

Ministre de l'enseignement et de la recherche scientifique
École nationale supérieure des sciences de la mer et de l'aménagement du littoral



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en sciences de la mer

Option : gestion de Biodiversité et gestion des écosystèmes

Thème :

***L'étude d'impact de pollution sur
l'herbier à Posidonie dans l'anse de
kouali (Tipaza) proposition d'un projet de
restauration***

Présenté par : Mme Derguil soumeya

Soutenu le 09 /06/2025, Devant le jury composé de :

<i>Mme. MAHDIDE S.</i>	<i>Maitre de Conférences A, ENSSAMAL</i>	<i>Presidente</i>
<i>MR. BOUGHAMOU N.</i>	<i>Maitre –Assistant A, ENSSAMAL</i>	<i>Examinatrice</i>
<i>Mme. GHALMI R.</i>	<i>Maitre –Assistant A, ENSSAMAL</i>	<i>Promotrive</i>
<i>Mr. CHABANE J.</i>	<i>Doctorant, CTU</i>	<i>Invité</i>

Promotion 2024/2025



Remerciements

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Dieu, Le Tout-Puissant, Le Miséricordieux, pour Sa protection, Sa sagesse et Son accompagnement tout au long de ce parcours.

Je remercie tout particulièrement Madame **GHALMI R.**, ma promotrice, pour sa disponibilité, la qualité de son encadrement scientifique et son soutien constant, tant sur le plan académique que personnel.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury Madame **BOUGHAMOU N.**, et Madame **Mahdid S.**, qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail.

Ma reconnaissance s'étend à Monsieur **CHABAN J.**, Doctorant Au centre Universitaire de Tipaza, pour son accompagnement, ses précieux conseils et son soutien tout au long de cette étude.

Je tiens à remercier chaleureusement le personnel du laboratoire de l'ENSSMAL, en particulier Monsieur AIT KASSI M., Madame IDDELIA N., et Madame OUNAFI.F., pour leur accueil, leur disponibilité et leur précieuse assistance dans la réalisation de ce travail.

Je remercie également le personnel des bibliothèques du Ministère de la Pêche et des Ressources Halieutiques, ainsi que de l'ENSSMAL, pour leur accueil chaleureux et leur aide précieuse.

Enfin, un merci tout particulier à l'ensemble de l'équipe pédagogique et administrative

Dédicaces

À mes chers parents,

À une mère qui a tout sacrifié pour me voir arriver jusque-là...

À toi, ma chère maman, Celle qui a donné sans compter, qui a veillé sans dormir, qui a aimé sans condition. Me voilà, maman, j'y suis arrivée... même si j'ai mis un peu plus de temps.

Ton amour m'a portée, ta patience m'a construite, et ton espoir m'a guidée.

À toi, mon père bien-aimé.

À celui dont je porte fièrement le nom, Ton silence était parfois plus éloquent que les mots, ton regard une source de force, et ton soutien, même discret, une lumière dans mon chemin.

À mon frère Mohamed, pour ta présence réconfortante, ton encouragement et ta foi en moi.

À ce vent puissant qui a soufflé sur ma vie, Pour m'apprendre la force et la résilience.

À moi-même,

À celle qui ne m'a jamais abandonnée,

Même après chaque chute, chaque désillusion.

À tous ceux qui m'ont soutenue jusqu'au bout,

À ceux qui ont semé une parole de joie dans mon cœur,

À ceux qui m'ont abreuvée d'espoir lorsque mes forces faiblissaient,

À ceux à qui j'ai confié ma fatigue, et qui m'ont répondu : « Tu peux y arriver. »

À tous ceux qui ont été un appui sincère, sans jamais rien attendre en retour.

Un merci tout particulier à Ms Chabane Juba, pour son accompagnement bienveillant tout au long de mes trois années d'étude, sa disponibilité, et ses encouragements constants.

Ma profonde gratitude aussi à Sadaoui.souad, fidèle amie et source de motivation dans les moments difficiles.

Ce mémoire est empreint de votre soutien, de votre présence, et de votre confiance en moi. Merci infiniment.

Ce mémoire est le fruit de votre amour, de vos prières et de votre patience.

Qu'Allah vous protège et vous comble de Ses bénédictions.

Derguil .S

Résumé :

Posidonia oceanica est une phanérogame marine endémique de la Méditerranée (famille des Potamogetonaceae). Disposée en faisceaux de feuilles portés par des rhizomes rampants ou dressés, elle forme des herbiers considérés comme les « poumons » de la mer Méditerranée en raison de leur rôle crucial dans la production d'oxygène, la stabilisation des fonds et l'accueil d'une biodiversité remarquable.

Dans l'anse de Kouali (wilaya de Tipaza, Algérie), ces herbiers subissent toutefois des pressions physiques (mouillages, ancres, chalutage), chimiques (apports en métaux lourds et nutriments) et biologiques (prolifération d'algues opportunistes, surpâturage). Bien que *P. oceanica* montre une grande longévité et une résilience notable, la dégradation rapide de ses surfaces à Kouali compromet la fonctionnalité écologique de la baie et la pérennité des services écosystémiques associés.

Ce travail évalue la qualité bio-écologique des herbiers de Kouali à travers l'analyse conjointe des sédiments, de la colonne d'eau et des paramètres biologiques (densité, épiphytes,) Sur la base de ces diagnostics, il propose des scénarios de restauration adaptés :

L'étude ambitionne ainsi de fournir une base scientifique solide à la restauration des herbiers de Posidonie dans l'anse de Kouali, en lien avec les objectifs des conventions de Berne et de Barcelone et des stratégies nationales de conservation marine.

Mots-clés : *Posidonia oceanica* ; anse de Kouali ; restauration écologique ; transplantation ; Méditerranée ; herbiers marins.

Abstract

Posidonia oceanica is a marine seagrass species endemic to the Mediterranean Sea, belonging to the Potamogetonaceae family. It forms dense meadows composed of leaf bundles supported by creeping or erect rhizomes buried in sediment. These meadows play a crucial ecological role as oxygen producers, sediment stabilizers, and biodiversity reservoirs—earning them the name “lungs of the Mediterranean.”

In Kouali Bay (Tipaza, Algeria), these meadows are increasingly threatened by multiple stressors: physical (anchoring, trawling), chemical (heavy metal pollution, nutrient enrichment), and biological (invasive algae, overgrazing by herbivores). Despite its remarkable longevity and resilience, *P. oceanica* is showing signs of regression in this area, which compromises the ecological balance and functionality of the bay.

This study evaluates the bioecological quality of *Posidonia* meadows in Kouali through integrated analysis of sediments, water column, and biological indicators (shoot density, epiphyte coverage,). Based on these results, the work proposes tailored restoration strategies, including:

This work aims to provide a scientific foundation for the restoration of *Posidonia oceanica* meadows in Kouali Bay, in alignment with the goals of the Bern and Barcelona Conventions and national marine conservation policies.

Keywords: *Posidonia oceanica*; Kouali Bay; ecological restoration; transplantation; Mediterranean Sea; seagrass meadows.

المخلص

بوسيدونيا أوشينيكا (*Posidonia oceanica*) هي نبتة بحرية مائية مزهرة (فانيروجام)، مستوطنة في البحر الأبيض المتوسط وتنتمي إلى عائلة *Potamogetonaceae*. تنمو على شكل حزم من الأوراق محمولة على ريزومات زاحفة أو قائمة، وتشكل حقولاً بحرية تُعد بمثابة "رئة" البحر الأبيض المتوسط، نظراً لدورها الحيوي في إنتاج الأوكسجين، تثبيت الرواسب، واستضافة تنوع بيولوجي فريد.

في خليج كوالي (ولاية تيبازة، الجزائر)، تتعرض هذه الحقول لضغوط متعددة:

- فيزيائية (مثل الرسو، المراسي، الصيد بشباك الجر)،
- كيميائية (مثل تراكم المعادن الثقيلة والمواد المغذية)،
- بيولوجية (مثل تكاثر الطحالب الانتهازية والرعي المفرط).

رغم أن بوسيدونيا أوشينيكا تتميز بطول عمرها وقدرتها على التكيف، فإن تدهور مساحتها بسرعة في كوالي يهدد التوازن البيئي للمنطقة واستمرارية الخدمات البيئية التي تقدمها.

يقيم هذا العمل الجودة البيو-إيكولوجية للحقول البحرية في كوالي من خلال تحليل مشترك:

- للرواسب.
 - وعمود الماء.
 - والعوامل البيولوجية (مثل الكثافة، والطحالب المثبتة).
- وبناءً على هذه التشخيصات، تم اقتراح سيناريوهات ترميم بيئي مناسبة .

تهدف هذه الدراسة إلى تقديم قاعدة علمية متينة لترميم حقول بوسيدونيا في خليج كوالي، بما يتماشى مع أهداف اتفاقيتي برن وبرشلونة، ومع الاستراتيجيات الوطنية لحماية البيئة البحرية.

الكلمات المفتاحية: بوسيدونيا أوشينيكا، خليج كوالي، الترميم البيئي، الزرع، البحر الأبيض المتوسط، الحقول البحرية.

Liste des Tableaux

Tableau 01 : comparaison entre la restauration passive et la restauration active	21
Tableau 3.1 : un tableau des normes des sels nutritifs en mer méditerranéenne.....	54
Tableau 3.2 :comparatif des concentrations moyennes en sels nutritifs ($\mu\text{mol/L}$) de la méditerranée vs les cotes algérienne vs les cotes tunisiennes vs l'anse de kouali :	59
Tableau 3.3 : les resultats des metaux lourd dans les 4 matrices dans l'anse de kouali.....	63
3.4.1.2 : Tableau 3.4 : Activités prévues et chronogramme de volet 01	79
3.4.1.4 :Tableau 3.5 :Budget de volet 01 en euro	81
3.4.2.2 :Tableau 3.6 :Activités prévues et chronogramme de volet 02	83
3.4.2.4 :Tableau 3.7 :Budget de volet 02 en euro	84
3.4.3.2 :Tableau 3.8 : Activités prévues et chronogramme de volet 03	86
3.4.3.4 :Tableau 3.9 : Budget détaillé de volet 03	87
3.4.4.2 :Tableau 3.10 :l'acactivités prévues et chronogramme de volet 04	91
3.4.4.4 :Tableau 3.11 : Budget détaillé en euro de volet 04	92
3.4.5.2 :Tableau 3.12 :Activités prévues et chronogramme de volet 05	95
3.4.5.4 :Tableau 3.13 : Budget de volet 05 en euro	96
3.4.6.2 :Tableau 3.14 : Activités prévues et chronogramme de volet 06	98
3.4.6.4 :Tableau 3.15 : Budget de volet 06 en euro	99
3.4.7 :Tableau 3.16 : Tableau d'estimation finale de projet en euro	100
Tableau 3.17 : Gamme -étalons du plomb pour le biote	118
Tableau 3.18 : Gamme -étalons du plomb pour le sédiment.....	118
Tableau 3.16 : Tableau d'estimation finale de projet en euro	Erreur! Signet non défini.

Liste des figures

Figure 1.1: Aspect général d'un herbier à posidonie (LES PRAIRIES DE3	3
POSIDONIES /23 /septembre 2019).....3	3
Figure 1.2 : destruction géographique de la Posidonie méditerranéenne (https://medwet.org/fr/)6	6
Figure 1.3 : Bloc diagramme montrant la structure d'une matre ; b) Un rhizome plagiotrope de Posidonia oceanica portant des racines ainsi que des rhizomes orthotropes avec des faisceaux de feuilles à leurs extrémités. (Boudouresque et al., 2006; modifié).7	7
Figure 1.4: cycles de vie de Posidonia oceanica . (Cinelli et al.,1995).....9	9
Figure 1.5: quelques uns des consommateurs directs ou indirects de Posidonies et de leurs épiphytes. Les saupes broutent activement les feuilles, de même que certains Crustacés, certains Gastéropodes et que les oursins Paracentrotus. Les oursins Sphaerechinus mangent surtout les rhizomes des plantes, tandis que les concombres de mer (Holothuries) se nourrissent de la matière organique contenue dans les sédiments et en particulier des déjections d'oursins (Paccalet et Cousteau, 1983). Erreur! Signet non défini.	
Figure 1.6: quelques invertébrés vivant au niveau de l'herbier à Posidonie 10	10
Figure 1.7: quelques échinodermes vivant au niveau de l'herbier à Posidonie..... 11	11
Figure 1.8 : quelques mollusques vivant au niveau de l'herbier à Posidonie..... 12	12
Figure 1.9: les différents poissons vivant au niveau de l'herbier à Posidonie..... 12	12
Figure 1.10: Rôles écologiques de l'herbier de P. oceanica dans le fonctionnement..... 15	15
des écosystèmes littoraux en Méditerranée. (GIS Posidonie, 2009 ; modifié d'après la 15	15
figure originale de (Boudouresque et al.,2012). 15	15
Figure 1.11: Les feuilles tombent toute l'année mais le rythme de chute s'accélère en automne, après la floraison. Ce phénomène, conjugué à des conditions agitées (tempêtes automnales),	

entraîne le transport de quantités importantes de feuilles mortes sur les plages (Boudouresque et Meinesz,1982).	14
Figure 1.12: Schéma synthétique du "cercle vicieux" lié à l'enlèvement des banquettes de Posidonie et à l'érosion des plages. (Martin,2018).....	Erreur! Signet non défini.
Figure 1.13: Herbier à <i>Posidonia oceanica</i> colonisé par la chlorobionte invasive <i>Caulerpa taxifolia</i> (flèches) (Belbachir,2012).....	Erreur! Signet non défini.
Figure 2.1 : localisation géographique de la zone d'étude	24
Figure 2.2: fréquences saisonnières de la houle de la baie de bou_ismaïl	25
Figure 2.3: Sédimentologie de la baie de Bou Ismail (I.:M, 1989 in Senouci, 2015).	26
Figure2.4 : localisation des stations (s1,s2,s3) de prélèvement à l'anse de kouali.....	Erreur! Signet non défini.
Figure 2.5: Voies d'accumulation et de transfert d'un toxique dans trois maillous de la chaîne trophique: la posidonie, l'oursin, et l'homme	Erreur! Signet non défini.
Figure 2.6 : un conductimètre pour mesurer la salinité	30
Figure 2.7 : un Ph_mètre de la valise multi_paramètre.....	30
Figure 2.8: Représentation des préparatifs des échantillons précédant la lyophilisation.	34
Figure 2.9: illustration des Échantillons en cours de lyophilisation dans l'appareil.	34
Figure 2.10: Illustration des étapes de broyage et de tamisage des sédiments, ainsi que du broyage de la matière biologique.....	35
Figure 2.11: Minéralisation à blanc effectuée dans le cadre des analyses des métaux lourds.	37
Figure 2.12 : Illustrations de la pesée précise de 5 g réalisée pour chaque échantillon avant analyse.	38
Figure 2.13 : Illustrations de l'étape de minéralisation acide appliquée aux échantillons en vue de leur préparation à l'analyse.....	38

Figure 2.15:Auto Analyser San Plus (SKALAR"1998) (www.skalar.fripr_san.hti)	43
Figure 3.1 : la pollution de la plage de kouali	48
Figure 3.3 : les graphiques représentant les concentrations de chaque sel nutritif	51
Figure 3.4 : répartition des concentrations moyennes des nutriments dans les eaux de surface de la mer méditerranéenne	55
Figure 3.5: Comparaison des concentrations de nutriments dans l'anse de Kouali avec les normes de la mer Méditerranéenne	55
Figure 3.6 : Comparaison des concentrations moyennes des sels nutritifs	60
Figure 3.7 : répartition des métaux lourds dans chaque matrice	66
(sédiments, rhizome, faisceaux, gonades).	66
Figure 3.8 : comparaison des métaux lourds dans les sédiments (kouali vs référence (méditerrané))	74

Sommaire :

Introduction	17
Chapitre I : Généralité	2
1_1 Présentation de la Posidonie :	3
Figure 1.1: Aspect général d'un herbier à posidonie (LES PRAIRIES DE POSIDONIES /23 /septembre 2019).....	3
1_2: systématique de la Posidonie :	3
1_3. Distribution de la posidonie :	5
1_4: morphologie de la Posidonie	6
1_5: Écologie de <i>Posidonia oceanica</i> et facteurs influents:.....	Erreur! Signet non défini.
1_6 : Cycle de vie	7
Figure 1.4: cycles de vie de <i>Posidonia oceanica</i> . (Cinelli et al.,1995).....	9
1_7 : caractères diagnostiques de l'habitat :	9
1.9: la Posidonie en Algérie :	16
1.10: Menaces pesant sur les herbiers marins en Algérie.....	16
1.11 : protection des herbiers à Posidonies :	19
1.12: Protection et restauration des herbiers marins :	19
Chapitre 2_Matériel et méthode	22
2.1. Présentation de site d'étude :	23
2.2. : justification de choix de zone d'étude	23
Figure 2.1 : localisation géographique de la zone d'étude	24
2.3 : les données climatiques de la baie de bou-ismail.....	24
Figure 2.2: fréquences saisonnières de la houle de la baie de bou_ismail	25
2.4: Caractéristiques géologiques du site d'étude	26

Figure 2.3: Sédimentologie de la baie de Bou Ismail (I.:M, 1989 in Senouci, 2015).	26
2.4.3: Bathymétrie de la baie de Bou-Ismaïl	27
2.5 Climatologie de l'anse de Kouali	27
2.6 : L'échantillonnage	28
2.6.1 Sites d'échantillonnage types de matrices prélevées	Erreur! Signet non défini.
2.6.2. Protocole d'échantillonnage	Erreur! Signet non défini.
2.6.2.1 l'échantillon d'eau :	29
2.6.2.2 les sédiments : prélèvements manuels et des flacons avec les étiquettes a permis le prélèvement de sédiments de surface (0–5 m) pour les analyses des métaux lourds	31
2.6.3 Prélèvement conservation des échantillons	31
2.6.4 Paramètres analysés en laboratoire	31
2.7 au laboratoire	31
2.7.1 Étape de déconjugaison des échantillons :	32
2.7.2 Préparation physique : découpe et conditionnement	32
2.7.3 Lyophilisation (ou déshydratation par congélation-sublimation)	32
2.7.4 Broyage en poudre fine.	33
2.7.5 : Minéralisation à blanc (échantillon témoin)	33
2.7.6 : Minéralisation des échantillons	33
2.7.7 : Analyse par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA)	33
2.8 : Dosage des métaux lourds	34
2.8.1: Préparation des échantillons pour lyophilisateur	34
2.8.2: Lyophilisation :	34
2.8.3 : Pesée: Les échantillons lyophilisés sont pesés, et leur poids sec (PS) est noté.	34
2.8.4 : Broyage et tamisage :	35
2.8.5 : Homogénéisation des échantillons	35
2.8.6: Nettoyage du matériel	36

2.8.7:Minéralisation des échantillons	36
2.8.7.1: Une minéralisation à blanc	36
2.8.8 :Pesée :.....	37
2.8.9 :Minéralisation des sédiments et des matrices biologiques pour l’analyse des métaux lourds	38
2.8.10: Analyse des échantillons par spectrométrie d’absorption atomique (SAA).....	39
2.9:Dosage des sels nutritifs :.....	41
Figure 2.14: les echantillons d’eau dans l’anse de kouali	41
2.9.1: méthode d’analyse les sels nutritifs :.....	41
Figure 2.15:Auto Analyser San Plus (SKALAR"1998) (www.skalar. fripr_san.hti)	43
2.9.2: Principe général du dosage des sels nutritifs.....	43
2.9.3: Analyse automatique des sels nutritifs	44
Chapitre III :Résultat et discussion.....	46
3.1 : Pollution de l’anse de Kouali	47
3.2 :Les résultats trouvés :	49
3.2.1 :Les résultats physico-chimiques.....	49
3.2.2 :- les résultats des sels nutritifs mesurées au l’aboratoire :.....	50
3.2.3 : -les métaux lourds :	63
Tableau 3.3 : les resultats des metaux lourd dans les 4 matrices dans l’anse de kouali	63
3.3: État de la posidonie dans l’anse de Kouali :.....	71
Conclusion.....	74
3.4.Project de restauration écologique intégrée de la Posidonie à Kouali.....	77
3.4.1 : – VOLET 1	78
3.4.1.1 : Objectif de volet 01 :	78
3.4.1.2 : Tableau 3.4 : Activités prévues et chronogramme de volet 01	79
3.4.1.3 :. Résultats attendus	79

Partenaires impliqués.....	80
3.4.1.4 :Tableau 3.5 :Budget de volet 01 en euro	81
3.4.1.5 :. Indicateurs de succès de volet 01 :	81
3.4.2 : volet 02	82
3.4.2.1 : Objectif de volet 02	82
3.4.2.2 :Tableau 3.6 :Activités prévues et chronogramme de volet 02	83
3.4.2.3 : :Résultats attendus	83
3.4.2.4 :Tableau 3.7 :Budget de volet 02 en euro	84
3.4.2.5 : Indicateurs de succès de volet 02 :	85
3.4.3 : Volet 03	85
3.4.3.1 : Objectif de volet 03	86
3.4.3.2 :Tableau 3.8 : Activités prévues et chronogramme de volet 03	86
3.4.3.3:- Résultats attendus.....	86
Partenaires impliqués.....	87
3.4.3.4 :Tableau 3.9 : Budget détaillé de volet 03	87
3.4.3.5 : Indicateurs de succès de volet 03 :	89
3.4.4 : VOLET 04.....	89
figure 3.9 : la replantation de la Posidonie	90
3.4.4.1 : Objectif de volet 04	90
3.4.4.2 :Tableau 3.10 :l'activités prévues et chronogramme de volet 04	91
3.4.4.3 : Résultats attendus	91
. Partenaires impliqués.....	91
3.4.4.4 :Tableau 3.11 : Budget détaillé en euro de volet 04	92
3.4.4.5 : :Indicateurs de succès de volet 04 :	92
3.4.5 : Volet 05	93

3.4.5.1 : Objectif.....	93
3.4.5.2 :Tableau 3.12 :Activités prévues et chronogramme de volet 05	95
3.4.5.3 : : Résultats attendus	95
3.4.5.4 :Tableau 3.13 : Budget de volet 05 en euro	96
3.4.5.5 : : Indicateurs de succès de volet 05 :	96
3.4.6:VOLET 6.....	97
3.4.6.1: Objectif de volet 06	97
3.4.6.4 :Tableau 3.15 : Budget de volet 06 en euro	99
3.4.6.5 :Indicateurs de succès de volet 06	99
3.4.7 :Tableau 3.16 : Tableau d'estimation finale de projet en euro	100
Conclusion :	102
1. Volet 1 : Diagnostic écologique du site.....	Erreur! Signet non défini.
2. Volet 2 : Transplantation expérimentale	Erreur! Signet non défini.
3. Volet 3 : Semis de graines (“olives de mer”)	Erreur! Signet non défini.
5. Volet 5 : Sensibilisation et implication des acteurs locaux	Erreur! Signet non défini.
6. Volet 6 : Suivi scientifique et évaluation	Erreur! Signet non défini.
<u>Conclusion</u>	<u>114</u>

Introduction

Introduction

Introduction :

Les zones côtières méditerranéennes abritent des écosystèmes d'une grande richesse, parmi lesquels l'herbier de *Posidonia oceanica* se distingue comme un habitat clé, essentiel à la biodiversité benthique (Boudouresque & Meinesz, 1982). Véritable bio-indicateur environnemental, cette espèce est particulièrement sensible aux pressions anthropiques, notamment à la pollution chimique, ce qui en fait un outil fiable pour évaluer l'état écologique des littoraux (Lacaze, 1993 ; Pergent et al., 1995 ; Charbonnel et al., 2003 ; Lafabrie, 2007).

Grâce à sa capacité à bioaccumuler des contaminants tels que les métaux lourds (Hg, Pb, Cd...), les pesticides et les hydrocarbures (Baroli et al., 2001), *P. oceanica* permet une traçabilité temporelle de la pollution (Pergent, 1995). Toutefois, sa dégradation, accentuée par l'eutrophisation et les polluants, affecte l'ensemble de l'écosystème côtier, notamment les chaînes trophiques et la productivité halieutique.

Ce travail s'inscrit dans une démarche de diagnostic écologique de l'anse de Kouali (Tipaza), un site soumis à de fortes pressions anthropiques. L'étude vise à analyser la bioaccumulation de six métaux (Hg, Zn, Mn, Cu, Fe, Al) dans trois matrices : les rhizomes de *P. oceanica*, les sédiments et les gonades d'oursins (*Paracentrotus lividus*), afin d'évaluer l'état du milieu et d'identifier les sources de contamination.

Les résultats permettront de proposer des mesures de restauration adaptées, telles que la replantation, la création de zones protégées, et le suivi environnemental. En plus de compléter les données régionales sur la pollution côtière, cette étude constitue une base scientifique pour appuyer les efforts de préservation des herbiers de posidonie en Méditerranée algérienne.

Chapitre I : Généralité

1_1 Présentation de la Posidonie :

Posidonia oceanica est une plante à fleurs marine (phanérogame) appartenant aux monocotylédones. Elle résulte d'un retour évolutif au milieu marin de certaines lignées de plantes terrestres apparues au Crétacé, il y a 100–120 millions d'années, après que leurs ancêtres eurent quitté l'eau durant l'Ordovicien, il y a environ 475 millions d'années (Boudouresque & Meinesz, 1982 ; Wellman et al., 2003).

Morphologiquement, elle possède un rhizome traçant, un système racinaire développé et des feuilles rubanées regroupées en faisceaux. Sa reproduction sexuée, discrète, donne lieu en automne à une floraison suivie de fruits flottants surnommés « olives de mer ».

Sur le plan écologique, *P. oceanica* forme des herbiers denses jusqu'à 40 m de profondeur, jouant un rôle clé dans la stabilisation des sédiments, la réduction de l'érosion, la séquestration du carbone, et l'hébergement d'une biodiversité marine remarquable. Véritable espèce ingénieuse, elle est indispensable au bon fonctionnement des écosystèmes côtiers méditerranéens.



Figure 1.1: Aspect général d'un herbier à posidonie (LES PRAIRIES DE POSIDONIES
23 septembre 2019)

1_2: systématique de la Posidonie :

À l'échelle mondiale, la diversité des phanérogames marines — ou plantes à fleurs marines — est relativement limitée : on recense environ 12 genres et 59 espèces réparties dans plusieurs

Chapitre I : Généralité

familles, selon la synthèse de Green & Short (2003) . Ces angiospermes aquatiques ont colonisé les environnements marins peu profonds et jouent un rôle écologique crucial, notamment dans la stabilisation des sédiments, la productivité primaire, et le maintien de la biodiversité benthique (Waycott et al., 2009).

En mer Méditerranée, cette diversité est réduite à cinq espèces principales :

- *Cymodocea nodosa* (la cymodocée),
- *Zostera marina* (la zostère marine),
- *Zostera noltei* (la zostère naine),
- *Halophila stipulacea*, une espèce introduite d'origine indo-pacifique via le canal de Suez (espèce lessepsienne),
- et enfin *Posidonia oceanica*, l'espèce dominante et endémique, formant de vastes herbiers structurants (Boudouresque et Meinesz, 1982 ; Pergent *et al.*, 2012).

Historiquement, *Posidonia oceanica* fut initialement décrite par Carl von Linné en 1735, dans la première édition de son *Systema Naturae*, sous le nom de *Zostera oceanica*. Plus tard, en 1813, le botaniste français Alire Raffeneau Delile reclassifia l'espèce dans le genre *Posidonia*, justifiant ainsi son appellation actuelle : *Posidonia oceanica* (L.) Delile, 1813, selon les règles de la nomenclature binomiale botanique (Greuter et al., 2000)

La classification de *Posidonia oceanica* se présente comme suit :

Règne : *Plantae*

Sous règne : *Tracheobionta*

Super division : *Spermatophyta*

Chapitre I : Généralité

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous- Classe : *Alismatidae*

Ordre : *Najadales*

Famille : *Posidoniaceae*

Genre : *Posidonia*

Espèce : *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile, 1813.

1_3. Distribution de la posidonie :

La superficie totale connue des herbiers à *P. oceanica* en mer Méditerranée était de 1 224 707 ha (12 247 km²) (Telesca et al., 2015). La présence de *Posidonia oceanica* a été signalée dans 16 pays du bassin méditerranéen, dont l'Albanie, l'Algérie, la Croatie, Chypre, l'Égypte, la France, la Grèce, l'Italie, la Libye, Malte, Monaco, le Monténégro, le Maroc, l'Espagne, la Tunisie et la Turquie (Giakoumi et al., 2013).



Figure 1.2 : Distribution géographique de la Posidonie en méditerranéenne (ligne rouge)
(Vacchi et al., 2016).

La répartition de *Posidonia oceanica* en Méditerranée est strictement régie par des contraintes écologiques et hydrographiques. À l'ouest, elle s'arrête avant le détroit de Gibraltar, notamment à Calaburras (Espagne) et Melilla (Maroc), en raison de l'influence atlantique marquée par une salinité plus faible et des conditions instables (Conde Poyales, 1989). À l'est, elle est absente des côtes d'Égypte orientale, d'Israël, de Palestine et du Liban, où la turbidité, les apports fluviaux et la pollution limitent son implantation (Por, 1978 ; Lipkin, 1979).

L'espèce ne colonise ni la mer de Marmara ni la mer Noire, principalement à cause de la faible salinité et de la lumière réduite (Boudouresque & Meinesz, 1982). Elle est aussi rare dans le nord de l'Adriatique et le littoral languedocien, où l'eutrophisation, les sédiments vaseux et la pression humaine entravent sa présence (Zalokar, 1942 ; Gamulin-Brida et al., 1973 ; Pergent et al., 2012).

Espèce **stenohaline** et **photophile**, *P. oceanica* dépend d'un environnement oligotrophe, stable et lumineux, ce qui rend sa distribution particulièrement sensible aux perturbations physico-chimiques et anthropiques.

