

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهئية الساحل

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



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN SCIENCES DE LA MER**

Option : Environnement marin

Thème :

**Évaluation de la contamination par les hydrocarbures des eaux
et sédiments du port de Bejaia : caractérisation, sources et
risques environnementaux**

Présenté par :

Ayache Oumessad

Khelifi Sara

Soutenu le 21/06/2026 devant le jury composé de :

M. FERNANE. L	Maitre-Assistant A	ENSSMAL	Président
Mme GHAZI. M	Maitre-Conférences A	ENSSMAL	Examinatrice
M. BOUGHRIRA. A	Maitre-Assistant A	ENSSMAL	Promoteur
M. DEBABI. S	Assistant HSE	NAFTAL	Co-Promoteur

Année universitaire : 2025-2026

REMERCIEMENTS

L'achèvement de ce mémoire marque la fin d'un parcours riche en apprentissages, en défis et en expériences. À cette occasion, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui nous ont accompagnées et soutenues tout au long de cette aventure.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre encadreur, M. BOUGHRIRA Abdelhak, pour sa disponibilité, son accompagnement, ses précieux conseils ainsi que la confiance qu'il nous a accordée durant la réalisation de ce travail. Son soutien et ses orientations ont été essentiels à l'aboutissement de cette étude.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance à notre co-encadreur, M. DEBABI Samir, pour son aide, son suivi, ses conseils avisés et l'intérêt constant qu'il a porté à notre travail.

Nos sincères remerciements s'adressent à M. FERNANE L., Président du jury, pour l'honneur qu'il nous fait en présidant cette soutenance. Nous remercions également Mme GHAZI M., Examinatrice, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour l'intérêt porté à notre étude. Nous leur sommes reconnaissantes pour le temps consacré à l'examen de ce travail ainsi que pour leurs remarques et suggestions constructives.

Nous remercions chaleureusement les responsables et le personnel de NAFTAL Béjaïa ainsi que ceux du CRD de Boumerdès pour leur accueil, leur disponibilité et leur précieuse contribution à la réalisation des analyses nécessaires à cette étude.

Nous adressons une reconnaissance particulière à Mme Wahil Souhila, Mme Benkrid Imene, M. Guessi Saïd, Mme Bouchra et Mme Houda pour leur aide précieuse, leur disponibilité et leurs conseils qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Nous adressons également nos plus sincères remerciements à nos familles, pour leur amour, leur patience, leur confiance et leurs encouragements inconditionnels. Leur soutien constant a été une source de motivation et de courage tout au long de notre parcours.

Nos remerciements vont également à nos amis, qui ont partagé avec nous les moments de doute comme les moments de réussite, et dont le soutien moral a rendu cette expérience plus agréable.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

À tous ceux qui nous ont accompagnées sur ce chemin, nous adressons notre profonde reconnaissance et nos plus sincères remerciements.

DÉDICACES

Nous dédions ce modeste travail à nos très chers parents, en témoignage de notre profonde reconnaissance pour leur amour, leur soutien indéfectible, leurs sacrifices et leurs encouragements tout au long de notre parcours. Sans eux, nous n'aurions jamais pu parvenir à cette étape de notre vie.

À nos familles, qui ont toujours cru en nous et nous ont accompagnées avec affection, patience et bienveillance dans les moments les plus difficiles comme dans les plus heureux.

À nos frères et sœurs, pour leur présence, leur soutien et leurs encouragements permanents. Merci à vous Chadha ,Fatma ,Narimène ,Lydia ,Nassima ,Marouene ,Kiko ,Zeineb ,Ishak , Rayhane ,Sophia,Samia,Tasnim,Béatrice

Ce mémoire est dédié aussi à mes cousins que nous adorons du Imène jusqu'à Batoul

À nos amis, qui ont partagé avec nous les joies, les doutes et les défis de ce parcours universitaire, et qui ont contribué à rendre cette expérience plus enrichissante à Chaimaa ,Khaoula ,Nesrine ,Thellili ,Younes,Mokko ,Khaoukha ,Khouloud ,Amina ,Roro ,Sohaib et Ali

A oppa qui m'a beaucoup aidé et qui a fait preuve d'amie fidèle et serviable.

À tous ceux qui sont chères, proches de nos cœur.

ملخص

يعد التلوث بالمحروقات من أبرز التحديات البيئية التي تهدد النظم البيئية البحرية، خاصة في المناطق المينائية التي تشهد نشاطاً بشرياً مكثفاً. ويُعتبر ميناء بجاية من أهم الموانئ التجارية والنפטية في الجزائر، مما يجعله عرضة لمصادر متعددة من التلوث الناتج عن حركة السفن والأنشطة الصناعية والتصرفات المختلفة. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم مستوى تلوث مياه ورسوبيات ميناء بجاية بالمركبات الهيدروكربونية العطرية متعددة الحلقات (HAP)، وتحديد مصادرهما المحتملة وتقييم المخاطر البيئية المرتبطة بها. ولتحقيق ذلك، أُجريت حملة لأخذ العينات خلال شهر فبراير 2026 على عدة محطات ممثلة للميناء. وشملت التحاليل دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه، إضافة إلى الخصائص الحبيبية للرسوبيات وتحديد محتواها من المحروقات. وتساهم النتائج المتحصل عليها في فهم أفضل لتوزيع التلوث داخل المنطقة المدروسة، كما توفر معطيات علمية مهمة لدعم برامج المراقبة البيئية ووضع استراتيجيات فعالة لحماية البيئة البحرية وضمان استدامتها في ميناء بجاية.

الكلمات المفتاحية: الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات، التلوث البحري، المياه المينائية، الرسوبيات، ميناء بجاية، التلوث البيئي، المخاطر البيئية

Résumé

La pollution par les hydrocarbures constitue l'une des principales menaces pour les écosystèmes marins, particulièrement dans les zones portuaires soumises à une forte pression anthropique. Le port de Béjaïa, en raison de son importance économique, de l'intensité du trafic maritime et des activités industrielles qui s'y développent, est exposé à diverses sources potentielles de contamination. Dans ce contexte, la présente étude vise à évaluer le niveau de contamination des eaux et des sédiments du port par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), à identifier leurs origines potentielles et à apprécier les risques environnementaux associés. Pour ce faire, une campagne d'échantillonnage a été réalisée durant le mois de février 2026 sur plusieurs stations représentatives du port. Les analyses ont porté sur les paramètres physico-chimiques des eaux ainsi que sur les caractéristiques granulométriques et les teneurs en hydrocarbures des sédiments. Les résultats obtenus contribueront à une meilleure compréhension de la répartition spatiale de la pollution et fourniront des données scientifiques utiles à la surveillance environnementale et à la mise en œuvre de stratégies de gestion durable du milieu marin dans le port de Béjaïa.

Mots-clés : Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), pollution marine, eaux portuaires, sédiments, port de Béjaïa, contamination environnementale, risques écologiques.

Abstract

Hydrocarbon pollution is one of the major environmental threats affecting marine ecosystems, particularly in port areas subjected to intense anthropogenic pressure. The Port of Bejaia, one of Algeria's most important commercial and petroleum ports, is exposed to various sources of contamination resulting from maritime traffic, industrial activities, and urban discharges. The present study aims to assess the level of contamination of water and sediments by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), identify their potential sources, and evaluate the associated environmental risks. To achieve these objectives, a sampling campaign was carried out in February 2026 at several representative stations within the port area. The analyses focused on the physicochemical characteristics of water as well as the granulometric properties and hydrocarbon contents of sediments. The obtained results contribute to a better understanding of the spatial distribution of hydrocarbon pollution and provide valuable scientific data for environmental monitoring and the development of sustainable management strategies for the marine environment of the Port of Bejaia.

Keywords: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), marine pollution, port waters, sediments, Port of Bejaia, environmental contamination, ecological risk.

Table des matières

Introduction.....	2
Généralité	5
I. La pollution marine.....	5
I.1.Introduction.....	5
I.2.Les différents types et sources de la pollution	5
I.2.1. La pollution par les hydrocarbures	6
II. Zone d'étude.....	24
II.1. Situation géographique du port de Bejaia.....	24
II.2. Présentation générale du port de Bejaia	25
II.3. Caractéristiques du port du Béjaia.....	26
II.3.1. Accès au port	26
II.3.2. Bassin portuaire	26
II.3.3. Jetées et brise-lames	26
II.3.4. Mouillage.....	27
II.3.5. Les infrastructures portuaires	27
II.3.6. Répartition des zones du port	28
II.4. Les conditions naturelles et physiques du port.....	28
II.5. Les données climatiques	29
II.5.1. La pluviométrie	29
II.5.2. Les vents	30
II.6. La géomorphologie côtière et sous-marine	32
II.7. Données sédimentologiques et bathymétriques.....	33
II.8. Évolution du fond marin.....	35
II.9. Etude Hydrologique.....	36
II.10. Données océanographiques	36
II.11. Données hydrodynamiques	37
II.11.1. Les courants	37
II.11.2. La marée	40
II.12. Sources de pollution	40
II.12.1. Situation en amont de la zone portuaire	40
II.12.2. Les sources directes de la pollution portuaire	43
III. Matériels et méthodes	45

III.1. Travaux effectués en mer	45
III.1.1. Prélèvement d'eau et localisation des stations	45
III.1.2. Prélèvement des sédiments superficiels	46
III.1.3. Mesures in situ (Paramètres physico-chimiques).....	47
III.2. Travaux effectués au laboratoire.....	48
III.2.1. Conditionnement du matériel utilisé	48
III.2.2. Préparation des produits d'analyse.....	49
III.2.3. Traitement de l'eau de mer pour l'analyse des hydrocarbures.....	50
III.2.4. Traitement du sédiment superficiel marin pour l'analyse des hydrocarbures.....	54
III.3. Technique d'analyse des hydrocarbures	62
III.3.1. Chromatographie en phase gazeuse (CPG)	62
IV. Résultats et discussions	68
IV.1. Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux du port de Béjaïa	68
IV.1.1. Résultats des analyses physico-chimiques	68
IV.1.2. Dosage des hydrocarbures de l'eau du port de Bejaïa	73
IV.1.3. Analyse des sédiments marins du port de Bejaïa.....	75
Conclusion.....	81
Bibliographie.....	84
Annexes	87
Annexe 1 : Fréquences et directions des houles pour différents états de la mer (LEM, 1993).	87

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les variations de concentration en hydrocarbures (HCT : Hydrocarbures Totaux) dans les sédiments.	21
Tableau 2 : Caractéristiques des bassins portuaires de Bejaia (EPB, 2026).	26
Tableau 3 : Caractéristiques des ouvrages de protection (EPB, 2026).	26
Tableau 4 : Caractéristiques des ouvrages d'accostages (Quais) (EPB, 2026).	27
Tableau 5 : Fréquences et répartition des vents à la station de Bejaia (LEM, 1993)	31
Tableau 6 : Moyennes mensuelles de la pluviométrie, de la température et de l'humidité de l'année 2007(ONM, 2008)	31
Tableau 7 : Caractéristiques de la houle à la côte au niveau de la baie de Bejaia (LEM ,1993)	37
Tableau 8: données de terrain des stations d'étude	47
Tableau 9 : produits chimiques utilisés dans le traitement des hydrocarbures	48
Tableau 10 : Références et utilisations des produits chimiques liquides dans le traitement des hydrocarbures	49
Tableau 11: Classification des différents types du sédiment marin	57
Tableau 12: Diamètres de grain et leurs appellations (CHAMLEY, et al., 2011)	59
Tableau 13 : Classement du sédiment par l'indice de classement	60
Tableau 14 : Type d'hydrodynamisme par rapport au facteur hydrodynamique (WEYDERT, 1971)	60
Tableau 15 : Classification des sédiments selon le taux des pélites	60
Tableau 16 : Conditions opératoires de la chromatographie en phase gazeuse (CPG)	64
Tableau 17 : Résultats des analyses physico-chimiques eau de mer du port de Béjaïa	67
Tableau 18 : Résultats des percentiles dans les stations	74
Tableau 19 : Indices granulométriques	74
Tableau 20 : Résultats des quartiles de chaque station	75

Liste des figures

Figure 1: Les processus de vieillissement des hydrocarbures en mer (Cédre , 2005)	14
Figure 2: Description schématique de susceptibilité des organismes marins aux hydrocarbures suivant leurs concentrations (O’Sullivan et Jacques, 2001 in Bocard, 2006).	18
Figure 3: La localisation géographique du port de Bejaia (Google Earth 2026).	25
Figure 4: Bathymétrie de la zone d’étude (LEM, 2011)	33
Figure 5: Schéma probable de la dynamique sédimentaire dans la baie de Bejaia (Google Earth, 2011)	35
Figure 6: Localisation des sites de prélèvement dans la zone d’étude	46
Figure 7: Extraction liquide-liquide : séparation de la phase organique et de la phase aqueuse	51
Figure 8 : évaporateur rotatif.....	52
Figure 9: purification des extraits par chromatographie sur Florisil.....	53
Figure 10: purification et fractionnement par chromatographie sur colonne ouverte.	54
Figure 11: Extracteur Soxhlet	56
Figure 12: Préparation et tamisage des échantillons de sédiments	59
Figure 13: Chromatographe en phase gazeuse PerkinElmer Clarus 580 GC équipé d’un détecteur FID	62
Figure 14 : Schéma d’un chromatographe en phase gazeuse.....	64
Figure 15: Variation de la température dans l’eau de mer de port de Bejaia	69
Figure 16: Variation de pH dans l’eau de mer de port de Bejaia	71
Figure 17: Variation de la salinité dans l’eau de mer de port de Bejaia	73
Figure 18: Concentration des Hydrocarbures aromatiques dans l’eau du port de Bejaia	74
Figure 19: Courbe granulométrique des échantillons des 4 stations	76
Figure 20: Concentration des Hydrocarbures aromatiques dans le sédiment port de Bejaia	78

Liste des abréviations

CRD : Centre de Recherche et Développement

COWS : Crude Oil Washing System

EPB : Entreprise Portuaire de Béjaïa

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

HCT : Hydrocarbures Totaux

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

LEM : Laboratoire d'Études Maritimes

MES : Matières En Suspension

MOP : Matière Organique Particulaire

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONM : Office National de la Météorologie

PSU : Practical Salinity Unit (Unité Pratique de Salinité)

RO/RO : Roll-On/Roll-Off

SSMO : Summary of Synoptic Meteorological Observations

Introduction

Introduction

Le milieu marin constitue un enjeu majeur pour le développement socio-économique. Au cours des dernières décennies, la pollution des océans à l'échelle mondiale est devenue une préoccupation croissante au niveau international.

La mer Méditerranée est particulièrement affectée par une pollution importante, résultant de l'augmentation des apports anthropiques d'origine côtière provenant des pays riverains en voie d'industrialisation. Ainsi, la civilisation moderne et les activités humaines représentent les principales causes de la contamination de l'hydrosphère. **(Salomon, 2003; Houma et al., 2005(a); Lambert et al., 1981 in Houma, 2009).**

Les zones portuaires, considérées comme parmi les secteurs côtiers les plus exposés à la pollution, constituent une menace importante pour les communautés benthiques et pélagiques. **(Boeining 1999 ; Viaroli et al., 2005 ; Warwick, 2005 in Rouane-Hacene, 2013).**

En Algérie, cette problématique est accentuée par le développement rapide du littoral et une forte pression démographique, avec près de 45 % de la population concentrée sur l'étroite bande côtière, en particulier dans les grandes zones industrielles et portuaires telles qu'Alger, Oran, Annaba, Arzew et Skikda. **(Grimes, 2003).**

Plusieurs études **(Grimes 1993 et 2003, Boutiba et al 2003)** ont mis en évidence une pollution croissante du littoral algérien, caractérisée par des contaminations de nature physique, bactériologique et chimique, notamment par les hydrocarbures, résultant de l'urbanisation, de l'agriculture, de l'industrialisation, de la combustion incomplète des matières organiques ainsi que des accidents liés au transport maritime. **(Rachdi, 2013 ; Dahnoun, 2013).**

De ce fait, la pollution par les hydrocarbures constitue l'un des problèmes environnementaux les plus préoccupants, en raison de ses impacts sur la santé humaine et les activités anthropiques. Cette dangerosité justifie leur classement parmi les polluants organiques persistants ainsi que leur inscription en tant que substances prioritaires par la Commission européenne, l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis et l'Organisation mondiale de la santé. **(GIP Seine Aval, 2008).**

Le choix de l'étude porte sur le port de Béjaïa, l'un des principaux ports commerciaux et industriels d'Algérie, situé dans une vaste baie méditerranéenne. Ce port constitue un pôle économique stratégique pour la région de la Kabylie, assurant le trafic de marchandises, l'exportation de produits locaux et l'accueil de navires passagers, tout en desservant un large arrière-pays.

Depuis plusieurs années, le port subit une pression anthropique croissante liée au trafic maritime, aux rejets industriels et aux effluents urbains. Ces activités génèrent une contamination potentielle par les hydrocarbures, composés persistants, toxiques et bioaccumulables, susceptibles d'affecter la qualité des eaux, des sédiments et de l'écosystème côtier.

Aujourd'hui, le littoral adjacent au port est directement affecté par ces pressions : accumulation de déchets, érosion côtière et dispersion de polluants dans l'eau et les sédiments constituent des risques environnementaux significatifs. Les hydrocarbures présents dans ces matrices représentent une

Source majeure de pollution chimique, pouvant avoir des impacts sur la biodiversité marine et la santé humaine.

L'objectif principal de cette étude est l'évaluation de la contamination par les hydrocarbures des eaux et des sédiments du port de Béjaïa. Pour ce faire, une campagne de prélèvements a été réalisée sur plusieurs stations représentatives du port durant le mois de février 2026, afin de caractériser la distribution spatiale des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), d'identifier leurs sources potentielles et d'évaluer les risques écologiques associés.

Ce travail est réalisé sur deux matrices principales :

- **Eau** : l'étude porte sur l'analyse des paramètres physico-chimiques et des indicateurs de pollution, notamment le pH, l'oxygène dissous, la conductivité, la turbidité, les matières en suspension (MES), la matière organique particulaire (MOP) ainsi que le dosage des hydrocarbures aromatiques.
- **Sédiments** : l'analyse comprend la granulométrie et le dosage des hydrocarbures aromatiques.

Pour répondre aux objectifs de l'étude, le mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

- ❖ **Chapitre 1 – Généralités** : Ce chapitre présente les notions fondamentales relatives aux différentes sources et types de pollution marine, aux paramètres physico-chimiques de l'eau et à la contamination par les hydrocarbures.
- ❖ **Chapitre 2 – Zone d'étude** : Ce chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, le port de Bejaïa. Il décrit sa situation géographique, ses caractéristiques hydrodynamiques et météorologiques, ainsi que les principales activités susceptibles d'influencer la qualité du milieu marin.
- ❖ **Chapitre 3 – Matériels et méthodes** : Ce chapitre décrit la méthodologie adoptée pour la réalisation de l'étude. Il présente les stratégies expérimentales mises en œuvre, le protocole de prélèvement des échantillons d'eau et de sédiments, les méthodes d'analyse utilisées en laboratoire, ainsi que le matériel et les produits chimiques employés.
- ❖ **Chapitre 4 – Résultats et discussion** : Il regroupe l'ensemble des résultats obtenus pour les matrices eau et sédiments, leur interprétation et l'évaluation de l'impact de la pollution sur la zone étudiée. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques, suivis d'une discussion comparant les données obtenues avec celles de travaux similaires publiés.

Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus et propose des perspectives pour la gestion et la prévention de la pollution dans le port de Béjaïa .

Chapitre I

Généralités

Généralité

I. La pollution marine

I.1.Introduction

La pollution marine est une problématique mondiale largement évoquée, en raison de ses conséquences néfastes sur les écosystèmes marins, la faune et la flore. Elle engendre également des impacts directs sur l'être humain. Afin de mieux appréhender la signification du terme « pollution », il est nécessaire d'en présenter quelques définitions.

➤ **Du point de vue juridique**

- **Selon la Convention de Montego Bay (1982) :** la pollution du milieu marin correspond à l'introduction, directe ou indirecte, par les activités humaines, de substances ou d'énergie dans les espaces marins, y compris les estuaires. Cette introduction peut entraîner des effets néfastes tels que la dégradation des ressources biologiques, des atteintes à la faune et à la flore marines, des risques pour la santé humaine, des obstacles aux activités maritimes comme la pêche, une détérioration de la qualité de l'eau de mer et une altération des valeurs récréatives du milieu marin.

➤ **Du point de vue opérationnel**

- **Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS) :** la pollution de l'eau correspond à toute altération des caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques de l'eau, ou à l'introduction de substances à l'état liquide, gazeux ou solide, susceptible de provoquer des nuisances. Elle peut rendre l'eau dangereuse ou préjudiciable pour la santé, la sécurité et le bien-être public, compromettre ses usages domestiques, commerciaux, industriels, agricoles et récréatifs, ainsi que porter atteinte à la faune sauvage et aquatique.

I.2.Les différents types et sources de la pollution

L'industrialisation et l'urbanisation constituent des étapes inévitables du développement humain. Toutefois, les risques de pollution qui en découlent représentent également une menace inévitable pour la santé des populations. L'exploitation de plus en plus intensive des matières premières et des sources d'énergie exerce des pressions cumulées sur la qualité des écosystèmes. Par ailleurs, il convient de prendre en considération les sources naturelles de pollution, telles que l'érosion des sols, l'activité volcanique, certaines plantes émettant

d'importantes quantités de pollen, ainsi que les sources naturelles de bactéries, de spores et de virus. La pollution par les hydrocarbures fait partie de la pollution chimique qui résulte du rejet dans le milieu marin de diverses substances chimiques, notamment les hydrocarbures, les détergents, les biocides tels que les pesticides organochlorés et organométalliques, ainsi que les métaux lourds comme le zinc, le cadmium et le mercure. Elle peut également provenir de la dissolution de sels minéraux, tels que les nitrates, les nitrites et les chlorures (**Bellan et Perres, 1994 ; Galaf et Ghannam, 2003, in Boughrira, 2012**).

I.2.1. La pollution par les hydrocarbures

I.2.1.1. Définition des hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés organiques constitués de chaînes moléculaires formées principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène (C et H). Le carbone possède quatre liaisons chimiques correspondant à quatre électrons de valence, ce qui lui permet de se lier soit à quatre atomes d'hydrogène, soit à d'autres atomes de carbone par des liaisons simples, doubles ou triples. Dans les structures comportant des liaisons multiples, on peut également retrouver, en faibles proportions, d'autres éléments tels que le soufre, l'azote et l'oxygène (**Fattal, 2008**).

I.2.1.2. Classification des hydrocarbures

A. Hydrocarbures aliphatiques

Les hydrocarbures aliphatiques sont des composés organiques à chaîne ouverte (linéaire ou ramifiée). Ils se divisent en trois catégories principales :

A.1. Les paraffines (Alcanes)

Les alcanes sont des hydrocarbures saturés, caractérisés par des liaisons simples entre les atomes de carbone. Leur formule générale est C_nH_{2n+2} . Ils peuvent être linéaires (n-alcanes) ou ramifiés (iso-alcanes) et représentent environ 30 % du pétrole brut. Ces composés sont généralement peu toxiques (sauf les plus légers) et facilement biodégradables, notamment les n-alcanes (**Michel, 1983 ; Krausz P et al., 2008**).

A.2. Les oléfines (Alcènes)

Les alcènes sont des hydrocarbures insaturés contenant au moins une double liaison carbone-carbone ($C=C$). Ils sont généralement absents du pétrole brut, mais présents dans les produits

raffinés. Ces composés sont instables et réactifs, notamment vis-à-vis des réactions d'addition, en raison de la présence de la liaison π (Krausz P et al., 2008).

A.3. Les acétyléniques (Alcynes)

Les alcynes sont des hydrocarbures insaturés caractérisés par une triple liaison carbone-carbone ($C\equiv C$). Ils peuvent être terminaux (avec hydrogène) ou substitués (avec groupements alkyles). Moins stables que les alcènes, ils présentent une forte réactivité chimique, notamment dans les réactions d'addition et d'oxydation (Krausz P et al., 2008).

B. Hydrocarbures aromatiques

B.1. Naphténiques (cyclaniques)

Les hydrocarbures naphténiques sont des hydrocarbures saturés cycliques, composés principalement de cycles à 5 ou 6 atomes de carbone (ex : cyclopentane, cyclohexane). Ils représentent environ 40 à 50 % du pétrole brut (Marchand et Kantin, 1995 in Fattal, 2008). Ces composés sont peu toxiques, mais plus persistants que les hydrocarbures aliphatiques. Certains dérivés comme les stéranes et hopanes sont utilisés comme indicateurs de pollution pétrolière.

