (pollution urbain) transporté par l'Oued de Beni Messous vers la mer.

#### **IV.4. Les Carbonates de calcium (CaCO<sub>3</sub>) dans les sédiments**

Le contexte de l'étude sur la variation des carbonates de calcium dans les sédiments marins repose sur le fait que ces carbonates (**Berger, W.H., and L.D. Keir (1984)**) jouent un rôle vital dans les processus géologiques et biogéochimiques. Leur importance réside dans leur capacité (**Broecker, W.S., and T. Takahashi (1978)**) à enregistrer les conditions environnementales passées et à influencer la composition chimique de l'eau de mer (**Milliman, J.D. (1993)**). Comprendre cette variation est essentiel pour évaluer les changements environnementaux (**Zeebe, R.E., and D.A. (Wolf-Gladrow (2001))**), les cycles biogéochimiques et les réponses des organismes marins dans un contexte évolutif et géologique (**Ridgwell, A., and R.E. Zeebe (2005)**).

Les principaux minéraux carbonatés couramment présents dans les sédiments marins incluent la calcite (CaCO<sub>3</sub>), l'aragonite (CaCO<sub>3</sub>), la dolomite (CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), le carbonate de sodium (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.10H<sub>2</sub>O) et la sidérite (FeCO<sub>3</sub>) (**Hlaváčková, 2005**). La calcite et l'aragonite se distinguent par leur solubilité respective. Ainsi, les sédiments marins sont principalement composés de calcite, car l'aragonite se dissout rapidement (**Purser, 1980**). Ces carbonates, ainsi que les argiles, les oxydes, les hydroxydes et la matière organique, représentent les principales phases contenant des métaux traces dans les sédiments. De plus, ils constituent

les fractions de sédiments les plus biodisponibles pour les espèces aquatiques, comparativement à celles enfermées dans la matrice cristalline des minéraux (Benoit, 2005).

En milieu légèrement basique, la surface spécifique des particules carbonatées facilite la rétention des ions métalliques par des processus tels que la précipitation, la co-précipitation et l'absorption (Alloway, 1995). Dans ces conditions, les ions métalliques se stabilisent sous forme de carbonates et d'hydroxy-carbonates (Cazalet, 2012).

Les teneurs en carbonates dans les 16 stations, illustrées dans la figure 16 correspondante, montrent des variations notables dans la zone étudiée, allant de 15,51% à 34,48% (Voir Figure 16). La concentration moyenne de  $\text{CaCO}_3$  dans les 16 stations est de 32,24%. La station 5 présente le pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  les plus élevés à l'embouchure de l'Oued Beni Messous, avec une moyenne de 34,48%, tandis que la station 1 présente le pourcentage les plus faible, avec une moyenne de 15,51%.

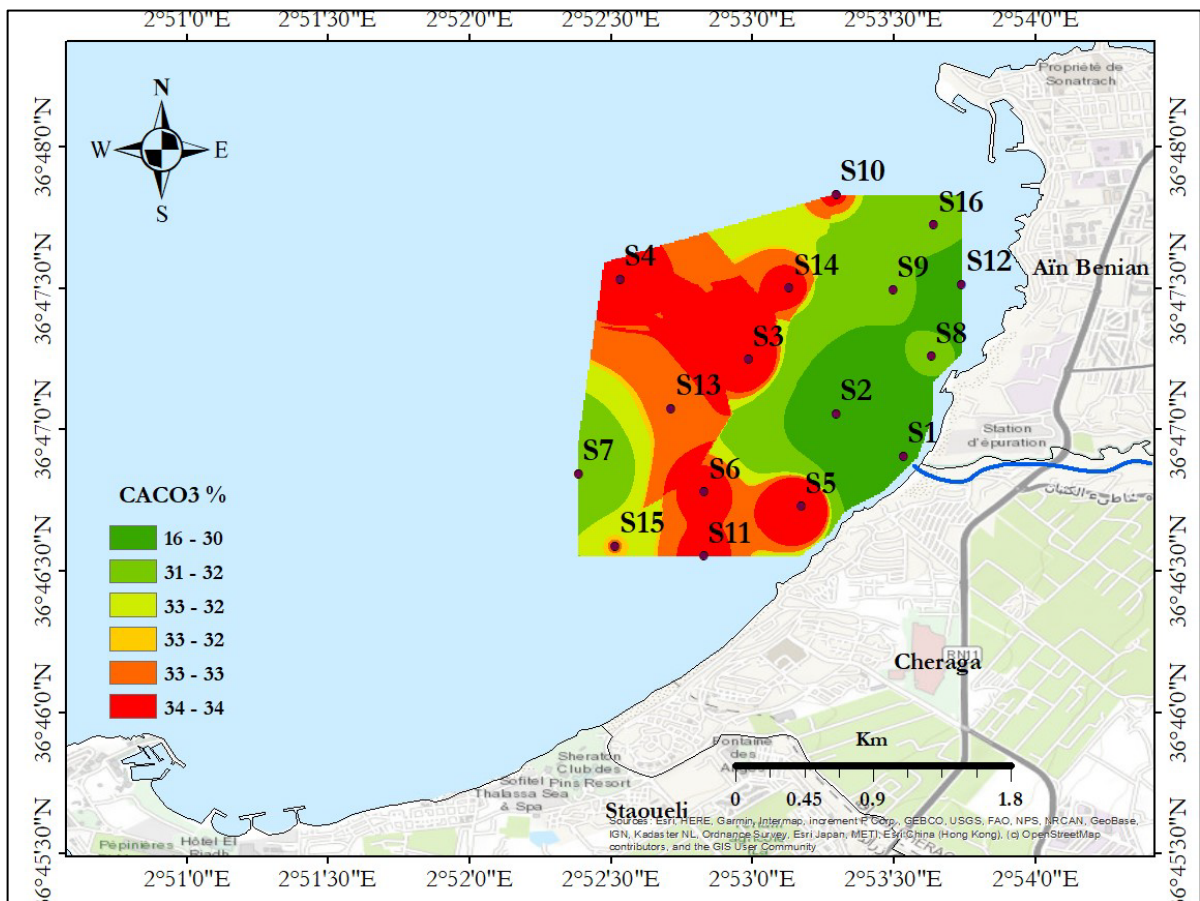


Figure 16. Distribution spatiale de  $\text{CaCO}_3\%$  au niveau de l'embouchure de Beni Messous.

L'ordre décroissant des teneurs moyennes de  $\text{CaCO}_3$  dans la zone est le suivant :

S5 (34,48 %) > S3 > S6 > S11 > S14 > S4 > S10 > S13 > S15 > S16 > S8 > S9 > S7 > S2 > S12 > S1 (15,51 %).

Les stations 2, 7, 9, 8, 16, 15, 13, 10, 4, 14 et 11 présentent des teneurs en carbonate comprises entre 20 et 30 %. Ces valeurs indiquent une présence modérée de carbonate dans ces sédiments.

Les stations 12, 6, 3 et 5 présentent les teneurs en carbonate les plus élevées, avec des valeurs supérieures à 30 %. Cela suggère que ces sédiments sont riches en carbonate, ce qui pourrait s'expliquer par la présence de coquilles ou d'autres organismes marins.

Les résultats du tableau montrent que la teneur en carbonates varie considérablement dans la zone de l'embouchure. L'apport significatif en carbonates peut également provenir de sources internes (biogéniques), comme les organismes benthiques ou planctoniques **(Schneider et al., 2000)**.

En revanche, les valeurs faibles et relativement constantes de  $\text{CaCO}_3$  dans les stations suggèrent une origine autochtone des carbonates, dérivant des débris exosquelettiques d'espèces benthiques et pélagiques (telles que les foraminifères, les mollusques, les échinodermes, et les crustacés), dont la structure est composée de carbonate de calcium. Ces systèmes à base de  $\text{CaCO}_3$  se trouvent souvent dans les sédiments sous forme amorphe, qui se transforment ensuite en calcite ou en aragonite **(Ajili et Bouri, 2018)**. Ces variations peuvent s'expliquer par différents facteurs, tels que la composition géologique de la zone, les courants marins, et l'activité des organismes marins.

Des recherches supplémentaires seraient nécessaires pour approfondir la compréhension des facteurs influençant la distribution des carbonates dans la zone d'étude. Ces investigations pourraient inclure les courants marins et l'identification des organismes marins présents dans la région.

## IV.5. Les éléments traces métalliques (ETM)

Les matériaux érodés résultant de l'altération continentale sont principalement transportés vers les zones côtières par les cours d'eau (**Martin et Whitfield, 1983**). Ainsi, ces apports de particules fluviales peuvent influencer considérablement la sédimentation des métaux du fond (**Radakovitch et al., 2008**). D'autre part, les métaux dissous peuvent s'associer aux particules marines dans les eaux côtières et s'incorporer rapidement dans les sédiments du fond (Hanson et al., 1983) ; Leur distribution et leur accumulation dans les sédiments sont influencées par la texture des sédiments, la composition minéralogique, l'état de d'oxydoréduction, les processus d'adsorption et de désorption et le transport physique. Les sédiments jouent un rôle majeur dans la détermination du schéma de pollution des systèmes aquatiques (**casas et al., 2003**) non seulement en tant que puits pour les métaux traces déposés après adsorption sur les particules en suspension ou les particules organiques fines, mais aussi en tant que source de pollution.

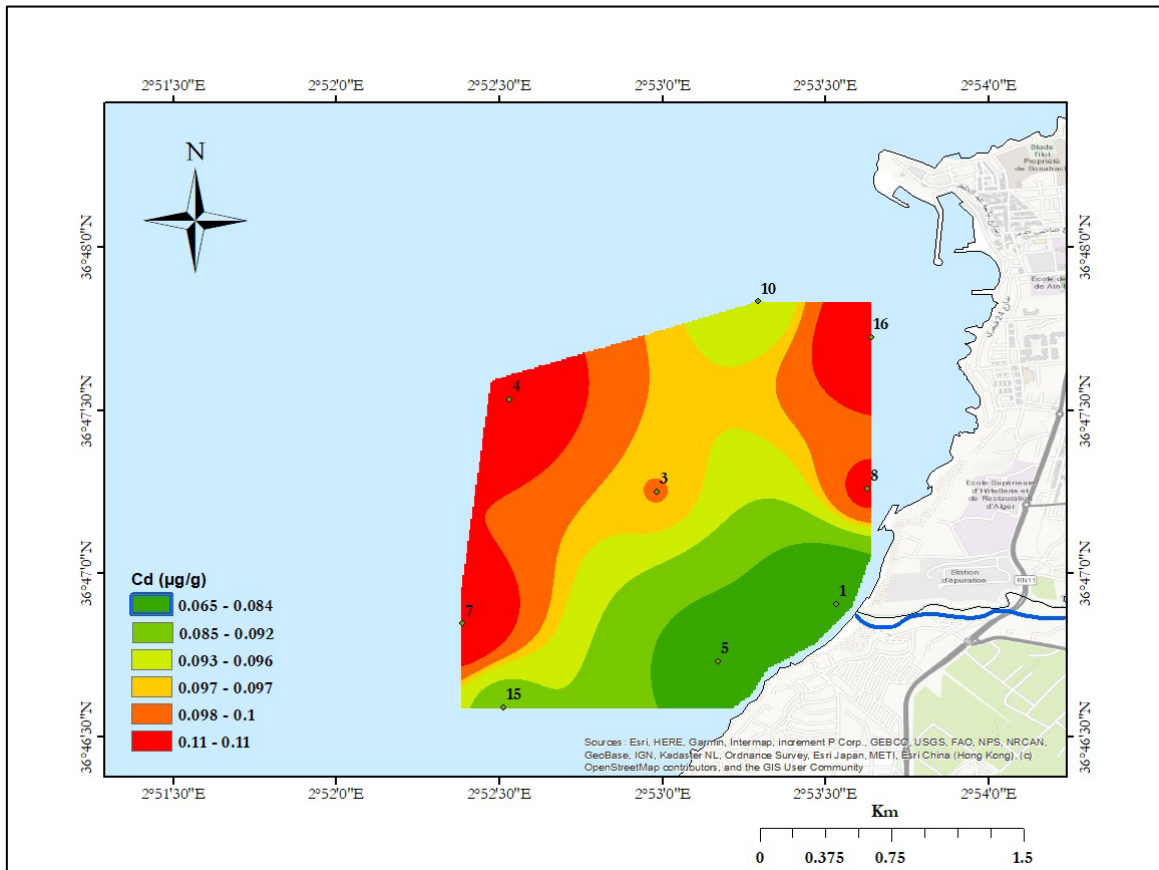
Pour mieux comprendre les schémas de distribution des métaux traces dans la zone de l'embouchure de l'Oued Beni Messous, 5 métaux traces (Cd, Pb, Zn, Cu ET Ni) et un élément major (Fe) ont été analysés par spectromètre d'absorption atomique (SSA). Ces analyses ont été présentés graphiquement et discutés dans la partie suivante :

### IV.5.1. Analyse du Cadmium (Cd)

Les concentrations du cadmium analysés dans les sédiments de l'embouchure de l'Oued Beni Messous sont présentés sur la figure 17. D'après les résultats. Les teneurs de Cd fluctuent considérablement dans la zone d'étude et variées entre 0,004 et 0,016 $\mu\text{g/g}$  avec une valeur moyenne de 0.007  $\mu\text{g/g}$  dans l'embouchure de l'Oued Beni Messous.

