

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
المدرسة الوطنية العليا للعلوم البحريّة وتهيئة الساحل  
**Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral**



**Thèse**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Docteur en science

Domaine : science de la nature et de la vie

Filière : Hydrobiologie Marine et Continentale

Spécialité : Science de la mer

Par

**BENHALIMA Moustafa**

Thème :

Apports et accumulation des métaux traces dans les sédiments des  
baies d'Alger et de Marseille.

Soutenue publiquement le 31/01/2024 à 17H devant le jury composé de :

|                          |            |                                |                    |
|--------------------------|------------|--------------------------------|--------------------|
| Mr. MEZOUAR Khoudir      | Professeur | ENSSMAL                        | Président          |
| Mme. GHAZI Malika        | MCA        | ENSSMAL                        | Examinatrice       |
| Mr. GUENDOUI Yassine     | MCA        | Centre Univ. Morsli A., Tipaza | Examinateur        |
| Mr. MOKADEM Maamar       | MCA        | Centre Univ. Morsli A., Tipaza | Examinateur        |
| Mr. KOURDALI Sid Ali     | MRA        | CNRDPA, Tipaza                 | Examinateur        |
| Mr. BOULAHIDID Mostefa   | Professeur | ENSSMAL                        | Directeur de thèse |
| Mr. RADA KOVITCH Olivier | HDR        | IRSN, France                   | Invité             |

**Année universitaire : 2023- 2024**

Ce projet de recherche a été réalisé dans le cadre du projet PHC-Tassili (Code PHC: 17MDU986; Title: Inputs, accumulations and trace metal contaminations in Algiers and Marseille coastal areas) :

Au Laboratoire des Ecosystèmes Marins et Littoraux de l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (EcosysMarL - ENSSMAL)



Au Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE)



Ce projet de recherche a été financé et soutenu par la Direction générale de la recherche scientifique et du développement technologique (DGRSDT, Algérie), et campus France (France).



Je dédie cette thèse à ma femme Ryma. Je te remercie pour ton soutien et ta confiance sans toi, ce travail n'aurait pas pu voir le jour.

A mes fils Zaid et Mouaâd ;

A mes parents, qui ont été présents à chaque étape, toujours à m'encourager ;

A mes beaux parents ;

A mon professeur de l'université, qui m'a honoré de diriger les travaux de cette thèse de doctorat et de m'accompagner dans mon parcours scientifique ;

Je dédie également ce travail de thèse à tous mes amis avec qui j'ai vécu des moments inoubliables.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord notre Allah le tout puissant qui m'a donné le courage et la volonté pour effectuer ce modeste travail « Elhamdouli Allah ».

Je suis très heureux de pouvoir exprimer ma gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Mes plus vifs remerciements s'adressent à :

M. **Boulahdid Mostefa**, Professeur à l'ENSSMAL, qui m'a encadré avec patience et m'a orienté tout au long de cette thèse. Je suis profondément reconnaissant pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et pour l'empressement qu'il a manifesté à le voir aboutir, puisse-t-il trouver ici la marque de mon profond respect ainsi que mes remerciements les plus sincères ;

M. **MEZOUAR Khoudir**, Professeur à l'ENSSMAL, qu'il m'a fait l'honneur de présider ce jury. Qu'il trouve dans ces lignes le témoignage de mes respectueuses reconnaissances ;

J'exprime ma sincère gratitude à Mme. **GHAZI Malika** de l'École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral pour avoir aimablement accepté d'évaluer ce travail, je me suis sentie privilégiée de recevoir de leur part un examen critique de cette étude ;

Je tiens également à exprimer ma gratitude à M. **GUENDOUI Yassine**, maître de conférences au Centre universitaire Morsli Abdellah de Tipaza, pour ses précieux conseils. J'aimerais lui exprimer ma sincère reconnaissance pour sa contribution inestimable à l'évaluation de ce travail ;

M. **MOKADAEM Maamar**, Maître de Conférences au Centre Universitaire Morsli Abdellah à Tipaza, qui a bien voulu se charger de l'évaluation de ce travail et qui a toujours manifesté un vif intérêt pour son contenu. Je tiens à lui exprimer ma sincère gratitude et mon profond respect ;

M. **KOURDALI Sid Ali**, Maître de recherche au Centre National de Recherche et de Développement de la Pêche et de l'Aquaculture, qui m'a fait l'honneur de participer au jury de cette thèse, compte tenu de leur grande expérience dans le domaine de la toxicologie marine. Ce dont je lui suis profondément reconnaissant.

