

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de
Master en Sciences Biologiques
Spécialité : Biologie des Populations et des Organismes

Contribution à l'étude de la contamination des
eaux marines de Béjaïa par les éléments traces
métalliques

Présenté par : M^{elle} NAIB Alycia

M^r OUBAKOUK Bilal

Devant le jury composé de :

Présidente : M^{me} KHAMMES-EL HOMSI Nora	MCA	UMMTO
Promotrice : M^{me} MEHOUEL Fetta	MCB	ISV Constantine
Co-promotrice : M^{me} BRAHMI Karima	Professeur	UMMTO
Examinatrice : M^{me} DJIOUA Ouiza	MAA	UMMTO

Année universitaire 2024-2025

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à **Madame MEHOUEL Fetta**, notre encadrante et promotrice de ce mémoire, pour son accompagnement rigoureux, sa disponibilité constante et ses conseils éclairés. Sa bienveillance, sa rigueur scientifique et son engagement à nos côtés ont été essentiels à la réussite de ce travail.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements à **Madame BRAHMI Karima**, notre co-promotrice, pour sa présence attentive, ses orientations pertinentes et son implication tout au long de notre projet de recherche.*

*Nos remerciements vont également à **Monsieur AIT MERZEG**, Directeur du **CRAPC Béjaïa**, pour nous avoir accueillis au sein de son établissement et pour avoir mis à notre disposition les moyens techniques et logistiques nécessaires à la réalisation de nos analyses.*

*Nous remercions chaleureusement toute l'équipe du laboratoire du **CRAPC** pour leur accueil, leur assistance précieuse et leur professionnalisme. Leur soutien quotidien lors des travaux expérimentaux a été d'une grande aide pour l'avancement de ce mémoire.*

*Nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance envers les **plongeurs professionnels** qui nous ont apporté leur aide lors des campagnes d'échantillonnage dans des zones difficiles d'accès. Leur contribution a été déterminante dans la réussite de la phase de terrain.*

Dédicace

En signe de respect et de profonde reconnaissance, je dédie ce modeste travail :

À ma famille,

En particulier à mes parents, pour tout l'amour, le soutien et les sacrifices que vous avez toujours faits pour moi. Merci d'avoir cru en moi, même dans les moments de doute. Votre présence à mes côtés m'a toujours portée, et ce travail est tout autant le vôtre.

À ma grande sœur et à mon petit frère,

Que j'aime profondément. Vous êtes une source de tendresse, de motivation et de réconfort dans ma vie. Merci d'être là, simplement.

À Bilal,

Mon binôme et mon ami, merci d'avoir partagé ce travail avec sérieux, patience et bonne humeur. Ton soutien m'a beaucoup aidée, et ta présence a rendu ces mois de travail bien plus légers et supportables. Je suis sincèrement reconnaissante d'avoir pu vivre cette aventure avec toi.

Et enfin, à toutes les personnes qui m'ont soutenue, aidée, encouragée ou simplement cru en moi, même discrètement, je vous remercie du fond du cœur. Vous avez tous contribué, chacun à votre manière, à l'aboutissement de ce mémoire.

Alycia

Dédicace

En signe de respect et de profonde reconnaissance, je dédie ce modeste travail :

À ma fiancée,

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à celle qui, tout au long de cette aventure académique, a su faire preuve d'une discrétion bienveillante, d'un soutien silencieux et d'une patience remarquable. Ta présence apaisante, ton écoute attentive et ta compréhension dans les moments d'incertitude m'ont permis de garder le cap. Ton amour pudique, mais constant, a été pour moi une source de stabilité inestimable dans les périodes de doute et de fatigue.

À mes parents,

À vous qui avez semés les premières graines de mon parcours éducatif, je dois bien plus qu'un simple merci. Merci pour votre foi indéfectible en mes capacités, pour votre soutien sans conditions, pour les sacrifices consentis dans l'ombre, et pour les valeurs de rigueur, de persévérance et de respect que vous m'avez transmises. Ce mémoire est aussi le fruit de votre engagement silencieux, de vos encouragements répétés et de votre confiance, même dans les moments où moi-même je doutais.

À Alycia,

À ma binôme, collègue et amie, je tiens à rendre hommage pour son investissement sans faille dans ce travail de recherche. Ton sérieux, ton esprit critique, ton sens de l'organisation et ta capacité à surmonter les obstacles ont été des atouts précieux tout au long de notre collaboration. Merci pour ton soutien constant, ta lucidité dans les moments de tension, et pour la dynamique de travail stimulante que nous avons su construire ensemble. Ce mémoire, en tant que réalisation commune.

À toutes celles et ceux, proches ou lointains, dont la présence, les encouragements ou les simples mots bienveillants ont ponctué ce parcours : soyez rassurés de ma sincère gratitude.

Bilal

Liste des tableaux

Tableau N°1 : Comparaison entre bioaccumulation, bioconcentration et biomagnification.....	23
Tableau N°2 : Valeurs du pH et de la conductivité dans les eaux marines des sites étudiés.....	39
Tableau N°3 : Concentrations des éléments traces métalliques mesurées dans l'eau de mer ($\mu\text{g/L}$)	40
Tableau N°4 : Comparaison des concentrations moyennes aux normes internationales ($\mu\text{g/L}$)	44

Liste de figures

Figure N°1 : Modèle de bioaccumulation des éléments traces métalliques dans la chaîne alimentaire (Zhang et al., 2021, via ResearchGate)	24
Figure N°2 : Collage photographique de quelques sites d'échantillonnage le long du littoral de Béjaïa (Photos Originales)	30
Figure N° 3 : Carte géographique montrant la localisation de différents sites d'échantillonnage (Google Earth)	30
Figure N°4 : Spectromètre d'Absorption Atomique à four graphite (GFAAS) (Photos Originale)	32
Figure N°5 : Acide nitrique (HNO ₃) (Photo Originale)	32
Figure N°6 : Les solutions étalons (Photo Originale)	33
Figure N°7 : Prélèvement des échantillons d'eau de mer : à gauche, prélèvement sur une plage ; à droite, prélèvement avec l'aide de plongeurs dans un port (Photos Originale)	34
Figure N°8 : Mesure du pH avec un pH-mètre (photo Originale)	34
Figure N°9 : Mesure de la conductivité avec un conductimètre (Photo Originale)	35
Figure N°10 : Traitement des échantillons avec de l'acide nitrique (Photo Originale).....	36
Figure N°11 : Chauffage des échantillons traités sur plaque chauffante à 150°C (Photo Originale)	36
Figure N°12 : Disposition des échantillons et des creusets (a) et remplissage des creusets de 5 mL avec les échantillons (b) (photos Originales)	37
Figure N°13 : Les échantillons disposés dans le disque autosampler PerkinElmer Furnace Autosampler AS900 (Photo Originale)	38

Figure N°14 : Variations des concentrations de cadmium (Cd) en fonction des sites d'étude	41
Figure N°15 : Variations des concentrations de cadmium (Cu) en fonction des sites d'étude.....	42
Figure N°16 : Variations des concentrations de cadmium (Ni) en fonction des sites d'étude.....	42

Liste des abréviations

- **ETM** : Éléments traces métalliques
- **Cd** : Cadmium
- **Pb** : Plomb
- **Zn** : Zinc
- **Cu** : Cuivre
- **Co** : Cobalt
- **Ni** : Nickel
- **Hg** : Mercure
- **Cr** : Chrome
- **MOD** : Matière organique dissoute
- **MES** : Matières en suspension
- **OMS** : Organisation mondiale de la santé
- **FAO** : Food and Agriculture Organization
- **EPA** : Environmental Protection Agency
- **UE** : Union Européenne
- **WHO** : World Health Organization
- **ppm** : Parties par million
- **ppb** : Parties par milliard
- **mg/L** : Milligramme par litre
- **µg/L** : Microgramme par litre
- **mL** : Millilitre
- **°C** : Degré Celsius
- **pH** : Potentiel Hydrogène
- **mS/cm** : Millisiemens par centimètre
- **µS/cm** : Microsiemens par centimètre
- **E01 à E14** : Échantillons numérotés de 01 à 14
- **TLM** : Toxicité létale moyenne
- **NOEC** : No Observed Effect Concentration (Concentration sans effet observé)
- **LOEC** : Lowest Observed Effect Concentration (Plus basse concentration avec effet observé)

- **BMF** : BioMagnification Factor (Facteur de biomagnification)
- **BCF** : BioConcentration Factor (Facteur de bioconcentration)
- **SAA** : Spectrométrie d'absorption atomique
- **GFAAS** : Spectromètre d'Absorption Atomique à four graphite
- **HNO₃** : Acide nitrique

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I – Les éléments traces métalliques en milieu marin	
I.1. Définition et classification	3
I.1.1. Définition chimique et environnementale	3
I.1.2. Critères de classification	3
I.1.3. Les éléments traces métalliques essentiels et non essentiels	4
I.1.4. Risques environnementaux et sanitaires	4
I.2. Présence et importance dans les écosystèmes marins	5
I.2.1. Distribution (eaux, sédiments, organismes)	5
I.2.2. Les éléments traces métalliques et le métabolisme des organismes marin	5
I.3. Principaux éléments traces métalliques analysés	6
I.3.1. Le plomb (Pb)	6
I.3.1.1. Histoire	6
I.3.1.2. Propriétés	6
I.3.1.3. Comportement dans l'eau de mer	6
I.3.1.4. Toxicité et effets écotoxicologiques	7
I.3.2. Le cuivre (Cu)	7
I.3.2.1. Histoire	7
I.3.2.2. Propriétés	7
I.3.2.3. Comportement dans l'eau de mer	8
I.3.2.4. Toxicité et effets écotoxicologiques	8

I.3.3. Le cadmium (Cd)	8
I.3.3.1. Histoire	8
I.3.3.2. Propriétés	8
I.3.3.3. Comportement dans l'eau de mer	9
I.3.3.4. Toxicité et effets écotoxicologiques	9
I.3.4. Le nickel (Ni)	9
I.3.4.1. Histoire	9
I.3.4.2. Propriétés	9
I.3.4.3. Comportement dans l'eau de mer	10
I.3.4.4. Toxicité et effets écotoxicologiques	10

Chapitre II – Sources des éléments traces métalliques

II.1. Origines naturelles	11
II.1.1. Altération des roches et érosion	11
II.1.2. Activité volcanique	11
II.1.3. Apports atmosphériques	12
II.2. Sources anthropiques	13
II.2.1. Activités industrielles	14
II.2.2. Activités agricoles	15
II.2.3. Rejets urbains et domestiques	16
II.2.4. Activités portuaires et maritimes	16
II.3. Voies d'introduction dans le milieu marin	17
II.3.1. Apports fluviaux	18
II.3.2. Déversements directs	18

II.3.3. Rejets urbains et domestiques	18
II.3.4. Transports et retombées atmosphériques	19
II.3.5. Exploitation minière et orpillage	19
II.4. Facteurs de dispersion	19
II.4.1. Le pH de l'eau	20
II.4.2. La salinité	20
II.4.3. La température	20
II.4.4. La turbidité et la matière en suspension (MES)	21
II.4.5. La matière organique dissoute (MOD)	21
II.4.6. Les courants marins et la stratification	21
Chapitre III – Passage des éléments traces métalliques vers le biote	22
III.1. Bioaccumulation.....	22
III.1.1. Définition.....	22
III.1.2. Mécanismes	22
III.2. Bioconcentration.....	22
III.3. Biomagnification	23
III.4. Comparaison entre bioaccumulation, bioconcentration et biomagnification.....	23
III.5. Transfert au sein de la chaîne alimentaire.....	25
III.6. Effets écotoxicologiques et sanitaires	25
III.6.1. Sur les organismes aquatiques	26
III.6.2. Sur la santé humaine	26

Chapitre IV – Matériel et méthodes

IV.1. Matériels	28
IV.1.1. Sites d'échantillonnage.....	28
IV.1.2. L'eau de mer	31
IV.1.3. Éléments traces métalliques à analyser	31
IV.1.4. Matériel de laboratoire	31
IV.1.4.1. Matériel de prélèvement (d'échantillonnage)	31
IV.1.4.2. Matériel de traitement des échantillons	31
IV.1.4.3. Matériel d'analyse	32
IV.1.5. Réactifs utilisés	32
IV.2. Méthodes	33
IV.2.1. Méthode d'échantillonnage	33
IV.2.1.1. Collecte des échantillons.....	33
IV.2.2. Mesures de pH et de la conductivité	34
IV.2.3. Préparation des échantillons	35
IV.2.4. Digestion	36
IV.2.5. Dosage des éléments traces	37
IV.2.5.1. Préparation des solutions d'essai	37
IV.2.5.2. Préparation des solutions étalons	37
IV.2.5.3. Dosage par SAA	38

Chapitre V – Résultats et discussion

V.1. Résultats	40
V.1.1. Paramètres physico-chimiques : pH et conductivité	40
V.1.2. Concentrations des éléments traces métalliques (Cd, Pb, Cu, Ni) dans les eaux marines de Béjaïa	41

V.1.3. Variations des concentrations des éléments traces analysés (Cd, Pb, Cu, Ni) en fonction des sites d'étude.....	41
V.1.4. Analyse des tendances spatiales	44
V.1.5. Conformité aux normes environnementales internationales	44
V.2. Discussion	46
V.2.1. Discussion des paramètres physico-chimiques : pH et conductivité	46
V.2.2. Résultats de concentration des éléments traces métalliques dosés dans l'eau de mer de Bejaïa	46
V.2.2.1. Cadmium (Cd)	46
V.2.2.2. Plomb (Pb)	47
V.2.2.3. Cuivre (Cu)	48
V.2.2.4. Nickel (Ni)	49
V.2.3. Implications écotoxicologiques et sources de pollution.....	50
V.2.3.1. Variations des concentrations des éléments traces dosés en fonction des sites d'étude.....	50
IV.2.4.2. Effets écotoxicologiques des éléments traces métalliques sur les organismes marins.....	51
Conclusion et perspectives	52
Références bibliographiques	54

Introduction générale

La contamination des écosystèmes marins par les **éléments traces métalliques (ETM)**, constitue l'un des enjeux environnementaux majeurs de notre époque (Ramalingam et al., 2024 ; Varol & Sünbül, 2023). Ces éléments métalliques toxiques, tels que le mercure, le plomb, le cadmium, le cuivre et d'autres éléments, sont largement répandus dans les milieux marins, principalement en raison des activités humaines (Bendjeddou, 2013 ; Belabed, 2014). Ces ETM possèdent des propriétés physico-chimiques qui leur confèrent une grande stabilité environnementale et une capacité à se bioaccumuler dans les organismes vivants, y compris les espèces marines, représentant ainsi un risque indirect pour la santé humaine (Duffus, 2002 ; Yang et al., 2015 ; Mehoul et al., 2019).

Ces polluants représentent une menace grave pour la biodiversité marine et pour la santé humaine, en particulier dans les régions côtières où les activités économiques et les sources de pollution sont importantes (Ali et al., 2019 ; OMS, 2021). Les causes de cette contamination sont multiples et variées : l'industrie, l'agriculture, les transports maritimes ainsi que l'exploitation minière constituent les principales sources anthropiques de pollution métallique dans les milieux marins (Remili & Kerfouf, 2013 ; Ramalingam et al., 2024). Ces activités libèrent des **éléments traces métalliques** dans les eaux de surface, qui finissent par s'accumuler dans les sédiments marins et les organismes aquatiques (Reddy et al., 2004 ; Mahmoudi et al., 2022).

Les **éléments traces métalliques** sont non seulement toxiques, mais ils présentent aussi une grande stabilité chimique qui les rend difficiles à éliminer ou à neutraliser une fois introduits dans l'environnement (Järup, 2003 ; Fan et al., 2022). Leur passage dans la chaîne alimentaire, via la bioaccumulation et la biomagnification, amplifie encore les risques sanitaires, affectant ainsi la qualité des ressources maritimes et représentant une menace potentielle pour la santé publique (Yang et al., 2015 ; Paul et al., 2024).

Le phénomène de bioaccumulation des **éléments traces métalliques** dans les tissus des organismes marins pose des défis scientifiques complexes, notamment en ce qui concerne les mécanismes d'absorption, de distribution, de métabolisme et d'excrétion (Stellio Casas, 2005 ; Paul et al., 2024). De plus, ces ETM peuvent interférer avec les fonctions biologiques essentielles des organismes, notamment la reproduction, la croissance et les processus enzymatiques (Goyer & Clarkson, 2001 ; Fan et al., 2022). À travers une évaluation des effets physiopathologiques de ces polluants sur les espèces marines, il devient possible de

comprendre les conséquences écologiques plus larges, comme l'altération des écosystèmes et la réduction de la biodiversité (Rainbow, 2002 ; Ali et al., 2019). Ces impacts peuvent avoir des répercussions économiques significatives, en particulier pour les communautés humaines qui dépendent des ressources marines pour la pêche et le tourisme (OMS, 2021).

L'objectif de cette étude est d'évaluer le niveau de contamination des eaux marines de différents sites de la région de Béjaïa par les éléments traces métalliques (ETM) ; le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le cuivre (Cu) et le nickel (Ni). Il s'agit également de comparer les concentrations obtenues aux seuils réglementaires fixés par les instances nationales et internationales, afin d'identifier les zones à risque et de contribuer à une gestion environnementale plus efficace du littoral.

Chapitre I

**Les éléments traces métalliques en
milieu marin**

I.1 Définition et classification

I.1.1 Définition chimique et environnementale

Le terme « **métaux lourds** », couramment utilisé dans la littérature, ne possède pas de définition universellement admise. Sur le plan chimique, il désigne généralement les éléments trace métalliques ayant une **densité élevée**, souvent supérieure à **5 g/cm³** (Duffus, 2002). Toutefois, cette approche physique est jugée réductrice, car elle ne tient pas compte des aspects toxicologiques ou écotoxicologiques de ces substances (Duffus, 2002).

Les **éléments traces métalliques** regroupent donc un ensemble d'éléments chimiques, principalement situés dans le bloc d des éléments de transition du tableau périodique, qui ont la particularité de former des cations stables, de s'accumuler dans les tissus biologiques et de persister dans l'environnement (Järup, 2003).

I.1.2 Critères de classification

Trois critères sont souvent utilisés pour classifier les **éléments traces métalliques** : **la densité, la toxicité et la capacité de bioaccumulation**. Une densité supérieure à 5 g/cm³ est un seuil communément utilisé pour définir les ETM sur le plan physique. Cependant, c'est surtout leur **toxicité** – en particulier à faible dose – qui attire l'attention dans les études environnementales (Nagajyoti et al., 2010).

La **bioaccumulation** est un autre facteur clé : certains **éléments traces métalliques** ont la capacité de s'accumuler dans les tissus d'organismes aquatiques et de se concentrer le long de la chaîne trophique, augmentant ainsi le risque d'effets chroniques même à de faibles concentrations (Ali et al., 2019).