Comme pour la matière organique, Les teneurs les plus élevée en Cd sont enregistrée au niveau de la station S4 (0,016  $\mu\text{g/g}$ ) et S7 (0.014  $\mu\text{g/g}$ ). Ces résultats indiquent probablement que la matière organique a constitué un puits pour le cadmium dans le sédiment. En outre, Ces valeurs restent beaucoup plus naturelles et sont inférieures au fond géochimique établie dans les sédiments de la côte centrale (**Aroua et al., 2023**). Les métaux traces sont considérés comme des polluants graves des écosystèmes aquatiques en raison de leur persistance dans l'environnement, la toxicité et sa capacité à être incorporés dans les chaînes alimentaires

(Förstner et Wittman 1983). Les sédiments marins peuvent être un indicateur sensible pour la surveillance des tendances spatiales et temporelles des contaminants dans l'environnement marin (Larsen et Jensen, 1989 ; Kennish, 2001) le cadmium est largement utilisé, notamment dans les pigments, les piles alcalines ... etc. Cette utilisation contribue à augmenter sa concentration dans les sédiments (Sin et al., 2001)



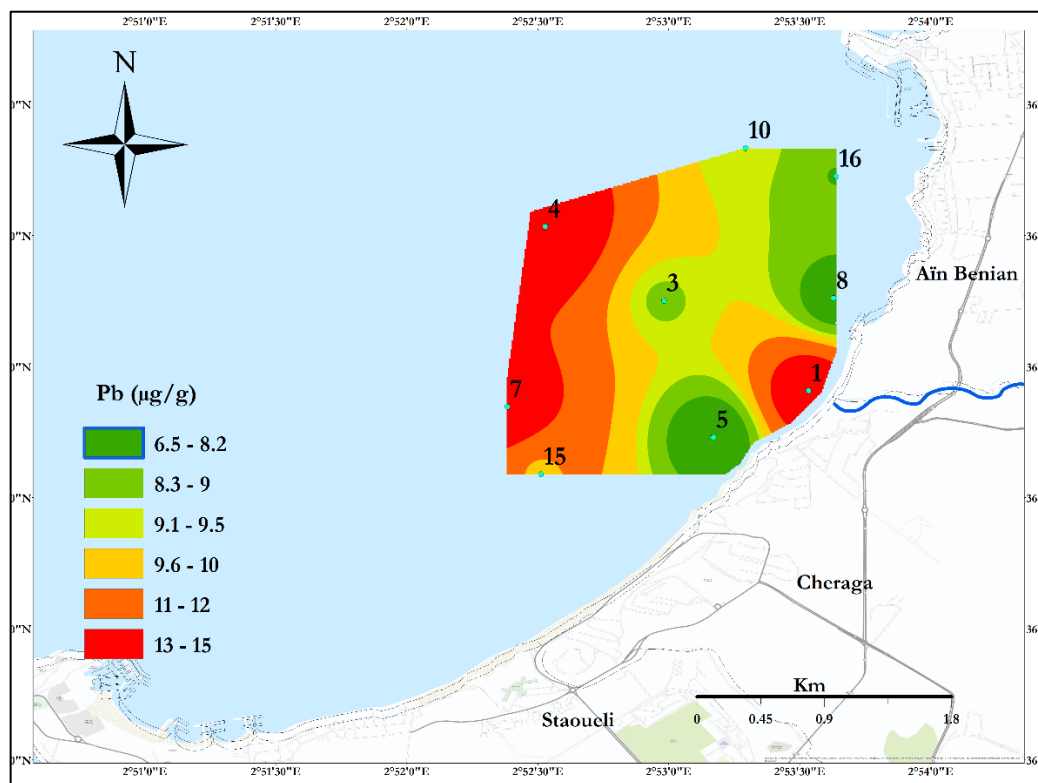
**Figure 17.** Distribution spatiale de cadmium Cd (mg/g) au niveau de l'embouchure Beni Messous

#### IV.5.2. Analyse du Plomb (Pb)

Le plomb est considéré comme l'un des contaminants associés aux dépôts atmosphériques (Frignani et al., 1997 ; Jiao et al., 2015), ainsi qu'à la combustion de produits dérivés du pétrole et au rejet d'effluents d'eaux usées (Laxen, 1983). Le plomb est également dérivé des activités de circulation (Han et al., 2006). En effet, le trafic routier entraîne d'intenses émissions de Pb provenant des eaux de ruissellement des routes et des gaz d'échappement des véhicules. (Mangani et al., 2005).

D'après la figure 18, Les teneurs en Pb sont relativement modérées. Elles se situent dans la gamme de concentration allant de 6,52  $\mu\text{g/g}$  (S5) à 15,13  $\mu\text{g/g}$  (S4) dans les sédiments avec une concentration moyenne de 10,23  $\mu\text{g/g}$ .

Comme pour le cadmium, le limon et la MO (4,7%), Les stations S4 et S7 affichent les valeurs les plus élevées en plomb (15,13  $\mu\text{g/g}$  et 14,08  $\mu\text{g/g}$ , respectivement) . Cela peut signifier que la concentration élevée en Pb dans les sédiments côtiers est en relation avec l'augmentation de la teneur en matière organique et l'abondance de particules fines (Salomons et al., 1984). Les valeurs trouvées dans notre étude sont tous inférieure au fond géochimique local (23,6  $\mu\text{g/g}$ ) (Aroua et al., 2023).



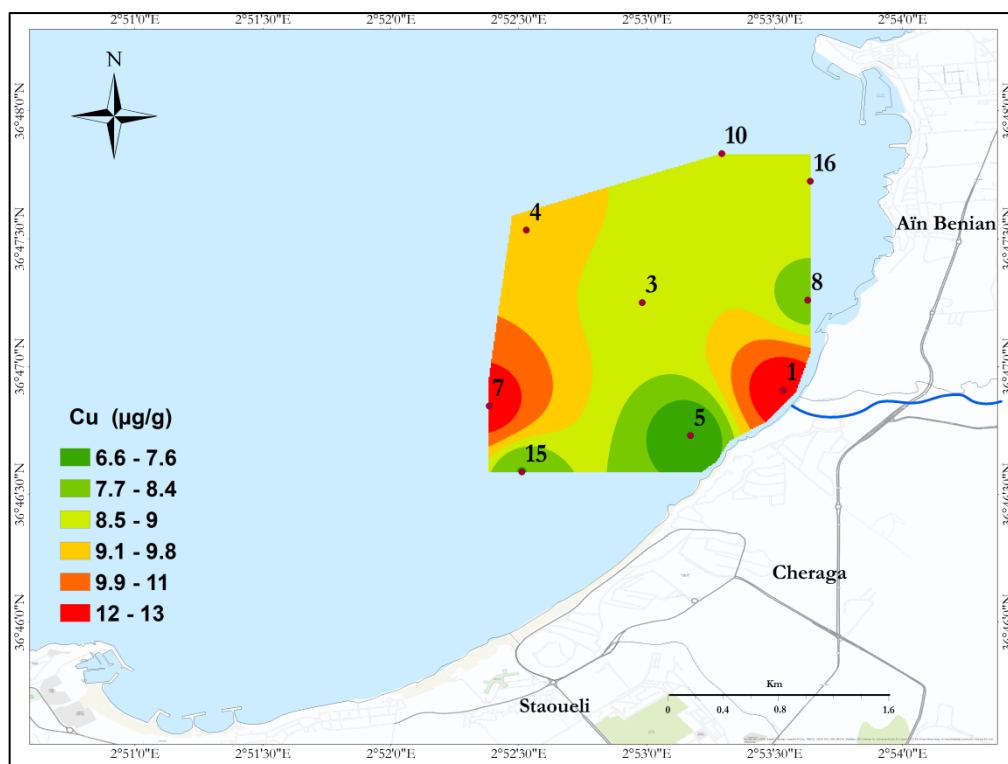
**Figure 18.** Distribution spatiale de plomb Pb (mg/g) au niveau de l'embouchure de Beni Messous.

Les sources potentielles du plomb dans la zone d'étude sont censées être les Engrais, les matières plastiques, les Pigments, les peintures, les Alliages et les soudures. (Biney et al.,1985).

### IV.5.3. Analyse du cuivre (Cu)

Les valeurs du cuivre dans les sédiments superficiels de la zone d'étude varient entre 6,61  $\mu\text{g/g}$  (S5) et 12,52  $\mu\text{g/g}$  (S7), avec une valeur moyenne de 8,85  $\mu\text{g/g}$  dans la baie d'Alger (Fig. 19).

Les sources anthropiques de cuivre dans les eaux côtières peuvent comprendre les rejets de déchets municipaux (Kennish, 1996) et les effluents agricoles dont le cuivre sert d'indicateur de l'intensité des émissions agricoles (Sun et al., 2012).



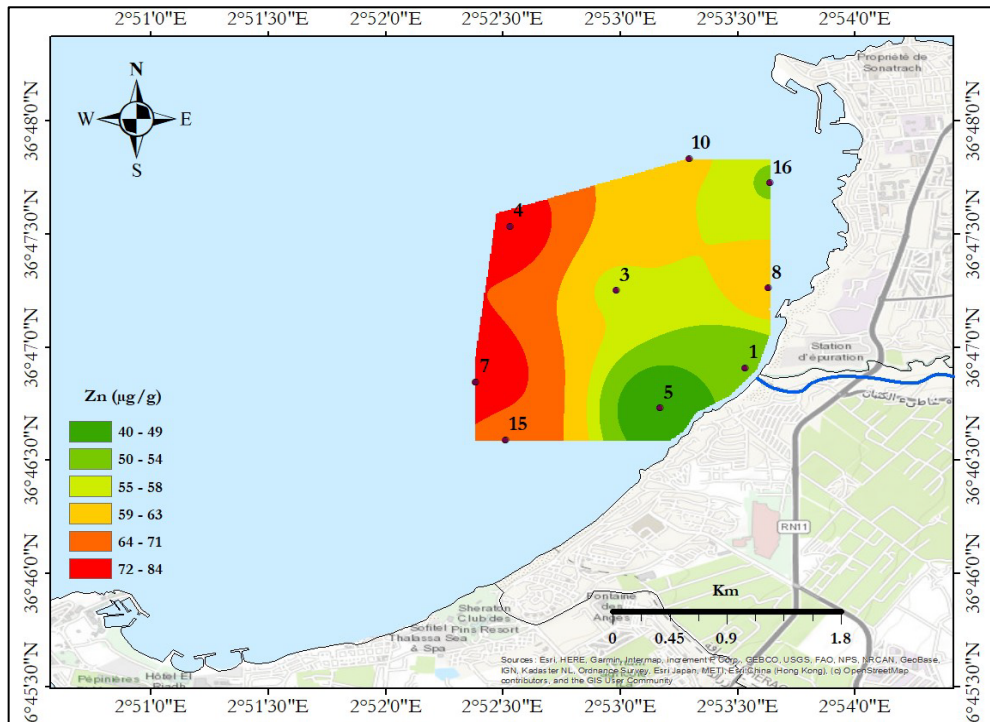
**Figure 19.** Distribution spatiale de cuivre Cu (mg/g) au niveau de l'embouchure de l'oued Beni Messous.

