

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

**Faculté des sciences biologiques et des
sciences agronomiques Département des
sciences biologiques**



Mémoire de fin d'étude

**En vue de l'obtention du diplôme de Master en
Sciences Biologiques**

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biologie des Populations et des Organismes

Thème

**Contribution à l'évaluation de la contamination de la moule
(*Mytilus galloprovincialis*) capturée à Béjaia par les éléments traces
métalliques**

Présenté par : ADEM Kathia et AIT DJOUDI OUFELLA Nouara

Devant le jury composé de :

- **MEHOUEL Fetta, Maître de Conférences B, Université de Constantine 1
(Promotrice)**
- **BRAHMI Karima, Professeur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
(UMMTO)
(Co-Promotrice)**
- **KHAMMES EL HOMSI Noura, Maître de Conférences A (Présidente de jury)**
- **DJIOUA Ouiza, Maître de Conférences Associée (Examinatrice)**

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à Madame **Fetta MEHOUEL**, Maître de Conférences B à l'Université de Constantine 1, ma promotrice, pour sa confiance, son encadrement rigoureux, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce travail. Mes remerciements vont également à Madame **Karima BRAHMI**, Professeure à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, ma co-promotrice, pour sa disponibilité, sa bienveillance et ses orientations précieuses.

Je tiens à remercier très chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour la qualité de leurs remarques et suggestions :

- Madame **Noura KHAMMES EL HOMSI**, Maître de Conférences A, présidente du jury, pour son évaluation rigoureuse et ses observations pertinentes,
- Madame **Ouiza DJIOUA**, Maître Assistante A, examinatrice, pour ses commentaires constructifs qui ont permis d'enrichir et d'améliorer ce mémoire.

Je remercie également le Centre de Recherche en Analyses Physico-Chimiques (CRAPC) de Béjaïa, en particulier Monsieur **Farid MERZEUG**, son directeur, pour son accueil, son accompagnement technique et les moyens mis à ma disposition durant toute la phase expérimentale.

Une pensée reconnaissante va aussi à l'ensemble des pêcheurs locaux de Béjaïa, ainsi qu'à Monsieur **Ahmed HAMITOUCH**, moniteur de plongée, pour leur précieuse aide lors des opérations de prélèvement.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur **BEN YAHIA**, directeur de la Direction du Port de Pêche de Béjaïa, pour sa collaboration et son appui logistique.

Je n'oublie pas mes enseignants, mes camarades de promotion et amis, pour les échanges constructifs, l'entraide et l'ambiance motivante tout au long de notre parcours.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma famille, pour son amour, sa patience et son soutien inconditionnel, qui ont toujours été mon moteur dans les moments de doute comme dans les réussites.

Dédicaces

À mes parents bien-aimés, piliers de ma vie, pour leur amour infini, leurs sacrifices silencieux et leur confiance indéfectible, qui m'ont portée bien au-delà des tempêtes.

À ma famille, refuge de tendresse et de force, pour son soutien constant et sa présence précieuse à chaque étape de mon chemin.

À toutes les personnes qui ont cru en moi, m'ont tendu la main, encouragée, écoutée ou simplement accompagnée, même en silence.

Et enfin,

À la mer, vaste, mystérieuse et vivante, source d'inspiration et de vie, qui m'a portée tout au long de cette belle aventure scientifique. Qui m'a inspirée, guidée et rappelé que la profondeur est souvent invisible à la surface.

Ce mémoire lui est dédié, comme un hommage à sa beauté, sa richesse... et aux secrets qu'elle nous permet de découvrir.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans une démarche de biosurveillance de la pollution métallique du littoral algérien, en particulier dans la région de Béjaïa, fortement soumise aux pressions anthropiques. L'étude a porté sur l'évaluation des concentrations de quatre éléments traces métalliques (ETM) – le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le cuivre (Cu) et le nickel (Ni) – chez la moule (*Mytilus galloprovincialis*), une espèce filtreuse largement reconnue comme bioindicateur de la pollution marine.

Des échantillons ont été prélevés dans cinq stations aux profils contrastés (zones portuaires, industrielles et moins urbanisées), puis analysés par spectrométrie d'absorption atomique. Les concentrations mesurées varient selon les stations et les ETM étudiés. Les niveaux les plus élevés ont été enregistrés à la **station S3 (zone portuaire de Béjaïa)** pour le **nickel (4.33 mg/kg)**, le **plomb (4.00 mg/kg)**, et le **cuivre (4.86 mg/kg)**, tandis que le **cadmium a atteint 1.27 mg/kg à la station S1 (zone industrielle de Tichy)**.

Dans certains cas, notamment pour le Cd et le Pb, les concentrations dépassent les seuils réglementaires. À titre de référence, la **norme européenne** fixe une **limite maximale de 1.0 mg/kg pour le Cd** et de **1.5 mg/kg pour le Pb** dans les mollusques bivalves destinés à la consommation humaine (Règlement CE n°1881/2006). Ces dépassements représentent donc un **risque potentiel pour la santé humaine**.

Une comparaison entre les concentrations des ETM dans les moules et celles mesurées dans l'eau de mer a révélé un phénomène de bioaccumulation significatif, confirmant l'efficacité de (*M. galloprovincialis*) comme espèce sentinelle. La discussion des résultats, confrontée à d'autres travaux réalisés en Algérie, met en évidence l'influence des activités humaines sur la variabilité spatiale de la contamination.

Ce mémoire souligne l'urgence de renforcer les programmes de surveillance environnementale et recommande une approche intégrée incluant les sédiments, les organismes benthiques et le suivi saisonnier des rejets industriels pour la préservation durable du littoral.

Mots-clés : (*Mytilus galloprovincialis*), bioaccumulation, éléments traces métalliques, cadmium (Cd), plomb (Pb), cuivre (Cu), nickel (Ni), pollution côtière, Béjaïa, Algérie.

Abstract

This study is part of a biomonitoring approach to assess metal pollution along the Algerian coastline, specifically in the Béjaïa region, which is heavily impacted by anthropogenic pressures. The research focused on evaluating the concentrations of four trace metal elements (TMEs) – cadmium (Cd), lead (Pb), copper (Cu), and nickel (Ni) – in the mussel (*Mytilus galloprovincialis*), a filter-feeding species widely recognized as a bioindicator of marine pollution.

Samples were collected from five stations with contrasting profiles (port, industrial, and less urbanized areas) and analyzed using atomic absorption spectrophotometry. The measured concentrations varied depending on the station and the specific trace elements. The highest levels were recorded at **station S3 (Béjaïa port area)** for **nickel (4.33 mg/kg)**, **lead (4.00 mg/kg)**, and **copper (4.86 mg/kg)**, while **cadmium reached 1.27 mg/kg at station S1 (industrial area of Tichy)**.

In some cases, particularly for Cd and Pb, the concentrations exceeded regulatory limits. For reference, the **European Union standard** sets a **maximum limit of 1.0 mg/kg for Cd** and **1.5 mg/kg for Pb** in bivalve mollusks intended for human consumption (Regulation EC No. 1831/2003). These exceedances therefore represent a **potential risk to human health**.

A comparison between TME concentrations in mussels and those in seawater revealed a significant bioaccumulation phenomenon, confirming the effectiveness of (*M. galloprovincialis*) as a sentinel species. The discussion of the results, compared with other studies conducted in Algeria, highlights the influence of human activities on the spatial variability of contamination. This thesis emphasizes the urgent need to strengthen environmental monitoring programs and recommends an integrated approach including sediments, benthic organisms, and seasonal monitoring of industrial discharges to ensure sustainable coastal protection.

Keywords: (*Mytilus galloprovincialis*), bioaccumulation, trace metal elements, cadmium (Cd), lead (Pb), copper (Cu), nickel (Ni), coastal pollution, Béjaïa, Algeria.

الملخص

تتدرج هذه الدراسة ضمن نهج للرصد الحيوي لتلوث المعادن في الساحل الجزائري، لا سيما في منطقة بجاية التي تتعرض لضغوط بشرية كبيرة. ركزت الدراسة على تقييم تركيزات أربعة عناصر معدنية نادرة (Cd) الكاديوم، Pb الرصاص، Cu النحاس، و Ni النيكل) في بلح البحر (*Mytilus galloprovincialis*)، وهو نوع من الرخويات المرشحة يُعتبر مؤشراً حيوياً معترفاً به لتلوث البيئة البحرية.

تم جمع العينات من خمس محطات ذات خصائص مختلفة (مناطق مرفئية، صناعية، وأخرى أقل تحضرًا)، وتم تحليلها باستخدام تقنية الامتصاص الذري. أظهرت النتائج أن التركيزات تختلف حسب المحطة والعنصر المدروس، حيث سُجِّلَت أعلى القيم في المحطة) S3 منطقة ميناء بجاية(بالنسبة للنيكل (4.33 ملغ/كغ)، والرصاص (4.00 ملغ/كغ)، والنحاس (4.86 ملغ/كغ)، في حين سُجِّلَ أعلى تركيز للكاديوم في المحطة) S1 المنطقة الصناعية لتيشي(وبلغ (1.27 ملغ/كغ).

في بعض الحالات، خاصةً بالنسبة للكاديوم والرصاص، تجاوزت التركيزات الحدود التنظيمية المسموح بها. على سبيل المثال، يحدد الاتحاد الأوروبي الحد الأقصى للكاديوم بـ 1.0 ملغ/كغ، وللرصاص بـ 1.5 ملغ/كغ في الرخويات ثنائية المصراع المخصصة للاستهلاك البشري (اللائحة الأوروبية رقم 2006/1881). وتمثل هذه التجاوزات خطراً محتملاً على الصحة البشرية.

كما أظهرت المقارنة بين تركيزات المعادن الثقيلة في بلح البحر ومياه البحر وجود ظاهرة تراكم حيوي واضحة، مما يؤكد فعالية نوع (*M. Galloprovincialis*) (ككائن مراقبة بيئية. وقد بينت مناقشة النتائج، مقارنةً بأعمال سابقة أُجريت في الجزائر، تأثير الأنشطة البشرية على التباين المكاني في التلوث.

ويبرز هذا البحث الحاجة الملحة إلى تعزيز برامج المراقبة البيئية، ويوصي باتباع نهج متكامل يشمل تحليل الرواسب والكائنات القاعية، بالإضافة إلى الرصد الموسمي للانبعاثات الصناعية، من أجل حماية مستدامة للساحل.

الكلمات المفتاحية: *Mytilus galloprovincialis*، التراكم الحيوي، العناصر المعدنية النادرة، الكاديوم (Cd)، الرصاص (Pb)، النحاس (Cu)، النيكل (Ni)، التلوث الساحلي، بجاية، الجزائر.

Table des matières

Résumé

Abstract

Résumé en arabe

Remerciements

Dédicace

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction	1
Chapitre 1 : Généralités sur les éléments traces métalliques	2
1.1. Les éléments traces métalliques	3
1.2. Classification des éléments traces métalliques.....	3
1.3. Sources d'émission.....	6
1.4. Caractéristiques des ETM étudiés	9
1.5. Bioaccumulation.....	11
1.6. Situation en Méditerranée	12
Chapitre 2 : Bioaccumulation et toxicité des éléments traces métalliques.....	13
2.1. Bioaccumulation.....	13
2.2. Effets sur les organismes et l'homme	16
Chapitre 3 : Présentation de (<i>Mytilusgalloprovincialis</i>)	20
3.1. Définition	20
3.2. Morphologie externe	21
3.3. Physiologie	24
3.4. Habitat	25
3.5. Adaptation aux facteurs écologiques	26
3.6. Distribution géographique	26
3.7. Pêche et consommation	27
3.8. Choix de moules comme bioindicateurs	27
Partie expérimentale	30
3.1. Matériels et méthodes.....	30
3.2. Description des stations.....	40

Résultats et discussion	52
1. Concentrations générales des ETM dans les moules	52
2. Variation spatiale selon les stations	53
3. Comparaison aux seuils réglementaires	55
4. Comparaison des concentrations observées aux seuils réglementaires.....	58
Conclusion et perspectives	63
Références bibliographiques	66

Liste des tableaux

Tableau n°1 : Teneur en éléments traces métalliques dans l'organisme humain	6
Tableau n° 2 : Sources industrielles et agricoles de éléments traces métalliques.....	8
Tableau n° 3 : Cycle de reproduction chez (<i>Mytilus galloprovincialis</i>	25
Tableau n°4 : Réactifs utilisés pour l'analyse des éléments traces métalliques dans les échantillons.....	40
Tableau n°5 : Paramètres statistiques des concentrations en ETM (mg/kg).....	52
Tableau n°6 : Comparaison des concentrations mesurées avec les résultats de (Oubakouk et Naib, 2025) dans l'eau de mer	54
Tableau n°7 : Comparaison des concentrations mesurées avec les normes réglementaires (mg/kg poids sec)	59
Tableau n°8 : Concentration des éléments traces métalliques (mg/kg) dans les moules selon les stations.....	63

Liste des figures

Figure n° 1 : Classification périodique des éléments chimiques	5
Figure n°2 : Sources majeures de contamination par les ETM.....	9
Figure n°3 : Voies d'accumulation d'éléments traces métalliques dans le milieu marin	11
Figure n°4 : Anatomie de la moule (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) (Bachelot, 2010).	23
Figure n°5 : Système respiratoire chez la moule	24
Figure n°6 : Répartition géographique mondiale de (<i>M. galloprovincialis</i>).....	26
Figure n°7 : Moule étudiée	31
Figure n°8: Carte des stations d'échantillonnage	32
Figure n°9 à 13 : Photos des stations 1 à 5 (Beni Ksila, ThalaGuilef, Béjaïa...)	33_37
Figure n°14 : Matériel de traitement utilisé en laboratoire	38
Figure n°15 : Spectrophotomètre d'absorption atomique (AAS)	39
Figure n°16 : Échantillon de moule fraîche	41
Figure n°17–24 : Étapes de la préparation des échantillons (calcination, digestion acide, filtration, dosage)	43_49
Figure n°25: Concentrations du Cadmium (Cd) exprimées en mg/kg chez la moule (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) dans les différentes stations d'étude.....	56
Figure n°26: Concentrations du nickel (Ni) exprimées en mg/kg chez la moule (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) dans les différentes stations d'étude.....	56
Figure n°27 : Concentrations du cuivre (Cu) exprimées en mg/kg chez la moule (<i>Mytilus galloprovincialis</i>) dans les différentes stations d'étude.....	57
Figure n°28 : Concentrations du Plomb (Pb) exprimées en mg/kg chez la moule <i>Mytilus galloprovincialis</i> dans les différentes stations d'étude	58

Liste des abréviations

AAS : Atomic Absorption Spectrophotometry

ALA : Acide δ -aminolévulinique

ALA-D : Acide δ -aminolévuliniquedéshydratase

Cd : Cadmium

CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer

CRAPC : Centre de Recherche en Analyses Physico-Chimiques

Cu : Cuivre

DHT : Dose Hebdomadaire Tolérable

DJA : Dose Journalière Admissible

EC₅₀ : Concentration efficace médiane

ETM : Éléments Traces Métalliques

FAO : Food and Agriculture Organization

FBC : Facteur de Bioconcentration

GPS : Global Positioning System

HNO₃ : Acide nitrique

H₂O₂ : Peroxyde d'hydrogène

JECFA: Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives

Ni : Nickel

PA : Pureté Analytique

Pb : Plomb

Ppm : Parties par million

SAA : Spectrophotomètre d'Absorption Atomique

Zn: Zinc

Introduction générale

Introduction générale

La pollution constitue un enjeu environnemental majeur de notre époque, touchant l'ensemble des écosystèmes, y compris les milieux aquatiques. Elle représente une menace non seulement pour la santé humaine, mais aussi pour l'équilibre des écosystèmes marins. Parmi les nombreux contaminants pouvant atteindre les eaux marines figure les éléments métalliques, présents en général à de très faibles concentrations, souvent de l'ordre de la ppm (parties par million) **(Benamar, 2006)**.

La cote algérienne qui s'étendant sur environ 1280 km, seulement 1,9 % de la superficie nationale, mais elle concentre près de 40 % de la population du pays **(Grimes et al., 2004)**. Cette forte densité humaine accentue la pression sur le littoral, déjà fragilisé par diverses formes de pollution, en particulier celle liée aux éléments traces métalliques (ETM). Ces derniers, classés parmi les micropolluants, présentent un risque important pour le milieu marin, car ils sont stables et résistants à toute dégradation naturelle. En conséquence, ils peuvent s'accumuler au fil du temps dans les organismes vivants, en atteignant parfois des niveaux toxiques à travers les réseaux trophiques **(Neathery et al., 1975)**.

Notre société emploie une multitude de substances chimiques, qu'elles soient d'origine naturelle ou synthétique. Nombreux de ces composés présentent des caractéristiques préoccupantes, telles que leur toxicité envers l'environnement, leur persistance dans les milieux aquatiques, ou encore leur capacité à s'accumuler dans les organismes vivants, ainsi que celle de leurs dérivés. Ces propriétés favorisent leur transfert dans la chaîne alimentaire jusqu'au consommateur final, exposant ainsi la santé humaine et la biodiversité à de réels dangers **(Levet, 2008)**.

Le présent travail a pour objectif d'évaluer le niveau de pollution de l'écosystème marin à travers une analyse spatio-temporelle des concentrations en ETM suivants : le cadmium (Cd), le plomb (Pb) et le Nickel (Ni) et Cuivre (Cu) chez les organismes bio-indicateurs tels que (*Mytilus galloprovincialis*).

Ces espèces benthiques, largement reconnues pour leur capacité à bioaccumuler les métaux et pour leur mode de vie fixé (sessile) et tolérant aux variations de salinité (euryhalin), sont souvent utilisées dans les programmes de surveillance environnementale **(Cossa, 1989)**. Les moules de Méditerranée, en particulier, présentent une valeur commerciale élevée et sont fréquemment consommées par les pêcheurs et les populations locales, ce qui accentue les risques sanitaires en cas de contamination. **(Geffard, 2001)**.

Le choix des compartiments biotique (moules) étudiés repose sur leur capacité à fixer et concentrer divers polluants métalliques et organiques **(Geffard, 2001)**, rendant ainsi leur

analyse essentielle pour évaluer les dangers potentiels sur l'environnement et la santé publique.

Donc, nous nous sommes intéressés à la biosurveillance de la pollution métallique dans l'environnement marin côtier, en particulier celle causée par les éléments traces métalliques (ETM). L'étude a été menée à partir de l'espèce bioindicatrice (*Mytilusgalloprovincialis*) (la moule méditerranéenne), collectée dans différentes stations situées sur la zone centrale du littoral algérien, plus précisément entre Béjaïa et Tizi Ouzou. Cette région, marquée par une activité humaine croissante, est particulièrement exposée aux rejets domestiques, industriels et agricoles, ce qui en fait un site pertinent pour l'évaluation de la contamination marine.

Ce mémoire s'organise autour de trois grandes parties :

CHAPITRE 1 : Revue bibliographique

Ce premier chapitre est dédié à une synthèse bibliographique structurée autour de trois axes principaux :

- **Origine et comportement des ETM dans le milieu marin** : définition, sources naturelles et humaines, et mécanismes de bioaccumulation dans les organismes.
- **Effets écotoxicologiques des ETM (Cd, Pb, Cu, Ni)** : impacts spécifiques sur les organismes marins et les risques pour la santé humaine.
- **Rôle bioindicateur de la moule (*Mytilusgalloprovincialis*)**: caractéristiques biologiques, écologiques et pertinence dans la surveillance de la pollution marine.