I.1.3. Les éléments traces métalliques essentiels et non essentiels

On distingue deux grandes catégories d'**éléments traces métalliques** :

- **Les éléments traces métalliques essentiels**, tels que le cuivre (Cu), le zinc (Zn) ou le fer (Fe), nécessaires en faibles quantités pour le fonctionnement biologique normal des organismes ;
- **Les éléments traces métalliques non essentiels**, comme le plomb (Pb), le cadmium (Cd) ou le mercure (Hg), qui n'ont aucune fonction biologique connue et sont toxiques même à faibles doses (Rehman et al., 2018).

Les ETM essentiels deviennent toutefois toxiques lorsqu'ils sont présents en concentrations supérieures aux seuils physiologiques. Leur toxicité dépend donc de la dose et de leur biodisponibilité dans le milieu (Tchounwou et al., 2012).

I.1.4. Risques environnementaux et sanitaires

Les **éléments traces métalliques** représentent un risque majeur pour les écosystèmes marins, car ils peuvent persister dans l'environnement, se fixer dans les sédiments ou les organismes, et interférer avec les fonctions biologiques (Rainbow, 2002). L'exposition chronique à ces éléments chez les organismes aquatiques peut entraîner des altérations génétiques, des troubles du développement, des effets cancérogènes ou perturbateurs endocriniens (Goyer & Clarkson, 2001).

Sur le plan sanitaire, la contamination de la chaîne alimentaire marine par des ETM constitue une menace directe pour l'homme, notamment à travers la consommation de poissons ou fruits de mer contaminés (Ali et al., 2019). Le plomb, le cadmium et le mercure sont classés parmi les substances prioritaires de surveillance en raison de leur toxicité aiguë et chronique (OMS, 2021).

I.2. Présence et importance dans les écosystèmes marins

I.2.1. Distribution (eaux, sédiments, organismes)

Les écosystèmes marins sont des récepteurs majeurs de pollution métallique. Les **éléments traces métalliques** y sont distribués selon trois compartiments principaux : **l'eau de mer, les sédiments et les organismes vivants**. Dans l'eau, les ETM peuvent exister sous forme dissoute ou être adsorbés sur des particules en suspension. Cependant, la majeure partie finit par se déposer dans les **sédiments**, qui jouent le rôle de réservoirs à long terme (Förstner & Wittmann, 2012).

Les **organismes marins**, notamment les invertébrés filtreurs, les poissons ou les macroalgues, peuvent absorber ces ETM par contact direct avec l'eau ou via leur alimentation. Cette bioaccumulation varie selon l'espèce, l'âge, le sexe, le régime alimentaire et la concentration des ETM dans le milieu (Rainbow, 2002). Ainsi, la contamination des espèces marines est un indicateur courant de la qualité environnementale.

Les zones côtières, soumises à des apports anthropiques plus marqués (rejets industriels, urbains ou agricoles), présentent généralement des concentrations plus élevées en **éléments traces métalliques** (Bryan & Langston, 1992). Ces zones jouent donc un rôle central dans l'évaluation de la pollution marine.

I.2.2. Les éléments traces métalliques et le métabolisme des organismes marin

Les éléments traces métalliques interfèrent avec de nombreux processus métaboliques des organismes marins. Certains ETM essentiels, comme le cuivre et le zinc, participent à des fonctions enzymatiques vitales. Cependant, en cas d'excès, ces éléments peuvent inhiber des réactions biochimiques et générer du **stress oxydatif**, en favorisant la formation d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), dommageables pour les cellules (Livingstone, 2001).

Les ETM non essentiels, quant à eux, n'ont aucun rôle physiologique et présentent une **toxicité directe**. Le cadmium, par exemple, perturbe le métabolisme calcique et inhibe la synthèse des protéines, tandis que le plomb interfère avec les systèmes nerveux et immunitaire (Tchounwou et al., 2012).

Les effets sont d'autant plus préoccupants qu'ils ne se limitent pas aux individus exposés directement : les **effets sublétaux** peuvent se répercuter à l'échelle des populations et des communautés biologiques, entraînant des modifications de la biodiversité et du fonctionnement global des écosystèmes marins (Luoma & Rainbow, 2008).

I.3. Principaux éléments traces métalliques analysés

I.3.1. Le plomb (Pb)

I.3.1.1. Histoire

Le plomb est l'un des ETM les plus anciens utilisé par l'humanité. Son usage remonte à l'Antiquité, notamment chez les Égyptiens et les Romains, qui l'employaient pour la fabrication de tuyaux, d'ustensiles et de pigments (Nriagu, 1983). Cependant, ce n'est qu'au cours du XXe siècle que l'on a pleinement pris conscience de sa toxicité, en particulier avec l'utilisation massive de l'essence au plomb, désormais interdite dans de nombreux pays (Nriagu, 1983).

I.3.1.2. Propriétés

Le plomb est un **élément trace métallique** de densité élevée (11,34 g/cm³), malléable, peu réactif chimiquement et stable dans de nombreux milieux. Il existe principalement sous forme de Pb²⁺ dans les environnements aqueux. Son comportement chimique dépend fortement des conditions physico-chimiques du milieu, notamment du pH, de la salinité et de la présence d'agents complexants (Salomons & Förstner, 1984).

I.3.1.3. Comportement dans l'eau de mer

Dans les écosystèmes marins, le plomb tend à se fixer rapidement aux particules en suspension, ce qui le rend peu mobile à l'état dissous. Une fois adsorbé, il s'accumule dans les **sédiments**, où il peut rester piégé pendant de longues périodes, ou être remobilisé dans certaines conditions (Burton, 1992). Cette dynamique rend difficile l'évaluation à long terme de sa biodisponibilité (Burton, 1992).

I.3.1.4. Toxicité et effets écotoxicologiques

Le plomb est toxique pour de nombreux organismes marins, même à faibles concentrations (Wright & Welbourn, 2002). Il perturbe les fonctions enzymatiques, altère les membranes cellulaires et nuit au développement embryonnaire chez les poissons et les invertébrés (Wright & Welbourn, 2002). Les bivalves, souvent utilisés comme bioindicateurs de pollution marine, présentent une bioaccumulation importante de ce métal, ce qui peut affecter leur filtration et leur reproduction (Rainbow, 2002). Chez les poissons, l'exposition au plomb peut causer des troubles neurologiques, du stress oxydatif et des altérations du comportement (Tchounwou et al., 2012).

I.3.2. Le cuivre (Cu)

I.3.2.1. Histoire

Le cuivre est un ETM utilisé depuis la Préhistoire (Craddock, 1995). Il est l'un des premiers métaux extraits et travaillés par l'homme, notamment pour la fabrication notamment pour la confection d'armes, d'ustensiles domestiques et de bijoux. Son usage s'est ensuite développé avec l'apparition du bronze, un alliage de cuivre et d'étain. Aujourd'hui, le cuivre est largement utilisé dans l'industrie électrique, la construction, les pesticides et les peintures antifouling pour bateaux (Stauber et Florence, 1990).

I.3.2.2. Propriétés

Le cuivre est un ETM rougeâtre, ductile et bon conducteur thermique et électrique. Sa densité est d'environ 8,96 g/cm³ (Greenwood & Earnshaw, 1997). En milieu marin, il existe principalement sous forme ionique Cu²⁺, mais peut également se complexer avec des composés organiques ou inorganiques (Luoma & Rainbow, 2008). Sa spéciation dépend du pH, de la salinité et de la présence d'agents complexants, ce qui influence sa biodisponibilité et sa toxicité (Luoma & Rainbow, 2008).

I.3.2.3. Comportement dans l'eau de mer

Dans l'eau de mer, le cuivre est présent à la fois sous forme dissoute et particulaire (Luoma & Rainbow, 2008). Une grande partie du cuivre dissous est rapidement complexée par la matière organique dissoute, réduisant ainsi sa toxicité immédiate (Moffett & Dupont, 2007). Il tend à s'accumuler dans les sédiments, où il peut être relargué selon les conditions environnementales (Bryan & Langston, 1992).

I.3.2.4. Toxicité et effets écotoxicologiques

Le cuivre est indispensable à de nombreuses fonctions biologiques, mais devient toxique à des concentrations élevées (Grosell et al., 2007). Chez les organismes marins, il interfère avec les processus enzymatiques et cause des dommages aux membranes cellulaires. Chez les mollusques et crustacés, il peut affecter la reproduction, la croissance et le comportement (Grosell et al., 2007). Le cuivre est aussi toxique pour les microalgues, réduisant leur taux de photosynthèse et perturbant l'équilibre des réseaux trophiques marins (Lewis & Cave, 1982).

I.3.3. Le cadmium (Cd)

I.3.3.1. Histoire

Le cadmium a été découvert en 1817 par le chimiste allemand Friedrich Stromeyer. Longtemps considéré comme un sous-produit de l'extraction du zinc, il a trouvé diverses applications industrielles au XXe siècle, notamment dans les batteries, les pigments, les plastiques et les revêtements anticorrosion (ATSDR, 2012). Ce développement industriel a entraîné une augmentation significative de la présence de cadmium dans l'environnement, y compris les milieux marins (ATSDR, 2012).

I.3.3.2. Propriétés

Le cadmium est un **élément trace métallique** mou, blanc-argenté, de densité 8.65 g/cm³ (ATSDR, 2012). Il est relativement stable à l'air mais peut former des composés solubles dans l'eau, principalement sous forme d'ions Cd²⁺. Contrairement au cuivre, le

cadmium n'a aucune fonction biologique connue chez les organismes vivants, ce qui en fait un contaminant particulièrement préoccupant (Pan & Wang, 2012).

I.3.3.3. Comportement dans l'eau de mer

Le cadmium est présent dans l'eau de mer sous forme dissoute ou lié à des particules (Sadiq, 1992). Il est plus mobile que d'autres **éléments traces métalliques** et tend à rester biodisponible plus longtemps, surtout dans les zones à faible salinité et forte activité biologique (Sadiq, 1992). Il peut s'accumuler dans les tissus des organismes marins et atteindre des niveaux toxiques dans les réseaux trophiques (Wang, 2001).

I.3.3.4. Toxicité et effets écotoxicologiques

Le cadmium est extrêmement toxique pour de nombreuses espèces marines, même à faibles concentrations (Rainbow, 2002). Il perturbe les fonctions enzymatiques, provoque des dommages oxydatifs, altère la reproduction et provoque des malformations chez les embryons de poissons et d'invertébrés (Rainbow, 2002). Sa bioaccumulation dans les chaînes alimentaires peut aussi représenter un danger pour la santé humaine, en particulier via la consommation de coquillages et poissons contaminés (Burger et al., 2002).

I.3.4. Le nickel (Ni)

I.3.4.1. Histoire

Le nickel a été identifié comme élément chimique en 1751 par le chimiste suédois Axel Fredrik Cronstedt. Il a été utilisé historiquement dans la fabrication d'alliages résistants à la corrosion, notamment l'acier inoxydable, ainsi que dans les pièces de monnaie, les piles et les catalyseurs industriels (Nieboer & Richardson, 1980). L'activité minière et métallurgique du nickel a considérablement augmenté au cours du XXe siècle, entraînant une dissémination plus large de cet élément dans l'environnement marin (Nieboer & Richardson, 1980).

I.3.4.2. Propriétés

Le nickel est un métal de transition de couleur argentée, dur et ductile (Greenwood & Earnshaw, 1997). Il a une densité de 8,9 g/cm³ et une bonne résistance à l'oxydation. Dans l'eau de mer, il est généralement présent sous forme d'ions Ni²⁺, et peut également former

des complexes avec des ligands organiques ou des particules colloïdales (Amiard et al., 2006). Le nickel est considéré comme un oligo-élément essentiel pour certains microorganismes et plantes marines, mais il devient toxique au-delà de certaines concentrations (Amiard et al., 2006).

I.3.4.3. Comportement dans l'eau de mer

Le nickel est généralement présent à de faibles concentrations dans l'eau de mer, mais sa distribution dépend de la salinité, du pH, de la présence de matière organique et des particules en suspension (Amiard et al., 2006). Il a une affinité modérée pour les sédiments, ce qui lui permet de rester en partie biodisponible (Amiard et al., 2006). Il peut aussi être absorbé par les phytoplanctons et ainsi entrer dans les chaînes trophiques (Chen et al., 2008).

I.3.4.4. Toxicité et effets écotoxicologiques

Bien que le nickel soit nécessaire à faibles doses pour certains organismes marins, une exposition excessive entraîne une toxicité cellulaire, affectant la croissance, la reproduction et la respiration des algues, des crustacés et des mollusques (Bryan & Langston, 1992). Il est également connu pour induire un stress oxydatif et des anomalies génétiques chez plusieurs espèces (Drexler & Briffa, 2020). Chez l'être humain, la consommation de produits de la mer fortement contaminés au nickel peut provoquer des réactions allergiques et, à long terme, des effets carcinogènes (Drexler & Briffa, 2020).

Chapitre II

Sources des éléments traces métalliques dans l'environnement

II.1. Sources naturelles

Les éléments traces métalliques présents dans l'environnement marin ne proviennent pas uniquement des activités humaines. Une partie significative de leur présence est d'origine naturelle. Ces sources naturelles, bien qu'étant moins problématiques que les sources anthropiques en termes de concentration et de toxicité, participent néanmoins au cycle biogéochimique de ces éléments dans les écosystèmes marins (Biney et al., 2004 ; Nriagu, 1989).

II.1.1. Altération des roches et érosion

L'altération chimique et mécanique des roches constitue l'une des principales sources naturelles d'**éléments traces métalliques** dans l'environnement. Les roches sédimentaires, ignées et métamorphiques contiennent divers ETM tels que le plomb, le cuivre, le zinc, le nickel ou encore le cadmium (Kabata-Pendias, 2001). Sous l'effet des intempéries, du vent, de l'eau ou des variations de température, ces roches se désagrègent lentement, libérant des **éléments traces métalliques** dans les sols et les eaux de ruissellement. Ces derniers sont ensuite transportés par les fleuves jusqu'aux zones côtières où ils peuvent s'accumuler dans les sédiments marins ou être absorbés par les organismes aquatiques (Nriagu, 1989 ; Biney et al., 2004).

Cette altération naturelle dépend fortement de la nature minéralogique des roches mères et des conditions climatiques locales. Par exemple, dans les zones tropicales humides, l'altération est généralement plus intense, ce qui peut entraîner une libération plus importante de métaux dans l'environnement (Kabata-Pendias, 2001). De plus, les sols issus de l'érosion peuvent jouer un rôle de vecteurs pour ces éléments, en les transportant vers les milieux aquatiques via le lessivage et l'érosion hydrique (Förstner et Wittmann, 1981).

II.1.2. Activité volcanique

Les éruptions volcaniques sont une autre source naturelle importante d'**éléments traces métalliques** dans l'environnement. Lors des phases éruptives, les volcans émettent des gaz, des cendres et des coulées de lave contenant divers éléments métalliques, parmi lesquels le mercure, l'arsenic, le plomb, le cadmium et le zinc (Nriagu, 1989). Ces métaux peuvent

être libérés sous forme de particules solides ou de composés gazeux dans l'atmosphère, où ils peuvent parcourir de longues distances avant de retomber au sol ou d'être lessivés par les précipitations (Kabata-Pendias, 2001).

Dans les régions maritimes ou insulaires, les dépôts volcaniques peuvent directement contaminer les eaux côtières, soit par écoulement superficiel, soit par interactions hydrothermales entre les émanations volcaniques sous-marines et l'eau de mer (Biney et al., 2004). Ces apports peuvent être localement très concentrés, notamment autour des zones volcaniques actives comme le Pacifique ou certaines régions méditerranéennes (Kabata-Pendias, 2001). Les systèmes hydrothermaux sous-marins jouent également un rôle clé dans la libération d'**éléments traces métalliques** au fond des océans, en particulier dans les dorsales océaniques où l'activité géothermique est intense (Förstner et Wittmann, 1981).

Bien que ponctuels, les apports volcaniques peuvent contribuer significativement aux concentrations naturelles d'**éléments traces métalliques** dans les écosystèmes marins, en particulier lorsqu'ils sont combinés à d'autres sources naturelles comme l'érosion ou les dépôts atmosphériques (Kabata-Pendias, 2001).

II.1.3. Apports atmosphériques

L'atmosphère constitue un vecteur majeur de transport et de dépôt des **éléments traces métalliques** dans l'environnement, y compris dans les écosystèmes marins (Förstner & Wittmann, 1981). Ces apports peuvent être d'origine naturelle ou anthropique, mais même dans un contexte naturel, des particules métalliques issues de l'érosion éolienne des sols, des incendies de forêts ou encore des activités volcaniques peuvent être transportées par les vents sur de longues distances avant de se déposer sur les surfaces terrestres ou marines (Biney et al., 2004).

Les dépôts atmosphériques se produisent selon deux mécanismes principaux : les dépôts secs (sédimentation gravitationnelle ou absorption par les surfaces) et les dépôts humides (lessivage par la pluie, la neige ou le brouillard). Ces processus permettent aux ETM présents dans les aérosols de rejoindre les milieux aquatiques, souvent à des concentrations significatives (Kabata-Pendias, 2001). Le plomb, le cadmium, le mercure et l'arsenic sont parmi les ETM les plus fréquemment détectés dans les dépôts atmosphériques, même loin de leur source d'émission (Nriagu, 1989).

Dans les zones côtières, les apports atmosphériques représentent une source non négligeable de contamination marine. Une fois déposés à la surface de l'eau, les métaux peuvent se dissoudre, s'associer à la matière organique ou aux particules en suspension, ou sédimenter vers les fonds marins. Ce mode de transfert est particulièrement important dans les zones éloignées des sources terrestres directes, comme les zones océaniques ouvertes, où l'atmosphère devient la principale voie d'introduction des **éléments traces métalliques** (Biney et al., 2004).

II.2. Sources anthropiques

Les activités humaines sont aujourd'hui reconnues comme les principales sources d'**éléments traces métalliques** dans l'environnement, dépassant souvent les contributions naturelles. Ces apports sont étroitement liés au développement industriel, à l'urbanisation croissante et à l'intensification de l'agriculture, qui génèrent une multitude de rejets contaminant les milieux terrestres, aquatiques et atmosphériques (Förstner et Wittmann, 1981 ; Kabata-Pendias, 2001).

Contrairement aux sources naturelles, les sources anthropiques tendent à introduire les **éléments traces métalliques** dans l'environnement sous des formes plus mobiles, plus biodisponibles et donc potentiellement plus toxiques pour les organismes vivants (Biney et al., 2004). En effet, les ETM issus des rejets industriels ou domestiques sont souvent présents sous forme de particules fines, de composés solubles ou de complexes organo-métalliques, ce qui facilite leur transport, leur assimilation biologique et leur accumulation dans les chaînes trophiques (Nriagu, 1989).