Toutes les stations ont enregistré des concentrations en cuivre inférieures au fond géochimique établie par Aroua et al. (2023) (21.9  $\mu\text{g/g}$ ) et indiquent des niveaux naturels de ce métal dans l'embouchure de l'Oued de Beni Messous.

### IV.5.4. Analyse du ZINC

Les résultats du zinc sont illustrés dans la figure 20. Dans la zone d'étude, les valeurs du zinc sont relativement modérées et varient entre 40,45  $\mu\text{g/g}$  (S5) et 84,01  $\mu\text{g/g}$  (S7), avec une valeur moyenne de 62,77  $\mu\text{g/g}$ .

Les niveaux élevés du Cd, Pb et Zn sont enregistrés dans les stations S4 et S7. Il est bien reconnu que le Cd est généralement présent comme impureté dans les gisements de Zn ou de Pb (**Bremner et Willis, 1993**), ce qui suggère une source possible de Cd comme impureté de ces minéraux provenant du port d'El Djamila et de l'oued Beni Messous.



**Figure 20.** Distribution spatiale de zinc (mg/g) au niveau de l'embouchure ben Messous

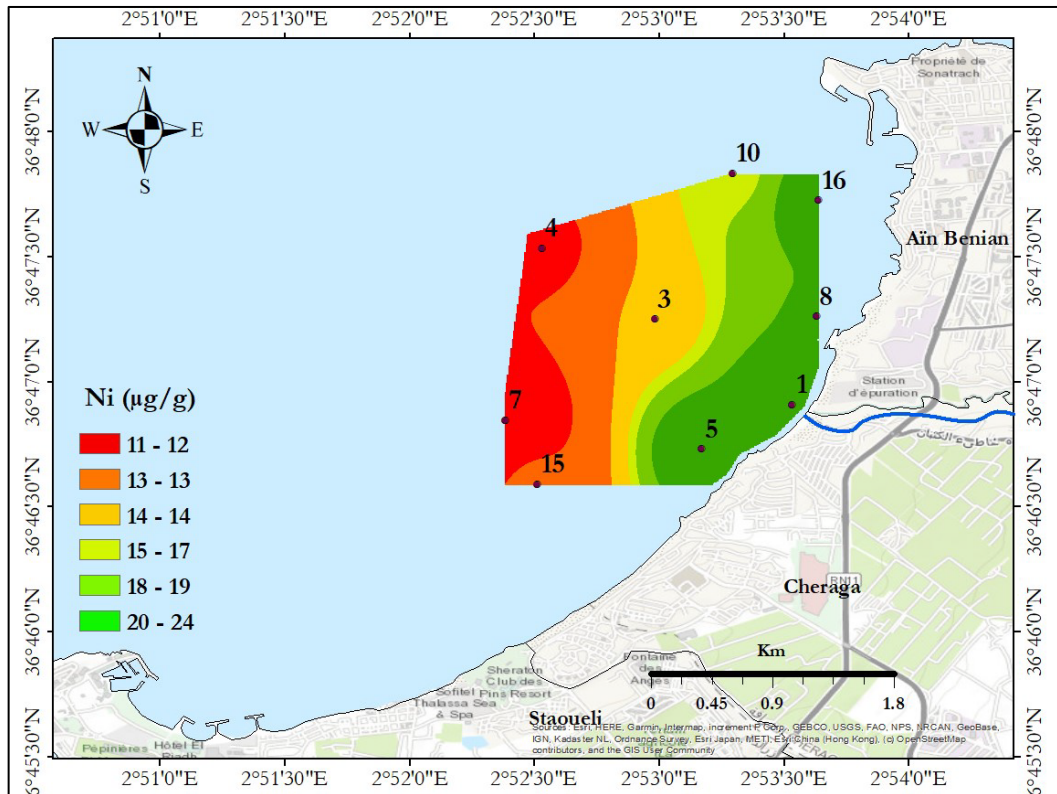
De plus, **Ismail et Awad (1984)** ont démontré qu'une variété de polluants, dont le cadmium, étaient présents dans les effluents d'eaux usées non traitées.

D'autre part, les valeurs trouvés pour le Zn à l'embouchure de l'oued Beni Messous sont inférieure à celle des valeurs de fond de la côte centrale Algérienne (**Aroua et al., 2023**) ( $101\mu\text{g/g}$ ). Ceci traduit vraisemblablement que les Zn provenaient de sources naturelles.

#### IV.5.5. Analyse du Nickel (Ni)

Le nickel est un élément lithophile, associé à la croûte terrestre où il se trouve avec une grande concentration. Il est aussi associé aux activités industrielles telles que la combustion de combustibles fossiles (**Rojas de Astudillo et al., 2015**).

Les teneurs en nickel qui sont présentés dans la figure 21 varient entre 10,88  $\mu\text{g/g}$  (S5) et 23,60 $\mu\text{g/g}$  (S7) avec une valeur moyenne de 16,32  $\mu\text{g/g}$  ces concentrations sont inférieures par rapport (33.7 $\mu\text{g/g}$ ) fond géochimique (**Aroua et al., 2023**).



**Figure 21.** Distribution spatiale du nickel (mg/g) au niveau de l'embouchure de l'oued Beni Messous.

Le Ni est susceptible de se trouver dans le pétrole brut ; de ce fait la pollution par les hydrocarbures produit par les embarcations de pêche qui circule dans la zone et par conséquent, constituer une source de contamination par cet élément.

#### IV.5.6. Analyse du Fer

Les sédiments prélevés dans l'embouchure présentent des concentrations en fer qui varient entre un minimum de 34,45 $\mu\text{g/g}$  (station15) et un maximum de 55,45  $\mu\text{g/g}$  (station16) avec une moyenne de 45,38  $\mu\text{g/g}$ .

La grande accumulation de Fe dans le sédiment est probablement due à sa grande réactivité et aussi au fait qu'il soit très abondant dans la nature : quatrième élément de la croûte terrestre avec une abondance de 41000 ppm (**Morillo et al., 2004**). De sa nature terrigène, le fer provient des oueds, de l'érosion côtière, des eaux de ruissellement par lessivage des sols



## IV.6. Evaluation environnementale

L'évaluation environnementale est un processus qui vise à évaluer les impacts potentiels des polluants sur l'environnement. Les facteurs d'enrichissement font référence aux éléments qui contribuent à l'amélioration ou à la protection de l'environnement lors de la réalisation d'un projet. Ces facteurs peuvent inclure des mesures de préservation de la biodiversité, des actions pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, ou des pratiques de gestion durable des ressources naturelles.

Pour évaluer la contamination métallique dans les sédiments de l'embouchure de l'Oued Beni Messous, un certain nombre d'approches sont utilisées pour distinguer les métaux traces anthropiques des métaux naturels. Dans ce travail, nous avons appliqué deux approches largement utilisées : le facteur d'enrichissement (EF) et l'indice de charge de pollution (PLI).

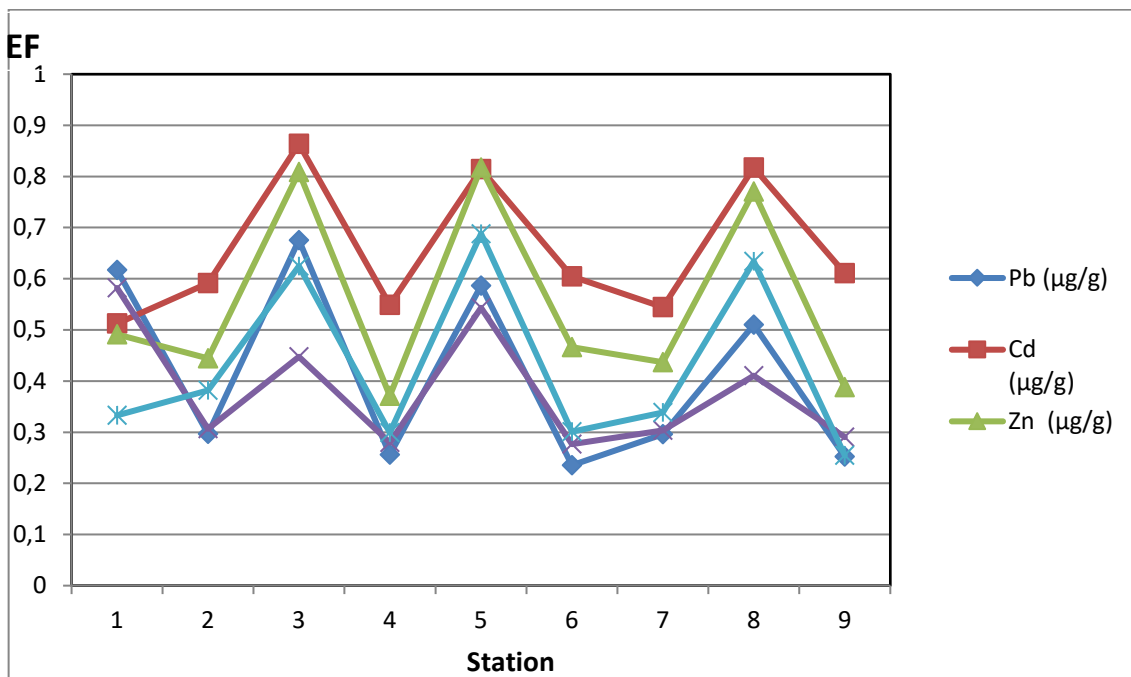
### IV.6.1 Facteur d'enrichissement (FE)

Comme dans de nombreux pays en développement, le littoral algérien subit une dégradation du fait de la pression démographique et des rejets non traités des activités humaines (**Abderrahmani et al., 2021 ; Inal et al., 2018 ; Guendouzi et al., 2020**). Selon **Chen et al. (2007)**, les EF avec des valeurs très faibles ( $EF < 1$ ) indiquent un enrichissement négligeable ou nul,  $EF < 2$  représentent un léger enrichissement, 2-5 représentent un enrichissement modéré, 5-10 implique un enrichissement modérément sévère, 10-25 indique un enrichissement sévère, 25 -50 affiche un enrichissement très sévère et enfin,  $EF > 50$  suggère un enrichissement extrêmement élevé. Une comparaison de la concentration en métaux dans les sédiments avec des valeurs de référence locale est souvent utilisée pour une évaluation la plus réaliste de l'enrichissement en métaux. Cependant, l'évaluation des concentrations de métaux traces dans les sédiments était difficile à interpréter car il n'existe pas d'élément de référence unique pour la normalisation. À cette fin, nous avons utilisé le fer comme métal de référence pour calculer les facteurs d'enrichissement (FEs) en raison de sa prédominance dans la croûte terrestre. De plus, il convient de noter que de nombreux auteurs ont utilisé le Fer avec succès pour la normalisation géochimique (**Inal et al., 2018 ; Bachouche et al., 2017 ; Moushmi et al., 2022 ; Ranjan et al., 2018**).

**Tableau 10:** Valeurs du facteur d'enrichissement (FE), fond local Algérien

| Station | Pb   | Cd   | Zn   | Cu   | Ni   |
|---------|------|------|------|------|------|
| S1      | 0.61 | 0.51 | 0.49 | 0.58 | 0.33 |
| S3      | 0.29 | 0.59 | 0.44 | 0.30 | 0.38 |
| S4      | 0.67 | 0.86 | 0.80 | 0.44 | 0.62 |
| S5      | 0.25 | 0.54 | 0.37 | 0.27 | 0.29 |
| S7      | 0.58 | 0.81 | 0.81 | 0.54 | 0.68 |
| S8      | 0.23 | 0.60 | 0.46 | 0.27 | 0.30 |
| S10     | 0.29 | 0.54 | 0.43 | 0.30 | 0.33 |
| S15     | 0.51 | 0.81 | 0.77 | 0.41 | 0.63 |
| S16     | 0.25 | 0.61 | 0.38 | 0.29 | 0.25 |
| Moyenne | 0.41 | 0.65 | 0.55 | 0.38 | 0.42 |

Selon les valeurs de fond local de la côte algéroise (Aroua et al., 2023), les résultats des valeurs du facteur d'enrichissement calculés sont présentés dans la Figure 23, les données numériques sont rapportées en Tableau 10, d'où l'on peut constater que le degré d'enrichissement en métaux traces varie dans une fourchette très étroite (de 0.23 à 0.86) dans toutes les stations de sédiments de l'embouchure. En d'autres termes, les FE pour les échantillons de sédiments ont été tous classés comme un enrichissement insuffisant ou nul. L'ordre de contamination de ces métaux dans l'ensemble de la zone d'étude était : Cd > Zn > Ni > Pb > Cu (Tableau 10).