B.2. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont des composés insaturés constitués de plusieurs cycles benzéniques fusionnés (au moins deux). Ils représentent généralement 15 à 40 % du pétrole brut et incluent des composés comme le benzène, le naphthalène ou l'anthracène. Ces hydrocarbures sont hautement toxiques, persistants et lipophiles, avec une forte capacité de bioaccumulation dans les organismes vivants. Certains, comme le benzo(a)pyrène, sont reconnus pour leurs effets mutagènes et cancérigènes (Fattal P., 2008 ; INERIS, 2005 ; Lacaze, 1980).

I.2.1.3. Origine des hydrocarbures dans l'environnement marin

A. Origine naturelle

Les hydrocarbures présents dans le milieu marin proviennent également de sources naturelles (Fernandes et al., 1997, in Abdelli et Mokrane, 2002). On peut distinguer deux types d'origines naturelles :

A.1. Suintement sous-marin naturel

La prospection pétrolière du sous-sol marin continue de s'intensifier. On estime que le flux d'hydrocarbures provenant des suintements naturels en mer s'élève à environ 0,6 million de tonnes par an, soit près de 10 % du flux total d'origine humaine (**Ramade, 1995**). Ces suintements proviennent à la fois de gisements pétroliers exploités et non exploités. Les fissures et filtrations d'hydrocarbures sont influencées par l'activité tectonique et dépendent des conditions géologiques et géochimiques locales (**Lacaze, 1980**).

A.2. Source biogène

Les organismes marins sont capables de biosynthétiser divers hydrocarbures, notamment aliphatiques, aromatiques et poly-aromatiques condensés. Le développement des techniques analytiques, telles que la chromatographie et la spectroscopie, a permis de révéler la complexité de ces composés, présents en faibles quantités dans la colonne d'eau et les sédiments. La biosynthèse, ainsi que les mécanismes de transformation — dissolution, évaporation, photo-oxydation, adsorption et désorption sur les particules, et transformations biologiques — conduisent à un mélange de composés dont la composition spécifique dépend à la fois des organismes producteurs et des conditions physico-chimiques du milieu.

Ces composés présentent une grande stabilité, ce qui en fait des marqueurs biologiques et géochimiques d'intérêt majeur. Par exemple, le phytoplancton et les macroalgues produisent des n-alcanes dont les longueurs de chaînes varient respectivement de n-C₁₄ à n-C₃₂ et de n-C₂₀ à n-C₃₀ (**Saliot, 1981**). Chez les bactéries (C₁₃ à C₂₀) et les plantes terrestres (C₁₅ à C₂₃), les n-alcanes ne présentent pas de prédominance pair/impair, avec un maximum de C₁₇ à C₂₀ pour les bactéries (**Han et Calvi, 1969 ; Oro et al., 1967**). Les plantes supérieures, en revanche, synthétisent des n-alcanes de poids moléculaire plus élevé (C₂₃ à C₃₃) avec une prédominance des nombres impairs.

B. Origine anthropique

De nombreuses études sur la distribution et l'abondance des hydrocarbures dans les environnements marins ont permis d'évaluer les niveaux de pollution, d'estimer l'augmentation éventuelle des concentrations due au transport et aux activités industrielles, et de prédire les effets des hydrocarbures d'origine anthropique sur les processus physiques, chimiques et biologiques (**Saliot, 1981**).

Selon Olajire et al. (2005), les hydrocarbures présents dans le milieu marin d'origine humaine proviennent de plusieurs sources :

- les fuites lors des opérations de forage offshore ;
- les naufrages et accidents de pétroliers ;
- les activités liées au transport maritime telles que le chargement, le déchargement et le déballastage
- les activités industrielles situées sur le littoral ;
- les rejets d'eaux contenant des hydrocarbures issus des procédés industriels.

Ces hydrocarbures sont introduits dans l'environnement marin sous forme de produits pétroliers raffinés, tels que les carburants et les huiles, dont la composition dépend à la fois du type de pétrole brut utilisé et des traitements subis lors du raffinage.

B.1. Pollution par les hydrocarbures provenant des navires

La pollution par les hydrocarbures liés au transport maritime peut être classée en deux catégories principales : la pollution opérationnelle et la pollution accidentelle. Bien que les deux se produisent lors des activités de transport maritime, elles diffèrent par leurs causes et leurs modes d'apparition.

B.2. Pollution opérationnelle

La pollution opérationnelle provient des activités normales liées à l'exploitation des navires, notamment le lavage des cuves et le rejet des eaux de ballast. Elle peut également entraîner la libération d'autres substances nocives dans le milieu marin.

B.2.1. Rejets des slops pétroliers

Les opérations de déballastage devraient idéalement être effectuées dans des installations spécialisées, appelées stations de déballastage. Cependant, dans la pratique, les pétroliers rejettent fréquemment leurs eaux de ballast directement en mer, ce qui constitue une source importante de pollution, d'autant plus que le volume du ballast représente environ un cinquième de celui du navire.

Après le déchargement de la cargaison, une petite quantité de pétrole adhère aux parois internes des citernes, représentant environ 0,5 % du volume total transporté. Traditionnellement, ces

parois étaient lavées à l'eau de mer, mais depuis 1971, cette méthode a été remplacée par le Crude Oil Washing System (COWS), une technologie plus efficace grâce à son pouvoir dissolvant supérieur (Laotbozzi, 2009 in Al Bakajaji, 2011).

B.2.2. Pollution liée au forage pétrolier

Le forage pétrolier en mer est une activité susceptible de générer une pollution importante par les hydrocarbures. Lors des opérations d'exploration et d'exploitation des gisements, des fuites accidentelles de pétrole, de fluides de forage ou d'eaux de production peuvent survenir. Ces rejets contaminent le milieu marin, affectent la qualité des eaux et des sédiments, et peuvent avoir des effets néfastes sur la faune et la flore marines. Bien que des mesures de prévention et de contrôle soient mises en œuvre, les accidents liés au forage pétrolier demeurent une source majeure de pollution des écosystèmes marins.

B.3. Pollution d'origine accidentelle en mer Méditerranée

La pollution accidentelle résulte principalement des collisions, des échouements de navires et des accidents pétroliers. Ces événements provoquent des déversements d'hydrocarbures pouvant contaminer les eaux, les sédiments et les organismes marins. En raison de son important trafic maritime, la mer Méditerranée est particulièrement exposée à ce type de pollution.

I.2.1.4. Propriétés physiques des hydrocarbures

Parmi les propriétés physiques des hydrocarbures, certaines sont particulièrement importantes pour comprendre leur comportement en milieu marin.

A. Densité

La densité détermine la flottabilité des hydrocarbures. Les hydrocarbures paraffiniques, plus légers, ont tendance à rester en surface, tandis que les naphthènes et les asphaltènes, plus lourds, peuvent couler. La majorité des pétroles déversés accidentellement ont une densité comprise entre 0,8 et 1, ce qui leur permet de flotter. Lorsque le poids moléculaire augmente (densité comprise entre 1 et 1,25), le pétrole peut s'enfoncer jusqu'à atteindre une profondeur où sa densité est égale à celle de l'eau. Outre le poids moléculaire, la densité des hydrocarbures peut être modifiée par la température, l'évaporation et la présence d'autres particules (Fattal, 2008).

B. Viscosité

La viscosité d'un hydrocarbure traduit sa résistance à l'écoulement et dépend notamment du pourcentage d'hydrocarbures légers. Elle s'exprime en centistokes (cSt) pour une température donnée. Cette propriété influence la vitesse de dispersion d'une nappe d'hydrocarbures à la surface de l'eau ainsi que sa capacité à pénétrer dans les sédiments lorsqu'elle atteint la côte. Un hydrocarbure plus visqueux pénètre moins dans le sédiment. La viscosité diminue avec l'augmentation de la température et augmente sous l'effet de l'évaporation des composés volatils, de l'oxydation photochimique et surtout de la formation d'émulsions inverses, qui modifient le comportement initial du produit (**Fattal, 2008**).

C. Point d'ébullition

Chaque fraction d'hydrocarbures possède une température d'évaporation spécifique. Les fractions légères s'évaporent à des températures relativement basses, inférieures à 20 °C. À mesure que les fractions légères disparaissent par évaporation, les hydrocarbures restants deviennent progressivement plus visqueux et plus denses.

I.2.1.5. Comportement des hydrocarbures dans le milieu marin

Lorsqu'un déversement de pétrole se produit en mer, le pétrole, hydrophobe et de densité légèrement inférieure à 1, forme une nappe à la surface de l'eau. Le devenir de cette nappe dépend de sa nature chimique et des conditions environnementales, telles que les courants, le vent, les vagues et la température. Après quelques heures, la nappe tend à se fragmenter en nappes plus petites et en gouttelettes. L'application de dispersants chimiques (surfactants) peut accélérer cette dispersion naturelle.

Les pétroles fluides s'étalent davantage, favorisant la solubilisation des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et leur évaporation. Les fractions légères, dont le point d'ébullition est inférieur à 200 °C, s'évaporent majoritairement dans les premières 24 heures, un processus amplifié par des températures élevées, des vents forts et une mer agitée. L'eau peut également s'incorporer au pétrole pour former des émulsions. Les hydrocarbures dispersés peuvent sédimenter lorsqu'ils sont plus denses que l'eau ou après fixation sur des matières en suspension, ce qui conduit à un transfert vers le compartiment sédimentaire (**Gilfillan et al., 1976; in Mazeas, 2004**).

A. Étalement

L'étalement est un processus clé pour prédire l'extension de la pollution et influence les autres transformations de la nappe. Il augmente la surface de contact avec l'eau et l'air, favorisant

l'évaporation et la dissolution. L'étalement définit deux variables importantes : la surface et l'épaisseur de la nappe, utilisées pour calculer l'évaporation et les changements de composition au fil du temps **(Reed et al., 1999 in Geory, 2013)**.

B. Évaporation

L'évaporation constitue le principal processus de transfert de masse lors des deux premiers jours suivant un déversement. Elle varie selon la nature des hydrocarbures : elle peut être totale pour l'essence ou le gasoil, atteindre 40 à 50 % pour un pétrole brut léger, et seulement 10 à 15 % pour un fioul lourd **(Geory, 2013)**. Les hydrocarbures légers (C4 à C12, $T_{eb} < 270\text{ °C}$) disparaissent rapidement **(Soltani, 2004)**. Ce processus dépend de la densité et de la viscosité de l'hydrocarbure, de la température, de la vitesse du vent et de la surface de la nappe.

C. Émulsification

L'émulsification conduit à la formation d'une émulsion eau-pétrole ou pétrole-eau, modifiant fortement le volume, la viscosité et la densité de la nappe, cette dernière tendant vers celle de l'eau. Le processus peut multiplier le volume de la nappe par 3 à 4 et ralentir les interventions de lutte.

- Émulsion huile dans l'eau : le pétrole se disperse sous forme de fines gouttelettes, instables mais pouvant atteindre de grandes profondeurs (jusqu'à 80 m).
- Émulsion eau dans l'huile (émulsion inverse ou "mousse au chocolat") : stabilise la nappe et complique les opérations de confinement et récupération, pouvant se former en quelques heures et atteindre 90 % de la nappe **(Sellali, 1996)**.

D. Sédimentation

La sédimentation correspond au transfert des hydrocarbures vers le fond marin, lorsque les résidus deviennent plus denses que l'eau de mer **(Lacaze, 1980)**. Elle résulte de deux mécanismes :

- Dans les eaux côtières peu profondes, la turbulence apporte des sédiments (argiles) qui se combinent avec le pétrole pour former des floculats colloïdaux, facilement sédimentables.
- Le vieillissement des hydrocarbures, par évaporation et solubilisation des composés légers, augmente leur densité. L'oxydation et la dégradation conduisent à la formation de glomérules ou boules de goudron semi-solides, flottantes au départ mais qui peuvent couler avec le temps. Le pétrole peut également sédimenter via l'ingestion par le zooplancton et l'excrétion sous

forme de pelotes fécales, ensuite dégradées par des microorganismes (**Lacaze, 1980; Mattei, 1995 in Lahlali et Hammi, 2005**).

E. Solubilisation

La solubilité des hydrocarbures dans l'eau de mer est faible mais augmente pour les composés polaires et de faible masse moléculaire. Les hydrocarbures solubles sont particulièrement dangereux car difficiles à éliminer et facilement absorbés par la faune et la flore (**Hamili, 2005 in Boudjellaba & Dehane, 2012; CEDRE, 2009**).

F. Photo-oxydation

La photo-oxydation se produit à la surface de l'eau sous l'effet de la lumière et de l'oxygène. Elle affecte surtout les composés aromatiques, plus photosensibles, et dans les alcanes, les structures ramifiées sont plus susceptibles que les n-alcanes. Ce processus produit des composés solubles (acides, alcools, cétones, peroxydes, sulfoxides) parfois toxiques pour les micro-organismes, avec des interactions notables avec la biodégradation (**Geory, 2013**).

G. Biodégradation

La biodégradation est le processus clé permettant l'élimination naturelle des hydrocarbures. Les microorganismes (bactéries, champignons, levures) utilisent les hydrocarbures comme source de carbone et d'énergie, les transformant en produits oxydés (**Bertha & Atlas, 1987 in Abdelli & Mokrane, 2002**). L'efficacité dépend de la disponibilité des nutriments, de la température, de l'oxygène et de la famille des hydrocarbures.

Les hydrocarbures saturés, notamment les n-alcanes, sont plus facilement biodégradés, tandis que certains composés aromatiques peuvent persister plusieurs années dans le milieu marin (**Boughrira, 2012**). La maîtrise de la biodégradation nécessite une bonne compréhension du métabolisme et de l'écologie des systèmes étudiés (**Lacaze, 1980; Mattei, 1995 in Lahlali et Hammi, 2005**).

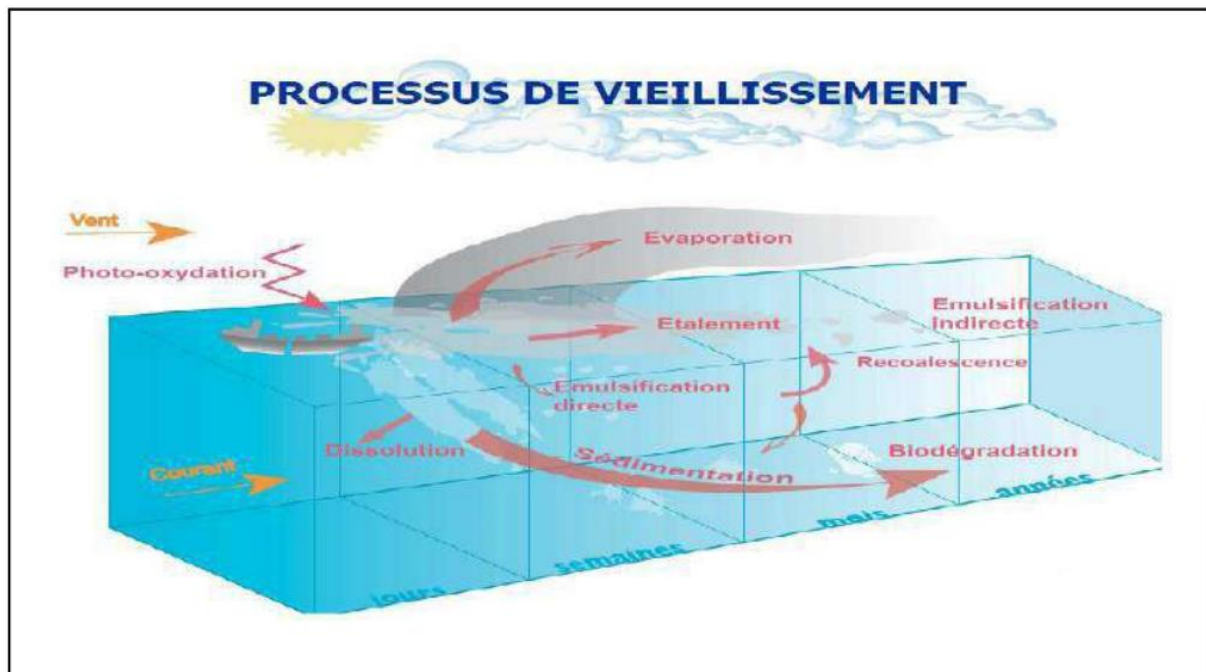


Figure 1: Les processus de vieillissement des hydrocarbures en mer (Cédre , 2005) .

I.2.1.6. Concentration des hydrocarbures dans l'environnement

En raison de leur nature complexe, les données sur la concentration des hydrocarbures dans les eaux de mer et les sédiments restent limitées. Leur présence doit être évaluée à trois niveaux :

- La microcouche de surface ;
- Les eaux de surface, comprenant les boules de goudron et les résidus goudronneux flottants
- La colonne d'eau, incluant les phases dissoute et particulaire.

Les hydrocarbures tendent à s'accumuler dans la microcouche de surface des océans, en raison de leur densité et de leur interaction avec les substances tensio-actives d'origine biogène (Lacaze et al., 1980).

I.2.1.7. Impacts environnementaux des hydrocarbures

La toxicité des hydrocarbures dans l'environnement est variée et complexe. Certains effets se manifestent rapidement, tandis que d'autres apparaissent après un certain temps. Ces composés affectent différents niveaux du règne animal et végétal, aussi bien en surface qu'en profondeur.

Pour le pétrole brut, les fractions légères et les composés aromatiques sont les plus toxiques. Dans le cas des produits raffinés, les substances à point d'ébullition bas, comme le kérosène, le gazole ou le fioul lourd N°6 (un combustible résiduel très visqueux utilisé principalement

comme carburant dans les navires et certaines installations industrielles), sont particulièrement nocives (**Saker, 2007**).

L'impact de la pollution par les hydrocarbures sur les biocénoses dépend plusieurs facteurs , notamment :

- Le type d'habitat ;
- La nature et la quantité des hydrocarbures ;
- La période du déversement (saison et stade de développement des espèces) ;
- Les conditions hydrométéorologiques et climatiques ;
- La durée et la fréquence d'exposition ;
- L'efficacité des mesures d'intervention (**Fattal, 2008**).

A. Impact sur la colonne d'eau

La dispersion et la dissolution des hydrocarbures affectent directement la colonne d'eau. Les zones peu profondes, comme les côtes, sont particulièrement sensibles, car la concentration des polluants y est plus importante (**Fattal, 2008**).

B. Impact sur le phytoplancton

L'effet du pétrole sur le phytoplancton dépend de la période de déversement. Si cela coïncide avec la poussée phytoplanctonique printanière, l'ensemble de l'écosystème peut être affecté, compromettant la production des niveaux trophiques supérieurs. Les hydrocarbures peuvent provoquer la prédominance de certaines algues (ex. phénophycées) et peuvent avoir un double effet :

- Inhibition de la croissance ;
- Stimulation dans certains cas.

Les doses létales de pétrole sont de 0,1 ppm, avec des effets sur la croissance à partir de 0,01 ppm (**Peres et al., 1976 in Abdelli et Mokrane, 2002**).

C. Impact sur le zooplancton

Les effets sur le zooplancton sont moins évidents, car il est difficile de distinguer les perturbations dues à la pollution de la variabilité naturelle liée aux conditions écologiques (brassage, saisonnalité) (**Fattal, 2008**).

D. Impact sur les espèces benthiques

- **Phytobenthos** : les algues benthiques sont relativement peu sensibles. Les effets à court terme incluent l'engluage et la brûlure des tissus en cas de contact direct avec le pétrole. Les conséquences économiques peuvent être importantes pour les espèces exploitées, mais à long terme, la restauration naturelle des champs d'algues est généralement observée (**Fattal, 2008**).

- **Zoobenthos** : l'écosystème benthique est le plus vulnérable. Le pétrole peut provoquer immobilisation, asphyxie, intoxication et narcose. Les espèces sessiles sont plus sensibles que celles capables de se déplacer. Les hydrocarbures piégés dans les sédiments augmentent la mortalité, surtout pour la macrofaune des substrats meubles comparée aux substrats rocheux (**Bondenec et al., 1983 in Sellali, 1996**).

E. Impact sur les phanérogames marines

Les herbiers marins, abritant de nombreuses espèces, sont essentiels à la productivité des écosystèmes tropicaux. Des concentrations élevées d'hydrocarbures dans des eaux peu profondes peuvent endommager ces plantes et les organismes associés. Les opérations de nettoyage doivent être pratiquées avec précaution pour éviter l'arrachage ou la destruction des herbiers par les ancres et les hélices (**ITOPF, 2013**).

F. Impact sur les oiseaux marins

Les oiseaux sont particulièrement vulnérables lors des accidents pétroliers majeurs. L'imprégnation du plumage par le pétrole réduit son pouvoir isolant, provoquant l'hypothermie et la mort (**GESAMP, 1993 in Lahlali et Hammi, 2005**).

Pour des contaminations moins sévères, le pétrole peut être absorbé par les plumes de la poitrine, augmentant le poids et l'épuisement physique. Il peut aussi affecter la fécondité, rendant les œufs stériles ou empêchant le développement embryonnaire (**Marie, 2003; Laubier, 1991 in Lahlali et Hammi, 2005**).

G. Impact sur les poissons

Les poissons sont affectés par ingestion d'organismes contaminés ou en cherchant leur nourriture dans des zones polluées. Les hydrocarbures provoquent :

- Altérations cutanées (nécroses, tumeurs) ;
- Effets sur le système nerveux, modifiant le comportement de groupe ;
- Perturbations de la reproduction et destruction des frayères ;
- Modification de l'alimentation des larves et des alevins (**Marie, 2003; Collos, 1977 in Lahlali et Hammi, 2005**).

H. Impact sur l'homme

L'exposition humaine se fait par inhalation, ingestion ou contact cutané, les poumons et la peau étant les voies principales en milieu professionnel. Le benzène et certains HAP sont liés à l'apparition de cancers. D'autres symptômes incluent douleurs abdominales, lombalgies, troubles du sommeil et fatigue, observés notamment lors des opérations de nettoyage (**Fattal, 2008**).

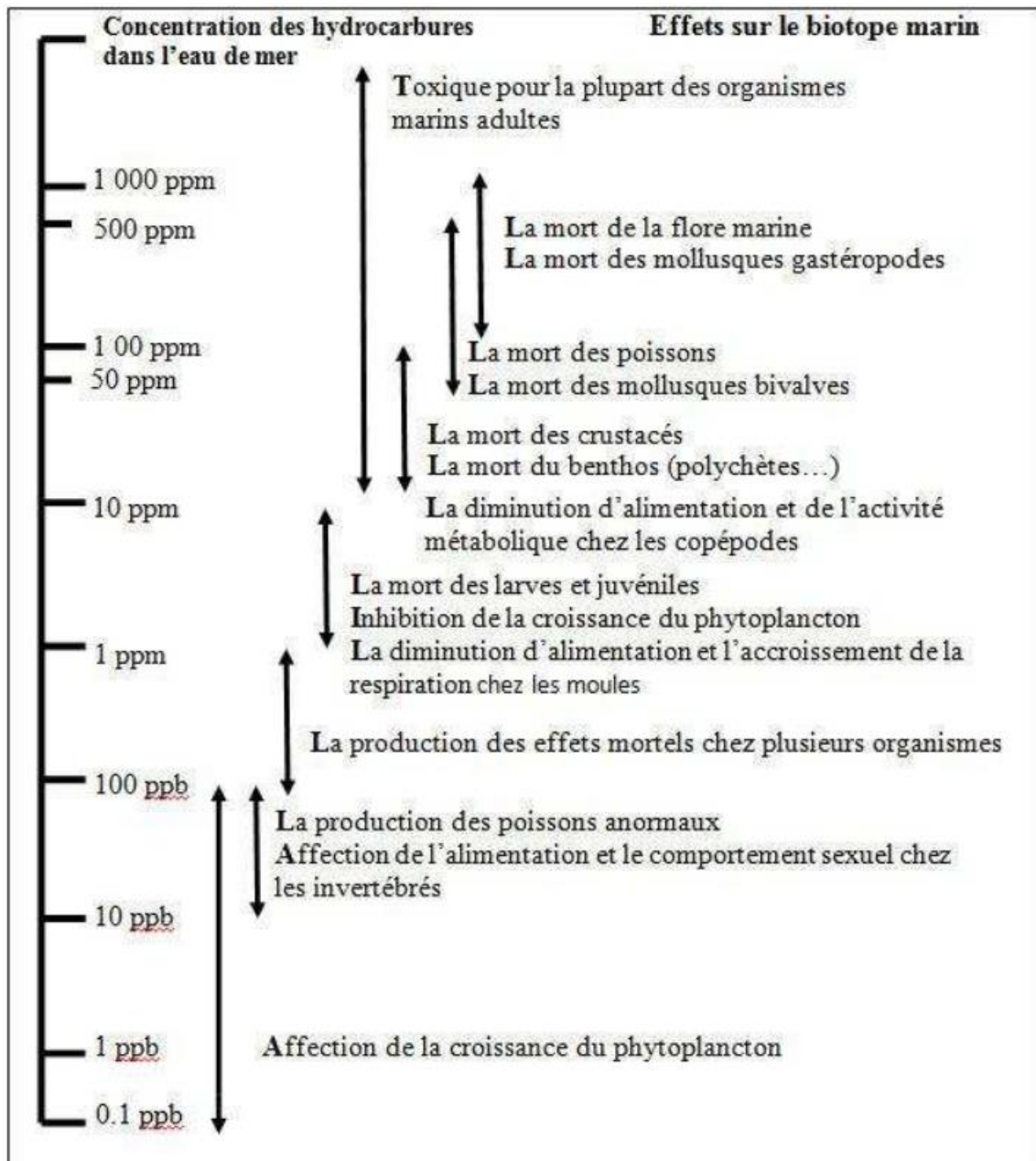


Figure 2: Description schématique de susceptibilité des organismes marins aux hydrocarbures suivant leurs concentrations (O'Sullivan et Jacques, 2001 in Bocard, 2006).