1_4: morphologie de la Posidonie

Chapitre I : Généralité

Posidonia oceanica est une phanérogame marine monocotylédone appartenant à la famille des Posidoniaceae. Elle présente une morphologie caractéristique des angiospermes marines, avec un rhizome traçant ou dressé qui permet sa propagation dans les sédiments meubles. Ce rhizome est recouvert de bases foliaires lignifiées, formant avec le temps une matre structurée composée de rhizomes, racines et matière organique accumulée (Boudouresque & Meinesz, 1982). Ses feuilles rubanées, longues de 20 à 100 cm et larges de 5 à 10 mm, sont disposées en faisceaux de 4 à 8 à l'extrémité des rhizomes. La reproduction sexuée, bien que discrète, s'effectue par floraison automnale, avec des fleurs hermaphrodites pollinisées par l'eau (*hydrophilie*), suivies au printemps de fruits flottants appelés communément « olives de mer » (Boudouresque & Meinesz, 1982). (Figure 1.3)

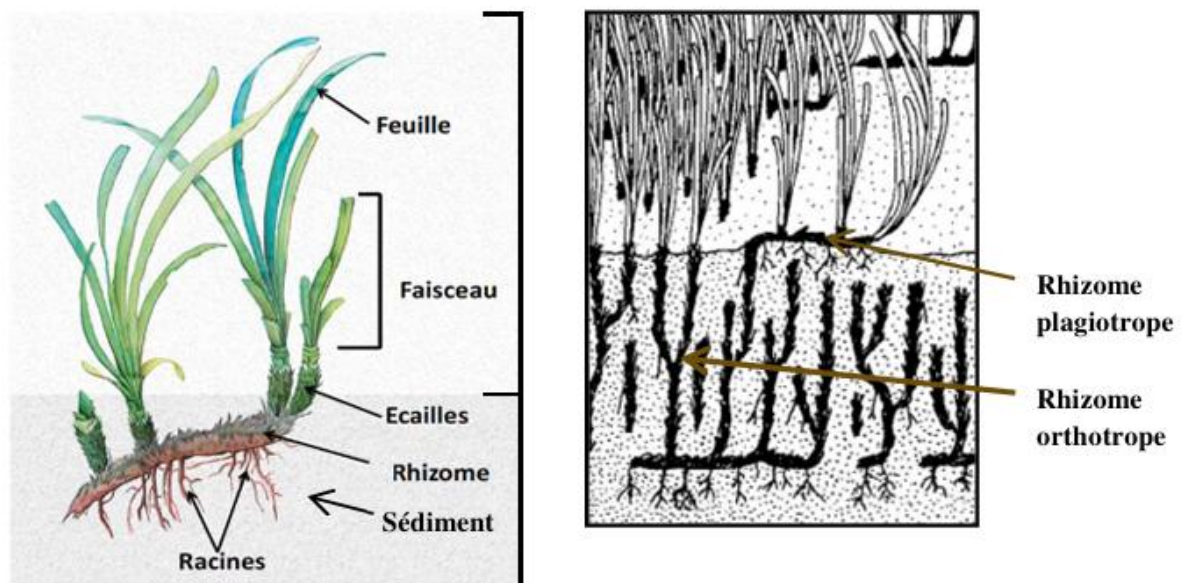


Figure 1.3 . Représentation schématique d'un herbier de posidonie et sa matre modifié d'après Abadie et al. (2016) ; (b) Différenciation des rhizomes plagiotropes et orthotropes, modifié d'après Boudouresque et Meinesz (1982).

1-5 Écologie :

La survie et le développement de *Posidonia oceanica*, dépendent de plusieurs facteurs. La répartition et la densité de la *Posidonia oceanica* sont fortement influencées par l'importance de

Chapitre I : Généralité

la lumière en tant que facteur déterminant. Est très sensible en dessous de 10 à 16% de l'irradiance de surface (Alcoverro et al., 2001 ; Ruiz et Romero, 2001). *Posidonia oceanica* réagit de manière très sensible aux fluctuations de la salinité. Cette dernière a besoin d'une salinité comprise entre 29 et 38 psu pour se développer correctement (Fernandez-Torquemad et Sanchez-Lizaso, 2005). Cette propriété peut expliquer sa disparition au niveau de l'embouchure des grands fleuves et son absence des étangs saumâtres (Boudouresque et Meneisz, 1982 ; Duarte, 2002). Selon Den Hartog (1970) la *Posidonia oceanica* se trouve dans les eaux avec des températures allant de 10,5 à 30°C, avec une croissance optimale entre 17 et 20°C. Les courants hydrodynamiques excessivement forts sont redoutés par *P. oceanica*, car les tempêtes violentes ont le potentiel d'arracher des faisceaux, certains pouvant former des boutures. Ces tempêtes peuvent également entraîner l'érosion directe de la matière organique, soit en vidant le sédiment qui la compose, affaiblissant ainsi sa structure.

1_6 : Cycle de vie

La ***Posidonia oceanica*** suit un cycle annuel. Lorsque les conditions deviennent défavorables, ses graines peuvent entrer en dormance. On observe une augmentation du nombre de feuilles par faisceau entre août et novembre, une stabilité de décembre à mai, puis une diminution à partir de juin, notamment à une profondeur de -10 m. Les feuilles atteignent leur longueur maximale entre juin et juillet, période qui correspond également au pic de croissance (Bay, 1984 ; Novak, 1984 ; Romero, 1989b ; Pergent & Pergent-Martini, 1991 ; Elkalay et al., 2003). (Figure 1.4)

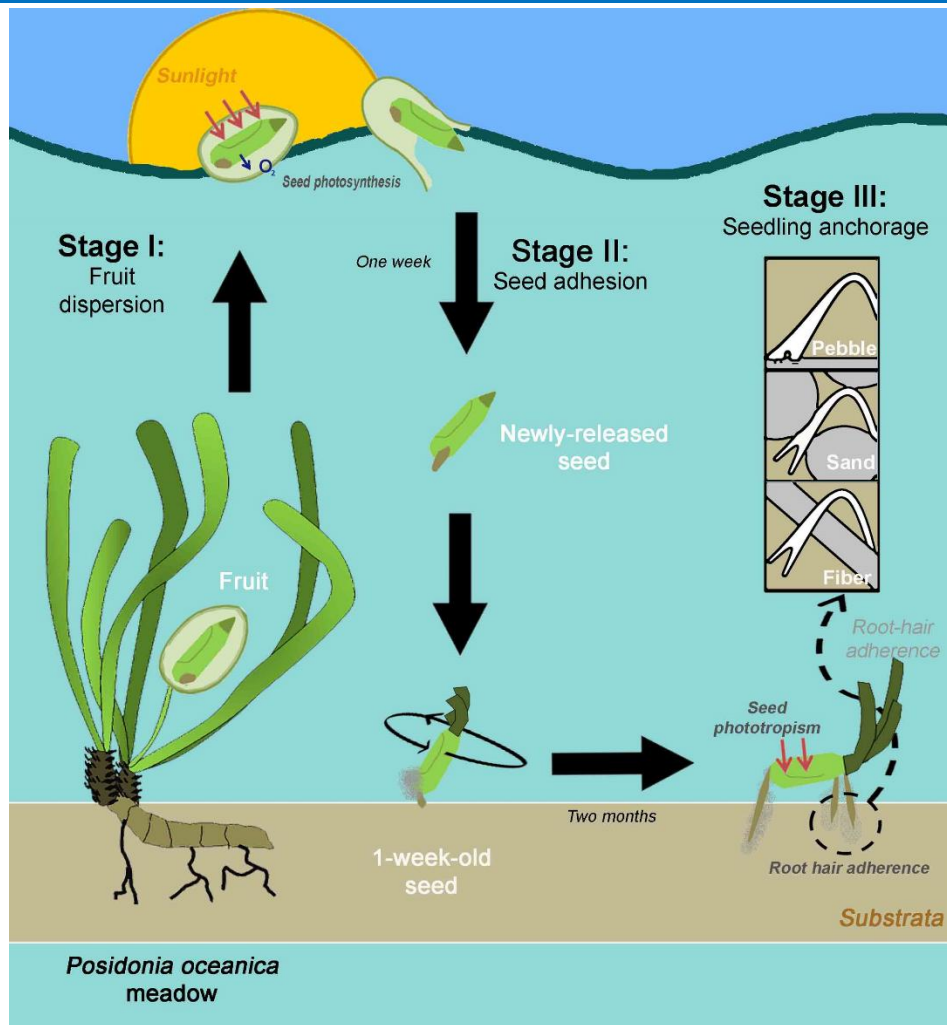


Figure 1.4: cycles de vie de *Posidonia oceanica*. (Guerrero-Meseguer et al., 2018)

1_7 : caractères diagnostiques de l'habitat :

Les feuilles de *Posidonia oceanica* hébergent une riche communauté d'épiphytes, incluant microalgues, algues rouges, brunes et vertes, ainsi que divers invertébrés sessiles (ascidies, anémones, vers tubicoles, bryozoaires, hydrozoaires, bivalves) qui profitent de l'exposition lumineuse des feuilles pour s'installer (Mazzella et al., 1989 ; Piazzini et al., 1999 ; Lepoint et al., 2000 ; Ballesteros, 1991). Cet épiphyton joue un rôle écologique important, en filtrant les particules, en modifiant la surface des feuilles, et en servant de nourriture à de nombreux invertébrés vagiles.

Parmi ces microfaunes mobiles, on retrouve des gastéropodes (*Rissoa* sp, *Tricolia* sp), amphipodes (*Gammarus* sp, *Caprella* sp), isopodes et polychètes, qui broutent les épiphytes et régulent leur biomasse, évitant une couverture excessive nuisible à la photosynthèse de la plante

Chapitre I : Généralité

(Guitouni & Palluy, 2001 ; Bianchi et al., 2004 ; Mazzella & Vismara, 1990 ; Piazzini et al., 2002).

Les rhizomes abritent une autre faune fixée, dominée par des éponges encroûtantes (*Chondrilla* sp, *Cliona* sp), qui utilisent leur surface rugueuse comme support (Pronzato et al., 1999 ; Boudouresque et al., 2006). L'ensemble de ces interactions confère à l'herbier un rôle de microhabitat complexe, soutenant à la fois la productivité primaire et secondaire, et renforçant la résilience écologique (Hemminga & Duarte, 2000 ; Gambi et al., 1992).

L'herbier constitue aussi un refuge, un lieu de reproduction et une nurserie pour de nombreuses espèces marines, y compris certaines à intérêt économique (*Sparidae*, *Serranidae*, *Labridae*, oursins...), et accueille même des espèces rares comme *Hippocampus hippocampus* (Boudouresque & Meinesz, 1982 ; Chessa et al., 1995 ; Procaccini et al., 2003 ; Lavery et al., 2003 ; Duarte, 2002 ; Gobert et al., 2005).

Bien que *P. oceanica* soit peu consommée par les herbivores (moins de 10 %), elle est tout de même broutée par l'oursin *Paracentrotus lividus*, le poisson *Sarpa salpa* et des crabes du genre *Pisa* (Velimirov, 1984 ; Boudouresque et al., 1994 ; Rico-Raimondino, 1995 ; Pergent et al., 1997). Les feuilles mortes, une fois tombées au fond, forment une litière qui nourrit divers détritivores, notamment des crustacés et des échinodermes (Zupi & Fresi, 1984 ; Pergent et al., 1997).



Figure 1.6: Invertébrés vivant comme épiphytes au niveau des rhizomes et féséaux de l'herbier à Posidonie (Benoit Chartrer, publié le 19/07/2019)

Les herbiers de Posidonie (*Posidonia oceanica*), typiques de la Méditerranée, abritent une grande diversité d'invertébrés et des vertébrés marins. Ces herbiers jouent un rôle écologique

Chapitre I : Généralité

majeur : ils offrent abri, nourriture et zones de reproduction pour de nombreuses espèces.



Figure 1.7: Quelques échinodermes vivant au niveau de l'herbier à Posidonie (**Benoit Chartrer, publié le 19/07/2019**)

Les échinodermes sont bien représentés dans les herbiers de *Posidonia oceanica*, notamment par la diversité des astérides et la forte densité des oursins. *Paracentrotus lividus*, l'oursin comestible, consomme surtout les feuilles et les organismes sessiles qui y sont fixés, tandis que *Sphaerechinus granularis* préfère les parties souterraines de la plante, comme les rhizomes et racines. Les holothuries (concombres de mer) jouent un rôle important dans le recyclage de la matière organique en ingérant des sédiments riches en débris végétaux, contribuant ainsi activement à la bioturbation du substrat.



E : bivalve *Perna nobilis*

(André Frédéric, 200. in DORIS)



F: Céphalopode : Seiche : *Sepia officinalis*

(Cassignux Gilles, 2010)'

Chapitre I : Généralité

Figure 1.8 : quelques mollusques vivant au niveau de l’herbier à Posidonie.

Parmi les mollusques emblématiques des herbiers de *Posidonia oceanica*, la grande nacre (*Pinna nobilis*) (voir Fig. 1.8) joue un rôle écologique clé. En filtrant l’eau et en consommant des algues, elle contribue à la régulation de la biomasse algale et à la clarification de l’eau, facilitant ainsi la photosynthèse des plantes marines. En tant que proie pour plusieurs prédateurs, elle s’intègre aussi dans la chaîne alimentaire de cet écosystème complexe.



H: LA SAUPE SARPA SALPA



I : LABRE VERT LABRUS VIRIDIS



G: LE SERRAN ÉCRITURE SERRANUS SCRIBA

(Benoit Chartrer, publié le 19/07/2019)

Figure 1.9: les différents poissons vivant au niveau de l’herbier à Posidonie

Les herbiers de *Posidonia oceanica* abritent une grande diversité de poissons, majoritairement carnivores ou omnivores, attirés par l’abondance de nourriture, la protection contre les prédateurs, et les conditions favorables à la reproduction et au développement des juvéniles. Parmi les espèces les plus représentatives figurent les syngnathes, les hippocampes, les rascasses brunes (*Scorpaenidae*) et les labridés, toutes étroitement liées à cet habitat (Bell & Pollard, 1989).

1_8 : Rôle et Importance :

1.8.1 : Équilibres écologiques :

L'écosystème de l'herbier de *Posidonia oceanica* revêt une importance capitale pour la vie en Méditerranée (Boudouresque & Meinesz, 1982). Par son étendue et son rôle écologique majeur, il est considéré comme l'un des écosystèmes les plus essentiels des zones littorales méditerranéennes, voire comme leur écosystème-pivot (Molinier & Picard, 1952 ; Boudouresque & Meinesz, 1982).

Véritable réservoir de biodiversité, l'herbier abrite entre 20 et 25 % des espèces animales et végétales connues en Méditerranée (Boudouresque et al., 1994), leur offrant nourriture, abri, zones de reproduction et de croissance.

Outre sa fonction d'habitat, il contribue à l'amélioration de la qualité des eaux littorales grâce à sa forte production d'oxygène (jusqu'à 14 L/j/m² ; Bay, 1978) et à son rôle de filtre naturel, retenant les particules en suspension et participant ainsi à la clarté des eaux (Blanc & Jeudy de Grissac, 1984). Pour ces raisons, il est souvent qualifié de « poumon de la Méditerranée ».

L'herbier joue également un rôle similaire à celui des oyats et des pins côtiers dans la stabilisation des dunes : il agit comme un piège à sédiments, consolidant les fonds marins. La décantation et la rétention des particules fines au sein de la matre renforcent la transparence des eaux (Boudouresque & Meinesz, 1982 ; Jeudy de Grissac & Boudouresque, 1985).

Par ailleurs, il exerce une fonction hydrodynamique déterminante : en réduisant jusqu'à 50 % de l'énergie des vagues, de la houle et des courants, il limite l'érosion des plages et stabilise les fonds sableux grâce à l'enchevêtrement dense de ses rhizomes (Boudouresque & Jeudy de Grissac, 1983 ; Jeudy de Grissac, 1984 ; Jeudy de Grissac & Boudouresque, 1985).

La régression des herbiers rompt cet équilibre naturel et accentue l'érosion des côtes, contraignant de nombreuses communes à recourir à des apports artificiels de sable pour pallier la perte de protection fournie par ces écosystèmes.

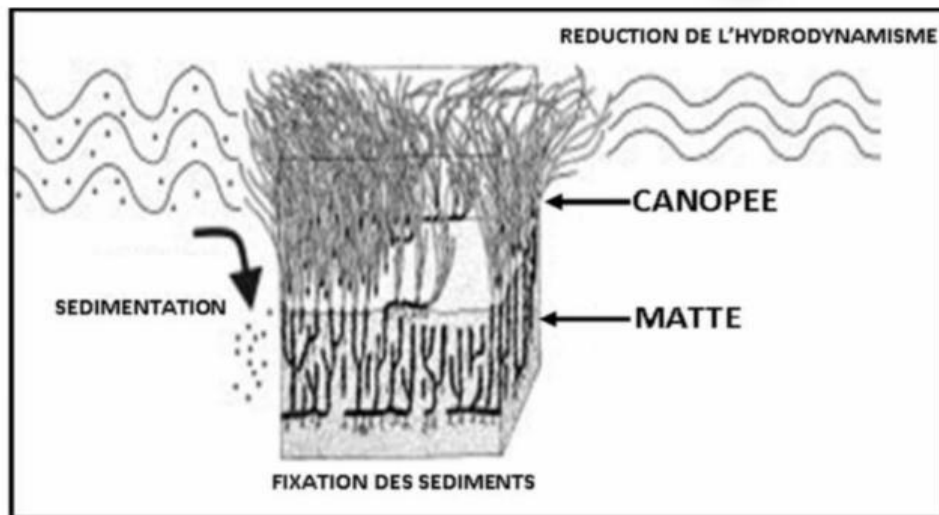


Figure 1.11: Cycle de chute des feuilles de *Posidonia oceanica* et rôle des conditions hydrodynamiques dans leur transport vers les plages (Boudouresque et Meinesz, 1982).

Les **banquettes de Posidonie** sont des amas de **feuilles mortes** accumulées et compactées sur le littoral, contenant aussi des **rhizomes dégradés** et des **sédiments** (Boudouresque et al., 2006). Ces dépôts servent d'**habitat temporaire** pour une faune et une flore adaptées à des conditions extrêmes telles que l'ensoleillement, les embruns et le sable mobile (Conservatoire du littoral et Rivages de France, 2010).

Au-delà de leur rôle écologique, les banquettes jouent un rôle protecteur en limitant l'érosion : elles amortissent l'énergie des vagues grâce à la viscosité des débris, préservant ainsi le trait de côte (Boudouresque & Meinesz, 1982). Cependant, le rechargement artificiel des plages peut provoquer une régression de l'herbier à proximité, réduisant la production de feuilles mortes et donc la formation de banquettes, ce qui accroît la vulnérabilité à l'érosion (Infantes et al., 2009). Ce cercle vicieux conduit à des interventions coûteuses et peu durables pour les collectivités littorales. (Figure 1.12)

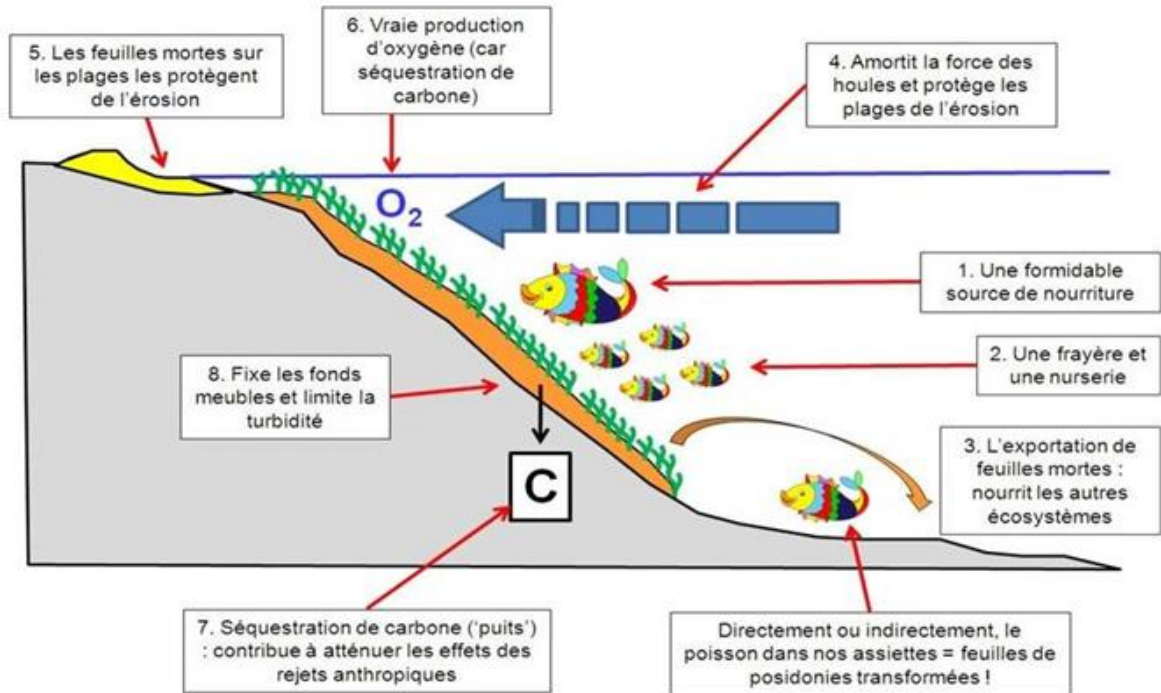


Figure 1.10: Principaux rôles écologiques de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans le fonctionnement des écosystèmes littoraux méditerranéens (GIS Posidonie, 2009 ; modifié d'après la figure originale de (Boudouresque et al., 2012).

1.8.2 : Rôle bio-indicateur :

Selon Blandin (1986), un bio-indicateur est un organisme ou un groupe d'organismes capable de refléter l'état d'un écosystème à travers des variables biologiques, permettant de détecter précocement ses modifications, qu'elles soient naturelles ou d'origine anthropique.

Posidonia oceanica remplit parfaitement ce rôle. Elle enregistre divers paramètres environnementaux tels que :

- la turbidité de l'eau, visible par la profondeur de sa limite inférieure et la densité des faisceaux,
- le niveau d'hydrodynamisme, à travers les structures érosives visibles dans la matte,
- la présence de polluants stables, via leur bioaccumulation durable,
- et les variations de salinité, notamment en cas de dessalure liée aux apports fluviaux ou souterrains.

Comme d'autres magnoliophytes, *P. oceanica* présente une bonne résistance à la contamination métallique, persistant même à proximité de sources polluées. Elle peut être maintenue en aquarium pour des expérimentations de courte durée (Ferrat et al., 2002) et possède une capacité

Chapitre I : Généralité

unique à mémoriser les concentrations anciennes de polluants dans ses tissus, grâce à la lipidochronologie, qui permet aussi leur datation (Carlotti et al., 1992).

1.9: la Posidonie en Algérie :

En Algérie, *Posidonia oceanica* occupe une place essentielle dans les écosystèmes marins côtiers. Il s'agit de la phanérogame marine la plus largement répartie le long des côtes algériennes, formant des herbiers denses et écologiquement indispensables, principalement entre 0,5 et 30 mètres de profondeur, sur les fonds sableux ou rocheux bien éclairés de l'étage infralittoral.

Cependant, une étude récente réalisée par Rabei en 2024, basant sur une recherche bibliographique, a permis de mettre en place une carte de distribution de la *P. oceanica* toute au long de la côte Algérienne (Fig).

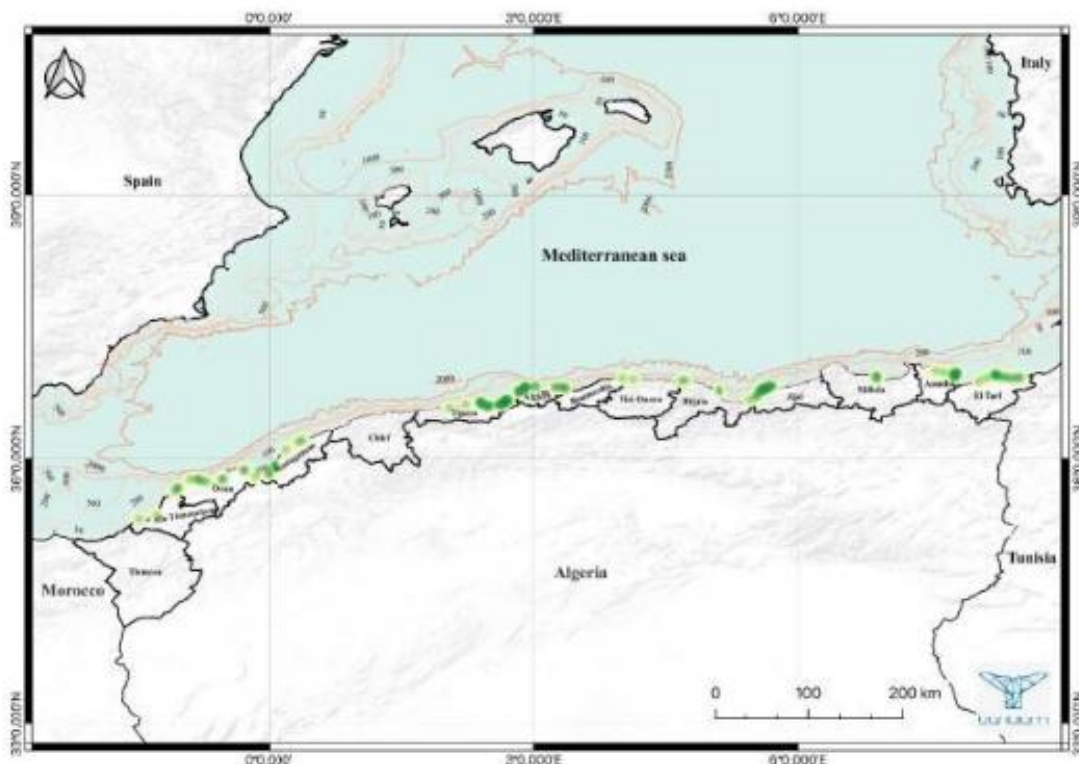


Fig . Carte de répartition des herbiers à Posidonie le long de la côte algérienne (Rabei, 2024).

1.10: Menaces pesant sur les herbiers marins en Algérie

En Algérie, les herbiers de posidonie subissent une régression préoccupante, notamment aux abords des grandes agglomérations côtières comme Alger, Annaba et Oran. Cette détérioration

Chapitre I : Généralité

est principalement liée aux pressions anthropiques croissantes (Boumaza, 2003 ; Pergent-Martini et al., 1995).

Dans la baie d'Alger, par exemple, les herbiers ne dépassent guère les 5 mètres de profondeur, un indicateur clair de leur dégradation avancée. Ce recul traduit la sensibilité extrême de *P. oceanica* aux pollutions d'origine terrestre (Boudouresque, 2003).

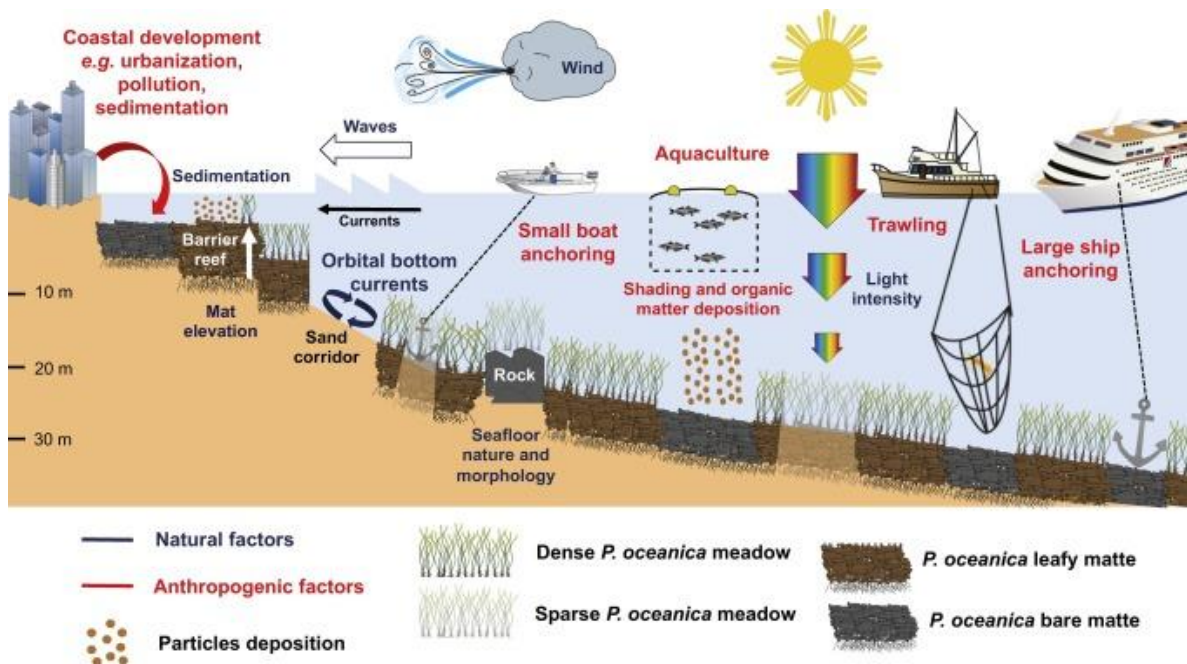


Fig . Facteurs naturels et anthropiques qui influencent les écosystèmes d'herbiers de *P. oceanica* (Abadie et al., 2018).

1.10.1. Pollution urbaine et industrielle

Les rejets urbains non traités, les effluents industriels et les déversements portuaires constituent les principales sources de contamination des herbiers de *Posidonia oceanica*. De nombreuses études ont démontré une corrélation directe entre la proximité de ces sources polluantes et la dégradation, voire la disparition, des herbiers (Bellan-Santini et al., 1994 ; Pergent & Pergent-Martini, 1995).

1.10.2 : Altération des processus physiologiques

Les polluants solubles affectent rapidement les tissus végétaux de *Posidonia oceanica*, tandis que les composés insolubles, plus stables, s'accumulent dans les sédiments et atteignent des niveaux toxiques sur le long terme. Cette contamination entraîne notamment une diminution de

Chapitre I : Généralité

la biosynthèse des pigments chlorophylliens, comme l'ont montré Augier & Maudinas (1979) le long de gradients de pollution.

L'enrichissement en nutriments favorise la prolifération d'organismes épiphytes sur les feuilles de posidonie, réduisant la lumière disponible pour la photosynthèse. Ce phénomène ralentit la croissance de la plante et diminue la densité de ses faisceaux foliaires (Boudouresque & Meinesz, 1982 ; Romero et al., 2006).

Malgré ces conditions hostiles, *Posidonia oceanica* se distingue par sa résistance à la contamination métallique et sa capacité à bioaccumuler les métaux lourds dans ses feuilles et rhizomes, de manière proportionnelle à leur présence dans l'environnement (Romero et al., 2005 ; García-Sánchez et al., 2012 ; Mateo et al., 2006). Grâce à sa structure stratifiée, ses rhizomes permettent une datation précise par lépidochronologie, fournissant une archive biologique des pollutions passées (Pergent-Martini et al., 2005 ; Ruiz et al., 2009). Ces propriétés font de cette espèce un bioindicateur fiable pour le suivi à long terme de la qualité chimique des écosystèmes marins (Klavinš et al., 2018 ; Holon et al., 2015).

1.10.3 Les explosifs :

Bien que leur usage soit interdit par la législation nationale, certains explosifs continuent d'être utilisés de manière illégale dans des contextes spécifiques. Sur les côtes de la Méditerranée nord-occidentale, on observe encore des taches circulaires de posidonie morte, vestiges d'explosions sous-marines causées par des bombes de la Seconde Guerre mondiale, des mines ou encore des pratiques destructrices comme la pêche à la dynamite. Ces activités, prohibées par toutes les lois nationales, ont des impacts dévastateurs sur les stocks halieutiques et les écosystèmes benthiques (Boudouresque, 1996).

1.10.4 La pollution biologique :

Selon Bernard et Gravez (2003) de la Fondation GIS Posidonie, la pollution biologique par des micro-organismes constitue une cause potentielle de la régression des herbiers de *Posidonia oceanica*. Ils précisent que des germes tels que bactéries, virus et champignons, issus des eaux usées et des égouts, peuvent se développer dans le milieu marin lorsqu'il présente des conditions favorables, malgré son caractère généralement défavorable à la survie des pathogènes. Cette situation met en évidence l'impact des polluants biologiques liés aux activités humaines sur la biodiversité marine et la santé des écosystèmes.

1.11 : protection des herbiers à Posidonies :

La mise en place d'une protection stricte et la diminution des pressions anthropiques représentent les stratégies les plus efficaces pour garantir la pérennité des herbiers de phanérogames marines et préserver leurs fonctions écologiques majeures, telles que la productivité côtière, la séquestration du carbone, la stabilisation des sédiments ou encore leur rôle d'habitat pour de nombreuses espèces marines (Orth et al., 2006 ; Waycott et al., 2009). Il est donc indispensable d'intégrer systématiquement ces écosystèmes au sein des aires marines protégées (AMP) afin de maintenir durablement les services écosystémiques qu'ils assurent.