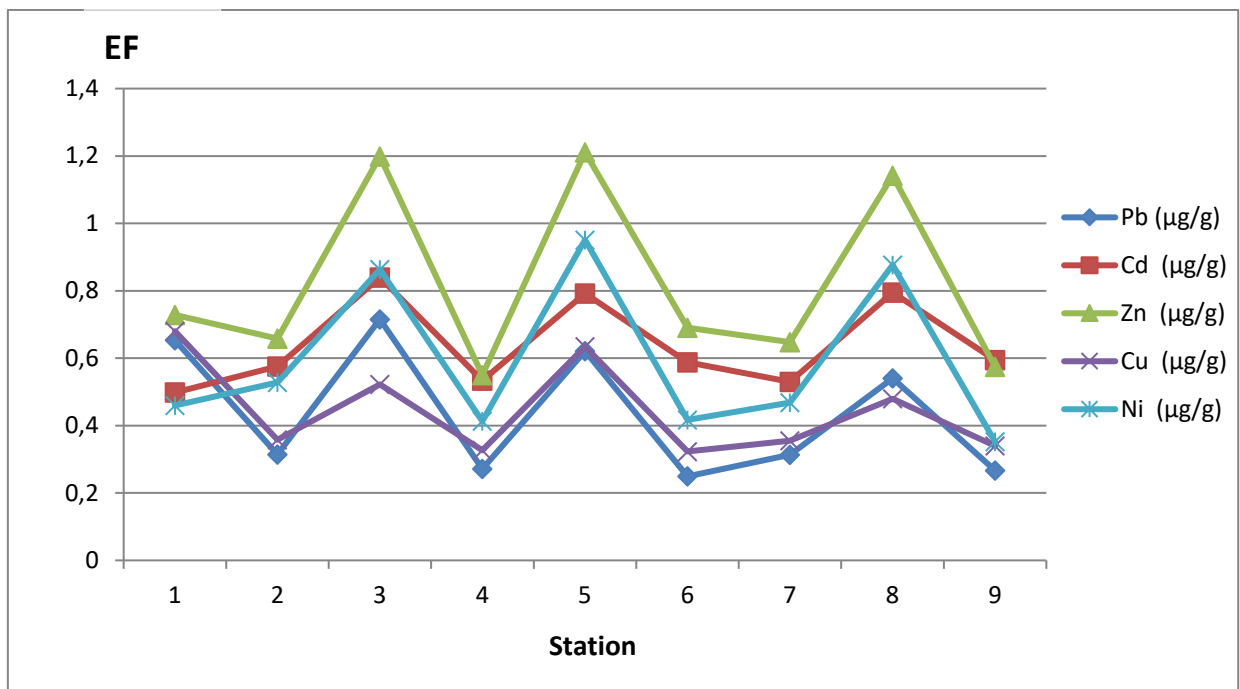
**Figure 23.** Facteur d'enrichissement des métaux traces

En détail, presque toutes les valeurs du facteur d'enrichissement de nickel (Ni), zinc (Zn), cadmium (Cd), cuivre (Cu) et le plomb (Pb) dans toutes les stations étaient très proches ou inférieures à 1, démontrant une origine crustale de ces métaux dans la zone d'étude.

**Tableau 11:** Facteur d'enrichissement par rapport au fond établie par (WEDEPOHL, 1995)

| Station | Pb   | Cd    | Zn   | Cu   | Ni   |
|---------|------|-------|------|------|------|
| S1      | 0.65 | 0.49  | 0.72 | 0.68 | 0.46 |
| S3      | 0.31 | 0.57  | 0.65 | 0.35 | 0.52 |
| S4      | 0.71 | 0.83  | 1.19 | 0.52 | 0.86 |
| S5      | 0.27 | 0.53  | 0.54 | 0.32 | 0.41 |
| S7      | 0.62 | 0.79  | 1.21 | 0.63 | 0.95 |
| S8      | 0.24 | 0.587 | 0.69 | 0.32 | 0.41 |
| S10     | 0.31 | 0.52  | 0.64 | 0.35 | 0.46 |
| S15     | 0.54 | 0.794 | 1.14 | 0.47 | 0.87 |
| S16     | 0.26 | 0.59  | 0.57 | 0.33 | 0.35 |
| Moyenne | 0.43 | 0.63  | 0.82 | 0.44 | 0.59 |

Selon les valeurs de la composition de la croûte continentale supérieure (WEDEPOHL, 1995), les valeurs de FE calculés sur la base de ses valeurs sont toutes inférieure à 1 (Figure 24) à l'exception des stations 7 et 15 qui ont affichés des valeurs FE >1 pour le zinc (Tableau 11), ce qui indiquent la présence d'un enrichissement et une contamination mineur dans la zone d'étude. L'ordre de contamination de ces métaux traces est le suivant : Zn > Cd > Ni > Cu > Pb.



**Figure 24:** facteur d'enrichissement par rapport au fond de WEDEPOHL (1995).

## IV.6.2. Indice de la charge polluante (PLI)

Le PLI introduit par **Tomlinson et al. (1980)** a été utilisé dans la présente étude pour évaluer la qualité environnementale des sédiments et comparer la charge globale en métaux dans chaque site. Deux classes de valeur PLI ont été identifiées :

Lorsque  $PLI < 1$ , cela signifie qu'il n'y a pas eu de pollution des sédiments côtiers ; sinon avec  $PLI > 1$ , les sédiments sont moyennement à fortement pollués. Ainsi, à mesure que la pollution par les métaux augmente dans les sédiments, la valeur PLI augmente également (**Haricumar and nacir, 2010**).

Les valeurs PLI calculées pour chaque station sont données dans le Tableau 13 (illustrés sur la Figure 25). Les résultats montrent que les valeurs de PLI variées entre 0.35 et 0.69 dans les sédiments de surface et ils sont toutes inférieure à la valeur 1, indiquant que la charge polluante est très faible dans l'embouchure.

D'après nos calculs par rapport au fond géochimiques (**Aroua et al.,2023**), les valeurs de l'indice de charge calculées pour toute les stations suivi l'ordre décroissant  $S7 > S4 > S15 > S3 > S10 > S1 > S16 > S8 > S5$ .

**Tableau 12:** Résultats de PLI des métaux traces

| Station | S1   | S3   | S4   | S5   | S7   | S8   | S10  | S15  | S16  |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Pli     | 0.48 | 0.49 | 0.63 | 0.36 | 0.69 | 0.45 | 0.49 | 0.51 | 0.46 |

Les valeurs PLI les plus élevées ont été mesurées pour les stations 7 et 4 situés au large de l'embouchure (Figure 25), tandis que les plus faibles ont été enregistrées pour les stations situés près de l'embouchure (site non contaminé). En plus, à mesure qu'on allant de l'embouchure vers le large, la charge polluante augmente (Figure 26).

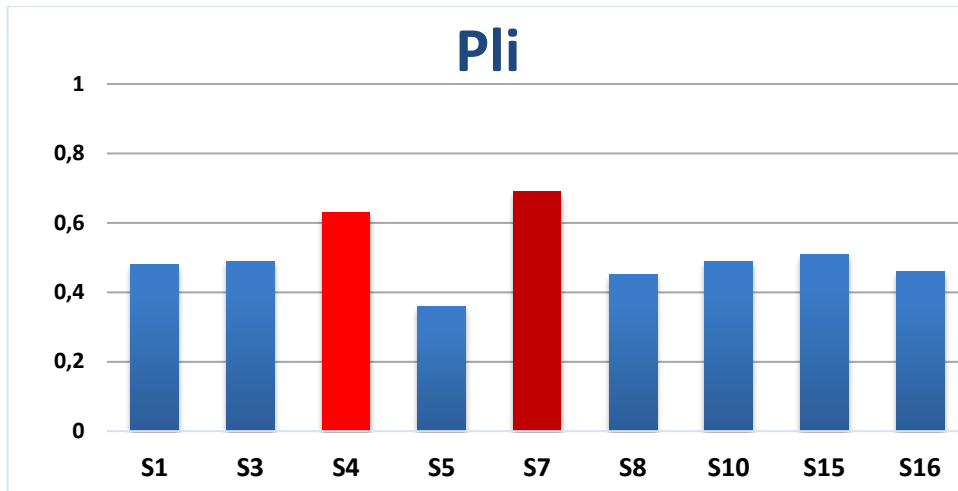


Figure 25. Pli des métaux traces

Ces résultats fournissent une confirmation supplémentaire que la contamination anthropique est inexistante dans la zone d'étude. Ceci indique que la zone étudiée située à l'embouchure de l'Oued Beni Messous est non polluée par les métaux traces où les sédiments sont de bonne qualité, en particulier pour le Cd, Pb, Zn, Cu et Ni.

En générale, les résultats de Pli et FE montrent que la station 7 constitue un puit important pour les métaux traces.

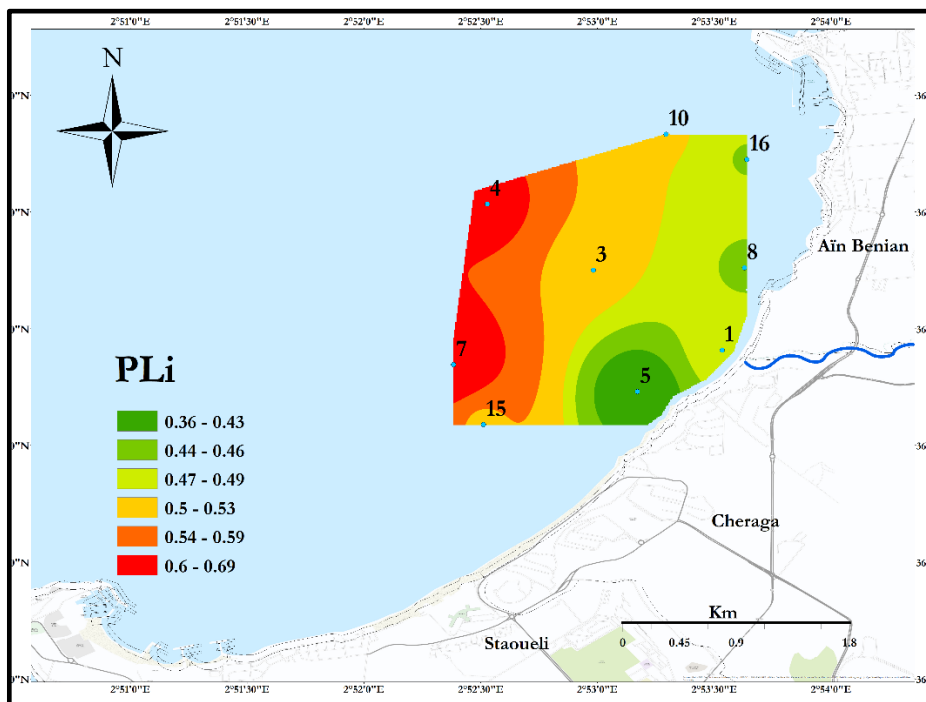


Figure 26. Pli des métaux traces dans la zone d'étude

# **CONCLUSION**

## Conclusion

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer pour la première fois l'étendue de la pollution dans l'environnement côtier dans la baie El Djamila en se concentrant sur l'analyse des sédiments marins à l'embouchure de l'oued Beni Messous, notamment sur les métaux traces. Cette étude a permis de dresser un état des lieux détaillé et de formuler des conclusions essentielles pour la gestion et la préservation de cet écosystème.