Je tiens à remercier chaleureusement M. **RADAKOVITCH Olivier** pour m'avoir gracieusement accepté au sein de l'équipe Environnement Durable au Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement à de multiples occasions. En outre, je lui suis reconnaissant pour ses conseils et sa supervision inestimables pendant la durée de mon

stage, qui ont grandement contribué à l'avancement de mes travaux de recherche. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour sa disponibilité constante, ses conseils précieux, son soutien motivant et sa contribution importante à l'accomplissement de ce projet de recherche ;

Je tiens à remercier tout particulièrement M. **Jean Paul Ambrosi**, chercheur au CEREGE, et M. **Bernard Angellitti**, ingénieur responsable de la plate-forme d'analyse chimique au Centre Européen de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement (CEREGE), pour le temps et l'attention qu'ils m'ont accordés lors de mes stages et pour m'avoir permis d'apprendre beaucoup de choses. **Laetitia LICARI**, Maître de Conférences au CEREGE, je la remercie énormément pour la carotte prélever en rade de Marseille. Pour l'aide apportée à l'analyse de la granulométrie des échantillons de sédiments pour cette étude, je voudrais également remercier Mme **Doriane Delanghe**, Responsable de la plateforme SEDIM au CEREGE, Aix-Marseille Université. Merci à **Sophie Delpoux**, ingénieure d'études au CNRS pour l'analyse du mercure dans les sédiments par DMA 80 'Plateforme AETE-ISO, OSU-OREME/Université de Montpellier'.

## LISTE DES ACRONYMES

|                  |                                                                                   |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>CEREGE</b>    | Centre Européen de Recherche et des Etudes en Géosciences de l'Environnement      |
| <b>CF</b>        | Facteur de Contamination                                                          |
| <b>CNRS</b>      | Centre National de la Recherche Scientifique                                      |
| <b>EcAp</b>      | Ecosystem Approach                                                                |
| <b>EF</b>        | Facteur d'Enrichissement                                                          |
| <b>ENAP</b>      | Entreprise NAtionale des Peintures                                                |
| <b>ENMTP</b>     | Entreprise Nationale des Matériels de Travaux Publics                             |
| <b>ENPC</b>      | Groupe Industriel des Plastiques & Caoutchoucs                                    |
| <b>ENSSMAL</b>   | Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral |
| <b>ÉRE</b>       | Évaluation des Risques Ecologique                                                 |
| <b>ERENAV</b>    | Entreprise de Réparation Navale                                                   |
| <b>Eri</b>       | Risque écologique monomial                                                        |
| <b>ERL</b>       | Intervalle "Effets faibles"                                                       |
| <b>ERM</b>       | Intervalle "Effets moyens"                                                        |
| <b>ETMM</b>      | Eléments en Traces Métalliques et Métalloïde                                      |
| <b>ETM</b>       | Eléments en Traces Métalliques                                                    |
| <b>ICP-AES</b>   | Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy                         |
| <b>ICP-MS</b>    | Inductively Coupled Plasma - Mass Spectroscopy                                    |
| <b>IR</b>        | Indice du risque écologique potentiel                                             |
| <b>MAP</b>       | Mediterranean Action Plan                                                         |
| <b>MATE</b>      | Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (Algérie)          |
| <b>MERMEX</b>    | Marine Ecosystems Response in the Mediterranean EXperiment.                       |
| <b>m-ERM-Q</b>   | Quotient ERM moyen                                                                |
| <b>MES</b>       | Matière En Suspension                                                             |
| <b>MISTRALS</b>  | Mediterranean Integrated STudies at Regional And Local Scales                     |
| <b>MO</b>        | Matière organique                                                                 |
| <b>Moy.</b>      | Moyenne                                                                           |
| <b>m-PEL-Q</b>   | Quotient PEL moyen                                                                |
| <b>MSFD</b>      | Marine Strategy Framework Directive                                               |
| <b>OMS</b>       | Organisation mondiale de la santé                                                 |
| <b>PAM</b>       | Plan d'action pour la Méditerranée                                                |
| <b>PEL</b>       | Niveau d'effet probable                                                           |
| <b>PLI</b>       | Indice de la charge polluante                                                     |
| <b>QGSs</b>      | Guidelines de la qualité des sédiments                                            |
| <b>S.D.</b>      | Standard Déviation                                                                |
| <b>SOACHLORE</b> | Société Algérienne du Chlore                                                      |
| <b>TEL</b>       | Niveau d'effet seuil                                                              |
| <b>TSS</b>       | Total Suspended Solids                                                            |
| <b>UNEP</b>      | United Nations Environment Program                                                |
| <b>WHO</b>       | World Health Organization                                                         |
| <b>ΣTU</b>       | Somme des unités toxiques                                                         |