CHAPITRE 2 : Partie expérimentale

Le deuxième chapitre présente la partie expérimentale du mémoire en présentant les zones d'étude ainsi que leurs environnements, et en décrivant le matériel et les méthodes spécifiques utilisées dans chaque manipulation effectuée au laboratoire.

CHAPITRE 3 : Partie résultats

- Le troisième chapitre fait référence aux résultats obtenus, leur discussion et leur interprétation.

Pour tout clôturer le mémoire est terminé par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre 1 : Généralités sur les éléments traces métalliques (ETM)

1.1. Les éléments traces métalliques

L'expression de métaux lourds est souvent considérée comme ambigu, sa définition variant selon les sources (**Baker et Walker, 1990**). De plus en plus, cette appellation est remplacée par le terme **éléments-traces métalliques (ETM)**, une désignation jugée plus précise (**Miquel, 2001**).

Un métal est un élément chimique caractérisé par une densité généralement supérieure à 5 g/cm³. Il possède une bonne conductivité thermique et électrique, ainsi qu'une grande dureté et une certaine malléabilité. Grâce à sa capacité à s'associer à d'autres éléments, il forme des alliages, dont l'usage par l'homme remonte à l'Antiquité (**Belanger & David, 2009**).

Les micropolluants d'origine minérale sont principalement constitués des éléments traces métalliques (ETM). Parmi les plus fréquemment détectés dans les milieux aquatiques figurent le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le cuivre (Cu) et le nickel (Ni). Bien que présents dans l'ensemble des compartiments de l'environnement, ces métaux le sont généralement à de très faibles concentrations, d'où leur qualification d'éléments "en trace". Ils témoignent à la fois des caractéristiques géologiques naturelles des milieux et des activités anthropiques passées et actuelles (**Gérard, 2000**).

1.2. Classification des ETM

1.2.1. Sur le plan chimique

D'un point de vue **chimique**, les métaux se distinguent par leur capacité à former des cations lorsqu'ils se trouvent en solution aqueuse. Autrement dit, ce sont des éléments du tableau périodique qui, en perdant un ou plusieurs électrons, acquièrent une charge positive et interagissent avec leur environnement sous forme ionique. (**Alloway et Ayres, 1997**).

L'expression de métaux lourds est souvent considérée comme ambigu, sa définition variant selon les sources (**Baker et Walker, 1990**). De plus en plus, cette appellation est remplacée par le terme **éléments-traces métalliques (ETM)**, une désignation jugée plus précise (**Miquel, 2001**).

Un métal est un élément chimique caractérisé par une densité généralement supérieure à 5 g/cm³. Il possède une bonne conductivité thermique et électrique, ainsi qu'une grande dureté et une certaine malléabilité. Grâce à sa capacité à s'associer à d'autres éléments, il forme des alliages, dont l'usage par l'homme remonte à l'Antiquité (**Belanger & David, 2009**).

Les micropolluants d'origine minérale sont principalement constitués des éléments traces métalliques (ETM). Parmi les plus fréquemment détectés dans les milieux aquatiques figurent le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le cuivre (Cu) et le nickel (Ni). Bien que présents dans l'ensemble des compartiments de l'environnement, ces métaux le sont généralement à de très faibles concentrations, d'où leur qualification d'éléments "en trace". Ils témoignent à la fois des caractéristiques géologiques naturelles des milieux et des activités anthropiques passées et actuelles (**Gérard, 2000**).

1.2. Classification des ETM

1.2.1. Sur le plan chimique

D'un point de vue chimique, les métaux se distinguent par leur capacité à former des cations lorsqu'ils se trouvent en solution aqueuse. Autrement dit, ce sont des éléments du tableau périodique qui, en perdant un ou plusieurs électrons, acquièrent une charge positive et interagissent avec leur environnement sous forme ionique (**Alloway et Ayres, 1997**).

La classification périodique des éléments, illustrée dans la **figure n°1**, permet de situer les métaux et de mieux comprendre leurs propriétés chimiques et leur réactivité.

Bloc S		Métaux lourds de densité > 5										Bloc p														
H												B	C	N	O	F	He									
Li	Be											Al	Si	P	S	Cl	Ar									
Na	Mg	Bloc d										Ga	Ge	As	Se	Br	Kr									
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	In	Sn	Sb	Te	I	Xe									
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Te	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	Pb	Bi	Po	At	Rn										
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn									
Fr	Ra	Ac	Bloc f										Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Lanthanides												Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Cf	Bk	Es	Fm	Md	No	Lr	
Transuraniens												Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Cf	Bk	Es	Fm	Md	No	Lr	

Figure 1 : tableau de classification périodique (Fourest,1993).

1.2.2. Sur le plan biologique

Sur le plan **biologique**, les ETM ne présentent pas tous le même degré de toxicité. On les répartit généralement en deux grandes catégories, selon leurs effets sur les organismes vivants. (Alloway et Ayres, 1997).

1.2.2.1. Les éléments essentiels (oligo-éléments)

Environ 65 % des métaux lourds ne présentent pas de toxicité pour l'homme. Certains d'entre eux sont même indispensables au fonctionnement biologique et font partie des oligo-éléments, des nutriments nécessaires aux processus cellulaires. Ces éléments, qualifiés d'essentiels, doivent être fournis par l'alimentation (Azimi, 2004).

Ils sont présents en quantités infimes mais sont essentiels au bon déroulement des réactions métaboliques. Ils jouent notamment un rôle fondamental dans la stabilité et la structure des enzymes et des protéines, en agissant comme cofacteurs enzymatiques. Certains sont indispensables aux réactions biochimiques, car ils interviennent dans les processus enzymatiques, accélérant les réactions métaboliques ainsi que d'autres rôles (Goudot-Perrot, 1983). Leur absence peut entraîner des dysfonctionnements structuraux et physiologiques similaires dans plusieurs espèces. C'est le cas du fer (Fe), zinc (Zn), silicium (Si), cuivre (Cu), manganèse (Mn), nickel (Ni), cobalt (Co), sélénium (Se), fluor (F), chrome (Cr), molybdène (Mo), étain (Sn), vanadium (V) et aluminium (Al) (Morrison, 1979). Toutefois ils deviennent toxiques lorsque leurs concentrations dépassent un certain seuil (Loué, 1993 ; Behanzin et al., 2014). La teneur normale en ETM dans l'organisme humain est illustrée dans le tableau ci-dessous (Voir le tableau n°1), basée sur les travaux de (Schroeder, 1967).

Tableau n° 1 : La teneur en ETM dans l'organisme humain, basé sur les travaux de Schroeder (1967)

Élément	Teneur (mg/kg)	Élément	Teneur (mg/kg)
Fer (Fe)	60	Manganèse (Mn)	0,2
Zinc (Zn)	33	Molybdène (Mo)	0,1
Rubidium (Rb)	4,6	Nickel (Ni)	0,02
Strontium (Sr)	4,6	Chrome (Cr)	0,02
Cuivre (Cu)	1,0	Cobalt (Co)	0,02
Vanadium (V)	0,3	Uranium (U)	0,001
Sélénium (Se)	0,2	Béryllium (Be)	0,0003

1.2.2.2. Les éléments toxiques

Certains ETM, contrairement aux éléments essentiels, sont dépourvus de fonctions biologiques utiles et sont toxiques même à très faibles doses. Le plomb, le cadmium et le nickel figurent parmi les plus préoccupants en raison de leur persistance dans l'environnement et de leur tendance à s'accumuler dans les organismes. Leur présence dans la chaîne alimentaire peut entraîner une accumulation dans les tissus humains, exposant ainsi à des effets toxiques chroniques (Gollenberg et al., 2010 ; Xu et al., 2017).

1.3. Sources d'émission des éléments traces métalliques

Les ETM présents dans l'environnement proviennent principalement de deux grandes catégories de sources : les sources naturelles et les sources anthropiques (Boulkrah, 2008).

1.3.1. Sources naturelles

- Les ETM sont naturellement présents dans les roches et sédiments.
- Ils peuvent être libérés par l'érosion, les activités humaines ou les phénomènes naturels (volcans).
- Dans les roches, ils existent sous forme d'**oxydes/silicates** (stables) ou de **sulfures/carbonates** (facilement altérables).
- Une fois libérés, ils peuvent :

- Se dissoudre dans l'eau et contaminer les sols et nappes,
- Se fixer sur les particules fines.
- Les principales sources de contamination sont :
 - L'exploitation minière,
 - L'érosion naturelle,
 - Le captage d'eaux profondes,
 - Les éruptions volcaniques.
- Les ETM se dispersent ensuite dans l'air, le sol, l'eau et les organismes, avec des échanges constants entre ces milieux. **(Gerard, 2000).**

1.3.2. Sources anthropiques

Les activités humaines contribuent largement à l'augmentation des concentrations des ETM dans l'environnement. Ces sources anthropogéniques incluent :

- **Les industries pétrochimiques** : les procédés de raffinage du pétrole et de combustion produisent des émissions métalliques dans l'air et les sols.
- **Les activités minières** : l'extraction et le traitement des minerais (comme le plomb, le cadmium et le zinc) libèrent des résidus métalliques dans les milieux naturels.
- **Les prélèvements et rejets d'eau industriels** : l'exploitation des ressources hydriques pour l'irrigation ou les usages industriels entraîne le déversement d'ETM dissous dans les eaux de surface.
- **La combustion de combustibles fossiles** : les centrales électriques au charbon, les chaudières industrielles et les fours à ciment rejettent des particules métalliques dans l'air.
- **Les transports** : les émissions des véhicules, dues à l'usure des pièces mécaniques (plaquettes de frein, pneus) et à l'usage de carburants contenant du plomb, sont une source majeure de pollution métallique.
- **L'incinération des déchets** : la combustion des ordures ménagères et industrielles peut relâcher des métaux toxiques tels que le mercure et le plomb dans l'environnement.
- **Les produits industriels et domestiques** : certains objets du quotidien (interrupteurs électriques, amalgames dentaires, lampes fluorescentes) contiennent des ETM qui peuvent se retrouver dans les déchets.
- **Les pratiques agricoles** : l'utilisation de pesticides et d'engrais enrichis en ETM contribue à la contamination des sols.

- **Les déchets urbains** : les eaux usées, les boues d'épuration et les ordures ménagères transportent des traces de divers ETM, alimentant ainsi leur accumulation dans l'environnement. **(Miquel, 2001)**.

Les principales sources industrielles et agricoles des ETM sont résumées dans le **tableau n°2** ci-dessous, adapté de Sedira (2013), en fonction des secteurs d'activité concernés et des métaux les plus fréquemment impliqués.

Tableau n° 2 : Principales sources industrielles et agricoles des ETM dans l'environnement **(Adapté de Sedira, 2013)**.

Secteur d'activité	ETM concernés
Batteries et équipements électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni
Pigments et peintures	Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As
Alliages et soudures	Cu, As, Fe, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni
Pesticides et herbicides	As, Hg, Pb, Cu, Zn, Mn, Sn
Catalyseurs industriels	Ni, Hg, Pb, Cu, Sn
Industrie du verre	As, Zn, Sn
Engrais agricoles	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Mn, Sn, Ni, Cu
Matières plastiques	Cd, Sn, Pb
Produits dentaires et cosmétiques	Sn, Hg
Industrie textile	Cr, Fe, Al
Carburants (véhicules et moteurs)	Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd
Raffinage du pétrole	Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn

La **figure n°2** illustre ces principales sources de pollution, qui incluent aussi bien les processus naturels (érosion, activités volcaniques) que les activités humaines (industries, agriculture, transports).

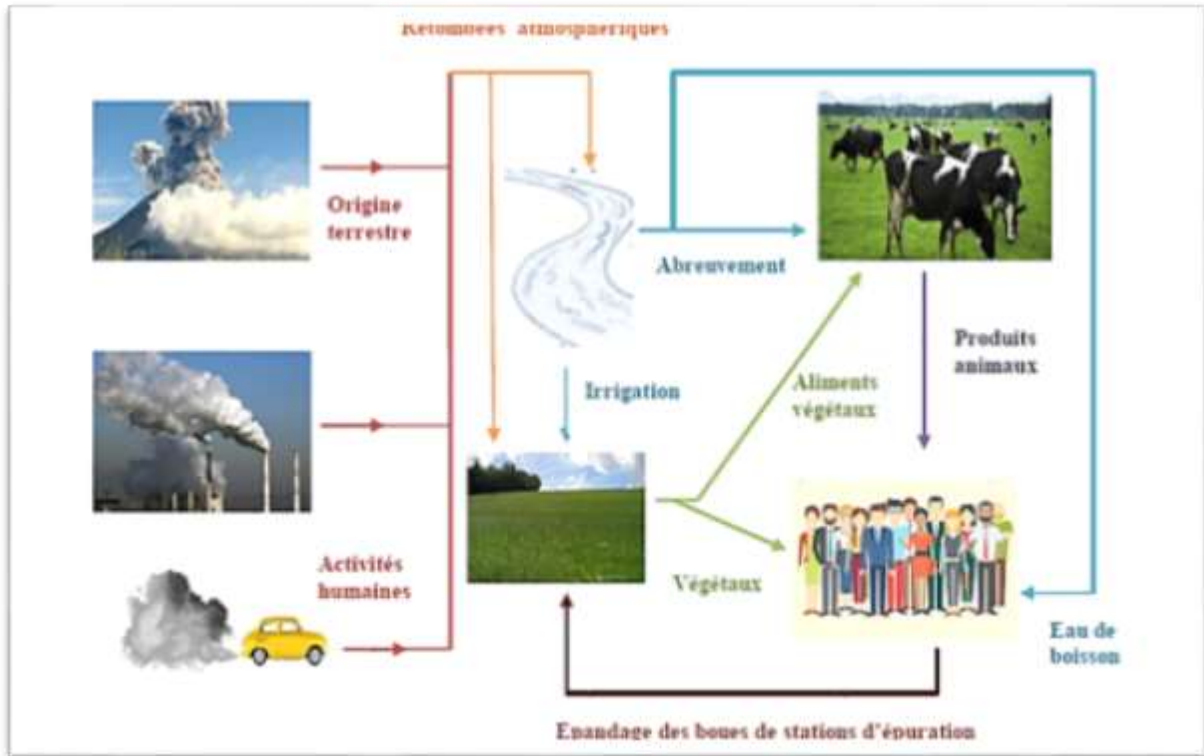


Figure n°2 : Sources majeures de contamination par les ETM d'après (Cai et al., 2012).

1.4. Caractéristiques des ETM

1.4.1. Cadmium (Cd)

Le **cadmium (Cd)** est un élément mineur de l'écorce terrestre, où il n'existe pas à l'état pur. Il est généralement associé aux minerais de plomb et de zinc. Ses composés, notamment ses sels, sont reconnus pour leur forte toxicité (Dehaine, 1992). Bien que présent en très faibles quantités dans la biosphère, avec des concentrations variant entre **0,1 et 0,2 ppm**, le cadmium provient principalement de plusieurs activités industrielles. Parmi celles-ci, on retrouve la métallurgie du zinc, la synthèse de produits organiques, ainsi que la production de ciment, de piles électriques et de peintures. D'autres sources incluent les émissions des raffineries et les procédés de galvanoplastie (Dehaine, 1992).

1.4.2. Le Cuivre (Cu)

Le **cuivre (Cu)** est un métal largement utilisé en métallurgie pour ses nombreuses qualités, notamment sa conductivité électrique très élevée, ce qui en fait un élément clé dans les installations électriques. Il est également employé comme pigment dans la verrerie et la céramique, et entre dans la fabrication de certains produits chimiques comme les insecticides et fongicides. Dans l'industrie pétrolière, il est valorisé pour ses propriétés purifiantes et désodorisantes (**Spaque, 2015**).

Le cuivre, absorbé principalement par l'alimentation, est essentiel au bon fonctionnement enzymatique de l'organisme. À fortes doses, il peut provoquer des troubles digestifs, bien que ces cas soient rares en raison de son goût métallique qui limite sa consommation (**Health Canada, 1992**).

1.4.3. Le plomb (Pb)

Le **plomb (Pb)** est un métal relativement répandu dans la croûte terrestre, avec une concentration variant entre **8 et 20 ppm (A.F.E.E, 1979)**. Il se trouve principalement dans divers minerais, tels que la galène. Bien que le plomb soit naturellement libéré dans l'environnement par certains processus géologiques, les émissions ont considérablement augmenté avec le développement des activités industrielles. Parmi les principales sources anthropiques, on retrouve la métallurgie, la combustion du charbon, l'usage du plomb dans les peintures et, surtout, l'incorporation de composés plombés dans les carburants (**A.F.E.E, 1979**).

Sur le plan biologique, le **métabolisme du plomb** présente des similitudes avec celui du calcium, notamment en ce qui concerne le dépôt et la mobilisation dans les os (**Noppe, 1996**). Toutefois, lorsque le plomb est absorbé en grandes quantités par l'organisme humain, il devient hautement toxique et entraîne divers effets néfastes sur la santé (**Noppe, 1996**).

1.4.4. Nickel (Ni)

Le nickel provient principalement des activités humaines, notamment des centrales, des incinérateurs, de la combustion du mazout, de la métallurgie, de l'exploitation minière et de la galvanisation. Sa mobilité dans les sols augmente avec l'acidité (pH faible), mais elle peut

être réduite par la présence de matière organique, qui fixe le nickel, notamment via les humines (Uren NC, 1992).

1.5. Processus physiologique de bioaccumulation des éléments traces métalliques

La bioaccumulation désigne le processus par lequel les ETM sont absorbés et concentrés dans les tissus des organismes vivants. La bioconcentration correspond à l'accumulation d'une substance dans un organisme jusqu'à atteindre une concentration plus élevée que celle du milieu environnant. Ce phénomène est quantifié par le facteur de bioconcentration (**FBC**), qui exprime le rapport entre la concentration du contaminant dans l'organisme et celle présente dans son environnement. (Bowen, 1966 cité par Casas, 2005).

La **bioamplification** ou **biomagnification** fait référence au mécanisme par lequel la concentration d'une substance augmente à chaque niveau de la chaîne alimentaire, les prédateurs accumulant ainsi des quantités plus importantes que leurs proies. L'intensité de ces processus dépend à la fois des caractéristiques biochimiques des substances concernées et des spécificités des différentes espèces (Bowen, 1966 cité par Casas, 2005)

Les voies d'accumulation des métaux dans le milieu marin sont représentées dans la **figure n°3** ci-dessous.