A cet effet, seize échantillons de sédiments marins ont été prélevés pour des analyses granulométriques, les composés organiques (MO) et les carbonates de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ).

En outre, neuf échantillons ont été sélectionnés pour l'analyse du fer et des métaux traces, notamment le cuivre, le zinc, le plomb, le nickel et le cadmium. Les concentrations des métaux ont été déterminées par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA).

Les résultats de la granulométrie, MO et  $\text{CaCO}_3$  dans les sédiments superficiels ont montré des variations plus au moins importantes dans la zone d'étude est des valeurs plus élevées au large de l'embouchure notamment dans la station 7 qui a constitué un puit important pour la matière organique (4.7 %) et le limon (28 %).

Les résultats de l'analyse chimique des métaux traces ont révélé des concentrations plus au moins faibles dans la zone d'étude. Les teneurs les plus élevées pour la plupart des métaux étudiés ont été observés au niveau des stations 4 et 7. Ces valeurs élevées de ces métaux correspondent au niveau le plus important pour la matière organique et le limon indiquant qu'il étaient les phases porteuses de ces éléments dans l'embouchure.

Le facteur d'enrichissement (FE) des métaux analysés dans les différents échantillons de sédiments de la baie d'El Djamila étaient tous inférieurs à 1 ( $\text{FE} < 1$ ). Cela suggère qu'il n'y a pas d'enrichissement et que les concentrations détectées dans les sédiments de la baie El Djamila sont dans la gamme de la variabilité naturelle.

Les valeurs de Pli des métaux traces ont été toutes inférieures à 1, indiquant que les sédiments de l'embouchure est non polluée. Les Valeurs PLI décroissent dans l'ordre suivant :  $S7 > S4 >$

S15 > S3 > S10 > S1 > S16 > S8 > S5 montrant que la station 7 est un puit important pour les métaux traces.

L'application de la technologies avancées pour le suivi environnemental et l'engagement communautaire sont indispensables pour protéger et restaurer les écosystèmes marins, plusieurs mesures doivent être prises :

- Surveillance continue : Il est essentiel de continuer à surveiller régulièrement les paramètres de qualité des sédiments pour détecter toute variation ou dégradation.
- Gestion des rejets continentaux : Étant donné que les valeurs de métaux sont inférieures à celles du fond géochimique local, il est crucial d'identifier les sources de ces rejets, notamment ceux de l'oued Beni Messous, et de mettre en place des mesures de gestion appropriées.
- Étude des impacts anthropiques : Il est nécessaire d'évaluer les activités humaines dans la région, incluant les rejets industriels, les eaux usées, les déchets solides et les pratiques de pêche dans le port de la madrague.
- Implication des parties prenantes et sensibilisation : Impliquer les parties prenantes locales, telles que les autorités, les pêcheurs, les habitants et les organisations environnementales, est essentiel pour le processus d'évaluation. Leur participation permettra de recueillir des connaissances locales, d'identifier les préoccupations spécifiques et de promouvoir une sensibilisation accrue à la conservation et à la protection de la plage et de la baie.

Enfin, il est recommandé de poursuivre ce type d'étude à l'avenir afin de créer des bases de données permettant le suivi de la qualité de l'environnement. Cela facilitera l'élaboration de normes de qualité spécifiques à notre littoral algérien. Une telle démarche permettra une meilleure gestion des zones les plus vulnérables et la protection de celles présentant un risque. La mise en place de ces bases de données et normes est essentielle pour garantir la préservation de notre environnement côtier.

## **REFERENCES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Abderrahmani, K., Boulahdid, M., Bendou, N., Guenachi, B., Hacene, O.R., Masino, F., Montevecchi, G., (2021).** Partitioning of trace elements in the tissues of Mediterranean mussels (*Mytilus galloprovincialis*) sampled from industrial sites along the Algerian coast. *Mar. Pollut. Bull.* 173. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113006>.

**ACHOUR, R. (2013).** Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routieret d'un béton à base de sédiments de dragage. Thèse de doctorat. Génie civil. Lille : Université des sciences et technologie de Lille. p. 199.

**Ajili, B., and Bouri, S. (2018).** Distribution and origin of carbonates in marine sediments: A case study from the Mediterranean coast. *Marine Geology*, 400. p.p. 34-45.

**Alloway et al., 1995:** Alloway, B.J., et al. (1995). *Heavy Metals in Soils*. Blackie Academic & Professional.

**Alloway, B.J. (1995).** Heavy Metals in Soils. *Blackie Academic & Professional*.

**Anonyme, 2007 :** Anonyme. (2007). *Utilisations du cadmium*. Éditions ABC.

**Aroua, M., Boulahdid, M., Radakovitch, O., Benhalima, M., Guendouzi, Y., Fowler, S.W., Ambrosi, J.-P., 2023.** Sediment pollution: An assessment of anthropogenic and geogenic trace element contributions along the central Algerian coast. *Marine Pollution Bulletin*. 186, 114398.

**AZZAZI et al.(2021).** Etude du schéma directeur de renforcement a court du réseau d AEP de la commune béni Messous. Mémoire de master. université sciences et technologies .[https://fr.wikipedia.org/wiki/Beni\\_Messous](https://fr.wikipedia.org/wiki/Beni_Messous)

**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'uneOpération de dragage. Mémoire de magister. Pollution marine et écotoxicologie. Alger : ENSSMAL. p. 182.

**Bachouche, S., Houma, F., Gomiero, A., Rabah, B., 2017.** Distribution and environmental risk assessment of heavy metal in surface sediments and red mullet (*Mullus barbatus*) from Algiers and Boulsmail Bay (Algeria). *Environmental Modeling & Assessment* 22. p.p. 473-490.

**Baize, 1997 :** Baize, D. (1997). *Teneurs en Éléments Traces Métalliques dans les Sols*. Paris, INRA Éditions.

**Baize, 1997 :** Baize, D. (1997). *Teneurs en Éléments Traces Métalliques dans les Sols*. Paris, INRA Éditions.

**Benito et al., 1999:** Benito, J., et al. (1999). Cadmium Toxicity in Plants. *Journal of Plant Physiology*, 154(3). p.p. 355-364. doi:10.1016/S0176-1617(99)80238-0

**Benoit, G. (2005).** Trace metals in sediments: Understanding their biogeochemical cycling and bioavailability. *Environmental Chemistry*, 2(3). p.p. 140-145.

**Berger, W.H., and L.D. Keir (1984).** Glacial-Holocene contrast in Atlantic carbonate preservation: Deep-sea drilling project site 502. *Earth and Planetary Science Letters*, 69(2). p.p. 275-293.

**Bigham et Nordstrom, 2000:** Bigham, J.M., & Nordstrom, D.K. (2000). Iron and Aluminum Hydroxysulfates from Acid Sulfate Waters. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 40(1). p.p. 351-403. doi:10.2138/rmg.2000.40.10

**Blackmore, 1998:** Blackmore, G. (1998). Metals in Marine Bivalves. In Langston, W.J., & Bebianno, M.J. (Eds.), *Metal Metabolism in Aquatic Environments* (pp. 185-217). Chapman & Hall.

**BONNET, C. (2000).** Développement de bioessais sur sédiments et applications à l'étude, en laboratoire de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés. Thèse doctorat. Toxicologie de l'environnement. France : Université de Metz, France. p. 309.

**Bonnet, C., 2000.** Développement de bioessais sur sédiments et applications à l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés. Thèse de doctorat, université de Metz, p. 326.

**Bonnet, J.-P. (2000).** Géologie marine. Paris Editions Quae.

**Bouchereau, 1992 :** Bouchereau, J.-L. (1992). Lead Contamination in the Environment: Sources, Risks, and Management. *Springer*.

**Bradl, H., 2005.** Sources and origins of heavy metals, Interface science and technology. Elsevier, pp. 1-27.

**Broecker, W.S., and T. Takahashi (1978).** The relationship between lysocline depth and atmospheric CO<sub>2</sub> concentration during the Late Pleistocene. *Quaternary Research*, 9(2). p.p. 237-249.

**BURDUGE, D.J. (2006).** Geochemistry of marine sediments. Princeton university press. United States of America: Princeton University Press. p. 609.

**Bureau de normalisation du Québec.** (1987). Sols – Analyse granulométrique des sols inorganiques, BNQ 2501-025. Ministère de l'Industrie et du Commerce, 23 p.

**Callender et al., 2003 :** Callender, E., et al. (2003). Sources and Pathways of Lead in the Environment. In F. Sherwood Rowland (Ed.), *Environmental Geochemistry* (pp. 239-282). Elsevier. doi:10.1016/B978-044451847-0/50014-3

**Callender et al., 2003** : Callender, E., et al. (2003). Sources and Pathways of Lead in the Environment. In F. Sherwood Rowland (Ed.), *Environmental Geochemistry* (pp. 239-282). Elsevier. doi:10.1016/B978-044451847-0/50014-3

**Cazalet, A. (2012)**. Metal retention mechanisms in carbonate environments. *Journal of Geochemical Exploration*, 114. p.p. 120-132.

**Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec**. Détermination des solides totaux et des solides totaux volatils : méthode gravimétrique, MA. 100 – S.T. 1.1. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Récupéré de <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA100ST11.pdf>

**Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec**. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyse environnementale. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Récupéré de <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage.htm>

**Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec**. Lignes directrices concernant les travaux analytiques en chimie, DR-12-SCA-01. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. [en ligne]. Consulté le 05/05/2024] disponible sur le web : [http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/accreditation/PALA/DR12SCA01\\_lignes\\_dir\\_chimie.pdf](http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/accreditation/PALA/DR12SCA01_lignes_dir_chimie.pdf)

**Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec**. Protocole pour la validation d'une méthode d'analyse en chimie, DR-12-VMC. Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. [en ligne]. Consulté le 09/05/2024] disponible sur le web : [http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/accreditation/PALA/DR12VMC\\_protocole\\_val\\_chimie.pdf](http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/accreditation/PALA/DR12VMC_protocole_val_chimie.pdf)

**CHAMLEY, H., DECONICK, J.F. (2000)**. Bases de Sédimentologie. 3e éd. France : Dunod. p. 213.

**CHAPMAN, P.M., WANG, F., JANSSEN, C. et al. (1998)**. Ecotoxicology of metals in aquatic sediments: binding and release, bioavailability, risk assessment, and remediation. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* n. 55. p.p. 2212-2243.

**Conseil des productions végétales du Québec**. (1997). Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux, Agdex 533, Méthode GR-1, 2e mise à jour, 74 p. [en ligne]. Consulté le 02/06/2024] disponible sur le web : <https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/Ma100Gran20.pdf>

**De Wolf et al., 2001, in El Namr et al., 2006** : De Wolf, H., et al. (2001). Metal Contamination in Intertidal Flats of the Scheldt Estuary: Heavy Metal Contents and Biomarker Responses in the Clam *Macoma balthica*. *Marine Pollution Bulletin*, 42(9). p.p. 882-892. In El Namr, F. et al. (2006). *Environmental Impact of Metal Contamination on Ecosystems*. Springer.

**Deschamps et al., 2006** : Deschamps, S., et al. (2006). Lead Speciation and Mobility in Soil Environments. *Environmental Science & Technology*, 40(3). p.p.1232-1238. doi:10.1021/es051208v

**DEVALLOIS, V. (2009).** Transferts et mobilité des éléments traces métalliques dans la colonne sédimentaire des hydrosystèmes continentaux. Thèse doctorat. Sciences de l'environnement. France : Université de Provence. p. 277.

**DEVALLOIS, V. (2009).** Transferts et mobilité des éléments traces métalliques dans la colonne sédimentaire des hydrosystèmes continentaux. Thèse doctorat. Sciences de l'environnement. France : Université de Provence. p. 277.

**Duffus, 2002 :** Duffus, J.H. (2002). "Heavy Metals" - A Meaningless Term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 74(5). p.p. 793-807. doi:10.1351/pac200274050793

**Fergusson, 1990:** Fergusson, J.E. (1990). The Heavy Elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects. *Pergamon Press*.