Les principales sources anthropiques de pollution métallique incluent les activités industrielles (mines, métallurgie, combustion), agricoles (engrais, pesticides), urbaines (eaux usées, lixiviats), ainsi que les activités portuaires et maritimes. Ces rejets peuvent atteindre les milieux marins directement, via des déversements ou ruissellements, ou indirectement par l'intermédiaire des rivières et de l'atmosphère (Harrison et al., 1981).

II.2.1. Activités industrielles

Les activités industrielles représentent l'une des principales sources de pollution métallique dans le milieu marin, en particulier dans les zones côtières densément peuplées. Les rejets issus du raffinage, de la métallurgie, de la fabrication de batteries, des fonderies, de la galvanoplastie, ainsi que de l'industrie chimique et électronique, contribuent de manière significative à la contamination par les éléments traces métalliques (ETM) tels que le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le cadmium (Cd) et le nickel (Ni) (Förstner & Wittmann, 1981 ; Nriagu, 1989).

Le plomb est principalement introduit dans le milieu marin par les rejets industriels, les eaux urbaines non traitées, les résidus de combustion de carburants et l'utilisation de peintures marines contenant du plomb. Il peut également être transporté sur de longues distances via l'atmosphère avant de retomber dans les mers par dépôt humide ou sec (Elder, 1988 ; Pacyna & Pacyna, 2001).

Le cuivre provient essentiellement des rejets industriels, des eaux usées domestiques, des fuites de réseaux de plomberie et de l'utilisation de peintures antifouling sur les coques de navires. L'aquaculture peut également contribuer localement à une augmentation des concentrations en cuivre. Bien que le cuivre soit un oligoélément essentiel, un excès dans le milieu marin peut avoir des effets toxiques importants (Stauber & Florence, 1990 ; Turner et al., 2009).

Le cadmium est principalement issu des activités de métallurgie, de la fabrication de batteries, des eaux usées, de l'agriculture (engrais phosphatés) et de la combustion de combustibles fossiles. Une partie du cadmium transportée par les rivières se retrouve ensuite dans les zones côtières et les sédiments marins (Bryan & Langston, 1992).

Le nickel, quant à lui, provient des rejets industriels (raffinage, production d'alliages), de l'érosion de roches ultrabasiques, des cendres volcaniques, des engrais et des eaux usées urbaines. Les activités portuaires et minières intensifient aussi sa présence dans les zones côtières (Forstner & Wittmann, 1981).

La combustion de combustibles fossiles dans les centrales électriques, les cimenteries et les incinérateurs de déchets représente également une source majeure d'émissions atmosphériques d'**éléments traces métalliques**, notamment de mercure (Hg), d'arsenic (As) et de plomb (Pb). Ces métaux peuvent parcourir de longues distances dans l'atmosphère avant de retomber sur les écosystèmes marins via les précipitations ou les dépôts secs (Nriagu, 1989 ; Harrison et al., 1981).

Dans les zones industrielles proches du littoral, la proximité des installations avec la mer accroît la probabilité de contamination directe des eaux marines par les rejets d'usines, les déversements accidentels ou les fuites chroniques de substances métalliques.

II.2.2. Activités agricoles

Les pratiques agricoles modernes représentent une source non négligeable de pollution métallique. L'utilisation intensive d'engrais chimiques, de pesticides, de fongicides et d'amendements organiques ou minéraux introduit dans l'environnement divers **éléments traces métalliques**, notamment le cuivre (Cu), le cadmium (Cd), le zinc (Zn), le plomb (Pb) et l'arsenic (As) (Alloway, 1995 ; Kabata-Pendias, 2001).

Le cuivre est largement utilisé dans les traitements phytosanitaires, en particulier dans la viticulture et les cultures maraîchères, sous forme de bouillie bordelaise ou de sulfate de cuivre (Kabata-Pendias, 2001). Le cadmium, quant à lui, est souvent présent à l'état de trace dans les engrais phosphatés, dérivés de roches phosphatées naturellement riches en ce métal (Kabata-Pendias, 2001). L'épandage répété de ces intrants entraîne une accumulation progressive des ETM dans les sols agricoles, augmentant ainsi le risque de lessivage vers les cours d'eau et, par conséquent, vers les milieux marins (Alloway, 1995).

Les effluents d'élevage peuvent également contenir des **éléments traces métalliques**, en particulier lorsque des compléments alimentaires ou des médicaments vétérinaires contenant du cuivre ou du zinc sont administrés aux animaux. Leurs rejets sur les sols favorisent le transfert de ces éléments par ruissellement, surtout lors des pluies intenses ou en l'absence de couvert végétal (Biney et al., 2004).

Enfin, les eaux de drainage agricoles et les systèmes d'irrigation peuvent agir comme vecteurs de transport des contaminants métalliques vers les écosystèmes aquatiques et marins, aggravant la pollution diffuse d'origine agricole (Kabata-Pendias, 2001).

II.2.3. Rejets urbains et domestiques

Les rejets urbains et domestiques constituent une source importante des éléments traces métalliques dans l’environnement, notamment dans les zones côtières densément peuplées. Ces rejets incluent les eaux usées provenant des habitations, des établissements publics et des infrastructures urbaines, qui peuvent contenir une variété d’**éléments traces métalliques** comme le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le cadmium (Cd), le chrome (Cr) ou encore le mercure (Hg) (Maanan et al., 2015 ; Tamele et al., 2020).

Les eaux usées domestiques transportent des ETM provenant des produits ménagers (détergents, produits de nettoyage), des canalisations en métal, des peintures, ainsi que des produits de soin et d’hygiène corporelle. Le plomb peut provenir de vieilles canalisations ou de peintures au plomb, encore présentes dans certaines habitations anciennes. Le cuivre et le zinc, quant à eux, peuvent être issus de la corrosion des tuyaux ou d’éléments métalliques dans les systèmes de plomberie (Sprovieri et al., 2007).

Lorsque les eaux usées ne sont pas convenablement traitées, notamment en l’absence ou en inefficacité de stations d’épuration, elles sont souvent déversées directement dans les cours d’eau ou en mer. Ce déversement contribue à l’accumulation de métaux dans les eaux côtières et les sédiments marins, avec des conséquences écotoxicologiques importantes sur la faune et la flore aquatiques (Maanan et al., 2015 ; Tamele et al., 2020).

Les eaux de ruissellement urbain, issues des précipitations lessivant les surfaces imperméabilisées (toits, routes, trottoirs), transportent également des **éléments traces métalliques**, souvent associés aux particules en suspension. Ces eaux peuvent contenir des résidus de carburant, d’huile de moteur, de pneus, de freins ou encore de matériaux de construction, tous riches en contaminants métalliques (Tessier et al., 2002 ; Sprovieri et al., 2007).

II.2.4. Activités portuaires et maritimes

Les activités portuaires et maritimes représentent une autre source majeure de contamination par les **éléments traces métalliques** dans les environnements marins. Ces activités comprennent le transport maritime, les opérations de chargement et de déchargement

de marchandises, ainsi que les travaux d'entretien et de maintenance des infrastructures portuaires (Cossa et al., 2016). Elles entraînent des rejets directs dans les eaux marines sous forme de résidus industriels, d'hydrocarbures, de produits chimiques et d'**éléments traces métalliques** (Bargagli et al., 2005).

Les navires, en particulier ceux qui transportent des matériaux industriels ou des produits chimiques, sont souvent responsables de déversements accidentels ou de fuites continues qui libèrent d'ETM tels que le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd) et le zinc (Zn) dans les eaux côtières. De plus, les processus de nettoyage des navires, notamment le lavage des cales, contribuent également à cette pollution (Bargagli et al., 2005).

Les installations portuaires elles-mêmes sont des sources de contamination. Les matériaux utilisés pour la construction des quais, des ports et des digues peuvent contenir des **éléments traces métalliques**, qui se libèrent dans l'environnement marin au fil du temps (Zhang et al., 2013). Par exemple, les peintures utilisées pour protéger les infrastructures portuaires contre l'usure peuvent contenir du cuivre (Cu), du zinc (Zn) et d'autres métaux (Sprovieri et al., 2007).

En outre, les activités liées à la pêche et aux réparations de bateaux dans les zones portuaires génèrent également des déchets contenant des **éléments traces métalliques**, qui peuvent se retrouver dans les sédiments marins ou être transportés par les courants marins (Sprovieri et al., 2007). Les effluents des usines de transformation de produits de la mer, souvent situées dans les ports, sont aussi une source de pollution métallique (Cossa et al., 2016).

II.3. Voies d'introduction dans le milieu marin

Les **éléments traces métalliques** peuvent pénétrer dans le milieu marin par plusieurs voies, contribuant ainsi à la pollution des eaux côtières et océaniques. Ces voies d'introduction sont variées et peuvent être classées en plusieurs catégories : apports fluviaux, déversements directs, rejets urbains et domestiques, retombées atmosphériques et exploitation minière (Cossa et al., 2016).

II.3.1. Apports fluviaux

Les rivières et les fleuves représentent une source significative d'apports d'**éléments traces métalliques** dans les milieux marins. Ces apports se produisent principalement en raison de l'érosion des sols et de l'altération des roches, mais aussi par l'intermédiaire des activités humaines (Montaño et al., 2018). Les ETM présents dans les sols et les sédiments peuvent être transportés par les eaux de ruissellement et les courants fluviaux jusqu'à la mer, où ils s'accumulent dans les sédiments marins ou se retrouvent dissous dans la colonne d'eau. Les ETM tels que le plomb (Pb), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) sont couramment observés dans ces apports fluviaux (Kabata-Pendias, 2001).

II.3.2. Déversements directs

Les déversements directs d'**éléments traces métalliques** dans l'environnement marin se produisent principalement par des activités industrielles, des accidents ou des pratiques humaines illégales. Ces rejets se font sous forme de solutions aqueuses ou de résidus solides contenant des ETM tels que le cadmium (Cd), le mercure (Hg), et le nickel (Ni), qui se retrouvent dans les eaux marines (Bargagli et al., 2005). Les déversements peuvent se produire à partir de navires, d'installations industrielles en bord de mer, de plateformes pétrolières, ou encore de pipelines sous-marins (Cossa et al., 2016).

II.3.3. Rejets urbains et domestiques

Les rejets urbains et domestiques, incluant les eaux usées provenant des ménages et des industries, constituent une autre voie d'introduction des **éléments traces métalliques** dans les milieux marins. Ces effluents contiennent divers polluants, dont les **éléments traces métalliques** provenant de la dégradation des infrastructures, des produits chimiques utilisés dans les ménages, ou encore des résidus industriels. Les ETM tels que le plomb (Pb) et le cuivre (Cu) sont fréquemment retrouvés dans ces eaux usées (Cossa et al., 2016).

II.3.4. Transports et retombées atmosphériques

Les **éléments traces métalliques** peuvent également être transportés par voie atmosphérique et retomber sur les surfaces marines sous forme de poussières, de cendres ou de particules fines. Les sources de pollution atmosphérique comprennent les émissions des industries, les véhicules, ainsi que les phénomènes naturels comme les éruptions volcaniques et les incendies de forêts. Ces particules, contenant des ETM tels que le plomb (Pb) et le cadmium (Cd), sont transportées par les vents sur de longues distances avant de se déposer sur les océans et les zones côtières (Lohmann et al., 2007 ; Nriagu, 1989).

II.3.5. Exploitation minière et orpillage

L'exploitation minière, tant légale qu'illégale, est une autre voie importante de contamination par les éléments traces métalliques dans les milieux marins. Les activités d'extraction minière libèrent des éléments traces métalliques dans les cours d'eau, qui peuvent ensuite se déverser dans l'océan. L'orpillage illégal, en particulier, est souvent responsable de la pollution au mercure (Hg) dans les rivières et les océans. Ce mercure se transforme en méthylmercure, une forme hautement toxique, qui peut s'accumuler dans les chaînes alimentaires marines, affectant ainsi les organismes marins et, en fin de compte, les humains (Hughes et al., 2019).

II.4. Facteurs de dispersion

La dispersion des **éléments traces métalliques** dans le milieu marin est un processus complexe influencé par plusieurs facteurs physiques, chimiques et biologiques. Ces facteurs jouent un rôle crucial dans la mobilité, l'accumulation et la toxicité des métaux dans les écosystèmes marins (Kabata-Pendias, 2001)

II.4.1. Le pH de l'eau

Le pH de l'eau est un facteur déterminant dans la solubilité des **éléments traces métalliques**. un pH acide favorise la dissolution des ETM, augmentant ainsi leur biodisponibilité et leur toxicité pour les organismes marins. À l'inverse, dans un environnement alcalin, certains métaux peuvent se précipiter sous forme de complexes insolubles et devenir moins disponibles pour les organismes aquatiques. Par exemple, le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) sont plus solubles dans les eaux acides, ce qui augmente leur concentration dans les sédiments marins (Sundaray et al., 2015).

II.4.2. La salinité

La salinité de l'eau influence également la dispersion des **éléments traces métalliques**. Une augmentation de la salinité peut réduire la solubilité de certains ETM, entraînant leur précipitation sous forme de sels. Cela affecte la mobilité et la biodisponibilité des ETM dans l'eau de mer. La salinité joue donc un rôle important dans la distribution des ETM dans les différentes couches de l'eau et les sédiments marins (Huang et al., 2014).

II.4.3. La température

La température de l'eau a un impact direct sur les processus de dissolution et de précipitation des **éléments traces métalliques**. Des températures plus élevées favorisent généralement la dissolution des ETM dans l'eau, augmentant leur disponibilité pour les organismes marins. De plus, la température peut influencer la vitesse des réactions chimiques et biologiques, affectant ainsi la mobilité des ETM dans les écosystèmes marins (Lu et al., 2019).

II.4.4. La turbidité et la matière en suspension (MES)

La turbidité de l'eau et la présence de matières en suspension (MES) peuvent jouer un rôle majeur dans le transport des **éléments traces métalliques**. Les particules en suspension, telles que les argiles, les sédiments ou la matière organique, peuvent adsorber les ETM et les transporter sur de grandes distances. Lorsque les particules se déposent au fond de l'océan, les ETM adsorbés peuvent être piégés dans les sédiments marins, influençant leur distribution et leur cycle biogéochimique dans l'écosystème marin (Hutton et al., 2017).

II.4.5. La matière organique dissoute (MOD)

La matière organique dissoute (MOD) dans l'eau de mer joue un rôle clé dans la distribution des **éléments traces métalliques**. Les complexes organiques peuvent se lier aux ETM, formant des complexes organométalliques qui sont souvent plus mobiles que les ETM libres. Ces complexes peuvent être transportés sur de longues distances et, selon leur stabilité, être plus ou moins biodisponibles pour les organismes marins (Aller et al., 2017).

II.4.6. Les courants marins et la stratification

Les courants marins sont un facteur important dans la dispersion des **éléments traces métalliques** dans les océans. Ces courants peuvent transporter les ETM sur de vastes distances, les redistribuant dans différentes zones marines. De plus, la stratification des eaux marines, où les couches d'eau supérieures et inférieures diffèrent en température et en densité, peut influencer la manière dont les métaux sont répartis dans l'eau. Les métaux peuvent être piégés dans les couches d'eau plus profondes et ne se mélanger à la surface que sous certaines conditions (McBride et al., 2018).

Chapitre III

Passage des éléments traces métalliques de l'eau marine vers le biote

III.1. Bioaccumulation

III.1.1. Définition

La bioaccumulation désigne le processus par lequel les organismes aquatiques absorbent et retiennent des substances chimiques, notamment les **éléments traces métalliques**, depuis leur environnement, que ce soit via l'eau, les sédiments ou la chaîne alimentaire (Bargougui et al., 2019). Ces substances s'accumulent dans les tissus vivants au fil du temps, souvent à des concentrations plus élevées que celles présentes dans le milieu ambiant (Amrani et al., 2021).

III.1.2. Mécanismes

La bioaccumulation peut survenir selon plusieurs voies : l'absorption directe depuis l'eau à travers les branchies, la peau ou les surfaces muqueuses ; ou par ingestion d'aliments ou de particules contaminées (Amrani et al., 2021). Une fois à l'intérieur de l'organisme, les ETM peuvent se lier à des protéines, être stockés dans certains organes (foie, reins, branchies), ou circuler dans l'organisme par voie sanguine ou lymphatique (Yahyaoui et al., 2022). La capacité de bioaccumulation varie selon les espèces, les caractéristiques physico-chimiques du métal, et les conditions environnementales comme la salinité, la température ou le pH (Bargougui et al., 2019 ; Yahyaoui et al., 2022).

III.2. Bioconcentration

La bioconcentration désigne l'accumulation d'**éléments traces métalliques** dans un organisme par absorption directe depuis l'eau, sans que l'organisme ne les ingère sous forme de nourriture. Ce processus est particulièrement pertinent pour les organismes marins vivant dans des eaux polluées, car ces ETM peuvent se lier aux tissus corporels, tels que les branchies, la peau et les organes internes (Güven et al., 2013). Les organismes marins tels que les mollusques, les poissons et les invertébrés peuvent accumuler des concentrations élevées d'**éléments traces métalliques**, même sans ingérer directement des sources externes de pollution (Güven et al., 2013).

Les **éléments traces métalliques** les plus fréquemment impliqués dans ce processus incluent le plomb (Pb), le cadmium (Cd) et le mercure (Hg), qui sont absorbés principalement

par diffusion passive. La bioconcentration peut être influencée par plusieurs facteurs environnementaux, tels que la température, le pH de l'eau, ainsi que la salinité (Gupta et al., 2007).

III.3. Biomagnification

Le phénomène de **biomagnification** se produit lorsque les éléments traces métalliques s'accumulent et s'intensifient à chaque niveau trophique. Autrement dit, les prédateurs de niveaux trophiques supérieurs, qui se nourrissent de nombreux organismes inférieurs, accumulent des concentrations plus élevées de ces substances toxiques (Köhler et al., 2011). Ce phénomène est particulièrement préoccupant pour les espèces marines de haut niveau trophique, comme les poissons prédateurs (requins, thons) et les mammifères marins, qui présentent des concentrations beaucoup plus élevées d'éléments traces métalliques que les organismes situés plus bas dans la chaîne alimentaire (Köhler et al., 2011).

L'intensification de la concentration des éléments traces métalliques dans les organismes carnivores, ainsi que la persistance de ces toxines dans les tissus corporels (en particulier dans les graisses), peut entraîner des effets écotoxicologiques graves, notamment des troubles de la reproduction, des anomalies neurologiques et des impacts sur la croissance (Köhler et al., 2011).

La biomagnification pose également un risque pour la santé humaine, en particulier pour les populations qui consomment régulièrement des produits marins contaminés, comme les poissons et fruits de mer.