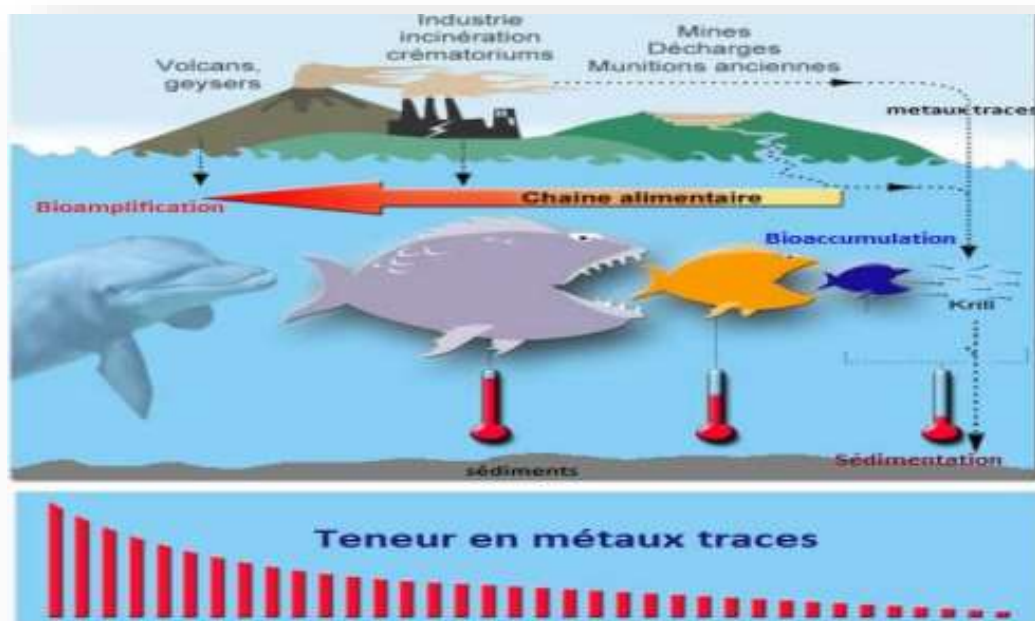


Figure n° 3 : Voies d'accumulations d'un métal dans le milieu marin (Augier et al., 2014)

1.6. Situation générale des éléments traces métalliques en méditerranée

La Méditerranée, bordée par une vingtaine de pays et accueillant environ 400 millions d'habitants, dont un quart réside en zone côtière, est fortement sollicitée par l'activité humaine et le tourisme. Chaque année, près de 120 millions de visiteurs fréquentent ses littoraux. En plus des apports naturels comme l'érosion et le ruissellement, les rejets industriels, agricoles et urbains augmentent la présence d'éléments traces métalliques (ETM) dans cette zone. Les retombées atmosphériques, provenant parfois de régions éloignées comme le nord de l'Europe ou le Sahara, contribuent également à cette pollution (**Casas, 2005**).

Les premières observations fiables sur les éléments traces métalliques en Méditerranée, datant de 1983, ont révélé des distributions verticales différentes de celles observées dans les océans Atlantique et Pacifique (**Tissoukai et Ouatmani, 2013**).

Dans les océans Atlantique et Pacifique, le zinc et le cadmium suivent un profil classique, avec des concentrations croissantes en profondeur. En revanche, en Méditerranée, ces ETM sont plus présents en surface et varient peu en profondeur. Cette particularité s'explique par des apports superficiels importants et un transfert vertical limité, en raison des interactions biologiques et des mouvements des eaux (**Casas, 2005**).

Chapitre 2 : Bioaccumulation et toxicité des éléments traces métalliques

Ce chapitre vise à détailler les effets toxiques de certains éléments traces métalliques (ETM), en particulier le cadmium, le plomb, le cuivre et le nickel, sur les organismes marins ainsi que sur la santé humaine. Il s'agira d'examiner de manière approfondie les impacts spécifiques de ces contaminants sur les écosystèmes marins, en mettant en lumière les mécanismes de toxicité, ainsi que les conséquences à court et à long terme sur la faune marine. Avant d'aborder ces effets toxiques, il est essentiel d'expliquer le processus de bioaccumulation de ces métaux dans les organismes marins, notamment chez les mollusques, qui représentent des bioindicateurs clés et une source importante de consommation humaine. De plus, ce chapitre explorera les risques sanitaires associés à l'accumulation de ces ETM dans les produits de la mer, en se concentrant sur les effets pour l'homme, notamment en termes de toxicité, de maladies et d'atteintes neurologiques.

L'objectif est de comprendre l'étendue du danger que représentent ces contaminants et de mieux cerner les implications écologiques et sanitaires.

2.1. Bioaccumulation des éléments traces métalliques (ETM) par les organismes marins

2.1.1. Définition et principes de l'évaluation des risques écotoxicologiques

L'évaluation du risque écotoxicologique est une discipline centrale de l'écotoxicologie qui examine la probabilité qu'un contaminant, d'origine naturelle ou anthropique, puisse causer des effets nuisibles sur les différentes composantes d'un écosystème. Ce risque dépend de deux facteurs clés : les caractéristiques intrinsèques du contaminant (ce qu'on appelle le danger) et l'exposition à ce contaminant (la concentration ou la dose). Les contaminants peuvent affecter la biodiversité et la chaîne alimentaire, avec des conséquences sur la santé des organismes, y compris des humains (**Caquet, 2012**).

Ce cadre d'analyse est essentiel pour comprendre les impacts des métaux lourds sur les écosystèmes marins, notamment par les phénomènes de bioaccumulation qui augmentent l'exposition des organismes à ces substances toxiques.

2.1.2. Bioaccumulation du cadmium (Cd)

Le cadmium (Cd) est un métal lourd toxique dont la présence dans les milieux marins résulte principalement des activités anthropiques. Il s'accumule préférentiellement chez les mollusques, en particulier les bivalves, qui constituent de bons bioindicateurs. Sur les côtes françaises, certaines huîtres et pétoncles dépassent les seuils réglementaires européens,

posant un risque pour la consommation humaine (**Miramand et al., 2000 ; Lemoine et al., 2008**).

En Algérie, une étude a montré une accumulation variable de Cd dans les moules (*Mytilusgalloprovincialis*) et (*Pernaspp.*), avec des concentrations plus élevées dans la glande digestive et les branchies. Les niveaux mesurés à **Sercouf** étaient plus importants que sur d'autres sites (**Abderrahmani et al., 2020**).

Dans les milieux polaires, les céphalopodes jouent un rôle clé dans le transfert du cadmium vers les mammifères marins supérieurs, comme les globicéphales noirs des îles Féroé, qui présentent des teneurs très élevées, suggérant des risques physiologiques malgré d'éventuels mécanismes de détoxification (**Lemoine et al., 2008**).

2.1.3. Bioaccumulation du plomb (Pb)

Le plomb (Pb) est un métal lourd non essentiel, considéré comme hautement toxique même à faible concentration. Il est principalement introduit dans les milieux marins par les rejets industriels, les eaux usées urbaines, l'abrasion de peintures au plomb, ainsi que par les activités portuaires (**Amiard et al., 2006 ; Fernandez et al., 2022**). Chez les organismes marins filtreurs comme les moules, le plomb peut s'accumuler dans les tissus mous à partir de l'eau de mer ou des particules en suspension.

Une étude récente menée sur les moules (*Perna viridis*) en Indonésie a démontré une accumulation significative de plomb dans les tissus de ces bivalves, indiquant leur potentiel en tant que bioindicateurs fiables de la pollution marine (**Sari et al., 2023**). D'autres travaux ont également mis en évidence la forte affinité du plomb pour les organes métaboliques des moules, notamment la glande digestive et les branchies, sites privilégiés de bioaccumulation (**Pytharopoulou et al., 2008**).

La bioaccumulation dépend fortement de la durée d'exposition, de la concentration du métal dans l'environnement, de la biodisponibilité du plomb, ainsi que des caractéristiques physiologiques et écologiques de l'espèce (**Rainbow, 2002 ; Romeo et al., 2000**). Ce métal provoque des altérations cellulaires, des perturbations enzymatiques — notamment par l'inhibition des enzymes antioxydantes comme la catalase et la superoxydedismutase — et, à long terme, des effets chroniques sur la croissance, la reproduction et le métabolisme général des organismes (**Viarengo&Nott, 1993 ; Pytharopoulou et al., 2008**). Les moules exposées

à des concentrations élevées de plomb peuvent également représenter un danger pour la santé humaine, en particulier lorsque les niveaux de contamination dépassent les limites admissibles fixées par les normes sanitaires européennes (EFSA, 2010). Cette contamination constitue un risque important dans les régions côtières soumises à une forte pression anthropique, comme les ports et les zones urbaines littorales.

2.1.4. Bioaccumulation du cuivre (Cu)

Le cuivre (Cu) est un oligo-élément essentiel à de nombreux processus biologiques, mais son excès peut devenir toxique pour les organismes aquatiques. Il est largement utilisé dans les antifouling marins, les pesticides, ainsi que dans de nombreuses industries, ce qui entraîne son rejet dans les milieux marins (Rainbow, 2002 ; Amiard et al., 2006). Une étude récente menée dans le lac de Faro (Messine, Sicile) a mis en évidence la présence de cuivre dans les moules (*Mytilus galloprovincialis*) ainsi que dans les palourdes (*Tapes decussatus*). Les résultats ont révélé une accumulation plus marquée du cuivre dans les tissus digestifs, reflétant une contamination chronique de l'environnement aquatique (Frontiers, 2024).

Bien que le cuivre soit nécessaire en faible quantité, son accumulation excessive affecte l'équilibre ionique des cellules, perturbe le métabolisme énergétique et inhibe des enzymes essentielles comme la Na^+/K^+ -ATPase, impliquée dans l'osmorégulation (Viarengo, 1989 ; Banni et al., 2011).

Chez les moules, le cuivre peut aussi interférer avec les processus de reproduction, entraînant une réduction de la fécondité et une altération du développement embryonnaire. Ainsi, la bioaccumulation de cuivre constitue un indicateur important non seulement de la pollution marine, mais aussi du risque écotoxicologique pour les chaînes trophiques supérieures, y compris l'homme.

2.1.5. Bioaccumulation du nickel (Ni)

Le nickel (Ni) est un métal de transition naturellement présent dans l'environnement, mais dont la concentration peut être fortement augmentée par les activités anthropiques, notamment les usines métallurgiques, les raffineries, les incinérateurs et les rejets de déchets industriels (Duis & Coors, 2016 ; Amiard et al., 2006). Bien qu'il soit considéré comme un oligo-élément à faibles doses, le nickel devient toxique à des concentrations plus élevées.

Une étude menée sur (*Mytilus galloprovincialis*) a montré une accumulation significative de nickel dans les tissus mous des moules exposées à un mélange d'éléments traces métalliques (ETM), avec des concentrations variant selon les saisons et les sites de collecte (**Boudjema et al., 2021**). Le nickel est particulièrement absorbé au niveau des branchies et de la glande digestive, où il peut interférer avec les processus enzymatiques, induire un stress oxydatif, perturber l'équilibre cellulaire et provoquer des dommages à l'ADN (**Viarengo&Nott, 1993 ; Romeo et al., 2000**).

Cette bioaccumulation est influencée par plusieurs facteurs environnementaux tels que la salinité, la température, le pH de l'eau ou la présence simultanée d'autres métaux. Des interactions synergiques ou antagonistes peuvent accentuer ou atténuer la toxicité du nickel dans les écosystèmes aquatiques. Comme pour d'autres métaux lourds, la consommation de moules contaminées au nickel représente un risque potentiel pour la santé humaine, notamment en cas d'exposition chronique.

2.2. Effets toxiques des éléments traces métalliques (ETM) sur les organismes marins et l'homme

2.2.1. Effets du cadmium (Cd)

2.2.1.1. Sur les organismes marins

Le cadmium est un métal lourd particulièrement toxique pour les organismes marins tels que les mollusques, crustacés et poissons. Il s'accumule dans les tissus via la chaîne alimentaire, entraînant divers effets physiologiques néfastes (**Amiard-Triquet et al., 2006 ; Rainbow, 2002**).

Par exemple, (**Mehouel et al, 2022**) rapportent que dans les moules et autres bivalves de la Méditerranée algérienne, la bioaccumulation de cadmium peut perturber les fonctions métaboliques, affecter la croissance, la reproduction et provoquer un stress oxydatif important.

Ces effets sont aggravés par l'interaction du Cd avec des enzymes clés et ses interférences avec les mécanismes cellulaires, entraînant des dommages tissulaires et une mortalité accrue (**Viarengo, 1989**).

2.2.1.2. Sur la santé humaine

Chez l'homme, le cadmium agit comme un toxique systémique aux effets multiples. Classé cancérigène de groupe I par le CIRC, il provoque des dommages au niveau rénal, osseux et pulmonaire (**Verger & Petit, 2009**). Son mécanisme toxique repose notamment sur son affinité pour les ligands biologiques et sa capacité à remplacer le zinc dans les enzymes, ce qui perturbe leurs fonctions. Il peut également provoquer des altérations génétiques, perturbant la structure de l'ADN et entraînant des mutations pouvant affecter la spermatogenèse (**Verger & Petit, 2009**). La longue demi-vie du cadmium dans l'organisme humain (20 à 30 ans) favorise les intoxications chroniques, même à faibles doses. Selon le comité JEFCA, la dose journalière admissible (DJA) est fixée à 1 $\mu\text{g/kg}$ de poids corporel. (**Mehouel et al, 2022**) soulignent que la consommation régulière de produits marins contaminés peut être une source non négligeable d'exposition au cadmium, justifiant une surveillance continue des concentrations dans les produits de la mer.

2.2.2. Effets du plomb (Pb)

2.2.2.1. Sur les organismes marins

Le plomb est un polluant métallique majeur, dont la toxicité varie selon l'espèce marine et le stade de développement. Les mollusques bivalves, comme *Mytilus edulis*, sont capables d'accumuler le plomb dans leurs tissus avec un facteur de concentration important (**Vincent et al., 1965**). (**Mehouel et al, 2022**) indiquent que le plomb peut affecter la physiologie des mollusques en perturbant la respiration, la croissance et la reproduction, et induire des dommages oxydatifs. Chez les crustacés, le plomb interfère avec le cycle de mue, entraînant des anomalies développementales. Des seuils de toxicité proches de 16 mg/L ont été identifiés pour certaines espèces, mais des effets sublétaux surviennent à des concentrations bien plus faibles, ce qui souligne la vulnérabilité des organismes marins au plomb même à faible exposition (**Aubert et al., 1975**). Les travaux expérimentaux confirment que des concentrations inférieures à 1 mg/L peuvent perturber le métabolisme des mollusques, avec des conséquences sur leur survie et leur capacité de reproduction (**Ramade, 1977**).

2.2.2. Sur la santé humaine

Chez l'homme, le plomb est un métal neurotoxique aux effets biologiques multiples. Il perturbe notamment la synthèse de l'hémoglobine en inhibant l'enzyme δ -aminolévuliniquedéshydratase (ALA-D), ce qui entraîne une accumulation d'acide δ -aminolévulinique (ALA) dans l'urine et une diminution de la concentration sanguine d'hémoglobine (**Thibaud, 1987**). (**Mehouel et al, 2022**) rappellent que cette inhibition enzymatique se traduit par une anémie fonctionnelle et d'autres troubles hématologiques. Par ailleurs, le plomb affecte le système nerveux central, induisant des troubles cognitifs, des altérations du comportement et une diminution des capacités intellectuelles, en particulier chez les enfants. Des effets toxiques rénaux, cardiovasculaires et reproductifs ont aussi été documentés. Contrairement à d'autres métaux lourds, il n'existe pas de seuil d'exposition sans risque pour le plomb, ce qui impose une vigilance accrue vis-à-vis de son accumulation dans la chaîne alimentaire marine.

2.2.3. Effets du cuivre (Cu)

2.2.3.1. Sur les organismes marins

Le cuivre est un oligo-élément indispensable pour les êtres vivants marins, mais il devient toxique à des concentrations élevées. Chez plusieurs espèces marines, notamment les polychètes comme *Arenicola marina*, l'augmentation de la concentration en ions Cu^{2+} due à l'acidification des océans accroît significativement la toxicité du cuivre. Cela impacte notamment les stades précoces de développement, réduisant la survie et la croissance larvaire (**Lewis et al., 2015**).

Chez les microalgues marines, une exposition au cuivre induit des altérations physiologiques notables, telles qu'une accumulation d'acides aminés libres et de composés phénoliques, traduisant un stress oxydatif important. Ce stress affecte la photosynthèse et perturbe le métabolisme cellulaire, compromettant ainsi la productivité primaire dans les écosystèmes marins (**Chen et al., 2023**).

2.2.3.2. Sur la santé humaine

Chez l'être humain, une exposition chronique au cuivre peut entraîner des troubles hépatiques, rénaux et neurologiques. La maladie de Wilson, qui résulte d'une accumulation excessive de cuivre due à un défaut génétique du métabolisme hépatique, illustre bien les effets toxiques de ce métal. Les patients développent une cirrhose du foie, des troubles

psychomoteurs et parfois une atteinte cérébrale sévère (**Scheiber et al., 2020**). Par ailleurs, une ingestion aiguë de cuivre peut entraîner des troubles gastro-intestinaux, tels que des nausées, des vomissements et des douleurs abdominales, bien que ce type d'intoxication reste rare via la consommation de produits de la mer (**ATSDR, 2004**).

2.2.4. Effets du nickel (Ni)

2.2.4.1. Sur les organismes marins

Le nickel est un métal présent naturellement dans les océans, mais il devient problématique en cas de concentrations élevées, notamment en milieu tropical. Une étude menée sur un gastéropode et deux crustacés marins tropicaux a démontré que le nickel inhibe significativement la croissance et la métamorphose, dès des concentrations de 64 à 67 µg/L. Parmi les espèces étudiées, le copépode *Acartiasinjiensis* s'est révélé particulièrement sensible (**Chariton et al., 2018**).

De plus, l'exposition au nickel entraîne une diminution de l'abondance cellulaire et de la capacité photosynthétique chez des microalgues telles que *Phaeodactylumtricornutum*, avec une concentration efficace médiane (EC_{50}) estimée à 2,48 mg/L (**Zhou et al., 2022**). Cette toxicité pourrait entraîner des déséquilibres majeurs dans la base de la chaîne alimentaire marine.

2.2.4.2. Sur la santé humaine

Sur le plan sanitaire, le nickel est reconnu pour ses effets allergènes, notamment sous forme de dermatite de contact, affectant une proportion importante de la population exposée. Par ailleurs, une exposition chronique, en particulier par inhalation dans les environnements industriels, est associée à un risque accru de cancer des voies respiratoires. Le nickel est classé comme cancérogène possible pour l'homme par le CIRC (groupe 2B), en raison de sa capacité à générer un stress oxydatif et à interférer avec la régulation génétique cellulaire (**Scheiber et al., 2020**).

Chapitre 3 : Présentation du matériel biologique (*Mytilus galloprovincialis*)

3.1. Définition

La classification des mollusques repose principalement sur des critères anatomiques permettant de différencier les grands axes taxonomiques, tout en prenant en compte leur répartition géographique. Bien que ces organismes affichent une grande diversité, ils partagent certaines similitudes anatomiques remarquables (**Rouane-Hacene, 2013**).

Le groupe des lamellibranches, également appelés bivalves, constitue la catégorie la plus significative de mollusques consommables. Ce groupe inclut notamment les huîtres, les moules et divers coquillages fouisseurs qui, dans leur milieu naturel, se regroupent en « bancs » ou « gisements ». Exclusivement aquatiques, les lamellibranches sont majoritairement marins et comptent environ 15 000 espèces (**Lupo et al., 2021**). Leur classification s'appuie sur les caractéristiques de la coquille, la structure de la charnière, les sutures palléales ainsi que les particularités des branchies, notamment leurs structures internes (**Guendouz, 2019**).