**Förstner, U., Salomons, W., 1983.** Trace element speciation in surface waters: interactions with particulate matter. p.p. 245-273

**FORSTNER, U., WITTMANN, G. T. W. (1981).** Metal pollution in the aquatic environment. 2 nd ed. New York: Springer-Verlag. p. 486

**Fox et al., 1993:** Fox, M.A., et al. (1993). *Environmental Chemistry*. Saunders College Publishing.

**Gasparon et Matschullat, 2006**

**Garrels et Christ, 1965 :** Garrels, R.M., & Christ, C.L. (1965). Solutions, Minerals, and Equilibria (2nd ed.). *Freeman*.

**Garret, 2000:** Garrett, R.G. (2000). Natural Sources of Metals to the Environment. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 6(6). p.p. 945-963. doi:10.1080/10807030091124492

**Grandjean, 1984:** Grandjean, P. (1984). Lead and Organolead Compounds. In J.O. Nriagu (Ed.), *Lead in the Environment* (pp. 3-18). Wiley.

**Guendouzi, Y., Boulahdid, M., Hacene, O.R., Inal, A., Boudjellal, B., Fowler, S.W., 2021.**

**Hem, 1976:** Hem, J.D. (1976). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. *US Geological Survey Water Supply Paper 2254*.

**Hlaváčková, L. (2005).** Mineralogy and the behavior of carbonate minerals in the environment. *Environmental Geology*, 47(2). p.p. 164-175.

**Hurlbut Jr. et Klein, 1982:** Hurlbut Jr., C.S., & Klein, C. (1982). *Manual of Mineralogy* (20th ed.). Wiley.

**Inal, A., Boulahdid, M., Angelletti, B., Radakovitch, O., 2018.** Levels and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of fishing grounds along Algerian coast. *Marine Pollution Bulletin* 136. p.p. 322-33

**Jambor et al., 2000 :** Jambor, J.L., et al. (2000). *The Environmental Geochemistry of Iron and Its Oxides. Mineralogical Society of America.*

**Kalnejis, R., Zemaite, J., Civuls, T., & Dekkers, A. (2010).** Element mobility and bioavailability in contaminated marine sediments: A case study from the Baltic Sea. *Environmental Pollution*. 128(3-4).p.p. 443-452

**LACAZE, J.C., PAQUET, F. (1989).** Tests d'évaluation du degré de pollution des sédiments marins : effets sur la production de larves et la consommation d'algues chez le copépode *Tigriopus brevicornis*. *Revue des sciences de l'eau*. p. 1-12.

**Laperche et al., 2004 :** Laperche, V., et al. (2004). Le comportement des métaux dans les sols : étude de la spéciation des métaux dans les sols pollués et approche de la phytoremédiation. *Revue de Métallurgie*, 101(5). p.p. 373-385. doi :10.1051/metal/2004101

**Leckie et Davis, 1975 :** Leckie, J.O., & Davis, A. (1975). Copper and Lead Contamination in Aquatic Environments. *Environmental Science & Technology*, 9(12). p.p. 1077-1082. doi:10.1021/es60109a003.

**Li, Y., guan, L, H., (2017).** Historical records of trace metals in core sediments from the Lianyungang coastal sea, Jiangsu, China. *Mar. Pollut. Bull.* 116. p.p. 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.063>.

**Liu, S., Shi, X., Liu, Y., Zhu, Z., Yang, G., Zhu, A., Gao, J. (2011).** Concentration distribution and assessment of heavy metals in sediments of mud area from inner continental shelf of the East China Sea. *Environ. Earth Sci.* 64. p.p. 567–579. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0941-z>.

**Mahan, 1987:** Mahan, B.H. (1987). *University Chemistry*. Addison-Wesley Publishing.

**Mahan, 1987:** Mahan, B.H. (1987). *The Environmental Chemistry of the Elements*. Academic Press.

**MARCHAND, M. (1985).** Processus géochimiques d'apports et de distribution des polluants organiques dans l'environnement marin. Etude appliquée aux hydrocarbures et hydrocarbures holocènes. Thèse de doctorat. Science naturelle. France : Université Pierre et Marie Curie 6. p. 586.

**Millero, 1975:** Millero, F.J. (1975). Thermodynamic Stability Constants for Hydroxide Complexes of Copper in Natural Waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(8). p.p. 1223-1233. doi :10.1016/0016-7037(75)90097-6

**Milliman, J.D. (1993).** Production and accumulation of calcium carbonate in the ocean: Budget of a nonsteady state. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4). p.p. 927-957.

**Naima Krachai, et al (2014),** ETUDE DE LA QUALITÉ DES SÉDIMENTS MARINSPOLLUÉES DE LA CÔTE OUEST DE L'ALGÉRIE. Université des sciences et de la Technologie USTO.

**Nriagu et Pacyna, 1988 :** Nriagu, J.O., & Pacyna, J.M. (1988). Quantitative Assessment of Worldwide Contamination of Air, Water and Soils by Trace Metals. *Nature*, 333. p.p. 134-139. doi:10.1038/333134a0

**Nriagu, 1974:** Nriagu, J.O. (1974). Lead in the Environment: A Speciation Study. *Nature*, 249, 472-474. doi:10.1038/249472a0

**Nriagu, 1978:** Nriagu, J.O. (1978). The Biogeochemistry of Lead in the Environment. *Elsevier/North-Holland Biomedical Press*.

**Nriagu, 1979:** Nriagu, J.O. (1979). *The Deposition and Fate of Trace Metals in Our Environment*. Wiley.

**Nriagu, 1979, 1991:** Nriagu, J.O. (1979). *The Biogeochemistry of Lead in the Environment*. Elsevier/North-Holland Biomedical Press. Nriagu, J.O. (1991). *The Deposition and Fate of Trace Metals in Our Environment*. Wiley.

**Nriagu, 1991:** Nriagu, J.O. (1991). Lead in the Environment (2nd ed.). *John Wiley & Sons*.

**Nriagu, 1996:** Nriagu, J.O. (1996). Lead and Lead Poisoning in Antiquity. *Johns Hopkins University Press*.

**O.-P.-S., 1987 :** Organisation Mondiale de la Santé. (1987). *Lead in Drinking Water*. World Health Organization.

**O.-P.-S., 1987 :** Organisation Mondiale de la Santé. (1987). *Iron in Drinking Water*. World Health Organization.

**OMEIRI, M. et SELLAMI, L. (2016).** Évaluation des Paramètres Physicochimiques et Bactériologiques au Niveau de la Plage El Bahdja avec les Apports de l'Oued Béni- Messous. Mémoire d'Ingénieur. Alger : ENSSMAL, p.p. 35-37

**Pacyna, 1986 :** Pacyna, J.M. (1986). Emission of Trace Elements from Industrial Sources. *Ecological Studies*, 38. p.p. 33-52.

**Plumlee et Ziegler, 2003:** Plumlee, G.S., & Ziegler, T.L. (2003). The Medical Geochemistry of Dusts, Soils, and Other Earth Materials. In Lollar, B.S. (Ed.), *Treatise on Geochemistry* (pp. 263-310). Elsevier. doi:10.1016/B0-08-043751-6/05166-0

**Plumlee et Ziegler, 2003 :** Plumlee, G.S., & Ziegler, T.L. (2003). The Medical Geochemistry of Metals and Metalloids. *Springer*.

**Purser, B.H. (1980).** Carbonate diagenesis in the marine environment. *Elsevier Oceanography Series*, 35.

**Rendek, 2006:** Rendek, J. (2006). Complexation of Lead (II) with Hydroxide and Sulfate at Elevated Temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18), A503. doi : 10.1016/j.gca.2006.06.992

**Ridgwell, A., and R.E. Zeebe (2005).** The role of the global carbonate cycle in the regulation and evolution of the Earth system. *Earth and Planetary Science Letters*, 234(3-4). p.p. 299-315.

**Rimstidt et Vaughan, 2003:** Rimstidt, J.D., & Vaughan, D.J. (2003). Pyrite Oxidation: A State-of-the-Art Assessment of the Reaction Mechanism. *GSA Reviews in Engineering Geology*, 15, 25-51. doi:10.1130/REG15-p25

**Risgaard-Petersen, N., et al. (2012).** Dissolution of carbonates in acid environments and its environmental implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 91. p.p. 169-182.

**Salvarredy Aranguren, 2008:** Salvarredy Aranguren, M.M. (2008). La mobilité des éléments traces métalliques dans les sols pollués : rôle des phases porteuses et impact des végétaux. *Thèse de doctorat*, Université de Montpellier.

**Schneider, B., et al. (2000).** The role of carbonate dissolution in the carbon cycle of the oceans. *Marine Chemistry*, 72(1). p.p. 129-152.

**Shriver et Atkins, 2001:** Shriver, D.F., & Atkins, P.W. (2001). *Inorganic Chemistry*. Oxford University Press.

**Sin, S., Chua, H., Lo, W., Ng, L., 2001.** Assessment of heavy metal cations in sediments of Shing Mun River, Hong Kong. *Environment international* 26. p.p. 297-301.

**Stoffregen et al., 2000 :** Stoffregen, R.E., et al. (2000). Secondary Iron Minerals: Occurrences, Composition, and Environmental Significance. *Clays and Clay Minerals*, 48(3). p.p. 298-309. doi:10.1346/CCMN.2000.0480307

**Tomlinson, D., Wilson, J., Harris, C., Jeffrey, D., 1980.** Problems in the assessment of heavymetal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer meeresuntersuchungen* 33. p.p. 566-575

**Velasco et al., 2005:** Velasco, J.M., et al. (2005). Acid Mine Drainage: Long-Term Source of Water Contamination. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 40(6-7). p.p. 1329-1356. doi:10.1081/ESE-200059402

**Wedepohl, 1995:** Wedepohl, K.H. (1995). The Composition of the Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7). p.p. 1217-1232. doi:10.1016/0016-7037(95)00038-2

**Zeebe, R.E., and D.A. Wolf-Gladrow (2001).** CO<sub>2</sub> in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes. *Elsevier Oceanography Series*, 65

# **ANNEXES**

## Les Annexe

### Annexe 1 : Photographie de matériels utilisés en terrain



**La benne**



**Glacière**

**Tableau 1 : Points de prélèvement des 16 stations**

| Points de prélèvement | Latitude     | Longitude   |
|-----------------------|--------------|-------------|
| Point 1               | 36°46'54.45" | 2°53'32.00" |
| Point 2               | 36°47'3.46"  | 2°53'17.68" |
| Point 3               | 36°47'15.04" | 2°52'58.90" |
| Point 4               | 36°47'32.02" | 2°52'31.69" |
| Point 5               | 36°46'43.82" | 2°53'10.21" |
| Point 6               | 36°46'46.92" | 2°52'49.62" |
| Point 7               | 36°46'50.78" | 2°52'23.03" |
| Point 8               | 36°47'15.62" | 2°53'37.70" |
| Point 9               | 36°47'29.76" | 2°53'29.76" |
| Point 10              | 36°47'49.99" | 2°53'17.55" |
| Point 11              | 36°46'33.27" | 2°52'49.51" |
| Point 12              | 36°47'30.95" | 2°53'44.24" |
| Point 13              | 36°47'4.57"  | 2°52'42.56" |
| Point 14              | 36°47'30.19" | 2°53'7.60"  |
| Point 15              | 36°46'35.33" | 2°52'30.69" |
| Point 16              | 36°47'43.50" | 2°53'38.32" |