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I.1 : La relation entre la concentration des matières en suspension et la fraction (en masse) des éléments transportés par la phase dissoute avec $K_d$ coefficient de partage ou de distribution d'après Baque (2006)..... | 29 |
| Figure I.2 : Relations entre un métal M et les constituants organiques et inorganiques de l'environnement aquatique (Buffle and Chalmers (1988). ....                                                                              | 31 |
| Figure II.1 : Situation géographique du Bassin Versant de l'oued El Harrach. ....                                                                                                                                                  | 36 |
| Figure II.2 : Répartition des zones industrielles au niveau du bassin versant de l'oued El Harrach (Louati, 2015). ....                                                                                                            | 38 |
| Figure II.3 : Situation géographique du bassin versant de l'oued Mazafran.....                                                                                                                                                     | 39 |
| Figure II.4 : Carte géologique (sur relief, données topographiques SRTM-3) du bassin de la Mitidja et ses environs (Guemache et al., 2010). ....                                                                                   | 40 |
| Figure II.5 : Occupation des sols de la zone algéroise (2001-2017) (Khelil, 2021). ....                                                                                                                                            | 41 |
| Figure II.6: Précipitation interannuelle dans le BV de l'oued El Harrach (station BARAKI-PONT).....                                                                                                                                | 43 |
| Figure II.7 : Précipitation interannuelle dans le BV de l'oued Mazafran (station FER A CHEVAL). ....                                                                                                                               | 43 |
| Figure II.8 : Corrélation entre les précipitations et le débit moyens mensuels dans les stations : (A) BARAKI- PONT ; (B) FER A CHEVAL. ....                                                                                       | 44 |
| Figure II.9 : Carte géologique du bassin versant du Rhône (Ollivier et al., 2011). ....                                                                                                                                            | 46 |
| Figure II.10 : Flux de pollution de l'agglomération marseillaise (Sauzade et al., 2009). ....                                                                                                                                      | 48 |
| Figure II.11 : Sites de prélèvement au niveau de l'oued El Harrach et l'oued Mazafran. ....                                                                                                                                        | 50 |
| Figure II.12 : Positionnement des stations de prélèvement du sédiment marin superficiel au niveau des deux baies (Alger et Bou-Ismaïl). ....                                                                                       | 50 |
| Figure II.13 : ICP-MS Quadripolaire Perkin Elmer NexIon 300X. ....                                                                                                                                                                 | 54 |
| Figure II.14 : ICP-AES Perkin elmer 4300 dv .....                                                                                                                                                                                  | 54 |
| Figure II.15 : Schéma type d'une ICP-MS. ....                                                                                                                                                                                      | 55 |
| Figure II.16 : Schéma de l'appareillage d'un spectromètre ICP-AES. ....                                                                                                                                                            | 56 |
| Figure II.17 : Minéralisation des échantillons par micro-onde. ....                                                                                                                                                                | 58 |
| Figure II.18 : Digestion des filtres sur la plaque chauffante. ....                                                                                                                                                                | 59 |
| Figure II.19 : Principe de fonctionnement de l'analyseur de mercure DMA 80.....                                                                                                                                                    | 60 |
| Figure II.20 : Diagramme triangulaire de classification des sédiments en fonction de leur texture.....                                                                                                                             | 61 |