Le genre (*Mytilus*), appartenant à la famille des Mytilidés (Pélecypodes), se distingue par la morphologie de sa coquille, et plus précisément par son embout situé en position terminale. (**Lubet, 1959**). L'espèce (*Mytilus galloprovincialis*), communément appelée moule méditerranéenne (**Lubet, 1959**), est un mollusque bivalve de type filibranche (mésobranchies). Ses branchies possèdent des jonctions interfilamentaires et interpapillaires simples. Son système nerveux est de type anisomyaire et elle ne présente qu'une seule suture palléale, correspondant à l'orifice exhalant (**Beaumont & Cassier, 2004**). La taille de la coquille de cette espèce varie généralement entre 2 et 10 cm (**Le Gall, 1970 ; Weinberg, 1993**). La classification scientifique de (*Mytilus galloprovincialis*) (**Lmk, 1816**), établie selon (**Lubet, 1973**) se présente ainsi :

Systematique :

- **Règne** : Animalia
- **Sous-règne** : Métazoaires
- **Phylum** : Mollusca
- **Classe** : Lamellibranches (ou Bivalvia)
- **Sous-classe** : Pteriomorphes
- **Ordre** : Filibranchia
- **Superfamille** : Mytiloidea

- **Famille** : Mytilidae
- **Genre** : *Mytilus*
- **Espèce** : *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1816)

3.2. Morphologie externe de (*Mytilus galloprovincialis*)

La moule (*Mytilus galloprovincialis*) possède une coquille allongée dont la forme varie considérablement, allant d'un contour triangulaire à subquadrangulaire (Dellali, 2001).

La coquille présente une extrémité antérieure renflée et pointue, avec un bord ventral arrondi et comprimé. Les crochets terminaux sont fins, incurvés et bien marqués. À l'arrière, la partie dorsale forme une extension plate mettant en relief le bord ligamentaire. Le bord antérieur est réduit et prend la forme d'une lunule. On y observe des stries de croissance nettes. Le périostracum, l'enveloppe externe de la coquille, est lisse et bien adhérente. Sous le ligament, une bande calcifiée ponctuée est visible, et la charnière possède quelques dents fines sous les crochets (Lubet, 1973 ; Rouane-Hacene, 2013 ; Guendouzi, 2019).

La coloration externe de (*Mytilus galloprovincialis*) est généralement noire violacée, tandis que l'intérieur varie du gris bleuté au violacé, avec des reflets nacrés blanchâtres près de la cavité umbonale (Fischer, 1987). Concernant sa taille, elle peut dépasser les 15 cm dans des conditions optimales, bien que la taille habituelle se situe entre 5 et 8 cm (Fischer, 1987).

3.2.1. Coquille

La coquille de (*Mytilus galloprovincialis*) est sécrétée par la face extérieure et le bord libre du manteau. Elle se compose de trois couches distinctes, allant de l'extérieur vers l'intérieur :

- **Le périostracum** : une fine membrane organique colorée, reliée au manteau et sécrétée par des cellules glandulaires spécialisées.
- **La couche prismatique** : constituée de prismes verticaux de carbonate de calcium (calcite) enveloppés dans une matrice protéique de conchyoline.
- **La nacre** : une structure feuilletée formée de cristaux d'aragonite, qui produit des reflets nacrés caractéristiques en raison des décalages de phases lumineuses.

La croissance de la coquille est continue et, dans des conditions normales, elle présente des stries d'accroissement concentriques visibles en toutes saisons (Rouane-Hacene, 2013). Ces

stries sont parallèles aux bords libres des valves et reflètent le déplacement du manteau au fil du temps (**Beaumont & Cassier, 2004**). Cependant, des perturbations externes (température, disponibilité alimentaire) ou internes (reproduction) peuvent provoquer un arrêt temporaire de la croissance, visible sous forme de discontinuités dans la coquille (**Gagnaire, 2005**).

Les deux valves, reliées par un ligament élastique dorsal composé principalement de conchyoline sécrétée par le manteau, peuvent s'ouvrir ou se fermer. Un ou deux muscles adducteurs assurent cette fonction. Grâce à leur élasticité et leur position intercalaire, ces muscles permettent l'écartement des valves (**Beaumont & Cassier, 2004**). L'articulation des valves repose sur les charnières antérieure et dorsale. Celles-ci fonctionnent par un système d'engrenage, où les dents d'une valve s'insèrent dans les fossettes de l'autre, assurant ainsi une fermeture solide et précise (**Beaumont & Cassier, 2004**).

3.2.2. Le manteau

Chez (*Mytilus galloprovincialis*), le manteau joue un rôle fondamental dans plusieurs fonctions vitales. Fixé au niveau dorsal et latéro-dorsal, il s'élargit à la base des branchies pour former deux lobes délimitant la cavité palléale (**Gagnaire, 2005**). Il entoure les principaux organes internes comme la masse viscérale, les branchies et le muscle adducteur.

Il assure notamment :

- La **sécrétion de la coquille** via des cellules spécialisées ;
- Une **fonction sensorielle**, grâce à des terminaisons nerveuses et des structures comme les ocelles et les osphradies ;
- Un **tri initial des particules alimentaires**, facilitant la nutrition ;
- Le **stockage de réserves énergétiques** (lipides, glycogène) ;
- Une **contribution à la respiration**, par les échanges gazeux au niveau de la cavité palléale ;
- La **libération des gamètes** dans le milieu marin lors de la reproduction ;
- Et une **protection contre les agressions**, grâce à la sécrétion de mucus agissant comme barrière (**Gagnaire, 2005**).

Ainsi, le manteau assure à la fois la protection, la croissance et l'adaptation de la moule à son environnement. (**Gagnaire, 2005**).

3.2.3. Le byssus

La moule (*Mytilusgalloprovincialis*) se fixe aux rochers grâce au byssus. Ce dernier est un bouquet de filaments analogues à la soie, sécrétés par une glande appelée « glande byssogène » située à la base du pied. Ces filaments protéiques, de couleur brun coriace (**Weinberg, 1993**), forment un faisceau qui durcit au contact de l'eau et adhère au substrat par une extrémité élargie en lentille (**Beaumont & Cassier, 2004**). Le byssus permet ainsi une fixation temporaire ou définitive des bivalves non fouisseurs (**Rouane-Hacene, 2013**).

3.2.4. Le pied

Le pied de (*Mytilusgalloprovincialis*), situé en avant de la masse viscérale, est comprimé latéralement et prend l'aspect d'un sac en forme de « soc de charrue ». Il est animé par des muscles protracteurs et rétracteurs, pairs, antérieurs et postérieurs, qui s'insèrent symétriquement sur la face interne des valves de la coquille, devant les muscles adducteurs.

Bien que les déplacements de la moule soient lents, le pied joue un rôle important dans sa mobilité. La moule s'aide du byssus et de son pied pour se mouvoir : elle tire sur les filaments du byssus tout en en brisant certains grâce à l'action du pied, au fur et à mesure que de nouveaux filaments se forment (**Beaumont, 2004 ; Rouane-Hacene, 2013**). La **figure n°4** illustre son anatomie

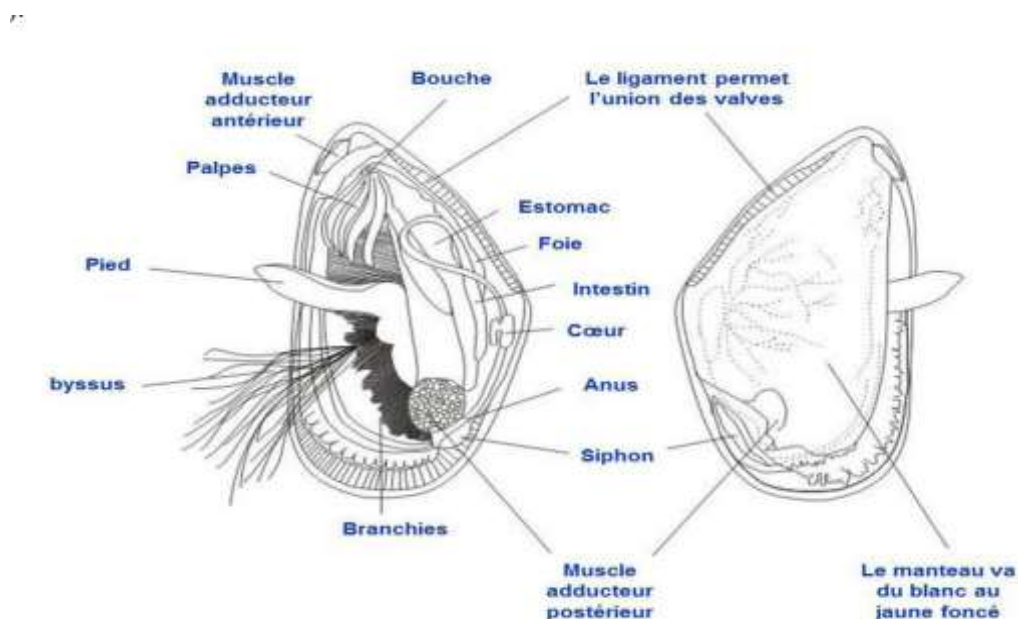


Figure n°4: Anatomie de la moule (*Mytilusgalloprovincialis*) (**Bachelot, 2010**).

3.3. Physiologie

3.3.1. Nutrition

(*Mytilusgalloprovincialis*) est un mollusque filtreur omnivore, consommant principalement du phytoplancton, des diatomées benthiques et des matières organiques en suspension. Fixée à un support, la moule se nourrit passivement en filtrant l'eau à travers ses branchies, capturant les particules alimentaires de plus de 2 à 5 μm . Son alimentation dépend donc fortement des courants marins. Son débit de filtration est élevé, atteignant jusqu'à 70 litres par jour. Les particules retenues sont ensuite dirigées vers la bouche grâce aux palpes labiaux (**Kantin et Pergent-Martini, 2007**).

3.3.2. Respiration

Chez les moules, comme c'est illustré dans la **figure n°5** la respiration s'effectue par les branchies, organisées en deux lames de chaque côté du corps. Deux siphons situés à l'arrière assurent l'entrée de l'eau pour l'oxygénation et son expulsion après filtration. Lorsqu'elles sont exposées à l'air, les moules ferment leur coquille pour éviter la déshydratation, mais l'ouvrent légèrement en milieu aquatique pour permettre la circulation de l'eau. Le mouvement continu des cils sur les branchies crée un flux d'eau, facilitant l'absorption de l'oxygène dissous. (**Kantin et Pergent-Martini, 2007**).

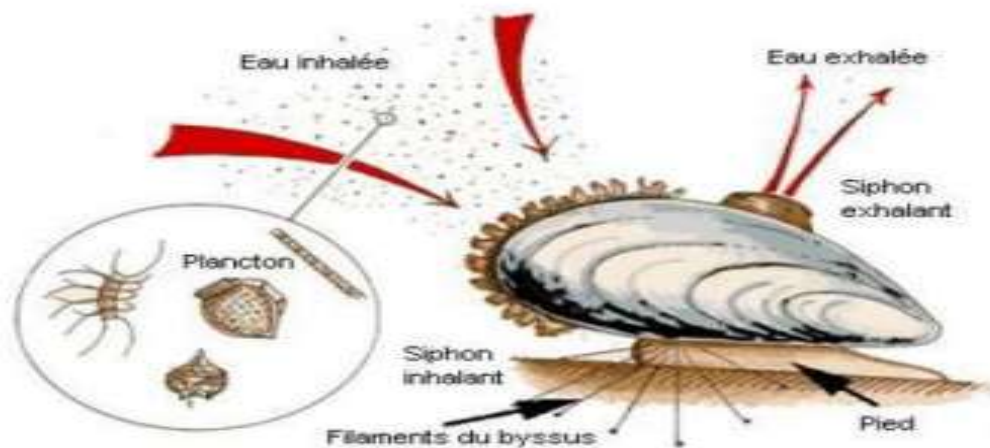


Figure n°5 : Système respiratoire chez la moule (MPO, 2003)

3.3.3. Reproduction

(*Mytilus galloprovincialis*) est une espèce à sexes distincts (gonochorique) dont la reproduction a lieu au printemps, lorsque la température de l'eau augmente. Les lobes du manteau prennent une couleur orangée chez les femelles et blanchâtre chez les mâles. La fécondation est externe : ovules et spermatozoïdes sont libérés dans l'eau, où la rencontre aboutit à la formation d'embryons qui deviennent rapidement des larves. La coquille commence à se former après quelques jours, un processus qui dure environ un mois. Les jeunes moules, appelées naissains, s'attachent au substrat et entre elles grâce au byssus, un faisceau de filaments sécrétés. Cependant, une part importante des naissains est perdue, à cause des conditions climatiques, de la prédation ou du manque de support pour la fixation. (Guendouzi, 2015).

Le **Tableau n°3** ci-dessous illustre les différentes étapes du cycle de reproduction chez (*M. galloprovincialis*).

Tableau n° 3 : Cycle de reproduction chez la moule (*M.galloprovincialis*)

Cycles de reproduction	
Stade	Phase
Stade 0	Le stade de repos
Stade 1	La gamétogenèse
Stade 2	Les gamètes sont visibles
Stade 3a	Les gamètes sont mures
Stade 3b	Début de ponte

3.4. Habitat

La moule (*Mytilus galloprovincialis*) colonise une grande variété de fonds, qu'ils soient durs (rocheux ou graveleux) ou meubles (sableux, vaseux). Elle se fixe grâce à son byssus sur des substrats situés dans les étages médiolittoral et infralittoral. Dans les zones de marée, cette espèce peut former de vastes bancs, couvrant ainsi de larges espaces. Elle est également capable de pénétrer dans les eaux saumâtres des lagunes côtières (Guendouzi, 2015).

3.5. Adaptation aux facteurs écologiques

La coquille solide de (*Mytilusgalloprovincialis*) assure sa protection contre l'environnement extérieur. Pour résister à la force des vagues, les moules se regroupent en colonies et s'attachent fermement au substrat. Lors des marées basses, elles ferment hermétiquement leurs valves afin de retenir l'eau, ce qui les préserve du dessèchement, de l'exposition à l'air, à la lumière et aux prédateurs. En cas de déficit en oxygène, elles peuvent recourir temporairement à une respiration anaérobie. Leur capacité à tolérer des variations de température et de salinité leur permet de vivre dans les zones supérieures de l'estran. (Guendouzi, 2015).

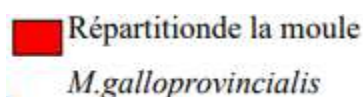
3.6. Distribution géographique

(*Mytilusgalloprovincialis*) est principalement présent dans les zones méditerranéennes. Cependant, son aire de répartition s'étend bien au-delà. On le retrouve en mer Noire, en Adriatique, ainsi que le long des côtes atlantiques, depuis la baie d'Agadir jusqu'aux îles britanniques. Il est également présent en Afrique du Sud, en Nouvelle-Zélande et en Californie (Bhaby et al., 2011).

La **figure n°6** ci-dessous illustre la répartition géographique mondiale de (*M. galloprovincialis*) (Bhaby et al., 2011).



Figure n° 6 : Répartition géographique mondiale de (*Mytilusgalloprovincialis*). (Bhaby et al., 2011)



3.7. Pêche et consommation

La moule (*Mytilusgalloprovincialis*) subit une exploitation intense, provenant à la fois des bancs naturels et de l'aquaculture (mytiliculture). La récolte se fait par divers moyens : chaluts de fond, dragues, râteaux ou encore à la main (**Guendouzi, 2019**). En aquaculture, elle est cultivée sur des cordes suspendues à des parcs fixes ou à des bouées (**Guendouzi, 2019**).

Cette espèce est fréquemment présente sur les marchés, commercialisée sous différentes formes : fraîche, réfrigérée, congelée, en conserve ou même utilisée comme appât de pêche (**Fischer, 1987**).

(*Mytilusgalloprovincialis*) est principalement cultivée dans les eaux côtières, s'étendant de la Galicie (Nord-Ouest de l'Espagne) jusqu'à la côte Nord méditerranéenne. La production a aussi été rapportée dans les pays du sud de la Méditerranée, en Russie, en Ukraine, en Afrique du Sud, et en Chine (**Valerio & Michael, 2009**).

Les statistiques de la FAO montrent que la production mondiale de (*M. galloprovincialis*) était relativement faible avant les années 1980 (< 50 000 tonnes). Elle a progressivement augmenté, atteignant un pic d'environ 200 000 tonnes dans les années 2000. Toutefois, cette production a récemment diminué, se stabilisant autour de 120 000 tonnes (**Valerio & Michael, 2009**).

3.8. Choix des moules comme bio-indicateur

Dans le cadre de l'évaluation continue de la qualité des eaux marines, les analyses physico-chimiques jouent un rôle clé en renseignant sur la présence, la nature et la concentration des polluants. Cependant, pour une vision plus intégrée de la contamination, l'étude des organismes aquatiques, en interaction permanente avec leur environnement, s'impose. Le recours aux bio-indicateurs devient ainsi essentiel pour détecter les variations écologiques et mesurer l'exposition à certains contaminants, qu'elles se traduisent par des réponses physiologiques, biochimiques ou comportementales (**Pichaud, 2005**).

Ces bio-indicateurs révèlent des informations précieuses à travers l'analyse de leur contenu chimique, leur structure cellulaire, leurs adaptations métaboliques, leurs comportements ou encore les dynamiques de leurs populations (**Morin, 2007**).

Chapitre 3 : Présentation du matériel biologique (*Mytilusgalloprovincialis*)

Parmi les bio-indicateurs les plus efficaces, les mollusques bivalves — en particulier les moules — occupent une place de choix dans les programmes de surveillance de l'environnement marin (Bélanger, 2009).

D'après Stellio (2005), plusieurs critères font de (*Mytilusgalloprovincialis*) une espèce particulièrement adaptée à cette mission :

- **Capacité de bioaccumulation** : (*M. galloprovincialis*) peut concentrer les métaux dans ses tissus, avec des facteurs de bioaccumulation allant de 10^3 à 10^5 .
- **Espèce intégratrice** : Grâce à sa longévité, cette moule permet un suivi des pollutions sur le long terme.
- **Représentativité écologique** : Espèce sessile (*M. galloprovincialis*) reste ancrée à son habitat, ce qui en fait un reflet fidèle de la qualité locale des eaux. Sa large distribution géographique et sa résistance au stress environnemental lui permettent de prospérer même dans les zones fortement polluées. Elle est également euryhaline, tolérant différentes salinités.
- **Praticité pour la bio surveillance** : L'abondance et la taille adéquate de cette espèce facilitent la collecte et l'analyse des échantillons.
- **Lien avec la santé humaine** : En tant qu'espèce consommée par l'homme, elle constitue un vecteur de transfert potentiel des polluants, renforçant son importance dans l'évaluation des risques sanitaires.

Partie expérimentale

4.1. Matériels et Méthodes

Dans le cadre de ce travail, une approche méthodologique rigoureuse a été adoptée afin de répondre aux objectifs de l'étude. Cette section présente les différents matériels utilisés ainsi que les méthodes mises en œuvre pour le choix de l'espèce étudiée, les protocoles d'échantillonnage, les analyses effectuées et les outils employés pour l'interprétation des résultats. L'ensemble de la démarche vise à assurer la fiabilité et la reproductibilité des données obtenues.