**Annexe 2 : photographie de matériels utilisés au niveau de laboratoire**



**Creusets**



**Dessiccateur**



**Etuve**



**Balance**



**Membrane de filtration**



**four à moufle**



**Microwave ETHOS 900**

**Annexe 3** : photographie de matériels utilisés au niveau de laboratoire pour la Granulométrie

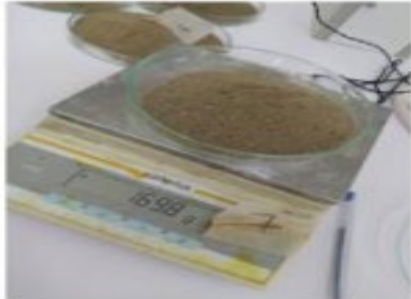


Figure : Balance

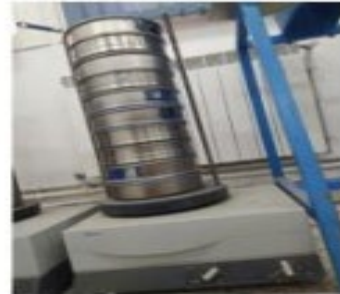


Figure : Tamiseuse électrique

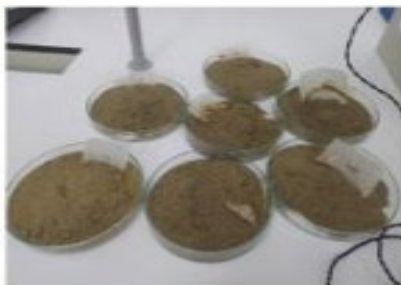
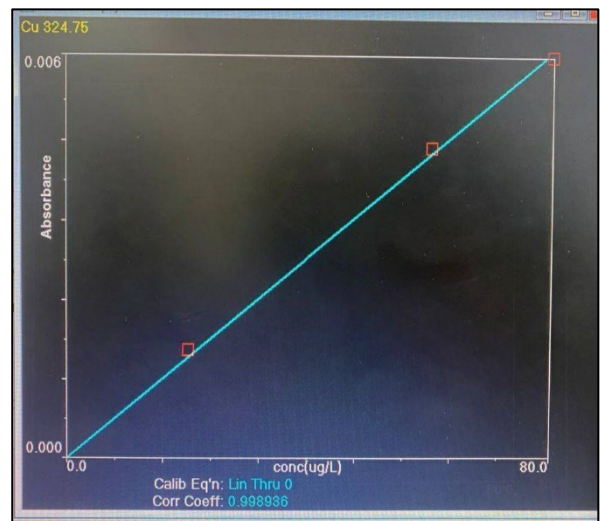
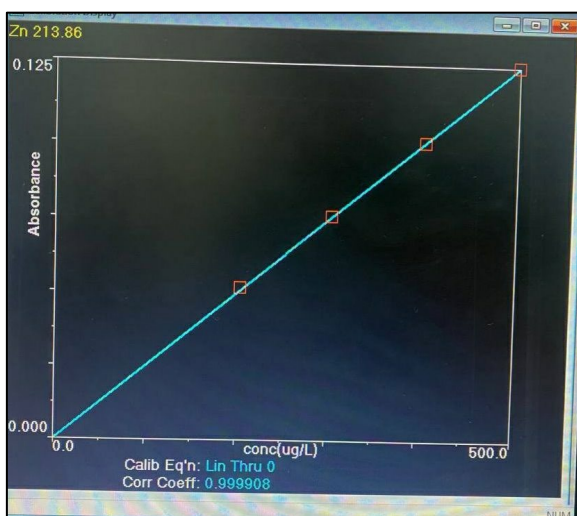
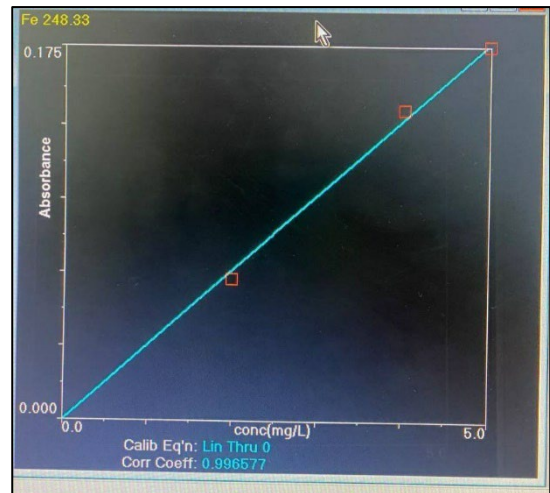
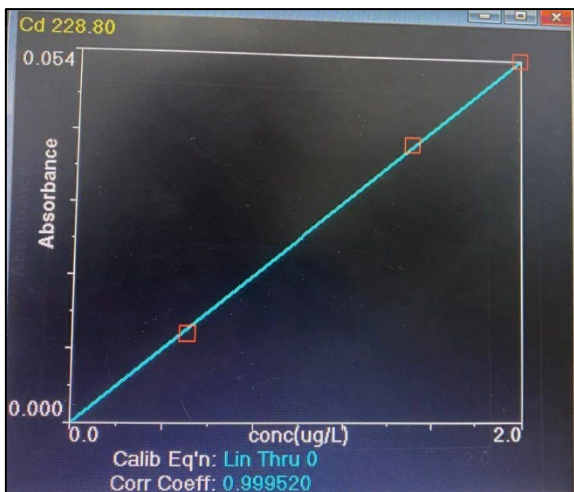
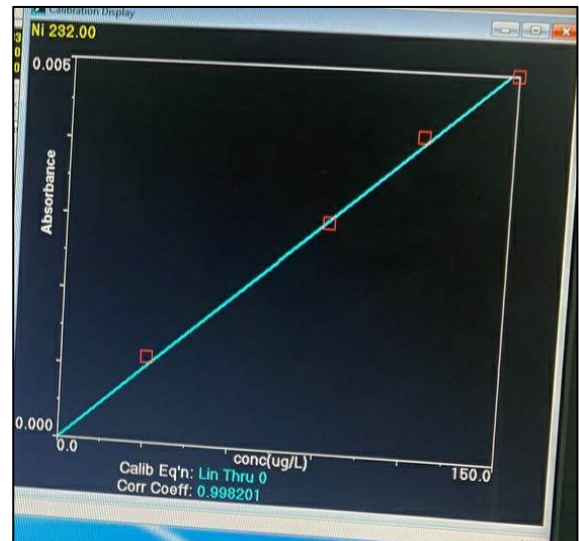
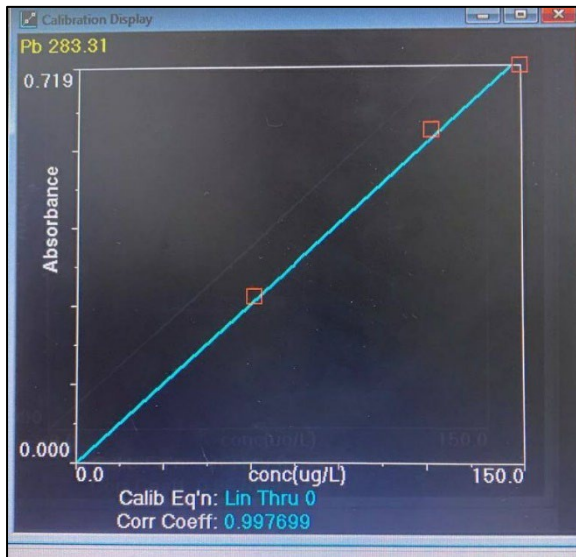


Figure : Boites de Pétri

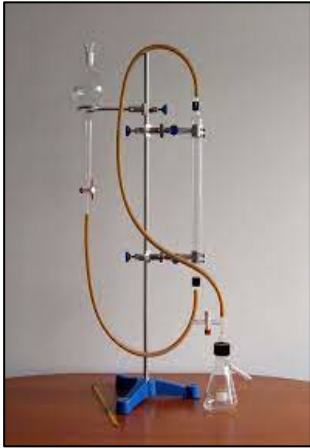


Figure : Etuve

## Annexe 4 : Les courbes d'étalonnage de SAA



**Annexe 5 :** calcimètre de Bernard Pour la mesure de la teneur en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  dans les sédiments



**BMC**

## ❖ Le Business Modèle Canva

### Utilisation des systèmes d'intelligence artificielle pour le tri des déchets plastiques :

#### Introduction

Les déchets plastiques constituent une menace majeure pour la vie marine. Ils peuvent être ingérés par les animaux marins, entraîner leur étouffement ou causer des blessures graves. En recyclant ces déchets, on réduit la quantité de plastique dans les océans, préservant ainsi les écosystèmes marins fragiles. Ces derniers en mer contribuent à la pollution visuelle et chimique des océans. En les recyclant, on limite la pollution des côtes, des plages et des zones marines, préservant ainsi la beauté naturelle des environnements côtiers.

Dans le cadre de l'arrêté ministériel n °12-75 portant projet « Diplôme start-up » on veut réaliser notre projet qui vise à établir une unité de fabrication de système d'IA pour le tri des déchets plastique en mer qui seront utiliser dans le recyclage de plastique

#### Problématique

Les installations de récupération des matériaux (Les centre de tri) traitent généralement un large éventail de matériaux, dont la plupart sont mélangés. Avant que les matériaux puissent être recyclés, ils doivent être séparés et triés en groupes distincts. Le carton doit être séparé des bocaux en verre, les canettes doivent être traitées séparément des bouteilles en plastique, etc. De plus, les articles non recyclables et potentiellement dangereux doivent être enlevés afin que les matériaux puissent être traités efficacement et en toute sécurité. D'autre part le plastique possède un problème dans l'environnement marin et selon une étude faite par l'AND en 2019, le plastique représente 78% des déchets marins. Traditionnellement, ces tâches ont été effectuées par des cueilleurs humains, mais cela présente certains inconvénients. Les humains font des erreurs, ce qui peut avoir de graves conséquences commerciales ou de sécurité si les matériaux sont mal triés ou si les matières dangereuses ne sont pas enlevées, et les préparateurs manuels ne peuvent trier qu'un nombre maximum de matériaux dans un laps de temps défini. De plus, les pénuries de main-d'œuvre ont entraîné un manque de personnel dans les centres

de tri, ce qui limite le nombre d'articles pouvant être traités.

#### Approche de la solution avec le produit

Au lieu de s'appuyer sur des préparateurs manuels pour traiter et trier les matériaux, des solutions de tri robotisées sont utilisées pour automatiser ces tâches. À l'aide de la vision par ordinateur de l'IA, Recycleye Vision scanne les déchets mélangés avant que Recycleye Robotics ne les cueille et les place dans des endroits désignés. Remplaçant ou complétant efficacement le travail des cueilleurs humains, les solutions de tri robotique fonctionnent avec des taux d'efficacité et de précision élevés, minimisant ainsi les erreurs et maximisant la productivité. Nous croyons fermement que la technologie peut révolutionner l'industrie de la

gestion des déchets, augmenter la valeur du recyclage et réduire l'impact environnemental négatif que les déchets continuent d'avoir. L'utilisation continue des sites d'enfouissement contribue au changement climatique et aux dommages environnementaux dus au rejet de toxines, de gaz à effet de serre (GES) et de lixiviat, mais une proportion considérable des déchets envoyés aux sites d'enfouissement n'a pas besoin d'y être. Comme les robots de tri des déchets peuvent augmenter la vitesse à laquelle les matériaux sont triés pour le recyclage et la précision avec laquelle les articles sont prélevés, ces innovations peuvent augmenter la valeur du recyclage et réduire le volume de matériaux envoyés à la décharge. Cela aura un impact positif sur l'environnement.