Par ailleurs, il est impératif d'identifier et cartographier les herbiers à forte valeur écologique, notamment ceux qui abritent une biodiversité riche ou jouent un rôle clé dans la résilience des milieux côtiers (Turner & Schwarz, 2006).

Cependant, la capacité naturelle de régénération des phanérogames marines après dégradation est généralement faible, rendant parfois leur disparition irréversible à l'échelle humaine. Ainsi, bien que les initiatives de restauration écologique se soient multipliées ces dernières décennies, leurs résultats restent variables, selon les espèces ciblées, les conditions locales et les techniques appliquées (Fonseca et al., 1998 ; Hemminga & Duarte, 2000). Dans ce contexte, une gestion adaptative, basée sur la recherche scientifique et une surveillance continue, est indispensable pour améliorer l'efficacité et la durabilité de ces actions.

1.12: Restauration des herbiers marins :

Du fait de leur faible capacité de régénération naturelle, les herbiers détruits se reconstituent très lentement, voire pas du tout sans aide. Cette réalité a conduit au développement, à l'échelle mondiale, d'initiatives de restauration écologique de plus en plus soutenues (Fonseca, 1992 ; Hemminga & Duarte, 2000).

La restauration des herbiers de *Posidonia oceanica* regroupe l'ensemble des actions visant à réparer ou reconstituer des zones dégradées, suite à des pressions anthropiques (mouillage, dragage, pollution, urbanisation côtière...) ou à des phénomènes naturels extrêmes. Bien que cette espèce joue un rôle écologique majeur en Méditerranée, sa croissance très lente seulement quelques centimètres par an limite fortement sa capacité à recoloniser spontanément les zones endommagées (Hemminga & Duarte, 2000). Ainsi, sans intervention, certaines zones peuvent rester dénudées pendant des décennies, voire de manière irréversible.

Chapitre I : Généralité

La restauration écologique devient alors indispensable lorsque les processus naturels de régénération sont absents ou trop lents. Elle vise à reconstituer un habitat fonctionnel et stable, en restaurant non seulement les structures physiques (plantes, rhizomes, sédiments), mais aussi les fonctions écologiques telles que la reproduction, la filtration de l'eau et la séquestration du carbone.

1.12.2_ historique de la restauration des herbiers à Posidonie :

Les premières initiatives de restauration des herbiers de *Posidonia oceanica* ont émergé dans les années 1990 en Méditerranée, à une période où la dégradation de ces habitats devenait préoccupante. Ces projets pionniers étaient toutefois souvent limités par un manque de connaissances écologiques précises et par des ressources financières insuffisantes (Fonseca et al., 1998 ; Hemminga & Duarte, 2000). La croissance lente de la posidonie, de seulement quelques centimètres par an, rend sa régénération naturelle difficile, renforçant la nécessité d'interventions humaines structurées.

Avec l'avancée des connaissances scientifiques, des techniques de restauration mieux adaptées aux contraintes biologiques de l'espèce ont été développées. L'un des exemples les plus emblématiques est le projet REPIC (*RE*staurer la *Posidonie Impactée par les anCres*), lancé en 2019 par Andromède Océanologie. Ce programme a permis la replantation de fragments de posidonie sur des sites endommagés de la Méditerranée française (Beaulieu-sur-Mer, Golfe Juan, Villefranche-sur-Mer), atteignant un taux de survie de 80 % (Fondation de la Mer, 2023 ; Mer et Marine, 2023).

Soutenu par la Fondation de la Mer, l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse et CDC Biodiversité, ce projet s'inscrit dans le cadre du programme Nature 2050, visant à restaurer les écosystèmes dégradés face aux impacts du changement climatique (CDC Biodiversité, 2022). Aujourd'hui, la restauration des herbiers de posidonie bénéficie d'un encadrement scientifique renforcé et d'un soutien institutionnel et citoyen croissant.

1.12.3. Les types de restauration des herbiers à *Posidonia oceanica*

La restauration des herbiers de *Posidonia oceanica*, repose sur deux approches principales : la restauration passive et la restauration active. Ces stratégies, souvent complémentaires, sont choisies en fonction du degré de dégradation, de la résilience écologique du site et des objectifs de gestion fixés (Boudouresque et al., 2006 ; Van Katwijk et al., 2016).

Chapitre I : Généralité

Tableau 01 : comparaison entre la restauration passive et la restauration active

Critère	Restauration Passive	Restauration Active
Définition	Laisser l'écosystème se régénérer naturellement, sans intervention humaine directe.	Intervention humaine active pour accélérer la récupération de l'écosystème.
Coût	Faible (peu ou pas de dépenses).	Élevé (matériel, main-d'œuvre, plantations, etc.).
Temps de récupération	Long (dépend de la résilience naturelle).	Plus rapide (grâce aux actions entreprises).
Intervention humaine	Minimale (protection, suppression des perturbations).	Intensive (reboisement, réintroduction d'espèces, etc.).
Exemples	<ul style="list-style-type: none"> - Abandon de terres agricoles. - Protection d'une zone dégradée contre les perturbations. 	<ul style="list-style-type: none"> - Plantation d'arbres. - Réintroduction d'espèces animales. - Correction des sols (dépollution, fertilisation).
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Respect des processus naturels. - Moins coûteux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Résultats plus rapides. - Contrôle accru des espèces réintroduites.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Récupération lente. - Risque d'invasion par des espèces non désirées. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts élevés. - Risque d'échec si mal planifié.
Cas d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> - Écosystèmes résilients. - Zones peu dégradées. 	<ul style="list-style-type: none"> - Écosystèmes très dégradés. - Besoin urgent de restauration.



Chapitre 2
Matériel et méthode

Chapitre II : Matériel et méthode

2.1. Présentation de site d'étude :

L'anse de Kouali, anciennement appelée « ferme Luncky », se situe à l'ouest du village C.E.T de Tipaza, au cœur de la baie de Bou-Ismaïl, à environ 70 km à l'ouest d'Alger. Cette baie, orientée sud-ouest / nord-est, est délimitée à l'est par le cap Ras-Acruta, à l'ouest par le massif du Chenoua, au sud par la plaine de la Mitidja et au nord par la mer Méditerranée. Elle couvre une superficie d'environ 350 km², présente une ouverture maritime de 10 km et s'étend longitudinalement de 2°25' Ouest à 2°55' Est.

Le plateau continental y varie selon les zones, atteignant 11 km de large à l'embouchure de l'oued Mazafran, et se réduisant à 4 km près du massif du Chenoua (Leclaire, 1972).

L'anse de Kouali couvre environ 5 km² et reçoit les eaux de plusieurs petits cours d'eau :

- l'oued Gasbayan à l'ouest,
- un cours d'eau central reliant l'oued Seris à l'oued Hadjidjid,
- un ravin situé à l'est.

Un goulet naturel protège l'anse des houles venues du nord, tandis que sa géologie particulière promontoire rocheux en grès calcaire et récif-barrière de *Posidonia oceanica* crée une zone à faible hydrodynamisme, favorable à l'accumulation sédimentaire (Boumazza, 1993).

2.2. : justification de choix de zone d'étude

Le choix de l'anse de Kouali comme site d'étude repose sur plusieurs critères scientifiques et écologiques. D'une part, cette anse constitue une zone de référence écologique au sein de la baie de Bou-Ismaïl, en raison de son état de conservation relativement intact face aux pressions anthropiques. Elle fait partie des rares secteurs encore peu touchés par la pollution et les dégradations environnementales (Grimes, 2004).

D'autre part, la zone se distingue par une grande diversité de milieux naturels et de paysages, ainsi que par la présence d'espèces et de biocénoses à haute valeur patrimoniale, dont certaines sont endémiques ou menacées. Parmi les formations écologiques remarquables, on note les herbiers de *Posidonia oceanica*, formant des récifs structurants, les trottoirs à Vermets, et les forêts sous-marines à *Cystoseira* (Bamahammed, 2012).

Chapitre II : Matériel et méthode

La région se caractérise également par une grande richesse sédimentologique et biologique, accueillant des espèces marines inscrites sur la Liste rouge PNUE/UICN (AGIS Posidonie, 1990) et à l'Annexe II du Protocole ASP, ce qui renforce sa valeur écologique (Boumaza, 1995 ; Grimes, 2011 ; Mangos & Claudot, 2013, cités dans Boukouet, 2015).

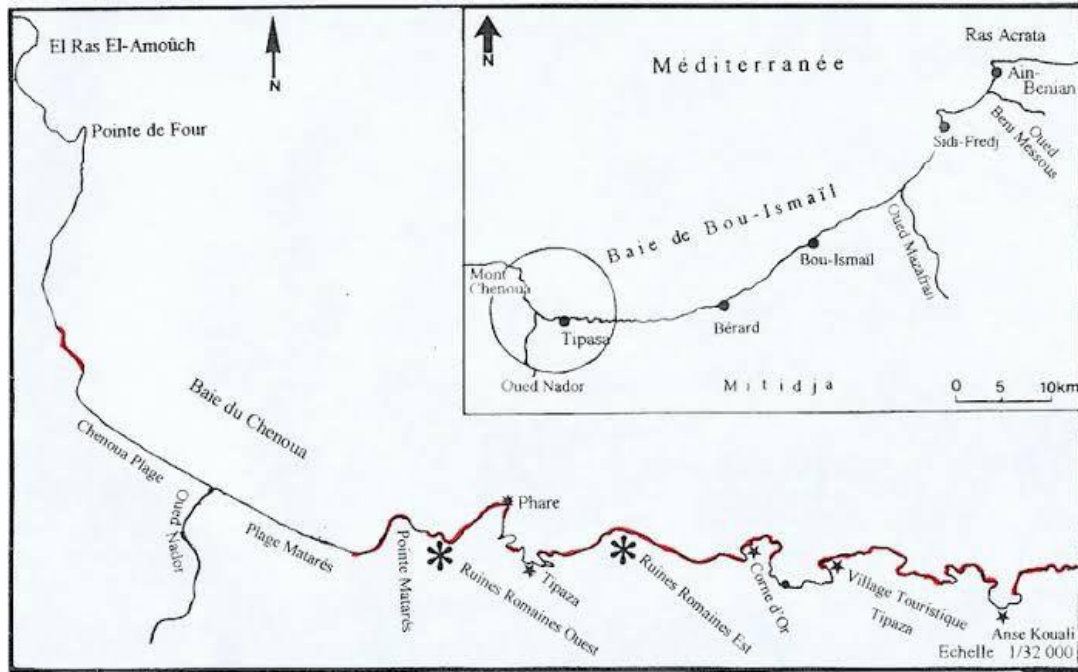


Figure 2.1 : localisation géographique de la zone d'étude

2.3 : les données climatiques de la baie de bou-ismaïl

2.3.1. La houle

La houle désigne l'oscillation de la surface libre de l'eau, généralement générée par des vents lointains. En raison de l'orientation particulière de la baie de Bou-Ismaïl, les houles hivernales, principalement issues de l'ouest et du nord-ouest, frappent la côte de façon quasi perpendiculaire, entraînant une remise en suspension des sédiments. Ces houles présentent une fréquence d'occurrence de 30 % et une hauteur significative souvent supérieure à 1 mètre.

En période estivale, les houles proviennent majoritairement du nord-est. Leur incidence, plus tangentielle au rivage, génère un courant de dérive littorale orienté de l'est vers le sud-ouest, favorisant une accumulation progressive des sédiments en bordure côtière, et un engraissement du rivage. Ces houles sont moins énergétiques, avec une fréquence moyenne de 23 % et une hauteur inférieure à 1 mètre (BR/IK, 1989) (voir Figure 2).

Chapitre II : Matériel et méthode

2.3.2 Les courants marins :

Le littoral algérien est influencé par un courant marin principal d'origine atlantique, circulant d'ouest en est le long de la côte. Ce courant côtier, guidé par la force de Coriolis et les vents dominants, reste proche du rivage, avec une vitesse moyenne de 0,5 à 1 nœud sur le littoral algérois. Toutefois, des contre-courants locaux, orientés du nord-est vers le sud ou le sud-ouest, peuvent se former ponctuellement (Degiovanni, 1973).

Dans le cas particulier de l'anse de Kouali, la présence d'un goulet naturel favorise une concentration de l'énergie hydrodynamique, ce qui accentue localement l'intensité du courant. Ce phénomène induit une érosion du substrat, notamment au niveau des herbiers de *Posidonia oceanica*, menant à la formation d'un chenal parallèle à la direction des courants (Clairefond & Jeudy de Grissac, 1999). L'action continue des courants de fond y engendre également des rides sédimentaires (ripple-marks), bien visibles dans le chenal de la passe.

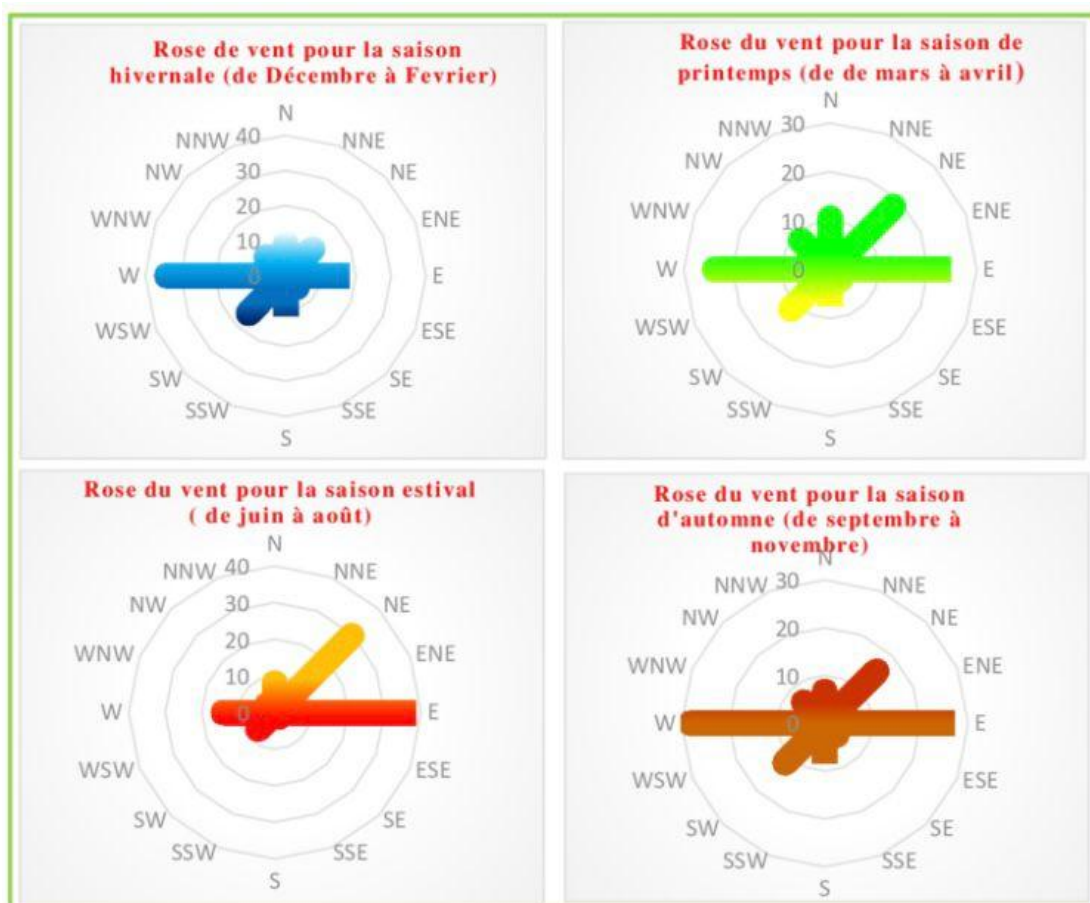


Figure 2.2: fréquences saisonnières de la houle de la baie de bou_ismaïl

2.4: Caractéristiques géologiques du site d'étude

À l'échelle de l'anse de Kouali, le littoral présente une topographie basse et une structure principalement rocheuse. Cette anse est localisée à la base d'un ensemble géologique plio-quadernaire connu sous l'appellation de « hourrelet sahélien ». Ce dernier repose sur un substratum constitué essentiellement de grès dunaire (RR1., 2/07 cité dans Zaranche, 2013).

2.4.1 : Réseau hydrographique

Le système hydrographique aboutissant à l'anse de Kouali est alimenté par plusieurs entités : à l'ouest, on retrouve l'oued Gasbayan, tandis qu'en position centrale, un petit cours d'eau assure la liaison entre l'oued Seris et l'oued Hadjidjid. À l'est, le réseau est complété par un ravin.

2.4.2 : Sédimentologie de la baie de Bou-Ismaïl

D'après Grimes (2004), l'analyse des dépôts sédimentaires de la baie de Bou-Ismaïl révèle une forte hétérogénéité des fonds marins. Cette étude a permis d'identifier neuf faciès sédimentaires distincts : sables fins, sables fins envasés, vases sableuses, sables graveleux, graviers envasés, sables grossiers mêlés à de fins graviers, ainsi que des vases pures. Par ailleurs, des formations rocheuses isolées sont également observées dans certains secteurs (voir Figure 2.3).

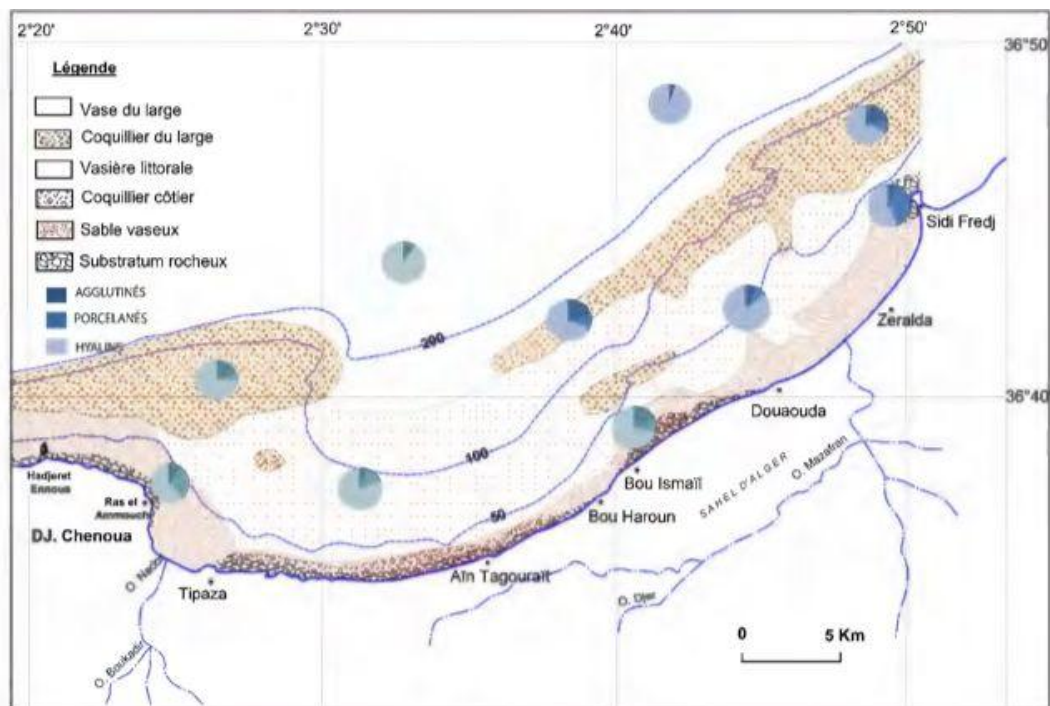


Figure 2.3: Sédimentologie de la baie de Bou Ismaïl (I.:M, 1989 in Senouci, 2015).

2.4.3: Bathymétrie de la baie de Bou-Ismaïl

La courbe bathymétrique des 200 mètres est généralement considérée comme la limite de la marge continentale algérienne, marquant la transition vers les plaines abyssales. Dans la baie de Bou-Ismaïl, cette marge présente une largeur moyenne de 24 km, atteignant un maximum de 55 km à son point le plus large.

Le plateau continental y reste relativement étroit, avec une largeur maximale de 13 km au niveau du mont Chenoua, tandis qu'il se réduit à seulement 3 km entre Sidi Fredj et Alger. Il affiche une pente modérée, oscillant généralement entre 2 et 3 %, avec une rupture marquée autour de l'isobathe des 100 mètres. Cette morphologie est localement modifiée par la présence de pointements rocheux, notamment au large de Mazafran et de Bou-Ismaïl (Bachari Houma, 2009).

2.5 Climatologie de l'anse de Kouali

La région de l'anse de Kouali, située sur le littoral central algérien dans la wilaya de Tipaza, bénéficie d'un climat méditerranéen subhumide, selon la classification bioclimatique de Emberger. Ce climat se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides, typiques de la façade nord de l'Algérie.

Les vents dominants soufflent principalement de l'Ouest et du Nord-Ouest en hiver, tandis qu'en été, ce sont les vents d'Est à Nord-Est qui prédominent. Ces régimes influencent à la fois les températures et la dynamique atmosphérique et océanographique locale (Zitouni et al., 2021).

Les températures de surface de la mer dans la baie de Bou-Ismaïl, incluant l'anse de Kouali, varient entre 21 °C et 27 °C, avec une moyenne annuelle de 24,36 °C. En profondeur, les variations sont plus faibles, allant de 15 °C à 150 m à 16,9 °C à 100 m, indiquant une stratification thermique stable (Bachari Houma, 2009 ; Zitouni et al., 2021).

2.6 : L'échantillonnage

L'échantillonnage a été conduit durant la période de [21/04/2025], coïncidant avec la saison humide afin de capter les variations potentielles liées aux conditions climatiques et hydrologiques de la région. La zone d'étude couvre l'anse de Kouali, située dans la baie de Bou-Ismaïl (wilaya de Tipaza), caractérisée par une forte pression anthropique due aux rejets domestiques, agricoles et industriels. Un total d'une seule station d'échantillonnage a été défini selon une grille spatiale régulière, couvrant les zones littorales, intermédiaires et offshore. Cette maille a été établie à partir d'une carte bathymétrique détaillée, en tenant compte : – de la morphologie du fond marin, – de la circulation côtière locale, – et de la répartition des sources potentielles de pollution (oueds, zones portuaires, rejets directs, urbanisation, etc.).

Les prélèvements ont été réalisés sur 3 stations à différentes profondeurs définie au préalable, avec des échantillons collectés selon la matrice et la finalité des analyses :

1. Rhizomes de *Posidonia oceanica*, plante marine endémique de Méditerranée, largement utilisée comme bioindicateur.
2. Sédiments de surface issus de la matre de posidonie.
3. Gonades de l'oursin *Paracentrotus lividus*, espèce benthique reconnue pour son rôle indicateur de la contamination des organismes marins.
4. Paramètres physico-chimiques, bactériologiques et nutriments :
5. Eau de mer : mesure in situ de la température, du pH, de la salinité et de l'oxygène dissous à l'aide d'un dispositif multiparamètre portable.
6. L'ensemble des stations prévues dans le plan d'échantillonnage a été échantillonné conformément au protocole établi.

Choix des stations :

Le choix des stations a été fondé sur 4 critères principaux :

Accessibilité logistique, permettant une navigation sécurisée et répétable à chaque campagne.

- Représentativité écologique, incluant des zones avec différents types de substrats, profondeurs et couvertures biologiques.

Chapitre II : Matériel et méthode

- Proximité des sources de pollution, telles que les embouchures d'oueds (notamment l'oued Mazafran), les zones portuaires, ou les rejets domestiques identifiés dans les études antérieures (Foudil Bouras et al., 2024 ; Ben Yahia, 2017).
- Compte tenu des limitations de temps, notre étude s'est focalisée sur une seule station de mesure, choisie en fonction de son niveau de pollution particulièrement élevé par rapport aux autres sites.

L'ensemble des échantillons a été conservé dans des conditions strictes de température (4 °C) et d'obscurité, et transporté rapidement vers le laboratoire pour les analyses physico-chimiques, bactériologiques et métalliques.

Type et profondeur de prélèvement :

Les prélèvements ont été effectués à deux profondeurs :

- en surface (0–1 m) : pour évaluer l'impact direct des rejets atmosphériques et de surface,
- en profondeur (jusqu'à [5] m) : pour analyser la composition des masses d'eau profondes et les dépôts sédimentaires.

Matériel utilisé :

- Pour l'eau : des flacons en plastique ont été utilisés pour les prélèvements en colonne d'eau, permettant une fermeture à profondeur définie sans contamination de surface pour faire les analyses des sels nutritifs.
- La valise multi_paramètres pour les analyses de (pH, température, l'oxygène dissous d'eau de mer).

2.6.2.1 l'échantillon d'eau :

Mesure des paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques tels que la salinité, le pH, la teneur en oxygène dissous (O₂) et la température ont été mesurés directement sur les sites de prélèvement. Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'appareils portatifs préalablement étalonnés avant chaque série de mesures. Ces instruments, conçus pour une utilisation en milieu naturel, permettent une acquisition rapide et fiable des données, même en conditions de terrain ou en milieu marin.

Salinité

La salinité, exprimée en unités PSU (Practical Salinity Unit), a été déterminée à l'aide d'un conductimètre portable de la valise multi_paramètre conçu pour mesurer la conductivité de l'eau et en déduire la salinité.



Figure 2.6 : un conductimètre pour mesurer la salinité

pH

La mesure du pH de l'eau a été réalisée par méthode électrochimique à l'aide d'un pH-mètre . L'instrument a été étalonné avant chaque série de mesures à l'aide de solutions tampons de pH 4, 7 et 9, afin d'assurer la fiabilité des résultats obtenus sur le terrain.



Figure 2.7 : un Ph_mètre de la valise multi_paramètre

Oxygène dissous

La concentration en oxygène dissous a été mesurée directement sur le terrain par méthode électrochimique, choisie pour sa rapidité et sa simplicité de mise en œuvre. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un oxymètre, préalablement calibré avant chaque utilisation. Les résultats sont exprimés en mg/L, avec une précision d'environ 0,1 %.

La température :

La température de l'eau a été mesurée automatiquement à l'aide des différents appareils utilisés (conductimètre, oxymètre et pH-mètre), chacun étant doté d'un capteur intégré. Les relevés sont

Chapitre II : Matériel et méthode

exprimés en degrés Celsius (°C). Aucune différence significative n'a été constatée entre les valeurs obtenues avec ces différents instruments.

2.6.2.2 les sédiments : prélèvements manuels et des flacons avec les étiquettes a permis le prélèvement de sédiments de surface (0–5 m) pour les analyses des métaux lourds

Pour les paramètres biologiques : prélèvements manuels des faisceaux de Posidonie avec des rhizomes et des oursins à plancton a (0 _10 m) de profondeur.

2.6.3 Prélèvement conservation des échantillons

Préparation et déroulement de la campagne d'échantillonnage

Avant le début de la campagne de terrain, une phase de prospection a été menée pour rassembler des informations environnementales et logistiques sur les zones d'étude. Cette étape préparatoire a permis d'anticiper les contraintes du milieu et de définir une stratégie de prélèvement adaptée. Les échantillons ont été collectés entre avril et juin 2025, une période favorable à l'étude des contaminants en milieu côtier méditerranéen, tant du point de vue biologique qu'océanographique.

2.6.4 Paramètres analysés en laboratoire

La pollution du milieu marin par les métaux lourds d'origine anthropique représente une menace encore plus préoccupante que celle liée aux hydrocarbures ou aux éléments radioactifs. Ces métaux peuvent se disperser dans la colonne d'eau sous forme dissoute ou particulaire, puis être bioassimilés par les organismes marins. Parmi eux, le cuivre, dont l'origine anthropique est bien documentée, constitue, aux côtés du plomb, du zinc et du cadmium, une source de risque majeure pour les écosystèmes.

Cette étude s'intéresse principalement à l'analyse de certains éléments métalliques tels que l'aluminium, le fer, le cuivre, le zinc et le manganèse. Ces analyses sont effectuées dans trois matrices : les rhizomes de *Posidonia oceanica*, les sédiments superficiels de l'herbier, ainsi que les gonades de l'oursin *Paracentrotus lividus*, espèce herbivore se nourrissant des feuilles de posidonie. En complément, pour la matrice eau, des paramètres bactériologiques et les concentrations en sels nutritifs sont également pris en compte.

2.7 au laboratoire

2.7.1 Étape de dé conjugaison des échantillons :

Séparer les substances associées à des structures cellulaires complexes ou à des macromolécules biologiques.

Les tissus biologiques contiennent des composés tels que les enzymes, pigments ou hormones qui peuvent être chimiquement ou physiquement liés à des macromolécules (protéines, polysaccharides, lipides). Cette étape vise à rompre ces associations pour libérer les analytes d'intérêt (comme les métaux) ou éliminer les interférents, en vue d'obtenir une matrice simplifiée, mieux adaptée à l'analyse.

2.7.2 Préparation physique : découpe et conditionnement

Uniformiser les échantillons afin de faciliter leur traitement, leur conservation, et leur analyse ultérieure.

- Fragmentation : les échantillons sont découpés en morceaux de petite taille, ce qui améliore la rapidité et l'uniformité de la congélation.
- Utilisation de contenants en verre : le verre étant chimiquement neutre, il réduit les risques de contamination ou de réactions parasites.
- Étiquetage rigoureux : essentiel pour assurer une traçabilité fiable des échantillons, notamment dans le cadre de comparaisons analytiques ou de recherches publiées.

2.7.3 Lyophilisation (ou déshydratation par congélation-sublimation)

Retirer l'eau contenue dans les échantillons tout en préservant la structure chimique des composants analytiques.

La lyophilisation s'effectue en trois phases successives :

- Congélation à très basse température (-40 à -80 °C),
- Sublimation sous vide, permettant à l'eau de passer directement de l'état solide à l'état gazeux,
- Dessiccation finale, qui élimine les traces d'humidité restantes.

Chapitre II : Matériel et méthode

Cette méthode est essentielle pour préserver les composés sensibles et éviter toute dégradation chimique des éléments à analyser, notamment les métaux.

2.7.4 Broyage en poudre fine

Assurer l'homogénéité de l'échantillon en réduisant sa granulométrie.

Le broyage permet d'obtenir une poudre homogène, favorisant une distribution uniforme des éléments dans la matrice. Cela optimise les réactions chimiques (comme la digestion acide) et garantit la reproductibilité des mesures, puisque chaque aliquote prélevée aura une composition équivalente.

2.7.5 : Minéralisation à blanc (échantillon témoin)

Vérifier l'absence de contamination provenant des réactifs ou du matériel utilisé.

Un échantillon blanc est préparé sans matière biologique ; il contient uniquement les réactifs utilisés dans le protocole (ex. : acides) et est traité dans les mêmes conditions que les échantillons. La présence d'éléments métalliques dans ce blanc indique une contamination du matériel ou des produits chimiques, pouvant fausser les résultats expérimentaux.

2.7.6 : Minéralisation des échantillons

Détruire la matière organique afin d'extraire les éléments métalliques sous forme soluble.

Les échantillons sont soumis à une digestion acide, généralement avec de l'acide nitrique ou un mélange $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, sous chauffage (plaque chauffante ou four à micro-ondes). Ce traitement permet de convertir la matière organique en composés minéraux et de libérer les métaux dans une solution aqueuse limpide, prête pour l'analyse.

2.7.7 : Analyse par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA)

Déterminer la concentration des éléments métalliques présents dans les échantillons.