I.2.1.8. Les descripteurs de la pollution de l'eau de mer

I.2.1.8.1. Les paramètres physico-chimiques

A. La température

La température constitue un paramètre physique essentiel dans la caractérisation des masses d'eau marines. Sa mesure permet d'évaluer la stratification verticale de la colonne d'eau, de déterminer le taux de saturation des gaz dissous, notamment l'oxygène, ainsi que de comprendre les mécanismes de circulation océanique. Elle représente également un facteur

écologique majeur influençant l'activité biologique, la productivité globale du milieu et la distribution des espèces (**Aminot et al., 2004**). Une augmentation anormale de la température peut entraîner des déséquilibres importants dans les écosystèmes aquatiques, phénomène connu sous le nom de pollution thermique. Dans les milieux marins, la température diminue généralement de la surface vers les profondeurs. Elle varie aussi en fonction d'autres paramètres physico-chimiques, tels que la pression. En surface, elle est principalement soumise aux conditions climatiques atmosphériques, tandis qu'en profondeur, elle décroît de manière progressive (**Aminot et al., 2007**).

B. La salinité

La salinité est un paramètre fondamental en milieu marin. Elle correspond à la quantité totale de sels minéraux dissous dans l'eau de mer. Sa détermination permet d'étudier la circulation océanique, d'identifier les différentes masses d'eau selon leur origine et de suivre leurs processus de mélange, aussi bien au large qu'au niveau des zones côtières et des estuaires (**Aminot et al., 1983**).

La première définition rigoureuse de la salinité a été proposée par Sorensen (1902). Elle correspond à la masse, exprimée en grammes, des substances solides contenues dans un kilogramme d'eau de mer, après remplacement des ions bromure et iodure par leur équivalent en chlorure, transformation des carbonates en oxydes et oxydation complète de la matière organique (**Aminot et al., 2004**).

Dans les océans, la salinité moyenne est proche de **35 ‰** et elle tend à diminuer de l'équateur vers les pôles. Toutefois, certaines mers présentent des valeurs particulières : la Méditerranée (**38–39 ‰**), la mer Rouge (**36–47 ‰**), la mer Baltique (**< 15 ‰**) et la mer Noire (**18–22 ‰**) (**Aminot et al., 2004**).

C. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est un paramètre qui permet d'évaluer le degré d'acidité ou d'alcalinité d'une eau. Il est généralement mesuré à l'aide d'un pH-mètre basé sur une méthode électrochimique utilisant une électrode en verre (**Aminot et al., 1983**).

Le pH dépend de la concentration en ions hydrogène (H^+) ou, plus précisément, en ions oxonium (H_3O^+) dans le milieu. Cette notion a été introduite par Sørensen (1909), qui a défini le pH comme le logarithme décimal négatif de la concentration en ions hydrogène (**Aminot et al., 2004**).

pH = - log [H₃O⁺] , dans l'eau de mer, le pH est généralement voisin de **8,2**. Il est principalement régulé par le système carbonaté, notamment par le dioxyde de carbone (CO₂), les bicarbonates (HCO₃⁻) et les carbonates (CO₃²⁻). Toute variation des concentrations en CO₂ (liée à la respiration, à la photosynthèse ou aux échanges air–mer) ou en bicarbonates (par exemple lors des phénomènes de précipitation) entraîne ainsi une modification du pH (**Aminot et al., 1983**).

I.2.1.9. Les sédiments

La compréhension du comportement des sédiments nécessite une connaissance approfondie des interactions entre les différentes phases qui les composent. Dans le cas d'un milieu contaminé, il est également essentiel d'identifier la nature des polluants présents ainsi que leur dynamique au sein du sédiment (**Tran, 2009**).

I.2.1.9. 1. Définition

Les sédiments sont définis comme « un ensemble constitué de particules de tailles variables ou de matières précipitées ayant subi, individuellement, un certain transport » (**Forstner, 1987**).

Les sédiments correspondent ainsi à des dépôts continentaux ou marins formés de particules issues de l'altération et de la désagrégation de roches préexistantes, ainsi que de la précipitation de matières en suspension transitant dans la colonne d'eau (**Loustau Cazalet, 2012**).

I.2.1.9. 2. Composition des sédiments marins

Les sédiments présentent une grande diversité et une structure complexe et hétérogène. Ils se composent généralement de trois phases principales :

- **Phase solide** : constituée de sables, d'argiles, d'oxydes, de sulfures, de phosphates ou de sulfates insolubles, ainsi que de matières organiques, de débris et de déchets de diverses origines.
- **Phase liquide** : représentée par l'eau interstitielle, qui permet les échanges entre le sédiment et la colonne d'eau et joue un rôle dans le transfert éventuel des polluants vers les aquifères.
- **Phase gazeuse** : constituée des gaz présents dans les pores des sédiments, tels que l'oxygène (O₂), le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄). Elle résulte principalement de l'activité biologique et participe aux échanges entre les sédiments et la colonne d'eau.

I.2.1.9. 3. Caractéristiques des sédiments

Les sédiments se caractérisent principalement par leur granulométrie, leur composition minéralogique, ainsi que par leur teneur en eau et en matière organique.

I.2.1.9.4. Granulométrie des sédiments

La distribution granulométrique d'un sédiment conditionne sa répartition dans le milieu aquatique. Les particules les plus grossières se déposent généralement en amont, tandis que les particules fines sont transportées plus loin et se déposent en aval (**Scordia, 2008**).

I.2.1.9.5. Composition minérale et organique

La composition minéralogique des sédiments varie en fonction de leur origine géographique et géologique (**Schneider, 2001**).

Les éléments grossiers tels que les blocs, les galets, les graviers et les sables correspondent principalement à des sédiments terrigènes issus de l'érosion des sols. Leur composition chimique dépend étroitement de la nature des roches sources. Les sables sont majoritairement constitués de quartz (silice, SiO_2) ou de silicates (mica, feldspath), et peuvent contenir des minéraux lourds tels que les amphiboles, les grenats ou le disthène, en relation avec la lithologie des terrains érodés. Des sables calcaires peuvent également être présents. Les fractions plus fines, comme les limons, les boues et les vases, sont composées essentiellement de minéraux argileux d'origine terrigène, ainsi que de débris biologiques, notamment des squelettes d'organismes d'origine endogène.

I.2.1.9.6. Pouvoir accumulateur des sédiments

De nombreuses substances chimiques rejetées dans l'environnement ont tendance à s'accumuler dans les sédiments, au fond des rivières, des canaux, des lacs, des retenues d'eau, ainsi que dans les estuaires et les fonds marins. Les sédiments constituent ainsi un compartiment privilégié pour évaluer le niveau de contamination d'un écosystème aquatique (**Mearns et al., 1986**).

Les particules fines, en particulier les argiles de granulométrie inférieure à **2 μm** , ainsi que la matière organique, représentent les principaux sites de fixation des polluants (**Barbe, 1997**). En général, plus la granulométrie du sédiment est fine, plus sa capacité d'accumulation des contaminants est élevée.

Tableau 1 : Les variations de concentration en hydrocarbures (HCT : Hydrocarbures Totaux) dans les sédiments. (UNESCO/IOC, 1982 ; Baumard et al., 1998)

Zone	Concentration typique en hydrocarbures (ppm ou $\mu g/g$ sec)
Sédiments non pollués (Large, eaux côtières propres)	< 1 - 10 $\mu g/g$
Zone côtière peu contaminée	10 - 50 $\mu g/g$
Zone à influence portuaire / industrielle	50 - 500 $\mu g/g$
Zones fortement contaminées (Proche déversoirs/épaves)	> 500 $\mu g/g$ (jusqu'à >1000)

CHAPITRE II

ZONE D'ÉTUDE

II. Zone d'étude

II.1. Situation géographique du port de Bejaia

Le port de Béjaïa bénéficie d'une situation géographique privilégiée au cœur de la Méditerranée occidentale et au centre de la côte algérienne, ce qui lui confère une originalité économique et une place de choix sur les routes maritimes. Protégé naturellement, sa rade est l'une des plus sûres, offrant un refuge sûr aux navires.

L'hinterland direct du port s'étend sur un rayon de 250 km et compte plus de 12 millions d'habitants répartis sur 10 wilayas. Cette zone est la plus dense en activités économiques, à la fois industrielles et commerciales. Plusieurs projets d'envergure nationale sont en cours ou prévus dans le cadre d'un plan global de développement. (LEM, 2003).

L'hinterland est segmenté en trois grandes zones principales :

- La zone de l'Algérois, comprenant les zones industrielles de Rouiba, Réghaia et Corso.
- La zone des Hauts Plateaux, qui regroupe les zones industrielles de Sétif, El Eulma, M'sila et Bordj Bou Arréridj.
- La zone de la Soummam, avec les zones industrielles d'Akbou, El Kseur et Béjaïa.

La ville et le port disposent d'un réseau routier reliant toutes les villes du pays, ainsi que de voies ferroviaires et d'un aéroport international, facilitant ainsi les échanges et le transport.

Le port de Bejaia est un port mixte (port pétrolier, commercial et un quai pêcheur) situé à environ 1,5 Km au sud du Cap Carbon. Il a été construit en deux étapes :

- entre 1898 et 1922 pour le port commercial

- entre 1958 et 1960 pour le port pétrolier.

➤ Position géographique du port de Bejaïa

Le port de Béjaïa est situé à :

- la latitude nord 36°45'24''
- la longitude est 05°05'50''

Le Port de Béjaïa est implanté dans la baie de Béjaïa et bénéficie d'une position géographique stratégique facilitant les échanges commerciaux (Figure 3). Son domaine public maritime et portuaire est défini conformément à la réglementation en vigueur. Ce domaine est délimité :

- au nord par la route nationale n°9
- au sud par les jetées de fermeture du large s'étendant sur une longueur d'environ 2 750 mètres
- à l'est par la jetée Est
- à l'ouest par la zone industrielle de Béjaïa.

Cette organisation spatiale permet d'assurer une gestion optimale et sécurisée des activités portuaires, tout en renforçant le rôle économique du port à l'échelle régionale et nationale.

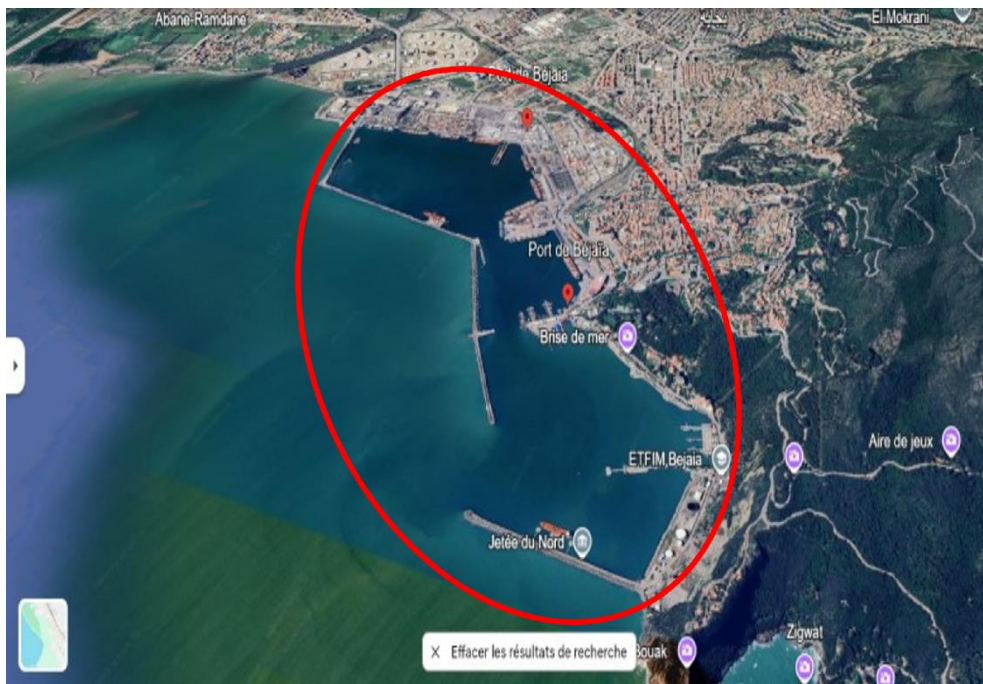


Figure 3: La localisation géographique du port de Bejaia (Google Earth 2026).

II.2. Présentation générale du port de Bejaia

Le port de Béjaïa est l'un des principaux ports d'Algérie, situé sur la côte nord du pays, au niveau de la wilaya de Béjaïa, et ouvert sur la Mer Méditerranée. Il joue un rôle stratégique dans le développement économique national, en assurant des activités variées telles que le transport des hydrocarbures, le commerce de marchandises et les services portuaires.

Le port se distingue par la diversité de ses fonctions, comprenant un port pétrolier, un port marchand et un port de pêche, ce qui en fait une zone à forte activité maritime.

En raison de cette intensité d'exploitation, le port constitue un environnement potentiellement exposé à différentes formes de pollution, notamment la contamination par les hydrocarbures. (EPB,2026).

II.3. Caractéristiques du port du Béjaïa

Le port de Béjaïa présente plusieurs caractéristiques techniques qui facilitent les activités maritimes et influencent le fonctionnement de la zone portuaire.

II.3.1. Accès au port

Le port de Béjaïa est desservi par un chenal extérieur d'une largeur de 320 mètres, maintenu par dragage à une profondeur de 13,50 mètres (EPB, 2026). L'accès des navires de marchandises générales aux bassins du vieux port et de l'arrière-port s'effectue via deux passes principales :

- La passe Abdelkader, large de 110 mètres et draguée à 12 mètres de profondeur
- La passe de la Casbah, située entre le vieux port et l'arrière-port, offrant une largeur de 125 mètres avec une profondeur également maintenue à 12 mètres.

II.3.2. Bassin portuaire

Le port de Béjaïa se structure autour de trois bassins distincts (Tableau 2):

- Bassin de l'Avant-Port
- Bassin du Vieux Port
- Bassin de l'Arrière-Port

Tableau 2 : Caractéristiques des bassins portuaires de Bejaia (EPB, 2026).

Bassins	Superficie (hectares)	Profondeur (m)	Activités
Avant-Port	75	10.5 à 13.5	la réception et au traitement des navires pétroliers
Vieux port	25	8 à 9	Pêche
Arrière-Port	55	10.5 à 12	Commerce

II.3.3. Jetées et brise-lames

À l'est, le port est délimité par une jetée Est d'une longueur de 650 mètres.

Au sud, la protection est assurée par une jetée en chevrons, composée de trois éléments distincts dont la longueur totale atteint 2 750 mètres (Tableau 3) :

- La jetée Sud,
- La jetée du large,
- Et la jetée de fermeture.

Tableau 3 : Caractéristiques des ouvrages de protection (EPB, 2026).

Jetées	Longueurs	Profondeurs
Jetée est	650mL	Entre 0 et 16m
Jetée sud	450mL	Entre 10 et 13m
Jetée du large	1500mL	Entre 6 et 10m
Jetée de fermeture	800mL	Entre 0 et 6m

II.3.4. Mouillage

La rade de Béjaïa, reconnue comme l'une des meilleures le long de la côte algérienne, offre d'excellentes conditions de protection ainsi que des fonds favorables à un mouillage sûr, avec des profondeurs comprises entre 10 et plus de 20 mètres. Protégée de tous les vents, à l'exception du vent de Nord-Est à l'Est, la rade est délimitée par une ligne imaginaire reliant le Cap Carbon au Cap Aokas. La zone de mouillage destinée aux pétroliers se situe à l'est de l'axe du chenal d'accès. (EPB, 2026).

II.3.5. Les infrastructures portuaires

Le port de Béjaïa s'étend sur une superficie totale de 79 hectares. Sa surface destinée à l'entreposage couvre 422 000 m², dont 17 500 m² sont couverts. Il dispose d'environ 3 235 mètres linéaires de quais, répartis en 16 postes à quai pour navires de marchandises générales, 3 postes pour navires pétroliers, 2 postes RO/RO et 1 poste gazier. (Tableau 4)

Tableau 4 : Caractéristiques des ouvrages d'accostages (Quais) (EPB, 2026).

Bassins	Nom de Quai	N° des postes à quai	Profondeurs (m)	Longueurs (m)
Vieux port	Quai Nord	6	8	102
	Prolongement de Quai Nord	Entre 06-07	9	40
	Quai RO/RO pour car-ferries	Poste 07	9	30
	Quai Ouest	07 à 11	9	380
	Quai de la Casbah	12 et 13	8	235

Arrière port	Quai Sud-Ouest	15 et 16	10.5	230
	Quai de la gare	17 à 19	7.5 à 10.5	530
	Nouveau Quai	20 à 24	12	750
	Grande jetée du large	26	12.5	78
Avant-port	Port pétrolier	01 à 03	10 à 13.5	710
Passe Casbah	Quai de la passe	14	10	145

II.3.6. Répartition des zones du port

- a. **Port pétrolier :** Le port pétrolier est une zone spécialisée dans le traitement des hydrocarbures. Il occupe une superficie totale d'environ 84 205 m², dont 935,15 m² de surfaces bâties. La surface des occupations est estimée à 55 052,15 m², soit un taux d'occupation d'environ 65 %. Cette zone est équipée d'installations spécifiques permettant le stockage et le transfert des produits pétroliers. **(EPB, 2026).**
- b. **Port marchand :** Le port marchand constitue la principale zone d'activité du port de Béjaïa. Il s'étend sur une superficie de 609 216,69 m², dont 8 832,28 m² de surfaces bâties. La surface occupée est de 263 061,28 m², soit un taux d'occupation d'environ 44,27 %. Il est destiné au traitement des marchandises diverses, notamment les conteneurs et les produits en vrac. **(EPB, 2026).**
- c. **Port de pêche :** Le port de pêche est dédié aux activités halieutiques. Il couvre une superficie d'environ 27 140 m², dont 2 019,5 m² de bâtiments, avec des installations adaptées aux besoins des pêcheurs. Cette zone joue un rôle important dans le développement de la pêche locale. **(EPB, 2026).**

II.4. Les conditions naturelles et physiques du port

Selon Hammoudi (2009), la ville de Béjaïa est édifiée sur des terrains appartenant principalement à deux systèmes géologiques de l'ère secondaire : le Jurassique et le Crétacé.

La partie nord de la région étudiée, incluant le djebel Gouraya et le cap Carbon, est principalement constituée de formations jurassiques, caractérisées par des calcaires riches en fer. En revanche, la partie sud, s'étendant du cap Bouak jusqu'à l'avant-port, est dominée par des formations crétacées (marneuses et conglomératiques, également riches en fer).

Le phénomène de lessivage de ces formations, particulièrement accentué lors des épisodes de forte pluviométrie, engendre un transfert significatif de fer vers le milieu marin, contribuant

ainsi à des apports solides susceptibles d'impacter la zone portuaire. Ces apports sont également tributaires des conditions hydrologiques propres à la région. En effet, plusieurs cours d'eau, notamment l'oued Soummam, drainent les bassins versants adjacents et se déversent directement en mer. Ce dernier, avec un bassin versant de plus de 9 125 km² et une longueur excédant 100 km, représente la principale voie d'écoulement fluvial de la région.

Le bassin versant de l'oued Soummam se distingue par une forte hétérogénéité dans les régimes d'écoulement et de ruissellement, résultant essentiellement de trois facteurs interdépendants :

- L'irrégularité de la pluviométrie
- La variation des caractéristiques géomorphologiques telles que les pentes et la perméabilité des sols
- La diversité du couvert végétal.

Ces paramètres influent directement sur les débits liquides (Ql) et les apports solides (As) qu'ils génèrent. Les données hydrologiques disponibles, recueillies entre 1964 et 1974 à la station de Sidi-Aich (**LEM, 1993**), indiquent un débit moyen de (26 m³/s), avec des valeurs minimales journalières oscillant entre (0,8 et 1 m³/s) en période d'étiage, et des débits maximaux pouvant atteindre (2200 m³/s) lors des crues hivernales.

Sur le plan hydrogéologique, les nappes phréatiques les plus significatives sont localisées dans les plaines alluvionnaires côtières de Béjaïa. Leur recharge s'effectue par infiltration directe des précipitations sur la plaine, par infiltration des eaux drainées à partir des bassins versants situés en piémont, ainsi que par les apports des cours d'eau traversant ces plaines.

II.5. Les données climatiques

L'analyse a été réalisée à partir des données relatives aux précipitations et aux fréquences des vents enregistrés à la station météorologique de Béjaïa (36°04'N - 05°04'E, « O.N.M »), complétées par certaines observations de fréquence des vents fournies par le S.S.M.O (Summary of Synoptic Meteorological Observations) pour la période 1969-1970.

II.5.1. La pluviométrie

Les données recueillies sur une période de 18 ans (1969-1986) à la station météorologique de Béjaïa indiquent les valeurs moyennes suivantes :

- Une pluviométrie annuelle de 798 mm

- Une évaporation potentielle de 1154 mm par an
- Une température moyenne de 18,6 °C (**LEM, 1993**).

La région de Béjaïa se distingue par des précipitations particulièrement abondantes. Selon l'Office National de la Météorologie (**O.N.M**), elle est considérée comme « l'une des villes les plus pluvieuses du pays ». Les précipitations annuelles moyennes varient entre 800 et 1200 mm (**Direction de l'Hydraulique de Béjaïa, 2006**).

La répartition des précipitations au cours de l'année est très inégale et soumise à une forte influence saisonnière. Le maximum pluviométrique est observé entre novembre et mars, avec un pic interannuel moyen supérieur à 160 mm durant les mois de janvier et février. À l'inverse, la période allant de mai à août enregistre les plus faibles précipitations, avec une moyenne inférieure à 6 mm sur ces quatre mois, particulièrement lors des années les plus sèches. Par exemple, durant la période 1985-1986, le nombre annuel de jours de pluie s'établissait à environ 100 jours, avec un maximum en hiver (38 jours) et un minimum en été (7 jours).

La distribution des précipitations est largement conditionnée par l'orientation des massifs montagneux par rapport à la mer et aux flux de vents humides.

II.5.2. Les vents

L'analyse des données recueillies dans la région de Béjaïa révèle que la distribution des vents est étroitement influencée par le relief environnant, notamment le Djebel Gouraya et la vallée de la Soummam. En effet, les vents provenant du secteur ouest sont canalisés par la vallée de la Soummam, ce qui oriente leur trajectoire selon un axe sud-ouest/nord-est. Ce phénomène local est communément désigné sous le nom de « vent de la Soummam ».

A. Données de S.S.M.O

En s'appuyant sur les données du S.S.M.O. (Summary of Synoptic Meteorological Observations) couvrant la période de 1963 à 1970, il est possible de déterminer les fréquences d'apparition des vents selon leur direction et leur vitesse, à la fois trimestriellement et annuellement. L'analyse révèle qu'au cours du premier trimestre, les vents dominants proviennent majoritairement des secteurs nord-est et est, représentant plus de 20 % du temps observé.

B. Régime hivernal : octobre à avril

Ce régime se caractérise par une nette prédominance des vents en provenance des secteurs sud-ouest et ouest (voir tableau 2). Le mois de janvier est particulièrement représentatif de cette tendance, avec environ 8 % des vents atteignant des vitesses supérieures à 16 m/s, soit près de 31 nœuds.