4.1.1. Matériels

4.1.1.1. L'espèce étudiée

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi comme espèce la moule sauvage marine (*Mytilus galloprovincialis*) (**Voir la figure n°7**). Les moules sont des organismes bio-indicateurs de la pollution marine en raison de leurs caractéristiques biologiques et écologiques favorables au suivi de la qualité du milieu marin. Ces bivalves filtrent continuellement de grandes quantités d'eau, ce qui les rend particulièrement sensibles à la présence de contaminants tels que les ETM, les hydrocarbures ou encore les composés organiques persistants. Leur mode de vie fixé, leur large répartition le long des littoraux, ainsi que leur facilité d'échantillonnage font des moules un excellent modèle pour l'évaluation de la pollution côtière.

Plusieurs travaux ont mis en évidence l'intérêt de l'utilisation des moules dans les réseaux de biosurveillance marine ; **Goldberg (1975)** fut l'un des premiers à proposer l'usage de ces bivalves dans le cadre du programme « Mussel Watch », destiné à surveiller la contamination chimique des zones littorales. Cette approche a depuis été largement reprise dans de nombreux pays, notamment en France par l'IFREMER dans le cadre de ses réseaux de surveillance comme le Réseau d'Observation de la Contamination Chimique (ROCCH) (**Amiard-Triquet et al., 2013**).

Ainsi, leur aptitude à accumuler les polluants sans pour autant développer de mécanismes de détoxification rapides en fait des sentinelles efficaces pour détecter la présence de substances toxiques dans l'environnement marin.



Figure n°7 : La moule étudiée (*Mytilus galloprovincialis*) (Photo originale ; taille réelle)

4.1.1.2. Éléments traces analysés

Cette étude est axée sur l'analyse de certains éléments traces métalliques (ETM) reconnus pour leur toxicité élevée et leur impact environnemental important. Les ETM étudiés sont le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le cuivre (Cu) et le nickel (Ni). Ces éléments ont été sélectionnés en raison de leur capacité à persister dans les milieux aquatiques, à se bioaccumuler dans les tissus des organismes marins, et à engendrer des effets écotoxicologiques et sanitaires dévastateurs.

L'évaluation de la contamination des organismes marins par ces éléments permet de mieux comprendre leur distribution dans l'environnement marin, leurs voies d'accumulation dans les tissus biologiques, ainsi que les risques qu'ils représentent pour les écosystèmes et la santé publique.

4.1.1.3. Zones d'étude et sites d'échantillonnage

Afin d'illustrer spatialement les emplacements retenus pour l'échantillonnage; la **figure n°8** ci-après présente la localisation des cinq stations sur une carte de la région côtière de Béjaïa. Ces stations ont été choisies en fonction de leur exposition variable aux pressions anthropiques (activités industrielles, portuaires, touristiques et urbaines),

Ce qui permet une comparaison représentative des niveaux de contamination.

La carte a été réalisée à l'aide de l'outil Google MyMaps, à partir des coordonnées GPS relevées sur le terrain.

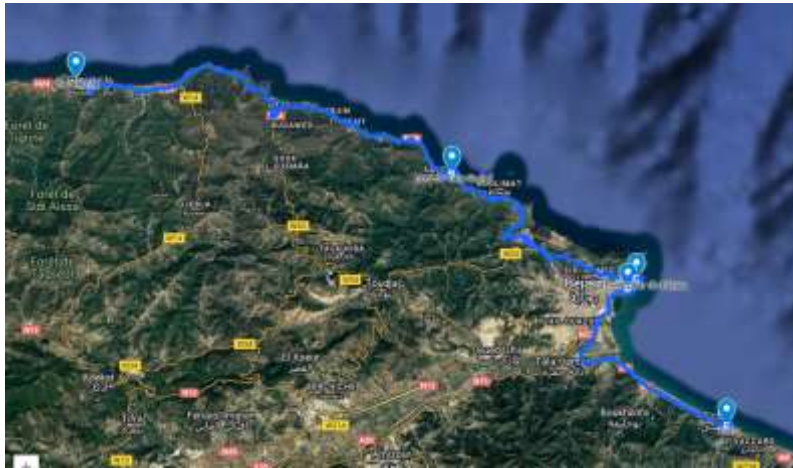


Figure n°8 : Cartographie des stations d'échantillonnage des moules dans la région de Béjaïa
(Photo originale ; échelle : 1 cm $\approx$ 5 km)

4.1.1.4. Description des stations d'échantillonnage

Station 1 – Port de Beni Ksila

- Localisation :** Commune de Beni Ksila, à l'ouest de Béjaïa
- Coordonnées GPS approximatives :** 36.8825° N, 4.6619° E
- Altitude :** Environ 3 à 5 m au-dessus du niveau de la mer

Cette station est implantée dans une zone de pêche artisanale relativement isolée, (**Figure n°9**). Elle se caractérise par un substrat littoral composé principalement de muscovite (36,11 %), quartz (33,33 %) et calcite (30,56 %), traduisant une origine magmatique, métamorphique et sédimentaire.

Bien que considérée comme une station de référence (faible impact direct), elle peut être influencée par les ruissellements agricoles et domestiques provenant des zones en amont. La proximité d'oueds augmente le risque d'introduction de résidus de pesticides ou de déchets organiques.



Figure n°9 : Photographie de la station 1 – Beni Ksila (Photo originale ; taille réelle)

Station 2 – Port de Thala-Guilef (région de Saket/Boulimat)

–**Localisation :** Côtes ouest de Béjaïa, entre les localités de Saket et Bolimat

–**Coordonnées GPS approximatives :** 36.7509° N, 5.0567° E

–**Altitude :** ~4 m

Ce petit port de pêche est implanté dans une zone semi-urbaine, entre forêt et littoral (**Figure n°10**). Le sol de cette station est constitué de quartz (52,17 %) et de dolomite (47,83 %), indiquant une double origine magmatique et sédimentaire.

Parmi les sources de pollution, on peut citer :

- Le rejet d’eaux usées domestiques non traitées
- Les résidus de pêche et huiles usagées
- La décharge de Boulimat à proximité, identifiée comme un foyer majeur de pollution diffuse en mer.



Figure n° 10 : Photographie de la station 2 – Port de Thala-Guilef (Photo originale, taille réelle)

Station 3 – Port de Béjaïa (centre-ville)

-Localisation : Ville de Béjaïa, port commercial principal

-Coordonnées GPS approximatives : 36.7559° N, 5.0843° E

-Altitude : 0–2 m

Le port de Béjaïa est une zone hautement industrialisée avec un trafic maritime dense. **(Voir la figure n°11)**. Le substrat est dominé par le quartz (54,16 %) et la calcite (45,84 %), d'origine magmatique et sédimentaire.

Les principales sources de pollution comprennent :

- Le rejet direct d'effluents industriels (CEVITAL, SONATRACH, etc.)
- Les eaux de ballast des navires
- La proximité immédiate de l'oued Soummam, qui draine des pollutions agricoles, urbaines et industrielles vers la mer
- L'absence de stations de traitement performantes aggrave la contamination



Figure n° 11 : Photographie de la Station 3 – Port de Béjaïa (centre-ville) (Photo originale ;
taille réelle)

Station 4 – Port pétrolier de Béjaïa

-Localisation : Zone industrielle, port pétrolier de Béjaïa

-Coordonnées GPS approximatives : 36.7510° N, 5.0590° E

-Altitude : 2–3 m

Cette station est adjacente aux infrastructures de SONATRACH et NAFTAL, spécialisées dans le transport et le stockage d'hydrocarbures, (**Figure n°12**).

La composition du sol montre la présence de quartz (33,89 %), calcite (17,97 %), alunite (15,38

%) et aluminium hydrogène sulfate (32,76 %) — ce qui révèle une altération chimique prononcée typique des zones industrialisées.

Pollutions spécifiques :

- Fuites de pétrole et d'hydrocarbures
- Absence de dispositifs de récupération ou de traitement des eaux usées industrielles
- Présence de produits toxiques dans les sédiments et les eaux portuaires



Figure n° 12 : Localisation du port pétrolier de Béjaïa, capturée depuis Google Maps
(emplacement : Sanhadji 06). Image datée de mai 2022.

Station 5 – Plage de Tichy

-Localisation : Commune de Tichy, zone balnéaire à l'est de Béjaïa

-Coordonnées GPS approximatives : 36.7365° N, 5.1157° E

-Altitude : ~3 m

Tichy est une zone touristique à forte fréquentation estivale, (**Figure n°13**). Le sol est constitué principalement de calcite (63,76 %) et de quartz (36,24 %), révélant une origine sédimentaire dominante.

Sources de pollution proches :

- Rejets d'eaux usées domestiques (absence d'assainissement efficace)
- Pollution liée au tourisme (déchets plastiques, hydrocarbures de bateaux de plaisance)
- Apports indirects de l'oued Soummam après ruissellements
- Influence des décharges sauvages (ex. : Tichy, Souk El Tenine)



Figure n°13 : Photographie de la station 5 – Plage de Tichy (Photo originale ; taille réelle)

4.1.1.5. Matériel de laboratoire

Cette étude a nécessité l'utilisation d'un matériel spécifique, réparti entre équipements de traitement des échantillons et instruments d'analyse. L'ensemble des outils a été rigoureusement nettoyé et manipulé dans des conditions assurant l'intégrité des échantillons.

4.1.1.5.1. Matériel de traitement des échantillons

Le traitement des moules, de la collecte jusqu'à la digestion acide, a nécessité le recours à plusieurs équipements de laboratoire essentiels pour assurer la qualité et la reproductibilité des résultats. Comme le montre la **figure n°14**

- **Four à moufle**
Utilisé pour la calcination des tissus biologiques à 375°C pendant 16 heures afin d'obtenir des cendres sèches et stables.
- **Plaque chauffante**
Employée lors de la digestion acide pour chauffer lentement les échantillons minéralisés.
- **Balance analytique de précision**
Utilisée pour peser précisément les cendres avant digestion.
- **Mortier et pilon en céramique**
Servent au broyage manuel des tissus mous des moules pour homogénéiser l'échantillon. Ils ont été nettoyés et désinfectés avant chaque utilisation.
- **Spatules en inox**
Utilisées pour le transfert des échantillons calcifiés.

- **Creusets en porcelaine**

Employés pour la calcination des échantillons.

- **Béchers en verre borosilicaté (100 mL)**

Utilisés pour le traitement acide des cendres.

- **Pipettes manuelles (100–1000 μ L et 1–5 mL)**

Utilisées pour les dosages des réactifs et la préparation des solutions.

- **Entonnoirs + filtres Whatman**

Employés pour la filtration des minéralisats.

- **Tubes en plastique gradués (50 mL)**

Utilisés pour la conservation des solutions d'essai avant analyse.



Figure n° 14 : Matériel de traitement utilisé pour la préparation et le traitement des échantillons
(Photo originale, taille réelle)

4.1.1.5.2. Matériel d'analyse

L'analyse des métaux traces a été réalisée grâce à un instrument de haute sensibilité ; le Spectrophotomètre d'Absorption Atomique (SAA) type PerkinElmer AS900 (**Voir la figure n°15**) permettant de quantifier précisément le Cd, le Pb, le Cu et le Ni.

Le spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA) est un instrument analytique permettant de détecter et de quantifier les éléments métalliques à l'état de traces dans divers types d'échantillons (eau, sol, tissus biologiques, etc.) (**Skoog, Holler et Crouch, 2017**).

Son principe de fonctionnement repose sur l'absorption de la lumière par des atomes libres en phase gazeuse. Lorsqu'un échantillon est introduit dans une flamme ou dans un four graphite, les éléments métalliques qu'il contient sont atomisés. Une lampe à cathode creuse, spécifique à l'élément à analyser, émet une lumière de longueur d'onde bien définie, qui traverse le nuage atomique formé. Les atomes libres absorbent cette lumière selon une intensité proportionnelle à leur concentration. L'absorbance est mesurée par un détecteur, et la concentration de l'élément est ensuite déterminée à l'aide d'une courbe d'étalonnage (**Skoog et al., 2017**).



Figure n°15 : Spectromètre d'absorption atomique (SAA) PerkinElmer AS900 utilisé pour l'analyse des métaux traces (Photo originale, taille réelle)

4.1.1.5.3. Autres petits matériels de laboratoire

- Ciseaux en inox, couteaux stériles
- Gants en latex ou nitrile (usage unique)
- Glacière rigide avec accumulateurs de froid
- Carnet de terrain (pour enregistrement des stations, coordonnées GPS, paramètres)
- Sacs de congélation en polyéthylène (étiquetés)

4.1.1.5.4. Réactifs utilisés

Tous les réactifs utilisés sont de **qualité analytique (PA)** pour garantir l'exactitude des résultats et éviter toute contamination comme illustré au **tableau n°4**

Tableau n°4 : Réactifs utilisés pour l'analyse des métaux dans les échantillons

Réactif	Concentration	Usage principal
Acide nitrique (HNO ₃)	65%	Digestion acide des cendres
Peroxyde d'hydrogène (H ₂ O ₂)	30%	Oxydation complémentaire
Eau distillée déminéralisée	Conductivité <5 μS/cm	Dilutions, nettoyage, compléments volumiques

4.2. Méthodes

4.2.1. Méthode d'échantillonnage des moules

La collecte des moules (*Mytilus galloprovincialis*) a été réalisée durant le mois de février 2025, le long du littoral de la wilaya de Béjaïa. Afin de garantir une représentativité spatiale de la pollution marine, les prélèvements ont été effectués dans cinq stations distinctes présentant différents niveaux d'anthropisation :

- **Port de Béjaïa** (zone portuaire commerciale)
- **Port pétrolier** (zone industrielle à forte activité pétrochimique)
- **Tichy** (zone touristique semi-urbaine)
- **Beni Ksila** (zone périurbaine à activité réduite)

- **Tala Guilef** (zone naturelle peu perturbée)

Au total, 5 échantillons ont été collectés, soit 1 échantillon par station, chacun constitué d'environ 200 g de moules adultes (taille ≥ 5 cm). Les moules ont été prélevées manuellement ou à l'aide de crochets en acier inoxydable, en fonction de l'accessibilité du site.

La collecte a été réalisée avec la collaboration de pêcheurs locaux et de plongeurs professionnels, particulièrement utile dans les zones profondes ou difficiles d'accès (notamment les ports). Leur participation a permis de cibler des substrats rocheux et artificiels propices au développement des moules comme illustré à la **figure n°16**.

Une fois récoltées, les moules ont été rincées à l'eau de mer sur place afin de retirer les particules en suspension. Chaque coquille a ensuite été nettoyée soigneusement à l'aide d'un couteau propre, pour éliminer les épibiontes (algues, débris, organismes fixés). Les échantillons ont ensuite été conditionnés dans des sacs de congélation en polyéthylène blancs, puis étiquetés avec

- Le nom de la station
- La date du prélèvement
- Le code de l'échantillon

Les coordonnées géographiques de chaque site ainsi que les observations environnementales (aspect de l'eau, activités humaines à proximité, météo) ont été notées dans un carnet de terrain.

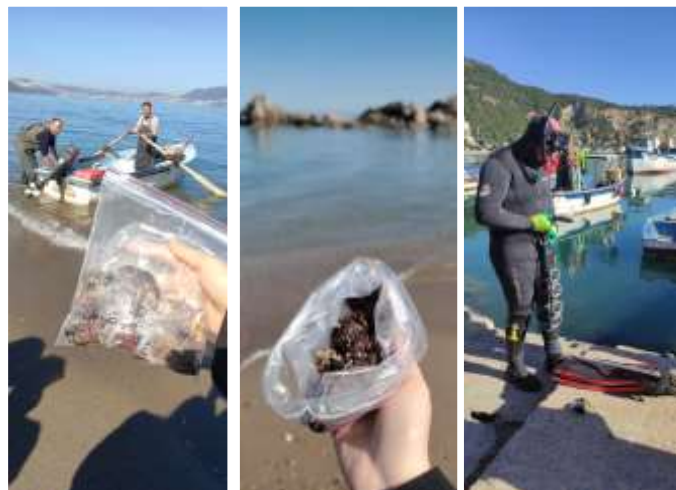


Figure n°16 : Echantillon de moule (*Mytilusgalloprovincialis*) fraîchement capturé (photo originale, taille réelle)

4.2.2. Conditionnement et transport des échantillons

Après le prélèvement, les moules ont été placées dans des sacs de congélation en polyéthylène étiquetés, puis immédiatement conservées dans une glacière rigide contenant des accumulateurs de froid. Ce système a permis de maintenir une température proche de 4°C pendant toute la durée du transport, afin de préserver la qualité biologique des échantillons. Les sacs n'étaient pas en contact direct avec les éléments réfrigérants, évitant ainsi tout risque de congélation accidentelle.

La glacière est restée hermétiquement fermée durant le transport, ce qui a permis de limiter les variations thermiques susceptibles d'altérer les tissus. À l'arrivée au laboratoire, les échantillons ont été transférés dans un réfrigérateur à 4°C, où ils ont été stockés jusqu'à leur dissection.

Des précautions strictes ont été respectées tout au long du processus, notamment l'usage de gants propres lors de la manipulation, la réduction du temps entre la collecte et le traitement, ainsi que la prévention des chocs thermiques. Ces mesures ont permis de garantir l'intégrité des échantillons en vue des analyses ultérieures.

4.2.3. Préparation des échantillons

À leur arrivée au **laboratoire du centre de recherche Physico-Chimique de Bejaia (CRAPC Bejaia)**, les moules ont d'abord été rincées abondamment à l'eau distillée afin d'éliminer les impuretés résiduelles, comme les particules de sable, les débris organiques et les sels minéraux issus du transport. Cette étape de nettoyage secondaire est essentielle pour éviter toute contamination externe lors des manipulations en laboratoire.

Lors de la préparation ; comme illustré à la **figure n°17**, chaque moule a été ouverte manuellement à l'aide d'un couteau propre en acier, en prenant soin de ne pas endommager les tissus internes. Une fois les coquilles ouvertes, la partie comestible (tissus mous) a été délicatement extraite à l'aide de la pince, sans distinction ni séparation des organes internes. Cette méthode a été choisie afin d'obtenir une vision globale de la bioaccumulation dans l'organisme entier, ce qui est pertinent dans une approche éco-toxicologique.

Les tissus extraits « les tissu mous » ont été immédiatement transférés dans un mortier manuel propre pour être traités sans délai. L'ensemble du contenu mou a été placé dans le mortier en vue d'un broyage manuel. Aucun stockage intermédiaire n'a été réalisé à cette étape pour éviter toute altération de la matière organique fraîche.

Ce protocole (**protocole standardisé du laboratoire CRAPC Béjaïa**) a été appliqué de manière identique pour tous les échantillons, garantissant ainsi une homogénéité de traitement et des conditions standardisées tout au long de la procédure.