|                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure III.1 : Paramètres environnementaux bimensuels enregistrés dans les eaux de l'oued El Harrach et l'oued Mazafran (août 2017-juillet 2018), a, température, b, pH, c, conductivité, d, particules en suspension (MES). .... | 74  |
| Figure III.2 Variation bimensuelle de la concentration des métaux traces dissous dans l'oued El Harrach .....                                                                                                                     | 77  |
| Figure III.3 : Variation bimensuelle de la concentration des métaux traces dissous dans l'oued Mazafran,.....                                                                                                                     | 78  |
| Figure III.4 : Variation bimensuelle des concentrations des métaux traces particulières dans l'oued El Harrach. ....                                                                                                              | 82  |
| Figure 5 : Variation bimensuelle des concentrations des métaux traces particulières dans l'oued Mazafran. ....                                                                                                                    | 83  |
| Figure III.6 : Comparaison des teneurs en métaux traces particulières ( $\mu\text{g/g}$ ) avec les valeurs ERL, ERM et TEL, PEL (MacDonald et al., 2000). ....                                                                    | 95  |
| Figure III.7 : Taux de contribution de chaque métal ( $\text{TU}_i / \Sigma \text{TU}_i$ ) (%) dans la somme des unités toxiques ( $\Sigma \text{TU}_i$ ). ....                                                                   | 96  |
| Figure III.8 : Variation du flux annuel total des EMT en tonne/ans dans l'oued El Harrach et Mazafran (flux du fer sont divisées par 100). ....                                                                                   | 97  |
| Figure III.9 : Granulométries des sédiments dans la baie d'Alger. ....                                                                                                                                                            | 101 |
| Figure III.10 : Granulométries des sédiments dans la baie de Bou-Ismaïl.....                                                                                                                                                      | 101 |
| Figure III.11 : Distribution spatiale du MO (%) au niveau de la baie d'Alger. ....                                                                                                                                                | 102 |
| Figure III.12 : Distribution spatiale du MO (%) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.....                                                                                                                                           | 102 |
| Figure III.13 : Distribution spatiale du manganèse ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.....                                                                                                                          | 105 |
| Figure III.14 : Distribution spatiale du manganèse ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl. ....                                                                                                                   | 106 |
| Figure III.15: Distribution spatiale du fer ( $\text{mg/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger. ....                                                                                                                                  | 107 |
| Figure III.16 : Distribution spatiale du fer ( $\text{mg/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.....                                                                                                                            | 107 |
| Figure III.17: Distribution spatiale du plomb ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger. ....                                                                                                                              | 108 |
| Figure III.18 : Distribution spatiale du plomb ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl... ..                                                                                                                       | 109 |
| Figure III.19: Distribution spatiale du vanadium ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.....                                                                                                                            | 110 |
| Figure III.20 : Distribution spatiale du vanadium ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl. ....                                                                                                                    | 110 |
| Figure III.21: Distribution spatiale du chrome ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.....                                                                                                                              | 111 |
| Figure III.22 : Distribution spatiale du chrome ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl. .                                                                                                                         | 111 |
| Figure III.23: Distribution spatiale du cobalt ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.....                                                                                                                              | 112 |