C. Régime estival : mai à septembre

La prédominance des vents provenant des secteurs Nord-Est et Est-Est manifeste principalement durant les mois de juillet et août. (Tableau 5).

Tableau 5 : Fréquences et répartition des vents à la station de Bejaia (LEM, 1993)

Direction en %	Régime	
	Hivernale	Estival
Sud-ouest	40	21
Ouest	23	9
Nord-est	6	20
Est	7	13
Calme	24	37

La direction Nord- ouest n'est pas représentée car sa fréquence est trop faible durant le régime estival ; 2% des vents (tous secteurs confondus) ont une vitesse supérieure à 16m/s (tableau 6)

Tableau 6 : Moyennes mensuelles de la pluviométrie, de la température et de l'humidité de l'année 2007(ONM, 2008)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
T°(c)	12	14	13	16	19	22	25	26	23	20	14	11
Précipitation (mm)	9	20	132	175	12	10	3	7	63	149	175	207
Humidité (mm)	74	76	77	83	73	77	78	72	60	80	78	80

L'étude de ces trois facteurs révèle que l'hiver est la saison où les précipitations sont les plus importantes. Pendant cette période, le vent dominant provient du Sud-Ouest et de l'Ouest (40%). Cette observation est d'autant plus significative lorsqu'on la relie à l'importance des crues et lessivages dans les bassins versants de l'oued Seghir et Soummam. Comme le montre le graphique, on constate surtout une augmentation des apports solides et liquides durant la saison printanière et hivernale en raison des précipitations.

II.6. La géomorphologie côtière et sous-marine

Le golfe de Béjaïa se présente comme une ouverture importante du littoral vers le large (Figure 4), caractérisée par une forme concave. Il est délimité à l'ouest par les falaises jurassiques du cap Bouak, et à l'est par le massif volcanique miocène du cap El Aouana. Cette configuration confère à ce golfe une morphologie particulièrement singulière (**Leclaire, 1972**). Les principales caractéristiques morphologiques sont les suivantes :

- Un plateau continental relativement étroit, d'une largeur moyenne de 1,5 km, présentant une pente douce d'environ 1°, et assimilable à un talus d'accumulation sédimentaire.
- Littoral découpé par de vastes « criques » (notamment au niveau du cap Aokas et de Béni-Segoual), à partir desquelles se développent des vallées sous-marines.
- Un littoral sablonneux, marqué par la présence de dunes, qui borde le pied des falaises de la chaîne de la Kabylie des Babors.
- Le plateau de la baie de Béjaïa est traversé, à une profondeur comprise entre 40 et 100 mètres, par un petit canyon remarquable par ses dimensions et sa localisation. Ce canyon entaille légèrement le rebord du plateau continental avant de s'estomper au-delà des isobathes de 150 mètres (**Leclaire, 1972**).

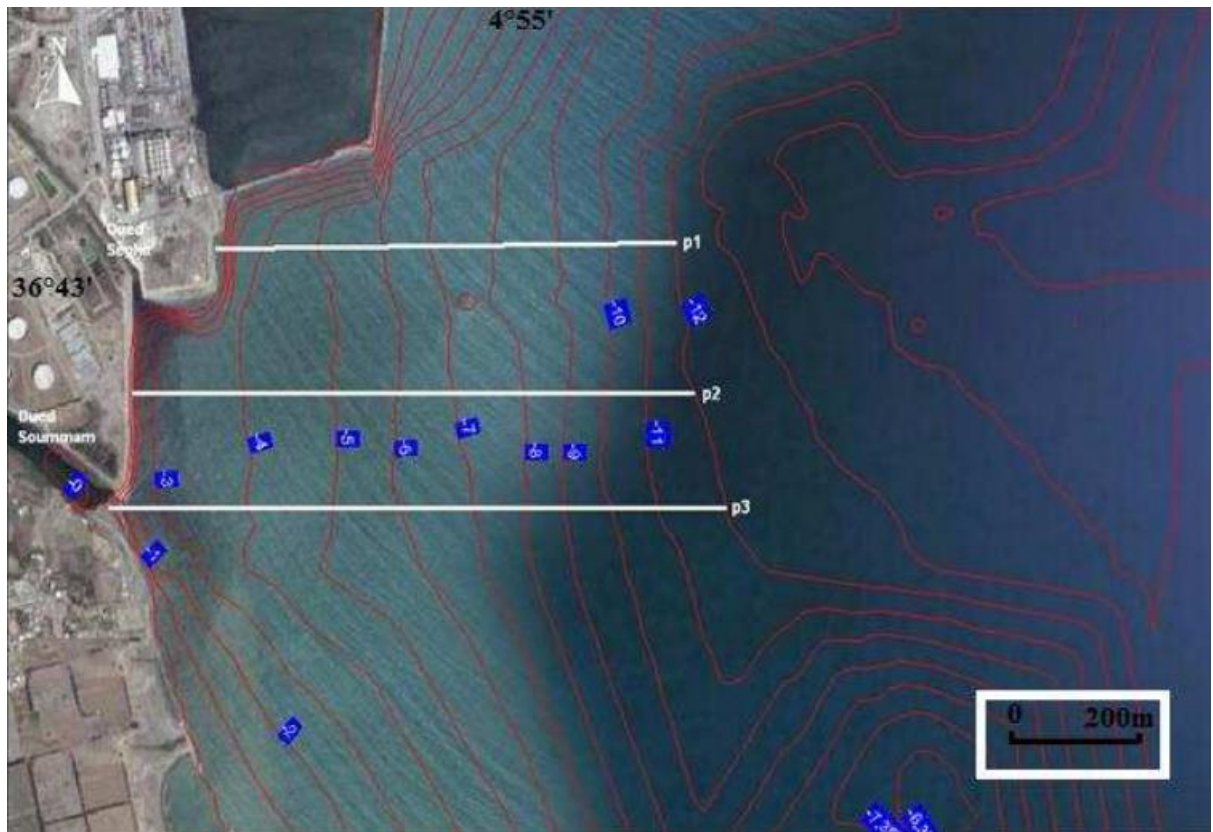


Figure 4: Bathymétrie de la zone d'étude (LEM, 2011)

Au regard de la figure (4) ci-dessus, il est possible de conclure que la bathymétrie spécifique de la zone étudiée se caractérise par les éléments suivants :

Entre 0 et 3 mètres de profondeur, les courbes bathymétriques révèlent une pente relativement abrupte, comparable à celle d'une falaise. Cette topographie est principalement attribuable à l'action des courants provenant des secteurs nord et nord-ouest, lesquels transportent d'importantes quantités de sédiments côtiers vers le large, accentuant ainsi le phénomène d'érosion.

Au-delà de 3 mètres de profondeur, la bathymétrie de la zone étudiée présente une pente généralement modérée, marquée par la présence de dépôts sédimentaires résultant du transport des matériaux côtiers.

II.7. Données sédimentologiques et bathymétriques

La distribution des sédiments dans le golfe de Béjaïa dépend principalement de la bathymétrie. Selon Leclaire (1972), trois grands types de faciès se distinguent :

- Aux faibles profondeurs (0-20 m), de la ville de Béjaïa jusqu'à la rive est de l'oued Agrtoun, on trouve des sables et sablons siliceux. Ce faciès s'étend également vers le large, jusqu'à environ 40 m de profondeur, notamment entre les embouchures des oueds Soummam et Djemâa.
- Entre 40 et 80 m de profondeur, le golfe est majoritairement couvert par un faciès de boues silico-argileuses.
- Au-delà de 100 m de profondeur, les boues silico-argileuses et argilo-siliceuses deviennent prédominantes sur l'ensemble du golfe.

A. Régime Sédimentologique, transit littoral et érosion du littoral

Les conclusions des expertises sédimentologiques réalisées dans le cadre du projet « Carte sédimentaire du littoral algérien » indiquent que la dynamique sédimentaire probable dans la baie de Béjaïa s'organise de la manière suivante (Figure 5) :

La répartition des sédiments dans la baie est principalement influencée par l'action des houles provenant des secteurs nord-ouest, nord-est, ainsi que du secteur nord (**LEM, 2003**).

Les houles dominantes venant de l'ouest, particulièrement en hiver, frappent la côte sous un angle oblique, générant un courant de dérive littorale qui assure le transport des sédiments dans cette même direction.

En été, les houles dominantes venant de l'est abordent également la côte de manière oblique, créant un courant de dérive littorale qui favorise la dispersion des sédiments dans le même sens.

Quant aux houles venant du nord, elles sont régulières tout au long de l'année et frappent la côte de face, générant un courant de retour qui contribue à redistribuer les sédiments dans le profil côtier. Ces houles sont aussi responsables de l'érosion du littoral.

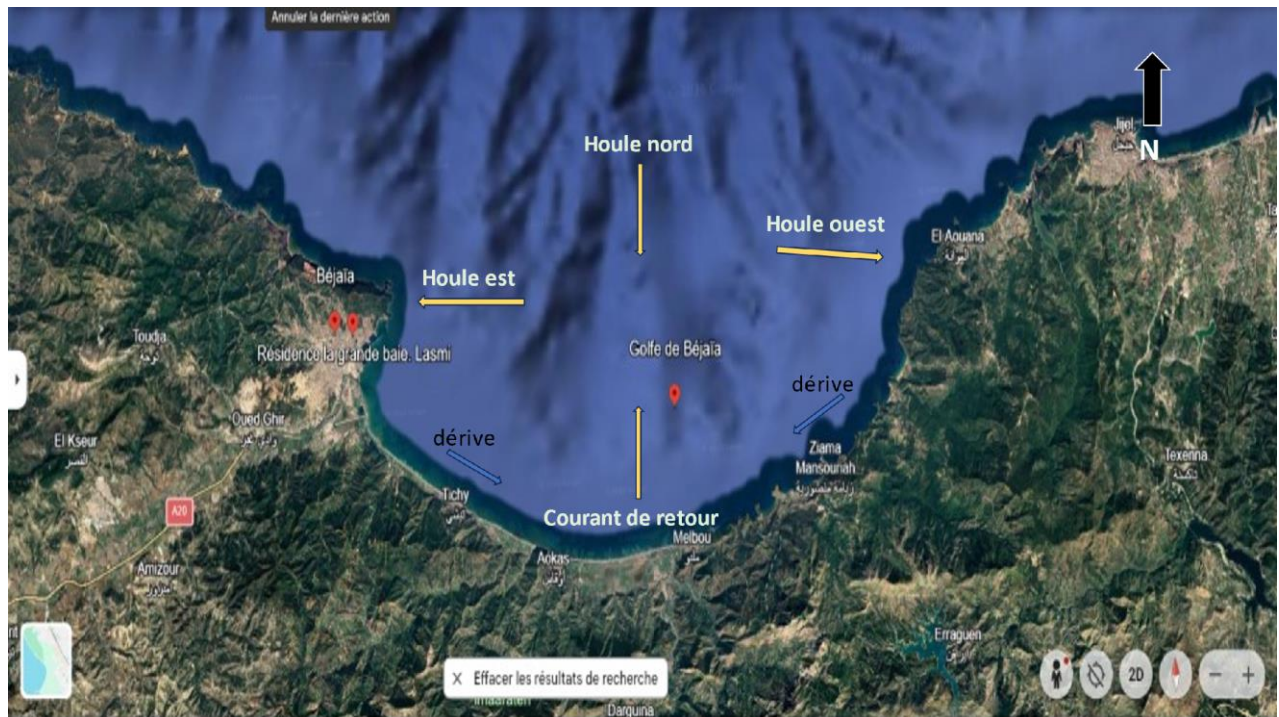


Figure 5: Schéma probable de la dynamique sédimentaire dans la baie de Béjaia (Google Earth, 2011)

II.8. Évolution du fond marin

L'érosion marine est particulièrement marquée sur la partie est de la côte, notamment au niveau de la plage de Béjaïa, de la piste de l'aéroport et de l'unité de Naftal, où un recul moyen d'environ 25 mètres a été observé entre 1994 et 1997. Cette situation a rendu urgente la mise en place de mesures de protection pour ces secteurs. Par ailleurs, entre la digue de fermeture et la rive gauche de l'oued Soummam, la plage a complètement reculé (**LEM, 2003**).

La comparaison des profils issus d'une carte marine datant de 1928 avec un relevé bathymétrique réalisé par **LEM en 1993** dans la zone d'étude révèle un recul important du trait de côte, estimé à environ 100 mètres.

Les taux nets d'évolution de la ligne de rivage le long de la côte ouest du golfe de Béjaïa (**Boutiba et al., 2005**), qui s'étend du Cap Carbon à l'ouest jusqu'au Cap Aokas à l'est sur une trentaine de kilomètres, ont été déterminés à partir d'orthophotographies numériques mosaïquées issues de différentes campagnes (1973, 1989, 2001) ainsi que des images satellitaires QuickBird acquises en 2005. Ces taux ont été calculés à chaque transect selon deux méthodes : la régression linéaire et la méthode dite « endpoint », en comparant les lignes de rivage les plus anciennes aux plus récentes. La base de données obtenue comprend environ 930

transsecte distincts, espacés de 10 mètres le long des 30 kilomètres de plages sableuses étudiées.

Quatre secteurs de plages ont été analysés : Sidi Ali Lebher, Boukhelifa, Tichy et la zone d'Aokas. La courbe d'évolution de la ligne de rivage entre 1973 et 2005 met en évidence un recul généralisé des plages, particulièrement prononcé dans la partie ouest de Boukhelifa et à Sidi Ali Lebher, où les taux d'érosion sont nettement plus élevés. Ces derniers varient entre -0,16 m/an et un maximum de -6,13 m/an, ce dernier correspondant à l'embouchure de l'oued Soummam. Les ouvrages de protection côtière tels que les épis en T, construits à partir de 2001, n'ont pas permis de stopper cette tendance érosive qui continue de toucher les plages de la zone. Le recul spectaculaire observé à l'embouchure de l'oued Soummam s'explique en grande partie par le déficit d'apports sédimentaires provenant du continent, dû notamment aux extractions excessives de sable et de gravier dans son lit.

Cette étude souligne que la côte sableuse de la partie ouest du golfe de Béjaïa a subi une érosion quasi généralisée, modérée mais persistante. La tendance à l'érosion observée sur une période d'environ 30 ans, de 1973 à 2005, peut être attribuée en partie à des phénomènes naturels, notamment les effets répétés et cumulés des tempêtes. Par ailleurs, les activités humaines non maîtrisées ont contribué à accélérer ce recul côtier.

II.9. Etude Hydrologique

Chaque année, la Wilaya de Bejaia reçoit une quantité moyenne globale de 1465 millions de m³ d'eau qui est utilisée pour l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable et les activités industrielles. (LEM, 2003)

II.10. Données océanographiques

Une analyse statistique des données de base permet d'identifier les secteurs prédominants de la houle ainsi que leurs amplitudes respectives. L'agitation provenant des secteurs Ouest-Est est la plus fréquente ; cependant, en cas de forte houle, le secteur Ouest prédomine.

Les houles de tempête proviennent principalement du secteur Ouest, tandis que les fréquences d'apparition des houles dans les secteurs Nord et Nord-Est restent très faibles. (LEM, 2003)

A. La houle au large

La région de Bejaia se distingue par deux directions de houle principales :

-Ouest-Nord-Ouest (300°)

-Nord-Nord-Est (20-40°)

En hiver, plus de 80 % des houles prédominantes proviennent du secteur Ouest-Nord-Ouest, avec une période moyenne comprise entre 8 et 9 secondes. Lors de grandes tempêtes, des périodes supérieures à 10 secondes, pouvant atteindre jusqu'à 13 secondes, ont été enregistrées.

Les houles estivales, quant à elles, de direction Nord-Nord-Est, présentent une amplitude comprise entre 0,5 m et 1,5 m. Environ 50 % de ces houles ont une période de 6 à 9 secondes et ne dépassent que rarement une amplitude de 3 mètres.

L'amplitude moyenne des houles se situe entre 2 et 3 mètres, tandis que les amplitudes maximales peuvent atteindre de 4 à 6 mètres.

B. La houle à la côte

L'analyse de la propagation des houles de périodes 6, 8 et 10 secondes, provenant des secteurs N (360°), N45° et N330°(Tableau 7), mesurées à une profondeur d'environ -15 mètres, révèle que les houles issues de ces différents secteurs atteignent la côte avec une énergie légèrement atténuée. Le coefficient de réfraction K varie entre 0,63 et 0,96, indiquant que les houles du secteur Nord-Est exercent l'impact le plus significatif (Annexe 1)

Tableau 7 : Caractéristiques de la houle à la côte au niveau de la baie de Bejaia (LEM ,1993)

	La houle	360° nord	45° nord	330° nord
Biennale	02 m	4,56 m	3,49 m	3,84 m
Quinquennale	05 m	5,43 m	4,09 m	4,41 m

II.11. Données hydrodynamiques

II.11.1. Les courants

A. Les courants généraux

Le régime climatique chaud et sec du bassin méditerranéen engendre une évaporation élevée, constituant ainsi le moteur principal de la circulation thermohaline. La configuration du détroit

de Gibraltar, d'une profondeur de 320 mètres, ne permet l'entrée que d'eaux superficielles dans le bassin méditerranéen. Ces eaux atlantiques, qui pénètrent par ce détroit, forment le courant algérien, une veine superficielle bien définie s'écoulant d'ouest en est le long des côtes du Maroc, de l'Algérie et de la Tunisie. Les instabilités de ce courant, principalement induites par la topographie, génèrent une importante activité à méso-échelle, caractérisée par la formation de méandres et de tourbillons, lesquels influencent l'ensemble de la circulation en Méditerranée occidentale.

Ce courant se divise en trois branches principales : la première tourne en sens lévogyre entre le bloc Corso-Sarde et la péninsule Ibérique, formant le circuit ibérique qui s'oriente vers l'ouest puis le sud-ouest ; la deuxième circule dans le bassin Tyrrhénien et longe les côtes provençales dans le cadre du circuit liguro-provençal ; la troisième, d'orientation nord-ouest/sud-est, se dirige vers la Méditerranée orientale en traversant le canal de Sicile. Par ailleurs, un courant profond, constitué d'eaux méditerranéennes à forte salinité et basse température, s'échappe du bassin par le détroit de Gibraltar en direction de l'océan Atlantique. La faible profondeur du fond du détroit sicilo-tunisien limite vraisemblablement la circulation des courants profonds issus du bassin oriental.

La veine d'eaux atlantiques entrant par Gibraltar et se propageant le long des côtes nord-africaines se traduit sur le plan biogéographique par la présence d'espèces atlantiques, bien que cette influence diminue à partir du canal de Sicile. La salinité des eaux superficielles, jusqu'à une profondeur d'environ 50 mètres, confirme également leur origine atlantique.

La houle est déterminée par la vitesse du vent, sa durée, ainsi que par la distance sur laquelle il souffle sans rencontrer d'obstacles (fetch). Le fetch le plus étendu se situe dans le secteur nord-nord-ouest, en accord avec la prédominance des vents de secteur nord, bien que les vents du sud-ouest soient également significatifs. L'orientation et la vitesse des courants sont, en principe, corrélées à celles des vents dominants (**Grimes, 2005**).

Au niveau de la baie de Bejaia, les courants atlantiques n'ont pas d'impact significatif sur la frange côtière. Seuls les courants locaux doivent être pris en compte dans l'étude de l'hydrodynamisme côtier. Parmi eux, un courant de retour, induit par les houles d'incidence frontale en provenance du secteur Nord-Est, joue un rôle essentiel dans la dispersion des sédiments vers le large.

Par ailleurs, des études universitaires ont mis en évidence l'existence d'un vent de la Soumma m qui entraîne les eaux superficielles vers le large à partir de l'embouchure de l'oued Soumma m.

La combinaison de ces différents courants génère un transport des particules en suspension vers le large, suivant une direction Sud-Ouest/Nord-Est (LEM, 2003).

B. Les courants côtiers

Les phénomènes hydrodynamiques responsables des transferts sédimentaires sur la plage sous-marine et dans la zone de ressac sont nombreux et complexes (LEM, 2003). La dynamique des sables le long des côtes dépend de la dérive littorale, elle-même influencée par les caractéristiques physiques de la houle.

Au contact des irrégularités du fond, les houles génèrent des rouleaux qui remettent en suspension les particules, facilitant ainsi leur déplacement.

La direction et l'intensité de ces courants varient selon l'amplitude et l'angle d'incidence de la houle par rapport à la côte, ainsi que la topographie de la plage sous-marine et la granulométrie des sédiments.

C. Les courants de retour

Le courant de retour désigne une zone de flux inverse qui se forme à partir du courant généré au point de déferlement de la houle. La vitesse de ces courants dépend de l'énergie de la houle ainsi que de la pente de la plage. Ils jouent un rôle essentiel dans la dispersion d'une partie des sédiments côtiers vers le large (LEM, 2003).

D. Les courants de dérive littorale

Lorsque la houle arrive à la côte avec une incidence oblique, elle génère un courant de dérive littorale dont la vitesse est maximale pour un angle d'incidence compris entre 50° et 60°. Ce courant prend naissance dans la zone de déferlement, où l'énergie est la plus élevée, favorisant la mise en suspension et le transport des particules sédimentaires le long du littoral.

Pour des houles de faible à moyenne amplitude, les courants restent principalement concentrés dans la zone de déferlement, affectant le triage des sables et graviers jusqu'à environ -10 mètres

de profondeur, assurant ainsi un transport latéral par dérive littorale et une dispersion des sédiments.

En revanche, les houles de forte amplitude peuvent influencer les fonds jusqu'à des profondeurs de -40 à -60 mètres (LEM, 2003).

La bathymétrie de la zone étudiée, caractérisée par des courbes bathymétriques proches de la côte et une pente assez marquée, induit une énergie importante sur le littoral, favorisant ainsi l'érosion côtière.

II.11.2. La marée

Sur la côte algérienne, la marée est faible, d'environ 20 cm. Selon différentes données hydrographiques, les variations observées sont les suivantes :

- Niveau maximum : +50 cm NGA
- Moyenne haute mer de vives eaux : +10 cm NGA
- Moyenne basse mer : -10 cm NGA
- Plus basse mer (ZH) : -34 cm NGA

II.12. Sources de pollution

Les bassins portuaires sont exposés à des risques de pollution provenant de sources diverses, soit directement par des rejets, soit indirectement via les réseaux d'assainissement ou des exutoires naturels (oueds, fossés, etc.) déversant dans le port. L'étude de la pollution, de sa transmission en mer et de ses impacts sur la zone portuaire se fait à deux niveaux.

II.12.1. Situation en amont de la zone portuaire

Le développement industriel rapide, la croissance démographique de la ville de Bejaia, ainsi que les insuffisances dans le traitement des eaux usées urbaines et industrielles, constituent des facteurs majeurs posant un problème de pollution dans la région, impactant directement la zone portuaire.

A. Réseau d'assainissement

La ville de Bejaia dispose de deux réseaux d'assainissement : l'un ancien, vétuste, sous-dimensionné, datant de la période coloniale, de type unitaire et se déversant dans le port ; l'autre, plus récent, suit l'extension urbaine et comprend deux stations de relevage, dont une seule est opérationnelle.

B. Rejets domestiques

Selon la Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire (**DPAT, 2007**), la population de la wilaya de Bejaia était estimée à 990 695 habitants fin 2006, avec une densité moyenne de 307 habitants/km² et un taux d'accroissement d'environ 1,23 %.

La majeure partie de la population urbaine est concentrée dans la vallée de la Soummam et son prolongement vers le nord, notamment à Bejaia ville, qui compte 173 693 habitants avec une densité élevée de 1445 habitants/km².

En se basant sur ces données démographiques et la dotation quotidienne en eau potable, le volume journalier d'eaux usées domestiques est estimé à environ 120 litres par habitant, dont une partie est rejetée vers la zone portuaire.

C. Rejets industriels

Bejaia possède un tissu industriel diversifié, couvrant presque toutes les branches, avec une prédominance des activités manufacturières et de transformation, totalisant plus de 220 unités en activité. Les principales industries situées à la périphérie de la zone portuaire incluent notamment les secteurs agro-alimentaire, textile et chimique (**Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire de Bejaia, 2007**).