III.4. Comparaison entre bioaccumulation, bioconcentration et biomagnification

Pour mieux comprendre les dynamiques d'accumulation des éléments traces métalliques dans les écosystèmes marins, il est utile de distinguer les concepts de bioaccumulation, bioconcentration et biomagnification, qui diffèrent par leurs mécanismes d'action et leur impact écologique (Yahyaoui et al., 2022 ; Amrani et al., 2021 ; Mehdi et al., 2018).

Tableau N°1 : Comparaison entre bioaccumulation, bioconcentration et biomagnification

Caractéristique	Bioaccumulation	Bioconcentration	Biomagnification
Définition	Accumulation d'un contaminant dans un organisme via toutes les voies d'exposition (Amrani et al., 2021)	Accumulation directe d'un contaminant depuis l'eau sans ingestion de nourriture (Yahyaoui et al., 2022)	Augmentation de la concentration d'un contaminant le long de la chaîne alimentaire (Mehdi et al., 2018)
Voie d'entrée	Eau, alimentation, sédiments (Amrani et al., 2021)	Eau uniquement (Yahyaoui et al., 2022)	Alimentation (consommation de proies contaminées) (Mehdi et al., 2018)
Exemples d'organismes	Mollusques, poissons, crustacés (Amrani et al., 2021)	Organismes filtreurs, invertébrés benthiques (Yahyaoui et al., 2022)	Poissons carnivores, oiseaux piscivores, mammifères marins (Mehdi et al., 2018)
Exemples de métaux	Cd, Pb, Hg, Zn (Amrani et al., 2021)	Cd, Pb, Cu (Yahyaoui et al., 2022)	Hg, Pb, Cd (Mehdi et al., 2018)
Impact écologique	Accumulation dans les tissus, toxicité chronique (Amrani et al., 2021)	Risques toxiques directs chez les espèces exposées (Ali et al., 2019)	Transmission accrue des toxiques aux niveaux trophiques supérieurs (Mehdi et al., 2018)

III.5. Transfert au sein de la chaîne alimentaire

Le transfert des **éléments traces métalliques** au sein de la chaîne alimentaire marine est un processus complexe où ces éléments passent des producteurs primaires (plantes aquatiques et phytoplancton) aux consommateurs primaires (herbivores) puis aux niveaux trophiques supérieurs. Ce processus peut entraîner une augmentation des concentrations d'**éléments traces métalliques** à chaque niveau trophique, phénomène connu sous le nom de **biomagnification**.

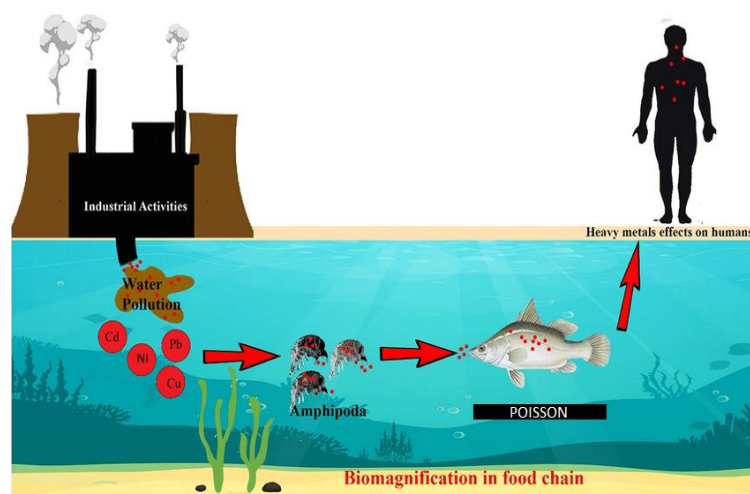


Figure N°1 : Modèle de bioaccumulation des éléments traces métalliques dans la chaîne alimentaire (Zhang et al., 2021, via ResearchGate)

III.6. Effets écotoxicologiques et sanitaires

Les éléments traces métalliques ont des effets écotoxicologiques significatifs sur les organismes aquatiques et des impacts potentiels sur la santé humaine. Ces effets varient en fonction du type d'ETM, de sa concentration et de la durée de l'exposition. Les **éléments traces métalliques** affectent le métabolisme, la reproduction, la croissance et la survie des espèces marines (Wang et al., 2007).

III.6.1. Sur les organismes aquatiques

Les effets écotoxicologiques des éléments traces métalliques sur les organismes marins incluent des altérations physiologiques et comportementales, des mutations génétiques, ainsi qu'une diminution de la biodiversité dans les écosystèmes aquatiques (Wang et al., 2007).

Les poissons, mollusques et crustacés sont particulièrement vulnérables aux effets des **éléments traces métalliques**, notamment en raison de leur exposition prolongée à ces contaminants dans leur environnement. Les ETM tels que le **cadmium (Cd)** et le **mercure (Hg)** sont bien connus pour leur toxicité, entraînant des perturbations du métabolisme cellulaire, des effets neurotoxiques, ainsi que des effets sur le système immunitaire et hormonal (Wang et al., 2007). Par exemple, le cadmium peut interférer avec la respiration cellulaire en inhibant les enzymes essentielles, ce qui conduit à un dysfonctionnement cellulaire grave. (Wang et al., 2007).

Des concentrations élevées de plomb (Pb) et de mercure peuvent également entraîner des anomalies dans le développement des embryons et des larves de poissons, réduisant ainsi la survie des jeunes et perturbant les populations marines (Yu et al., 2012). Les poissons carnivores, en particulier, montrent des concentrations accrues de ces ETM dans leurs tissus, affectant leur santé et leur capacité à se reproduire efficacement (Yu et al., 2012)

III.6.2. Sur la santé humaine

Les éléments traces métalliques présents dans les produits marins représentent un danger pour la santé humaine, notamment par leur consommation régulière. Ces contaminants peuvent pénétrer dans l'organisme humain et s'accumuler dans les tissus, en particulier dans les reins, le foie et le cerveau (Bose-O'Reilly et al., 2010).

Le mercure est particulièrement préoccupant, car il peut affecter le système nerveux central, provoquant des troubles cognitifs, des problèmes de coordination et des effets neurocomportementaux, notamment chez les enfants et les femmes enceintes (Bose-O'Reilly et al., 2010). Le plomb, quant à lui, est lié à des troubles neurologiques, des problèmes de développement chez les enfants et des effets cardiovasculaires chez les adultes (López et al., 2012).

De plus, l'exposition prolongée à des concentrations élevées de cadmium (Cd) peut causer des dommages rénaux et des troubles respiratoires, en particulier dans les zones côtières où la pollution par les **éléments traces métalliques** est plus fréquente en raison des activités industrielles et agricoles (Satarug et al., 2013).

Les risques sanitaires sont particulièrement élevés dans les communautés qui consomment fréquemment des poissons et des fruits de mer contaminés, ce qui nécessite une surveillance stricte des niveaux d'**éléments traces métalliques** dans les produits marins destinés à la consommation humaine (Satarug et al., 2013).

Chapitre IV

Matériels et méthodes

IV.1. Matériels

Toutes les opérations expérimentales de cette étude ont été réalisées au Centre de Recherche en Analyse Physico-Chimique (CRAPC) de Béjaïa, en suivant rigoureusement le protocole analytique de ce centre. Ce protocole encadre les procédures d'échantillonnage, de préparation, de digestion et d'analyse des éléments traces métalliques dans l'eau de mer, assurant la fiabilité des résultats.

IV.1.1. Sites d'échantillonnage

L'échantillonnage a été effectué sur 13 sites répartis le long du littoral de la wilaya de Béjaïa, située au nord-est de l'Algérie. Cette région, bordée par la mer Méditerranée, est une grande métropole urbaine caractérisée par une activité industrielle, portuaire et touristique importante, ce qui la rend sensible à la pollution.

Les sites d'échantillonnage ont été sélectionnés en fonction de leur exposition potentielle à différentes sources de pollution, telles que les rejets industriels, domestiques, agricoles ainsi que les activités portuaires et touristiques. Les zones comprennent :

- **Port de pêche de Béjaïa (site 1)**: zone portuaire commerciale à forte activité maritime, avec des rejets industriels et hydrocarbonés provenant des navires.
- **Aoukas (site 2)**: zone côtière urbaine, soumise à des rejets domestiques et à un ruissellement urbain mal contrôlé.
- **Tichy (site 3)**: plage touristique, recevant une forte affluence en saison estivale. La pollution est principalement liée aux activités humaines et aux infrastructures touristiques.
- **Port pétrolier (site 4)**: zone industrielle spécialisée dans le stockage et le transport d'hydrocarbures, avec des risques élevés de contamination par les hydrocarbures et les métaux lourds.
- **Tala ilef (site 5)**: site naturel peu urbanisé, utilisé comme point de comparaison. Exposition plus faible à la pollution directe.
- **Aiguades (site 6)**: plage populaire, fréquentée durant la saison estivale. Risques de pollution liés aux activités récréatives et aux installations sanitaires.
- **Sidi Ali Lebhar (site 7)**: zone semi-urbaine, proche de plusieurs habitations et exposée à des rejets d'eaux usées domestiques.

- **Oued Ageryoun (site 8)**: embouchure d'un oued déversant des eaux pluviales et usées non traitées, susceptible de transporter des polluants agricoles et domestiques vers la mer.
- **Plage Lota (site 9)** : plage de sable connue pour son environnement semi-naturel, mais exposée aux rejets domestiques provenant des quartiers voisins.
- **Plage El Maghra (site 10)** : site à proximité de zones rurales et de terrains agricoles, pouvant être affecté par les ruissellements contenant des résidus de pesticides ou d'engrais.
- **Beni Ksila (site 11)**: plage bordée d'habitations et de petites infrastructures touristiques. Pollution potentielle par les eaux usées domestiques et les déchets solides.
- **Boulimat (site 12)**: zone touristique très fréquentée, notamment en été. Présente un risque de pollution lié à la forte activité humaine et au manque de traitement des eaux usées.
- **Saket (site 13)**: zone portuaire de pêche et de plaisance, soumise à une pollution mixte (domestique, hydrocarbures, et déchets portuaires).

Comme l'illustre le collage photographique des principaux sites d'échantillonnage (Figure 2), ces zones présentent une grande diversité de contextes environnementaux et de pressions anthropiques.

De plus, la carte géographique (Figure 3) permet de visualiser la localisation précise de chacun des sites le long du littoral de Béjaïa.

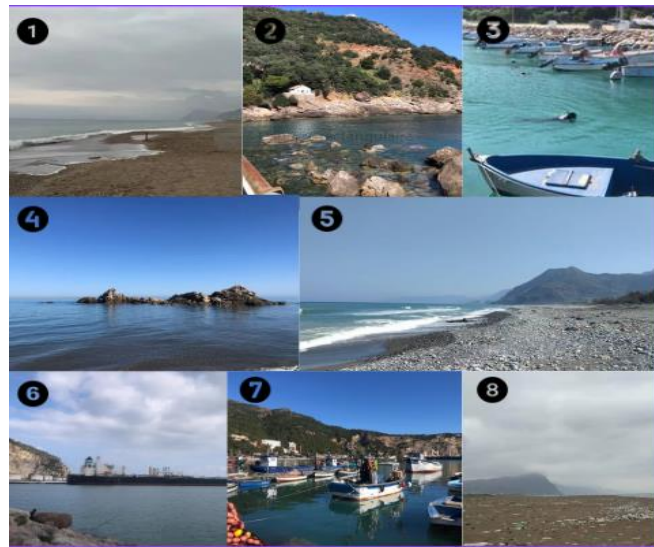


Figure N°2 . Collage photographique de quelques sites d'échantillonnage le long du littoral de Béjaïa (Photos Originales)

1: Plage El Maghra, 2: Aiguades, 3: Tala ilef, 4: Tichy, 5: Oued Ageryoun, 6: Port pétrolier, 7: Port de pêche de Béjaïa, 8: Plage Lota.

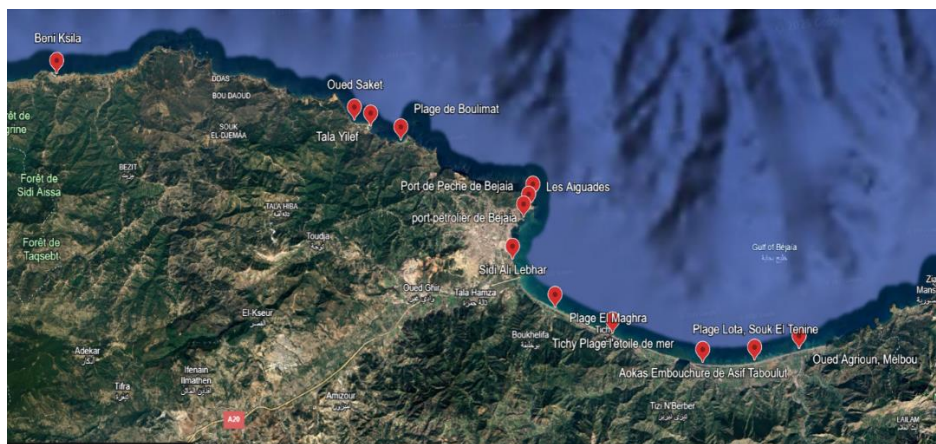


Figure N° 3. Carte géographique montrant la localisation de différents sites d'échantillonnage (Google Earth)

IV.1.2. L'eau de mer

Le choix de l'eau de mer n'est pas fortuit. L'eau de mer est une composition complexe en éléments minéraux et organiques dans leur présence en grande concentration peut être une source de contamination de la faune et de la flore aquatique et puis de l'organisme humain. L'eau de la région nord-est d'Algérie (**Bejaia**) était l'objet de cette étude puisqu'elle constitue une grande région industrielle avec de nombreux rejets en eaux usées.

IV.1.3. Éléments traces métalliques à analyser

L'étude a porté sur l'analyse de certains éléments traces métalliques présents dans l'eau de mer. Parmi ceux-ci, quatre éléments traces métalliques ont été ciblés en raison de leur **toxicité élevée : Plomb (Pb), Nickel (Ni), Cadmium (Cd) et le Cuivre (Cu)**.

IV.1.4. Matériel de laboratoire

Le matériel utilisé au cours de cette étude se divise en trois catégories principales : **le matériel de prélèvement, le matériel de traitement des échantillons, et le matériel d'analyse.**

IV.1.4.1. Matériel de prélèvement (d'échantillonnage)

- Bouteilles en plastique de 500 mL (pré-désinfectées et rincées à l'eau distillée)

IV.1.4.2. Matériel de traitement des échantillons

- Bêchers en verre de 100 mL
- Éprouvettes graduées
- Plaque chauffante réglée à 150°C
- Fioles jaugées de 50 mL
- Pipettes automatiques
- Tubes en polypropylène de 50 mL
- Réfrigérateur à 4°C
- pH-mètre
- Conductimètre
- Gants de protection
- Creusets de 5mL

IV.1.4.3. Matériel d'analyse

- Spectromètre d'absorption atomique à four graphite (GFAAS) PerkinElmer PinAAcle 900T, équipé d'un autosampler Furnace AS900, utilisé pour le dosage des éléments traces métalliques.



Figure N°4. Spectromètre d'absorption atomique (SAA) (Photos Originale)

IV.1.5. Réactifs utilisés

- Eau distillée (conductivité < 5 mS/cm)
- Acide nitrique (HNO₃) à 5 % pour la digestion acide des échantillons
- Solutions étalons commerciales (1000 mg/L) pour le Cd, Pb, Cu, Ni,

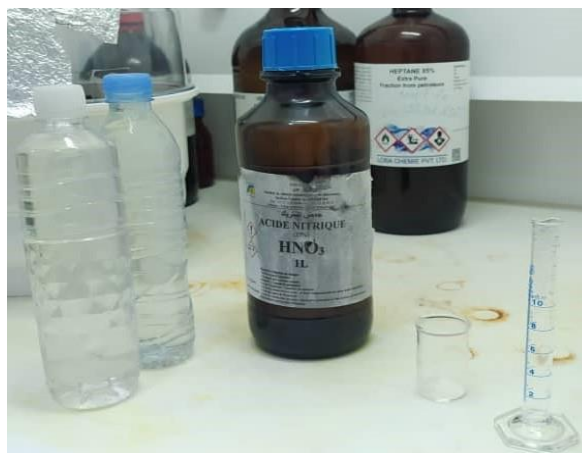


Figure N°5. Acide nitrique (HNO₃) (Photo Originale)

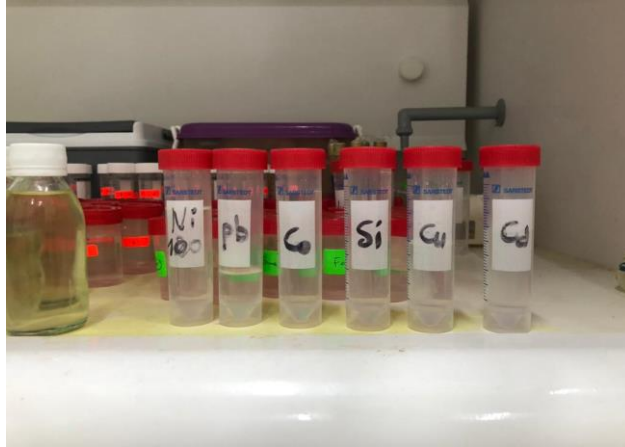


Figure N °6. Les solutions étalons (Photo Originale)

IV.2. Méthodes

IV.2.1. Méthode d'échantillonnage

IV.2.1.1. Collecte des échantillons

Les prélèvements ont été réalisés à environ dix mètres du rivage et à 50 cm de profondeur, afin de limiter la contamination de surface par les hydrocarbures ou les matières en suspension (MES).

Pour les plages, les échantillons d'eau de mer ont été recueillis directement. Dans les ports, la collecte a été effectuée avec l'aide de plongeurs afin d'atteindre les zones portuaires actives et d'assurer une représentativité optimale des échantillons.

Chaque échantillon a été recueilli dans une bouteille en plastique de 500 mL, préalablement désinfectée par immersion dans une solution d'acide nitrique diluée pendant 24 heures, puis soigneusement rincée à l'eau distillée et séchée à l'air libre avant utilisation.



Figure N°7. Prélèvement des échantillons d'eau de mer : à gauche, prélèvement sur une plage ; à droite, prélèvement avec l'aide de plongeurs dans un port (Photos Originale)

IV.2.2. Mesures de PH et de la conductivité

Une fois au laboratoire et avant l'addition de l'acide nitrique, des mesures physico-chimiques ont été réalisées à l'aide d'appareils portables :

- **Le pH** a été mesuré à l'aide d'un **pH-mètre** préalablement étalonné.
- **La conductivité** a été déterminée avec un **conductimètre**, permettant d'évaluer la minéralisation de l'eau.