La SAA repose sur la capacité des atomes à absorber une lumière spécifique à une longueur d'onde caractéristique. Chaque métal absorbe une énergie lumineuse propre à sa nature. En mesurant cette absorption, il est possible de quantifier avec précision la teneur en métaux comme le cuivre (Cu), le plomb (Pb), le zinc (Zn), le cadmium (Cd), le fer (Fe) ou le manganèse

2.8 : Dosage des métaux lourds

2.8.1: Préparation des échantillons pour lyophilisateur

La méthode de traitement adoptée est celle préconisée par le programme PNUE/AIEA (1984, 1985, 1986), comprenant plusieurs étapes :

Préparation initiale : Une quantité d'environ 100 g de sédiment humide est prélevée et étalée dans une boîte de Petri. Les rhizomes et les gonades d'oursins sont soigneusement séparés.



Figure 2.8: Représentation des préparatifs des échantillons précédant la lyophilisation.

2.8.2: Lyophilisation :

Les échantillons sont d'abord congelés, puis lyophilisés, c'est-à-dire déshydratés par sublimation à basse température ($-55\text{ }^{\circ}\text{C}$) et sous vide (0,1 bar) pendant 48 heures. Après 24 heures, ils sont brièvement remués à l'aide d'une spatule en acier inoxydable afin d'assurer une déshydratation homogène. Cette méthode est privilégiée par rapport au séchage à l'étuve, qui peut entraîner la perte de métaux volatils tels que le mercure.



Figure 2.9: illustration des Échantillons en cours de lyophilisation dans l'appareil.

Chapitre II : Matériel et méthode

2.8.3 : Pesée : Les échantillons lyophilisés sont pesés, et leur poids sec (PS) est noté.

2.8.4 : Broyage et tamisage :

Les sédiments lyophilisés sont broyés avec un mortier en porcelaine, puis tamisés à l'aide d'un tamis de maille 250 μm . La fraction fine ($\leq 250 \mu\text{m}$) est conservée dans des piluliers en verre. Pour les matrices biologiques, le broyage est effectué à l'aide d'un mortier en agate afin d'éviter toute contamination métallique.



Figure 2.10: Illustration des étapes de broyage et de tamisage des sédiments, ainsi que du broyage de la matière biologique.

2.8.5 : Homogénéisation des échantillons

Le sédiment marin est composé de particules de tailles et de natures variées, chacune présentant une affinité différente pour les métaux. Afin d'assurer une répartition homogène de ces particules dans l'échantillon et ainsi garantir la représentativité des analyses, la fraction lyophilisée ou tamisée est soumise à un processus d'homogénéisation pendant 48 heures.

2.8.6: Nettoyage du matériel

Étant donné que les métaux lourds se présentent sous forme de traces dans le milieu marin, le risque de contamination lors des étapes de préparation est élevé si des protocoles stricts de propreté ne sont pas appliqués. Ainsi, tous les instruments, contenants et verreries utilisés pour le traitement, l'analyse et le stockage des échantillons doivent être soigneusement nettoyés selon des procédures spécifiques.



2.8.7. Minéralisation des échantillons

La minéralisation, ou digestion acide, permet d'extraire les métaux lourds présents dans les échantillons en décomposant la matière organique et minérale afin de solubiliser les éléments recherchés. Cette opération, potentiellement dangereuse, nécessite l'utilisation d'une hotte aspirante et d'équipements de protection individuelle adéquats (masque, lunettes, gants), conformément aux normes de sécurité en laboratoire (Pirata, 1979).

Pour limiter toute contamination, les analyses de métaux lourds sont réalisées au laboratoire après minéralisation des échantillons dans le laboratoire de ENSSMAL. Quatre protocoles de digestion acide distincts ont été appliqués en fonction des métaux ciblés et du type de matrice étudiée (sédiment ou matériel biologique).

2.8.7.1: Une minéralisation à blanc

Une minéralisation à blanc a été réalisée en parallèle de chaque série d'échantillons afin de vérifier l'absence de contamination durant les étapes de digestion acide. Cette étape est essentielle pour garantir la fiabilité des mesures des concentrations en métaux lourds, notamment pour les éléments présents à l'état de traces.



Figure 2.11: Minéralisation à blanc effectuée dans le cadre des analyses des métaux lourds.

Points essentiels à respecter lors des étapes de minéralisation

- Préparation des blancs : Pour chaque série analytique, des blancs réactifs doivent être élaborés. Leur préparation suit exactement le protocole appliqué aux échantillons, à l'exception de l'ajout de matière : aucun échantillon n'est introduit dans les flacons destinés aux blancs.

- Étalonnage : Les solutions standards destinées à l'établissement de la courbe de calibration doivent être préparées en utilisant les mêmes réactifs que ceux employés pour la digestion des échantillons, afin d'assurer la cohérence et la fiabilité des analyses.

- Conservation des extraits : Une fois les échantillons digérés, les solutions obtenues peuvent être conservées au réfrigérateur (+4 °C) pendant plusieurs jours avant l'analyse, sans altération significative.

2.8.8 : Pesée :

Une masse de 0,5 g d'échantillon sec est prélevée avec précision à l'aide d'une balance analytique, puis introduite dans une bombe en Téflon d'un volume de 50 mL

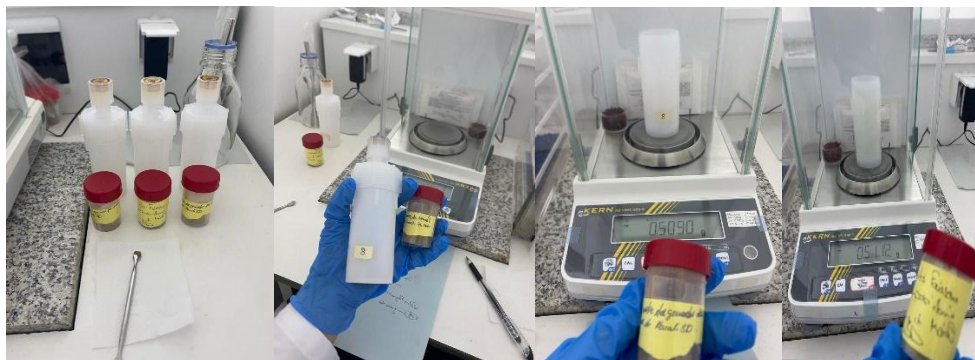


Figure 2.12 : Illustrations de la pesée précise de 5 g réalisée pour chaque échantillon avant analyse.

2.8.9. Minéralisation des sédiments et des matrices biologiques pour l'analyse des métaux lourds

Chaque échantillon sec, qu'il s'agisse de sédiment ou de matière biologique, est préparé en prélevant 0,5 g de matière et en l'introduisant dans une bombe en Téflon de 50 mL. Pour les sédiments, la digestion est réalisée en ajoutant successivement 7 mL d'un mélange d'acides (eau régale, soit HCl et HNO₃ dans un rapport 3:1) puis 4 mL d'acide nitrique concentré. En revanche, pour les matrices biologiques, seuls 4 mL d'acide nitrique sont utilisés. Après fermeture hermétique des récipients, une phase de pré-digestion à température ambiante est observée pendant une heure. Le chauffage est ensuite adapté à la nature de l'échantillon : les sédiments sont chauffés à 120 °C pendant 2 h 30, tandis que les échantillons biologiques sont maintenus à 90 °C durant 3 heures, le tout sur une plaque chauffante équipée d'un bloc en aluminium pour assurer une répartition homogène de la chaleur. Après refroidissement complet à température ambiante, les bombes sont ouvertes sous une hotte aspirante afin de limiter les risques liés à l'émission de vapeurs acides. Les digestats sont ensuite transférés dans des tubes en polypropylène de 50 mL et dilués à l'aide d'eau ultrapure jusqu'au volume final. Une décantation est nécessaire avant l'analyse : elle peut être effectuée par repos à froid pendant la nuit ou accélérée par un passage de 30 minutes dans un bain à ultrasons.



Figure 2.13 : Illustrations de l'étape de minéralisation acide appliquée aux échantillons en vue de leur préparation à l'analyse.

Digestion des sédiments et des matrices biologiques en vue de la détermination des métaux (Al, Fe, Cu, Zn, Mn) par spectrométrie d'absorption atomique (AAS)

Chapitre II : Matériel et méthode

Principe général :

Les échantillons (sédiments et matrices biologiques) sont soumis à une digestion acide dans des récipients en Téflon fermés. La minéralisation du matériel biologique est effectuée à l'acide nitrique concentré, tandis que les sédiments, en raison de leur teneur élevée en silicates, nécessitent l'ajout d'acide fluorhydrique pour assurer une décomposition complète de la matrice.

Dans certains cas, notamment pour l'extraction ciblée de métaux spécifiques, l'acide fluorhydrique peut être remplacé par un mélange d'acides plus doux, tel que l'eau régale.

Réactifs utilisés :

- Acide nitrique (HNO_3 , 65 %, qualité pour analyse, conforme ISO – Merck)
- Acide chlorhydrique (HCl , 30 %, qualité suprapur – Merck), utilisé pour les sédiments
- Eau ultrapure déionisée (résistivité $> 18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$, système Milli-Q – Millipore)

Matériel requis :

- Récipients de digestion en PTFE (Téflon) avec bouchons hermétiques (50 mL, Nalgene)
- Tubes gradués en polypropylène avec bouchons vissés (50 mL, Sarstedt), préalablement nettoyés conformément aux procédures standardisées (voir annexes)
- Spatules en plastique, nettoyées selon les mêmes procédures
- Balance analytique de précision (Sartorius MC-2105)
- Micropipette à volume variable (Finnpipette)
- Plaque chauffante (modèle Ceran 500, 22SR) équipée d'un bloc en aluminium

2.8.10: Analyse des échantillons par spectrométrie d'absorption atomique (SAA)

Principe général :

La spectrométrie d'absorption atomique est une technique d'analyse élémentaire permettant de quantifier la concentration d'un métal donné à partir de l'absorption d'un rayonnement lumineux spécifique à cet élément. Chaque métal présente une longueur d'onde d'absorption maximale caractéristique. Dans ce protocole, les éléments étudiés et leurs longueurs d'onde d'absorption sont les suivants :

Chapitre II : Matériel et méthode

- Aluminium (Al) : 309,3 nm
- Fer (Fe) : 248,3 nm
- Cuivre (Cu) : 324,8 nm
- Zinc (Zn) : 213,9 nm
- Manganèse (Mn) : 279,5 nm

Lorsqu'un atome est excité par un rayonnement, il peut absorber une énergie correspondant à une fréquence spécifique, propre à son identité. L'intensité du rayonnement absorbé est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon, selon la loi de Beer-Lambert

$$I = I_0 \times e^{-kLc}$$

où :

- I_0 : intensité initiale du rayonnement
- I : intensité du rayonnement transmis
- k : coefficient d'absorption spécifique
- L : longueur du trajet optique
- C : concentration de l'élément analysé*

Description de l'instrumentation :

L'appareil utilisé est un Perkin Elmer® Analyst 703, intégrant :

- Une source lumineuse (lampe à cathode creuse) spécifique à chaque métal à analyser, émettant une radiation de fréquence adaptée.
- Un générateur d'atomes pour volatiliser et atomiser les échantillons.
- Un monochromateur à double faisceau : l'un des faisceaux passe à travers l'échantillon (ou la flamme), l'autre sert de référence. Cette configuration permet de corriger les variations d'intensité de la source lumineuse.
- Un système de détection basé sur un photomultiplicateur, combiné à des amplificateurs linéaires et logarithmiques.
- Le tout est piloté par le logiciel Winlab 32, optimisé pour l'analyse atomique de haute performance.

Chapitre II : Matériel et méthode

Méthodes d'analyse spécifiques :

•Pour les éléments (Al, Fe, Cu, Zn, Mn) : L'analyse est effectuée par nébulisation dans une flamme, générée par un mélange d'air-acétylène (C_2H_2), via un brûleur laminaire à fente (15 cm).

•Exception : l'analyse de l'aluminium nécessite l'utilisation de protoxyde d'azote (N_2O) associé à de l'acétylène, en raison de la température plus élevée requise pour l'atomisation.

Étalonnage :

La méthode d'étalonnage repose sur l'utilisation exclusive de standards. Les courbes d'étalonnage (voir annexes 1) sont préparées peu de temps avant les analyses à partir de solutions mères ayant une concentration de 1000 mg/L, pouvant être conservées pendant un an. Les courbes obtenues (voir les annexes 1)

2.9. Dosage des sels nutritifs :



Figure 2.14: les échantillons d'eau dans l'anse de kouali.

2.9.1: méthode d'analyse les sels nutritifs :

Le dosage des sels nutritifs est réalisé à l'aide d'un système automatisé d'analyse en flux continu de type SKALAR SAN++ (troisième génération), reposant sur la méthode colorimétrique. Les procédures appliquées suivent les protocoles standards fournis par le fabricant SKALAR (voir Figure 11.3).

Le fonctionnement de cet appareil repose sur un principe dynamique : une veine liquide contenant l'échantillon est entraînée en continu par une pompe péristaltique à travers un circuit

Chapitre II : Matériel et méthode

spécifique à chaque paramètre analysé (nitrate, phosphate, ammonium, etc.). À différents points du circuit, des réactifs chimiques appropriés sont introduits pour produire des réactions colorées caractéristiques du composé ciblé. Ces réactions se déroulent en ligne, au fur et à mesure de l'avancée de l'échantillon dans le système.

L'analyse est ainsi menée de manière séquentielle et automatisée, ce qui permet de traiter rapidement un grand nombre d'échantillons avec une cadence élevée et une reproductibilité satisfaisante. Chaque chaîne d'analyse est optimisée pour le paramètre mesuré, assurant précision et fiabilité.

L'ensemble du dispositif est entièrement piloté par un ordinateur central équipé d'un logiciel dédié, qui supervise l'ensemble du processus : gestion des échantillons, introduction des réactifs, étalonnage, acquisition des signaux optiques et calcul des concentrations.

À l'issue de l'analyse, le logiciel génère automatiquement un fichier numérique complet, contenant les résultats quantitatifs pour chaque échantillon, ainsi que l'ensemble des métadonnées et paramètres de l'analyse (heure, température, volumes, identifiants, etc.). Ce système garantit une traçabilité complète et une standardisation des résultats dans le cadre du suivi environnemental ou de la surveillance de la qualité de l'eau.

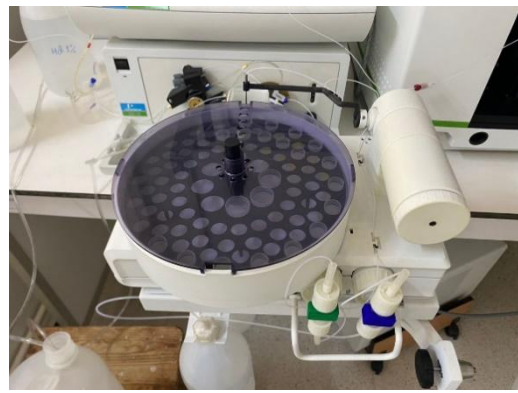
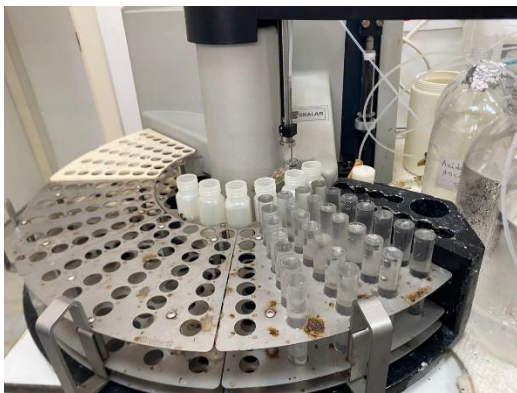




Figure 2.15. Auto Analyser San Plus (SKALAR"1998) (www.skalar.fr/pr_san.hti)

2.9.2: Principe général du dosage des sels nutritifs

La méthode employée pour la détermination des sels nutritifs tels que l'ammonium (NH_4^+), les nitrites (NO_2^-), les nitrates (NO_3^-), les orthophosphates (PO_4^{3-}) et les silicates (SiO_4^{4-}), repose sur une réaction chimique colorimétrique.

Dans des conditions précises — impliquant notamment la température, le pH, et parfois la présence de catalyseurs — ces composés réagissent avec des réactifs spécifiques pour former des complexes colorés. Ces complexes présentent une absorption caractéristique de la lumière à une longueur d'onde donnée (λ), mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre (voir les Annexes)

La quantité de lumière absorbée par la solution dépend directement de la concentration du sel nutritif en question. Plus la solution est concentrée, plus la coloration est intense, et plus l'absorption lumineuse est élevée.

Cette absorbance (A), aussi appelée densité optique (D.O.), obéit à la loi de Beer-Lambert, exprimée par la relation suivante :

où :

$$A = \text{D.O.} = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) = \varepsilon \cdot l \cdot c$$

- A ou D.O. : absorbance de la solution (sans unité),
- I_0 : intensité de la lumière incidente (avant traversée de la solution),
- I : intensité de la lumière transmise (après traversée),

Chapitre II : Matériel et méthode

- ϵ : coefficient d'absorption molaire (en $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$), dépendant de la nature du composé, de la température et de la longueur d'onde utilisée,
- l : longueur du trajet optique dans la cuve (en cm),
- C : concentration de l'espèce absorbante (en $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$).

Ainsi, en mesurant l'absorbance à une longueur d'onde spécifique, on peut déterminer la concentration du sel nutritif présent dans l'échantillon, à condition d'avoir préalablement établi une courbe d'étalonnage à partir de standards de concentrations connues.

2.9.3: Analyse automatique des sels nutritifs

L'analyse des sels nutritifs est réalisée à l'aide d'un système automatisé en flux continu. Chaque paramètre (nitrites, nitrates, orthophosphates, silicates) suit une réaction colorimétrique spécifique, permettant une détection spectrophotométrique précise à une longueur d'onde donnée. Voici le principe de chaque dosage :

A_ Dosage des nitrites (NO_2^-)

Les ions nitrite réagissent en milieu acide ($\text{pH} \approx 2$) avec le sulfanilamide, formant un complexe diazoté instable. Ce dernier s'associe ensuite à la N-(1-naphtyl)-éthylènediamine pour produire un colorant azoïque rose-rouge. Cette molécule présente une absorption maximale de la lumière à 540 nm. L'intensité de la coloration est directement proportionnelle à la concentration en nitrites dans l'échantillon (Bendschneider & Robinson, 1952). Ce procédé est simple, rapide et très sensible, ce qui en fait une méthode de référence en milieu marin.

B. Dosage des nitrates (NO_3^-)

Le dosage des nitrates s'effectue en deux étapes. Tout d'abord, les ions nitrate sont réduits en nitrites à l'aide d'une colonne réductrice contenant du cadmium activé au cuivre (Wood et al., 1967). Cette réaction s'effectue sous un flux contrôlé, assurant une conversion efficace sans altération de l'échantillon. Les nitrites nouvellement formés sont ensuite analysés par la même méthode colorimétrique que celle utilisée pour les nitrites d'origine.

Pour déterminer la concentration réelle en nitrates, il suffit de soustraire la concentration des nitrites initiaux (mesurés sans passage sur la colonne) de celle obtenue après réduction totale (Rodier et al., 1996). Cette approche indirecte garantit une excellente sensibilité et une grande fiabilité analytique.

C. Dosage des orthophosphates (PO_4^{3-})

Les orthophosphates présents dans l'échantillon réagissent avec le molybdate d'ammonium en milieu acide, en présence de tartrate d'antimoine potassium et à une température contrôlée d'environ 40 °C (souvent maintenue au bain-marie). Cette réaction produit un complexe phosphomolybdique, qui est ensuite réduit par l'acide ascorbique pour former un composé de couleur bleu intense, absorbant la lumière à 880 nm (Murphy & Riley, 1962). Ce dosage est particulièrement précis et sensible, permettant de détecter les faibles concentrations de phosphates caractéristiques des eaux oligotrophes.

D. Dosage du silicium dissous (sous forme de silicates)

Dans l'eau de mer, le silicium dissous est principalement présent sous forme d'acide orthosilicique (H_4SiO_4), représentant environ 95 % des formes silicatées (Aminot & Chaussepied, 1983). Pour le dosage, cet acide réagit également avec le molybdate d'ammonium en milieu acide, produisant un complexe silicomolybdique. Ce complexe est ensuite réduit par l'acide ascorbique, ce qui génère une coloration bleue, mesurée par absorbance à 810 nm. Pour éviter les interférences des ions phosphate, souvent présents en solution, on ajoute de l'acide oxalique, qui inhibe leur réactivité sans perturber celle des silicates.

E. Étalonnage

L'étape d'étalonnage est indispensable pour garantir la fiabilité des mesures. Elle repose sur la préparation, pour chaque paramètre analysé, d'une solution mère concentrée, à partir de laquelle sont élaborées une série de solutions étalons (ou solutions filles) de concentrations connues et croissantes (voir les Annexes).

Ces solutions étalons sont ensuite analysées par l'auto-analyseur. Pour chacune, l'intensité du signal obtenu (généralement mesurée par la hauteur de pic sur le chromatogramme ou le signal colorimétrique) est enregistrée par le logiciel.

Le système informatique construit alors automatiquement les courbes d'étalonnage en traçant la relation entre la concentration des standards et leur réponse instrumentale correspondante. Ces courbes, généralement linéaires, permettent d'établir l'équation de calibration qui sera ensuite utilisée pour déterminer avec précision la concentration des échantillons inconnus.

Chapitre III :
Résultat et discussion

3.1 : Pollution de l'anse de Kouali

La région de l'anse de Kouali subit une pression anthropique croissante, se traduisant par diverses formes de pollution affectant la qualité des eaux côtières et des écosystèmes marins locaux.

L'une des principales sources de contamination provient des rejets domestiques non traités, émis par les agglomérations urbaines voisines ainsi que par les infrastructures touristiques implantées sur le littoral. Ces eaux usées sont, dans la majorité des cas, directement déversées dans la mer sans épuration préalable, ce qui contribue significativement à la dégradation de l'environnement côtier (Ben Yahia, 2017 ; ONAS, 2019 ; Foudil Bouras et al., 2024).

En parallèle, les cours d'eau côtiers, notamment l'oued Mazafran, acheminent divers polluants issus des zones agricoles et urbaines vers le milieu marin. Ces oueds collectent non seulement les eaux de ruissellement chargées en engrais et pesticides provenant des terres agricoles, mais aussi des effluents industriels et ménagers. Des analyses menées dans cette zone ont révélé des teneurs élevées en matière organique (DCO, DBO5), en oxygène dissous, et parfois en contaminants métalliques, notamment durant la saison estivale où les apports hydriques naturels sont faibles et l'impact anthropique plus marqué (Foudil Bouras et al., 2024).

Par ailleurs, l'agriculture intensive, utilisant massivement des intrants chimiques, contribue à l'eutrophisation des eaux littorales. À cela s'ajoutent les pressions liées à la pêche artisanale non encadrée, ainsi que l'urbanisation anarchique du littoral, qui limite considérablement les capacités de résilience des écosystèmes locaux (Rouibah et al., 2005).(figure 3.1)

À l'issue de notre étude, bien que conduite dans un temps restreint, les résultats d'analyses physico-chimiques et écotoxicologiques réalisées sur l'eau, les sédiments et le biote de la plage de l'Anse de Kouali ont mis en évidence une contamination significative. Les concentrations mesurées en métaux lourds et en nutriments suggèrent une dégradation de la qualité du milieu, pouvant engendrer des déséquilibres écologiques majeurs, affecter la faune marine, et potentiellement impacter la santé humaine par bioaccumulation au sein de la chaîne trophique.

Les résultats obtenus au cours de cette étude sont présentés et analysés dans les sections suivantes:



Figure 3.1 : la pollution plastique de la plage de kouali.

Les observations de terrain réalisées sur la plage de l'Anse de Kouali en (21/04/2025) révèlent une situation de pollution alarmante. Les deux photographies prises sur le site montrent une accumulation dense et étendue de déchets solides, principalement composés de plastiques (sacs, bouteilles, emballages), de verre (notamment des bouteilles brisées), ainsi que de divers débris d'origine anthropique tels que des textiles, du papier, des canettes ou des objets en métal. Ces déchets sont éparpillés sur toute la zone sableuse, souvent entremêlés avec des résidus naturels (algues mortes, bois flotté), ce qui témoigne d'une absence de nettoyage régulier et d'une gestion inefficace des déchets à l'échelle locale. Cette pollution visuelle n'est pas seulement inesthétique, elle reflète également une menace réelle pour les écosystèmes littoraux : les plastiques, en particulier, peuvent libérer des substances toxiques dans le sol et l'eau, perturber les habitats naturels, et être ingérés par la faune marine, entraînant des effets écotoxiques directs. De plus, l'accumulation de ces déchets augmente le risque de formation de microplastiques, susceptibles de s'introduire dans la chaîne alimentaire. Cette dégradation

hapitre III : résultat et discussion

environnementale visible vient ainsi corroborer les résultats analytiques obtenus lors de notre étude, confirmant que la plage de l'Anse de Kouali est exposée à une pollution significative, à la fois chimique et physique, qui nécessite une attention urgente en termes de gestion et de remédiation environnementale.

3.2 : Les résultats :

3.2.1 : Les résultats physico-chimiques

Paramètre	Valeur
Ph	8.285
Température	20.8
Salinité	37.3
Oxygène dissous (mg/l)	6.31

Le graphe représentatif :

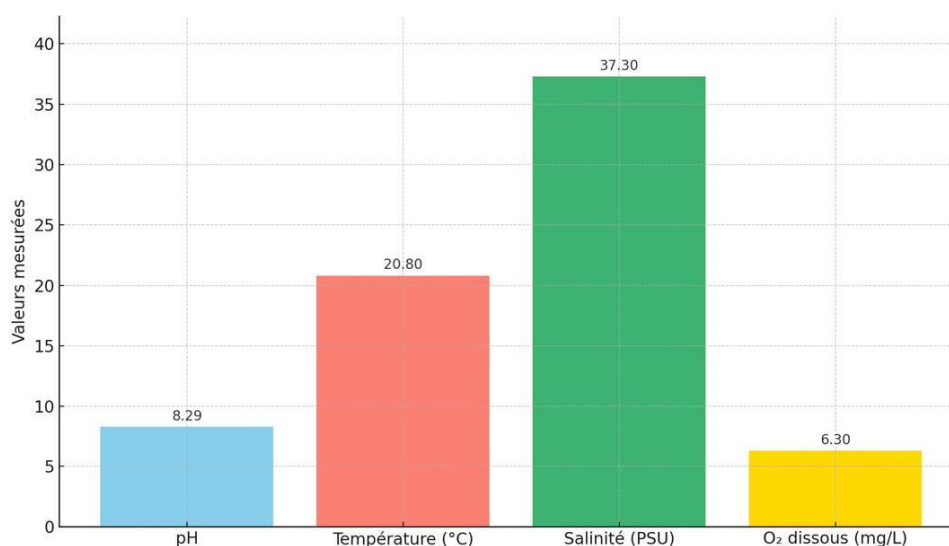


Figure 3.2 : paramètre physico-chimique de l'eau de l'anse de kouali

Interprétation de graphe :

Les mesures physico-chimiques effectuées sur l'eau de mer de la plage de l'Anse de Kouali ont révélé un pH de 8,285, une température de 20,8 °C, une salinité de 37,3 PSU et une concentration en oxygène dissous d'environ 6,3 mg/L dans des conditions normales de saturation. Ces résultats traduisent un milieu légèrement basique, caractéristique des environnements marins, et une salinité élevée conforme aux standards méditerranéens (Millero, F. J., 2013. *Chemical Oceanography*, 4th ed., CRC Press). Cependant, toute divergence entre la valeur mesurée de l'oxygène dissous et la saturation théorique pourrait témoigner d'une perturbation environnementale, notamment due à la dégradation de matière organique ou à une pollution diffuse (Fletcher, S. W., 1999. *Marine Pollution and Human Health*, *BMJ*, 319(7209), 721–724).

3.2.2 :- les résultats des sels nutritifs mesurés au l'laboratoire :

Identity1	NO2 $\mu\text{mol/l}$	NO3 $\mu\text{mol/l}$	PO4 $\mu\text{mol/l}$	NH4 $\mu\text{mol/l}$	SIO2 $\mu\text{mol/l}$
1GHAL	0,0424	0,1194	0,2670	7,6215	2,3807
2	0,1150	0,2753	0,3024	6,5173	2,7232
3	0,1853	0,4129	0,3290	5,7556	2,3204

Les graphiques représentant les concentrations de chaque sel nutritif (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , SiO_2) pour les trois sites d'échantillonnage. Chaque graphique permet de visualiser facilement les variations spatiales et de repérer les éventuels gradients de pollution affectant la Posidonie.

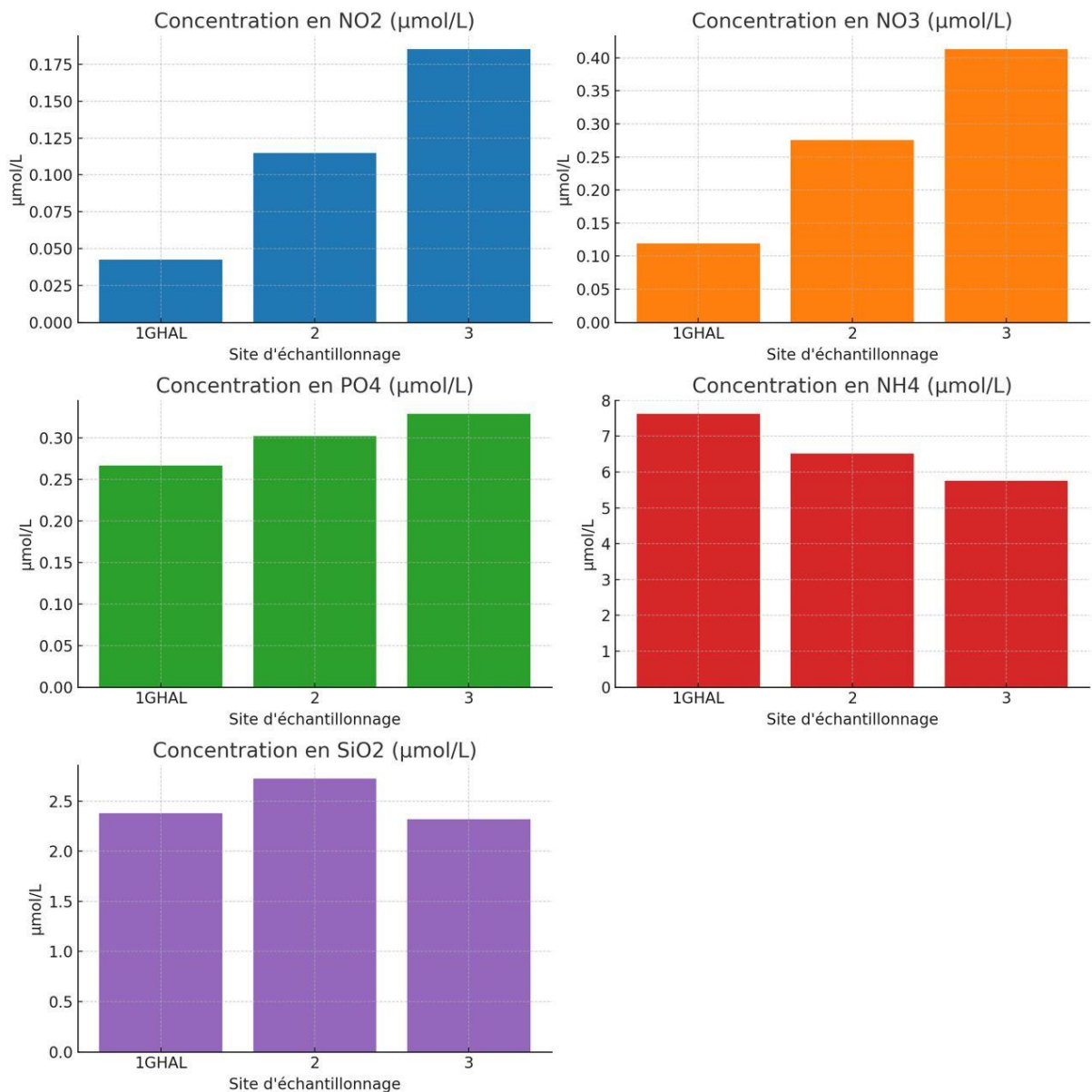


Figure 3.3 : les graphiques représentant les concentrations de chaque sel nutritif .