D. Eaux de ruissellement

La pollution issue des eaux de ruissellement urbaines provient à la fois du lessivage atmosphérique et de l'érosion des surfaces urbaines. À Bejaia, les conduites collectant les eaux pluviales sont souvent sous-dimensionnées et mal entretenues, ce qui engendre des débordements lors des précipitations. Ces eaux pluviales se déversent directement dans les bassins portuaires. Trois exutoires principaux ont été identifiés (**Direction de l'Hydraulique de Bejaia, 2006**) :

- L'exutoire Fort Abdelkader, qui draine la haute ville de Bejaia depuis Sidi Touati et les Oliviers vers l'aval.
- L'exutoire Carrefour du Port, qui draine la zone délimitée par les Bois Sacrés en amont et l'avenue Mustapha Ben Boulaïd en aval.
- L'exutoire Bitouri (Oued Danous), où les eaux pluviales se déversent directement dans l'Oued Danous et l'Oued Salomon.

E. Apport des oueds

Les oueds constituent une source majeure de pollution, particulièrement en saison hivernale. La zone étudiée reçoit quotidiennement des rejets pollués véhiculés principalement par l'oued Salomon, qui se jette directement dans l'arrière-port, ainsi que par l'oued Soummam et l'oued Sghir, situés en dehors du port.

F. Station de traitement

Outre les lacunes du réseau d'assainissement qui compliquent la collecte efficace des eaux usées, celles-ci sont généralement rejetées dans le milieu naturel sans traitement adéquat. La station d'épuration biologique de Bejaia est depuis longtemps hors service, principalement en raison des flux élevés de rejets chimiques industriels et des infiltrations d'eaux pluviales dans le réseau, rendant le traitement inefficace.

Même en cas de remise en état, cette station, conçue pour une capacité de 80 000 équivalents habitants, reste insuffisante face à la croissance démographique et au développement industriel récents.

Pour protéger la zone de l'arrière-port des nuisances liées aux eaux usées, des mesures immédiates sont envisagées, notamment la proposition de la Direction hydraulique de Bejaia de créer un collecteur dimensionné reliant le tunnel Sidi Abdelkader à la station d'épuration, afin d'assurer l'évacuation des eaux usées vers cette dernière une fois remise en service.

L'Office National d'Assainissement (**ONA**) a lancé un appel d'offres international visant le diagnostic et la réhabilitation du réseau d'assainissement de la ville de Bejaia.

II.12.2. Les sources directes de la pollution portuaire

La zone portuaire de Bejaïa est soumise à différentes sources de pollution liées principalement aux activités urbaines et portuaires. En effet, les eaux usées domestiques issues des habitations, ainsi que les eaux pluviales chargées de divers polluants, sont souvent déversées directement dans les bassins portuaires. À cela s'ajoutent les rejets provenant des activités industrielles et des opérations portuaires, qui contribuent également à la dégradation de la qualité des eaux.

Ainsi, l'ensemble de ces apports constitue une pression importante sur le milieu marin, favorisant l'accumulation de polluants et impactant négativement l'écosystème du port.

Chapitre III

MATERIELS ET

METHODES

III. Matériels et méthodes

Cette partie décrit les analyses des paramètres pour définir le degré de pollution dans le port de Bejaia qui sont :

- Les contaminants organiques :
 - Les Hydrocarbures
- Les paramètres physico-chimiques in situ :
 - pH.
 - Salinité.
 - Température.

III.1. Travaux effectués en mer

III.1.1. Prélèvement d'eau et localisation des stations

Dans le cadre de l'évaluation du degré de contamination du port de Béjaïa par les hydrocarbures, une campagne d'échantillonnage a été réalisée au niveau de plusieurs stations représentatives de la zone d'étude. Les analyses ont porté à la fois sur les eaux de mer superficielles et les sédiments, ainsi que sur les différents paramètres physico-chimiques

Les prélèvements ont été effectués lors de sorties en mer, couvrant l'ensemble des bassins du port de Béjaïa, afin d'assurer une bonne représentativité spatiale. Les coordonnées géographiques des stations ont été déterminées à l'aide d'un système GPS, permettant une localisation précise des points d'échantillonnage.

Un total de 6 échantillons d'eau et de sédiments ont été prélevés le 09/02/2026 selon des protocoles standardisés (Figure 6), puis conservés et transportés au laboratoire pour l'analyse des hydrocarbures et des paramètres physico-chimiques.

Le procédé utilisé pour le prélèvement de l'eau de mer de surface s'inspire des recommandations du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (**PNUE, 1995**), adaptées aux conditions de travail sur le terrain.

Le dispositif de prélèvement se compose d'une bouteille en verre fumé, propre, d'une capacité de 2,5 litres, munie d'un goulot étroit (2 à 3 cm de diamètre intérieur), permettant un

remplissage progressif et limitant les risques de contamination. Les prélèvements ont été réalisés manuellement à partir des quais du port, en immergeant directement la bouteille entre 0 et 1 mètre de profondeur.

Afin d'éviter toute contamination, les bouteilles ont été conditionnées au préalable. Chaque échantillon a été soigneusement identifié à l'aide d'une fiche de relevé mentionnant les coordonnées géographiques (latitude et longitude), la date, l'heure locale du prélèvement ainsi que les caractéristiques du milieu lorsque cela était possible. Une étiquette portant ces informations a été fixée sur chaque flacon.

Après prélèvement, les échantillons ont été conservés à l'abri de la lumière et dans des conditions de température appropriées jusqu'à leur transfert au laboratoire. Une première extraction des hydrocarbures a été réalisée à l'aide de 50 ml d'hexane.

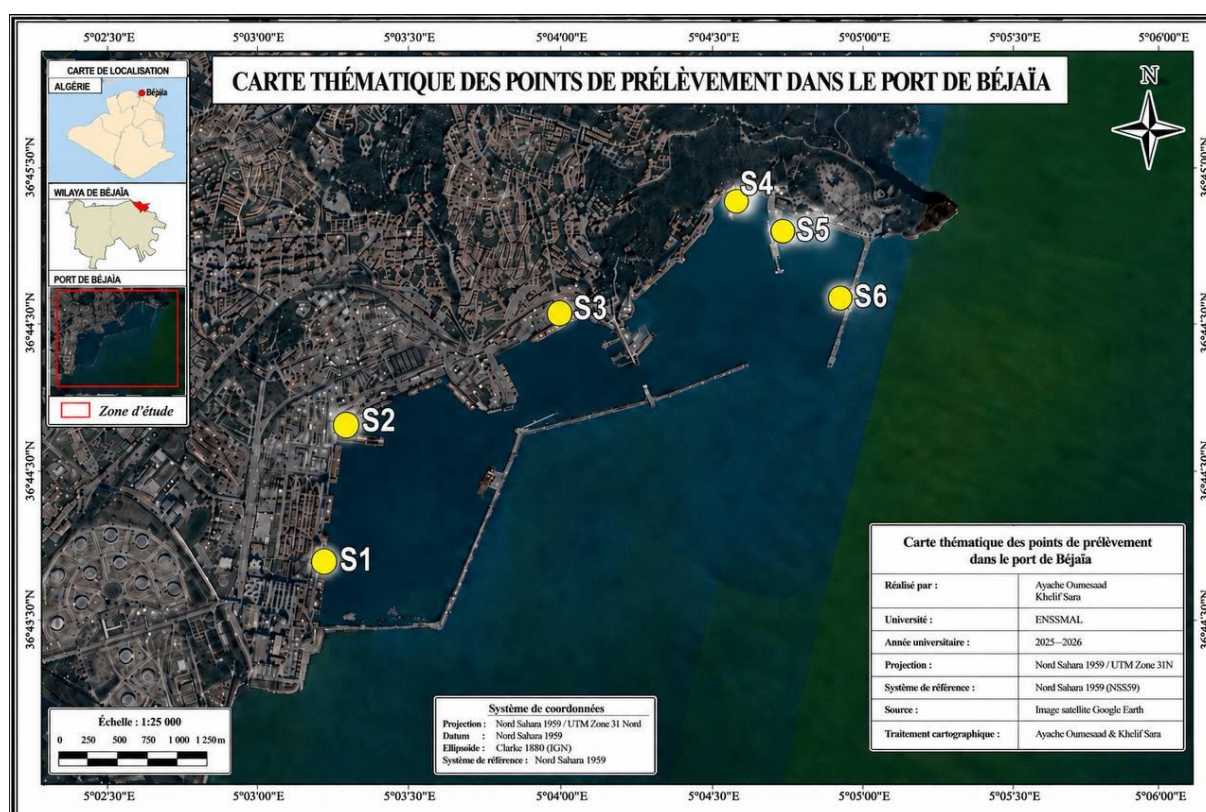


Figure 6: Localisation des sites de prélèvement dans la zone d'étude

III.1.2. Prélèvement des sédiments superficiels

Le prélèvement des sédiments superficiels a été réalisé à l'aide d'une benne preneuse de type Van Veen, utilisée dans des zones présentant une bathymétrie comprise entre 4 et 20 mètres.

Cet équipement, fabriqué en acier inoxydable, possède un poids approximatif de 25 kg et une surface d'échantillonnage d'environ 0,19 m².

Avant son immersion, les bras de la benne sont maintenus ouverts. Lors de son arrivée au fond, le système de fermeture s'active automatiquement, permettant aux mâchoires de se refermer lors de la remontée à l'aide du câble, assurant ainsi la collecte du sédiment.

Une fois la benne récupérée à la surface, les sédiments sont prélevés à l'aide d'une spatule en acier préalablement nettoyée après chaque utilisation, afin de limiter tout risque de contamination. Les échantillons sont ensuite transférés dans des piluliers en verre.

Dans l'attente des analyses au laboratoire, les échantillons de sédiments sont conservés à une température de -18 °C. Cette étape de congélation permet de préserver au mieux leurs caractéristiques chimiques, tout en évitant les altérations et les pertes éventuelles de composés volatils.

III.1.3. Mesures in situ (Paramètres physico-chimiques)

A. La salinité S ‰

La salinité est un paramètre fondamental dans l'étude du milieu marin, étroitement liée à la température pour caractériser les masses d'eau. Elle a été mesurée par méthode conductimétrique à l'aide d'un conductimètre de type WTW 315 i/Set, permettant de déterminer simultanément la conductivité, la salinité et la température de l'eau de mer. La mesure consiste à immerger la sonde de l'appareil dans l'échantillon et à relever directement la valeur affichée, exprimée en ‰ pour la salinité et en µS/cm pour la conductivité.

B. Température (T)

La température constitue une caractéristique physique essentielle du milieu marin, influençant notamment la solubilité des sels et des gaz, ainsi que la densité des masses d'eau et la circulation des courants. Les eaux superficielles sont généralement affectées par la température de l'air, en particulier lorsqu'elles sont peu profondes. La mesure de la température a été réalisée à l'aide de valise multiparamétrique

C. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH de l'eau de mer est déterminé principalement par sa composition ionique, notamment la présence des carbonates issus des échanges de dioxyde de carbone (CO₂) entre l'eau et l'atmosphère. Il constitue un paramètre chimique essentiel permettant de caractériser l'acidité ou la basicité du milieu. Les mesures ont été réalisées in situ à l'aide d'une sonde de pH intégré dans la valise multiparamétrique de type pH 315i (Tableau 8).

Tableau 8: données de terrain des stations d'étude

Stations	Date	Heure	Latitude	Longitude	Profondeur(m)	T (°C)	pH	S%	Observations
1	09-févr	10 :02	36.7396585	5.079558	12	15.4	6.943	36	/
2	09-févr	10 :38	36.7449695	5.0788214	11-12	15.8	6.94	36.1	Présence des grains de blé dans la boue
3	09-févr	11 :08	36.7522334	5.0883316	9	15.6	6.946	36.1	/
4	09-févr	12 :17	36.7586908	5.0958578	5	15.4	6.944	36.2	Présence des coquilles
5	09-févr	13 :28	36.7577708	5.0971325	11	15.4	6.945	36.4	/
6	09-févr	15 :17	36.7547435	5.1013131	6	15.4	6.941	36.3	/

III.2. Travaux effectués au laboratoire

III.2.1. Conditionnement du matériel utilisé

Le matériel utilisé a été conditionné selon un protocole approprié afin de garantir l'absence de toute contamination susceptible d'influencer les résultats analytiques.

- Lavage à l'eau additionnée d'un détergent classique
- Rinçage à l'eau acidulée à 5%
- Rinçage à l'eau distillée
- Rinçage final avec l'hexane

- Séchage à l'étuve à 70°C pendant 24 heures.

III.2.2. Préparation des produits d'analyse

A. Produits solides

Tableau 9 : produits chimiques utilisés dans le traitement des hydrocarbures

Produit solide	Références	Marque	Matrice utilisée	Etape et rôle d'utilisation
Florisil (MgO :15.5%. SiO ₂ : 84% Na ₂ SiO ₄ :0,5%)	-Florisil R 100 a 200 mesh ASTM. -destiné à la chromatographie sur colonne.	Fluka	Eau de mer	Utilisé comme phase stationnaire pour la purification en chromatographie sur colonne ouverte, permettant d'éliminer les composés interférents.
Gel de silice (SiO₂)	-60-200 mesh –ASTM -PH of 10% slurry practile size (90%)	BIOCHEM	Eau de mer Sédiments marin	Utilisé pour le fractionnement des hydrocarbures en chromatographie sur colonne ouverte, assurant la séparation des différentes fractions.
Alumine ou oxyde d'alumine (AL₂O₃)	-70 - 230 mesh. -PH neutre -Granulométrie : 50-160 µm	PROLABO	Eau de mer Sédiment marin	Utilisée pour le fractionnement de l'échantillon, en complément du gel de silice, afin d'améliorer la séparation des composés.
Sulfate de sodium anhydre(Na₂SO₄)		Fluka	Eau de mer Sédiment marin	Utilisé comme agent déshydratant, permettant d'éliminer l'humidité de l'échantillon à toutes les étapes de l'analyse (eau de mer et sédiments).
Cuivre (Cu)			Sédiment marin	Utilisé pour éliminer les composés soufrés présents dans l'échantillon

Préparation des adsorbants

Le Florisil, le gel de silice, et l'alumine servant en chromatographie à colonne ouverte sont conditionnés comme suit :

-Étape d'activation

Une masse déterminée d'adsorbant est pesée puis placée dans une étuve à 120 °C pendant une durée de 24 heures afin d'assurer son activation.

-Étape de désactivation partielle

Par la suite, l'adsorbant est partiellement désactivé par l'ajout de 5 % d'eau distillée.

B. Produits liquides

Tableau 10 : Références et utilisations des produits chimiques liquides dans le traitement des hydrocarbures

Produits liquides	Références	Marque	Matrices utilisée	Etape d'utilisation
n-Hexane (C6H14)	Destiné à l'analyse des résidus	-B.D.H	Eau et	-Extraction
	de pesticides et à la	-R.D.H.	sédiment	-Purification
	spectroscopie infrarouge (I.R.)		marins	-Fractionnement
Dichlorométhane (C12CH2)	Le solvant est stabilisé à	-R.D.H	Eau et	-Extraction des sédiment
	l'amylène ou contient 0,5 %	Pestanal®	sédiment	-Purification
	d'éthanol.		marins	-Fractionnement

III.2.3. Traitement de l'eau de mer pour l'analyse des hydrocarbures

Les échantillons d'eau de mer ont été traités dans les plus brefs délais afin de limiter toute perte ou contamination. Le protocole utilisé s'inspire des normes françaises AFNOR T90-114 et T90-203 (1972) (**Roussel, 1983**) et a été validé par les experts de la Commission Océanographique Intergouvernementale (**C.O.I., 1982**). Il repose essentiellement sur deux étapes principales : l'extraction liquide-liquide, suivie de la purification et du fractionnement.

- **Extraction :** Le procédé d'extraction adopté est celui décrit par **Roussel et Marchand (1983)**. À cet effet, 50 ml d'hexane sont ajoutés in situ à chaque échantillon, suivis d'une agitation pendant environ 3 minutes. Idéalement, cette opération est effectuée en mer lorsque les conditions le permettent ; à défaut, elle est réalisée dès l'arrivée au laboratoire. Les échantillons ne doivent en aucun cas être conservés plus de trois à quatre heures avant l'ajout du solvant, et doivent être maintenus au frais et à l'abri de la lumière (**COI, 1984**).

L'extraction liquide-liquide est ensuite réalisée à l'aide d'une ampoule à décanter, dont le volume est au moins deux fois supérieur à celui du mélange à traiter. L'ampoule, robinet fermé, est placée sur un support approprié, puis le mélange (échantillon et hexane) y est introduit. Une quantité supplémentaire de 50 ml d'hexane est ajoutée comme solvant d'extraction. L'ampoule est soigneusement bouchée, en veillant à assurer une bonne étanchéité du rodage (graissage ou utilisation d'un manchon en Téflon).

L'ensemble est ensuite agité modérément pendant 10 à 15 minutes, en procédant régulièrement à un dégazage par ouverture du robinet, jusqu'à disparition de toute surpression. Après agitation, l'ampoule est replacée sur son support et laissée au repos jusqu'à séparation nette des deux phases (Figure 7). Les phases aqueuse et organique sont alors récupérées séparément, en prenant soin de retirer le bouchon avant l'écoulement.

La phase organique est recueillie dans un erlenmeyer à col rodé ou un bécher. Enfin, une petite quantité de sulfate de sodium anhydre (Na_2SO_4) est ajoutée afin d'éliminer les éventuelles traces d'eau présentes dans l'extrait.



Figure 7: Extraction liquide-liquide : séparation de la phase organique et de la phase aqueuse

- **Concentration de l'échantillon**

La concentration de l'extrait issu de l'eau de mer a pour objectif d'éliminer le solvant d'extraction à l'aide d'un évaporateur rotatif (Figure 8). L'échantillon est ainsi concentré sous vide jusqu'à obtenir un volume d'environ 15 mL, en utilisant un bain-marie maintenu à une température proche de 40 °C, suffisante pour favoriser l'évaporation du solvant. L'opération est réalisée à l'aide d'un évaporateur rotatif de type BUCHI R110 équipé d'un thermostat, et relié à une pompe à vide fonctionnant à une pression de 1,3 millibar.



Figure 8 : évaporateur rotatif

● Purification

Le solvant organique employé extrait non seulement les hydrocarbures, mais également d'autres composés organiques polaires tels que les lipides et les acides gras. Afin d'éliminer ces interférents et d'isoler spécifiquement les hydrocarbures, une étape de purification est réalisée par chromatographie d'adsorption sur colonne ouverte (Figure 9).

Une colonne en verre d'un volume de 50 mL et d'un diamètre interne de 10 mm est préparée. Elle contient 5 g de Florisil (100–200 mesh ASTM) préalablement conditionné, constituant la phase stationnaire. La partie inférieure de la colonne est maintenue par de la laine (soie) de verre, tandis que la partie supérieure est recouverte d'une couche de sulfate de sodium.

La préparation de la colonne s'effectue selon la méthode humide, consistant à mélanger au préalable l'adsorbant avec le solvant avant son introduction dans la colonne. L'élution est

ensuite réalisée à l'aide de 20 mL d'hexane, permettant de récupérer un éluat d'un volume final de 20 mL.



Figure 9: purification des extraits par chromatographie sur Florisil.

- **Concentration**

Une seconde étape de concentration est ensuite réalisée, plus délicate en raison du faible volume final. L'échantillon est évaporé à sec sous un flux d'azote, puis repris dans 5 mL d'hexane. Selon le protocole de la **C.O.I (1984)**, il existe un risque de perte lorsque le volume devient inférieur à 200 μ L.

- **Purification et fractionnement**

Cette technique repose sur l'utilisation d'une colonne remplie d'alumine neutre, assurant le pouvoir de purification, et de gel de silice, jouant un rôle de séparation et de fractionnement. (Figure 10) Ces deux adsorbants (70–230 mesh ASTM) sont disposés en deux lits successifs.

La préparation de la colonne s'effectue selon la méthode humide. Une burette de 50 mL de capacité, de 10 mm de diamètre interne et équipée d'un robinet en téflon ou en verre non lubrifié, est remplie successivement par de la laine de verre, 20 mL d'hexane, 5 g de gel de

silice (70–230 mesh ASTM), puis 5 g d'alumine (70–230 mesh). Une fine couche de sulfate de sodium est ajoutée en tête de colonne.

Pour l'élution, l'extrait dissous dans 2 mL d'hexane est déposé au sommet de la colonne. Une première fraction (F1), constituée des hydrocarbures aliphatiques, est récupérée par élution avec 20 mL d'hexane. Une seconde fraction (F2), correspondant aux hydrocarbures aromatiques, est ensuite obtenue par élution avec un mélange hexane/dichlorométhane (70 :30). Cette fraction F2 est destinée à une analyse par spectrofluorométrie à rayonnement ultraviolet (S.F.U.V).

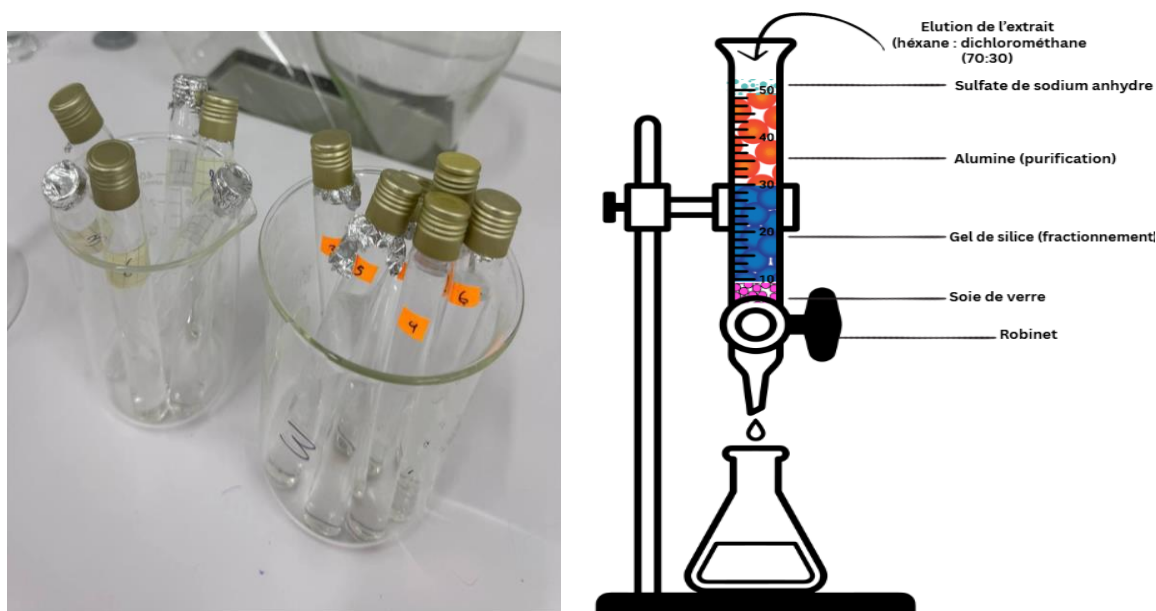


Figure 10: purification et fractionnement par chromatographie sur colonne ouverte.

III.2.4. Traitement du sédiment superficiel marin pour l'analyse des hydrocarbures

Le sédiment est prélevé à l'aide d'une benne Van-Veen en fer galvanisé, puis récupéré avec une spatule en acier inoxydable.

La conservation des échantillons à basse température permet de limiter les phénomènes d'évaporation ainsi que la dégradation microbienne susceptibles d'altérer les composés organiques présents dans les sédiments, notamment les hydrocarbures.

Les échantillons sont ensuite transportés rapidement dans une glacière, puis conservés au laboratoire à une température de -18 °C jusqu'aux analyses.

III.2.4.1. Protocole d'extraction des hydrocarbures dans le sédiment

- **Lyophilisation**

La lyophilisation correspond au passage de l'eau de l'état solide (sous forme de cristaux) directement à l'état gazeux, phénomène appelé sublimation. Cette technique permet de sécher ou de déshydrater l'échantillon à basse température afin de préserver ses composés.

L'échantillon est placé dans un lyophilisateur où la température est maintenue à -40 °C sous une pression de 10^{-1} atm pendant une durée de 48 heures.

- **Broyage**

Les sédiments lyophilisés sont ensuite réduits en une poudre fine à l'aide d'un mortier en porcelaine, préalablement conditionné entre chaque utilisation afin d'éviter toute contamination. Cette étape permet d'homogénéiser les échantillons et de favoriser la libération des composés piégés dans les particules sédimentaires, assurant ainsi une répartition uniforme des polluants au sein du sédiment.

- **Extraction**

L'extraction des hydrocarbures est réalisée à l'aide d'un dispositif Soxhlet, également appelé batterie d'extraction (Figure 11). Cette technique permet d'extraire, par lessivage, les hydrocarbures contenus dans les sédiments à l'aide d'un mélange de solvants organiques.