Figure N°8. Mesure du pH avec un pH-mètre (photo Originale)



Figure N°9. Mesure de la conductivité avec un conductimètre (Photo Originale)

Ces paramètres ont été enregistrés pour chaque site afin d'établir une corrélation avec la concentration en éléments traces étudiés.

Une fois les mesures effectuées, **0.5% d'acide nitrique** a été ajouté à chaque échantillon afin de stabiliser les éléments traces métalliques et d'éviter toute précipitation ou adsorption sur les parois des bouteilles.

IV.2.3. Préparation des échantillons

Chaque échantillon a été préparé de la manière suivante :

1. Chaque échantillon (50 ml) a été prélevé dans un bécher préalablement rincé avec de l'eau distillée.
2. 2.5 mL d'acide nitrique ont été ajoutés à chaque bécher.
3. Le matériel a été rincé entre chaque échantillon pour éviter la contamination croisée.
4. Un échantillon témoin (blanc) a été préparé avec de l'eau distillée et 2.5 mL d'acide nitrique.



Figure N° 10. Traitement des échantillons avec de l'acide nitrique (Photo Originale)

IV.2.4. Digestion

Afin de faciliter la digestion ; les échantillons ont été chauffés sur une plaque chauffante à 150°C pendant 2 heures jusqu'à la réduction du volume à 20 mL puis refroidit à la température ambiante du laboratoire par la suite ils étaient transférés dans des fioles jaugées de 50 mL et complétées avec de l'eau distillée (conductivité < 5%).

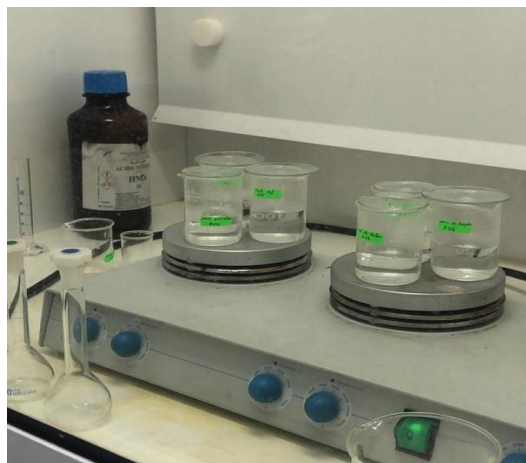


Figure N°11. Chauffage des échantillons traités sur plaque chauffante à 150°C
(Photo Originale)

Les échantillons ont été transférés dans des tubes en polypropylène transparents de 50mL, puis conservés dans un réfrigérateur à une température de 4°C dans l'obscurité dans le laboratoire jusqu'à l'analyse.

IV.2.5. Dosage des éléments traces

IV.2.5.1. Préparation des solutions d'essai

Avant l'analyse, les échantillons ont été transférés dans de petites creusets de 5 mL, préalablement rincées à l'eau distillée puis séchées soigneusement. Le remplissage a été réalisé avec soin afin d'assurer précision et homogénéité entre les Aliquotes.



Figure N°12. Disposition des échantillons et des creusets (a) et remplissage des creusets de 5 mL avec les échantillons (b) (photos Originale)

IV.2.5.2. Préparation des solutions étalons

Les solutions étalons ont été préparées à partir de solutions mères commerciales de concentration 1000 mg/L pour chaque métal (Cd, Pb, Cu, Ni). Des dilutions appropriées ont été réalisées dans de l'eau ultrapure acidifiée à 1 % d' HNO_3 , pour générer une gamme d'étalonnage couvrant les concentrations attendues dans les échantillons. Les étalons ont été transférés dans des creusets identiques à celles des échantillons, elles aussi rincées et séchées au préalable, puis déposés dans le **disque de l'autosampler (PerkinElmer Furnace Autosampler AS900)**.

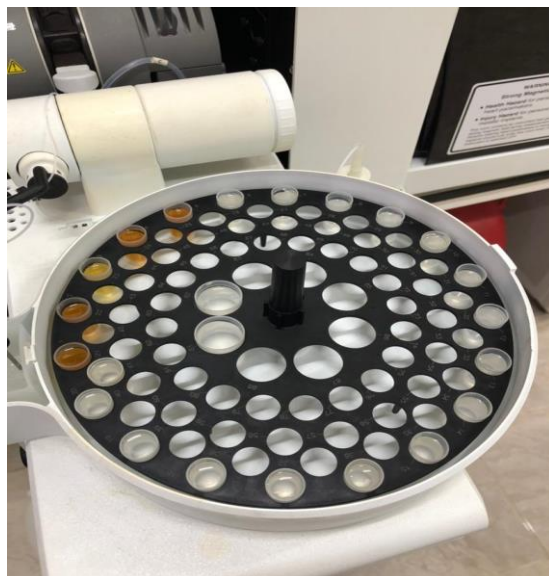


Figure N °13. Les échantillons disposés dans le disque autosampler PerkinElmer Furnace Autosampler AS900 (Photo originale)

IV.2.5.3. Dosage par SAA

L'analyse des EMT a été réalisée par Spectrométrie d'Absorption Atomique à four graphite (GFAAS) à l'aide d'un spectromètre PerkinElmer PinAAcle 900T équipé d'un autosampler automatique type PerkinElmer Furnace AS900. Ce dernier sélectionne et aspire automatiquement les échantillons et étalons placés dans les creusets selon l'ordre programmé. Le logiciel **SyngistixAA** a été utilisé pour piloter l'analyse, calibrer l'instrument, lancer les séquences, suivre les mesures, et générer automatiquement les courbes d'étalonnage pour chaque élément. Les longueurs d'onde spécifiques à chaque métal ont été choisies automatiquement : par exemple ; 217.0 nm pour le Pb ; 228.8 nm pour le Cd, etc. Les résultats ont été exprimés en $\mu\text{g/L}$.

Afin de valider la linéarité de la méthode, une courbe d'étalonnage a été établie pour chacun des métaux analysés à partir de cinq solutions standards. Les courbes obtenues ont montré une corrélation satisfaisante entre l'absorbance et la concentration, selon un modèle de régression linéaire. Les coefficients de détermination (R^2) obtenus sont de 0.9857 pour le cuivre (Cu), 0.8365 pour le nickel (Ni), 0.9604 pour le cadmium (Cd) et 0.9934 pour le plomb (Pb). Selon la littérature, un R^2 supérieur à 0.99 est considéré comme excellent, tandis qu'un R^2 supérieur à 0.80 reste acceptable pour des matrices environnementales complexes telles

que les eaux marines. Ces résultats confirment la validité de l'étalonnage et la fiabilité des mesures. Les courbes correspondantes sont présentées en annexes (Annexes 3, 6, 9 et 12).

Chapitre V

Résultats et discussion

V.1. Résultats

V.1.1. Paramètres physico-chimiques : pH et conductivité

Les résultats des mesures de pH et de conductivité dans l'eau de mer des différents sites étudiés sont présentés dans le tableau ci-dessous. Ces données permettent une première évaluation des conditions environnementales des stations d'échantillonnage. Le tableau N°2 ci-après laisse apparaître des valeurs proches de pH et de conductivité et ce dans tous les sites.

Tableau N°2 : Valeurs du pH et de la conductivité dans les eaux marines des sites étudiés.

Site	Code	pH	Conductivité (mS/cm)
Port de Béjaïa	E01	8,12	54,2
Aoukas	E02	8,17	55,1
Tichi	E03	8,18	55,2
Port pétrolier	E04	8,21	54,9
Tala Ilef	E05	8,18	55,1
Aiguiades	E06	8,07	55,3
Sidi Ali Lebhar	E07	8,11	55,1
Oued Agrioun	E08	8,20	55,2
Le Temoïn	T	/	/
Plage Lota	E09	8,60	54,8
Plage El Maghra	E10	8,64	54,6
Beni Ksila	E11	8,36	55,1
Boulimat	E12	8,38	53,9
Saket	E13	8,46	54,2

V.1.2. Concentrations en éléments traces analysés (Cd, Pb, Cu, Ni) dans les eaux marines de Béjaïa

Les résultats du tableau N° 3 montrent que le nickel (Ni) est l'élément qui a enregistré une concentration moyenne la plus élevée (71,844 µg/L), suivi par celle du cuivre (27,977 µg/L) après vient celle du cadmium (4,366 µg/L) et en dernier le plomb dont la concentration est non détectable (concentrations < limite de détection).

Tableau N°3 : Concentrations des éléments traces métalliques dans l'eau de mer (µg/L)

Élément	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart-type
Cadmium (Cd)	4,366	0,488	10,038	3,081
Plomb (Pb)	Non détecté	Non détecté	Non détecté	Non détecté
Cuivre (Cu)	27,977	5,484	153,338	40,788
Nickel (Ni)	71,844	50,298	86,075	11,763

V.1.3. Variations des concentrations en éléments traces métalliques analysés (Cd, Pb, Cu, Ni) en fonction des sites d'étude

- **Cadmium (Cd)**

Les résultats de la figure n°14 ci-dessous montrent que les concentrations les plus élevées ont été enregistrées dans les sites Boulimat (E13) et Saket (E13). La plus faible concentration est enregistrée dans le site Plage Lota (E09).

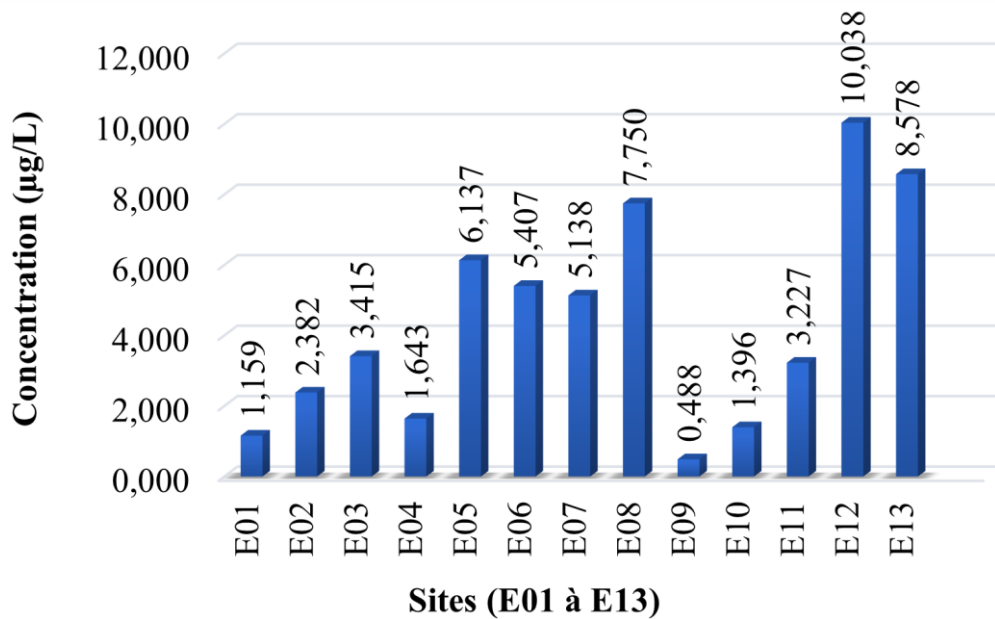


Figure N°14 : Variations des concentrations de cadmium (Cd) en fonction des sites d'étude

- **Cuivre (Cu)1**

Les résultats de la figure N°15 ci-dessous montrent que la concentration la plus élevée a été enregistrée dans le site Sidi Ali Lebhar (E07). Les plus faibles concentrations ont été enregistrées dans les sites Aoukas (E02), Plage Lota (E09) et Plage El Maghra (E10).

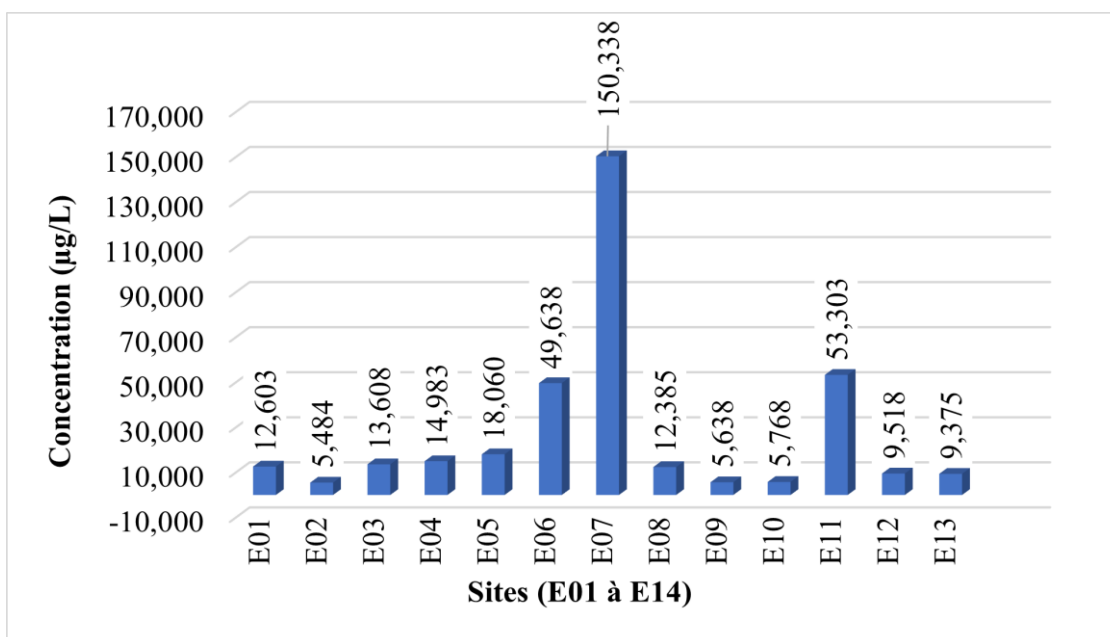


Figure N°15 : Variations des concentrations de cuivre (Cu) en fonction des sites d'étude

- **Nickel (Ni)**

Les résultats de la figure N°16 ci-dessous montrent que les concentrations les plus élevées ont été enregistrées dans les sites Port de Bejaïa (E01), Port pétrolier (E04), Beni Ksila (E12) et Boulimat (E13). La plus faible concentration est enregistrée dans le site Plage Lota (E10).

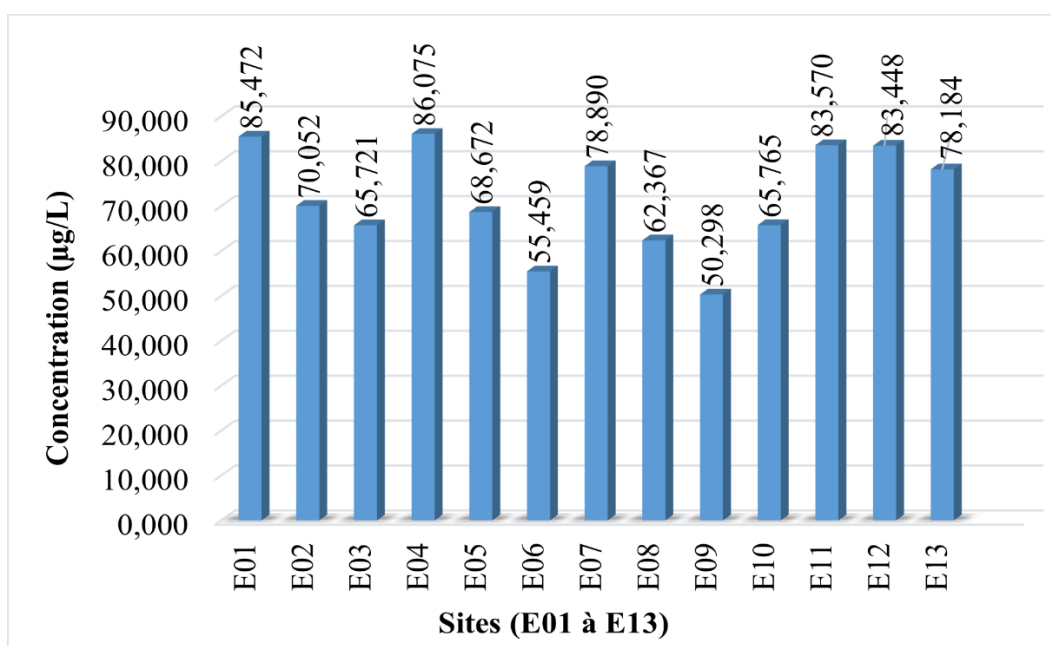


Figure N°16 : Variations des concentrations de nickel (Ni) en fonction des sites d'étude

V.1.4. Analyse des tendances spatiales

Les tendances générales montrent que certains types de sites enregistrent des concentrations plus élevées :

- Les **zones portuaires** comme le Port de Bejaïa (E01) et le Port pétrolier (E04) ont des teneurs plus importantes en nickel.
- Les **plages fréquentées** telles que Tichi (E03) et Aiguiades (E06) présentent des concentrations élevées en cadmium et cuivre.
- Les **zones peu urbanisées** ou semi-naturelles, notamment Plage Lota (E09), Plage El Maghra (E10), ont des niveaux globalement bas pour l'ensemble des métaux analysés.

Cette répartition spatiale montre une certaine organisation des données selon les caractéristiques des sites.

V.1.5. Conformité aux normes environnementales internationales

Afin de mieux évaluer les niveaux de pollution des eaux analysées, les concentrations moyennes des éléments traces ont été comparées aux valeurs limites recommandées par plusieurs instances de référence, notamment l'Union Européenne (UE), l'Environmental Protection Agency (EPA), et la Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Ces normes ont pour objectif de protéger la qualité des eaux de surface, la santé humaine, ainsi que les écosystèmes aquatiques.

L'analyse des résultats obtenus montre que le cadmium (Cd) dépasse nettement la norme européenne de 1 µg/L. Cette concentration suggère un risque potentiel pour les écosystèmes marins, en particulier pour les espèces les plus sensibles.

En ce qui concerne le plomb (Pb), aucune concentration n'a été détectée dans les échantillons analysés. Cette absence est rassurante au regard des normes internationales. Toutefois, un suivi régulier est nécessaire pour prévenir toute contamination future ou chronique.

Le cuivre (Cu), avec une moyenne de 27,977 µg/L, reste inférieur aux seuils fixés par l'Union européenne et la FAO, mais dépasse largement la valeur guide de l'EPA (3,1 µg/L).

Ce dépassement peut engendrer des effets toxiques sur la faune aquatique, notamment les invertébrés et les algues, qui y sont particulièrement sensibles.

Le nickel (Ni) présente une concentration moyenne de 71,844 µg/L, nettement supérieure à toutes les normes de référence, notamment celles de l'UE (20 µg/L), et de l'EPA (7 µg/L). Ce niveau élevé constitue un facteur préoccupant pouvant affecter la biodiversité marine.