Figure n°17 : Préparation des échantillons biologiques : ouverture manuelle des moules (Photo originale, taille réelle)

4.2.4. L'homogénéisation de la matrice prélevée

Avant de procéder à la minéralisation les échantillons (la matrice comestible des moules) ont été broyés manuellement à l'aide d'un mortier et d'un pilon en céramique, (**Voir la figure n°18**), tous les deux lavés et décontaminés avant l'utilisation. Cette étape a permis de transformer les tissus frais en une pâte homogène, facilitant les étapes ultérieures de traitement.

Le broyage a été réalisé avec soin, en portant des gants propres, afin d'éviter toute introduction de contaminants extérieurs. La texture pâteuse obtenue garantit une meilleure homogénéité des échantillons, ce qui est essentiel pour des analyses chimiques fiables.

Une fois le broyage est terminé, la pâte a été répartie dans des sacs de congélation en polyéthylène, (**Voir la figure n°19**) étiquetés avec les informations nécessaires : site de prélèvement, date et numéro de l'échantillon. Ces sacs ont été stockés dans un réfrigérateur à 4°C en attendant les traitements ultérieurs (calcination et digestion acide), afin de préserver la stabilité des tissus.



Figure n°18 : Homogénéisation des tissus de moules par broyage manuel (Photo originale, taille réelle)



Figure n°19 : Échantillons broyés de moules conditionnés dans des sacs de congélation (Photo originale)

4.2.5. Minéralisation sèche (calcination)

4.2.5.1. Calcination (dessiccation des échantillons)

Les échantillons réfrigérés ont ensuite été préparés pour la calcination (minéralisation sèche). Une quantité appropriée de la matrice homogénéisée a été versée dans de petits creusets en porcelaine propres et décontaminés, qui ont ensuite été placés dans un four à moufle à une température de 375 °C pendant 16 heures, jusqu'à l'obtention de cendres grises. Les produits de la calcination ont été pesés à l'aide d'une balance électronique de précision, afin

de contrôler la masse exacte de matière sèche à utiliser. Ce procédé permet d'éliminer totalement l'eau contenue dans les tissus sans dégrader les composants chimiques d'intérêt. À la fin du cycle, les échantillons ont été récupérés sous forme de cendres, sèches et stables.

La calcination est particulièrement adaptée aux analyses chimiques, car elle empêche les réactions enzymatiques ou bactériennes susceptibles d'altérer les résultats. **(Figure n°20)**

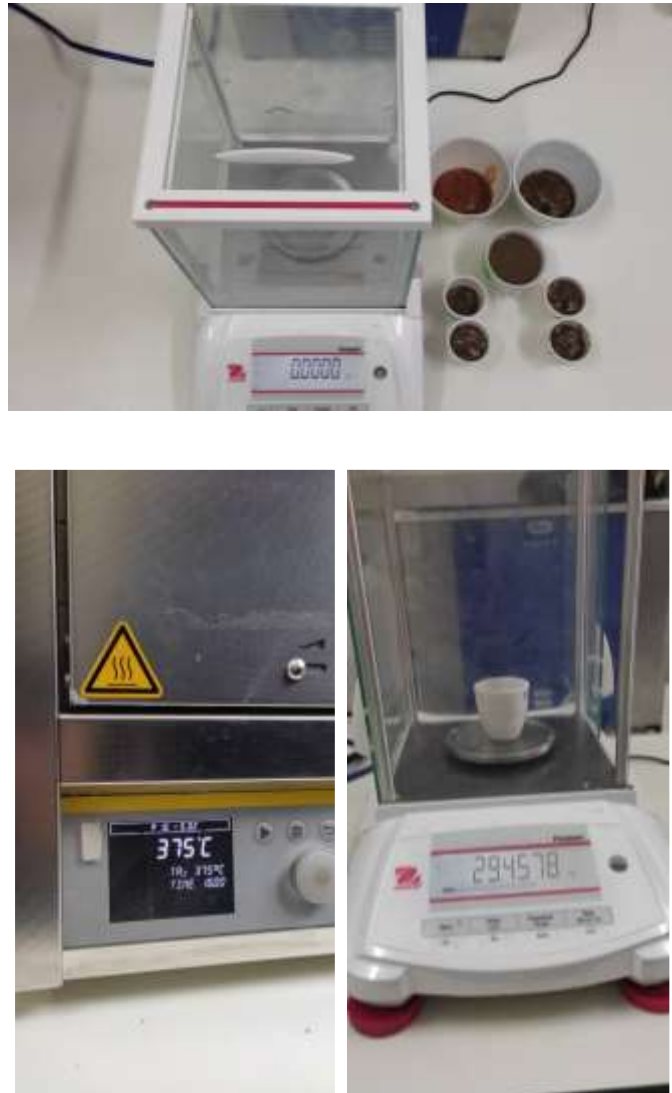


Figure n°20 : Étapes de calcination (dessiccation des échantillons) (Photo originale ; taille réelle)

4.2.5.2. Traitement acide des échantillons séchés (cendres)

Environ 1 g du produit de calcination (cendres) a été prélevé à l'aide d'une spatule propre et qui est introduit dans un bécher en verre préalablement lavé et désinfecté (**Voir la figure n°21**). Tout le matériel utilisé dans cette étape a été soigneusement nettoyé et stérilisé afin d'éviter toute contamination. Les cendres prélevées sont traitées avec 10 ml d'acide nitrique (HNO_3) concentré et 5 ml de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) pour élimination de toute matière organique. Les béchers ont été couverts et laissés pendant toute une nuit à température ambiante, pour permettre aux réactifs de digérer progressivement la matière organique.

Le lendemain, les échantillons ont été chauffés sur une plaque chauffante à une température comprise entre 80°C et 100°C , tout en remuant régulièrement les béchers. Au cours de cette phase, une évaporation de gaz jaunes (oxydes d'azote) a été observée, ainsi qu'une condensation de fines gouttelettes sur les parois internes des béchers comme le montre la **figure n°22**, signes typiques du bon déroulement de la digestion chimique.



Figure n°21 : Préparation des extraits pour analyse par SAA : digestion acide (Photo originale, taille réelle)

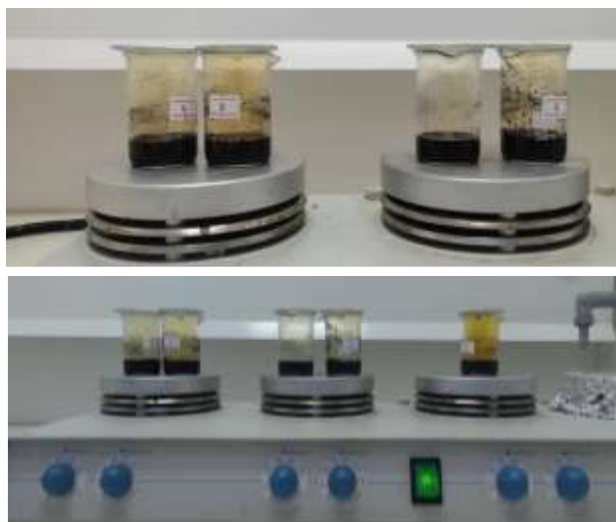


Figure n°22 : Digestion acide des échantillons biologiques (Photo originale, taille réelle)

4.2.6. Préparation des solutions d'essai

Après refroidissement complet, les échantillons digérés (minéralisés) ont été filtrés à l'aide de papier filtre (**Type Whatman**) inséré dans un entonnoir propre, fixé sur des béchers de réception. Cette filtration a permis de séparer les éventuels résidus solides restants du liquide contenant les métaux dissous.

La filtration a été réalisée lentement, sans agitation excessive, afin d'assurer une séparation optimale et d'éviter toute perte des minéraux. Le filtrat clair obtenu a ensuite été transféré dans des tubes en plastique gradués à l'aide de pipettes désinfectées.

Chaque échantillon a été complété jusqu'à un volume final de 50 ml avec de l'eau distillée à faible conductivité (environ 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les tubes ont été hermétiquement fermés, étiquetés (station, date, numéro d'échantillon) comme illustré à la **figure n°23**, puis conservés au réfrigérateur à 4°C jusqu'à l'analyse chimique.



Figure n°23 : Filtration par papier **Whatman** (Photo originale, taille réelle)

4.2.7. Analyse

L'analyse des échantillons a été réalisée afin de déterminer les concentrations de ETM(plomb, cadmium, cuivre et nickel) dans les tissus mous de (*Mytilusgalloprovincialis*) collectés au niveau des cinq stations du littoral de Béjaïa. La méthode utilisée repose sur la spectrométrie d'absorption atomique (SAA), qui permet une quantification précise des éléments métalliques à l'état de traces dans les matrices biologiques.

Avant l'analyse, des solutions étalons ont été préparées à partir de solutions mères certifiées pour chaque métal étudié. Ces solutions ont permis d'établir une courbe d'étalonnage indispensable pour la quantification des métaux dans les échantillons digérés.

4.2.7.1. Préparation des solutions étalons

Des solutions étalons ont été préparées à partir de solutions mères à 1000 mg/L pour chaque métal (Pb, Cd, Cu, Ni). Ces solutions mères, de qualité analytique certifiée, ont été diluées dans de l'eau ultra-pure (Milli-Q) afin d'obtenir une série de concentrations appropriées à la plage de détection de l'appareil.

Pour chaque métal, cinq à six concentrations croissantes ont été préparées afin d'établir une courbe d'étalonnage linéaire (**Voir la figure n°24**). Ces courbes ont été utilisées pour interpoler les concentrations des métaux présents dans les échantillons. Chaque solution étalon a été conservée dans des flacons en polypropylène, à l'abri de la lumière et à température ambiante, pour éviter toute contamination ou dégradation.

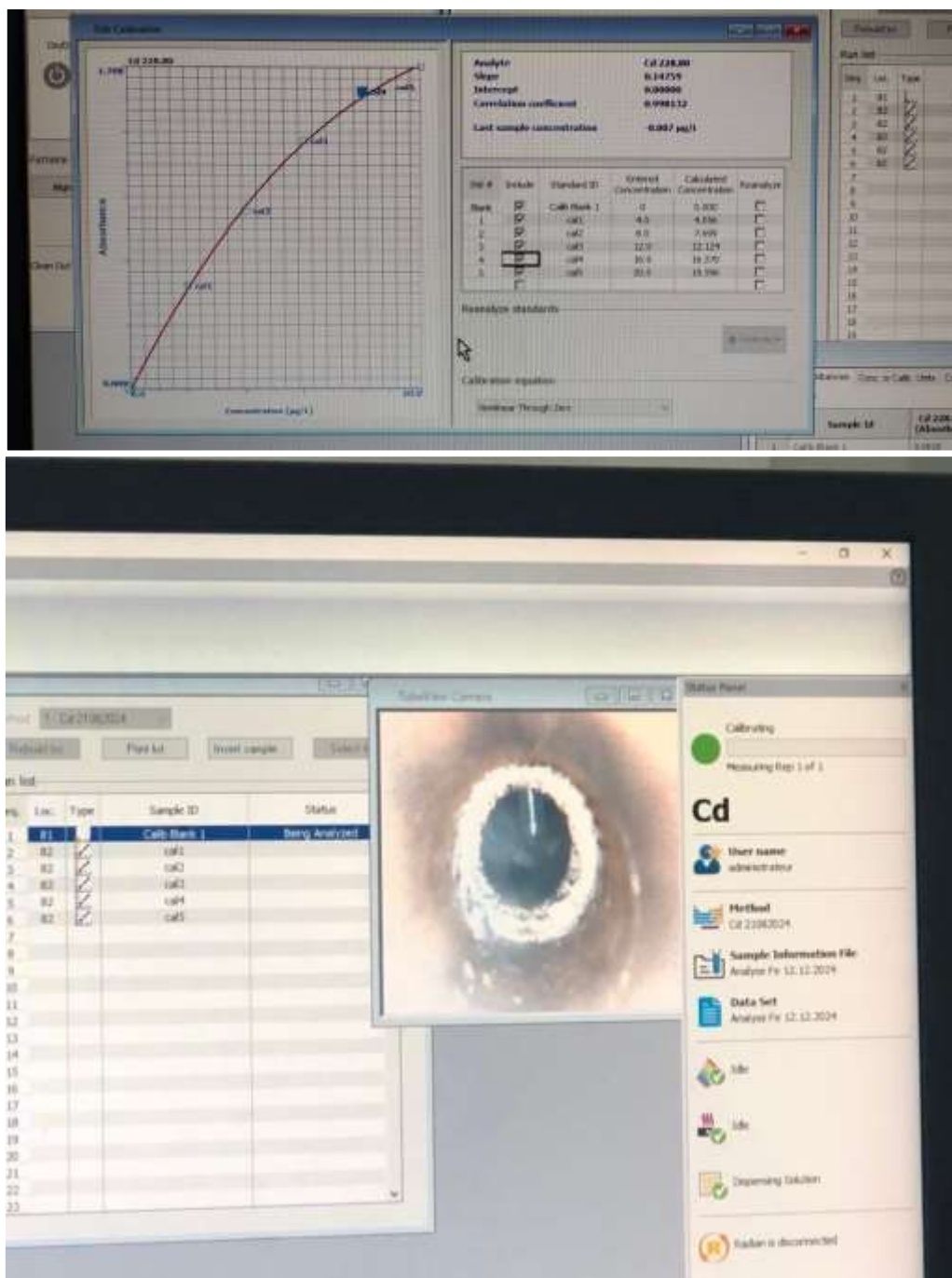


Figure n°24 : Analyse des ETM (Cd) par SAA (Photo originale, taille réelle)

4.2.7.2. Dosage par la méthode de spectrométrie d'absorption atomique

Le dosage des éléments traces étudiés (Cd, Pb, Cu et Ni) a été effectué au moyen d'un spectromètre d'absorption atomique à flamme (SAA-F), équipé de lampes à cathode creuse spécifiques pour chaque élément à analyser.

Avant l'analyse, l'appareil a été calibré à l'aide des solutions étalons. Chaque échantillon digéré a ensuite été introduit dans le spectromètre à l'aide d'un nébuliseur. Les conditions de fonctionnement (type de flamme, débit de gaz, longueur d'onde spécifique à chaque métal) ont été optimisées pour assurer une meilleure sensibilité et reproductibilité des mesures.

Les longueurs d'onde utilisées étaient :

- 217.0 nm pour Pb
- 228.8 nm pour le Cd
- 324.8 nm pour le Cu
- 232.0 nm pour le nickel Ni.

Les concentrations obtenues ont été exprimées en mg/kg de poids frais. Chaque échantillon a été analysé en triplicata afin d'assurer la fiabilité des résultats.

Résultats et discussion

L'objectif de cette étude est d'évaluer la contamination de la moule (*Mytilusgalloprovincialis*) capturée à Bejaia par le cadmium (Cd), plomb(Pb), nickel (Ni) et le cuivre (Cu) et de comparer les résultats obtenus aux seuils limites réglementaires nationaux et internationaux.

1. Concentrations générales des éléments traces métalliques (ETM) dans les moules

L'analyse des concentrations en éléments traces métalliques (ETM) dans les moules (*Mytilusgalloprovincialis*) collectées sur le littoral de Béjaïa révèle des niveaux de contamination variables, traduisant une pollution métallique allant de modérée à élevée. Ces variations semblent fortement liées aux rejets anthropiques d'origine portuaire, industrielle ou domestique, et sont indiquées dans le tableau suivant (**Tableau n°5**)

Tableau n°5 : Concentrations en éléments traces métalliques (ETM) mesurées dans les moules (*Mytilusgalloprovincialis*) à Béjaïa (en mg/kg poids sec)

Métal	Min (mg/kg)	Max (mg/kg)	Moyenne (mg/kg)	Écart-type
Ni	2,94	4,33	3,45	0,51
Cd	0,26	1,27	0,59	0,39
Cu	1,22	4,86	2,38	1,39
Pb	0,00	3,95	1,86	1,47

1.1. Interprétation des résultats

Les concentrations mesurées des quatre ETM étudiés révèlent une **pollution métallique significative dans les moules de la région de Béjaïa**, (Tableau N°5) avec des variations importantes selon le métal :

- **Nickel (Ni)** présente la concentration moyenne la plus élevée (**3,45 mg/kg**) avec une **faible dispersion (écart-type : 0,51)**, indiquant une **contamination homogène** à l'échelle régionale.
- **Cadmium (Cd)**, bien que moins concentré (**0,59 mg/kg** en moyenne), affiche une **toxicité élevée**. Sa variation modérée laisse penser à des **sources ponctuelles de pollution**.
- **Cuivre (Cu)** montre une concentration moyenne de **2,38 mg/kg**, avec un **écart-type élevé (1,39)**, ce qui suggère **des pics de pollution localisée**, probablement liés aux peintures antisalissures ou aux effluents industriels.

- **Plomb (Pb)**, avec une **valeur moyenne de 1,86 mg/kg** et un **écart-type élevé (1,47)**, indique **des niveaux préoccupants**, surtout dans certaines stations comme le port de Béjaïa.

Ces données confirment le **rôle des moules comme bioindicateurs efficaces** et soulignent la **nécessité d'un suivi régulier** de la qualité des eaux littorales à Béjaïa. Les concentrations des ETM ont été déterminées par spectrométrie d'absorption atomique (SAA). Les résultats exprimés en µg/L ont été convertis en mg/kg selon la formule suivante :

$$\text{Concentration (mg/kg)} = (\mu\text{g/L} \times \text{Volume final (L)}) / \text{Prise d'essai (g)}$$

Cette method permet d'exprimer les resultants de manière représentative de la contamination dans la matière biologique analysée.

- **µg/L** : concentration obtenue après la lecture par la SAA
- **Volume final (L)** : volume final après digestion acide (en litres)
- **Prise d'essai (g)** : masse de la matière sèche utilisée pour l'analyse (en grammes)

Un tableau statistique a ensuite été généré à l'aide du logiciel **Excel**. Il présente quatre indicateurs principaux pour chaque métal analysé :

- **La moyenne** : elle reflète le niveau général de contamination.
- **La valeur minimale et maximale** : elles indiquent l'étendue des concentrations relevées selon les stations d'échantillonnage.
- **L'écart-type** : il mesure la variabilité des données, c'est-à-dire à quel point les valeurs individuelles s'écartent de la moyenne.

2. Comparaison des concentrations des ETM obtenues dans les moules et dans l'eau de mer selon les données de Oubakouk Bilal et Naïb Alycia (2025), sur les mêmes stations et durant la même période

Les moules (*Mytilusgalloprovincialis*), en tant qu'organismes filtreurs, ont la capacité d'accumuler les éléments traces métalliques (ETM) présents dans l'environnement marin. Pour évaluer l'intensité de la bioaccumulation, les concentrations mesurées dans les tissus de moules ont été comparées à celles détectées dans l'eau de mer (**Voir le tableau n°6**), collectées aux mêmes stations de prélèvement, lors de la même campagne d'échantillonnage

(février 2025) Dans le cadre d'une étude parallèle menée par **Oubakouk B** et **Naib A**, membres de notre promotion.

Tableau n°6 : Comparaison des concentrations moyennes mesurées dans les moules et dans l'eau de mer (février 2025)

Métal	Moule (mg/kg)	Eau de mer (mg/L)
Cd	0,59	0,004
Pb	1,86	0,000
Cu	2,38	0,028
Ni	3,45	0,00017

2.1.Interprétation et discussion

Ce tableau met en évidence un **gradient de concentration très marqué entre les moules et leur environnement aquatique**, confirmant le phénomène de **bioaccumulation**.