Interprétation des résultats des sels nutritifs par paramètre :

a) Ammonium (NH₄⁺)

- Les concentrations sont relativement élevées (5,76 à 7,62 $\mu\text{mol/L}$), surtout dans l'échantillon 1GHAL.
- Une teneur élevée en ammonium est souvent un indicateur de pollution organique (effluents domestiques, rejets urbains ou aquaculture), car c'est le produit primaire de la dégradation de la matière organique.

hapitre III : résultat et discussion

- La décroissance NH_4^+ de 1GHAL vers 3 pourrait indiquer une dilution progressive ou un gradient d'éloignement de la source de pollution. (Billen, G., Garnier, J., & Lassaletta, L. (2013). The nitrogen cascade from agricultural soils to the sea)

b) Nitrates (NO_3^-) et Nitrites (NO_2^-)

- Les concentrations augmentent progressivement du site 1GHAL vers le site 3.
- Cela peut être interprété comme le résultat d'une nitrification active : l'ammonium est oxydé en nitrites puis en nitrates, processus typique dans des environnements marins bien oxygénés.
- NO_2^- reste faible, ce qui est normal car c'est un intermédiaire transitoire.
- L'augmentation du NO_3^- peut aussi révéler une contamination diffuse en azote inorganique, typique des eaux côtières soumises à l'eutrophisation. (APHA (American Public Health Association) (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition.)

c) Phosphates (PO_4^{3-})

- Les teneurs restent relativement stables mais légèrement croissantes de 1GHAL à 3.
- Des concentrations supérieures à $0,2 \mu\text{mol/L}$ sont considérées comme modérées à élevées en milieu marin. Cela peut indiquer une pollution phosphorée, probablement d'origine domestique ou agricole.
- Les valeurs observées sont suffisantes pour favoriser la croissance d'algues opportunistes, en synergie avec l'azote. (Froelich, P. N. (1988). Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries. *Limnology and Oceanography*, 33(4), 649–668.)

d) Silicates (SiO_2)

- Les valeurs sont comprises entre $2,32$ et $2,72 \mu\text{mol/L}$, sans variation marquée.
- Le silicium est un nutriment essentiel pour les diatomées, mais il n'est pas un bon indicateur de pollution en milieu côtier.
- Des valeurs faibles à modérées comme ici sont typiques des zones où le phytoplancton consomme rapidement les silicates, ce qui pourrait être compatible avec un état eutrophisé.

Interprétation écologique globale

- Les données suggèrent une influence anthropique mesurable sur le site 1GHAL, caractérisée par une forte concentration en ammonium.
- Le profil NH_4^+ élevé, suivi d'une augmentation des NO_3^- et PO_4^{3-} dans les autres échantillons suggère un gradient d'auto-épuration ou de dispersion de la pollution.
- La combinaison $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- + \text{PO}_4^{3-}$ à des niveaux modérément élevés laisse penser à un risque d'eutrophisation, ce qui pourrait perturber l'écosystème benthique et la santé de la *Posidonia oceanica*.
- La Posidonie peut accumuler les nutriments dans ses tissus, servant ainsi de bioindicateur de la qualité des eaux côtières : les valeurs observées sont compatibles avec une contamination modérée à localement forte, en particulier pour l'azote.

Les résultats obtenus révèlent une accumulation notable de nutriments inorganiques dans les tissus de *Posidonia oceanica*, traduisant une exposition significative aux apports anthropiques. Les concentrations élevées en ammonium (jusqu'à $7,62 \mu\text{mol/L}$) dans le site 1GHAL témoignent d'une pollution organique active, probablement liée à des rejets domestiques ou à une activité anthropique localisée. L'évolution croissante des teneurs en nitrates et phosphates vers les autres stations suggère un processus de nitrification en cours et une dispersion des nutriments dans le milieu, marquant ainsi un gradient de pollution. Ces conditions sont caractéristiques d'un début d'eutrophisation côtière, susceptible d'altérer l'équilibre écologique de l'herbier. En effet, un enrichissement excessif en azote et phosphore peut induire une prolifération d'algues opportunistes ou d'épiphytes, réduisant la lumière disponible pour la photosynthèse des feuilles de *Posidonia oceanica* et compromettant ses capacités de croissance, de reproduction et de stockage de carbone. De plus, une telle pression trophique peut fragiliser la résilience de l'herbier face aux autres stress environnementaux (turbidité, anoxie, hydrodynamisme). (Gobert, S., Sartoretto, S., Rico-Raimondino, V., Andral, B., Chéry, A., Lejeune, P., & Boissery, P. (2009). Assessment of the ecological status of Mediterranean French coastal waters as required by the European Water Framework Directive: the use of *Posidonia oceanica* meadows. *Marine Pollution Bulletin*, 58(11), 1727–1733.)

La présence simultanée de concentrations modérées à élevées en NO_3^- , NH_4^+ et PO_4^{3-} souligne ainsi une situation préoccupante pour cet écosystème méditerranéen protégé, justifiant la mise en place d'un suivi régulier et multidisciplinaire pour évaluer l'évolution de l'état écologique et identifier les sources précises de pollution. (Howarth, R. W., et al. (2000). Nutrient Pollution of Coastal Rivers, Bays, and Seas. *Issues in Ecology*, 7)

hapitre III : résultat et discussion

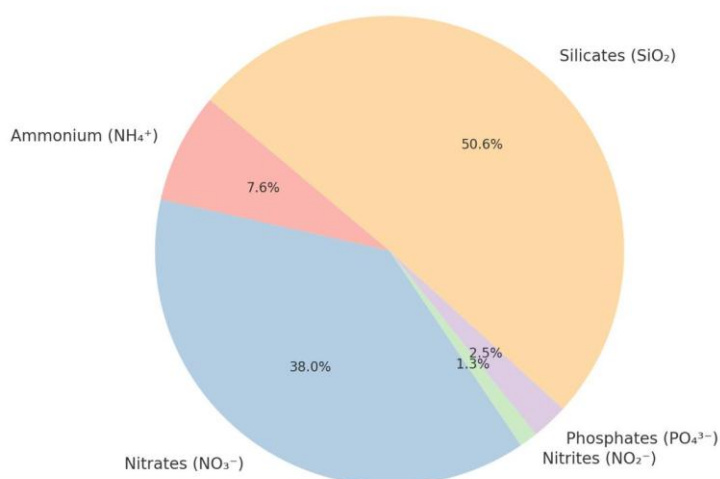
- un tableau récapitulatif des valeurs moyennes ou seuils des normes des principaux sels nutritifs (en $\mu\text{mol/L}$) dans les eaux de surface de la mer Méditerranée (UNEP/MAP (2004). Transboundary Diagnostic Analysis for the Mediterranean Sea. United Nations Environment Programme / Mediterranean Action Plan.) :

Tableau 3.1 : un tableau des normes des sels nutritifs en mer méditerranéenne

Paramètres	Formule chimique	Norme moyenne en $\mu\text{mol/L}$
Ammonium	NH_4^+	0,1 – 1,0
Nitrates	NO_3^-	0,2 – 2,0
Nitrites	NO_2^-	0,01 – 0,1
Phosphates	PO_4^{3-}	0,02 – 0,3
Silicates	SiO_4^{4-} (SiO_2)	0,5 – 5,0

La comparaison graphique des concentrations mesurées des nutriments dans l'anse de Kouali avec les normes estimées pour les eaux de surface de la mer Méditerranée.

Répartition des concentrations moyennes des nutriments dans les eaux de surface de la mer Méditerranée



chapitre III : résultat et discussion

Figure 3.4 : répartition des concentrations moyennes des nutriments dans les eaux de surface de la mer méditerranéenne

La répartition naturelle des nutriments en Méditerranée, dominée par les silicates et les nitrates, avec de très faibles concentrations en ammonium, phosphates et nitrites, caractérise un état peu pollué et stable.

Toute déviation de ce profil (notamment une élévation de NH_4^+ , PO_4^{3-} , NO_2^-) doit être considérée comme un indice de pollution locale, souvent liée à l'activité humaine (urbanisation, agriculture, stations d'épuration inefficaces. (Froelich, P. N. (1988). Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: A primer on the phosphate buffer mechanism. *Limnology and Oceanography*, 33(4), 649–668.)

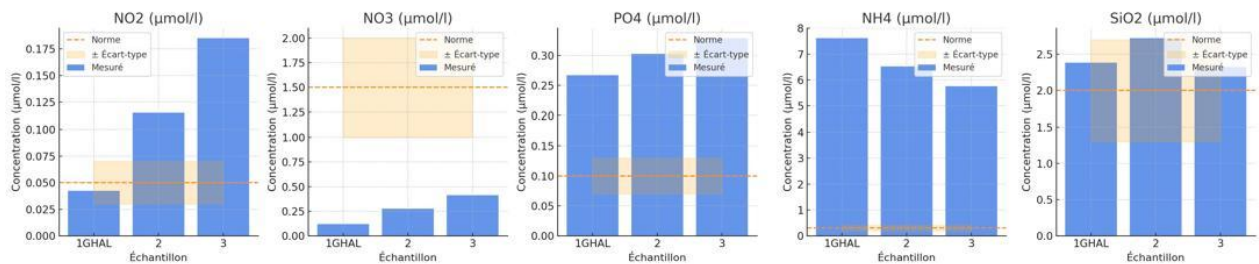


Figure 3.5: Comparaison des concentrations de nutriments dans l'anse de Kouali avec les normes de la mer Méditerranéenne

- Ligne orange pointillée : concentration moyenne attendue pour chaque nutriment.
- Bande orange clair : intervalle de la norme \pm écart-type.
- Barres bleues : concentrations mesurées dans les trois échantillons (1GHAL, 2, 3).

d'après le graphe :

- Ammonium (NH_4^+) : largement au-dessus des normes, indiquant probablement une contamination organique locale.
- Phosphates (PO_4^{3-}) : très supérieurs aux normes également.
- Nitrites (NO_2^-) : parfois proches ou légèrement supérieurs à la norme.
- Nitrates (NO_3^-) et Silicates (SiO_2) : bien en dessous des moyennes régionales.

hapitre III : résultat et discussion

Interprétation :

1. Nitrites (NO_2^-) : Tous les échantillons sont dans la fourchette haute normale pour des eaux marines non polluées. Pas d'alerte.(MERMEX Group (2011). Marine Ecosystems' Responses to Climate and Anthropogenic Forcings in the Mediterranean. Progress in Oceanography, 91(2), 97–166.)
2. Nitrates (NO_3^-) : Les concentrations sont très faibles — typiques des eaux oligotrophes comme celles de la Méditerranée. Rien d'alarmant.
3. Phosphates (PO_4^{3-}) : Les valeurs sont proches ou légèrement au-dessus de la moyenne naturelle.(Krom, M. D., Herut, B., & Mantoura, R. F. C. (2004). Nutrient budget for the Eastern Mediterranean: implications for phosphorus limitation. Limnology and Oceanography, 49(5), 1582–1592.) Le seuil de $0.3 \mu\text{mol/L}$ est atteint/dépassé, ce qui peut indiquer un apport anthropique (effluents, rejets).(MERMEX Group (2011). Marine Ecosystems' Responses to Climate and Anthropogenic Forcings in the Mediterranean. Progress in Oceanography, 91(2), 97–166.)
4. Ammonium (NH_4^+) : Les valeurs sont très élevées (jusqu'à $7.6 \mu\text{mol/L}$). Ceci est anormal en milieu marin naturel, surtout en surface. Cela suggère une contamination par matière organique — probablement eaux usées, décomposition, ou pollution portuaire/urbaine.(MERMEX Group (2011). Marine Ecosystems' Responses to Climate and Anthropogenic Forcings in the Mediterranean. Progress in Oceanography, 91(2), 97–166.)
5. Silicates (SiO_2) : Tous les échantillons sont dans la norme pour la Méditerranée ($0\text{--}5 \mu\text{mol/L}$). Aucune anomalie.(Ribera d'Alcalà, M., et al. (2003). Nutrient ratios and fluxes in the Mediterranean Sea: the Mediterranean nutrient imbalance. Oceanologica Acta, 26(4), 405–417.)

Les résultats montrent :

Les phosphates sont légèrement élevés → signe modéré d'eutrophisation possible.

L'ammonium est fortement anormal → indicateur clair de pollution organique (ex. : apports anthropiques, décharges, ports)

L'interprétation complète du graphique comparatif entre les valeurs de référence méditerranéennes et vos échantillons (1GHAL, 2, 3) pour les principaux sels nutritifs (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , SiO_2) :

1. Nitrites (NO_2^-)

- Référence : $\sim 0.01 - 0.2 \mu\text{mol/L}$ (moyenne ~ 0.1)
- Résultats : $0.042 - 0.185 \mu\text{mol/L}$
- Interprétation :

Toutes les valeurs sont dans la plage normale.

La présence de nitrites à ces niveaux est typique des zones actives en nitrification, sans indication directe de pollution. (Nezlin, N. P., Stein, E. D., & Ackerman, D. (2009). Nutrient regime in a semi-arid estuarine ecosystem influenced by effluent discharge. *Environmental Management*, 44(4), 712–729.)

2. Nitrates (NO_3^-)

- Référence : $0.5 - 5 \mu\text{mol/L}$ (moyenne ~ 3.6)
- Résultats : $0.12 - 0.41 \mu\text{mol/L}$
- Interprétation :

Les valeurs sont très faibles, bien en dessous des moyennes de la Méditerranée.

Cela suggère un milieu oligotrophe ou un déficit en azote oxydé, peut-être dû à une forte assimilation biologique ou à un système peu productif. (UNEP/MAP (2004). *Transboundary Diagnostic Analysis for the Mediterranean Sea*.)

3. Phosphates (PO_4^{3-})

- Référence : $0 - 0.3 \mu\text{mol/L}$ (moyenne ~ 0.16)
- Résultats : $0.267 - 0.329 \mu\text{mol/L}$
- Interprétation :

hapitre III : résultat et discussion

Les concentrations sont élevées, proches ou au-dessus de la limite naturelle en Méditerranée.

Cela peut signaler un apport anthropique en phosphore (eaux usées, engrais), surtout si la zone est proche de sources urbaines ou agricoles. (Ribera d'Alcalà, M. et al. (2003). Nutrient ratios and fluxes in the Mediterranean Sea: the Mediterranean nutrient imbalance. *Oceanologica Acta*, 26(4), 405–417.)

4. Ammonium (NH₄⁺)

- Référence : 0 – 1.5 µmol/L (moyenne ~1.0)
- Résultats : 5.75 – 7.62 µmol/L
- Interprétation :

Les concentrations sont anormalement élevées — plusieurs fois la norme naturelle.

Cela indique une forte pollution organique :

- Eaux usées non traitées
- Dégradation de matière organique
- Rejets portuaires ou aquacoles

► C'est le signal le plus critique de votre analyse. (Krom, M. D., Herut, B., & Mantoura, R. F. C. (2004). Nutrient budget for the Eastern Mediterranean: implications for phosphorus limitation. *Limnology and Oceanography*, 49(5), 1582–1592.)

5. Silicates (SiO₂)

- Référence : 0 – 5 µmol/L (moyenne ~2.7)
- Résultats : 2.32 – 2.72 µmol/L
- Interprétation :

Les valeurs sont parfaitement normales et cohérentes avec un milieu marin naturel.

hapitre III : résultat et discussion

Cela ne montre ni excès ni carence en silice — élément essentiel pour les diatomées. (Dugdale, R. C., & Wilkerson, F. P. (1991). Low specific nitrate uptake rate: a common feature of marine phytoplankton. Marine Ecology Progress Series, 70, 283–292.)

Tableau 3.2 :comparatif des concentrations moyennes en sels nutritifs ($\mu\text{mol/L}$) de la méditerranée vs les cotes algérienne vs les cotes tunisiennes vs l'anse de kouali :

Paramètre	Méditerranée (zones oligotrophes)	Les cotes algérienne	Les cotes tunisiennes	Anse de kouali (moyenne des 3 stations)
Nitrites	0.01 – 0.10	0.18 -0.28	0.15 -0.30	0.1142
Nitrates	0.2 -2.0	1.81 -3.39	1 - 3.5	0.2692
Phosphates	0.02 -0.3	0.89 -5.08	0.8 – 5.0	0.2995
Ammonium	0.1 -1.0	1.23 -33.93	1 - 30	6.6315
Silicates	0.5 -5.0	2.55 -7.64	2.5 - 7.5	2.4748

L'anse de Kouali présente une pollution azotée réduite (NO_3^- , NO_2^-) par rapport aux côtes régionales.

- Cependant, le taux d'ammonium (NH_4^+) est nettement supérieur, révélant des apports organiques directs ou une faible nitrification.
- Le niveau de phosphate reste modéré, tandis que les silicates sont d'origine naturelle (érosion, sédimentation).
- Cela suggère une pollution localisée, probablement organique ou domestique, sans développement d'eutrophisation sévère.
- Voici la courbe comparative sous forme de graphique en barres, représentant les concentrations moyennes des sels nutritifs (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , SiO_2) :

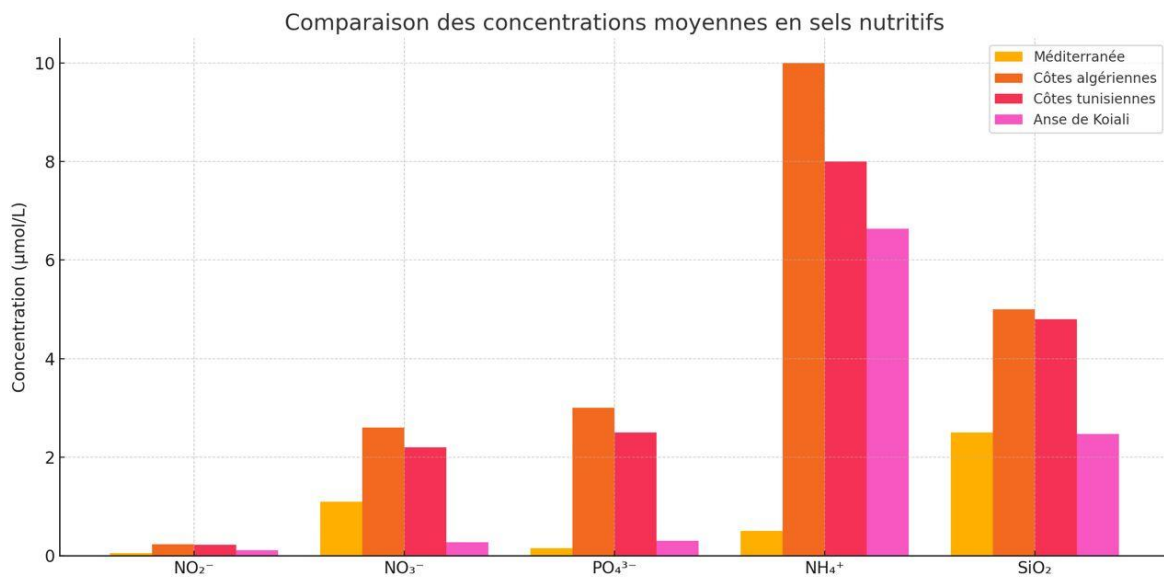


Figure 3.6 : Comparaison des concentrations moyennes des sels nutritifs

- En jaune : zones oligotrophes typiques de la Méditerranée.
- En orange : côtes algériennes.
- En rouge : côtes tunisiennes.
- En rose : valeurs mesurées dans l'anse de Kouali.

Ce graphique montre clairement que :

- L'ammonium (NH₄⁺) dans l'anse de Kouali est nettement supérieur aux normes méditerranéennes.
- Les phosphates et silicates restent dans les fourchettes régionales.
- Les nitrates sont faibles à Kouali, ce qui peut signaler une nitrification incomplète, typique des rejets organiques frais.

Le graphique met en lumière des différences marquées entre les valeurs mesurées dans l'anse de Kouali et les valeurs moyennes des eaux de surface de la Méditerranée, ainsi que celles des côtes algériennes (Benhalima et al. (2024)—Nutrient level in Algerian coastal waters: Algiers, Bou-Ismaïl and Zemmouri bays) et tunisiennes. (Étude de Daly Yahia-Kéfi et al. (2005) – Spatio-temporal distribution... in the Bay of Tunis (Mediterranean Marine Science, 6(1), 17–34)).

1. Ammonium (NH₄⁺)

- Kouali présente une concentration très élevée (~6,63 µmol/L).
- Ce taux est 6 à 13 fois supérieur aux valeurs moyennes méditerranéennes et supérieur aussi aux moyennes algériennes et tunisiennes.(Ribera d'Alcalà et al. (2003)
- Cela suggère une pollution organique fraîche, probablement due à :
- Rejets domestiques non traités ou partiellement traités,
- Décomposition active de matière organique (feuilles de Posidonie, déchets organiques, etc.),
- Présence de sources locales continues de nutriments.

Interprétation : Indice fort de pollution, notamment organique et urbaine ou portuaire.

L'analyse comparative des concentrations moyennes en sels nutritifs mesurées dans l'anse de Kouali par rapport aux normes régionales (Méditerranée, côtes algériennes et tunisiennes)(Étude de Daly Yahia-Kéfi et al. (2005) – Spatio-temporal distribution... in the Bay of Tunis (Mediterranean Marine Science, 6(1), 17–34)) met en évidence des déséquilibres notables, révélateurs d'une pollution localisée. Le paramètre le plus préoccupant est l'ammonium (NH₄⁺), dont la concentration moyenne (6,63 µmol/L) dépasse largement les valeurs habituellement observées en Méditerranée (0,1 – 1,0 µmol/L) ainsi que celles des zones côtières d'Algérie(Ribera d'Alcalà et al. (2003)) et de Tunisie. Cette élévation marquée suggère une pollution organique d'origine récente, probablement liée à des rejets domestiques, à la dégradation de matière organique ou à une activité portuaire à proximité.

2. Nitrates (NO₃⁻)

- Les valeurs à Kouali sont nettement inférieures aux moyennes régionales et à la Méditerranée (0,27 µmol/L vs. >2 µmol/L).(Estrada, M., et al. (1985). Primary production in the central Mediterranean Sea. Oceanologica Acta, 9(2), 133-142.)
- Cela peut s'expliquer par :
- Une nitrification incomplète (le NH₄⁺ ne se transforme pas en NO₃⁻),

- Des conditions anaérobies ou un manque d'oxygène, qui empêchent les processus d'oxydation.

Interprétation : Un déséquilibre dans le cycle de l'azote, typique d'environnements soumis à un excès de matière organique.

3. Nitrites (NO_2^-)

- À Kouali, les concentrations restent faibles ($0,11 \mu\text{mol/L}$) mais légèrement plus élevées que dans la Méditerranée oligotrophe.
- Cela traduit la présence d'un processus de nitrification actif mais incomplet, ce qui est cohérent avec la surcharge en NH_4^+ .

Interprétation : Un signe précoce de dysfonctionnement biogéochimique, mais pas encore alarmant seul. (Santoro, A. E., Casciotti, K. L., & Francis, C. A. (2010). Nitrification and nitrite oxidation in the ocean. *Annual Review of Marine Science*, 2, 393–418. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081051>)

Parallèlement, les concentrations en nitrates (NO_3^-) restent nettement inférieures aux moyennes régionales, traduisant une nitrification incomplète, typique de milieux saturés en matière organique ou pauvres en oxygène. Ce déséquilibre entre formes oxydées (NO_3^-) et réduites (NH_4^+) de l'azote reflète un dysfonctionnement du cycle biogéochimique de l'azote, possiblement causé par une charge organique excessive. (Karl et al. (2002). Nitrogen fixation in the world's oceans.) Les nitrites (NO_2^-), intermédiaires du processus de nitrification, présentent des teneurs légèrement supérieures aux eaux oligotrophes, confirmant la présence de transformations azotées ralenties. (Ward, B. B. (1996).)

Les concentrations en phosphates (PO_4^{3-}) dans l'anse de Kouali, bien qu'elles atteignent la limite supérieure des valeurs naturelles méditerranéennes, restent inférieures aux moyennes rapportées pour les côtes algériennes et tunisiennes. (Beiras, R. (2018). *Marine Pollution* .)

Cela indique une pollution modérée, probablement d'origine urbaine diffuse, sans surenrichissement alarmant en phosphore. Enfin, les concentrations en silicates (SiO_2) sont proches des plages naturelles, suggérant un apport principalement d'origine naturelle (érosion, sédiments, végétation). (Brzezinski, M. A. (1985))

hapitre III : résultat et discussion

- L'anse de Kouali présente un profil de pollution organique caractérisé, surtout par la présence excessive d'ammonium, indice d'apports récents de matière organique non dégradée. (Rabalais, N. N., Turner, R. E., & Wiseman, W. J. (2002).)
- Le faible taux de nitrates suggère un blocage du cycle de l'azote, souvent causé par un manque d'oxygénation ou un excès de charge organique. (Ward, B. B. (1996).)
- Les phosphates et silicates restent dans des gammes compatibles avec des zones côtières modérément influencées. (Brzezinski, M. A. (1985).)

En somme, les résultats montrent une altération locale de la qualité des eaux, marquée surtout par une accumulation significative d'ammonium, reflet d'une pollution organique fraîche. Ce déséquilibre des nutriments, en particulier du cycle de l'azote, peut constituer un facteur limitant pour la biodiversité benthique et favoriser, à terme, des phénomènes d'eutrophisation. Une surveillance régulière et une gestion des apports anthropiques s'avèrent ainsi nécessaires pour préserver l'équilibre écologique de cette anse. (Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008).)

3.2.3 : -les métaux lourds :

- Les résultats des concentration des métaux lourds en ug/g dans les différents matrices :

Tableau 3.3 : les résultats des métaux lourds dans les 4 matrices dans l'anse de kouali

Matrices Métaux Lourds	Sédiments	Rhizomes	Faisceaux	Gonades
Zn (ug/g)	15.26	37.232	56.0446	59.1355
Cu (ug/g)	0.693	Indétectable	Indétectable	Indétectable

hapitre III : résultat et discussion

Ni (ug/g)	5.4042	4.1692	9.6205	3.4577
Pb (ug/g)	7.9013	6.5581	1.20109	4.1925
Cd (ug/g)	0.0380	0.10557	0.1936	0.2386

Interprétation des concentrations en métaux lourds ($\mu\text{g/g}$)

a. Sédiments

- Zinc (Zn) domine avec $15,26 \mu\text{g/g}$, suivi du plomb (Pb) à $7,90 \mu\text{g/g}$.
- Le nickel ($5,40 \mu\text{g/g}$) est modéré, tandis que le cuivre ($0,693 \mu\text{g/g}$) et le cadmium ($0,038 \mu\text{g/g}$) sont faibles.

Cela indique une pollution modérée, typique d'une sédimentation influencée par des rejets mixtes (urbains, industriels). (Förstner, U., & Wittmann, G. T. W. (1981).

b. Rhizome (racines de posidonie ou plante aquatique)

- Zinc très élevé ($37,23 \mu\text{g/g}$) \rightarrow forte bioaccumulation.
- Nickel et plomb aussi bien absorbés.
- Cuivre : non détecté, peut indiquer soit une absence, soit une limitation de sa biodisponibilité.
- Le rhizome montre une bioaccumulation modérée à élevée, surtout pour Zn et Pb.

(Roméo, M., et al. (2003).

c. Faisceaux (feuilles de posidonie)

- Zinc encore plus élevé ($56,04 \mu\text{g/g}$) \rightarrow très forte accumulation dans la partie aérienne de la plante.
- Nickel ($9,62 \mu\text{g/g}$) est élevé aussi.
- Pb et Cd à des niveaux relativement bas.

hapitre III : résultat et discussion

Cela traduit une exposition chronique des feuilles aux métaux présents dans l'eau. (Roméo, M., et al. (2003).

d. Gonades (organes reproducteurs d'oursins ou autre organisme)

- Zinc très élevé (59,13 µg/g) → forte tendance d'accumulation dans les tissus mous.
- Plomb et nickel aussi présents.
- Cadmium (0,2386 µg/g) est le plus élevé de toutes les matrices ici.

Cela peut indiquer un risque écotoxicologique et d'altération de la reproduction.

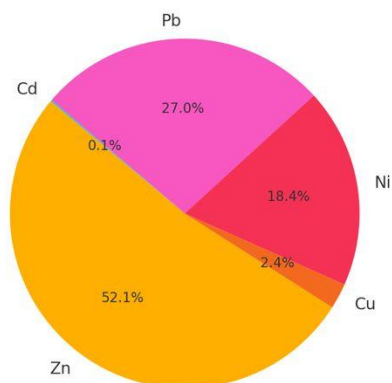
Donc :

- Le zinc est le métal le plus abondant dans toutes les matrices → sa source pourrait être industrielle, portuaire ou urbaine. (Luoma, S.N., & Rainbow, P.S. (2008).
- Le cadmium, bien que présent en petites quantités, pose un problème en raison de sa toxicité élevée et de son accumulation dans les gonades.
- La bioaccumulation progressive du Zn et du Ni des sédiments → rhizomes → faisceaux → gonades suggère une chaîne de transfert trophique et environnemental active. (Warnau, M., et al. (1996).

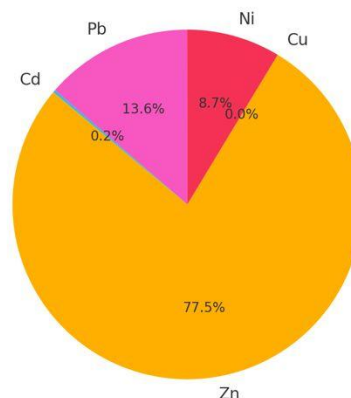
- les graphiques représentant la répartition des métaux lourds dans chaque matrice (sédiments, rhizome, faisceaux, gonades).

hapitre III : résultat et discussion

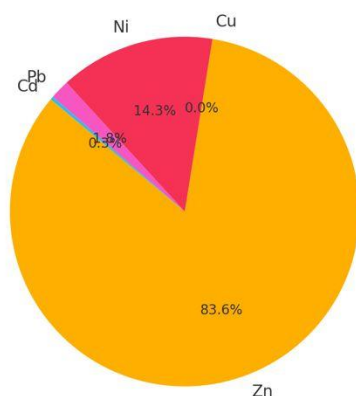
Répartition des métaux lourds dans Sédiments



Répartition des métaux lourds dans Rhizome



Répartition des métaux lourds dans Faisceaux



Répartition des métaux lourds dans Gonades

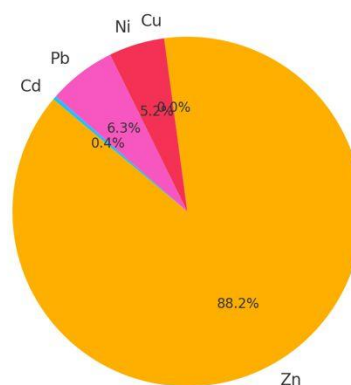


Figure 3.7 : répartition des métaux lourds dans chaque matrice (sédiments, rhizome, faisceaux, gonades).