Dans l'ensemble, si la qualité des eaux semble satisfaisante pour le plomb, les niveaux observés pour le cadmium, le cuivre et surtout le nickel nécessitent une vigilance accrue. Un suivi environnemental renforcé est recommandé, notamment dans les zones à forte activité anthropique, afin de limiter l'impact des métaux lourds sur les écosystèmes marins.

Tableau N°4 : Comparaison des concentrations moyennes obtenues aux normes internationales (µg/L)

Élément trace métallique	Moyenne observée	(UE,2008)	(EPA,2022) eau de mer	(FAO,2022)
Cd	4,366	1	8,8	10
Pb	Non détecté	7,2	8,5	50
Cu	27,977	50	3,1	100–200
Ni	71,844	20	7	50
UE (Union Européenne), EPA (Environmental Protection Agency), et FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture).				

V.2 Discussion

V.2.1 Discussion des paramètres physico-chimiques : pH et conductivité

Les valeurs de pH mesurées dans l'eau marine du littoral de Béjaïa dans cette étude (7,8 à 8,3) sont en accord avec celles rapportées pour d'autres régions du littoral algérien, comme à Skikda (7,7–8,2) ; Abdelmalek et al., 2020) ou Jijel (7,9–8,4 ; Zerrouki et al., 2019), confirmant la stabilité relative de ce paramètre dans les eaux côtières méditerranéennes. Ce pH légèrement alcalin favorise la précipitation de certains éléments traces métalliques sous forme d'hydroxyde, limitant leur biodisponibilité immédiate, mais il peut aussi faciliter leur adsorption sur les particules en suspension, augmentant ainsi leur transfert potentiel vers les organismes filtreurs comme les moules.

La conductivité enregistrée (autour de 48–52 mS/cm) est typique des eaux marines ouvertes du bassin algérien (Aït Ziane et al., 2013 ; Hafsi et al., 2021), traduisant une forte minéralisation et une faible influence des apports d'eau douce sauf à proximité des embouchures. Cette stabilité de la conductivité indique que les variations des concentrations en éléments traces observées sont principalement liées aux apports anthropiques et non à une dilution par des eaux continentales. Ces paramètres physico-chimiques, en cohérence avec les valeurs régionales, confirment que les conditions du milieu marin étudiés sont comparables à celles d'autres zones côtières algériennes, ce qui valide la pertinence des comparaisons interrégionales réalisées dans ce travail.

V.2.2. Résultats des concentrations en éléments traces métalliques dosés dans l'eau de mer de Bejaïa

V.2.2.1. Cadmium (Cd)

Dans cette présente étude, la concentration moyenne en cadmium est de 4,366 µg/L, avec une valeur maximale de 10,038 µg/L, indiquant une pollution notable du milieu marin étudié. Ces niveaux dépassent la norme européenne pour l'eau de mer (1 µg/L) ; la valeur maximale franchit également les seuils fixés par l'EPA (8,8 µg/L) et la FAO (10 µg/L)

Nous avons comparé la concentration de cadmium obtenue dans cette étude avec celle d'une étude réalisée antérieurement à Béjaïa par Drici et al. (2017) qui ont rapporté une

concentration nettement élevée dans les eaux littorales (6,1 µg/L) à proximité de l'oued Seghir, montrant une influence locale des apports fluviaux. Sur un autre site du littoral algérien, à Jijel, Zerrouki et al. (2019) ont enregistré des valeurs élevées comprises entre 2 et 6 µg/L pendant la saison estivale, ce qui reflète une contamination diffuse liée à l'activité touristique et urbaine. De même, à Skikda, Abdelmalek et al. (2020) ont mesuré 3,2 µg/L en zone industrielle, soulignant l'impact des activités anthropiques sur la qualité de l'eau.

Dans une étude effectuée sur la moule (*Mytilus galloprovincialis*) récoltée dans les eaux marines de Béjaia par (Adem & Ait Djoudi, 2025) les concentrations moyennes de Cd est de 0,0115 mg/kg, avec un minimum de 0,005 mg/kg et un maximum de 0,025 mg/kg. Cette différence traduit la capacité des moules à bioaccumuler le cadmium à partir de concentrations dissoutes relativement faibles.

Ces résultats sont en accord avec les observations de Bennacer et Boubegtitene (2016) et Stello (2005), qui soulignent que la moule *Mytilus galloprovincialis* est un bioindicateur efficace de la pollution métallique, notamment pour le cadmium, dans les eaux côtières algériennes. Par ailleurs, une étude menée sur le littoral algérois (Belabed et al., 2008) a rapporté des concentrations en cadmium dans les moules variant selon les sites, avec des pics associés aux zones proches des rejets industriels et urbains, ce qui corrobore la variabilité observée dans cette étude.

Le cadmium est un métal non essentiel et toxique même à faibles concentrations. Sa présence significative dans l'eau, associée à une faible accumulation dans les moules, signale une pollution environnementale préoccupante qui peut avoir des effets toxiques sur la faune marine et, indirectement, sur la santé humaine via la chaîne alimentaire.

V.2.2.2. Plomb (Pb)

Le plomb n'a pas été détecté dans nos échantillons, ce qui peut signifier une concentration inférieure au seuil de détection analytique, sans pour autant exclure totalement sa présence dans l'environnement marin. Ce résultat contraste avec plusieurs études antérieures menées sur le littoral algérien ; à Bejaïa, Haddad et al. (2018) ont rapporté des concentrations nettement élevées allant jusqu'à 5 µg/L dans les eaux côtières, particulièrement dans les zones influencées par les activités humaines. À El Kala, Bourahli et al. (2017) ont également mis en évidence des teneurs élevées et supérieures à celle rapportée dans cette

étude comprises entre 3,5 et 6,1 µg/L, suggérant une contamination chronique. Par ailleurs, Djenoune et Moussaceb (2015) ont identifié l'oued Soummam, traversant plusieurs zones industrielles, comme un vecteur de pollution au plomb, contribuant à la contamination du littoral à son embouchure. Ce contraste avec nos résultats pourrait être dû à une meilleure dilution, à un éloignement des sources de pollution, ou à la répartition préférentielle du plomb dans les sédiments ou les organismes aquatiques plutôt que dans la colonne d'eau.

(Adem & Ait Djoudi, 2025) ont rapporté dans la moule (*Mytilus galloprovincialis*) pêchée à Béjaïa une concentration moyenne de 0,016 mg/kg (min 0,010, max 0,028 mg/kg) supérieure à celle enregistrée dans cette étude (dans l'eau de mer). Cette observation est classique et souligne la capacité des moules à accumuler le plomb à partir de particules en suspension ou des sédiments, même lorsque ce métal est peu détectable dans l'eau (Duffus, 2002 ; Mehoul et al., 2019). Selon Belabed et al. (2008), les teneurs en plomb dans les moules du littoral algérien présentent un gradient décroissant d'Est en Ouest, avec des concentrations plus élevées à proximité des sources industrielles et urbaines, ce qui rejoint nos observations sur la présence de plomb dans les tissus des moules malgré son absence dans l'eau de mer. Le plomb est un métal non essentiel et hautement toxique. Sa présence dans les moules, même en l'absence de détection dans l'eau, met en lumière l'importance des organismes bioaccumulateurs pour détecter des pollutions diffuses et potentiellement dangereuses.

V.2.2.3. Cuivre (Cu)

Le cuivre présente dans cette étude une concentration moyenne de 27,977 µg/L, avec un maximum particulièrement élevé de 153,338 µg/L au site E06. Ces niveaux dépassent la norme de l'EPA (3,1 µg/L) mais restent inférieurs à la limite européenne (50 µg/L). À Béjaïa, Aït Ziane et al. (2013) ont enregistré des concentrations dans les eaux côtières du golfe comprises entre 10 et 30 µg/L, ce qui est proche de la moyenne de 27,977 µg/L relevée dans notre étude. Ces données confirment la présence de cuivre dans l'environnement marin de la région et indiquent la présence de sources anthropiques d'émission de cet élément dans le littoral de Béjaïa. À Jijel, Hafsi et al. (2021) ont signalé des concentrations nettement élevées dans les eaux allant de 20 à 40 µg/L, valeurs proches de notre moyenne. Kaced et al. (2019) ont rapporté à l'est (Annaba) des teneurs de 10 à 35 µg/L, confirmant une contamination récurrente sur la façade est du littoral algérien. De plus, Slimanou et Bouzidi (2021) ont mis en évidence des niveaux préoccupants de cuivre dans les sédiments du port de Béjaïa,

notamment dans les boues de dragage, avec des concentrations allant jusqu'à 120 mg/kg, ce qui souligne une pollution significative dans cette zone portuaire.

Dans la moule (*Mytilus galloprovincialis*) capturée dans la même région (Béjaïa), (Adem & Ait Djoudi, 2025) ont rapporté une concentration moyenne de 0,031 mg/kg, avec un écart-type de 0,030 mg/kg. Cette faible accumulation relative est cohérente avec les mécanismes physiologiques qui régulent le cuivre chez les organismes marins, comme l'expliquent Goyer et Clarkson (2001). Les travaux de Belabed et al. (2008) sur les moules du littoral d'Annaba montrent des concentrations similaires, comprises entre 0,02 et 0,05 mg/kg, avec une variabilité saisonnière liée aux apports anthropiques. Ces résultats confirment que le cuivre, bien que présent dans l'environnement, est strictement contrôlé par les organismes, limitant ainsi son accumulation excessive. Le cuivre est vital pour de nombreuses fonctions biologiques, mais sa régulation stricte est nécessaire pour éviter la toxicité. La faible accumulation observée dans les moules reflète cet équilibre délicat entre besoin biologique et protection contre les effets nocifs.

V.2.2.4. Nickel (Ni)

Le nickel présente dans notre étude une concentration moyenne de 71,844 µg/L, avec un maximum de 86.075 µg/L, des valeurs largement supérieures aux normes européennes (20 µg/L) et américaines (7 µg/L). Benabdelkader et al. (2018) ont mesuré des concentrations de nickel allant de 15 à 28 µg/L dans la baie de Béjaïa, ce qui révèle un contraste marqué avec nos résultats. À Skikda, Bensemmane et al. (2020) ont trouvé des valeurs encore plus élevées, de 25 à 35 µg/L, en lien avec les rejets industriels. Même si nos résultats sont élevés, Slimanou et Bouzidi (2021) ont détecté la présence de nickel dans les sédiments du port de Béjaïa, avec des concentrations atteignant 85 mg/kg, ce qui suggère une contamination historique ou une accumulation sur le long terme.

La concentration moyenne de nickel dans l'eau de mer dans cette étude est élevée (71,844 µg/L), tandis que (Adem & Ait Djoudi, 2025) ont rapporté dans la moule (*Mytilus galloprovincialis*) de Béjaïa une concentration moyenne faible de 0,025 mg/kg, avec une variabilité allant de 0,015 à 0,079 mg/kg. Cette faible accumulation relative dans les moules est conforme aux résultats de Mahmoudi et al. (2022) qui ont montré que le nickel, bien que présent en quantité dans l'eau, est généralement moins bioaccumulable par les bivalves.

Une étude de biosurveillance réalisée sur le littoral algérois (UMMTO, 2023) indique également que les concentrations de nickel dans les moules restent faibles, même dans des zones où la pollution métallique est importante, soulignant une faible biodisponibilité ou une régulation physiologique efficace chez la moule (*Mytilus galloprovincialis*).

Le nickel est un élément trace essentiel à faibles concentrations mais devient toxique quand elles dépassent certains seuils. Sa faible accumulation dans les moules malgré une concentration élevée dans l'eau suggère que ces organismes disposent de mécanismes efficaces pour limiter son absorption, ce qui est important pour leur survie dans des milieux pollués.

V.2.3. Implications écotoxicologiques et sources de pollution

V.2.3.1. Variations des concentrations des éléments traces métalliques dosés en fonction des sites d'étude

L'analyse spatiale des concentrations met en évidence l'influence prépondérante des activités humaines sur la contamination métallique du littoral de Béjaïa. Les zones portuaires (E01, E04) et les plages urbaines (E03, E06) présentent les niveaux les plus élevés de métaux lourds, ce qui s'explique par la proximité des ports, des activités industrielles, du trafic maritime et des rejets urbains (Slimanou et Bouzidi, 2021 ; Drici et al., 2017). Les ports constituent des sources majeures de pollution via les eaux de ruissellement, les activités de maintenance navale et le lessivage des infrastructures métalliques. Les plages urbaines subissent l'impact des eaux usées domestiques, du ruissellement pluvial et de la fréquentation touristique, qui contribuent à la dispersion des contaminants (Zerrouki et al., 2019). À l'inverse, les sites peu urbanisés ou semi-naturels (E05, E09, E11) affichent des concentrations plus faibles, traduisant une moindre pression anthropique. Enfin, la dynamique des courants côtiers, la nature des substrats et la proximité des embouchures d'oueds jouent un rôle dans la distribution et l'accumulation des métaux, comme observé dans d'autres régions du littoral algérien (Bensemmane et al., 2020 ; Benabdelkader et al., 2018).

IV.2.4.2. Effets écotoxicologiques des éléments traces métalliques sur les organismes marins

Les dépassements des seuils pour le cadmium, le nickel et le cuivre observés dans les eaux du littoral de Béjaïa exposent les organismes marins à des risques écotoxicologiques avérés. Le cadmium, métal non essentiel et hautement toxique, a été associé à des perturbations de la reproduction, à des anomalies embryonnaires et à une augmentation de la mortalité chez les invertébrés et les poissons, comme l'ont montré Drici et al. (2017) à Béjaïa et Zerrouki et al. (2019) à Jijel. Le nickel, à des concentrations élevées, provoque des altérations du métabolisme cellulaire et une inhibition de la croissance chez les bivalves, ainsi qu'une réduction de la survie larvaire chez les poissons (Mahmoudi et al., 2022 ; Bensemmane et al., 2020). Le cuivre, bien qu'essentiel à faible dose, devient toxique pour les algues, les crustacés et les mollusques dès que ses concentrations dépassent quelques microgrammes par litre, entraînant des troubles du développement, du comportement alimentaire et de la reproduction (Aït Ziane et al., 2013 ; Hafsi et al., 2021). Ces effets toxiques sont d'autant plus préoccupants que les espèces bioindicatrices comme la moule (*Mytilus galloprovincialis*), largement utilisée sur le littoral algérien, sont sensibles à ces polluants et peuvent servir d'alerte précoce pour la gestion environnementale (Belabed et al., 2008).

Conclusion et perspectives

La contamination des écosystèmes marins par les éléments traces métalliques (ETM) constitue aujourd'hui l'un des enjeux environnementaux majeurs, tant du point de vue écologique que sanitaire. Ce travail a porté sur l'évaluation de la pollution métallique du littoral de Béjaïa, en se focalisant sur quatre ETM prioritaires : le plomb, le cuivre, le cadmium et le nickel. Ces métaux, dont la toxicité et la persistance dans l'environnement sont bien établies, représentent une menace croissante pour la biodiversité marine et la santé humaine, notamment dans les zones côtières soumises à de fortes pressions anthropiques.

L'analyse des échantillons prélevés sur différents sites du littoral a mis en évidence des concentrations variables de ces ETM, souvent corrélées à la proximité des zones urbaines, industrielles, portuaires ou agricoles. Certains sites, en particulier ceux situés à proximité d'activités humaines intenses, ont présenté des niveaux dépassant les normes internationales de référence (UE, EPA), traduisant une pollution significative et localisée. L'étude des paramètres physico-chimiques, tels que le pH et la conductivité, a permis d'approfondir la compréhension des facteurs influençant la mobilité, la spéciation et la biodisponibilité de ces ETM dans le milieu marin.

Sur le plan biologique, les résultats confirment la capacité des ETM à s'accumuler dans les organismes marins, notamment les mollusques filtreurs, qui constituent d'excellents bioindicateurs de la qualité du milieu. Le phénomène de bioaccumulation, combiné à la biomagnification le long de la chaîne alimentaire, amplifie les risques écotoxicologiques, exposant non seulement la faune marine mais aussi les populations humaines consommatrices de produits de la mer à des effets toxiques chroniques. Ces impacts se traduisent par des altérations physiologiques, une diminution de la biodiversité et, à terme, des répercussions économiques pour les communautés littorales dépendantes de la pêche et du tourisme.

Face à ces constats, il apparaît indispensable de renforcer les dispositifs de surveillance et de contrôle de la qualité des eaux côtières, d'améliorer le traitement des rejets urbains et industriels, et de promouvoir des pratiques agricoles et portuaires respectueuses de l'environnement. La sensibilisation des acteurs locaux, la mise en œuvre de technologies

propres et l'application rigoureuse des réglementations existantes sont autant de leviers pour limiter les apports de métaux toxiques dans le milieu marin.

Afin de compléter cette démarche, il serait pertinent de mener des études complémentaires sur l'analyse des sédiments, qui constituent souvent un réservoir important d'ETM, ainsi que sur les effets à long terme de ces polluants sur les espèces bioindicateurs locales. Par ailleurs, l'élargissement de ce type d'étude à d'autres zones côtières algériennes permettrait de disposer d'une vision plus globale et comparative de l'état de santé du littoral national.

En définitive, ce mémoire contribue à la compréhension des mécanismes de contamination métallique en milieu marin et met en lumière l'urgence d'adopter une approche intégrée, préventive et durable pour préserver la qualité des écosystèmes côtiers et la sécurité sanitaire des populations. Il s'inscrit ainsi dans la dynamique internationale de lutte contre la pollution marine et de protection de la biodiversité, tout en ouvrant la voie à de nouvelles perspectives de recherche et d'action environnementale.