- **Le cadmium (Cd)**, détecté à **0,004 mg/L dans l'eau de mer**, atteint **0,59 mg/kg** dans les moules, soit un **facteur d'accumulation de plus de 140 fois**, ce qui illustre sa forte affinité avec les tissus biologiques.
- **Le plomb (Pb)** est indétectable dans l'eau (valeur proche de 0,000 mg/L), mais atteint une **concentration moyenne de 1,86 mg/kg** dans les moules, mettant en évidence **une bioaccumulation extrême**, typique des environnements portuaires contaminés.
- **Le cuivre (Cu)** passe de **0,028 mg/L dans l'eau à 2,38 mg/kg dans les tissus**, ce qui confirme un **enrichissement notable**, cohérent avec les apports anthropiques, notamment les peintures antisalissures et les rejets industriels.
- **Le nickel (Ni)**, bien que faiblement présent dans l'eau (**0,00017 mg/L**), atteint une moyenne de **3,45 mg/kg** dans les moules, ce qui témoigne d'un **phénomène de bioaccumulation extrêmement élevé (facteur supérieur à 20 000)**.

Ces résultats confirment pleinement les observations de **Zerrouki et al. (2023)**, selon lesquelles (*Mytilusgalloprovincialis*) peut concentrer certains métaux jusqu'à 50 fois ou plus par rapport à leur niveau dans l'eau de mer. Cela **renforce son statut de bioindicateur fiable** pour la surveillance de la pollution métallique dans les zones côtières.

En conclusion, cette comparaison illustre non seulement le **pouvoir bioaccumulateur des moules**, mais aussi la **sous-estimation potentielle du risque** si l'on se base uniquement sur l'analyse de l'eau. Elle justifie pleinement l'usage combiné des matrices biologiques et abiotiques pour une évaluation environnementale intégrée.

3. Variation spatial des concentrations en ETM selon les stations d'échantillonnage

3.1. Cas du cadmium (Cd)

Les résultats montrent une variation des concentrations en cadmium selon les stations (**Figure n°25**). Le port de Béjaïa présente la concentration la plus élevée (1,27 mg/kg), suivi du port pétrolier (0,60 mg/kg). À Tichy, la concentration est modérée (0,40 mg/kg), tandis que ThalaGuilef et Beni Ksila enregistrent des niveaux faibles (0,30 et 0,20 mg/kg respectivement). Ces différences s'expliquent par la présence de zones industrielles, l'intensité du trafic maritime, ou encore l'absence de stations d'épuration. Des études antérieures menées à El Kala (**Kherici, 2022**) ont rapportés des valeurs plus faibles (0,26 mg/kg), tandis qu'à Oran, **Chergui et al. (2014)** ont trouvés des valeurs supérieures (0,80 mg/kg).

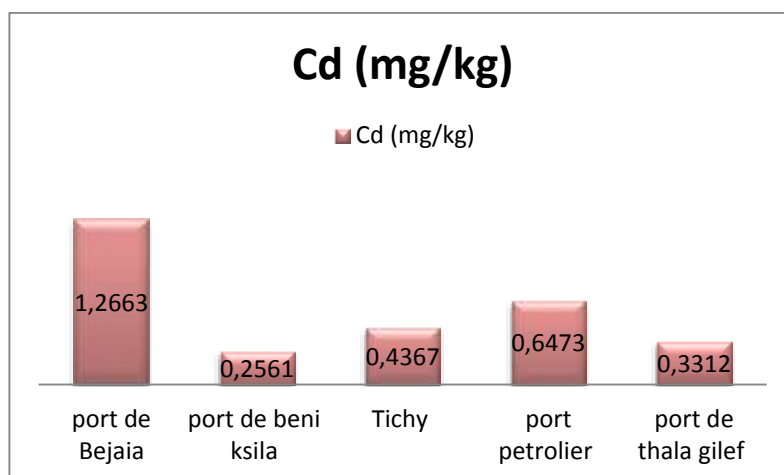


Figure n°25 : Concentrations du Cadmium (Cd) exprimées en **mg/kg** chez la moule (*Mytilusgalloprovincialis*) dans les différentes stations d'étude.

3.2. Cas du nickel (Ni)

Les teneurs en nickel montrent également une variabilité (**Voir la figure n°26**). ThalaGuilef affiche la valeur maximale (4,2 mg/kg), suggérant une source de pollution locale. Tichy et le port pétrolier présentent des concentrations modérées (3,5 mg/kg), alors que Beni Ksila et Béjaïa présentent les niveaux les plus faibles (2,8 – 3,0 mg/kg). À Mostaganem, **Guendouzi (2015)** avait signalé une concentration de 1,98 mg/kg, ce qui confirme un niveau plus élevé à Béjaïa.

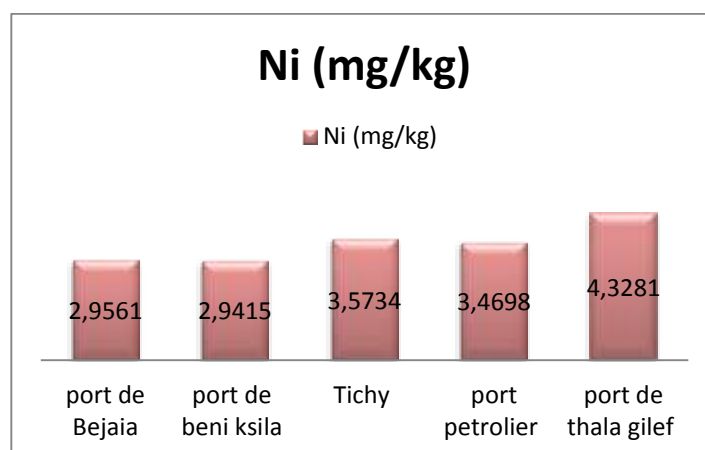


Figure n°26 : Concentrations du nickel (Ni) exprimées en **mg/kg** chez la moule (*Mytilusgalloprovincialis*) dans les différentes stations d'étude.

3.3. Cas du cuivre (Cu)

Le site de Tichy présente la concentration la plus élevée en cuivre (4,86 mg/kg), suivi du port pétrolier (2,8 mg/kg), Beni Ksila (1,7 mg/kg), et Béjaïa et ThalaGuilef (1,3 mg/kg chacun). Des niveaux comparables ont été relevés à Annaba (2,1 mg/kg, **Belkessa et Taleb, 2021**)), mais à Oran, des concentrations bien plus élevées ont été enregistrées (jusqu'à 6,3 mg/kg selon (**Rouane-Hacene, 2013**))

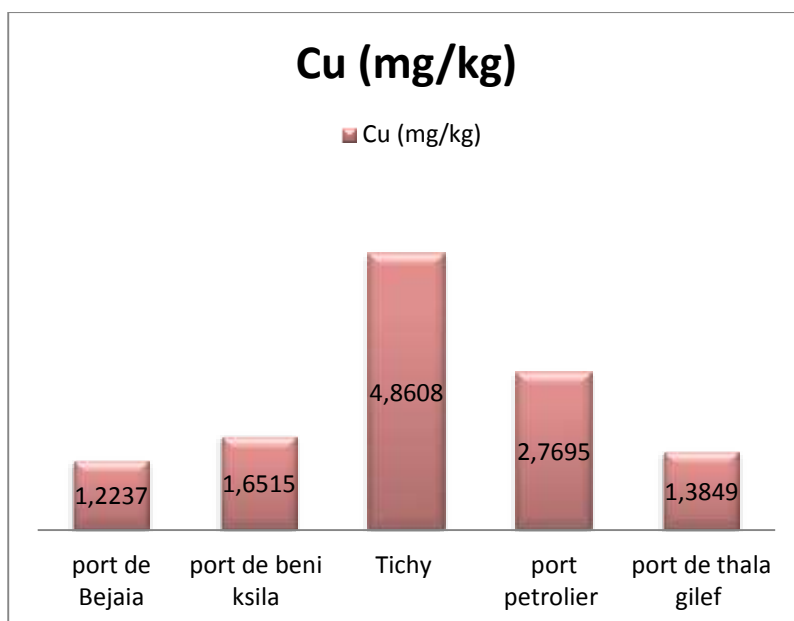


Figure n°27 : Concentrations du cuivre (Cu) exprimées en **mg/kg**chez la moule (*Mytilusgalloprovincialis*) dans les différentes stations d'étude.

3.4. Cas du plomb (Pb)

Comme illustré dans la **figure n°28**, le port de Béjaïa affiche la concentration maximale en plomb (4,00 mg/kg), suivi du port pétrolier (2,2 mg/kg), Beni Ksila (2,0 mg/kg), Tichy (1,0 mg/kg), et enfin ThalaGuilef (0 mg/kg). Cette répartition pourrait être attribuée à la densité du trafic maritime et aux sources de pollution urbaine. À Oran, **Chergui et al. (2014)** avaient rapportés une valeur similaire (1,9 mg/kg), mais des valeurs plus faibles ont été notées à Tipaza (0,9 mg/kg, **Belkessa et Taleb, 2021**).

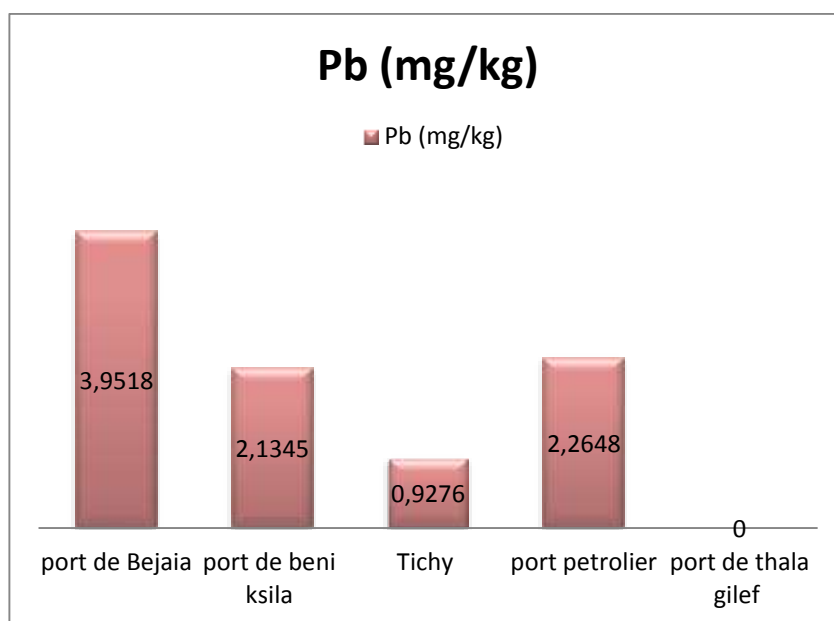


Figure n°28 : Concentrations du Plomb (Pb) exprimées en **mg/kg** chez la moule (*Mytilusgalloprovincialis*) dans les différentes stations d'étude.

✓ Tous ces résultats montrent que la zone d'étude constitue un facteur de variation de bioaccumulation de ces éléments traces métalliques

4. Comparaison des concentrations observées aux seuils réglementaires

Afin d'évaluer les risques sanitaires liés à la consommation de moules contaminées par les éléments traces métalliques (ETM), les concentrations mesurées dans les échantillons prélevés ont été comparées aux seuils réglementaires établis par différents organismes nationaux et internationaux.

Les normes de référence retenues incluent :

- La réglementation algérienne (Journal Officiel, 2011),
- Le règlement (UE) 2023/915 de l'Union Européenne,
- Les recommandations de la FAO/OMS (JECFA), considérées comme valeurs indicatives ou tolérables.

Le **tableau n°7** ci-dessous présente les concentrations moyennes et maximales mesurées pour chaque métal, ainsi que les seuils réglementaires correspondants.

Tableau n°7 : Comparaison des concentrations mesurées avec les normes réglementaires (mg/kg poids sec)

Métal	Moyenne mesurée	Limite Algérie	Limite UE	Limite OMS/JECFA	Autres références
Cadmium (Cd)	0,59	1,0	1,0	0,5	Codex Alimentarius : 1,0
Plomb (Pb)	1,86	1,5	1,5	0,3	Codex : 0,5–2,0
Nickel (Ni)	3,45	Non spécifiée	0,2*	Non spécifiée	ANZFS : seuil indicatif = 1,0
Cuivre (Cu)	2,38	Non spécifiée	5,0	10,0	JECFA : 10,0 (tolérance provisoire)

Les normes sont issues de la réglementation algérienne (**Journal Officiel 2011**), du règlement européen **UE 2023/915**, et des recommandations de l'OMS/JECFA. Les données sont exprimées en mg/kg de poids frais. Les limites peuvent être réglementaires (obligatoires) ou indicatives (recommandées).

La limite de 0,2 mg/kg pour le Ni est prévue dans la future mise à jour UE de 2025.

Les concentrations des ETM mesurées dans les moules dépassent pour certains éléments les limites réglementaires fixées par les normes internationales et nationales algériennes, ce qui représente un risque potentiel pour la santé humaine. Ces dépassements soulignent la nécessité d'une surveillance environnementale renforcée, en particulier dans les zones portuaires les plus impactées.

- Cadmium (Cd)** : La concentration maximale enregistrée (1,27 mg/kg poids sec) dépasse les seuils fixés par la directive européenne et la réglementation algérienne, toutes deux établies à 1,0 mg/kg. Ce dépassement signale une pollution préoccupante, notamment au niveau du port de Béjaïa, et souligne le risque sanitaire lié à la toxicité cumulative du cadmium.
 Plomb (Pb) : Avec une concentration maximale de 4,00 mg/kg, le plomb dépasse largement les seuils réglementaires européens (1,5 mg/kg), australiens/néo-zélandais (2,0 mg/kg) et algériens (1,5

mg/kg). Cette contamination persistante témoigne d'une pollution importante, probablement d'origine industrielle ou portuaire, avec des conséquences graves pour la sécurité alimentaire.

- **Cuivre (Cu)** : Bien que certains pics atteignent 4,86 mg/kg, ces valeurs restent inférieures à la limite tolérable de 10,0 mg/kg fixée par l'OMS et les normes européennes. Le cuivre ne présente donc pas de risque immédiat, mais sa variabilité suggère la nécessité d'une surveillance continue.
- **Nickel (Ni)** : Les concentrations mesurées, jusqu'à 4,33 mg/kg, dépassent largement le seuil indicatif de 1,0 mg/kg recommandé par la FAO/OMS et repris par certaines normes. Même en l'absence d'une norme européenne stricte, ces niveaux indiquent une contamination préoccupante, en particulier au port de ThalaGuilef.

Ces résultats révèlent un danger potentiel pour la santé des consommateurs, en particulier pour les populations consommant régulièrement des produits de la mer issue des zones côtières étudiées. Il est impératif de mettre en place des mesures de gestion et de contrôle renforcées pour limiter ces risques et protéger la santé publique.

4.1. Discussion : Comparaison aux seuils réglementaires

L'évaluation des concentrations moyennes en éléments traces métalliques (ETM) dans les moules (*Mytilus galloprovincialis*) prélevées sur le littoral de Béjaïa a permis de mettre en évidence une contamination qui, dans certains cas, dépasse les limites réglementaires reconnues aux niveaux national et international. Cette section compare les résultats obtenus à Béjaïa aux normes en vigueur, tout en les confrontant aux valeurs rapportées dans d'autres régions algériennes.

- **Cadmium (Cd)**

La concentration moyenne du cadmium à Béjaïa est de **0,59 mg/kg**, soit **au-dessus de la limite tolérée par l'OMS/JECFA (0,5 mg/kg)**, mais **inférieure à la norme algérienne et européenne (1,0 mg/kg)**. À titre de comparaison, des niveaux similaires ont été observés à Alger/Tipaza (**0,58 mg/kg, Belkessa & Taleb, 2021**), et légèrement plus élevés à Annaba (**0,75 mg/kg, Kherici, 2022**). Ce dépassement de la norme de l'OMS, même modéré, indique une **contamination préoccupante** susceptible de s'accumuler dans les tissus humains, surtout en cas de consommation fréquente de produits de la mer.

- **Plomb (Pb)**

La concentration moyenne mesurée en plomb atteint **1,86 mg/kg** à Béjaïa, ce qui **dépasse le seuil réglementaire algérien et européen (1,5 mg/kg)**, ainsi que celui de l'OMS (0,3 mg/kg). Cette valeur est **deux fois supérieure à celle rapportée à Alger/Tipaza (0,90 mg/kg)**, mais reste inférieure à celle observée à Oran (**2,20 mg/kg, Chergui et al., 2014**). Ces niveaux élevés révèlent une **pollution persistante** au plomb, souvent liée au trafic maritime, à la combustion de carburants et à la corrosion des structures métalliques dans les zones portuaires.

- **Cuivre (Cu)**

À Béjaïa, la concentration moyenne en cuivre est de **2,38 mg/kg**, ce qui demeure **conforme aux normes sanitaires internationales**, notamment celles de l'OMS (10,0 mg/kg) et de l'Union Européenne (5,0 mg/kg). Toutefois, cette valeur est **plus faible que celle rapportée à Oran (3,50 mg/kg)**. Le cuivre étant un oligo-élément essentiel, il ne présente pas de **danger immédiat**, mais sa variabilité dans les stations étudiées suggère une influence anthropique (industries, antifoulings, etc.), justifiant une **surveillance continue**.

- **Nickel (Ni)**

La concentration moyenne en nickel à Béjaïa est de **3,45 mg/kg**, soit **plus de trois fois le seuil indicatif de 1,0 mg/kg** recommandé par l'ANZFS et repris dans les avis de l'OMS/FAO, bien qu'aucune norme européenne officielle ne soit définie. Cette valeur est également **nettement supérieure à celle trouvée à Alger/Tipaza (0,95 mg/kg)**. Le nickel est reconnu pour sa toxicité potentielle, notamment dans ses formes solubles, et sa présence à de telles concentrations reflète une **pollution préoccupante**, probablement liée à l'activité industrielle et portuaire dans la région de Béjaïa.

En résumé, les **teneurs en plomb et nickel mesurées dans les moules dépassent les limites de sécurité** dans la majorité des références consultées, tandis que le **cadmium** dépasse les seuils OMS, et le **cuivre** reste dans les normes. Cette situation appelle à une **vigilance accrue** dans la surveillance de la qualité du milieu marin et de la sécurité des produits halieutiques destinés à la consommation humaine, en particulier dans les zones à forte activité anthropique comme Béjaïa.

Conclusion et perspectives

Tableau n°8 : Concentration des éléments traces métalliques (mg/kg) dans les moules selon les stations

Station	Cd	Ni	Cu	Pb
Port de Béjaïa	●1,2663	2,9561	1,2237	●3,9518
Beni Ksila	0,2561	2,9415	1,6515	●2,1345
Tichy	0,4367	3,5734	●4,8608	0,9276
Port pétrolier	0,6473	3,4698	2,7695	●2,2648
ThalaGuilef	0,3312	●4,3281	1,3849	0

●= concentration la plus élevée ou seuil toxique probable dépassé.