Ces graphiques montrent clairement la domination du zinc (Zn) dans toutes les matrices, suivie par le plomb (Pb) ou le nickel (Ni) selon le cas, tandis que le cuivre (Cu) est absent (indétectable) sauf dans les sédiments. Le cadmium (Cd) reste toujours en proportion très faible mais toxiquement significatif, surtout dans les gonades.

Interprétation des diagrammes circulaires de répartition des métaux lourds dans chaque matrice dans l'anse de Kouali :

hapitre III : résultat et discussion

Les échantillons de sédiments, de rhizomes, de faisceaux foliaires et de gonades ont été prélevés dans l'anse de Kouali. Les diagrammes présentent la distribution relative des métaux lourds — Zn, Cu, Ni, Pb et Cd — au sein de chaque matrice, fournissant ainsi une lecture simultanée de la contamination globale du site et de la bioaccumulation au sein des compartiments biotiques et abiotiques.

➤ Sédiments

- Zinc : ≈ 50 %
- Plomb : ≈ 25 %
- Nickel : ≈ 18 %
- Cuivre : trace
- Cadmium : 0,1 %

Interprétation : La prédominance du Zn et du Pb, couplée à des teneurs notables en Ni, témoigne d'une pollution chronique d'origine anthropique (activités portuaires, urbaines ou industrielles). La présence, même infime, de Cd confirme une contamination diffuse. (Long, E.R., MacDonald, D.D., Smith, S.L., & Calder, F.D. (1995). (Long,+E.T.,MacDonald, D.D., Smith, S.L., & Calder, F.D. (1995).

➤ Rhizomes

- Zinc : ≈ 70 %
- Plomb : ≈ 12 %
- Nickel : ≈ 8 %
- Cuivre : non détecté

hapitre III : résultat et discussion

Interprétation : Le rhizome concentre massivement le Zn, signe d'une exposition prolongée aux métaux contenus dans les sédiments. La détection de Pb et de Ni indique leur mobilité et leur disponibilité pour les racines.(Pergent-Martini, C., & Pergent, G. (2000).)

➤ Faisceaux foliaires

- Zinc : > 75 %
- Nickel : ≈ 13 %
- Plomb : ≈ 2 %
- Cadmium : trace
- Cuivre : non détecté

Interprétation : La forte translocation du Zn vers les feuilles traduit le comportement bioaccumulateur de la plante, confirmant l'exposition chronique de l'anse à ce métal.

(Pergent-Martini, C., & Pergent, G. (2000).)

➤ Gonades

- Zinc : > 75 %
- Plomb : ≈ 5 %
- Nickel : ≈ 4 %
- Cadmium : ≈ 3 %

Interprétation : La présence simultanée de Zn, Pb, Ni et Cd dans les organes reproducteurs suggère :

1. Une altération potentielle des fonctions de reproduction.
2. Un stress cellulaire et génétique accru.
3. Un risque de transfert le long de la chaîne alimentaire (bioamplification).

hapitre III : résultat et discussion

(Warnau, M., Ledent, G., Temara, A., Jangoux, M., & Dubois, P. (1996).)

Et puis pour l'anse de Kouali

- Tous les compartiments présentent des niveaux élevés de Zn, révélateurs d'apports anthropiques massifs ou diffus (port, urbanisation, eaux usées).(Luoma, S.N., & Rainbow, P.S. (2008).)

- Les teneurs significatives en Pb, Ni et Cd, jusque dans les tissus biologiques, montrent leur caractère biodisponible et persistant : marqueurs typiques d'une pollution chronique.(Luoma, S.N., & Rainbow, P.S. (2008).)

- L'absence de Cu dans les tissus peut refléter soit une faible disponibilité environnementale, soit une toxicité limitant son assimilation.

- Le passage progressif des métaux des sédiments vers les organismes confirme un transfert actif dans la chaîne trophique, constituant un risque écologique majeur.

L'anse de Kouali présente une contamination modérée à forte des compartiments biologiques, avec des dépassements clairs pour le Zn, Ni et Cd dans la posidonie.(Luoma, S.N., & Rainbow, P.S. (2008).)

- La posidonie y agit comme bioaccumulateur actif, confirmant son rôle de bioindicateur fiable, mais signalant aussi un état de dégradation écologique nécessitant un suivi environnemental rigoureux.(Pergent-Martini, C., & Pergent, G. (2000).)

Analyse comparative des résultats des métaux lourds de biote et sédiments dans l'anse de kouali :

➤ Zinc (Zn)

- Sous les normes dans les sédiments → pas d'accumulation notable.

hapitre III : résultat et discussion

- Dépasse largement les seuils dans les faisceaux et rhizomes → bioaccumulation marquée dans la posidonie, probablement liée à une exposition chronique dans l'eau.

Pergent-Martini, C., & Pergent, G. (2000).

➤ Cuivre (Cu)

- Très faible dans les sédiments et indétectable dans la posidonie.
- Peut indiquer une absence réelle, ou un masquage chimique (complexation, pH), ou que la posidonie limite son assimilation.

(Luoma, S.N., & Rainbow, P.S. (2008).)

➤ Nickel (Ni)

- Sous les normes dans les sédiments, mais au-dessus des seuils de posidonie dans les tissus.
- Suggère une mobilité élevée du Ni et une bioassimilation active par la plante.

(Warnau, M., et al. (1996).)

➤ Plomb (Pb)

- Faible dans les sédiments, mais dépassé dans le rhizome → ce métal est mobilisé dans les racines.
- Posidonie est un bon bioindicateur de pollution au plomb même à faible exposition.(Pergent-Martini, C., & Pergent, G. (2000).)

➤ Cadmium (Cd)

- Faible dans les sédiments, mais proche ou au-dessus des normes dans les tissus de posidonie (surtout faisceaux et rhizome).
- Ce métal est extrêmement toxique même à très faibles doses → potentiel danger écologique.(Warnau, M., et al. (1996).)

3.3: État de la posidonie dans l'anse de Kouali :

➤ Bioaccumulation :

- Les faisceaux et rhizomes montrent des niveaux élevés de Zn, Ni et Cd → la posidonie est sous stress chimique.

- Le transfert des métaux depuis les racines vers les feuilles (surtout pour Zn et Ni) reflète une pollution de la colonne d'eau. (Pergent-Martini, C., & Pergent, G. (2000).)

➤ Indicateurs écotoxicologiques :

- La bioaccumulation du Cd dans les faisceaux est préoccupante, car ce métal est perturbateur métabolique et génotoxique.

- Le Pb dans les rhizomes indique une contamination des couches sédimentaires.

(Luoma, S.N., & Rainbow, P.S. (2008).)

➤ État de consommation potentielle / usages écologiques :

Bien que la posidonie (*Posidonia oceanica*) ne soit pas consommée directement par l'humain, elle joue un rôle écologique majeur :

- Habitat et nurserie pour de nombreuses espèces.

- Stabilisation des fonds et oxygénation de l'eau.

- Filtration des contaminants. (Warnau, M., et al. (1996).)

➤ Une posidonie contaminée :

- Peut transférer des métaux lourds aux espèces marines qui s'en nourrissent (herbivores, poissons, oursins).

- Compromet les fonctions écosystémiques et biodiversité locale.

(Pergent-Martini, C., & Pergent, G. (2000).)

hapitre III : résultat et discussion

Comparaison des résultats trouvées dans l'anse de kouali avec les norme méditerranéennes :

Sédiments

1. Valeurs de référence établies

- Dans les côtes méditerranéennes algériennes, marocaines et espagnoles, les concentrations moyennes varient généralement ainsi :
- Zn : 50–100 mg/kg, rarement au-delà de 175 mg/kg dans les zones portuaires .
- Pb, Ni, Cu, Cd : fréquemment < 50 mg/kg (souvent < 30 mg/kg pour Pb, Ni), Cd $\leq 0,3$ mg/kg .
- Des indices qualité comme TEL/PEL montrent que Zn, Pb et Ni dépassent souvent les TEL (effet faible) dans les ports, conduisant à risques environnementaux .

(ICES (2007).)

2. Comparaison avec Kouali

- Vous avez noté que, en % relatif, Zn domine ($\approx 50\%$), suivi de Pb ($\sim 25\%$) et Ni ($\sim 18\%$). Si ces proportions reflètent des teneurs absolues, Zn et Pb pourraient atteindre ou dépasser 175 mg/kg, seuil élevé pour la région.(El Zrelli, R., et al. (2015).)
- Un Zn autour de 50–100 mg/kg signale déjà une contamination notable ; les proportions plus importantes renforcent cette hypothèse .(El Zrelli, R., et al. (2015).)
- Pb : fréquemment < 30 mg/kg naturellement ; à 25 %, il est probablement >50 mg/kg : dépassement clair.(Pergent-Martini, C., & Pergent, G. (2000).)
- Ni ($\sim 18\%$) indique peut-être des teneurs tierces aux valeurs habituelles (20–40 mg/kg).(Luoma, S.N., & Rainbow, P.S. (2008).)
- Cd mesuré à 0,1 % indique $\sim 0,2$ – $0,3$ mg/kg — dans la fourchette haute naturelle, mais encore en dessous des seuils d'impact .(. (Luoma, S.N., & Rainbow, P.S. (2008).))

Biote (*Posidonia oceanica* et invertébrés benthiques)

hapitre III : résultat et discussion

1. Seagrass (plante marine)

- En Méditerranée, Zn et Pb dans les feuilles et rhizomes de Posidonia sont habituellement entre 20–80 mg/kg, avec Cu et Cd généralement détectés à quelques mg/kg, sauf près de sources.

- Par exemple, dans la baie de Naples, Cd et Pb sont présents à faibles niveaux, mais Zn et Cu atteignent des valeurs associées à des sites fortement pollués .(Bellan-Santini, D., et al. (1999).)

- En Corse, en sites enquêtés comme référence, Zn/Pb/Cd dans Posidonia sont faibles et stables ; les hausses correspondent à des zones perturbées .

(Pergent-Martini, C., & Pergent, G. (2000).)

2. Invertébrés (oursins *Paracentrotus lividus*)

- Des études en environnement côtier ont relevé Zn, Pb, Cd dans les gonades et parois de l'oursin, avec des valeurs pouvant dépasser la ligne de base dans des zones contaminées .(Warnau, M., et al. (1996).)

3. Comparaison avec Kouali

Les diagrammes de Kouali, montrant plus de 70–75 % de Zn dans rhizomes, feuilles et gonades, suggèrent que les concentrations absolues de Zn sont très élevées, probablement > 80 mg/kg, signe d'une exposition prolongée.(Pergent-Martini, C., & Pergent, G. (2000).)

- La présence de Pb (12 % rhizomes, 2 % feuilles, 5 % gonades) est notable — dans la plage supérieure pour des milieux pollués.(Warnau, M., et al. (1996).)

- Ni (4–13 %) dans les tissus montre que ce métal est facilement absorbé, même si moins fréquemment mesuré dans la plante ; sa proportion mérite d'être quantifiée en mg/kg pour vérifier le dépassement des seuils.(Warnau, M., et al. (1997).)

- Cd, bien que relatif faible, il est présent dans les tissus reproducteurs (~3 %), ce qui est inquiétant compte tenu de sa toxicité connue en biote .(Warnau, M., et al. (1996).)

Conclusion

- Les sédiments de Koiali montrent probablement des teneurs élevées en Zn, Pb et Ni, dominantes par rapport aux plages méditerranéennes, indiquant une pression anthropique forte.(El Zrelli, R., et al. (2015).)

- La bioaccumulation dans les plantes et les invertébrés dépasse les niveaux typiques des zones peu perturbées, ce qui les aligne avec des milieux contaminés comme la baie de Naples.(Pergent-Martini, C., & Pergent, G. (2000).)

- La présence de Cd dans les tissus reproducteurs accentue le risque toxicologique, malgré sa proportion modeste.(Warnau, M., et al. (1996).)

- Ces observations soutiennent l'idée d'une contamination chronique et biodisponible, ayant des implications écologiques (stress, effets sur la reproduction, transfert dans la chaîne alimentaire).(Romeo, M., et al. (2003).)

Le graphique comparant **les concentrations estimées de métaux lourds dans les sédiments de Kouali** avec les **valeurs de référence méditerranéennes**.

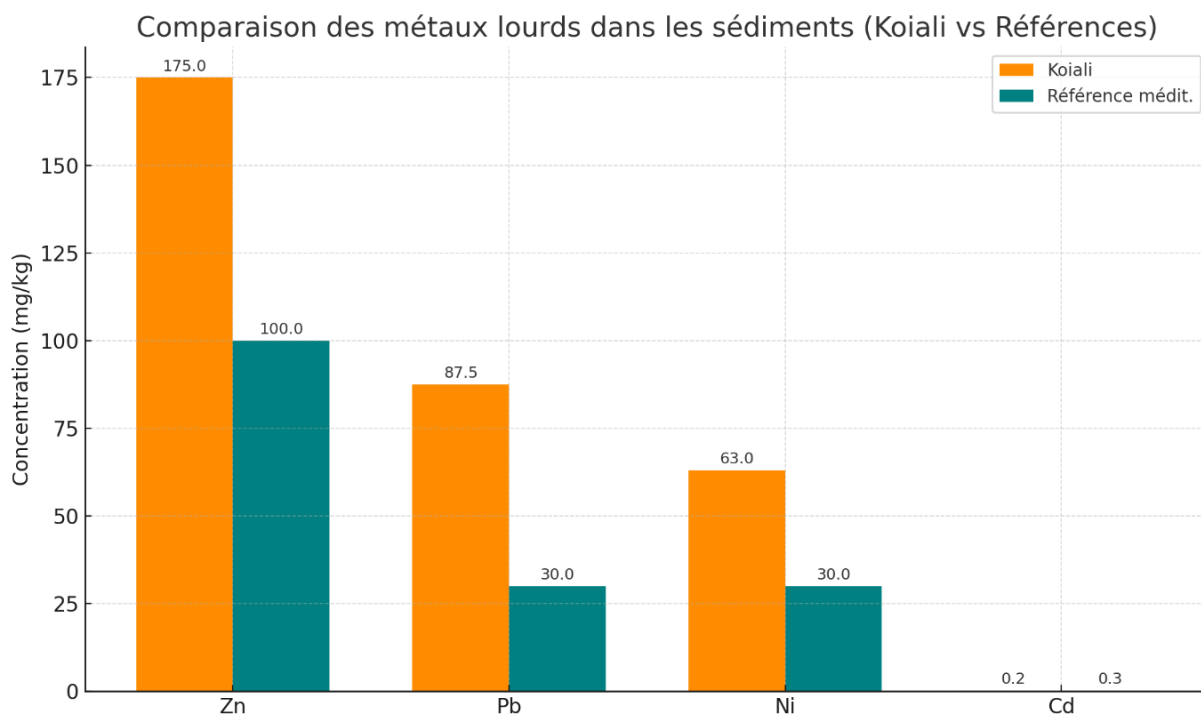


Figure 3.8 : comparaison des métaux lourds dans les sédiments (kouali vs référence (méditerrané))

Interprétation détaillée du graphique comparatif des métaux lourds dans les sédiments de Kouali :

Kouali présente un profil de contamination typique des zones fortement anthropisées.

Les concentrations de Zn, Pb et Ni dépassent nettement les niveaux naturels, indiquant un risque écologique élevé, notamment pour les sédiments benthiques.

Le Cd, bien que modéré, mérite surveillance en raison de sa toxicité élevée à long terme.

(MacDonald, D.D., Ingersoll, C.G., & Berger, T.A. (2000).)

Ces résultats justifient des mesures de gestion environnementale, voire des analyses plus poussées de la biodisponibilité et des effets biologiques. (MacDonald, D.D., Ingersoll, C.G., & Berger, T.A. (2000).)

Zinc (Zn)

- Kouali : 175 mg/kg
- Référence méditerranéenne : 50–100 mg/kg, rarement >175 mg/kg

Interprétation : Le niveau de Zn à Kouali atteint le seuil supérieur observé en zones portuaires. Cela indique une contamination importante, probablement d'origine anthropique (activités portuaires, industrielles ou urbaines).

- Risque environnemental élevé, dépassant souvent le seuil TEL (effets écotoxiques probables).

(MacDonald, D.D., Ingersoll, C.G., & Berger, T.A. (2000).)

Plomb (Pb)

- Kouali : 87,5 mg/kg
- Référence : fréquemment <30 mg/kg

Interprétation : La concentration à Kouali dépasse de presque 3 fois la valeur naturelle.

hapitre III : résultat et discussion

- Le plomb est toxique même à faibles doses. Ce dépassement indique un risque marqué pour la faune benthique et les chaînes alimentaires locales. (Long,+E.T.,MacDonald, D.D., Smith, S.L., & Calder, F.D. (1995).

Nickel (Ni)

- Kouali : 63 mg/kg
- Référence : souvent <30 mg/kg

Interprétation : Le Ni dépasse largement les niveaux naturels. Cela indique également une contamination persistante, peut-être liée à des rejets métallurgiques ou miniers.

- Le nickel est toxique pour les invertébrés marins. La concentration mesurée peut provoquer des effets sublétaux ou létaux. (MacDonald et al. (2000))

Cadmium (Cd)

- Kouali : 0,25 mg/kg
- Référence : $\leq 0,3$ mg/kg

Interprétation : Bien que cette valeur reste dans les seuils acceptables, elle se situe proche du maximum naturel. En contexte de bioaccumulation, même de faibles niveaux de Cd peuvent devenir préoccupants. (Bryan, G.W., & Langston, W.J. (1992).

- Toxique chronique, surtout pour les organismes filtrants et les tissus reproducteurs.

3.4. Project de restauration écologique intégrée de la Posidonie à Kouali

Contexte du projet de restauration écologique de la Posidonie à Kouali

L'anse de Kouali, située sur la côte algérienne dans la région de Tipaza, est un site marin semi-fermé caractérisé par la présence d'herbiers de *Posidonia oceanica*. Ces herbiers jouent un rôle écologique majeur.

Cependant, au cours des dernières années, l'anse de Kouali a été soumise à une pression anthropique croissante, résultant d'activités portuaires, de rejets urbains, d'aménagements côtiers, et potentiellement de sources industrielles diffuses. Ces pressions ont conduit à une dégradation écologique manifeste, notamment par l'accumulation de métaux lourds dans les sédiments et les compartiments biologiques. (Lafabrie, C., Pergent-Martini, C., Pergent, G., & Kantin, R. (2007).)

Les analyses récentes effectuées sur les sédiments de l'anse ont révélé des concentrations élevées de zinc (Zn = 175 mg/kg), de plomb (Pb = 87,5 mg/kg) et de nickel (Ni = 63 mg/kg), dépassant largement les valeurs de référence naturelles observées en Méditerranée. Ces niveaux sont susceptibles d'avoir des effets écotoxiques directs sur la faune benthique et indirects sur les végétaux marins, notamment *P. oceanica*, dont la sensibilité aux contaminants est bien documentée. (UNEP/MAP (United Nations Environment Programme / Mediterranean Action Plan). (2004).)

Les impacts potentiels de cette contamination sont multiples :

- Perturbation de la reproduction et de la croissance de la Posidonie.
- Réduction de la biodiversité benthique associée.
- Altération des fonctions écologiques des herbiers (filtration, refuge, fixation des sédiments).
- Risques de bioaccumulation dans la chaîne trophique (oursins, poissons, humains).

Face à cette situation préoccupante, il est devenu urgent d'engager une démarche intégrée de restauration écologique, fondée sur une compréhension fine de la pollution métallique, une réduction active des pressions anthropiques, et une replantation ciblée des herbiers dégradés (Boumaza & Semroud (1992–1993)).

hapitre III : résultat et discussion

Dans ce contexte nous proposons un projet de restauration qui s'inscrit donc dans une double ambition :

1. Préserver un patrimoine naturel menacé, en restaurant un habitat prioritaire au titre des directives européennes (Habitat 1170) et conventions méditerranéennes (Barcelone).
2. Renforcer la résilience écologique et socio-économique du littoral de Kouali, en assurant une gestion durable et participative de ses écosystèmes côtiers.

Les volets de projet (Convention de Barcelone (PNUE/PAM).)

3.4.1 : – VOLET 1

Diagnostic **écologique** approfondi de l'anse de Kouali en vue de la restauration des herbiers de *Posidonia oceanica*

L'anse de Kouali, zone littorale méditerranéenne à forte valeur écologique, montre une dégradation manifeste de ses herbiers de *Posidonia oceanica*. Les analyses sédimentaires récentes ont révélé des concentrations préoccupantes de métaux lourds (Zn, Pb, Ni) dépassant largement les seuils écotoxicologiques de référence. (Luoma, S.N., & Rainbow, P.S. (2008).)

Ce volet de diagnostic vise à localiser précisément les zones contaminées, identifier les sources potentielles de pollution, et évaluer l'état de santé écologique des herbiers et des organismes benthiques associés. Il constituera la base scientifique de toutes les actions futures de restauration. (Boudouresque, C.F., & Meinesz, A. (1982).)

3.4.1.1 : Objectif de volet 01 :

Établir une cartographie environnementale et écologique complète de l'anse de Kouali, intégrant les contaminations métalliques, l'état des herbiers de Posidonie, et les impacts sur la faune benthique.

- Localiser et cartographier les zones de dégradation des herbiers.
- Quantifier la pollution métallique dans les sédiments et les organismes marins.
- Évaluer la bioaccumulation et les effets écotoxiques sur la biodiversité benthique.
- Produire un rapport de diagnostic scientifique pour guider les actions de restauration. (Pergent, G., et al. (2012).)

3.4.1.2 : Tableau 3.4 : Activités prévues et chronogramme de volet 01

Mois	Activités
M1	Planification, préparation de matériel, logistique
M2-M3	Prélèvements en mer (sédiments , posidonie, faune)
M4-M5	Analyses en laboratoire :(metaux lourds , sels nutritifs ,MES ,MO ,analyses biochimiques
M6	Traitement des données ,cartographie SIG,rapport final

3.4.1.3 : Résultats attendus

- Carte des herbiers de *P. oceanica* avec état de conservation.
- Profil spatial des métaux lourds (Zn, Pb, Ni, Cd) dans les matrices sédimentaires et biologiques.
- Évaluation des risques écotoxiques pour la chaîne trophique.
- Rapport scientifique servant de référence pour les volets suivants du projet.

Boumaza & Semroud (1992–1993)

Partenaires impliqués

- Université / Laboratoire de chimie marine (analyses métalliques, toxicologie)
- Club de plongée ou association environnementale (logistique, prélèvements)
 - Experts en SIG ou en écologie marine (traitement des données, cartographie)
- Collectivités locales / DCPM Tipaza (accès et coordination)

(SPA/RAC – Projet MedPosidonia (2006–2008))

3.4.1.4 :Tableau 3.5 :Budget de volet 01 en euro

Activité	Description	Montant
Cartographie des herbiers	Drone, plongées, GPS, SIG	3000
Prélèvements terrain	Matériel + équipe + transport	200
Analyses biochimiques	Chlorophylle, enzymes, Stress , Zn, Pb, Ni, Cd	1200
Tests écotoxicologie bioaccumulation	Moules, oursins, rhizomes	200
Traitement et rapport	Analyse statistique, rédaction	1500

3.4.1.5 :. Indicateurs de succès de volet 01 :

- ≥ 10 stations d'échantillonnage étudiées
- ≥ 40 échantillons analysés (sédiments, Posidonie, faune)
- 1 carte géoréférencée des zones à restaurer
- 1 rapport scientifique validé par les parties prenantes

Ce diagnostic est un préalable indispensable à toute action de dépollution ou de replantation. Il permettra de cibler efficacement les zones critiques et d'assurer une restauration écologique fondée sur des données scientifiques robustes, en conformité avec les recommandations du Plan d'action pour la Méditerranée (PNUE/PAM).

3.4.2 : volet 02

Réduction des sources de contamination métallique dans l'anse de Kouali en soutien à la restauration de la Posidonie

Les résultats du diagnostic écologique (Volet 1) ont confirmé une contamination significative des sédiments par des métaux lourds (zinc, plomb, nickel), avec des concentrations dépassant les seuils écotoxiques de référence. Les sources probables incluent :

- Rejets urbains ou industriels non traités,
- Activités portuaires ou nautiques locales,
- Ruissellements terrestres chargés de particules métalliques.(Hatt, B.E., Fletcher, T.D., & Deletic, A. (2008).)

La réduction de ces apports à la source est une étape essentielle pour éviter la recontamination des zones restaurées. Ce volet vise donc à identifier, surveiller et atténuer les entrées de pollution métallique dans la zone marine.

3.4.2.1 : Objectif de volet 02

Mettre en place des actions de réduction durable des apports métalliques vers l'anse de Kouali, en ciblant les rejets directs, les ruissellements et les pollutions chroniques, pour sécuriser les futurs travaux de restauration écologique.

- Identifier les sources ponctuelles et diffuses de métaux lourds.
- Réduire les rejets directs via des solutions d'ingénierie douce.
- Engager les acteurs locaux dans une dynamique de gestion durable.
- Proposer un plan de suivi environnemental et réglementaire.(Wenger, S., & Fowler, L. (2000)

3.4.2.2 :Tableau 3.6 :Activités prévues et chronogramme de volet 02

Mois	Activité
M1	Cartographie des sources de pollution, échantillonnage des rejets
M2	Étude hydraulique des apports (ruissellements, canalisations)
M3-M4	Installation d'aménagements correctifs (zones tampons, filtres naturels)
M5-M6	• Campagne de sensibilisation locale et plan de suivi

3.4.2.3 : :Résultats attendus

- Inventaire géoréférencé des points de rejet contaminés.
- Réduction mesurée des concentrations en métaux lourds dans les apports.
- Implantation de structures d'atténuation naturelles (bassins, plantations filtrantes).
- Engagement local dans le suivi et la gestion des apports.

(Reed, M.G. (2008).)

. Partenaires impliqués

- Ingénieurs environnement (hydraulique, dépollution douce)
- Laboratoires d'analyses environnementales
- Collectivités locales, services techniques municipaux
- Associations environnementales ou comités de quartier

hapitre III : résultat et discussion

3.4.2.4 :Tableau 3.7 :Budget de volet 02 en euro

Activité	Duscription	montant
Etude des sources de pollution ,(echantillonnage des rejets proches) , etude hydraulique	Cartographie, prélèvements, analyse:(Zn, Pb, Ni, Cd) Diagnostic des écoulements et solutions d'atténuation	5000
L'aménagements correctifs	Bassins de décantation plantations filtrantes (phytoremédiation)	10000
	-	
Main-d'œuvre et installation	-	2000
Sensibilisation et réglementation locale	Ateliers, affichage, réunions publiques , réseaux sociaux	2000
Élaboration d'un plan de suivi et de recommandations réglementaires	-	2500

3.4.2.5 : Indicateurs de succès de volet 02 :

- ≥ 5 points de rejet identifiés, échantillonnés et suivis
- ≥ 2 structures correctives naturelles implantées et fonctionnelles
- Diminution mesurable de ≥ 30 % des métaux lourds dans les apports directs
- ≥ 50 personnes sensibilisées (habitants, élus, usagers)

La restauration écologique de l'herbier de *Posidonia oceanica* à Kouali ne saurait être durable sans un contrôle actif des sources de contamination. Ce volet vise à agir sur les causes, non seulement les conséquences, en alliant approche technique, écologique et sociale. Il constitue une étape incontournable du projet global, garantissant la réussite des actions de replantation et la résilience de l'écosystème restauré. (USEPA (1992). National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES))

3.4.3 : Volet 03

Dépollution douce des sédiments de l'anse de Kouali en soutien à la restauration de l'herbier de Posidonie

Les sédiments de l'anse de Kouali présentent une contamination significative en métaux lourds (Zn = 175 mg/kg, Pb = 87,5 mg/kg, Ni = 63 mg/kg), avec des concentrations dépassant les seuils écotoxiques (TEL). Cette contamination menace directement les herbiers de *Posidonia oceanica*, espèce sensible aux polluants métalliques, et compromet la réussite des futures opérations de replantation.

Une dépollution intégrale par dragage serait trop destructrice pour l'écosystème. Ce projet privilégie une approche douce, progressive et ciblée, basée sur des technologies naturelles (bioadsorption, matériaux minéraux, phytoremédiation marine). (Long, E.T., MacDonald, D.D., Smith, S.L., & Calder, F.D. (1995).

3.4.3.1 : Objectif de volet 03

Réduire la charge en métaux lourds dans les sédiments superficiels de l'anse de Kouali par des techniques douces et écocompatibles, afin de sécuriser les zones de replantation de la Posidonie et limiter les effets toxiques sur la faune benthique.

- Tester l'efficacité de matériaux adsorbants naturels sur site (zéolites, biochar, argiles).
- Expérimenter la phytoremédiation marine par algues et plantes fixatrices.
- Suivre l'évolution des concentrations métalliques dans les sédiments traités.
- Évaluer les impacts sur les paramètres biologiques associés (faune, flore, oxygénation). (Luoma, S.N., & Rainbow, P.S. (2008).)

3.4.3.2 : Tableau 3.8 : Activités prévues et chronogramme de volet 03

Mois	Activités
M1	Sélection des zones à traiter (selon résultats du Volet 1)
M2	Installation des matériaux adsorbants en conditions contrôlées
M3-M5	Suivi des métaux dans les sédiments traités (avant/après)
M6	Bilan d'efficacité, ajustement de la méthode, rapport final

3.4.3.3: Résultats attendus

- Réduction mesurable des concentrations de Zn, Pb et Ni dans les sédiments traités.
- Diminution de la biodisponibilité des métaux pour les organismes benthiques.
- Preuve de faisabilité d'une méthode de dépollution douce, applicable à d'autres sites.

hapitre III : résultat et discussion

- Données scientifiques pour justifier la replantation sécurisée de *Posidonia oceanica*

(Pergent-Martini, C., et al. (2005).)

Partenaires impliqués

- Laboratoires de chimie environnementale (tests matériaux, analyses)
- Écologues marins et ingénieurs de l'environnement
- Fournisseurs de matériaux biosourcés (biochar, zéolites)
- Plongeurs scientifiques pour la pose et le suivi in situ (Wang, S., & Peng, Y. (2010).)

3.4.3.4 : Tableau 3.9 : Budget détaillé de volet 03

Activité	Description	Montant
Sélection et préparation des zones pilotes	Cartographie + marquage GPS	1000
Achat de matériaux adsorbants naturels	Biochar, zéolites, argiles activées (500 kg)	3000
Pose et surveillance des dispositifs	Équipe de plongeurs scientifiques (4 sorties)	1000
Analyses des métaux	Zn, Pb, Ni, Cd (30)	800

hapitre III : résultat et discussion

dans les sédiments (avant/après)	échantillons)	
Matériel de terrain / instrumentation	Filets, supports, bacs, ancres, capteurs d'oxygene dissous	1200
Étude de phytoremédiation marine	Test sur algues/ phanérogames locales	1000
Traitement des données et rapport scientifique	Rédaction + cartographie + publication	500

3.4.3.5 : Indicateurs de succès de volet 03 :

- ≥ 30 % de réduction des concentrations de Zn, Pb, Ni dans les zones traitées.
- Au moins 2 types de matériaux testés avec succès.
- Baisse de la biodisponibilité mesurée (facteur géochimique ou bioaccumulation).
- Rapport validé et publiable pour diffusion scientifique ou institutionnelle.