Références bibliographiques

1. Abdelmalek, F., et al. (2020). Évaluation de la qualité des eaux côtières de Skikda. *Revue des Sciences de l'Environnement*, 15(2), 45-56.
2. Aït Ziane, M., et al. (2013). Contamination métallique dans le golfe de Béjaïa. *Bulletin de la Société Zoologique de France*, 138(1), 77-88.
3. Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 1-14.
4. Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2021). Heavy metals in the environment and health impact. In A. K. Shukla & R. K. Sharma (Eds.), *Heavy Metals - Their Environmental Impacts and Mitigation* (Chap. 1). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96817>
5. Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
6. Aller, R. C., Cochran, J. K., & Lee, C. (2017). Dissolved organic matter and trace metals in marine environments. *Marine Chemistry*, 196, 1-15.
7. Alloway, B.J. (1995). *Heavy Metals in Soils*. 2nd Edition. Blackie Academic & Professional, London.
8. Amrani, M., Yahyaoui, A., & Mehdi, M. (2021). Bioaccumulation of heavy metals in marine organisms: mechanisms and ecological implications. *Marine Environmental Research*, 170, 105414.
9. ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (2012). *Toxicological Profile for Cadmium*. U.S. Department of Health and Human Services.
10. Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. <https://www.fao.org/3/t0551e/t0551e00.htm>
11. Bargagli, R., Monaci, F., Bucci, C., Borghini, F., & Nelli, L. (2005). Environmental impact of a coastal landfill in the Mediterranean (Elba Island, Italy): I. Groundwater quality. *Science of the Total Environment*, 336(1-3), 1-16.
12. Belabed, B.E., Benyahia, F., Bouzid, S., Cherif, M. (2008). Les moules comme bioindicateurs de la pollution métallique sur le littoral algérien. *Environmental Monitoring and Assessment*, 145, 273-282.
13. Belabed, B. E. (2014). *La pollution par les métaux lourds dans la région d'Annaba [Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar - Annaba]*. <https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2014/07/BELABED-BOURHANE-EDDINE.pdf>

14. Benabdelkader, A., et al. (2018). Distribution spatiale des métaux lourds dans la baie de Béjaïa. *Journal Algérien des Sciences de la Mer*, 4(1), 23-34.
15. Bendjeddou, H. (2013). Évaluation des niveaux de pollution marine par les hydrocarbures et les métaux lourds dans le port d'Alger [Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique].
<https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/1920/1/BENDJEDDOU.Haroun.pdf>
16. Bennacer, H., & Boubegtitene, F. (2016). Bioaccumulation des métaux lourds chez *Mytilus galloprovincialis*. *Revue Algérienne des Sciences de la Mer*, 2(1), 15-24.
17. Bensemmane, S., et al. (2020). Pollution métallique à Skikda : sources et impacts. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111-120.
18. Biney, C.A., Amazu, A.T., Calamari, D., Kaba, N., Naeve, H., Ochumba, P.B.O., Osibanjo, O., Radegonde, V., & Saad, M.A.H. (2004). Review of heavy metals in the African aquatic environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 8(1), 1-25.
19. Bose-O'Reilly, S., McLean, D., & Drasch, G. (2010). Mercury exposure and children's health. *Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care*, 40(8), 186-215.
20. Bourahli, S., et al. (2017). Surveillance du plomb dans les eaux côtières d'El Kala. *Revue des Sciences de l'Environnement*, 13(1), 61-70.
21. Bryan, G.W., & Langston, W.J. (1992). Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. *Environmental Pollution*, 76(2), 89-131.
22. Burger, J., Gaines, K.F., Boring, C.S., Stephens, W.L., Snodgrass, J., Dixon, C., McMahan, M., Shukla, S., Shukla, T., & Gochfeld, M. (2002). Metal levels in fish from the Savannah River: potential hazards to fish and other receptors. *Environmental Research*, 89(1), 85-97.
23. Casas, S. (2005). Modélisation de la bioaccumulation de métaux traces (Hg, Cd, Pb, Cu et Zn) chez la moule, *Mytilus galloprovincialis*, en milieu méditerranéen [Thèse de doctorat, Université du Sud Toulon Var]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00009551>
24. Chen, C.-Y., Stemberger, R.S., Kamman, N.C., Mayes, B.M., & Folt, C.L. (2008). Patterns of Hg bioaccumulation and transfer in aquatic food webs across multi-lake studies in the northeast US. *Ecotoxicology*, 17(7), 635-646.
25. Cossa, D. (1988). Le plomb en milieu marin : flux, comportement et bioaccumulation. Ifremer. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/1449/1083.pdf>

26. Craddock, P. T. (1995). *Early Metal Mining and Production*. Edinburgh University Press.
27. Djenoune, S., & Moussaceb, A. (2015). Pollution du littoral par l'oued Soummam. *Revue Algérienne de l'Environnement*, 8(2), 19-28.
28. Drexler, J.W., & Briffa, S.M. (2020). Nickel toxicity in aquatic organisms: A review. *Environmental Pollution*, 267, 115629.
29. Drici, S., Boudjema, S., Khelifi, L. (2017). Impact des apports fluviaux sur la contamination métallique à Béjaïa. *Revue Algérienne des Sciences de la Mer*, 3(2), 41-52.
30. Duffus, J. H. (2002). "Heavy metals" - A meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793–807. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>
31. Elder, J.F. (1988). *Metal biogeochemistry in surface-water systems—a review of principles and concepts*. U.S. Geological Survey Circular 1013.
32. Fan, W., Wu, L., Xu, D., et al. (2022). Toxic effects of cadmium on aquatic organisms: A comprehensive review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 241, 113730. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113730>
33. Food and Agriculture Organization (FAO), 2022. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation*. Rome, FAO.
34. Forstner, U., & Wittmann, G.T.W. (1981). *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
35. Goyer, R. A., & Clarkson, T. W. (2001). Toxic effects of metals. In C. D. Klaassen (Ed.), *Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons* (6th ed., pp. 811–867). McGraw-Hill.
36. Greenwood, N.N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the Elements* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
37. Grosell, M., Blanchard, J., Brix, K.V., & Gerdes, R. (2007). Physiology is pivotal for interactions between salinity and acute copper toxicity to fish and invertebrates. *Aquatic Toxicology*, 84(2), 162-172.
38. Güven, K., Özbay, C., Ünlü, E., & Satar, A. (2013). Acute lethal toxicity and accumulation of copper in *Gammarus pulex* (L.) (Amphipoda). *Turkish Journal of Biology*, 27, 21-28.

39. Gupta, A., Rai, D. K., Pandey, R. S., & Sharma, B. (2007). Analysis of some heavy metals in the riverine water, sediments and fish from river Ganges at Allahabad. *Environmental Monitoring and Assessment*, 157, 449–458.
40. Haddad, M., et al. (2018). Évaluation de la pollution métallique dans les eaux côtières de Béjaïa. *Journal Algérien de Chimie*, 10(2), 89-97.
41. Hafsi, A., et al. (2021). État de la pollution métallique à Jijel. *Revue Algérienne des Sciences de la Mer*, 5(1), 33-44.
42. Harrison, R.M., Laxen, D.P.H., & Wilson, S.J. (1981). Chemical associations of lead, cadmium, copper, and zinc in street dusts and roadside soils. *Environmental Science & Technology*, 15(11), 1378-1383.
43. Huang, W., Wang, J., & Chen, J. (2014). Effects of salinity on heavy metal distribution in estuarine waters. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(2), 1234-1245.
44. Hughes, C. E., Wilson, S. P., & Croke, B. F. W. (2019). Mercury contamination from artisanal and small-scale gold mining in water systems: A review. *Environmental Pollution*, 252, 1235–1246.
45. Hutton, M., Symon, C., & Harrison, R. (2017). Suspended particulate matter and trace metals in marine systems. *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), 12-21.
46. Järup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 68(1), 167–182. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032>
47. Kabata-Pendias, A. (2001). *Trace Elements in Soils and Plants*. 3rd Edition. CRC Press, Boca Raton.
48. Kaced, S., et al. (2019). Contamination métallique à Annaba. *Revue...* (incomplète, il manque la référence complète)
49. Köhler, A., Wahl, E., & Hanel, R. (2011). Ecotoxicological impact of heavy metals on aquatic food webs. *Marine Environmental Research*, 72(3), 71-79.
50. Lewis, A.G., & Cave, W.R. (1982). The biological importance of copper in the oceans and estuaries. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 20, 471-695.
51. Lohmann, R., Breivik, K., Dachs, J., & Muir, D. (2007). Global fate of POPs: Current and future research directions. *Environmental Pollution*, 150(1), 150–165.
52. López, J. F., Matos, M. A., & García, M. E. (2012). Lead exposure and its impact on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9, 234-245.

53. Lu, X., Wang, L., & Li, L. (2019). Influence of temperature on the mobility of heavy metals in marine environments. *Chemosphere*, 233, 706-715.
54. Luoma, S.N., & Rainbow, P.S. (2008). *Metal Contamination in Aquatic Environments: Science and Lateral Management*. Cambridge University Press.
55. Maanan, M., Zourarah, B., Carruesco, C., Aajjane, A., & Naud, J. (2015). The distribution of heavy metals in the coastal sediments of northwestern Morocco. *Environmental Monitoring and Assessment*, 102(1-3), 155-167.
56. Mahmoudi, N., El Atrache, R., & Benyahia, N. (2022). Cadmium contamination in marine sediments: Source and environmental risk assessment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 100672. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100672>
57. McBride, G. B., Spigel, R. H., & Gillibrand, P. A. (2018). Ocean stratification and trace metal cycling. *Progress in Oceanography*, 165, 1-15.
58. Mehdi, M., Yahyaoui, A., & Amrani, M. (2018). Bioconcentration and biomagnification of trace metals in marine food webs. *Ecotoxicology*, 27(6), 789-800.
59. Mehoul, F., Bouayad, L., Hammoudi, A.H., Ayadi, O., & Regad, F. (2019). Evaluation of the heavy metals (mercury, lead, and cadmium) contamination of sardine (*Sardina pilchardus*) and swordfish (*Xiphias gladius*) fished in three Algerian coasts. *Veterinary World*, 12(1), 7.
60. Mehoul, F., et al. (2019). Accumulation de métaux lourds chez les organismes benthiques. *Revue Algérienne des Sciences de la Mer*, 4(2), 55-63.
61. Moffett, J.W., & Dupont, C.L. (2007). Cu complexation by organic ligands in the subarctic NW Pacific and Bering Sea. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 54(4), 586-595.
62. Montaña, M. D., Olesik, J. W., Barber, A. G., Challis, K., & Ranville, J. F. (2018). Detection and characterization of engineered nanoparticles in natural waters. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410(17), 3995–4010.
63. Nagajyoti, P. C., Lee, K. D., & Sreekanth, T. V. M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 8, 199–216. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>
64. Nieboer, E., & Richardson, D.H.S. (1980). The replacement of the nondescript term 'heavy metals' by a biologically and chemically significant classification of metal ions. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, 1(1), 3-26.

65. Nriagu, J.O. (1989). A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals. *Nature*, 338(6210), 47-49.
66. OMS (Organisation mondiale de la santé). (2021). Guidelines for drinking-water quality. WHO.
67. Pacyna, E.G., & Pacyna, J.M. (2001). An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environmental Reviews*, 9(4), 269-298.
68. Pan, K., & Wang, W.-X. (2012). Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China. *Science of the Total Environment*, 421-422, 3-16.
69. Paul, S., Das, S., Giri, A., & Dutta, S. (2024). A review on heavy metal-induced toxicity in fishes: Bioaccumulation, antioxidant defense system, histopathological manifestations, and transcriptional profiling of genes. *Environmental Research*, 247, 118871. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118871>
70. Rainbow, P. S. (2002). Trace metal concentrations in aquatic invertebrates: why and so what? *Environmental Pollution*, 120(3), 497-507.
71. Ramalingam, S., Krishna, K. V., Rajagopal, A., & Mallick, S. (2024). Comprehensive review on toxic heavy metals in the aquatic system: Sources, identification, treatment strategies, and health risk assessment. *Environmental Research*, 248, 118941. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118941>
72. Reddy, M. S., Basha, S., Joshi, H. V., & Ramachandraiah, G. (2004). Distribution of heavy metals in coastal sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 48(11-12), 1055–1059. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X03005526>
73. Rehman, K., Fatima, F., Waheed, I., & Akash, M. S. H. (2018). Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of Cellular Biochemistry*, 119(1), 157-184.
74. Remili, S., & Kerfouf, A. (2013). Évaluation de la qualité physico-chimique et du niveau de contamination métallique (Cd, Pb, Zn) des rejets d'eaux usées d'Oran et de Mostaganem (littoral ouest algérien). *Physio-Géo*, (7), 3258. <https://journals.openedition.org/physio-geo/3258>
75. Satarug, S., Garrett, S. H., Sens, M. A., & Sens, D. A. (2013). Cadmium, environmental exposure, and health outcomes. *Environmental Health Perspectives*, 121(3), 295-302.
76. Sadiq, M. (1992). *Toxic Metal Chemistry in Marine Environments*. CRC Press.

77. Slimanou, A., & Bouzidi, A. (2021). Pollution métallique dans les sédiments du port de Béjaïa. *Journal Algérien des Sciences de la Mer*, 6(1), 71-80.
78. Sprovieri, M., Feo, M.L., Prevedello, L., Manta, D.S., Sammartino, S., & Tamburrino, S. (2007). Heavy metals distribution in marine sediments from three different coastal areas of southern Italy. *Microchemical Journal*, 85(2), 235-243.
79. Stauber, J.L., & Florence, T.M. (1990). Mechanism of toxicity of ionic copper and copper complexes to algae. *Marine Biology*, 105(2), 259-264.
80. Stellio, L. (2005). Les moules comme bioindicateurs de la pollution métallique. Thèse, Université d'Alger.
81. Sundaray, S. K., Nayak, B. B., & Bhatta, D. (2015). Influence of pH on the solubility and mobility of heavy metals in marine sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 1-12.
82. Tamele, I.J., Loureiro, S., & Muchangos, S. (2020). Assessment of heavy metals in water, sediment, and fish from the Maputo Bay, Mozambique. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 36103–36120.
83. Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. In *Molecular, clinical and environmental toxicology* (pp. 133-164). Springer.
84. Tessier, E., Garnier, J.M., Mullot, J.U., Lenoble, V., Arnaud, M., & Amouroux, D. (2002). Urban runoff and road dust contribution to metals in sediments of the Seine River (France). *Science of the Total Environment*, 308(1-3), 243-256.
85. Turner, A., Millward, G.E., & Le Roux, S.M. (2009). Sediment–water partitioning of inorganic mercury in estuaries. *Environmental Science & Technology*, 43(21), 8182-8187.
86. UMMTO (2023). Rapport sur la biosurveillance des métaux lourds dans les moules du littoral algérien. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
87. Union Européenne (UE), 2008. Directive 2008/105/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relative aux normes de qualité environnementale dans le domaine de l'eau. JOUE L 348, 84–97.
88. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2022. National Recommended Water Quality Criteria – Aquatic Life Criteria Table. EPA-822-H-22-001.
89. Varol, M., & Sünbül, M. R. (2023). Heavy metal contamination in the aquatic ecosystem: Toxicity and its remediation using eco-friendly approaches. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1124775. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1124775>

90. Wang, W.-X. (2001). Bioavailability of cadmium in marine organisms: a review. *Environmental Pollution*, 111(2), 285-310.
91. Wang, W.-X., Rainbow, P. S., & Wong, R. S. K. (2007). Bioaccumulation and biomagnification of trace metals in marine organisms. *Environmental Science & Technology*, 41(19), 6789-6794.
92. Yang, Y., Li, Q., & Chen, M. (2015). Bioaccumulation of heavy metals in marine organisms: Mechanisms and applications. *Marine Pollution Bulletin*, 95(1), 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.012>
93. Yu, R., Yuan, X., Zhao, Y., Hu, G., Tu, X., & Yang, Q. (2012). Heavy metal pollution and its potential ecological risk assessment in the coastal sediments of the Yellow Sea, China. *Marine Pollution Bulletin*, 64, 2151-2159.
94. Zhang, J., Wang, X., & Wang, J. (2013). Heavy metal pollution in coastal areas of China: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 76(1-2), 7–15.
95. Zerrouki, H., et al. (2019). Contamination métallique sur le littoral de Jijel. *Revue Algérienne des Sciences de la Mer*, 3(1), 27-38.

Annexes

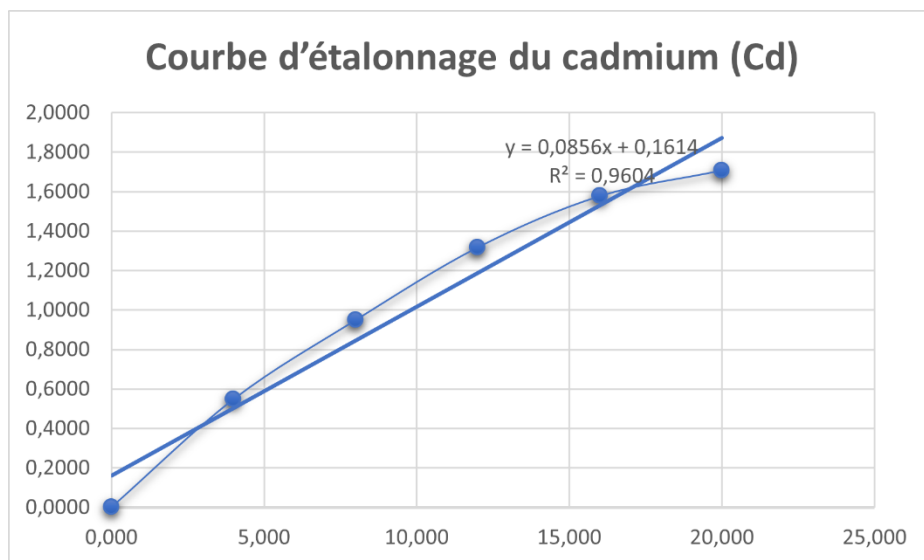
Annexe A : Données brutes d'absorbance et de concentration pour le cadmium (Cd)

	Sample Id	R	Acquisition Time	QC Status	Dataset File	Method File	Cd 228.80 (Absorbance)
1	Calib Blank 1		4/21/2025 10:33:28 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,0018
2	cal1		4/21/2025 10:36:07 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,5491
3	cal2		4/21/2025 10:38:55 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,9498
4	cal3		4/21/2025 10:41:44 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	1,3178
5	cal4		4/21/2025 10:44:34 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	1,5778
6	cal5		4/21/2025 10:47:26 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	1,7076
8	1		4/21/2025 11:13:16 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	1,8774
9	2		4/21/2025 11:15:44 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,6763
10	3		4/21/2025 11:18:29 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	1,0401
11	4		4/21/2025 11:21:13 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	1,3599
12	5		4/21/2025 11:23:57 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,8385
13	E01		4/21/2025 11:26:41 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,1694
14	E02		4/21/2025 11:29:25 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,3378
15	E03		4/21/2025 11:32:09 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,4718
16	E04		4/21/2025 11:34:53 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,2373
17	E05		4/21/2025 11:37:37 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,7876
18	E06		4/21/2025 11:40:21 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,7083
19	E07		4/21/2025 11:43:05 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,6780
20	E08		4/21/2025 11:45:49 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,9499
21	E09		4/21/2025 11:48:33 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,0008
22	E10		4/21/2025 11:51:17 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,0724
23	E11		4/21/2025 11:54:01 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,2029
24	E12		4/21/2025 11:56:45 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,4481
25	E13		4/21/2025 11:59:29 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	1,1503
26	E14		4/21/2025 12:02:13 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	1,0263