Les résultats du **tableau n°8** révèlent une **contamination variable selon les stations** :

- **Nickel (Ni)** est le **métal le plus élevé** dans toutes les stations, en particulier à **ThalaGuilef (4,3281 mg/kg)**. Cela suggère une **pollution diffuse**, possiblement d'origine **géologique** ou **industrielle**. Le Ni, bien que naturellement présent, peut affecter les **fonctions enzymatiques** des organismes marins à forte dose.
- **Cadmium (Cd)** atteint une valeur critique à **Béjaïa (1,2663 mg/kg)**, bien au-dessus des autres sites. Ce métal est **hautement toxique**, responsable de **dommages rénaux** chez l'homme et de **perturbations du métabolisme** chez les moules. Cette pollution pourrait provenir de **rejets urbains non traités** ou de **pesticides**.
- **Cuivre (Cu)** montre un pic exceptionnel à **Tichy (4,8608 mg/kg)**. Bien que ce soit un **oligo-élément essentiel**, des concentrations aussi élevées peuvent provoquer une **toxicité aiguë**, affectant la reproduction et la croissance des organismes aquatiques. La présence d'activités **portuaires ou industrielles locales** pourrait en être la cause.
- **Plomb (Pb)** atteint un maximum à **Béjaïa (3,9518 mg/kg)**. Le Pb est l'un des métaux les plus **neurotoxiques**, affectant le **système nerveux**, en particulier chez les jeunes enfants et les invertébrés marins. Ses sources probables incluent les **émissions atmosphériques**, **carburants**, et **rejets anciens**.

Impact sur l'environnement et la santé humaine

- Pour l'homme : consommation de moules contaminées par le **Cd** ou le **Pb** peut entraîner des **effets chroniques sévères** (néphrotoxicité, neurotoxicité).
- Pour l'écosystème : les moules, étant des **bioindicateurs**, signalent une **altération de l'état écologique** des milieux marins. Une pollution chronique pourrait entraîner la **biodiversité marine locale** à long terme.

Les résultats obtenus à Béjaïa montrent des concentrations élevées en éléments traces métalliques (ETM), notamment en cadmium (Cd) et en plomb (Pb), dépassant les seuils réglementaires fixés par les normes européenne (1,0 mg/kg pour le Cd et 1,5 mg/kg pour le Pb) et algérienne. Cette non-conformité soulève un véritable **risque pour la santé humaine**, en particulier pour les consommateurs de produits de la mer provenant de zones côtières contaminées.

Par ailleurs, la moule (*Mytilus galloprovincialis*) s'est révélée être un **bioindicateur très efficace** pour évaluer la pollution métallique du milieu marin. Son mode de vie filtreur lui permet d'accumuler rapidement les métaux présents dans l'eau, comme le confirment les niveaux de bioaccumulation observés dans cette étude. Les concentrations mesurées dans les moules étaient significativement supérieures à celles de l'eau de mer, ce qui met en évidence l'impact des rejets industriels, portuaires et urbains sur l'écosystème marin de Béjaïa.

En somme, ce travail met en lumière une **situation de contamination préoccupante**, nécessitant la mise en place de mesures de surveillance et de gestion rigoureuses pour la préservation du littoral. Il souligne également l'importance de poursuivre les efforts scientifiques en matière de biosurveillance marine, afin de mieux protéger à la fois l'environnement et la santé des populations côtières.

Perspectives

Au vu des résultats obtenus, plusieurs recommandations peuvent être formulées en vue d'améliorer la surveillance de la pollution marine sur le littoral de Béjaïa :

- **Renforcer le suivi temporel** : Il serait pertinent de réaliser des campagnes d'échantillonnage saisonnières afin d'évaluer l'influence des facteurs environnementaux (température, salinité, cycle biologique des moules) sur les niveaux de bioaccumulation des ETM.
- **Étendre la gamme des contaminants analysés** : Les ETM comme le zinc (Zn), le mercure (Hg), l'arsenic (As) ou le chrome (Cr) pourraient également être étudiés pour obtenir un aperçu plus complet de la contamination.
- **Inclure les sédiments et autres compartiments** : L'analyse des ETM dans les sédiments, mais aussi dans d'autres espèces bioindicateurs (poissons, algues, crustacés), permettrait de mieux comprendre les dynamiques de transfert des polluants dans l'écosystème.
- **Sensibiliser les acteurs locaux** : Une collaboration entre les chercheurs, les autorités portuaires et les services de l'environnement est essentielle pour mettre en place une gestion efficace des rejets industriels et urbains.
- **Valoriser les bioindicateurs dans les politiques publiques** : Intégrer la moule (*Mytilus galloprovincialis*) comme espèce sentinelle dans les programmes de biosurveillance environnementale contribuerait à une meilleure évaluation de la qualité des eaux côtières.

Enfin, ces recommandations ouvrent la voie à des recherches plus approfondies et multidisciplinaires, en lien avec les enjeux de santé publique, d'écotoxicologie et de gestion durable des milieux littoraux.

Références bibliographiques

1. Abderrahmani, K., Boulahdid, M., Bendou, N., & Aissani, A. (2020). Seasonal distribution of cadmium, lead, nickel, and manganese in several tissues of mussels from the Algerian coasts. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(22), 22547–22567. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08682-8>
2. A.F.E.E. (1976–1979). *Synthèse bibliographique : les micropolluants minéraux dans les eaux superficielles continentales*. Rapports n°2 (1976), n°3 (1978), n°6 (1979).
3. Ait Ziane, K., & Bouyahia, N. (2013). *Cycle biogéochimique de quelques métaux lourds dans les eaux côtières du golfe de Béjaïa* [Mémoire de Master 2, Université de Béjaïa].
4. Alloway, B. J., & Ayres, D. C. (1997). *Chemical Principles of Environmental Pollution*. Chapman and Hall, London.
5. Amiard-Triquet, C., Amiard, J. C., & Rainbow, P. S. (2013). *Environmental Assessment of Estuarine Ecosystems: A Case Study*. CRC Press.
6. ANZFS. (2015). *Australian and New Zealand Food Standards Code, Standard 1.4.1 – Contaminants and Natural Toxicants* (F2011C00542). Federal Register of Legislation. (Consulté le 02.06.2025 à 14h29).
7. Arrêté interministériel du 5 janvier 2011 fixant les seuils limites de présence de contaminants chimiques dans les produits de la pêche et de l'aquaculture. *Journal Officiel de la République Algérienne*, n°25 du 27 avril 2011.
8. Azimi, S. (2004). *Sources, flux et bilan des retombées atmosphériques de métaux en Île-de-France* [Thèse de doctorat, École des Ponts ParisTech].
9. Baker, A. J. M., & Walker, P. L. (1990). Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. In Shaw, J. (Ed.), *Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects* (pp. 155–178). CRC Press.
10. Behanzin, G. J., Adjou, E. S., Yessoufou, A. G., Ahoussi, E. D., & Sezan, A. (2014). Effet des sels de métaux lourds sur l'activité des hépatocytes. *Journal of Applied Biosciences*, 83, 7499–7505.
11. Belkessa, N., & Taleb, S. (2021). *Évaluation de la toxicité de la moule Mytilus galloprovincialis en contaminants métalliques dans deux sites côtiers algériens : Alger et Tipaza* [Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes]. <https://theses-algerie.com/3960497843407967>
12. Benomar, S., Bouhaimi, A., Elhamidi, F., Mathieu, M., Ouichou, A., & Moukrim, A. (2006). Cycle de reproduction de la moule africaine *Perna perna* dans la baie d'Agadir. *Biologie & Santé*, 6(1), 21.

13. Bhabby, S., Belhsen, O. K., & Errhif, A. (2014). *Mytilus galloprovincialis*: Reproduction Activity and Mantle Structure in a Zone Located in the Northwest of the Atlantic Ocean (Imessouane, Morocco). *Journal of Marine Biology & Oceanography*, 3(1).
14. Boudjema, K., Badis, A., & Moulai-Mostefa, N. (2021). Study of heavy metal bioaccumulation in *Mytilus galloprovincialis* from heavy metal mixture using the CCF design. *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102202. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102202>
15. Boulkah, H. (2008). *Étude comparative de l'adsorption des ions plomb sur différents adsorbants* [Mémoire d'ingénieur, Université de Skikda].
16. Caquet, T. (2012). Évaluation des risques et écotoxicologie : le cas des pesticides. *Innovations Agronomiques*, 23, 29–54. <https://doi.org/10.17180/dg0h-4f03>
17. Casas, S. (2005). *Modélisation de la bioaccumulation de métaux traces chez la moule Mytilus galloprovincialis, en milieu méditerranéen* [Thèse de doctorat, Université de Toulon].
18. Chariton, A. A., et al. (2018). Assessing the chronic toxicity of nickel to a tropical marine gastropod and two crustaceans. *PubMed*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29758510/>
19. Chen, Y., Wang, Z., & Li, J. (2023). Toxicological effects of copper on marine microalgae. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-25939-0>
20. Chergui, A., Bouzid, R., & Saidi, D. (2014). *La moule Mytilus galloprovincialis bioindicateur de pollution marine – Cas du port d'Oran*. <https://www.researchgate.net/publication/260779025>
21. Cossa, D., & Lassus, P. (1989). Le cadmium en milieu marin : bio-géochimie et écotoxicologie. *Rapports scientifiques et techniques de l'IFREMER*, n°16.
22. Dehaine, Ch. (1992). *Contamination métallique et micro-organique des poissons d'eau douce*. D.E.S.S. Gestion des ressources naturelles renouvelables, Université du Littoral.
23. Dellali, M. (2001). *Utilisation d'indicateurs microbiologiques et biochimiques chez Ruditapes decussatus et Mytilus galloprovincialis dans la lagune de Bizerte*. Faculté des sciences de Bizerte.
24. Fergusson, J. E. (1990). *The Heavy Elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects*. Pergamon Press, Oxford, 614p.
25. Fischer, W. (1987). *Fiches FAO d'identification des espèces pour les besoins de la pêche* (Rev. 1). Méditerranée et mer Noire – Zone de Pêche 37. Vertébrés, 2.
26. Frontiers. (2024). Mineral composition in mussel *Mytilus galloprovincialis* and clam *Tapes decussatus* from Faro Lake of Messina: risk assessment for human health. *Frontiers in Toxicology*. <https://doi.org/10.3389/ftox.2024.1494977>

27. Gagnaire, B. (2005). *Étude des effets des polluants sur les paramètres hématologiques de l'huître creuse Crassostrea gigas : Interactions entre environnement, mécanismes de défense et maladies infectieuses*. Université de La Rochelle.
28. Geffard, O. (2001). *Toxicité potentielle des sédiments marins et estuariens contaminés : évaluation chimique et biologique* [Thèse de doctorat, Université Bordeaux I], 376p.
29. Gerard, M. (2000). *Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé*. Rapport, 365p.
30. Goldberg, E. D. (1975). The Mussel Watch—A first step in global marine monitoring. *Marine Pollution Bulletin*, 6(7), 111–114. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(75\)90240-9](https://doi.org/10.1016/0025-326X(75)90240-9)
31. Gollenberg, A. L., Hediger, M. L., & Lee, P. A. (2010). Association between lead and cadmium and reproductive hormones in peripubertal U.S. girls. *Environmental Health Perspectives*, 118, 1782–1787. <https://doi.org/10.1289/ehp.1001943>
32. Google Maps. (2022). Port pétrolier de Béjaïa, image satellite. <https://maps.google.com>
33. Goudot-Perrot, A. (1983). *Les métaux des mécanismes de la vie*. Maloine S.A. Éditeur, Paris.
34. Grimes, S., Boutiba, Z., Bakalem, A., Bouderbala, M., Boudjellal, B., Boumaza, S., et al. (2004). *Biodiversité marine et littorale algérienne*. Éditions Diwan, Alger, 400p.
35. Guendouzi, Y. (2011). *Contribution à l'étude de l'impact de la pollution chimique sur l'herbier à Posidonie dans la baie d'Alger* [Mémoire d'ingénieur d'État, École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer, Alger].
36. Guendouzi, Y. (2015). *Étude de la qualité de l'eau de mer de la région littorale de Mostaganem à travers deux bioindicateurs Mytilus galloprovincialis et Paracentrotus lividus* [Mémoire de magister, Université de Mostaganem].
37. Guendouzi, Y. (2019). *Étude de la bioaccumulation des métaux traces et des radioéléments chez la moule M. galloprovincialis et l'oursin P. lividus dans le littoral algérien* [Thèse, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem].
38. Health Canada. (1992). *Le cuivre*. Technical Report 5.
39. Kantin, R., & Pergent-Martini, C. (2007). *Monitorage de la qualité des eaux et de l'environnement marin – Rapport final*. Programme INTERREG IIIA Sardaigne/Corse/Toscane, Ifremer Publ., La Seyne.
40. Khelil, F. Z. (2007). *Évaluation de la contamination bactérienne de l'eau de mer et d'un mollusque M. galloprovincialis pêché du port d'Oran*. Mémoire, 57p.

41. Kherici, N. (2022). *Contamination des moules et de l'eau de mer sur la côte Est algérienne : cas d'Annaba et El Kala* [Mémoire de Master, Université de Souk Ahras]. <https://dspace.univ-soukahras.dz/items/ade2961e-f044-41eb-9317-ad1e2a6be4ea>
42. Le Gall, P. (1970). Étude des moulières normandes : renouvellement, croissance. *Vie et Milieu*, Observatoire Océanologique – Laboratoire Arago, pp. 545–590.
43. Lemoine, S., Bustamante, P., & Chérel, Y. (2008). Cadmium in cephalopods: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 56(12), 1864–1871. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.05.016>
44. Levet, D. (2008). *Guide pratique des substances toxiques dans les eaux douces et littorales du bassin Seine-Normandie*. Éditions AESN.
45. Lewis, C., Clemow, K., & Holt, R. (2015). Ocean acidification increases copper toxicity to early life stages of the polychaete *Arenicola marina*. *Environmental Science & Technology*, 49(17), 10232–10239. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es502739m>
46. Loué, A. (1993). *Oligo-éléments en agriculture*. Nathan, Paris, 577p.
47. Lubet, P. (1959). *Recherches sur le cycle sexuel et l'émission des gamètes chez les mytilidés et les pectinidés*. Institut Scientifique des Pêches Maritimes.
48. Lubet, P. (1973). *Exposé synoptique des données biologiques sur la moule Mytilus galloprovincialis (Lamarck 1819)*. FAO – Synop. Pêche, Vol. 88.
49. Malayeri, B. E. (1995). *Décontamination des sols contenant des métaux lourds à l'aide de plantes et de microorganismes* [Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy 1].
50. Mehoul, F., Fowler, S. W., & Hamouda, S. (2022). Review of the toxic trace elements arsenic, cadmium, lead and mercury in seafood species from Algeria and contiguous waters in the Southwestern Mediterranean Sea. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 18491–18504. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17130-0>
51. Miquel, G. (2001). *Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé*.
52. Miquel, M. (2001). *Rapport sur les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé*. Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, N°2979 Assemblée Nationale, N°261 Sénat.
53. Miramand, P., Guyot, T., Pigeot, J., & Bustamante, P. C. (2000). Le cadmium dans les réseaux trophiques marins : de la source aux consommateurs. *Journal Européen d'Hydrologie*, 31(2), 127–143. <https://doi.org/10.1051/water/20003102127>
54. Morin, S. (2007). *Bioindication des effets des pollutions métalliques sur les communautés de diatomées benthiques* [Thèse de doctorat, Université de Bordeaux].
55. Morrison, G. H. (1979). Role of trace elements in biology. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*.

56. Neathery, M., & Miller, W. J. (1975). Metabolism and toxicity of cadmium, mercury and lead in animals. *Journal of Dairy Science*, 58, 1767–1781.
57. Noppe, K. (1996). *Contamination métallique des sédiments des cours d'eau du bassin Artois-Picardie et son impact sur la contamination des chairs de poissons* [Mémoire, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI].
58. Pichaud, N. (2005). *Effets biologiques d'une exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques sur une espèce bioindicatrice, Mya arenaria*. Québec, 102p.
59. Ramade, F. (1972). Le mercure tue. *Découverte Sciences Progrès*, pp. 39–47.
60. Ramade, F. (1978). *Élément d'écologie appliquée* (2e éd.). McGraw-Hill, Paris, 451p.
61. Ramade, F. (1993). Équitabilité. In *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*. Éditions Science Internationale, Paris, 822p.
62. Règlement (CE) n°1881/2006 de la Commission européenne établissant les teneurs maximales en contaminants dans les denrées alimentaires.
63. Rouane-Hacene, O. (2013). *Biosurveillance de la qualité des eaux côtières du littoral occidental algérien par le suivi des indices biologiques, de la biodisponibilité et la bioaccumulation des métaux lourds chez la moule Mytilus galloprovincialis et l'oursin Paracentrotus lividus* [Thèse, Université d'Oran 1 Ahmed Ben Bella].
64. Sari, M. A., Edelwis, T. W., & Pardi, H. (2023). Bioaccumulation of lead (Pb) in green mussels (*Perna viridis*) in Indonesian waters. *BIO Web of Conferences*, 79, 12003. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237912003>
65. Scheiber, I. F., Dringen, R., & Mercer, J. F. (2020). Copper and nickel toxicity in humans: A review. *Toxicology Reports*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7037090/>
66. Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2018). *Chimie analytique*. De Boeck Supérieur.
67. SPAQUE. (2015). *Fiche environnementale : Cadmium*.
68. Stellio, C. (2005). *Modélisation de la bioaccumulation des métaux traces chez la moule Mytilus galloprovincialis en milieu méditerranéen* [Thèse de doctorat, Université du Sud Toulon Var], 269p.
69. Thibaud, Y. (1987). Le plomb, le cadmium et le mercure dans les produits de la mer. *Rapport DER0-87-02-MR*, IFREMER. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00132/24331/>
70. Tissoukai, F., & Ouatmani, B. (2013). *Dosage de quelques métaux lourds dans les régions de haute vulnérabilité du golfe de Béjaïa* [Mémoire de Master, Université de Béjaïa].

71. Uren, N. C. (1992). Forms, reaction and availability of nickel in soils. *Advances in Agronomy*, 48, 141–203.
72. Valerio, C., & Michael, N. (2009). *Mytilus galloprovincialis*. In *Cultured Aquatic Species Fact Sheets*, FAO.
73. Verger, G., & Petit, C. (2009). Les effets toxiques du cadmium. *Revue Médicale Vétérinaire*, 160(10), 484–490.
74. Vincente, M. S., et al. (1965). [Référence expérimentale sur la bioaccumulation du plomb chez la coque et l'aplysie].
75. Weinberg, S. (1993). *Découvrir la Méditerranée*. Éditions Nature, 351p.
76. Xu, J., Yuan, G., Dai, S., Yin, Z., Lu, H., Jia, R., Song, X., Li, L., Shu, Y., & Zhao, X. (2017). Toxicological assessment of combined lead and cadmium: Acute and sub-chronic toxicity study. *Food and Chemical Toxicology*, 65, 260–268.
77. Zerrouki, I., Laouer, H., & Sifi, K. (2023). Bioaccumulation of trace metals in *Mytilus galloprovincialis* from the Algerian west coast. *Mediterranean Marine Science*.
<https://www.researchgate.net/publication/334290434>
78. Zhou, J., Zhang, Y., & Wang, D. (2022). Nickel-induced toxicity in marine diatom *Phaeodactylum tricornerum*. *Ecotoxicology*.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10646-022-02532-8>