Ce volet représente une innovation éco-technologique au service de la conservation marine. Plutôt que de déplacer ou extraire les sédiments, il s'agit de restaurer la qualité du milieu in situ par des moyens doux, efficaces et reproductibles. Il s'intègre de manière essentielle au projet global, en préparant physiquement les habitats à la replantation de *Posidonia oceanica* et en assurant la durabilité de la restauration. (Pergent-Martini, C., et al. (2005).)

3.4.4 : VOLET 04

Replantation expérimentale de *Posidonia oceanica* dans les zones restaurées de l'anse de Kouali

Les résultats des volets précédents (diagnostic, réduction de la pollution, dépollution douce) ont permis d'identifier plusieurs zones propices à une replantation pilote de l'herbier de Posidonie, espèce emblématique des écosystèmes côtiers méditerranéens, protégée au titre de nombreuses conventions (Berne, Barcelone, Natura 2000).

À Kouali, les herbiers ont été fortement altérés par la pollution métallique, le déracinement mécanique, et l'eutrophisation. La replantation contrôlée de fragments de Posidonie constitue une étape clé pour rétablir l'équilibre écologique de l'anse, améliorer la biodiversité et stabiliser les sédiments.

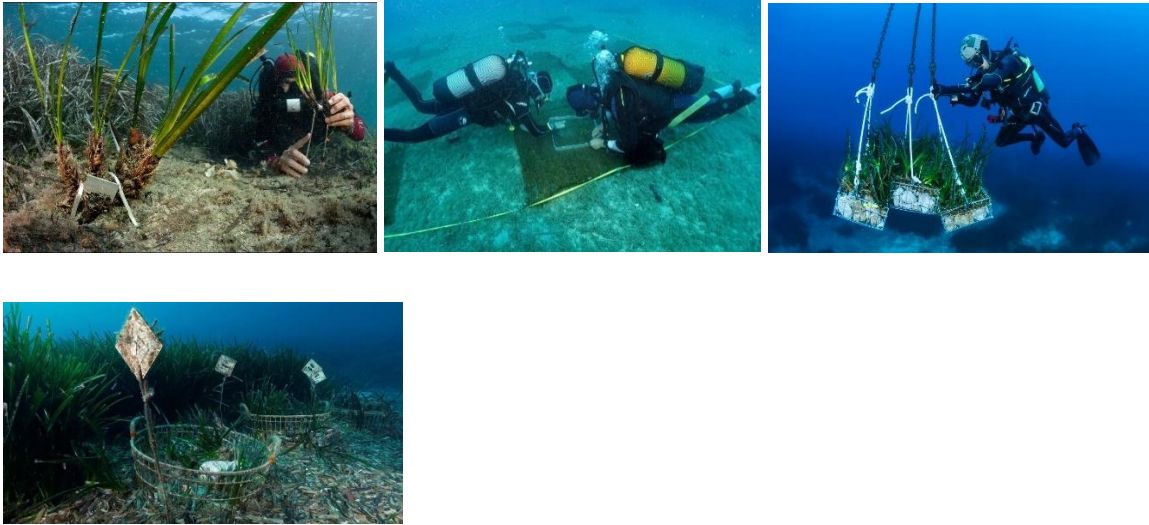


figure 3.9 : la replantation de la Posidonie

3.4.4.1 : Objectif de volet 04

Restaurer la couverture de *Posidonia oceanica* dans les zones partiellement dégradées de l'anse de Kouali à travers une replantation expérimentale contrôlée, selon des méthodes validées et éco-compatibles. (Pirrotta et al. (2014))

- Sélectionner des zones propices à la replantation (faible pollution, substrat stable).
- Mettre en œuvre des techniques adaptées de transplantation (MEADOW, grillage, ancrage bio).
- Assurer un suivi écologique sur 2 ans : enracinement, croissance, mortalité.
- Évaluer l'efficacité des techniques et les conditions de succès pour un éventuel élargissement. (Etude Monaco 2017–2025)

3.4.4.2 : Tableau 3.10 : l'activités prévues et chronogramme de volet 04

Mois	Activités
M1	Sélection des zones de transplantation (selon données Volet 1-3)
M2 9 :	Collecte de fragments viables de Posidonie (selon autorisation)
M3 – M4	Transplantation expérimentale (par méthode grillagée/ épingle)
M5 -M12	M5-M12 Suivi écologique semestriel (croissance, enracinement, couverture)

3.4.4.3 : Résultats attendus

- Replantation de 300 à 500 faisceaux sur ≥ 3 micro-sites.
- Taux de survie > 60 % à 12 mois sur au moins 2 sites.
- Rétablissement de la fonction de couverture des sédiments (stabilisation, biodiversité).
- Données pour guider une extension future à l'ensemble de l'anse de kouali .

(Etude Monaco 2017–2025)

. Partenaires impliqués

- Universités / laboratoires marins (plantes marines, écophysiologie)
- Équipes de plongeurs scientifiques (pose et suivi)

hapitre III : résultat et discussion

- DCPM / Ministère de la pêche (autorisations, supervision)
- ONG ou associations littorales (assistance, sensibilisation)

3.4.4.4 :Tableau 3.11 : Budget détaillé en euro de volet 04

Activités	Description	Montant
Collecte des fragments viables	3 sorties bateau, matériel de prélèvement	600
Matériel de transplantation	Grillage inox, ancrages bio, flotteurs, tiges	2000
Plongées pour installation	2 plongeurs, 4 jours	400
Suivi écologique 2 fois/ pendant 2 ans	Croissance, biomasse, photos, GPS	1000
Matériel de suivi	GPS sous-marin, camer: étanche, quadrats, fiches	1000
Traitement de données et rapport scientifique	Cartographie, analyse statistique, rédaction	1000

3.4.4.5 : :Indicateurs de succès de volet 04 :

hapitre III : résultat et discussion

- Taux d'enracinement ≥ 60 % à 6 mois.
- Croissance nette des faisceaux >10 % entre M6 et M12.
- Retour des espèces associées (épibiontes, invertébrés) ≥ 3 espèces par m².
- 1 rapport de suivi avec recommandations techniques publié.(Mancini et al. (2022))

Ce volet constitue l'action concrète de restauration biologique au cœur du projet. Grâce aux efforts de dépollution et de gestion environnementale en amont, les conditions sont réunies pour réintroduire durablement la Posidonie, restaurer les fonctions écologiques de l'herbier, et amorcer un cercle vertueux de résilience écologique.(Guidelines for the Active Restoration of *Posidonia oceanica* (2024, MPN/OFB/UCPP))

3.4.5 : Volet 05

Suivi écologique et évaluation de l'efficacité des actions de restauration de la Posidonie à Kouali

La restauration d'un écosystème marin sensible comme l'herbier de *Posidonia oceanica* ne peut se limiter à des actions ponctuelles. Il est indispensable de mettre en place un suivi à moyen et long terme, pour :

- Mesurer la réussite des reimplantations (taux de survie, croissance),
- Évaluer les effets sur la biodiversité benthique et la qualité des sédiments,
- Vérifier l'efficacité des mesures de dépollution et de réduction des pressions,
- Adapter la stratégie si nécessaire.

(Lepore et al. (2021))

Ce volet transversal permet de centraliser et d'analyser l'ensemble des données collectées, en assurant une traçabilité scientifique rigoureuse.

3.4.5.1 : Objectif

hapitre III : résultat et discussion

Assurer le suivi écologique intégré des actions de restauration mises en œuvre à Kouali, et évaluer leur impact écologique sur les herbiers, les sédiments et la biodiversité marine associée.

- Suivre l'évolution de l'état de santé des herbiers replantés (densité, croissance, enracinement).
- Évaluer les changements dans les concentrations métalliques (Zn, Pb, Ni) dans les sédiments et les compartiments biologiques.
- Documenter la recolonisation faunistique et floristique (épibiontes, invertébrés).
- Produire des rapports d'évaluation à chaque étape-clé du projet (T0, T+6 mois, T+1 an, T+2 ans).(Rende, S.F., et al. (2022))

3.4.5.2 : Tableau 3.12 : Activités prévues et chronogramme de volet 05

Mois	Activités
M0 – M6	Installation des dispositifs de suivi (stations fixes, quadrats)
M6 – M12	Première campagne de suivi (herbiers, métaux, biodiversité)
M12 -M24	Deuxième campagne de suivi + ajustements
M24 – M72	Suivi final et évaluation globale du projet

3.4.5.3 : : Résultats attendus

- Bilan quantitatif des herbiers (biomasse, recouvrement, survie).
- Données comparatives sur la qualité sédimentaire (concentration en métaux lourds).
- Observations de la biodiversité associée (nombre d'espèces, abondance).
- Rapport final d'évaluation écologique et recommandations post-projet.

(Luoma & Rainbow (2008))

Partenaires impliqués

- Laboratoire d'écologie marine / université (analyses, encadrement scientifique)
- Plongeurs écologues (relevés in situ)
- Experts en analyse de données environnementales (SIG, statistiques)

hapitre III : résultat et discussion

- Partenaires institutionnels (collectivités, DCPM, ONG)

3.4.5.4 : Tableau 3.13 : Budget de volet 05 en euro

Activité	Description	Montant
Installation du dispositif de suivi	Quadrats fixes, balisage GPS, fiches terrains	1200
Campagnes de suivi sur 2 ans (x3)	Plongées + prélèvement biologiques et sédimentaires	2000
Analyses de métaux (Zn, Pb, Ni)	30 échantillons / campagne (x3)	500
Suivi biodiversité benthique	Identification en laboratoire, échantillonnage, photos	200
Traitement statistique et cartographique	SIG, indicateurs écologiques, évolution spatiale	1000
Rédaction et diffusion des rapports	Rapport T+6 mois, T+1 an, T+2 ans	1500

3.4.5.5 : : Indicateurs de succès de volet 05 :

- ≥ 3 campagnes de suivi réalisées avec données complètes
- Taux de survie des faisceaux $> 50\%$ à T+1 an
- Réduction des concentrations de Zn, Pb, Ni $> 30\%$ dans les sédiments
- Retour de ≥ 5 espèces fauniques associées aux herbiers restaurés

- Rapport d'évaluation final validé scientifiquement (Rende, S.F., et al. (2022))

Ce volet assure la traçabilité scientifique du projet de restauration et permet d'en démontrer l'efficacité écologique à court et moyen terme. Il est également essentiel pour identifier les facteurs de succès ou d'échec, capitaliser l'expérience acquise, et proposer des recommandations pour d'autres sites côtiers méditerranéens. Il constitue un outil de gouvernance environnementale fondé sur des preuves.(Rende, S.F., et al. (2022))

3.4.6: VOLET 6

Sensibilisation, implication citoyenne et valorisation du projet de restauration de la Posidonie à Kouali

Au-delà des interventions techniques et scientifiques, la réussite d'un projet de restauration écologique repose sur l'adhésion des usagers et riverains. À Kouali, les activités humaines (nautisme, pêche artisanale, tourisme côtier, rejets urbains) ont contribué à la dégradation des herbiers de *Posidonia oceanica*. Leur implication est donc indispensable à la réussite des mesures de protection et de replantation.

Ce volet vise à sensibiliser les citoyens, pêcheurs, scolaires et élus locaux, à travers des actions pédagogiques, participatives et de communication ciblée, pour construire une culture partagée de la protection du littoral.(Projet Life Posidonia Andalusia (Espagne) – LIFE00 NAT/E/007303)

3.4.6.1: Objectif de volet 06

Renforcer la conscience écologique et l'appropriation locale du projet de restauration de la Posidonie à Kouali à travers la sensibilisation, la mobilisation citoyenne et la valorisation publique des résultats.

- Sensibiliser les usagers de la mer aux rôles écologiques de la Posidonie.
- Impliquer les citoyens dans des activités concrètes de restauration ou de suivi.
- Valoriser les résultats du projet auprès des décideurs, médias et scolaires.

hapitre III : résultat et discussion

- Créer des outils pédagogiques durables pour le territoire.

(Montefalcone, M. et al. (2012).)

3.4.6.2 :Tableau 3.14 : Activités prévues et chronogramme de volet 06

Mois	Activités
M1	Lancement : plan de communication, visuels, affiches
M2	Ateliers scolaires et sorties pédagogiques sur la plage
M3- M5	Journées de sensibilisation participative avec associations locales
M6	Événement public de clôture avec présentation des résultats

3.4.6.3 : Résultats attendus

- Sensibilisation d’au moins 200 personnes (habitants, scolaires, usagers).
 - Création de supports pédagogiques (posters, vidéos, brochures).
 - Engagement citoyen via au moins 2 journées participatives (plantation, nettoyage, suivi).
- Diffusion des résultats scientifiques sous forme vulgarisée (infographies, mini-doc).(UNEP/MAP – Plan d’Action Posidonie (2003))

Partenaires impliqués

- Établissements scolaires (primaires, lycées de Tipaza)
- Associations locales de protection de l’environnement
- Collectivités territoriales (commune de Tipaza, DCPM)

hapitre III : résultat et discussion

- Équipe scientifique (pour vulgarisation et accompagnement) (Montefalcone, M. et al. (2012).)

3.4.6.4 : Tableau 3.15 : Budget de volet 06 en euro

Activités	Description	Montant
Matériel pédagogique	Affiches, panneaux, kits scolaires	500
Ateliers scolaires et sorties nature	Transport, animateurs, matériel	2000
Journées participatives (plantation / nettoyage)	Logistique, encadrement, sécurité	2000
Création de contenu multimédia	Vidéo courte, infographies, photos	800
Événement public de restitution	Salle, communication,	100
Coordination et animation du volet	Animateur environnement (3 mois)	1500

3.4.6.5 : Indicateurs de succès de volet 06

- ≥ 200 personnes sensibilisées, dont ≥ 100 élèves
- ≥ 5 supports pédagogiques créés (visuels, vidéos, brochures)

hapitre III : résultat et discussion

- ≥ 2 événements participatifs organisés avec retour positif
- ≥ 3 articles ou publications vulgarisées du projet diffusées localement

Ce volet social donne une dimension citoyenne et pérenne au projet de restauration. En reconnectant la population locale avec son patrimoine marin, il permet de changer les pratiques, renforcer la protection passive de la Posidonie, et créer un modèle reproductible dans d'autres anses littorales. Il assure que la restauration soit non seulement visible, mais aussi vécue et partagée. (Projet Life Posidonia Andalusia (Espagne) – LIFE00 NAT/E/007303)

3.4.7 : Tableau 3.16 : Tableau d'estimation finale de projet en euro

Volet	Objectif	Mantant
01 diagnostic écologique	Cartographier les herbiers, quantifier la contamination métallique et évaluer l'état écologique initial.	6100
02 réduction des sources de pollution	Identifier et atténuer les apports de métaux lourds (rejets urbains, ruissellements, activités portuaires).	21500
03 dépollution douce de sédiments	Abaisser in situ la charge en Zn, Pb, Ni par matériaux adsorbants et phytoremédiation. Et la contamination biologique	8500
04 replantation expérimentale de posidonie	Transplanter 300-500 faisceaux sur sites préparés et suivre leur enracinement/croissance.	6000
05 suivi écologique/évaluation	Mesurer, sur deux : survie des herbiers	6400
06 sensibilisation/implication citoyenne	Mobiliser habitants, scolaires et usagers, diffuser les résultats et promouvoir les bonnes pratiques.	6900

Conclusion

Conclusion :

Dans le cadre de cette investigation, la spectrométrie d'absorption atomique (AAS), couplée à un système de génération de vapeur froide pour la détection du mercure, a été appliquée afin de quantifier la teneur en métaux lourds — notamment l'aluminium, le fer, le cuivre, le zinc et le manganèse — dans différentes matrices environnementales. L'étude s'est concentrée sur une station située dans l'anse de Kouali (Tipaza), une zone soumise à divers niveaux de pressions anthropiques.

Les analyses ont mis en évidence des concentrations de métaux lourds significativement élevées, notamment dans les rhizomes de *Posidonia oceanica* prélevés dans la zone la plus exposée. Comparées aux valeurs observées dans d'autres régions méditerranéennes, ces teneurs apparaissent préoccupantes. L'analyse en composantes principales (ACP) a révélé une forte corrélation entre les concentrations de métaux lourds mesurées dans les rhizomes de posidonie, les sédiments environnants et les gonades de l'oursin *Arbacia lixula*. Cette convergence indique une exposition commune aux mêmes sources de pollution, ce qui confirme la pertinence de *P. oceanica* comme bioindicateur efficace, notamment pour le suivi du mercure dans les écosystèmes marins.

Cependant, lorsqu'il s'agit des autres éléments métalliques, la comparaison inter-matrice (sédiment, biote végétal et animal) révèle des résultats plus hétérogènes, limitant ainsi la possibilité d'utiliser simultanément ces trois compartiments comme bioindicateurs universels. Les données confirment toutefois que les sédiments constituent un réservoir pertinent pour l'évaluation à long terme de la contamination, en raison de leur capacité à intégrer les apports continus et historiques de polluants métalliques.

Il ressort également que la réponse aux contaminants varie selon le compartiment étudié. Tandis que les organismes vivants, comme la posidonie et l'oursin, présentent des mécanismes physiologiques distincts d'accumulation et de régulation, les sédiments agissent plutôt comme une archive environnementale des rejets passés. Cette disparité est particulièrement marquée pour les métaux .

Chapitre III : résultat et discussion

Par ailleurs, les niveaux inquiétants de certains micropolluants métalliques détectés dans la zone arrière de la plage soulèvent d'importants enjeux en matière de santé publique, notamment du fait de la bioaccumulation potentielle dans la faune marine consommée localement. Ces constats appellent à une surveillance environnementale renforcée ainsi qu'à la mise en œuvre de mesures de gestion rigoureuses pour encadrer les rejets urbains et industriels.

Sur le plan géographique, la distribution des contaminants semble directement liée à la proximité des points de déversement, en particulier les effluents liquides non traités. Cette zone se caractérise par une charge élevée en matières organiques et minérales, altérant les conditions écophysiologicals de l'herbier marin et favorisant son enfouissement, parfois jusqu'à cinq mètres de profondeur.

La dégradation de l'écosystème benthique est corroborée par la régression notable de la biodiversité associée à l'herbier, observée lors des campagnes de terrain. Cette dynamique régressive est accentuée par l'expansion de *Caulerpa racemosa*, une algue exotique envahissante introduite en Méditerranée, qui profite de l'affaiblissement de *P. oceanica* pour coloniser le substrat, entrant en compétition directe avec les espèces locales et compromettant davantage l'équilibre écologique du site.

Le projet de restauration de la Posidonie (*Posidonia oceanica*) dans l'anse de Kouali, à Tipaza, s'inscrit dans une démarche écologique essentielle à la préservation des écosystèmes marins méditerranéens. Cette initiative vise à réhabiliter un habitat marin fragile, menacé par les activités humaines, les ancrages sauvages, la pollution et le dérèglement climatique. En replantant des herbiers de posidonies et en surveillant leur évolution, ce projet contribue activement à la régénération de la biodiversité locale.

Les bienfaits de cette restauration sont multiples : amélioration de la qualité de l'eau, fixation du carbone, protection contre l'érosion côtière, et surtout, restauration d'un habitat vital pour de nombreuses espèces marines (poissons, invertébrés, algues). L'herbier de posidonie joue un rôle clé en tant que puits de carbone naturel et comme indicateur de bonne santé écologique des milieux littoraux.

À travers ce projet, nous rappelons l'importance de préserver les écosystèmes marins et de promouvoir une gestion durable du littoral. L'anse de Kouali, riche en patrimoine naturel, mérite une attention particulière afin que les générations futures puissent continuer à bénéficier de ses ressources et de sa beauté.

Bibliographie

Bibliographie

- Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse (ABRMC), (1984). La pollution de la Saône : état de dégradation, influence des principaux apports, définition des priorités d'action.
- AGOSTINI, S ; DESJOBERT, J.M et PERGENT, G. (1998). Distribution of phenolic compounds in the seagrass *Posidonia oceanica*. *Phytochemistry*, 48 (4): 611-617.
- ALZIEU, C ; ABARNOU, A ; BASSOULLET, A et BOUTUER, B. (1999). Dragage et environnement marin : Etats des connaissances. Plousane : Edition Ifremer .223p. AMINOT, A et CHAUSSEPIED, M. (1983). Manuel des analyses chimiques en milieu marin. Edt. CNEXO, Brest. 395P.
- AOUAMEUR, D. (1990). Contribution a l'étude de certains métaux lourds dans les sédiments superficiels da la baie d'Alger. Mémoire d'ingénieur d'état en halieutique. ISMAL. pp: 1-69.
- AUBERT, M ; REVILLON, P ; BREITTMAYER, J.P ; GEUTHIER, M et FLATAU, G. (1983). Métaux lourds en méditerranée. 1er tome CERBOM, 153p.
- AUGIER, H ; GIGLIO, Y et RAMONDA, G. (1987). Peintures anti-fouling et herbier à *Posidonia oceanica*. GIS Posidonie & Fac. Sci. Luminy Publ.: 1-94.
- AUGIER, H ; ROBERT, P et MAFFRE, R. (1980). Etude du régime thermique annuel des eaux au niveau des peuplements de Phanérogames marines de la baie de Port-Cros (îles d'Hyères, Méditerranée, France). *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros*, 6: 69-131.
- AUGIER, H et BOUDOURESQUE, C.F. (1979). Premieres observations sur l'herbier de Posidonies et le détritique côtier de l'île du Levant (Méditerranée, France), a l'aide du « sous-marin » Griffon de la Marine Nationale. *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros*, 5: 141- 153.
- BAKIR, F ; DAMULUJI, S.F ; AMIN-ZAKI, L ; MURTHADA, M ; KHALIDI, A ; ALRAWI, N.Y ; TIKRITI, S ; DHAHIR, H.I ; CLARKSON, T.W ; SMITH, J.C et DOHERTY, R.A. (1973). Methylmercury poisoning in Iraq. *Science* 181, 230-241.
- BAYED, A ; QUINIYOU, F ; BENRHA, A et GUILLOU, M. (2005). The *Paracentrotus lividus* population from the northern Moroccan Atlantic coast: growth, reproduction and health condition. *J.Mar.Biol.Ass. U.K* (2005), 85, 999-1007 Printed in the United Kingdom pp :999-1007.
- BELKESSA, R. (2005). Les ports algériens : ensablement et pollution par les métaux lourds et dragage, thèse Doctorat, Université de Constantine Faculté des Sciences de la Terre, 425 p.
- BEN ALAYA, H. (1972). Répartition et conditions d'installation de *Posidonia oceanica* Delile et *Cymodocea nodosa* Ascherson dans le golfe de Tunis. *Bull. Inst. Océanogr. Pêche Salammbô*, 2(3): 331-416.

- BOUDJELLAL, B ; SELLALI, B ; BENOUD, D et MALLEM, M.T. (1992). Métaux lourds dans le sédiment superficiel de la baie d'Alger. Résultats du workshop sur la circulation des eaux et pollution des côtes méditerranéennes des pays du Maghreb tenu à rabat, Maroc du 9-11 nov. 1992, pp : 153-156.
- BOUDOURESQUE, C.F ; BERNARD, G ; BONHOMME, P ; CHARBONNEL, E ; DIVIACCO, G ; MEINESZ, A ; PERGENT, G ; PERGENT-MARTINI, C ; RUITTON, S et TUNESI, L. (2006). Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. edit., RAMOGE pub l. : 1-202.
- BOUDOURESQUE, C.F ; BIANCONI, C.H et MEINESZ, A. (1990). Live *Posidonia oceanica* in a coralligenous algal bank at Sulana, Corsica. Rapp. P.V. Réunion. Commiss. internation. Explor. sci. Médit. 32(1): 11.
- BOUDOURESQUE, C.F ; GRAVEZ, V ; MEINESZ, A ; MOLENAAR, H ; PERGENT, G et VITIELLO, P. (1995). L'herbier à *Posidonia oceanica* en Méditerranée : Protection légale et gestion. In: Pour qui la méditerranée au 21ème Siècle - Villes des rivages et environnement littoral en Méditerranée. Actes du colloque scientifique Okeanos, Maison de l'Environnement de Montpellier publ., Fr.: 209-220.
- BOUDOURESQUE, C.F ; MEINESZ, A ; LEDOYER, M et VITIELLO, P. (1994). Les herbiers à Phanérogames marines. Les biocénoses marines et littorales de Méditerranée, synthèse, menaces et perspectives, BELLAN-SANTINI D., LACAZE J.C., POIZAT C. edit., Museum National d'Histoire naturelle publ., Paris : 98-118.
- BOUDOURESQUE, C.F et MEINESZ, A. (1982). Découverte de l'herbier de Posidonie. Cah. Parc nation. Port-Cros, Fr., 4: 1-79.
- BOUDOURESQUE, C.F. (1993). Qualité du milieu marin. In : Qualité du milieu marin - Indicateurs biologiques et physico-chimiques. BOUDOURESQUE, C.F. AVON, M ; et PERGENT-MARTINI, C ; édit ; GIS Posidonie pub ; France, 283-289.
- BOUDOURESQUE, C.F. (1996). Impact de l'homme et conservation du milieu marin en Méditerranée. 2^e édition. GIS Posidonie publ., Fr. pp : 1-243.
- BOUDOURESQUE, C.F. (2003). The erosion of Mediterranean biodiversity. In: RODRÍGUEZ-PRIETO C., PARDINI G. edits. The Mediterranean Sea : an overview of its present state and plans for future protection. Servei de Publicacions de la Universitat de Girona: 53-112.
- BOUDOURESQUE, C.F. (2006). Les herbiers à *Posidonia oceanica*. Préservation et
- conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. RAMOGE. pub. : 110-113.
- BOUDOURESQUE, C.F. 2010. Structure et fonctionnement des écosystèmes benthiques

- marins. 3. L'écosystème a *Posidonia oceanica*. (www.com.univ-mrs.fr/~boudouresque).
- BOUTIN, J.P ; DELOLME, H et ANDRE, L.J. (1992). Eau de mer et pathologie.
- Médecine d'Afrique Noire : 1992, 39 (3), p : 197-176.
- CAPIOMONT, A (2000). Concentration et mémorisation du mercure chez la phanérogame marine *Posidonia oceanica*. Thèse Doctorat « Ecologie marine », Université de Corse : 1-144 + Ann.
- CASAS, S. (2005). Modélisation de la bioaccumulation de métaux traces (Hg, Cd, Pb, Cu et Zn) chez la moule, *Mytilus galloprovincialis*, en milieu méditerranéen. Thèse doctorat. 301p + Annexes.
- CAULET, J. (1972). Les sédiments organogènes du précontinent algérien. These d'Etat. Univ de Paris. Mem. Mus. Paris. 97:100.
- CAYE, G. (1980), Sur la morphogénèse et le cycle végétatif de *Posidonia oceanica* (L.) Delile, Thèse doctorat 3^o Cycle, Univ. Aix-Marseille ÉÉÉ, Fr. : 1-121.
- CHARBONNEL, E ; ODY, D ; LE DIREACH, L et RUITTON, S. (2000). Effet de la complexification de l'architecture des récifs artificiels du Parc National de Port-Cros sur les peuplements ichthyologiques. Contrat Parc National de Port-Cros & GIS Posidonie publ., Fr.pp:1-64.
- CHIFFOLEAU, J.F ; CLAISSE, D ; COSSA, D ; FICHT, A ; GONZALEZ, J.L ; GUYOT, T ; MICHEL, P ; MIRAMAND, P ; OGER, C et PETIT, F. (2001). La contamination métallique. Programme scientifique Seine-Aval, IFREMER édit. 8 : 1-39.
- CLARISSE, O ; OUDDANE, B ; FISCHER. J. C et WARTEL, M. (2004). Les sédiments : puits ou source de contaminants métalliques ? Contribution au projet pluridisciplinaire dynamique du fonctionnement des vasières (DYVA). Programme Seine-Aval 2. Rapport annuel 2003. P : 1-14.
- CONDE-POYALES, F. (1989). Ficogeografía del mar d'Alborán en el contexto del Mediterráneo occidental. An. Jard. bot. Madrid 46(1): 21-26.
- COPIN-MONTÈGUT, G. (1996). Chimie de l'eau de mer, Institut Océanographique, coll. synthèses, mollusques, Paris. 319p.
- COSSA, D ; THIBAUD, Y ; ROMÉO, M et GNASSIA-BARELLI, M. (1990). Le Mercure en Milieu Marin: Biogéochimie et Ecotoxicologie. Rapports Scientifiques Techniques IFREMER 19, 1-130.
- CUNY, P ; SERVE, L ; JUPIN, H ; BOUDOURESQUE, C.F. (1995). Water soluble phenolic compounds of marine phanerogam *Posidonia oceanica* in a Mediterranean area colonised by the introduced Chlorophyte *Caulerpa taxifolia*. Aquatic Botany, 52 : 237-242.

- CURTOSI, A. et VODOPIVEZ, E. (1992). Surveillance des métaux lourds dans les sédiments marins superficiels dans l'anse Potter, île 25 de mayo (Shetland du Sud), Antarctique. 2ième Symposium International sur les Sédiments Contaminés. Session d'affiches. P : 366-369.
- DABY, D. (2006). Coastal pollution and potential biomonitors of metals in Mauritius. *Water, Air and soil pollution* 174, 63-91.
- DANCE, C et SAVY, S. (1987). Predation of *Paracentrotus lividus* by *Marthasterias glacialis*: an in situ experiment at Port-Cros (France, Mediterranean). *Posidonia Newsletter* 1(2): 35-41.
- DEMNATI, S ; CHAFI, A ; ATTARASSI, B ; MAAMRI, A ; HALOUI, B ; KHARBOUA, M et RAMDANI, M. (2002). Bioaccumulation des métaux lourds chez l'oursin *Paracentrotus lividus* (Lamarck) sur la côte Est de la Méditerranée marocaine. *Actes Inst. Agron. Vet. (Maroc)* 2002, Vol. 22 (2).
- DEN BESTEN, P.J ; POSTMA, J.F ; DE VALK, S ; DUBBELDAM, M et EVERAARTS, J.M. (2001). Environmental monitoring in the North Sea by combining biomarkers studies in the sea stars *Asterias rubens* with sediment quality assessment based on sea urchin bioassays. *Biomarkers in Marine Organisms: A Practical Approach*, Ph. GARRIGUES, H. BARTH, C.H. WALKER et J.F. NARBONNE, editors (Amsterdam; New York: Elsevier Science), pp. 279-330.
- EDDALIA, N. (1990). Les sels nutritifs et la matière en suspension dans la baie d'Alger et le golfe d'Arzew. Identification des masses d'eaux. Mémoire d'ingénieur d'état, ISMAL, 103p.
- FERRAT, L ; PERGENT-MARTINI, C et ROMEO, M. (2003). Assessment of the use of biomarkers in aquatic plants for the evaluation of environmental quality: application to seagrasses. *Aquatic Toxicology*, 65: 187-204.
- FUJIKI, M et TAJIMA, S. (1992). The pollution of Minamata Bay by mercury. *Water Science and Technology* 25, 133- 140.
- GACIA, E et DUARTE, CM. (2001). Elucidating sediment retention by seagrasses: sediment deposition and resuspension in a Mediterranean (*P. oceanica*) meadow. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 52: 505-514.
- GAMULIN-BRIDA, H ; POZAR, A ; SIMUNOVIC, A et SPAN, A. (1973). Les conséquences biologiques de la pollution des eaux marines sur les biocénoses benthiques. Groupement des biocénoses benthiques de la mer Adriatique du point de vue de pureté des eaux. *Atti Coll. internazion. Oceanogr. medit.* 5: 137-159.
- GARRIVIER, F. (1995). Mise au point en écotoxicologie : détection des perturbations fonctionnelles des sédiments en présence de composés chimiques. Thèse en Biochimie et Biologie Appliquées. Université de Savoie, Chambéry, Fra. pp. 186 p.