Annexe B : Concentrations de cadmium (Cd) dans les échantillons d'eau de mer

	Sample Id	R	Acquisition Time	QC Status	Dataset File	Method File	Cd 228.80 (µg/L)
1	Calib Blank 1		4/21/2025 10:33:28 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,000
2	cal1		4/21/2025 10:36:07 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	4,000
3	cal2		4/21/2025 10:38:55 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	8,000
4	cal3		4/21/2025 10:41:44 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	12,000
5	cal4		4/21/2025 10:44:34 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	16,000
6	cal5		4/21/2025 10:47:26 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	20,000
8	1		4/21/2025 11:13:16 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	25,326
9	2		4/21/2025 11:15:44 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	5,123
10	3		4/21/2025 11:18:29 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	8,733
11	4		4/21/2025 11:21:13 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	12,946
12	5		4/21/2025 11:23:57 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	6,623
13	E01		4/21/2025 11:26:41 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	1,159
14	E02		4/21/2025 11:29:25 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	2,382
15	E03		4/21/2025 11:32:09 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	3,415
16	E04		4/21/2025 11:34:53 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	1,643
17	E05		4/21/2025 11:37:37 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	6,137
18	E06		4/21/2025 11:40:21 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	5,407
19	E07		4/21/2025 11:43:05 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	5,138
20	E08		4/21/2025 11:45:49 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	7,750
21	E09		4/21/2025 11:48:33 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,005
22	E10		4/21/2025 11:51:17 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	0,488
23	E11		4/21/2025 11:54:01 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	1,396
24	E12		4/21/2025 11:56:45 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	3,227
25	E13		4/21/2025 11:59:29 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	10,038
26	E14		4/21/2025 12:02:13 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cd 21082024	8,578

Annexe C : Courbe d'étalonnage du cadmium (Cd)



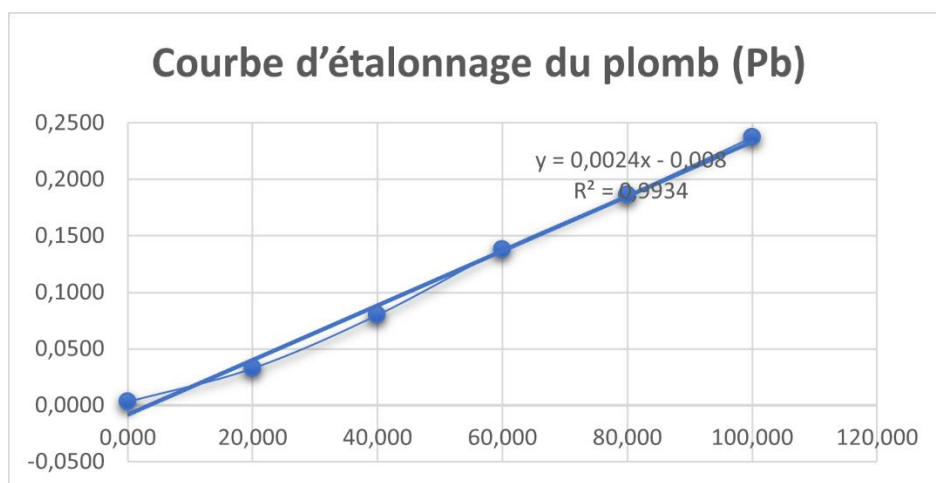
Annexe D : Données brutes d'absorbance et de concentration pour le plomb (Pb)

	Sample Id	R	Acquisition Time	QC Status	Pb 283.31 (Absorbance)
1	Blanc		4/23/2025 8:20:31 AM		0,0030
2	cal1		4/23/2025 8:23:10 AM		0,0326
3	cal2		4/23/2025 8:25:58 AM		0,0800
4	cal3		4/23/2025 8:28:49 AM		0,1378
5	cal4		4/23/2025 8:31:39 AM		0,1861
6	cal5		4/23/2025 8:34:29 AM		0,1837
7	cal5		4/23/2025 9:08:13 AM		0,2374
8	Blanc		4/23/2025 9:12:33 AM		0,2056
9	1		4/23/2025 9:18:19 AM		0,1833
10	2		4/23/2025 9:20:46 AM		0,0902
11	3		4/23/2025 9:23:30 AM		0,0284
12	4		4/23/2025 9:26:14 AM		0,0969
13	5		4/23/2025 9:28:58 AM		-0,0914
14	E01		4/23/2025 9:31:42 AM		-0,2050
15	E02		4/23/2025 9:34:26 AM		-0,1979
16	E03		4/23/2025 9:37:10 AM		-0,1669
17	E04		4/23/2025 9:39:54 AM		-0,1760
18	E05		4/23/2025 9:42:38 AM		-0,1201
19	E06		4/23/2025 9:45:22 AM		-0,1400
20	E07		4/23/2025 9:48:06 AM		-0,1842
21	E08		4/23/2025 9:50:50 AM		-0,1854
22	E09		4/23/2025 9:53:34 AM		-0,2047
23	E10		4/23/2025 9:56:18 AM		-0,2134
24	E11		4/23/2025 9:59:02 AM		-0,2040
25	E12		4/23/2025 10:01:46 AM		-0,2014
26	E13		4/23/2025 10:04:30 AM		-0,1666
27	E14		4/23/2025 10:07:14 AM		-0,1783

Annexe E : Concentrations de plomb (Pb) dans les échantillons d'eau de mer

	Sample Id	R	Acquisition Time	QC Status	Pb 283.31 (µg/L)
1	Blanc		4/23/2025 8:20:31 AM		0,000
2	cal1		4/23/2025 8:23:10 AM		20,000
3	cal2		4/23/2025 8:25:58 AM		40,000
4	cal3		4/23/2025 8:28:49 AM		60,000
5	cal4		4/23/2025 8:31:39 AM		80,000
6	cal5		4/23/2025 8:34:29 AM		100,000
7	cal5		4/23/2025 9:08:13 AM		100,000
8	Blanc		4/23/2025 9:12:33 AM		0,000
9	1		4/23/2025 9:18:19 AM		79,036
10	2		4/23/2025 9:20:46 AM		42,690
11	3		4/23/2025 9:23:30 AM		18,552
12	4		4/23/2025 9:26:14 AM		45,297
13	5		4/23/2025 9:28:58 AM		-28,235
14	E01		4/23/2025 9:31:42 AM		-72,594
15	E02		4/23/2025 9:34:26 AM		-69,828
16	E03		4/23/2025 9:37:10 AM		-57,733
17	E04		4/23/2025 9:39:54 AM		-61,296
18	E05		4/23/2025 9:42:38 AM		-39,442
19	E06		4/23/2025 9:45:22 AM		-47,223
20	E07		4/23/2025 9:48:06 AM		-64,479
21	E08		4/23/2025 9:50:50 AM		-64,939
22	E09		4/23/2025 9:53:34 AM		-72,468
23	E10		4/23/2025 9:56:18 AM		-75,882
24	E11		4/23/2025 9:59:02 AM		-72,214
25	E12		4/23/2025 10:01:46 AM		-71,181
26	E13		4/23/2025 10:04:30 AM		-57,615
27	E14		4/23/2025 10:07:14 AM		-62,179

Annexe F : Courbe d'étalonnage du plomb (Pb)



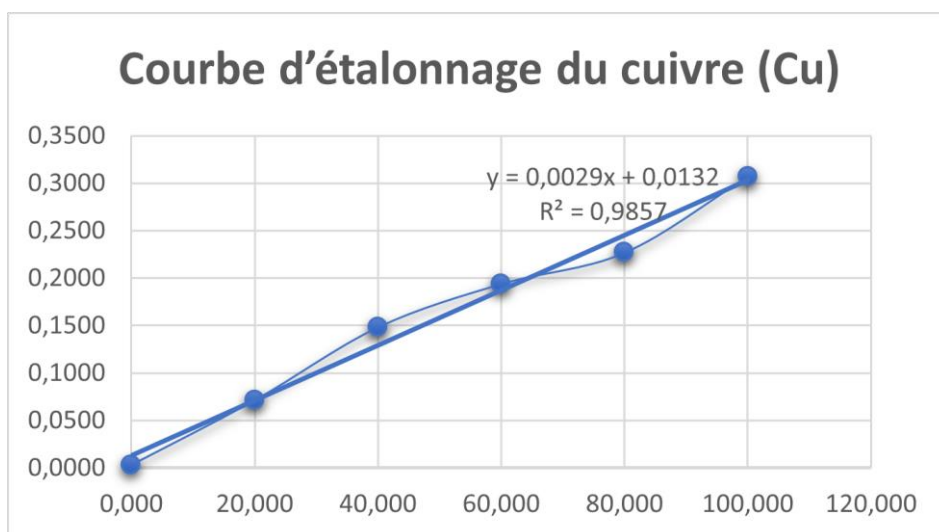
Annexe G : Données brutes d'absorbance et de concentration pour le cuivre (Cu)

Sample Id	R	Acquisition Time	QC Status	Cu 324.75 (Absorbance)
Calib Blank 1		4/22/2025 11:54:03 AM		0,0030
cal 1		4/22/2025 11:56:38 AM		0,0713
cal 2		4/22/2025 11:59:26 AM		0,1482
cal 3		4/22/2025 12:02:16 PM		0,1939
cal 4		4/22/2025 12:05:05 PM		0,2269
cal 5		4/22/2025 12:35:52 PM		0,3072
E01		4/22/2025 12:52:56 PM		0,0471
E02		4/22/2025 12:55:40 PM		0,0209
E03		4/22/2025 12:58:24 PM		0,0508
E04		4/22/2025 1:01:08 PM		4,0449
E05		4/22/2025 1:03:52 PM		0,0667
E06		4/22/2025 1:06:36 PM		0,1700
E07		4/22/2025 1:09:20 PM		0,4246
E08		4/22/2025 1:12:05 PM		0,0464
E09		4/22/2025 1:14:48 PM		0,0605
E10		4/22/2025 1:17:32 PM		0,0215
E11		4/22/2025 1:20:16 PM		0,0220
E12		4/22/2025 1:23:00 PM		0,1810
E13		4/22/2025 1:25:44 PM		0,0359
E14		4/22/2025 1:28:28 PM		0,0354
1		4/22/2025 3:04:11 PM		0,0889
2		4/22/2025 3:06:58 PM		0,1176
3		4/22/2025 3:09:46 PM		0,3003
4		4/22/2025 3:12:35 PM		0,1872
5		4/22/2025 3:15:24 PM		0,0999

Annexe H : Concentrations de cuivre (Cu) dans les échantillons d'eau de mer

	Sample Id	R	Acquisition Time	QC Status	Dataset File	Method File	Cu 324.75 (µg/L)
57	Calib Blank 1		4/22/2025 11:54:03 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	0,000
58	cal 1		4/22/2025 11:56:38 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	20,000
59	cal 2		4/22/2025 11:59:26 AM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	40,000
60	cal 3		4/22/2025 12:02:16 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	60,000
61	cal 4		4/22/2025 12:05:05 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	80,000
63	cal 5		4/22/2025 12:35:52 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	100,000
69	E01		4/22/2025 12:52:56 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	12,603
70	E02		4/22/2025 12:55:40 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	5,484
71	E03		4/22/2025 12:58:24 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	13,608
72	E04		4/22/2025 1:01:08 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	
73	E05		4/22/2025 1:03:52 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	18,060
74	E06		4/22/2025 1:06:36 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	49,638
75	E07		4/22/2025 1:09:20 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	153,338
76	E08		4/22/2025 1:12:05 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	12,385
77	E09		4/22/2025 1:14:48 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	16,332
78	E10		4/22/2025 1:17:32 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	5,638
79	E11		4/22/2025 1:20:16 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	5,768
80	E12		4/22/2025 1:23:00 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	53,303
81	E13		4/22/2025 1:25:44 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	9,518
82	E14		4/22/2025 1:28:28 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	9,375
112	1		4/22/2025 3:04:11 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	24,473
113	2		4/22/2025 3:06:58 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	33,029
114	3		4/22/2025 3:09:46 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	97,215
115	4		4/22/2025 3:12:35 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	55,389
116	5		4/22/2025 3:15:24 PM		Analyse Fe 12.12.2024	Cu 14.08.2024	27,698

Annexe I : Courbe d'étalonnage du cuivre (Cu)



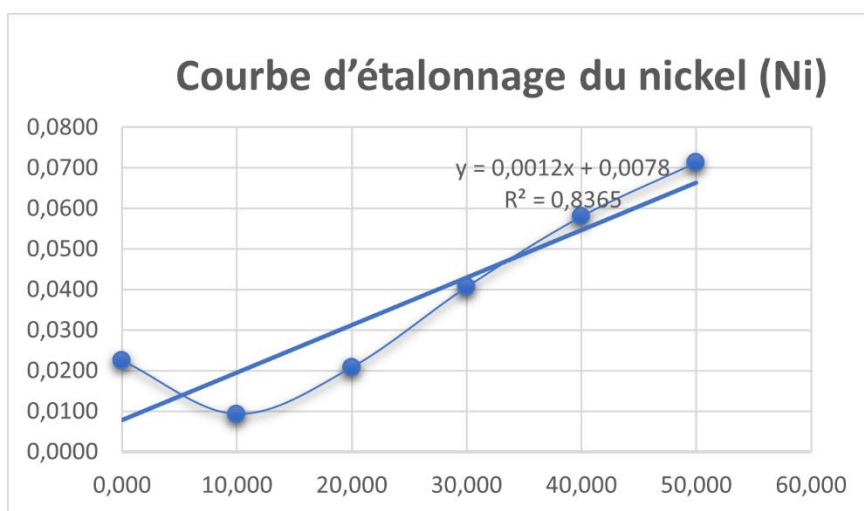
Annexe J : Données brutes d'absorbance et de concentration pour le nickel (Ni)

	Sample Id	R	Acquisition Time	QC Status	Ni 232.00 (µg/L)
7	Calib Blank 1		4/22/2025 9:26:05 AM		0,0225
8	cal1		4/22/2025 9:28:40 AM		0,0024
9	cal2		4/22/2025 9:31:29 AM		0,0208
10	cal3		4/22/2025 9:34:18 AM		0,0406
11	cal4		4/22/2025 9:37:08 AM		0,0580
12	cal5		4/22/2025 9:39:57 AM		0,0671
13	cal5		4/22/2025 9:44:42 AM		0,0713
14	cal1		4/22/2025 9:47:58 AM		0,0093
15	1		4/22/2025 9:53:52 AM		0,1066
16	2		4/22/2025 9:56:20 AM		0,1056
17	3		4/22/2025 9:59:03 AM		0,1620
18	4		4/22/2025 10:01:47 AM		0,1508
19	5		4/22/2025 10:04:31 AM		0,2864
20	E01		4/22/2025 10:07:15 AM		0,2737
21	E02		4/22/2025 10:09:59 AM		0,1543
22	E03		4/22/2025 10:12:43 AM		0,1330
23	E04		4/22/2025 10:15:27 AM		0,2806
24	E05		4/22/2025 10:18:11 AM		0,1471
25	E06		4/22/2025 10:20:55 AM		0,0943
26	E07		4/22/2025 10:23:39 AM		0,2116
27	E08		4/22/2025 10:26:23 AM		0,1188
28	E09		4/22/2025 10:29:07 AM		-0,0162
29	E10		4/22/2025 10:31:51 AM		0,0791
30	E11		4/22/2025 10:34:35 AM		0,1332
31	E12		4/22/2025 10:37:19 AM		0,2534
32	E13		4/22/2025 10:40:03 AM		0,2522
33	E14		4/22/2025 10:42:47 AM		0,2061

Annexe K : Concentrations de nickel (Ni) dans les échantillons d'eau de mer

	Sample Id	R	Acquisition Time	QC Status	Ni 232.00 (µg/L)
7	Calib Blank 1		4/22/2025 9:26:05 AM		0,000
8	cal1		4/22/2025 9:28:40 AM		10,000
9	cal2		4/22/2025 9:31:29 AM		20,000
10	cal3		4/22/2025 9:34:18 AM		30,000
11	cal4		4/22/2025 9:37:08 AM		40,000
12	cal5		4/22/2025 9:39:57 AM		50,000
13	cal5		4/22/2025 9:44:42 AM		50,000
14	cal1		4/22/2025 9:47:58 AM		10,000
15	1		4/22/2025 9:53:52 AM		59,122
16	2		4/22/2025 9:56:20 AM		58,830
17	3		4/22/2025 9:59:03 AM		71,468
18	4		4/22/2025 10:01:47 AM		69,396
19	5		4/22/2025 10:04:31 AM		86,562
20	E01		4/22/2025 10:07:15 AM		85,472
21	E02		4/22/2025 10:09:59 AM		70,052
22	E03		4/22/2025 10:12:43 AM		65,721
23	E04		4/22/2025 10:15:27 AM		86,075
24	E05		4/22/2025 10:18:11 AM		68,672
25	E06		4/22/2025 10:20:55 AM		55,459
26	E07		4/22/2025 10:23:39 AM		78,890
27	E08		4/22/2025 10:26:23 AM		62,367
28	E09		4/22/2025 10:29:07 AM		-20,888
29	E10		4/22/2025 10:31:51 AM		50,298
30	E11		4/22/2025 10:34:35 AM		65,765
31	E12		4/22/2025 10:37:19 AM		83,570
32	E13		4/22/2025 10:40:03 AM		83,448
33	E14		4/22/2025 10:42:47 AM		78,184

Annexe L: Courbe d'étalonnage du nickel (Ni)



Résumé

Ce travail évalue la contamination des eaux marines du littoral de Béjaïa par quatre éléments traces métalliques (Pb, Cd, Cu et Ni). Leur toxicité et leur persistance constituent un danger pour les écosystèmes marins et la santé humaine. Des prélèvements ont été effectués sur différents sites, accompagnés de mesures physico-chimiques (pH, conductivité). Les résultats montrent que certaines concentrations dépassent les normes internationales, notamment dans les zones urbaines et portuaires, en lien avec des rejets industriels, domestiques et agricoles. L'étude met en évidence les phénomènes de bioaccumulation, bioconcentration et biomagnification, révélant un risque écotoxicologique. Elle souligne la nécessité d'une surveillance régulière, d'une meilleure gestion des rejets et d'une sensibilisation accrue pour protéger le milieu marin.

Mots-clés : éléments traces métalliques, pollution marine, Béjaïa, bioaccumulation, santé environnementale.

Abstract

This study assesses the contamination of Béjaïa's coastal waters by trace metals (Pb, Cd, Cu, Ni), which threaten marine ecosystems and human health due to their toxicity and persistence. Analyses of seawater samples and physico-chemical parameters revealed that concentrations—especially in urban and port areas—often exceed international standards, mainly from industrial, domestic, and agricultural discharges. The findings emphasize the risks of bioaccumulation, bioconcentration, and biomagnification in marine organisms, highlighting the need for regular monitoring, better waste management, and stronger environmental awareness.

Keywords: trace elements, marine pollution, Béjaïa, bioaccumulation, environmental health.