Le mélange utilisé est composé d'hexane et de dichlorométhane dans les proportions 50:50, avec un volume total de 150 mL introduit dans le ballon à col rodé du dispositif. Des grains de type boiling chips sont ajoutés afin d'assurer une homogénéisation de la température au sein de la phase organique, maintenue entre 65 et 72 °C.

Une masse de 5 g de sédiment broyé est placée dans une cartouche en cellulose Whatman, préalablement nettoyée par extraction à blanc avec de l'hexane pendant 4 heures, afin d'éviter toute contamination.

Chaque série d'extraction est accompagnée d'un blanc de procédure contenant du Na_2SO_4



Figure 11: Extracteur Soxhlet

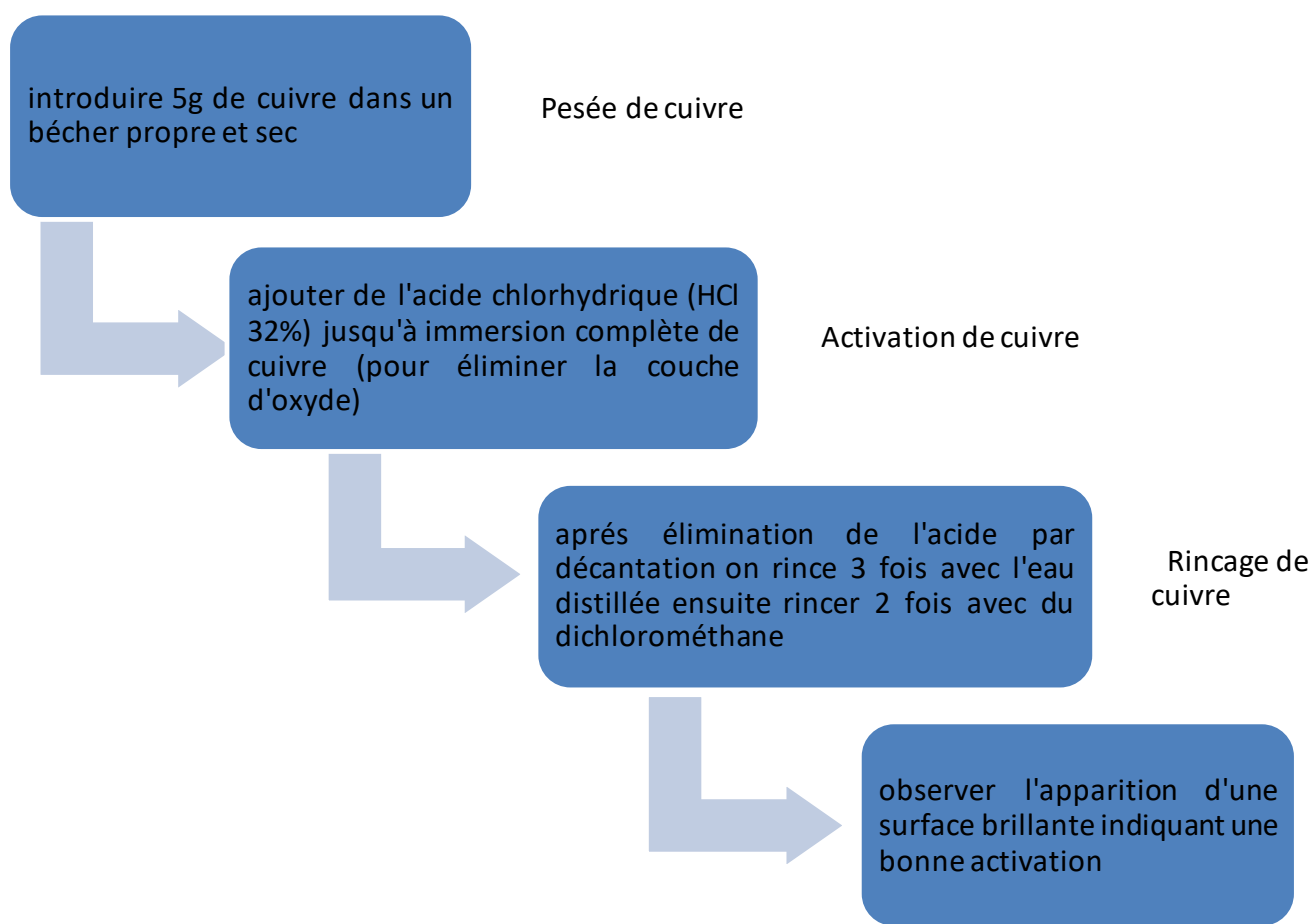
- **Concentration de l'extrait**

L'extrait récupéré, environ 120 ml, est concentré à l'évaporateur rotatif jusqu'à un volume de 10 ml environ (T° 40°C ; P 1,5 bars).

- **Elimination des composés soufrés/ traitement au cuivre**

Afin d'éliminer les composés soufrés susceptibles d'interférer avec les analyses chromatographiques et spectrofluorimétriques, un traitement au cuivre activé a été appliqué aux extraits organiques des sédiments.

Le cuivre, utilisé initialement sous forme de poudre, a été liquéfié puis activé afin d'augmenter sa réactivité et d'améliorer sa capacité à fixer les composés soufrés présents dans l'extrait organique. Le diagramme suivant résume les étapes de préparation du cuivre :



Après l'étape d'extraction, l'extrait organique obtenu a été récupéré et préalablement concentré dans un tube à essai conditionné. Une quantité de cuivre activé y a ensuite été ajoutée.

Le mélange a été agité pendant quelques minutes à l'aide d'un agitateur vibrant afin de favoriser le contact entre le cuivre et les composés soufrés. Cette étape permet leur adsorption sur le cuivre.

Enfin, le cuivre chargé en composés soufrés a été séparé de la phase organique, permettant ainsi d'obtenir un extrait purifié destiné aux analyses ultérieures.

● Purification et fractionnement

Cette opération suit le même protocole appliqué aux échantillons d'eau de mer. La purification et le fractionnement sont réalisés à l'aide de deux couches successives de gel de silice et d'alumine (70–230 mesh), permettant d'obtenir deux fractions distinctes :

F1 : Fraction aliphatique, obtenue par élution avec 25 mL d'hexane.

F2 : Fraction aromatique, récupérée après élution avec 25 mL d'un mélange hexane/dichlorométhane (70:30).

III.2.4.2. Granulométrie

- **Principe de la méthode** : Selon la norme française : **NF P94-056**, la granulométrie désigne la distribution des tailles des particules solides, exprimée en pourcentage de la masse totale du matériau.

Cette analyse consiste à faire passer un échantillon à travers une série de tamis dont les mailles sont de plus en plus fines, puis à mesurer la masse des particules retenues sur chaque tamis (Tableau 11). Les résultats obtenus sont ensuite représentés sous forme de courbe granulométrique sur un graphique. **(Belaarbi et Limani, 2018).**

Tableau 11: Classification des différents types du sédiment marin

Diamètre des sédiments (mm)	≥2	1-2	0.251-1	0.0625-0.25	0.002-0.0625	≤0.002
Type des sédiments	Galet	Graviers	Sable grossier	Sable fin	Vase/limon	Argile

- **Mode opératoire**
 - Répartir le sédiment marin dans des boîtes de Pétri en verre préalablement étiquetées (Figure 12)
 - Sécher l'échantillon dans une étuve à une température de 105 °C pendant 24 heures
 - Broyer l'échantillon sec à l'aide d'un mortier en porcelaine.
 - Prélever et peser 200 g de l'échantillon, notés Pi.
 - Introduire l'échantillon dans une série de tamis préalablement pesés, puis effectuer un tamisage mécanique à l'aide d'une tamiseuse (Figure 12)
 - Peser la masse des refus retenus sur chaque tamis.
 - Une colonne de tamis conforme à la norme AFNOR a été utilisée. Les diamètres de mailles, classés par ordre décroissant, sont : **800 µm, 630 µm, 500 µm, 400 µm, 315 µm, 250 µm, 160 µm, 80 µm et 63 µm.**

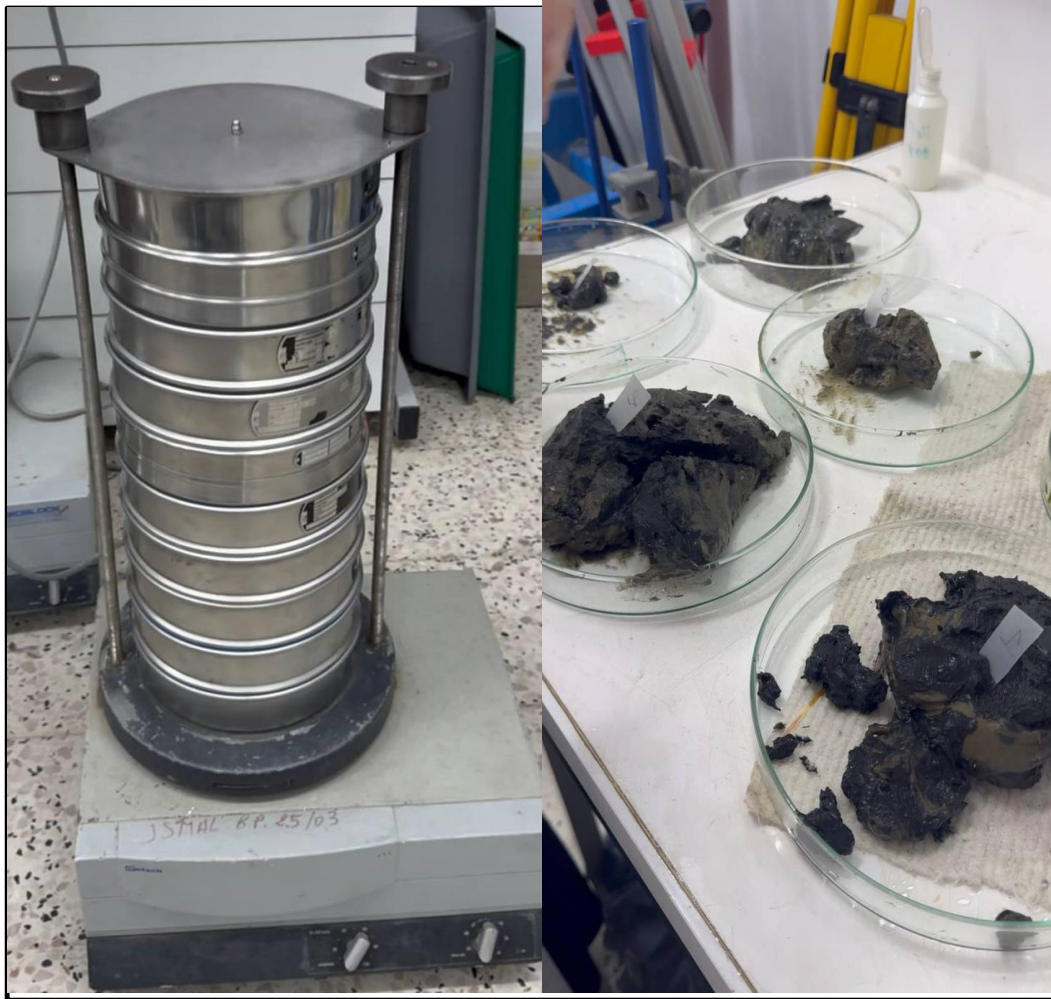


Figure 12: Préparation et tamisage des échantillons de sédiments

- **Traitement des données**

Les résultats obtenus sont représentés sous forme de courbes granulométriques, où l'axe des abscisses correspond aux diamètres des tamis et l'axe des ordonnées au pourcentage des fractions massiques retenues.

- **Paramètres granulométriques**

Les paramètres granulométriques ont été déterminés à partir de la courbe cumulative des fréquences granulométriques selon la méthode décrite par RIVIERE (1977).

➤ Les quartiles

Correspondent aux diamètres des particules associés à des pourcentages cumulés spécifiques. Le premier quartile (Q25) : représente la taille pour laquelle 25 % des particules possèdent un diamètre inférieur.

Le troisième quartile (Q75) : correspond au diamètre en dessous duquel se trouvent 75 % des particules.

La médiane (Q50) : est la valeur qui partage la distribution granulométrique en deux fractions égales, soit 50 % des particules de taille inférieure et 50 % de taille supérieure.

➤ Les percentiles

(P5, P10, P16, P18, P60, P84, P95) sont également extraits de la courbe cumulative et représentent respectivement les diamètres correspondant aux pourcentages cumulés de 5 %, 10 %, 16 %, 18 %, 60 %, 84 % et 95 %.

➤ Taille moyenne de sédiment (M), proposée par Folk et Ward (RIVIERE, 1977)

Permet de caractériser la granulométrie moyenne de l'échantillon. Elle est calculée à partir des percentiles P16, Q50 et P84 selon l'équation suivante :

$$M = (P16 + Q50 + P84) / 3$$

Tableau 12: Diamètres de grain et leurs appellations (CHAMLEY, et al., 2011)

Diamètre en mm	Types de sédiment
2	Sable très grossier
1	Sable grossier
0.5	Sable moyen
0.25	Sable fin
0.125	Sable très fin

➤ Indice de classement de TRASK (S_0) (RIVIERE, 1977)

Il est utilisé pour apprécier le degré de tri des sédiments. Une valeur élevée de cet indice traduit un mauvais classement granulométrique. Il est calculé selon la formule :

$$S_0 = \sqrt{(Q75 / Q25)}$$

Tableau 13 : Classement du sédiment par l'indice de classement

S_0	<2.5	$2.5 < S_0 < 3.5$	$3.5 < S_0 < 4.5$	$4.5 > S_0$
classement	Sédiment très bien classé	Sédiment normalement classé	Sédiment normalement classé	Sédiment mal classé

➤ Facteur hydrodynamique (FH)

Proposé par Weydert (1971), permet d'évaluer l'intensité des conditions hydrodynamiques et les modalités du transport sédimentaire. Son calcul repose sur les valeurs granulométriques exprimées en unité phi (ϕ), avec :

$$FH = (\phi_{95} - \phi_5 / 2,44 * (\phi_{75} - \phi_{25})) - (\phi_{75} - \phi_{25} / 2)$$

Avec : $\phi = -\log_2(x)$

Tableau 14 : Type d'hydrodynamisme par rapport au facteur hydrodynamique (WEYDERT, 1971)

Limite	Terminologie
FH>2	Hydrodynamisme très fort
$2 > FH > 1$	Hydrodynamisme fort
$1 > FH > 0.5$	Hydrodynamisme moyen
FH=0	Hydrodynamisme faible
FH=-1	Hydrodynamisme très faible

➤ La fraction fine (pélites)

Correspond à la partie la plus fine du sédiment. Elle est déterminée par la différence entre le poids initial de l'échantillon et son poids après rinçage à l'eau :

$$\text{Fraction fine (g)} = P_{\text{initial}} - P_{\text{final}}$$

Tableau 15 : Classification des sédiments selon le taux des pélites

Type de dépôt	Taux des pélites (%)
Sable peu vaseux	<5
Sable vaseux	5 à 25
Vase sableuse	25 à 75
Vase	>75

III.3. Technique d'analyse des hydrocarbures

Diverses techniques sont utilisées pour l'analyse des polluants organiques marins. Parmi elles, les méthodes chromatographiques occupent une place importante grâce à leur sensibilité et leur capacité à fournir des informations qualitatives et quantitatives sur les hydrocarbures présents dans les échantillons environnementaux.

Dans cette étude, l'analyse des hydrocarbures a été réalisée par **chromatographie en phase gazeuse (CPG)**, une technique de séparation permettant l'identification et la caractérisation des différents composés hydrocarbonés présents dans les échantillons de sédiments.

III.3.1. Chromatographie en phase gazeuse (CPG)

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) est une technique analytique largement utilisée pour la séparation, l'identification et la quantification des composés organiques volatils et semi-volatils (Figure 13). Cette méthode repose sur la migration différentielle des constituants d'un mélange à travers une colonne chromatographique sous l'action d'un gaz vecteur inerte. Grâce à sa sensibilité élevée, sa rapidité et sa bonne résolution, la CPG est couramment employée dans les domaines environnemental, pétrolier, pharmaceutique et agroalimentaire.

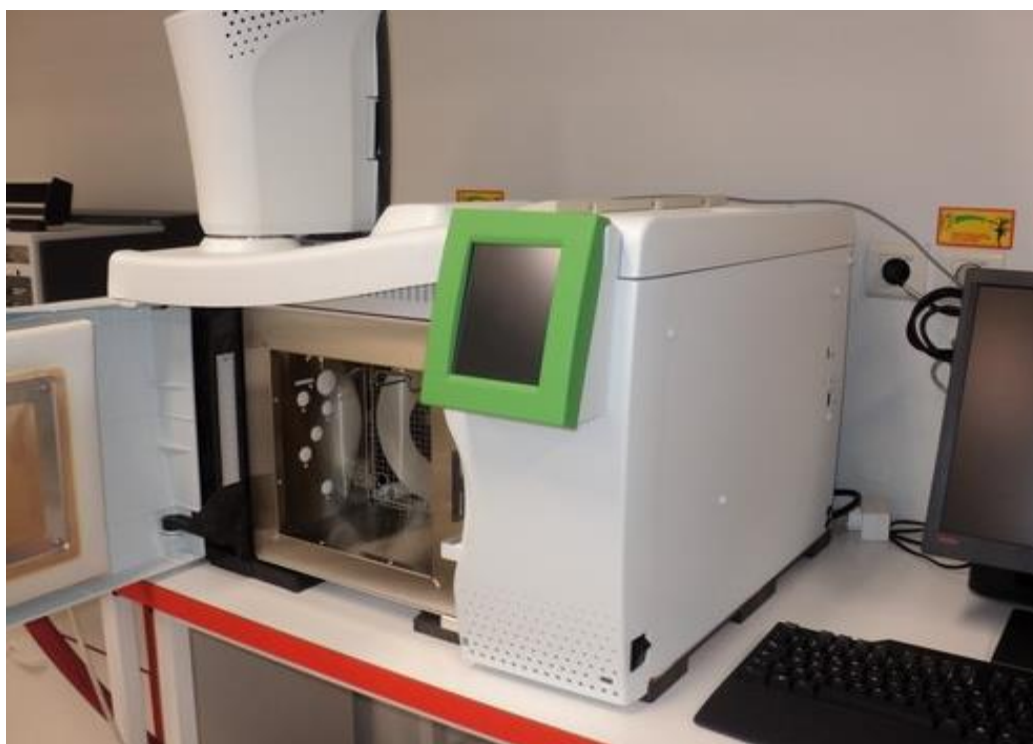


Figure 13: Chromatographe en phase gazeuse PerkinElmer Clarus 580 GC équipé d'un détecteur FID

III.3.1.1. Principe de la méthode

Le principe de la chromatographie en phase gazeuse est basé sur la répartition des molécules entre une phase mobile gazeuse et une phase stationnaire fixée à l'intérieur d'une colonne capillaire. Après injection, l'échantillon est vaporisé dans l'injecteur puis transporté par le gaz vecteur à travers la colonne.

Au cours de leur déplacement, les différents composés interagissent différemment avec la phase stationnaire selon leurs propriétés physicochimiques. Les composés présentant une faible affinité pour la phase stationnaire migrent plus rapidement et sont élués en premier, tandis que ceux ayant une affinité plus importante sont retenus plus longtemps dans la colonne. Cette différence de comportement permet la séparation des constituants du mélange. Chaque composé est caractérisé par un temps de rétention spécifique correspondant à la durée nécessaire pour traverser la colonne dans des conditions chromatographiques données. (Sigma-Aldrich)

III.3.1.2. Appareillage

L'analyse chromatographique a été réalisée à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse PerkinElmer Clarus 580 GC couplé à un détecteur à ionisation de flamme (FID). L'appareil est équipé d'un système d'injection automatique permettant l'introduction précise des échantillons ainsi que d'un logiciel de traitement et d'acquisition des données TotalChrom, comme indiqué sur le schéma ci-dessous (**Figure 14**)

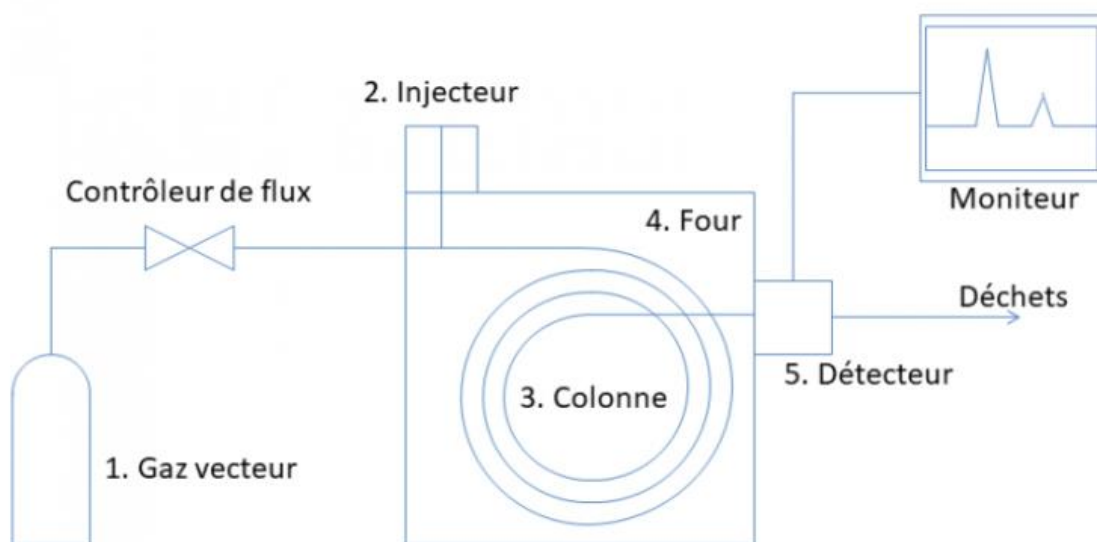


Figure 14 : Schéma d'un chromatographe en phase gazeuse

a) **Gaz vecteur**

Le gaz vecteur utilisé est l'hélium de qualité analytique (pureté $\geq 99,999\%$). Ce gaz assure le transport des analytes à travers la colonne chromatographique avec un débit constant de $1,0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

b) **Système d'injection**

L'introduction des échantillons est réalisée par injection automatique en mode splitless afin d'optimiser la sensibilité de détection. Le volume injecté est de $1\text{ }\mu\text{L}$. L'injecteur est maintenu à une température de $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ permettant la vaporisation rapide des composés analysés.

c) **Colonne chromatographique**

La séparation chromatographique a été réalisée à l'aide d'une colonne capillaire en silice fondue de type DB-5, comportant une phase stationnaire apolaire constituée de (5 % phényl)-méthylpolysiloxane. Cette colonne présente une longueur de 30 m, un diamètre interne de 0,25 mm et une épaisseur de film de $0,25\text{ }\mu\text{m}$.

Les colonnes capillaires sont les plus utilisées en chromatographie en phase gazeuse en raison de leur grande efficacité de séparation et de leur pouvoir de résolution élevé. La phase stationnaire déposée sur la paroi interne de la colonne favorise les interactions avec les analytes, permettant ainsi leur séparation selon leur volatilité et leur affinité chimique. (McNair H.M., Miller J.M., Snow N.H., Basic Gas Chromatography, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 2019.)

d) Four chromatographique

La colonne est placée dans un four thermostatique dont la température peut être programmée au cours de l'analyse. Le contrôle de la température constitue un paramètre essentiel en chromatographie gazeuse puisqu'il influence directement le temps de rétention et la qualité de la séparation des composés.

Dans cette étude, le programme thermique appliqué débute à 50 °C avec un maintien de 1 min, suivi d'une rampe de chauffage de 12 °C.min⁻¹ jusqu'à 310 °C, température maintenue pendant 8 min. Cette programmation permet une séparation efficace des hydrocarbures pétroliers compris entre C10 et C40.

e) Détecteur à ionisation de flamme (FID)

La détection des composés séparés est assurée par un détecteur à ionisation de flamme (FID), largement utilisé pour l'analyse des composés organiques contenant du carbone. Son principe repose sur l'ionisation des molécules organiques dans une flamme produite par la combustion de l'hydrogène et de l'air synthétique. Les ions formés génèrent un courant électrique proportionnel à la quantité de composés présents, permettant ainsi leur détection et leur quantification. Le détecteur FID se distingue par sa grande sensibilité, sa stabilité et sa large plage de réponse pour les hydrocarbures (Poole C.F., Gas Chromatography, Elsevier, Amsterdam, 2012.)