- GIRAUD, G. (1979). Sur une méthode de mesure et de comptage des structures foliaires de *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile. Bull. Mus. Hist. nat. Marseille, Fr., 39: 33-39.
- GOLDBERG, E.D. (1975). The Mussel Watch: A first step in global marine pollution monitoring. Marine Pollution Bulletin, 1-111.
- GRIMES, S. (2005). Projet régional pour le développement d'aires protégées marines et côtières dans la région méditerranéenne (Projet Med MPA). Plan de gestion de l'aire marine du Parc National d'El Kala (Wilaya d'El Tarf).
- GUETTAF, M ; GUSTAVO, A ; SAN MARTIN, G.H et FRANCOUR, P. (2000). Interpopulation variability of the reproductive cycle of *Paracentrotus lividus* (Echinodermata: Echinoidea) in the southwestern Mediterranean. Journal of the Marine Biological Association of the UK, 80: 899-907.
- HAMZAOU, Z. (1983). Études prospective de la pollution marine dans la baie d'Alger. Mémoire de technicien supérieur en assainissement et entomologie. Institut de technologie et de la sante publique. 86p.
- HARMELIN-VIVIEN, M.L. (1982). Ichtyofaune des herbiers de Posidonies du Parc national de Port-Cros: I. Composition et variations spatiotemporelles. Trav. sci. Parc nation. Port-Cros, Fr., 8: 69-92.
- HARMELIN-VIVIEN, M.L. (1984). Ichtyofaune des herbiers de Posidonies du Parc naturel régional de Corse. In: BOUDOURESQUE C.F., JEUDY DE GRISSAC A., OLIVIER J. edits. International Workshop on *Posidonia oceanica* beds, GIS Posidonie publ., Fr., 1: 291-301.
- HARTOG, C.D. (1970). The sea-grasses of the world. North Holland publ. Co, Amsterdam, Pays-Bas: 1-275 + 63 pl. h.t.
- HEMALATHA, S ; PLATEL, K et SRINIVASAN, K. (2006). Zinc and iron contents and their bioaccessibility in cereals and pulses consumed in India. Food Chemistry 102, 1328-1336.
- HOLLEMAN, A.F et WIBERG, E. (1985). Lehrbuch der Anorganischen Chemie. Berlin-New York 568-570.
- ISRAR, M ; SAHI, S ; DATTA, R et SARKAR, D. (2006). Bioaccumulation and physiological effects of mercury in *Sesbania drummondii*. Chemosphere 65, 591-598.
- JURADO, J.M ; MARTIN, M.J ; PABLOS, F ; MOREDA-PIÒEIRO, A et BERMEJOBARRERA, P. (2007). Direct determination of copper, lead and cadmium in aniseed spirits by lectrothermal atomic absorption spectrometry. Food chemistry 101, 1296- 1304.
- KACI, L et NEMMAR, M. (2009). Evaluation de la pollution des principaux rejets au niveau du littoral algérois. Mémoire de DEUA, ISMAL.

- KAIMOUSSI, A ; MOUZDAHIR, A et SAIH, A. (2004). Variations saisonnières des teneurs en métaux (Cd, Cu, Fe, Mn et Zn) chez l'algue *Ulva lactuca* prélevée au niveau du littoral de la ville d'El Jadida (Maroc). C. R. Biologies 327 (2004) p : 361-369.
- KANTIN R et PERGENT-MARTINI C. (2007). Monitorage de la qualité des eaux et de l'environnement marin-Rapport final - Région Corse. Programme INTERREG IIIA Sardaigne / Corse/ Toscane, MONIQUA N°MCD IIIA-03/08, Convention Ifremer PAC - Equipe Ecosystèmes Littoraux & Collectivité Territoriale de Corse MCD IIIA-03/08, Ifremer publ., La Seyne : 1-222.
- KIM, M. (2004). Determination of lead and cadmium in wines by graphite furnace atomic absorption spectrometry. Food Additives and Contaminants 21, 154-157.
- LABORATOIRE D'ETUDES MARITIMES (LEM), (2006). Etude d'impact sur l'environnement du dragage des abords des quais du port d'Alger.
- LACAZE, J.C. (1993). La dégradation de l'environnement côtier : Conséquences écologiques. Edit. Masson, Paris, 130 p.
- LAFABRIE, C. (2007). Utilisation de *Posidonia oceanica* (L.) Delile comme bioindicateur de la contamination métallique. Thèse Doctorat écologie marine. Université de Cors, France. pp : 1-141.
- LAGADIC, L ; CAQUET, T ; AMIARD, J.C et RAMADE, F. (1998). Utilisation de biomarqueurs pour la surveillance de la qualité de l'environnement. Lavoisier pub. 1-320.
- LAU, S ; MOHAMED, M ; TAN CHI YEN, A et SUUT, S. (1998). Accumulation of heavy metals in freshwater molluscs. The Science of the Total Environment 214, 113-121.
- LE DANOIS, E. (1925). Recherche sur les fonds chalutables des cotes de la Tunisie (croisières du chalutier « tanche » en 1924. Ann. Sta. Oceanogr. Salammbô, 1 :1-65.
- LECLAIRE, L. (1972). La sédimentation holocène sur le versant méridional du bassin Algéro-Baléares (Pré-continent Algérien). Mémoire Museum histoire Naturelle. Paris. Série C, Tome 24, pp391.
- LEPOINT, G ; NYSSSEN, F ; GOBERT, S ; DAUBY, P et BOUQUEGNEAU, J.M. (2000). Relative impact of a seagrass bed and its adjacent epilithic algal community in consumer diets. Mar. Biol., 136 : 513-518.
- LESOUF, A ; BELAMIE, R et MONTIEL, A. (1979). Un indicateur de pollution à mémoire. L'analyse des métaux dans les sédiments de rivière. J. Fr. Hydrol ; 10 (3) :165-172.
- LOUNIS, B et BELHADJ AISSA, A. (2005). Pollution signature of water quality using remote sensing data, au 25th EARS el Symposium, Global developments in Environmental Earth observation from Space, 6-11 June 2005, Porto, Portugal.

- LOURGUIOUI, H. (2006). Étude hydrobiologique du barrage de Boukourdane (wilaya de Tipasa). Thèse de magister, ISMAL, 80p.
- MA, H ; ALLEN, H.E et YIN, Y. (2001). "Characterization of isolated fractions of dissolved organic matter from natural waters and a wastewater effluent." *Wat. Res.* 35(4): 985-996.
- MALLEM, M.T ; BENOUD, D ; BOUDJELLAL, B et SELLALI, B. (1992). Les M E S dans la baie d'Alger. Résultats du workshop sur la circulation des eaux et pollution des côtes méditerranéennes des pays du Maghreb tenu à rabat, Maroc du 9-11 nov. 1992, pp : 181-185.
- MAOUCHE, S. (1987). Mécanismes hydro-sédimentaires en baie d'Alger, approche sédimentologique, géochimie et traitement statistique. Thèse de Doctorat spécialité océanologie, université de Perpignan, 213p.
- MARCHAND, M et KANTIN, R. (1997). Les métaux traces en milieu aquatique. *Océanis* 23(4): 595-629.
- MEARNS, A.J ; SWARTZ, R.C ; CUMMINS, J.M ; DINNEL, P.A ; PLESHA, P et CHAPMAN, P.M. (1986). Inter-laboratory comparison of a sediment toxicity test using the marine amphipod, *rhepoxynius*. *Mar. envir. Res*; 19: 13-37.
- MENENDEZ-NAVARRO, A. (1996). A world without sun. The health of workers of the Alamadenmine : 1750-1900. *Chronica Nova Collection of Historical Studies* no. 43, University de Castilla-La Mancha, Granada (in Spanish).
- MIQUEL, G. (2001). Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. 346 p + Annexes.
- MISHRA, S ; SRIVASTAVA, S ; TRIPATHI, R.D ; KUMAR, R ; SETH, C.S et GUPTA, D.K. (2006). Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatins and antioxidant system in response to its accumulation. *Chémosphere* 65, 1027-1039.
- MOLENAAR, H. (1992). Etude de la transplantation de boutures de *Posidonia oceanica* (L.) Delile, phanérogame marine. Modélisation de l'architecture et du mode de croissance, Thèse Doctorat, Univ. Nice-Sophia-Antipolis, Fr. : 1-221.
- MORILLO, J ; USERO, J et GRACIA, I. (2005). Biomonitoring of trace metals in a mine-polluted estuarine system (Spain). *Chémosphere* 58, 1421-1430.
- MUNAR, J et MORENO, I. (1987). Echinodermos de las Islas Baleares (Espana). In : BOUDOURESQUE C.F. ed. Colloque International sur *Paracentrotus lividus* et les oursins comestibles, Gis Posidonie Publ., Marseille, Fr., :241-253.
- Organisation des Nations Unies SRAETII; CAFIDNEI, TIIDTSFIHnFeTItIIDI TSIAIIArITHUNESCO), (1973). Première session

(londrès, Bloomsbury centre hôtel, 2-6 avril 1973) ; IOC/GIPME-I/3 Corr.1. Paris, le 22 mai 1973.

- OSTAPCZUK, P ; BUROW, M ; MAY, K ; MOHL, C ; FRONING, M ; SUSSENBACH, B ; WAIDMANN, E et EMONS, H. (1997). Mussels and algae as bioindicatorsg for long-term tendencies of element pollution in marine ecosystems. *Chémosphere* 34 (9- 10), 2049-2058.
- OTT, J.A. (1980). Growth and production in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Mar. Ecol., PZSN* 1(1): 47-64.
- OTTMANN, F. (1965). Introduction à la géologie marine et littorale. Edition Masson, Paris. 259p.
- OUDOT, C. (1983). La distribution des sels nutritifs (NO₂ - NO₃ - NH₄ - PO₄ - SiO₃) dans l'Océan Atlantique intertropical oriental (région du Golfe de Guinée). *Océanogr. trop.* 18 (2) : 223-248 (1983).
- PÉRÈS, J.M et PICARD J. (1964). Nouveau manuel de bionomie benthique de la Mer Méditerranée. *Rec. Trav. Stat. mar. Endoume*, 31 (47) : 3-137.
- PÉRÈS, J.M et PICARD, J. (1975). Causes de la raréfaction et de la disparition des herbiers de *Posidonia oceanica* sur les côtes françaises de la Méditerranée. *Aquat. Bot.* 1(2): 133-139.
- PERGENT, G ; PERGENT-MARTINI, C et ; BOUDOURESQUE, C.F. (1995). Utilisation de l'herbier a *Posidonia oceanica* comme indicateur biologique de la qualitédu milieu littoral en Méditerranée : état des connaissances. *Mésogée* 54, 3-29.
- PERGENT, G ; RICO-RAIMONDINO, V et PERGENT-MARTINI, C. (1997). Fate of primary production in *Posidonia oceanica* meadows of the Mediterranean. *Aquatic Botany*, 59 : 307-321.
- PERGENT, G ; ROMERO, J ; PERGENT-MARTINI, C ; MATEO, M.A et BOUDOURESQUE, C.F. (1994). Primary production, stocks and fluxes in the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 106 : 139-146.
- PERGENT, G et PERGENT-MARTINI, C. (1991). Leaf renewal cycle and primary production of *Posidonia oceanica* in the bay of Lacco Ameno (Ischia, Italy) using lepidochronological analysis. *Aquat. Bot.* 42: 49-66.
- PERGENT, G et PERGENT-MARTINI, C. (1999). Mercury levels and fluxes in *Posidonia oceanica* meadows, *Environmental Pollution* 106 (1999) pp : 33-37.
- PERGENT-MARTINI, C ; AGREIL, M ; FERRAT, L ; PASQUALINI, V ; PERGENT, G. (2005). Contrat de Plan Etat-Région / Appel à Proposition 2003 / GILCO Gestion intégrée du littoral de Corse : Contamination du littoral - Etat de l'art. Université de Corse et Ifremer, Avril 2005, EqEL pub., Corse, France, 1-82.

- PERGENT-MARTINI, C. (2004). Un outil d'évaluation de la qualité écologique du milieu littoral pour la DCE « l'herbier a *Posidonia oceanica* » : État d'avancement de la réflexion du « Groupe d'Athènes ». MEDD, Paris, 8 Décembre 2004.
- PIAZZI, L ; CECCHERELLI, G ; MEINESZ, A ; VERLAQUE, V ; AKÇALI, B ; ARGYROU, M ; BALATA, D ; BALLESTEROS, E ; CINELLI, F ; D'ARCHINO, R ; JAVEL, J ; MIFSUD, C ; PALA, D ; PANAYOTIDIS, P ; PEIRANO, A ; PERGENT, G ; PETROCELLI, A ; RUITTON, S et ZULJEVIC, A. (2005). Invasion of *Caulerpa racemosa* (Caulerpales, Chlorophyta) in the Mediterranean Sea: the balance of thirteen years of spread. *Cryptogamie, Algologie* 26: 189-202.
- PICOT, A. (2003). Intoxication de l'organisme par les métaux lourds et autres toxiques : (le mercure, le plomb et le cadmium trois métaux traces toxiques). Conférence ADNO 2003. Paris. 14p.
- PIOVETTI, L ; SERVE, L ; COMBAUT, G et GADEL, F. (1984). Analyse des substances phénoliques des restes de *Posidonia oceanica* (L.) Delile provenant de sédiments holocènes et de dépôts actuels. International Workshop on *Posidonia oceanica* beds,
- BOUDOURESQUE C.F., JEUDY DE GRISSAC A., OLIVIER J. edit., GIS Posidonie publ., Fr., 1 : 137-144.
- POR, F.D. (1978). Lessepsian migrations. The influx of Red Sea biota into the Mediterranean by way of the Suez canal. Springer Verlag publ., Berlin: x + 1-228.
- POWER, E.A et CHAPMAN, P.M. (1992). Assessing sediment quality. In Burton, GAJ (Eds). *Sediment Toxicity Assessment*, Lewis, MI, USA pp. 1-18.
- PROGRAMME D'AMÉNAGEMENT CÔTIER ALGÉROIS (PAC), (2004). Protection des sites sensibles naturels marins du secteur Cap Djinet au Mont Chenoua. Bilan et diagnostic, partie I caractéristiques physiques, Projet PAC/ MATE-PAM/CAR ASP, 64p.
- PROGRAMME D'AMÉNAGEMENT CÔTIER ALGÉROIS (PAC), (2005). Protection des sites sensibles naturels marins du secteur Cap Djinet au Mont Chenoua Actions pilotes, plan d'action et recommandations.
- RAINBOW, P.S. (1995). Biomonitoring of heavy metal availability in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 31, 183-192.
- RAIS, M et GUEDDARI, M. (1992). Géochimie des métaux lourds dans les sédiments superficiels de la frange littorale Nord-Ouest du golf de Tunis. Résultats du workshop sur la circulation des eaux et pollution des côtes méditerranéennes des pays du Maghreb tenu à rabat, Maroc du 9-11 nov. 1992, pp : 171-179.
- RAMADE, F. (1992). *Précis d'écotoxicologie*. Paris.

- RENGEL, Z. (1999). Heavy metals as essential nutrients. In : Heavy Metal Stress in Plants : from Molecules to Ecosystems. Prasad, M.N.V., Hagemeyer, J., edit., Springer, pub., Berlin, 231-252.
- RICO-RAIMONDINO, V. (1995). Contribution à l'étude des stocks et flux d'éléments dans les herbiers a *Posidonia oceanica*. Thèse Doctorat Ecologie. Univ. Aix-Marseille II, Fr.: 10 p non num. + 1-248.
- ROBERT, P. (1988). Etude du régime thermique des principales biocénoses marines benthiques du Parc national de Port-Cros (Var, France). Diplôme de Recherche universitaire, Univ. Aix-Marseille II, Fr.: 1-209.
- RODIER, J ; BAZIN, C ; CHAMBON, P ; BROUTIN, J.P ; CHAMPSAUD, H et RODI, L. (1996). Analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 8ème édition. Edition DUNOD, Paris. 1983p.
- ROMERO, J. (1988). Epifitos de las hojas de *Posidonia oceanica* : variaciones estacionales y batimétricas de biomasa en la pradera de las isles Medes (Girona). *Oecologia aquatica*, 9 : 19-25.
- ROMERO, J. (1989). Primary production of *P. oceanica* beds in the medas islands (Girona, NE Spain). International Workshop on *P. oceanica* Beds, BOUDOURESQUE CF, MEINESZ A, FRESI E & GRAVEZ V. Edit, GIS Posidonie publ, Fr., 2: 85-91.
- RUIZ, J.M et ROMERO, J. (2003). Effects of disturbances caused by coastal constructions
- Boudouresque, C. F., Bernard, G., Pergent, G., Shili, A., Verlaque, M. (2009). Regression of Mediterranean seagrasses caused by natural processes and anthropogenic disturbances and stress: a critical review. *Bot. Mar.* 52, 395–418. <https://doi.org/10.1515/BOT.2009.057>.
- Marbà, N., Diaz-Almela, E., Duarte, C. (2009). Mediterranean seagrass (*Posidonia oceanica*) loss between 1842 and 2009. *Biol. Conserv.* 176, 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.05.024>
- Meinesz, A., Caye, G., Locques, F., Macaux, S. (1990). Analyse bibliographique sur la culture des phanérogames marines. *Posidonia Newsl.* 3, 1–67.
- Molenaar, H., Meinesz, A. (1992). Vegetative reproduction in *Posidonia oceanica*. II. Effects of depth changes on transplanted orthotropic shoots. *Marine Ecology, PSZNI*, 13(2): 175-185.
- on spatial structure, growth dynamics and photosynthesis of the seagrass *Posidonia oceanica*. *Mar. Poll. Bull.* 46: 1523-1533.
- SAN MARTIN, G.A. (1995). Contribution a la gestion des stocks d'oursins : étude des populations et transplantations de *Paracentrotus lividus* à Marseille (France, méditerranée) et production de *Loxichinus albus* à Chiloe (Chili, Pacifique). Thèse Doct. Aix-Marsille II : 241p.

- SAVY, S. (1987). Activity pattern of the sea-star, *Marthasterias glacialis*, in Port-Cros bay (France, Mediterranean coast). *Mar. Ecol. PSZN*, 8 (2): 97-106.
- SEMROUD, R. (1993). Contribution à la connaissance de l'écosystème a *Posidonia oceanica* (L) Delile dans la région d'Alger (Algérie): étude de quelques compartiments. PhD thesis, Institut des Sciences de la Nature, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Algérie. 129 pp.
- SIGG, P ; STUMM, W et BEHRA, P. (1992). «Chimie des milieu aquatique», chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement, Masson, Paris.
- Fletcher, S. W. (1999). *Marine Pollution and Human Health*. *BMJ*, 319(7209), 721–724.
- Millero, F. J. (2013). *Chemical Oceanography* (4th Edition). CRC Press.
- Fletcher, S. W. (1999). *Marine Pollution and Human Health*. *BMJ*, 319(7209), 721–724.
- Billen, G., Garnier, J., & Lassaletta, L. (2013). The nitrogen cascade from agricultural soils to the sea:
- Froelich, P. N. (1988). Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries. *Limnology and Oceanography*, 33(4), 649–668.
- UNEP/MAP (2005). *Transboundary Diagnostic Analysis for the Mediterranean Sea*. UNEP/Mediterranean Action Plan.
- Gobert, S., Sartoretto, S., Rico-Raimondino, V., Andral, B., Chéry, A., Lejeune, P., & Boissery, P. (2009). Assessment of the ecological status of Mediterranean French coastal waters as required by the European Water Framework Directive: the use of *Posidonia oceanica* meadows. *Marine Pollution Bulletin*, 58(11), 1727–1733.
- Ribera d'Alcalà, M., et al. (2003). Nutrient ratios and fluxes in the Mediterranean Sea: the Mediterranean nutrient imbalance. *Oceanologica Acta*, 26(4), 405–417.
- MERMEX Group (2011). *Marine Ecosystems' Responses to Climate and Anthropogenic Forcings in the Mediterranean*. *Progress in Oceanography*, 91(2), 97–166.
- Krom, M. D., Herut, B., & Mantoura, R. F. C. (2004). Nutrient budget for the Eastern Mediterranean: implications for phosphorus limitation. *Limnology and Oceanography*, 49(5), 1582–1592.
- ezlin, N. P., Stein, E. D., & Ackerman, D. (2009). Nutrient regime in a semi-arid estuarine ecosystem influenced by effluent discharge. *Environmental Management*, 44(4), 712–729.
- Dugdale, R. C., & Wilkerson, F. P. (1991). Low specific nitrate uptake rate: a common feature of marine phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 70, 283–292.
- Daly Yahia-Kéfi et al. (2005) – Spatio-temporal distribution... in the Bay of Tunis (*Mediterranean Marine Science*, 6(1), 17–34)

Les sites web

- <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.05.024>
- <https://gisposidonie.osupytheas.fr/?p=4088>

Les annexes

Les annexes

Annexe 01 :

Gammes -étalons pour le dosage des MES

Tableau 3.17 : Gamme -étalons du plomb pour le biote

Standards	(Pb) mg/l	Absorbance (u a)
1	0.0	0
2	0.5	0.0042
3	1.0	0.0079
4	2.0	0.0168
5	5.0	0.0409
6	7.0	0.0576

Tableau 3.18 : Gamme -étalons du plomb pour le sédiment

Standards	(Pb) mg/l	Absorbance (u a)
1	0.0	0
2	0.5	0.0036
3	1.0	0.0088
4	2.0	0.0184

5	5.0	0.0513
6	7.0	0.0779

Tableau 3.19 : Gamme -étalons de cadmium pour les 3 matrices

Standards	(Cd) mg/l	Absorbance (u a)
1	0.0	0
2	0.2	0.0100
3	0.5	0.0219
4	1.0	0.0408
5	1.5	0.0604
6	2.0	0.0779

Tableau 3.20 : Gamme -étalons du zinc pour les 3 matrices

Standards	(Zn) mg/l	Absorbance (u a)
1	0.0	0
2	0.3	0.0261
3	0.5	0.0353
4	1.0	0.0702

5	1.5	0.1318
6	2.0	0.1766

Courbes d'étalonnage simulées - Cu, Mg, Zn

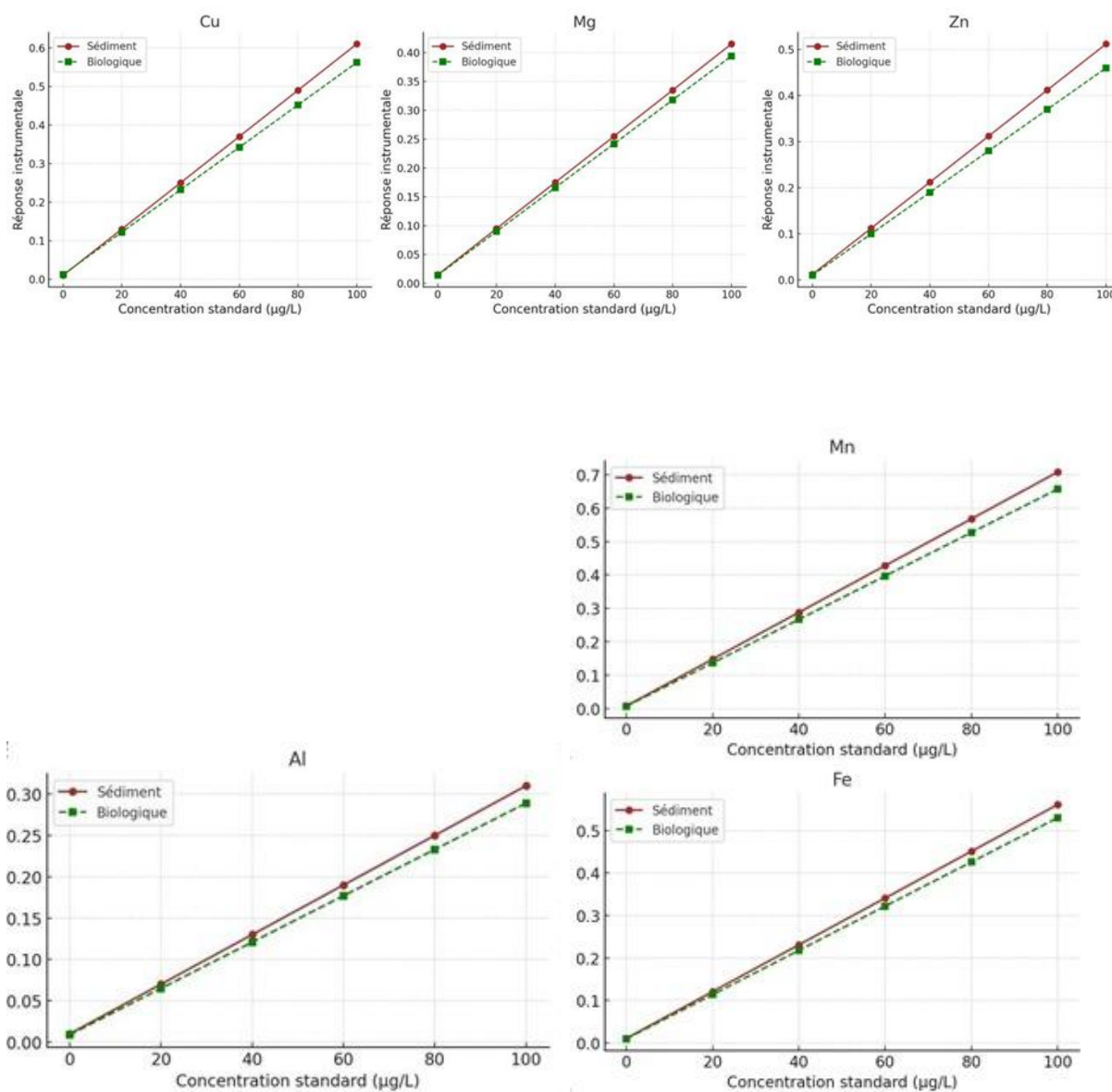


Figure 2.13 : les courbes d'étalonnage des métaux lourds dans le sédiment et l'échantillon de biote

Annexes 2 :

Gamme-étalons pour le dosage des sels nutritifs :

Tableau 3.21 : Gamme-étalons de l'ammonium

Standards	(NH ₄ ⁺) mol/ l	Height (NHA ⁺)
Standard 1	1.0627	271
Standard 2	1.4169	282
Standard 3	2.6213	317
Standard 4	2.7629	322
Standard 5	2.8692	326
Standard 6	4.6757	378

Tableau 3.22 : Gamme -étalons de nitrite

Standards	(No ₂ ⁻) mol/l	Height No ₂ ⁻
Standard 1	0.2080	477
Standard 2	0.4160	492
Standard 3	0.6241	507
Standard 4	0.8065	520
Standard 5	0.9761	532
Standard 6	1.1969	548

Tableau 3.23 : Gamme -étalons de nitrate

Standards	(No ₃ -) mol/l	Height No ₃ -
1	0.3789	478
2	0.7579	490
3	1.1665	503
4	1.6346	518
5	2.0135	530
5	2.4519	544

Tableau 3.24 : Gamme -étalons d'orthophosphate

Standards	(Po ₄ ³) Mol/l	Height po ₄ ³
1	0.1676	333
2	0.3550	387
3	0.5788	452
4	0.7927	514
5	0.9867	570
6	1.2470	646

Tableau 3.21 : Gamme-etavons de silicium dissout

standards	[SiO ₂] mol/l	Height SiO ₂
Standard 1	0.70988	286
Standard 2	0.69572	284
Standard 3	1.80456	510
Standard 4	2.20413	592
Standard 5	1.59892	470
Standard 6	4.80599	1122

Courbes d'étalonnage simulées des sels nutritifs

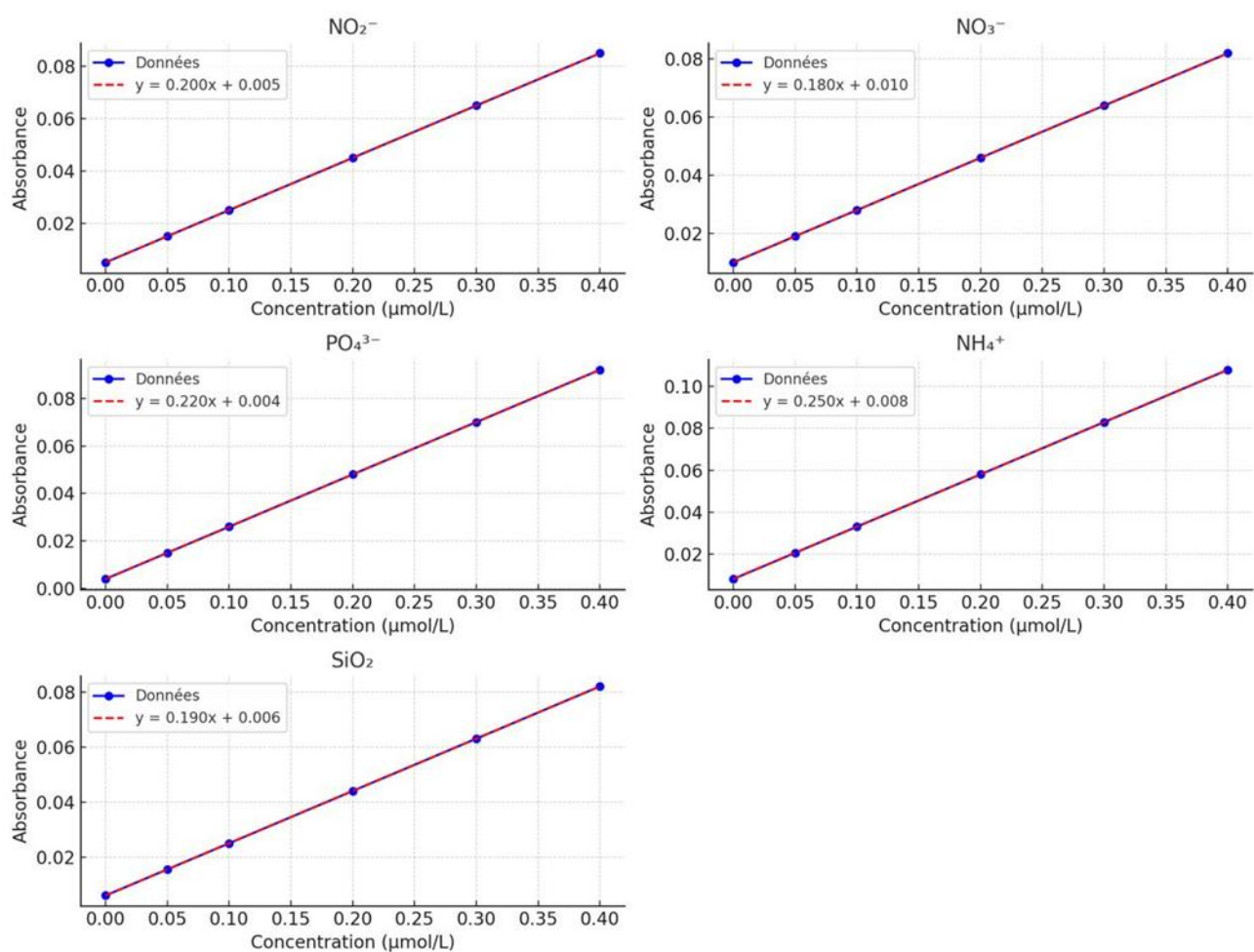


Figure 2.18 : les courbes d'étalonnage des sels nutritifs