### **ESTIMATION ANUELLE :**

|                                      |             |
|--------------------------------------|-------------|
| Le prix d'un Kg de plastique recyclé | 40 DA       |
| Le prix de robots de tri             | 20.000.00\$ |

|   |   |
|---|---|
| Capacité de production                              | 100 t/j   |
| Industries applicables                              | Ateliers de matériaux de construction ; ateliers de réparation de machine |
| Emplacement de la salle d'exposition                | Espagne   |
| Lieu d'origine                                      | Henan ; chine   |
| Garantie  | 1an   |
| Rapport d'essai de machines                         | Fourni  |
| Inspection vidéo a la sortie                        | Fournie   |
| Type de commersilation                              | Nouveau produit   |
| Garantie de composant principe composant principaux | Moteur ; recepaient sous pression ;pompe                                  |
| Poids   | 100 000kg   |
| Condition   | Nouveau   |
| Marque  | Xrido   |
| Numéro de model                                     | XRD-100D  |
| Nom   | Machine de tri de déchets   |
| Application   | Machine de système de tri msw   |
| Avantage  | Taux de séparation élevée 99 .99  |
| TENSION   | 220V/380V/personnalise  |
| CAPACITE  | 100t/j  |
| DUREE DE VIE  | 30 ans  |
| APRES VENTE   | SUOOPRT EN LIGNE  |
| COULEUR   | COULEUR PERSONALISEE  |
| ATTESTATION   | CE ION  |
| EMBALLAGE   | EMEBALLAGE DE CAISSE EN BOIS  |
| UNITES DE VENTE                                     | UN SEUL ARTICLE   |

## Le revenu annuel :

| L'année     | Revenu           |
|-------------|------------------|
| 1 ère année | 146 000 000 0 DA |
| 2 ème année | 292 000 000 0 DA |
| 3 ème année | 584 000 000 0 DA |

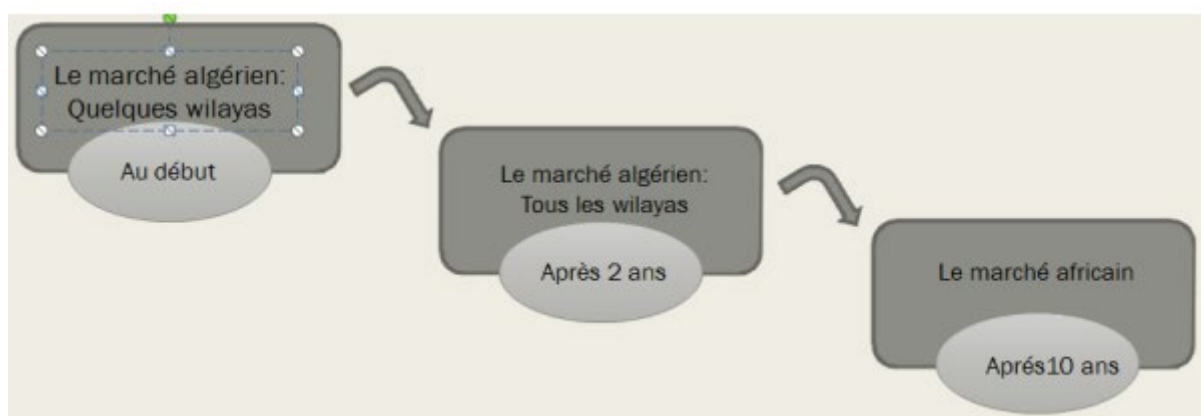
## Le marché

A court terme, on va acheter notre matière REBOT qui fait le tri de déchet de plastique en mer, en moyen terme, on va le recycler nous même dans notre entreprise.

Les deux premières années on va vendre aux wilayas voisines (Alger, Tipaza, Blida),

Après on va essayer de couvrir toutes les entreprises qui cherchant le plastique trie.

Après avoir couvrir le marché national, on va aller vers le marché africain.



**Figure :** stratégie de marché.

## Résumé

En résumé, le tri des déchets plastiques en mer avec l'intelligence artificielle offre une approche technologique avancée pour lutter contre la pollution plastique dans les océans, en utilisant des drones, des robots et des algorithmes d'IA pour collecter, trier et recycler les déchets. Collecte autonome : Les drones et les robots équipés de capteurs peuvent être utilisés pour surveiller et collecter les déchets plastiques en mer de manière autonome. Ces technologies permettent de couvrir de vastes étendues d'eau et de localiser les zones les plus touchées par la pollution plastique.

Recyclage intégré : Une fois les déchets plastiques triés, l'IA peut également être utilisée pour identifier les meilleures options de recyclage pour chaque type de plastique. Cela peut inclure le broyage et la fusion pour créer de nouveaux produits en plastique recyclé ou d'autres méthodes de recyclage innovantes.

Surveillance continue : En utilisant des techniques d'apprentissage automatique, l'IA peut analyser les données collectées sur la pollution plastique en mer pour identifier les tendances, les points chauds et les modèles de distribution. Cette surveillance continue permet de mieux comprendre l'ampleur du problème et d'orienter les efforts de nettoyage et de prévention. Déchets de manière efficace et durable.

## Les besoins de la réalisation du projet

- La disponibilité de la main-d'œuvre pour le tri et le traitement des matières recyclables devient un facteur clé de la capacité de recyclage ;
- Le local ;
- Les zones de pollution plastique ;
- Des employés qualifiés ;
- La machine de tri ;

## Activités clés

La vente de déchets traite à partir de traitement

## Les valeurs ajoutées :

**1. Réduction des coûts d'exploitation Les coûts de recrutement**, de rétention et autres coûts de personnel sont souvent le plus grand défi d'une entreprise et représentent une proportion importante des dépenses d'exploitation (OPEX) de l'organisation. Cependant, en utilisant un robot de ramassage des déchets IA aux côtés de travailleurs humains, les centres de tri peuvent gérer leurs dépenses d'exploitation et augmenter la rentabilité.

**2. Augmenter l'efficacité En règle générale**, la technologie peut fonctionner à un rythme toujours plus rapide que les humains et cela s'applique également à la robotique des déchets. Capable de livrer 33 000 prélèvements à partir de déchets mélangés en 10 heures, Recycleye Robotics montre à quel point l'automatisation du recyclage peut augmenter l'efficacité et maximiser les rendements.

**3. Performances MRF optimales La technologie** peut améliorer la précision du contrôle de la qualité (CQ) à un coût réduit par rapport à l'assurance qualité manuelle. Lorsque les matériaux sont identifiés, cueillis et triés par vision par ordinateur pilotée par l'IA, la robotique de tri des déchets augmente la précision et la traçabilité des matériaux à recycler. Cela offre une plus grande pureté des sorties, avec une valeur de revente plus élevée pour les acheteurs.

### **4. Transparence et traçabilité accrues**

Aujourd'hui, une gestion efficace des déchets nécessite une transparence et une traçabilité complètes, ce qui signifie mettre en œuvre des processus qui vous permettent de surveiller et de suivre comment et où les matériaux sont traités. Avec Recycleye Vision, les articles sont classés plus de 100 fois pour assurer l'exactitude, tandis que les données sont fournies en temps réel pour maximiser la traçabilité à chaque étape.

## 5. Une meilleure planification

Lorsque vous comptez sur des travailleurs humains, il y a toujours des variabilités qui doivent être prises en compte, en particulier lorsque les pénuries de main-d'œuvre rendent difficile la recherche de personnel permanent. Si vous disposez de solutions de prélèvement et de tri robotisées sur site, vous pouvez être sûr que vous aurez toujours les ressources dont vous avez besoin pour travailler à des taux d'efficacité optimaux.

### Partenariats clés

- L'AND : agence nationale des déchets ;
- Les CET qui ont des centres de tri ;
- Les centres de récupération de plastiques ;
- Les entreprises de recyclages de plastiques ;
- Fournisseurs financiers : ANADE, les banques.

### Le segment client :

- Fabricants d'équipement de pêche : tels que les producteurs de cannes à pêche, de moulinets et d'accessoires, ont la possibilité d'être des clients potentiels. Ils ont la capacité d'intégrer le plastique recyclé dans leurs produits finaux, offrant ainsi à leur propre clientèle des solutions plus respectueuses à l'environnement.
- Détaillants d'articles de pêche : Les détaillants spécialisés dans la vente d'articles de pêche, qu'ils s'agissent de magasins physiques ou de boutiques en ligne, constituent un autre segment de clientèle. Ils peuvent proposer les filets de pêche fabriqués à partir du plastique recyclé à leurs clients, en mettant l'accent sur les avantages écologiques et la durabilité des produits.

### Relations clients :

- Communication transparente : Cultivez une relation de communication ouverte et transparente avec nos clients en partageant des informations concernant la durabilité de nos produits, les bénéfices environnementaux du plastique recyclé et les mesures que nous prenons pour promouvoir des pratiques responsables. Soyons réactifs et professionnels en répondant rapidement aux questions, préoccupations et commentaires émis par les clients ;
- Service client attentif : Offrons un service client de qualité, soyons attentif aux besoins des clients et fournissons des réponses claires et précises. Nous assurons que nos clients se sentent valorisés, écoutés et pris en compte ;
- Promotion.

| Partenariats clés   | Activités clés  | Valeur ajoutée   | Relations clients  | Segment de client  |
|---|---|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• l'AND : Agence nationale des déchets ;</li> <li>• Les centres d'enfouissement techniques qui ont des centres de tri ;</li> <li>• Les centres de récupération de plastiques ;</li> <li>• les entreprises de recyclage de plastiques comme Algérie Recyclage Plastique (ARP) et Ecorecyclage Algérie ;</li> <li>• Fournisseurs financiers: ANADE, les banques</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le tri de plastique en utilisent l'intelligence artificielle</li> </ul> <p><b>Ressources clés</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Matière première : plastique jetée non traite</li> <li>• Le matériel et la chine de tri <ul style="list-style-type: none"> <li>• Main d'œuvre qualifiée ;</li> <li>• Camion pour la livraison ;</li> </ul> </li> <li>• Local</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Valorisation des déchets ;</li> <li>• le plastique traitée est demande dans le monde de recyclage ;</li> <li>• Durabilité environnementale ;</li> <li>• Réduction de l'empreinte carbone ;</li> <li>• Performance et qualité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonne communication et soyons transparents avec les clients ;</li> <li>• Service client attentif ;</li> <li>• Promotion.</li> </ul> <p><b>Canaux de distribution</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ventes directes aux centres de récupération de plastiques ;</li> <li>• Les entreprises qui utilise le plastique traitées ;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entreprises de pêche commerciale comme Société de Pêche et d'Exploitation des Produits de la Mer (SPEPM) d'Alger et Société Algérienne des Pêches (SAP) ;</li> <li>• Fabricants d'équipement de pêche : AQUALUX Pêche Sportive, AB Pêche Algérie et Pêche Center Algérie ; pour utiliser le plastique recyclé</li> <li>• entreprises de fabrications</li> <li>• industries technologique</li> </ul> |
| <b>Structure des coûts</b>  |   | <b>Sources de revenus</b>  |  |  |
| <p>La machine qui fait le tri Une quantité de matière première (plastique présent dans l'eau) : 2 684 780 DA ; Salaire d'employés : 1080000 DA ; et Electricité : 200000 DA ; Local : 360000 DA.</p> <p>Total=400 0 780 DA</p>  |   | <p>146 000 000 0 DA</p>  |  |  |

## Résumé

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer l'étendue de la pollution dans l'environnement marin côtier de la région. La première partie de l'étude s'est concentrée sur l'analyse des paramètres des sédiments, tels que la matière organique, l'humidité et les carbonates. Des échantillons de sédiment ont été prélevés à différentes stations et analysés afin de déterminer comment ces paramètres variaient selon l'emplacement géographique de chaque station. Les résultats ont montré que ces paramètres variaient considérablement selon les sites. La deuxième partie de l'étude a porté sur l'analyse de certains métaux et la troisième partie compris les études granulométriques. Les résultats obtenus à partir de diverses analyses, y compris les paramètres de sédiments, la taille des particules et les concentrations de métaux, aident à identifier les facteurs et les causes qui influencent les niveaux de pollution chimiques qui perturbent le milieu marin. Les résultats obtenus dans cette étude ont montré que le site est classé comme naturel.

## المخلص

تركز هذه الدراسة على تقييم جودة الرواسب وتركيز العناصر المعدنية النزرية في خليج الجميلة. كان الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقييم مدى التلوث في البيئة البحرية الساحلية في المنطقة.

ركز الجزء الأول من الدراسة على تحليل عناصر الرواسب مثل المواد العضوية والكربونات وحجم الجزيئات، حيث تم جمع عينات من الرواسب في محطات مختلفة وتحليلها لتحديد مدى اختلاف هذه العوامل باختلاف الموقع الجغرافي لكل محطة.

أظهرت النتائج أن هذه المعلمات تختلف بشكل كبير بين المواقع. وركز الجزء الثاني من الدراسة على تحليل معادن مختارة، وتضمن الجزء الثالث دراسات حجم الجسيمات، وتساعد النتائج التي تم الحصول عليها من التحليلات المختلفة، وحجم الجسيمات وتركيزات المعادن، على تحديد العوامل والأسباب التي تؤثر على المستويات. من المواد الكيميائية التي تعطل البيئة البحرية.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من هذه الدراسة أن الموقع غير ملوث.