Les conditions de fonctionnement du détecteur sont les suivantes :

Température du détecteur : 320 °C ;

Débit d'hydrogène : 45 mL.min⁻¹ ;

Débit d'air synthétique : 450 mL.min⁻¹ ;

Gaz d'appoint (make-up) : hélium, 25 à 30 mL.min⁻¹.

III.3.1.3. Conditions chromatographiques

Les conditions opératoires utilisées pour l'analyse des hydrocarbures totaux pétroliers (HCT, C10–C40) sont les suivantes (tableau 16) :

Tableau 16 : Conditions opératoires de la chromatographie en phase gazeuse (CPG)

paramètres	Valeurs / description
Température de l'injecteur	280 °C
Température initiale du four	50 °C (maintien 1 min)
Rampe de température	12 °C.min ⁻¹
Température finale	310 °C (maintien 8 min)

Température du détecteur FID	320 °C
Gaz vecteur	Hélium
Débit du gaz vecteur	1,0 mL.min ⁻¹
Volume d'injection	1 µL
Mode d'injection	Splitless

Ces conditions permettent une séparation efficace des hydrocarbures pétroliers compris entre C10 et C40 et assurent une bonne résolution chromatographique ainsi qu'une détection sensible des composés présents dans les échantillons analysés.

III.3.1.4. Mode opératoire

Les extraits obtenus ont été analysés par chromatographie en phase gazeuse (CPG) à l'aide d'un chromatographe PerkinElmer Clarus 580 GC équipé d'un détecteur à ionisation de flamme (FID). Un volume de 1 µL de chaque échantillon a été injecté en mode splitless dans l'appareil. La séparation chromatographique a été réalisée sur une colonne capillaire en silice fondue de type DB-5 (30 m × 0,25 mm × 0,25 µm), en utilisant l'hélium comme gaz vecteur à un débit de 1,0 mL/min.

Le programme de température du four a débuté à 50 °C avec un maintien de 1 minute, suivi d'une rampe de température de 12 °C/min jusqu'à 310 °C, maintenue pendant 8 minutes. La température de l'injecteur a été fixée à 280 °C et celle du détecteur FID à 320 °C. Les composés séparés ont été détectés par ionisation de flamme et enregistrés sous forme de chromatogrammes, permettant l'évaluation des hydrocarbures pétroliers totaux dans les échantillons analysés.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV. Résultats et discussions

Dans le cadre de notre étude intitulée « Évaluation de la contamination par les hydrocarbures des eaux et des sédiments du port de Béjaïa : caractérisation, sources et risques environnementaux », une campagne d'échantillonnage a été réalisée en février 2026.

Pour l'étude des eaux, six stations de prélèvement ont été sélectionnées au sein du port de Béjaïa. Les paramètres physico-chimiques (température, pH et salinité) ont été mesurés directement in situ au niveau de chaque station à l'aide d'appareils multi-paramètres. Par ailleurs, des échantillons d'eau ont été prélevés et acheminés au laboratoire pour l'analyse des hydrocarbures.

Concernant les sédiments, six échantillons ont été prélevés au niveau des différentes stations d'étude pour l'analyse des hydrocarbures. En revanche, l'analyse granulométrique n'a été réalisée que sur quatre échantillons, en raison d'une quantité insuffisante de sédiment prélevée à la station S1 et S3, ne permettant pas la réalisation de cette analyse.

IV.1. Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux du port de Béjaïa

IV.1.1. Résultats des analyses physico-chimiques

L'ensemble des résultats de mesure des paramètres physico-chimique relevé in-situ et sont présentés dans le tableau 17 suivant :

Tableau 17 : Résultats des analyses physico-chimiques eau de mer du port de Béjaïa

Station	Température (°C)	pH	Salinité (PSU)
S1	15.4	6.943	36.0
S2	15.8	6.94	36.1
S3	15.6	6.946	36.1
S4	15.4	6.944	36.2
S5	15.4	6.945	36.4
S6	15.4	6.941	36.3
Moyenne	15.50	6.943	36.18
Ecart type	0.167	0.0023	0.147

A. Température des eaux de surface

La température est un paramètre environnemental important qui influence la biodégradation des hydrocarbures pétroliers. Elle agit sur les propriétés physiques et chimiques du pétrole ainsi que sur l'activité métabolique des microorganismes responsables de sa dégradation. Ainsi, la vitesse de biodégradation et la diversité des communautés microbiennes sont étroitement liées aux conditions thermiques du milieu (Atlas, 1981 ; Leahy et Colwell, 1990).

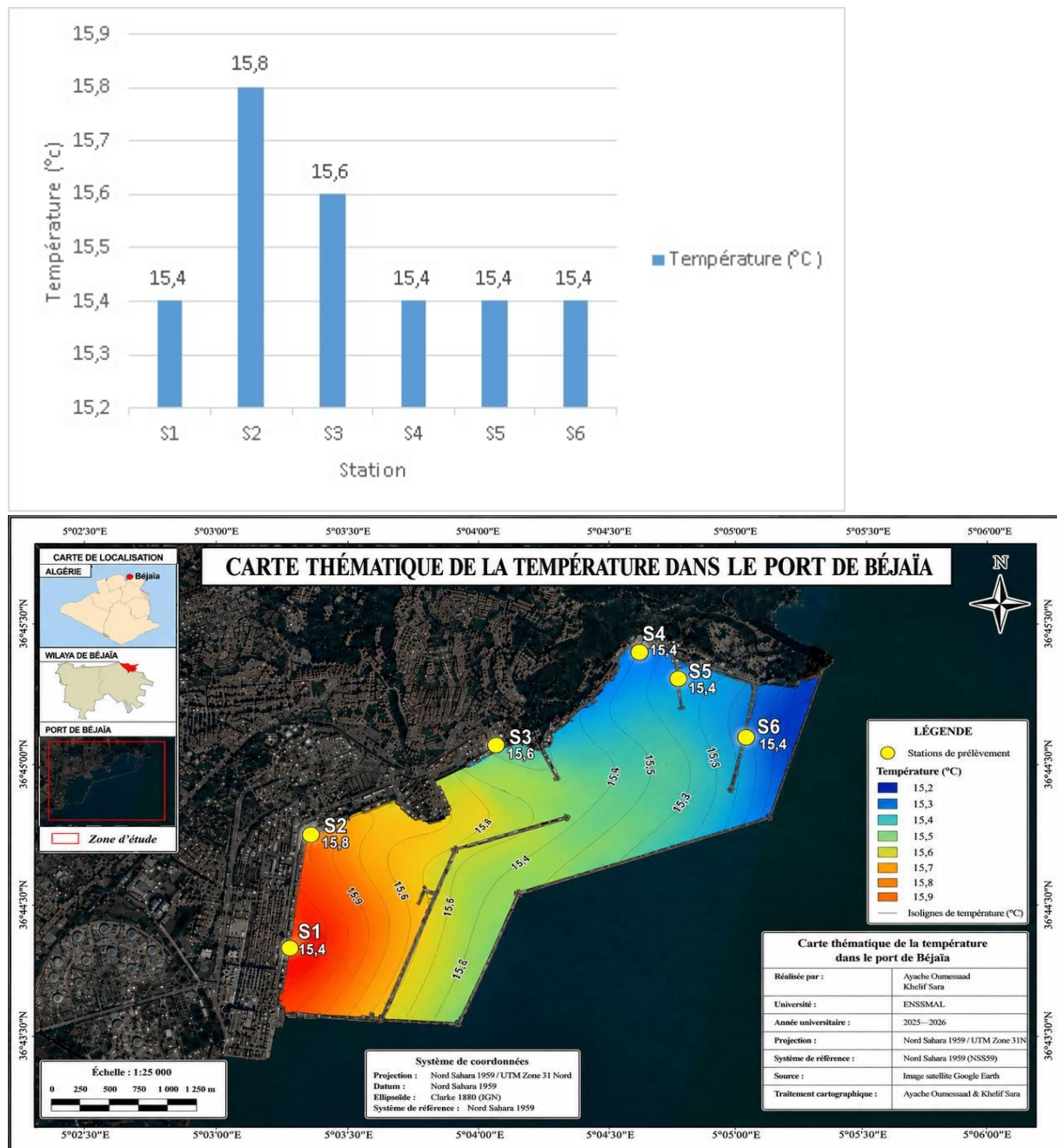


Figure 15: Variation de la température dans l'eau de mer de port de Bejaia

Les températures mesurées dans les eaux du port de Bejaia varient entre 15,4 et 15,8 °C (Figure 15). La valeur maximale a été enregistrée à la station S2 (15,8 °C), tandis que les valeurs minimales (15,4 °C) ont été observées aux stations S1, S4, S5 et S6. La station S3 présente une température intermédiaire de 15,6 °C.

La carte de distribution spatiale montre une relative homogénéité de la température dans l'ensemble de la zone étudiée, avec un léger gradient décroissant de l'ouest vers l'est du port. Les températures plus élevées sont observées dans la partie ouest, alors que les secteurs est et nord-est présentent des valeurs légèrement plus faibles.

Ces faibles variations thermiques indiquent des conditions relativement stables au moment de l'échantillonnage. Selon plusieurs études, une diminution de la température peut ralentir l'activité enzymatique des microorganismes et réduire ainsi la vitesse de biodégradation des hydrocarbures. À l'inverse, une augmentation de la température favorise l'activité microbienne et accélère les processus de dégradation des composés pétroliers (**Walworth et al., 2001 ; Sandvik et al., 1986 ; Song et al., 1990**). Les températures enregistrées dans le port de Béjaïa demeurent donc favorables au maintien de l'activité biologique et aux processus naturels d'atténuation des hydrocarbures dans le milieu marin.

B. Potentiel d'hydrogène (pH)

Les valeurs du pH mesurées dans le port de Béjaïa varient entre 6,940 et 6,946, avec une moyenne d'environ 6,943, traduisant une faible variabilité entre les différentes stations échantillonnées. Cette faible amplitude de variation témoigne d'une relative homogénéité du milieu sur l'ensemble de la zone étudiée. (Figure 16)

La distribution spatiale du pH met néanmoins en évidence de légères différences entre les stations. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées aux stations S3 (6,946) et S5 (6,945), tandis que les plus faibles ont été observées aux stations S2 (6,940) et S6 (6,941). La carte de répartition spatiale montre ainsi un faible gradient du pH au sein du port, sans variation marquée. Cette homogénéité peut être liée au brassage des eaux portuaires et aux échanges hydrodynamiques qui favorisent la dispersion des éléments influençant le pH.

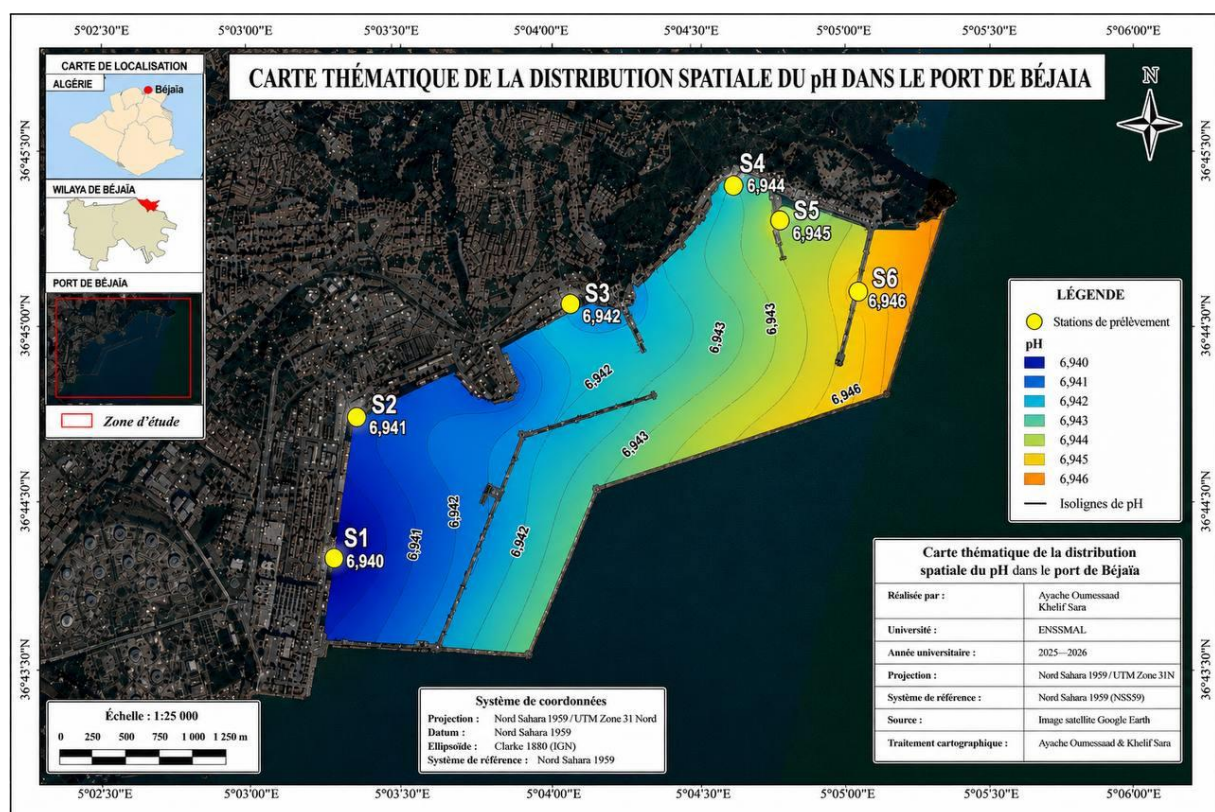
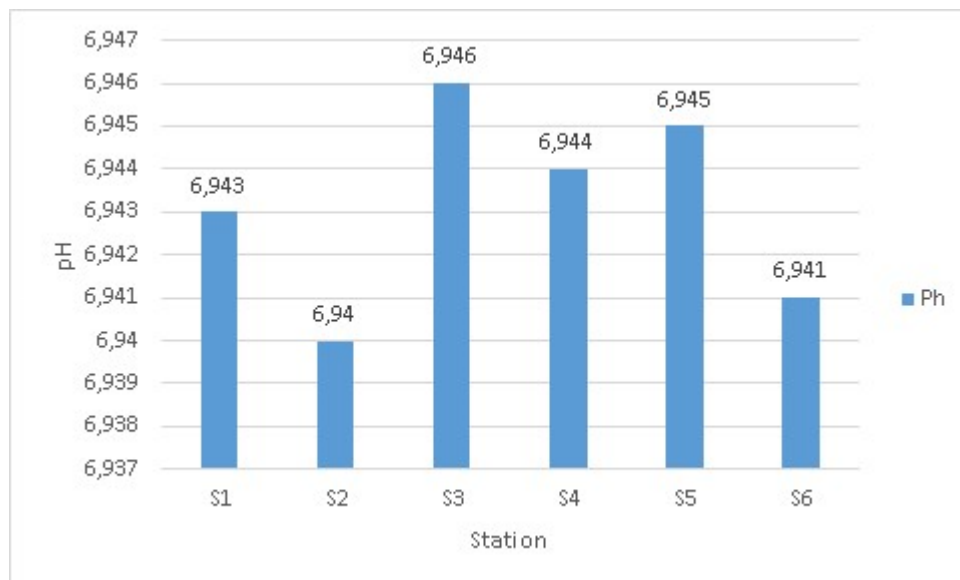


Figure 16: Variation de pH dans l'eau de mer de port de Béjaia

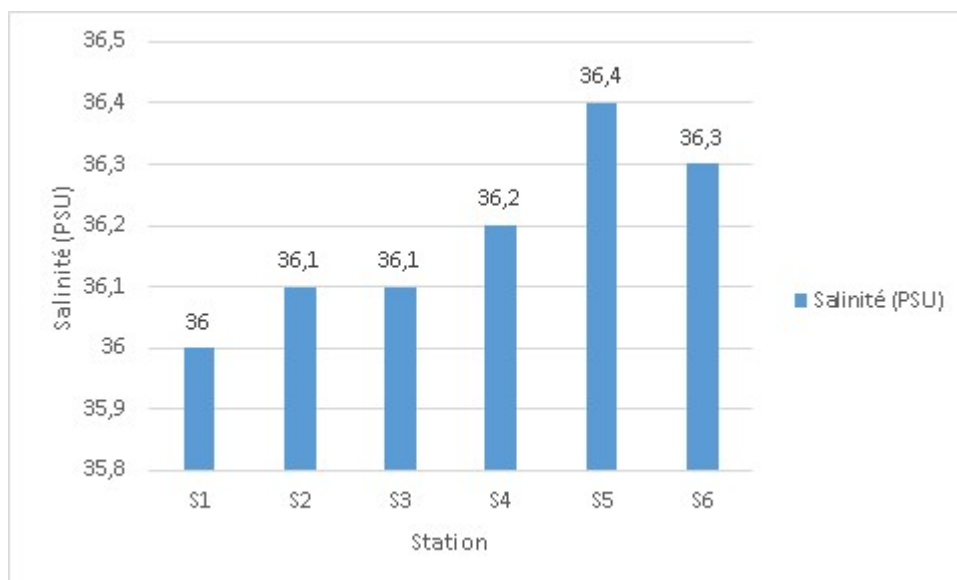
C. Salinité des eaux de surfaces

Les valeurs de salinité mesurées dans le port de Béjaïa varient entre 36,0 et 36,4 PSU, avec une moyenne d'environ 36,18 PSU. Ces valeurs restent relativement faibles par rapport aux salinités moyennes observées en Méditerranée (37,8 à 39,39 PSU), ce qui traduit l'influence des apports d'eau douce dans la zone portuaire. (Figure 17)

La répartition spatiale de la salinité montre un gradient croissant de l'Ouest vers l'Est. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées aux stations S1 (36,0 PSU) et S2-S3 (36,1 PSU), situées dans la partie occidentale du port, tandis que les valeurs les plus élevées sont observées aux stations S5 (36,4 PSU) et S6 (36,3 PSU) dans la partie orientale.

Cette distribution peut être expliquée par l'influence des apports continentaux (eaux de ruissellement et rejets d'eau douce) qui contribuent à la dilution des eaux marines dans les zones les plus proches du littoral et des exutoires. À l'inverse, les secteurs plus ouverts vers le large présentent des salinités plus élevées sous l'effet d'un renouvellement plus important par les eaux marines.

D'un point de vue écologique, plusieurs études ont montré que l'augmentation de la salinité peut limiter l'activité des microorganismes responsables de la biodégradation des hydrocarbures. Selon **Ward et Brock (1978)**, la vitesse de biodégradation diminue lorsque la salinité augmente, en raison d'une réduction de l'activité métabolique microbienne. Toutefois, les valeurs observées dans le port de Béjaïa restent relativement homogènes et ne présentent qu'une faible variabilité spatiale (écart maximal de 0,4 PSU entre les stations).



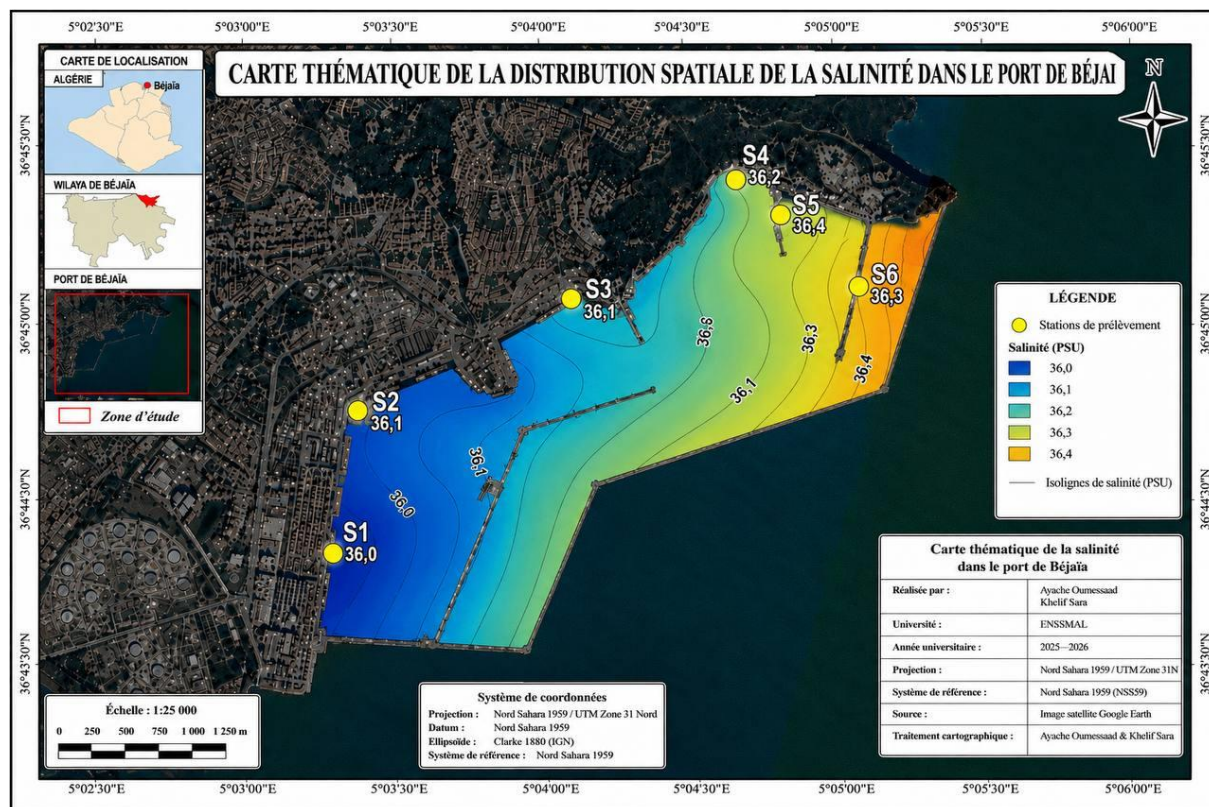


Figure 17: Variation de la salinité dans l'eau de mer de port de Bejaia

IV.1.2. Dosage des hydrocarbures de l'eau du port de Bejaïa

IV.1.2.1. Evaluation des résultats de dosage des hydrocarbures de l'eau de mer du port de Bejaïa

En raison de l'indisponibilité des équipements d'analyse, le dosage des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) a été réalisé uniquement sur deux stations d'échantillonnage (S3 et S5).

Les analyses ont été effectuées au niveau du Centre de Recherche et Développement de SONATRACH à Boumerdès, où il a été demandé de fournir seulement quatre échantillons : deux échantillons d'eau et deux échantillons de sédiments provenant des stations S3 et S5.

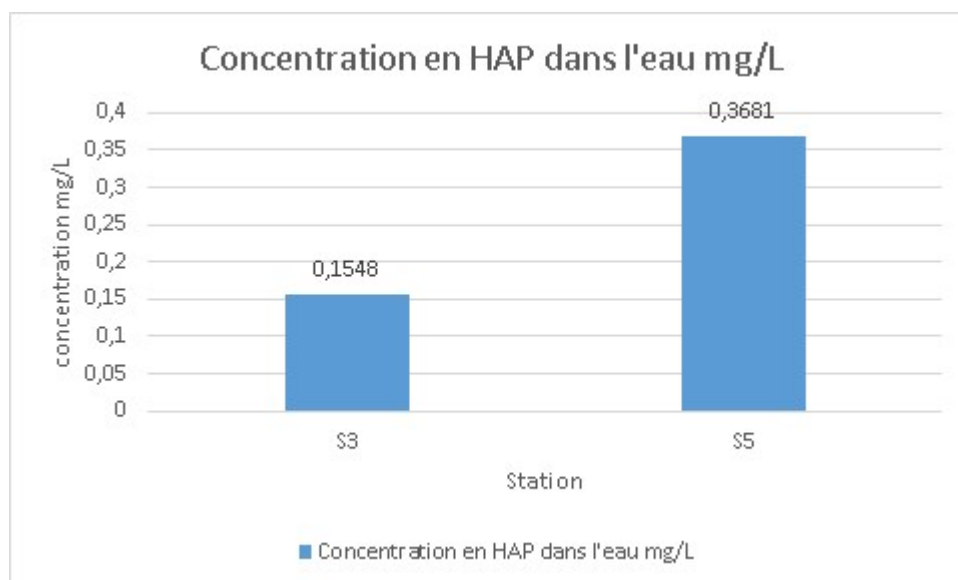


Figure 18: Concentration des Hydrocarbures aromatiques dans l'eau du port de Bejaïa

D'après la figure 18, les concentrations en HAP mesurées dans l'eau de mer varient entre 0,1548 mg/L à la station S3 et 0,3681 mg/L à la station S5. La concentration la plus élevée est donc observée au niveau de la station S5, tandis que la plus faible est enregistrée à la station S3. La concentration moyenne est de 0,2615 mg/L.

Ces valeurs sont supérieures aux limites fixées par la réglementation algérienne, comprises entre 0.08 et 0.1 mg/L (**JORA, 2006**). Néanmoins, leur présence témoigne d'une contamination du milieu marin par les hydrocarbures aromatiques.

La concentration plus importante observée à la station S5 pourrait être liée aux activités portuaires et aux différentes sources de pollution d'origine anthropique. En effet, les rejets issus du nettoyage des réservoirs des embarcations, les déversements accidentels de produits pétroliers, les eaux de ruissellement provenant des zones urbanisées environnantes ainsi que les opérations de vidange ou de manutention des hydrocarbures peuvent contribuer à l'enrichissement du milieu en HAP.

La station S3 présente également une contamination, bien que moins marquée. Cette différence entre les deux stations peut s'expliquer par la proximité variable des sources de pollution, les conditions hydrodynamiques locales ou encore les phénomènes de dilution et de dispersion des contaminants dans le milieu marin.

Ainsi, la détection des HAP dans les eaux étudiées révèle l'influence des activités humaines sur la qualité du milieu marin et souligne la nécessité d'un suivi régulier de ces polluants afin de prévenir toute dégradation de l'écosystème côtier.

IV.1.3. Analyse des sédiments marins du port de Bejaïa

La sédimentation des hydrocarbures correspond au transfert des hydrocarbures de la colonne d'eau vers le fond marin. Ce phénomène se produit lorsque la densité des hydrocarbures devient supérieure à celle de l'eau. Deux principaux mécanismes favorisent cette sédimentation :

- L'adsorption des hydrocarbures sur les particules en suspension, qu'elles soient d'origine organique ou minérale.
- Le vieillissement des hydrocarbures résultant de l'évaporation et de la dissolution des composés à faible poids moléculaire, ce qui entraîne une augmentation de leur densité.

L'adsorption est particulièrement importante au niveau des particules minérales fines telles que les vases, les argiles et les sables fins. Ces particules constituent la fraction pélique du sédiment ($\leq 40 \mu\text{m}$) et possèdent une forte capacité à retenir les hydrocarbures dissous présents dans la colonne d'eau. Cette aptitude est principalement liée à leurs propriétés électrochimiques.

Afin de caractériser les sédiments marins étudiés, cinq échantillons ont été soumis à une analyse granulométrique. Les courbes granulométriques ont été établies en représentant le pourcentage de chaque fraction en fonction de la taille des tamis utilisés. Cette analyse a permis d'identifier les stations présentant un fort potentiel adsorbant, caractérisées par une proportion importante de vase, d'argile et de sable fin, selon la classification présentée dans le Tableau 11.

IV.1.3.1. Résultats de l'analyse granulométrique

Tableau 18 : Résultats des percentiles dans les stations

Station	P5	P10	P16	P18	P50	P60	P84	P95
St2	245	225	185	175	141	130	95	68
St4	248	230	190	180	145	135	100	72
St5	248	238	215	210	204	198	165	142
St6	252	242	220	215	192	185	155	128

Tableau 19 : Indices granulométriques

Moyenne (mm)	St2 0.140 Sable très fin	St4 0.145 Sable très fin	St5 0.193 Sable fin	St6 0.189 Sable fin
S0	1.52 Très bien classé	1.49 Très bien classé	1.35 Très bien classé	1.38 Très bien classé
FH	-0.3 Hydrodynamisme faible	-0.2 Hydrodynamisme faible	+0.8 Hydrodynamisme moyen	+0.6 Hydrodynamisme moyen

Tableau 20 : Résultats des quartiles de chaque station

Station	Q25 (µm)	Q50 (µm)	Q75 (µm)
St 1	106	141	234
St 4	109	145	213
St 5	173	204	234
St 6	148	192	231

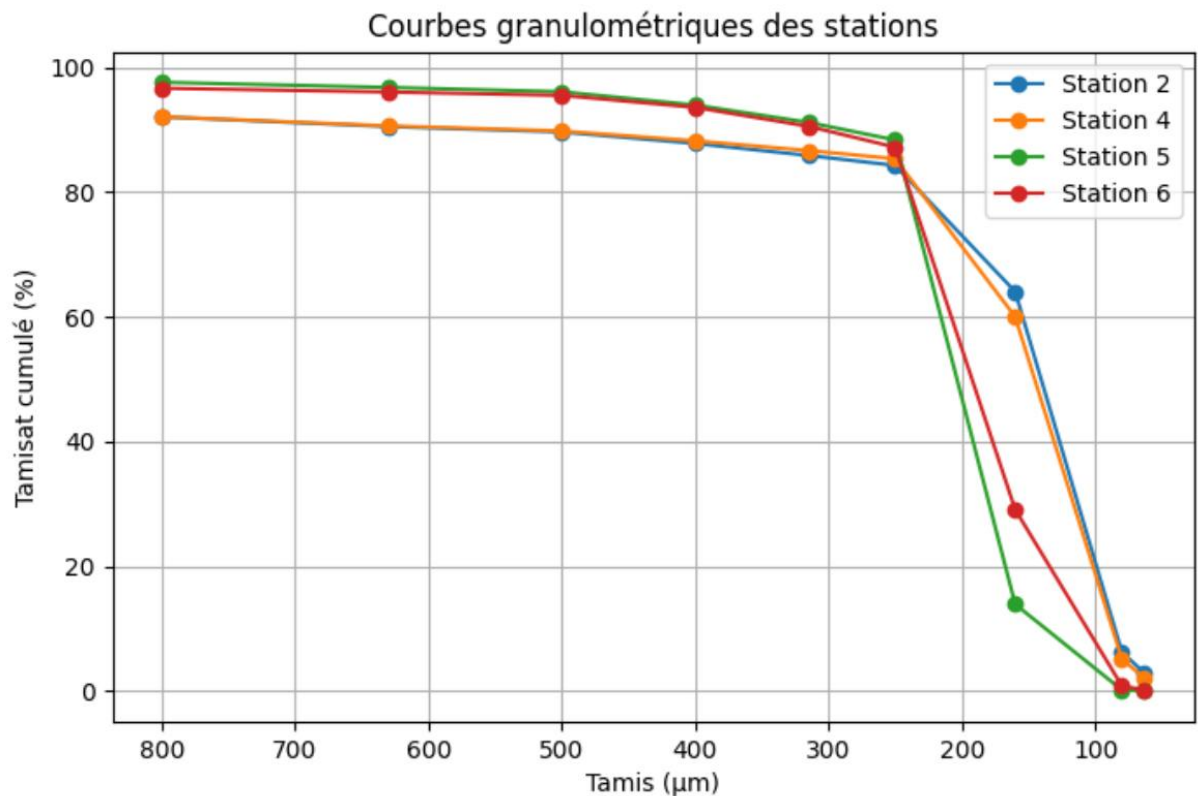


Figure 19: Courbe granulométrique des échantillons des 4 stations

- D'après les tableaux (**Tableau 18** **Tableau 19** **Tableau 20**) l'analyse granulométrique des échantillons prélevés au niveau des stations St2, St4, St5 et St6 met en évidence une prédominance des fractions sableuses fines à très fines. Les diamètres moyens varient entre 0,140 mm et 0,193 mm, ce qui permet de classer les sédiments des stations St5 et St6 comme des sables fins, tandis que ceux des stations St2 et St4 correspondent à des sables très fins.
- Les valeurs du coefficient de tri (S_o) sont comprises entre 1,35 et 1,52. Selon la classification de Trask, ces valeurs indiquent que l'ensemble des échantillons est très bien classé (« très bien trié »). Cette homogénéité granulométrique traduit une sélection efficace des particules sous l'action des agents de transport et de dépôt. Elle témoigne également d'un environnement sédimentaire relativement stable où les particules de taille similaire sont préférentiellement accumulées.
- L'indice d'hydrodynamisme (FH) présente des valeurs positives pour les stations St5 (+0,8) et St6 (+0,6), traduisant un hydrodynamisme moyen. En revanche, les stations St2 (-0,3) et St4 (-0,2) montrent des valeurs négatives indiquant un hydrodynamisme faible. Cette évolution suggère une diminution progressive de l'énergie du milieu, favorisant le dépôt des particules les plus fines dans les stations St2 et St4.
- Les quartiles granulométriques confirment ces observations (**Figure 19**). Les valeurs du diamètre médian (Q50) diminuent progressivement de 204 μ m à la station St1 à 141 μ m et 145 μ m aux stations St2 et St4. Cette diminution traduit un enrichissement en particules fines et suggère un transport sélectif des sédiments depuis les zones à plus forte énergie vers les zones à énergie plus faible.
- Dans l'ensemble, les résultats mettent en évidence un milieu dominé par des sables fins à très fins, très bien triés, caractéristique d'un environnement sédimentaire relativement homogène. Les stations St5 et St6 reflètent des conditions hydrodynamiques moyennes favorisant le maintien de particules légèrement plus grossières, tandis que les stations St2 et St4 correspondent à des secteurs plus calmes où s'accumulent préférentiellement les fractions les plus fines. Cette répartition spatiale traduit une diminution de l'énergie hydrodynamique et une augmentation relative de la vulnérabilité sédimentaire vers les stations St2 et St4.
- **Conclusion**

Les analyses granulométriques révèlent une dominance de sables fins à très fins, caractérisés par un excellent tri granulométrique. La distribution des tailles de grains indique une influence notable de l'hydrodynamisme sur la répartition des sédiments, avec des conditions énergétiques moyennes au niveau des stations St5 et St6 et plus faibles au niveau des stations St2 et St4. Ces résultats traduisent un environnement de dépôt relativement stable, marqué par une sélection granulométrique efficace et une accumulation préférentielle des particules fines dans les secteurs les moins énergétiques.

IV.1.3.2. Résultats du dosage des hydrocarbures du sédiment marin

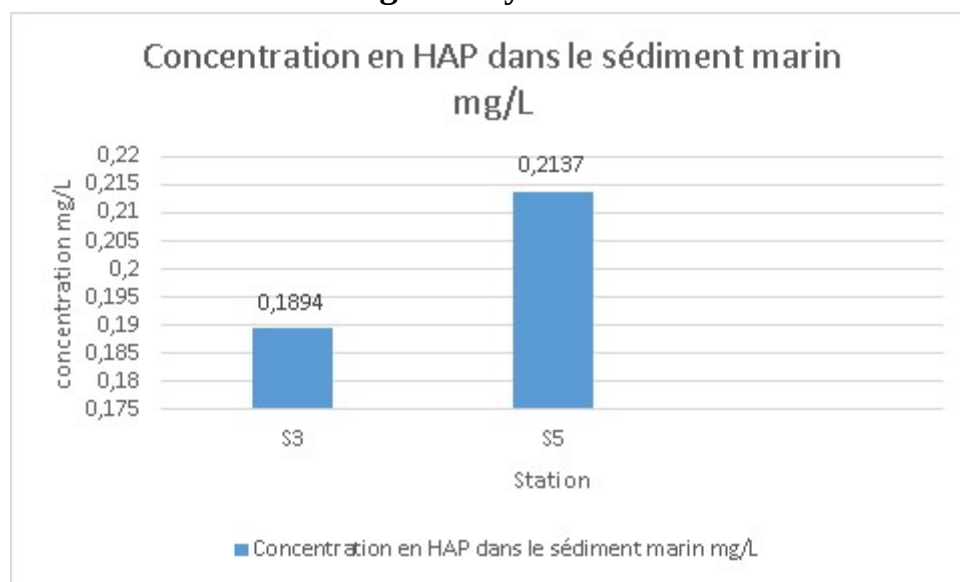


Figure 20: Concentration des Hydrocarbures aromatiques dans le sédiment port de Bejaïa

D'après la figure 20, les concentrations en HAP dans les sédiments marins varient entre 0,1894 mg/L au niveau de la station S3 et 0,2137 mg/L à la station S5. La concentration moyenne enregistrée est de 0,2015 mg/L.

Les résultats montrent que la station S5 présente la concentration la plus élevée en HAP, tandis que la station S3 enregistre la valeur la plus faible. La présence de ces composés dans les sédiments traduit une contamination du milieu marin par les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Cette contamination est principalement liée à la forte affinité des HAP pour les particules solides. En raison de leur caractère hydrophobe, ces composés ont tendance à s'adsorber sur les sédiments, qui constituent ainsi un réservoir important de pollution dans le milieu marin. Les hydrocarbures accumulés dans les sédiments peuvent provenir des activités portuaires, des

rejets pétroliers chroniques ou accidentels, des opérations de maintenance et de nettoyage des embarcations, ainsi que des eaux de ruissellement transportant divers contaminants vers le port.

Par ailleurs, les émissions issues de la combustion des carburants des embarcations, notamment celles équipées de moteurs diesel, représentent une source potentielle de HAP. Ces composés peuvent être transportés vers le milieu marin par dépôt atmosphérique avant de se fixer sur les particules sédimentaires.

La comparaison des résultats du dosage des HAP avec les données granulométriques montre que les sédiments des stations étudiées sont majoritairement constitués de sable grossier. Bien que ce type de sédiment possède généralement une capacité d'adsorption inférieure à celle des sédiments fins riches en limons et en argiles, les concentrations observées indiquent que les sédiments jouent néanmoins un rôle dans l'accumulation des hydrocarbures présents dans l'environnement portuaire.

Ainsi, les concentrations mesurées dans les stations S3 et S5 mettent en évidence l'impact des activités anthropiques sur la qualité des sédiments marins et soulignent l'importance d'un suivi régulier de ces polluants afin de préserver l'équilibre écologique du milieu côtier.

Conclusion

Conclusion

La protection du milieu marin constitue aujourd'hui un enjeu environnemental majeur, particulièrement dans les zones portuaires soumises à une forte pression anthropique. Le port de Bejaia, l'un des principaux pôles économiques et pétroliers d'Algérie, est exposé à diverses sources de pollution liées aux activités maritimes, industrielles et urbaines. Dans ce contexte, la présente étude avait pour objectif d'évaluer le degré de contamination par les hydrocarbures des eaux et des sédiments du port de Bejaia, de caractériser leur distribution spatiale, d'identifier leurs sources potentielles et d'apprécier les risques environnementaux associés.

Les investigations menées sur les matrices eau et sédiment ont permis de mettre en évidence l'état de qualité du milieu marin portuaire à travers l'analyse des paramètres physico-chimiques et le dosage des hydrocarbures aromatiques. Les résultats obtenus montrent que la contamination observée varie selon les stations étudiées, reflétant l'influence des activités portuaires, du trafic maritime, des rejets urbains et des apports continentaux.

L'étude des paramètres physico-chimiques a permis de mieux comprendre le fonctionnement du milieu et les conditions susceptibles d'influencer le devenir des hydrocarbures dans l'environnement marin. Les variations observées traduisent l'impact des conditions hydrodynamiques locales ainsi que des apports anthropiques. L'analyse des sédiments a également confirmé leur rôle de réservoir de contaminants, en raison de leur capacité à adsorber et à accumuler les hydrocarbures sur de longues périodes.

Les résultats obtenus soulignent que les sédiments présentent généralement des teneurs plus importantes en hydrocarbures que les eaux de surface, ce qui confirme leur intérêt comme indicateurs de la contamination chronique du milieu marin. La présence de ces composés dans les différentes stations étudiées témoigne de l'influence des activités pétrolières, des opérations portuaires et des rejets associés aux activités humaines développées dans la zone de Bejaia.

Cette étude met ainsi en évidence la nécessité de renforcer les programmes de surveillance environnementale au niveau du port de Bejaia afin de prévenir l'accumulation des polluants et de limiter leurs impacts sur les écosystèmes marins. La préservation de la qualité des eaux et des sédiments constitue une condition essentielle pour assurer la protection de la biodiversité marine, la pérennité des activités économiques et la santé des populations.

Au terme de ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

- Réaliser des campagnes d'échantillonnage couvrant les différentes saisons de l'année afin de mieux appréhender les variations temporelles de la contamination.
- Étendre les analyses à d'autres polluants tels que les métaux lourds, les pesticides et les microplastiques.
- Renforcer les dispositifs de contrôle des rejets industriels, urbains et portuaires.
- Mettre en place un système permanent de surveillance environnementale au niveau du port de Bejaia.
- Développer une base de données environnementale permettant le suivi à long terme de la qualité des eaux et des sédiments.
- Encourager les actions de sensibilisation et de formation en faveur de la protection du milieu marin.

En définitive, ce travail constitue une contribution à la connaissance de l'état de contamination du port de Bejaia par les hydrocarbures et représente une base scientifique pouvant servir à l'élaboration de stratégies de gestion durable et de protection de l'environnement marin algérien.

Bibliographie

Bibliographie

Abdelli, A., & Mokrane, Z. (2002). Pollution par les hydrocarbures en milieu marin. Mémoire d'ingénieur. Environnement marin. Dely Brahim : ENSSMAL.

Aminot, A., Chaussepied, M., & Kerouel, R. (1983). Manuel des analyses chimiques en milieu marin. Centre National pour l'Exploitation des Océans.

Aminot, A., & Kérouel, R. (2004). Hydrologie des écosystèmes marins : paramètres et analyses. Brest : Ifremer.

Aminot, A., & Kérouel, R. (2007). Dosage des paramètres physico-chimiques en milieu marin. Brest : Ifremer.

Barbe, J. (1997). Pollution des sédiments et contamination des milieux aquatiques. Paris : Lavoisier.

Bocard, C. (2006). Évaluation des impacts écologiques des hydrocarbures en milieu marin. France : Université de Bretagne.

Boughrira, S. (2012). Biodégradation des hydrocarbures dans les sédiments marins. Mémoire de Magister. Environnement marin. Dely Brahim : ENSSMAL.

CEDRE. (2005). Les processus de vieillissement des hydrocarbures en mer. Centre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentations sur les Pollutions Accidentelles des Eaux.

CEDRE. (2009). Guide pratique de la pollution par les hydrocarbures. Brest, France.

Collos, Y. (1977). Effets des hydrocarbures sur les organismes marins. Paris : Masson.

Direction de l'Hydraulique de Béjaïa. (2006). Données hydrologiques de la région de Béjaïa.

Entreprise Portuaire de Béjaïa (EPB). (2026). Présentation générale du port de Béjaïa. Béjaïa, Algérie.

Fattal, P. (2008). Pollutions marines et littorales. France : Presses Universitaires de Rennes.

Forstner, U. (1987). Sediments and environmental geochemistry. London: Springer.

Gilfillan, E. S., et al. (1976). Fate of petroleum hydrocarbons in marine sediments. Marine Pollution Bulletin.

Hammoudi, M. (2009). Étude géologique et hydrologique de la région de Béjaïa. Bejaia. Université de Béjaïa.

INERIS. (2005). Hydrocarbures aromatiques polycycliques. Guide méthodologique : Acquisition des données d'entrée des modèles analytiques ou numériques de transfert

dans les sols et les eaux souterraines. Rapport d'étude N°66244 DESP-R01. 85p+annexe.

ITOPF. (2013). Effects of oil pollution on marine habitats. International Tanker Owners Pollution Federation.

Julie Lions. (2004). Étude des sédiments et de leurs interactions avec les polluants. Université de Limoges.

Krausz, P., et al. (2008). Hydrocarbures pétroliers : caractéristiques et comportement environnemental. Éditions. Paris : Tec & Doc.

Lacaze, J.-C. (1980). La pollution marine par les hydrocarbures. Masson.

Lahlali, M., & Hammi, H. (2005). Pollution des eaux par les hydrocarbures, mémoire d'ingénieur d'état, université de Béjaïa .

LEM. (1993). Étude environnementale de la baie de Béjaïa. Laboratoire d'Études Maritimes.

LEM. (2003). Caractéristiques hydrologiques et environnementales du port de Béjaïa. Laboratoire d'Études Maritimes.

Loustau-Cazalet, M. (2012). Caractérisation des sédiments marins contaminés. France : Université de Bordeaux.

McNair, H. M., Miller, J. M., & Snow, N. H. (2019). Basic gas chromatography (3rd ed.). USA: John Wiley & Sons.

Mearns, A. J., et al. (1986). Contaminated sediments in coastal ecosystems. Marine Environmental Research.

O'Sullivan, D., & Jacques, T. G. (2001). Marine pollution impacts on aquatic organisms. London : Elsevier.

Olajire, A. A., et al. (2005). Sources and distribution of petroleum hydrocarbons in marine environments. Environmental Monitoring and Assessment.

Ramade, F. (1995). Éléments d'écologie : écologie appliquée. USA : McGraw-Hill.

Saker, M. (2007). Toxicité des hydrocarbures pétroliers en milieu marin. Oran. Université d'Oran.

Saliot, A. (1981). Natural hydrocarbons in sea water. In: Duursma, E.K. and Dawson, R. (Eds.), Marine organic chemistry. Elsevier, Amsterdam, pp. 327-374.

Schneider, J. (2001). Minéralogie et géochimie des sédiments marins. Paris : Dunod.

Scordia, P. (2008). Granulométrie et dynamique sédimentaire. France : Éditions BRGM.

Sigma-Aldrich. (s.d.). Produits chimiques et réactifs analytiques. Sigma-Aldrich

Annexes

Annexes

Annexe 1 : Fréquences et directions des houles pour différents états de la mer (LEM, 1993).

Degrés	Ouest (%)	Nord-ouest (%)	Nord (%)	Nord-est (%)	Est (%)
Calme	2.6	1.9	2.3	2.3	3.2
0°	8	4.2	2.8	4.3	6.6
1°	14.2	6.7	3.3	3.7	6.1
2°	4.4	2.3	0.5	0.4	0.7
3°	1.1	0.8	0	0	0
4°	0.6	0.3	0	0	0
Total	30.9	16.2	8.9	10.7	16.6

Annexe 2 : résultats des calculs de granulométrie

Tamis (µm)	refus de St 2 (g)	tamisé cumulé (%) de st2	refus de St 4 (g)	refus de St 4 (g) ²	refus de St 5 (g)	tamisé cumulé (%) de st5	refus de St 6 (g)	tamisé cumulé (%) de st6
800	15,93	92,04	15,95	15,95	4,84	97,58	6,75	96,63
630	3,13	90,48	2,94	2,94	1,64	96,76	1,22	96,02
500	1,94	89,61	1,65	1,65	1,41	96,06	1,08	95,48
400	3,69	87,77	3,16	3,16	4,26	93,93	3,85	93,56
315	3,86	85,84	3,14	3,14	5,57	91,15	6,09	90,52
250	3,18	84,25	2,64	2,64	5,64	88,33	6,72	87,17
160	40,52	64,02	50,87	50,87	148,96	13,89	116,36	29,07
80	115,71	6,24	110,2	110,2	27,46	0,15	56,64	0,8
63	6,82	2,83	6,27	6,27	0,61	0,01	1,34	0,13
Refus	5,676	0	4,02	4,02	0,04	0	0,26	0
Poids secs	200,456		200,84	200,84	200,43		200,31	

Annexe 3 : Marques et utilisation des produits chimiques

Verreries et matériel	Appareillages	Produits chimiques (solides et liquides)
Ballons à fond plat de 250ml	Balance de précision	Eau distillée
Ampoules à décanter de 500 ml	Étuve	HCl
Burette de 25 ml	Évaporateur rotatif	eau de robine et détergent
Tubes à essais	Mixeur	Sulfate de sodium anhydre (Na_2SO_4)
Béchers de différents volumes	Soxhlet	Gel de silice (SiO_2)
Erlens meyers	Chauffe ballon agitateur	Alumine (Al_2O_3)
Barreau magnétique	Lyophilisateur	Laine de verre
Éprouvettes de 50ml et 100ml	GC/MS	Mercure (Hg)
Boiling chips	Dessiccateur	Dichlorométhane (C_2H_2)
Réfrigérants	Vortex	Hexane (C_6H_{14})
Matras	Hôte	Acétone ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)
Entonnoirs	Plaque chauffante	Éthanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
Tiges en verre	Agitateur magnétique	Hydroxyde de sodium (NaOH)
Pincettes et spatules en métal inoxydable	Benne Van Veer	Réactif 1 : solution de Mn (II) (MnCl_2)
Piluliers en verre	Valise multi-paramétrique	Réactif 2 : solution basique d'iodure (NaOH, NaI)
Creusets en porcelaine	Colonne vibrante	Réactif 3 : Acide sulfurique (H_2SO_4) à 10 moles/l
Mortier en porcelaine	Tamis à différents diamètres	Thiosulfate de Sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)
Cristallisateur	Titreur automatique	Source d'azote pur
Bistouri	—	—
Erlen à col rodé	—	—