|                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure III.24 : Distribution spatiale du cobalt ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl. ...                                                          | 113 |
| Figure III.25: Distribution spatiale du nickel ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.....                                                                 | 114 |
| Figure III.26 : Distribution spatiale du nickel ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl. ...                                                          | 114 |
| Figure III.27: Distribution spatiale du cuivre ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.....                                                                 | 115 |
| Figure III.28 : Distribution spatiale du cuivre ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl. ...                                                          | 116 |
| Figure III.29: Distribution spatiale du zinc ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger. ....                                                                  | 117 |
| Figure III.30 : Distribution spatiale du zinc ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.....                                                            | 117 |
| Figure III.31: Distribution spatiale de l'arsenic ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger. ....                                                             | 118 |
| Figure III.32 : Distribution spatiale de l'arsenic ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.                                                           | 119 |
| Figure III.33: Distribution spatiale du cadmium ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau des baies d'Alger. ....                                                                | 120 |
| Figure III.34 : Distribution spatiale du cadmium ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.<br>.....                                                    | 120 |
| Figure III.35: Distribution spatiale du mercure ( $\text{ng/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.....                                                                  | 121 |
| Figure III.36 : Distribution spatiale du mercure ( $\text{ng/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.                                                               | 122 |
| Figure III.37 : Comparaison des teneurs en ETM avec ERL, ERM dans les deux baies (Long<br>et al., 1995). ....                                                        | 132 |
| Figure III.38 : Comparaison des teneurs en ETM avec TEL, PEL dans les deux baies<br>(Macdonald et al., 1996). ....                                                   | 133 |
| Figure III.39 : Valeurs de m- ERM-Q et m- PEL- Q dans la baie d'Alger.....                                                                                           | 133 |
| Figure III.40 : Valeurs de m- ERM-Q et m- PEL- Q dans la baie de Bou-Ismaïl. ....                                                                                    | 134 |
| Figure III.41 : Valeurs de la toxicité potentielle ( $\Sigma\text{TU}_i$ ) des sédiments de la baie d'Alger<br>(A01-A15) et de la baie de Bou-Ismaïl (B01-B20). .... | 134 |
| Figure III.42 : la contribution de chaque métal ( $\text{TU}_i / \Sigma\text{TU}_i$ ) (%) à la valeur de toxicité<br>potentielle ( $\Sigma\text{TU}_i$ ). ....       | 135 |
| Figure III.43 : Distribution verticale des ETM de la carotte d'Alger et Marseille.....                                                                               | 137 |
| Figure III.44 : Comparaison des teneurs en ETM avec ERL, ERM dans les deux carottes<br>d'Alger et de Marseille (Long et al., 1995). ....                             | 141 |
| Figure III.45 : Comparaison des teneurs en ETM avec TEL, PEL dans les deux carottes<br>d'Alger et de Marseille (Macdonald et al., 1996). ....                        | 141 |
| Figure III.46 : Valeurs moyennes de m- ERM-Q et m- PEL- Q dans les deux carottes. ....                                                                               | 141 |
| Figure III.47 : Pourcentage de contribution à la toxicité de différents métaux dans la carotte<br>d'Alger et de Marseille. ....                                      | 142 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau I.1 : Teneur moyenne en ETM dans les rivières en $\mu\text{g/L}$ et dans la croûte continentale supérieure (CCS) en $\mu\text{g g}^{-1}$ , à l'exception de Al et Fe en % (Gaillardet et al., 2003; Wedepohl, 1995). ..... | 32 |
| Tableau I.2 : Les phases porteuses de certains éléments traces métalliques dans les fractions sédimentaires (Eggleton and Thomas, 2004; Shaw et al., 1990; Wedepohl, 1995).....                                                    | 33 |
| Tableau II.1: Ensemble des zones industrielles et zones d'activités dans le bassin versant d'Oued El Harrach (Louati, 2015). .....                                                                                                 | 37 |
| Tableau II.2 : Les unités industrielles recensées par la Direction de l'Environnement (Moali et al., 2005).....                                                                                                                    | 37 |
| Tableau II.3 : Précipitation moyenne mensuelle en (mm) dans la station BARAKI-PONT et station FER A CHEVAL.....                                                                                                                    | 42 |
| Tableau II.4 : débit moyen mensuel en aval d'oued El Harrach et l'oued Mazafran.....                                                                                                                                               | 43 |
| Tableau II.5 : Intensité de la contamination métallique en fonction des valeurs de l'indice (Igeo), d'après Müller (1986).....                                                                                                     | 63 |
| Tableau II.6 : niveau d'enrichissement métallique en fonction des valeurs de l'indice (Igeo). .....                                                                                                                                | 63 |
| Tableau II.7 : Valeurs guides sédimentaires de type ERL et ERM, et de type TEL et PEL utilisés dans cette étude pour le système marin et le système eau douce. ....                                                                | 66 |
| Tableau III.1 : Paramètres environnementaux de l'eau des oueds El Harrach et Mazafran. ....                                                                                                                                        | 73 |
| Tableau III.2: Analyse des matériaux de référence certifiés : valeurs certifiées (Cert, Val,) et valeurs mesurées (Meas, Val,) (Moyenne $\pm$ s,d, $\mu\text{g/g}$ poids sec).....                                                 | 75 |
| Tableau III.3 : Valeurs bimensuelles de la concentration des métaux traces dissous dans l'oued El Harrach. ....                                                                                                                    | 79 |
| Tableau III.4 : Valeurs bimensuelles de la concentration des métaux traces dissous dans l'oued Mazafran. ....                                                                                                                      | 80 |
| Tableau III.5 : Valeurs bimensuelles de concentrations des métaux traces particulières dans l'oued El Harrach. ....                                                                                                                | 84 |
| Tableau III.6 : Valeurs bimensuelles des concentrations des métaux traces particulières dans l'oued Mazafran. ....                                                                                                                 | 85 |
| Tableau III.7 : Matrice de corrélation entre les paramètres environnementaux de l'eau, les métaux traces dissous ( $\mu\text{g/L}$ ) et les métaux traces particulières ( $\mu\text{g/g p,s}$ ) dans les deux oueds.....           | 87 |

|                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau III.8 : comparaison entre métaux traces particulières de la présente étude avec d'autres oueds et rivières du monde. ....                                                       | 90  |
| Tableau III.9 : comparaison entre métaux traces dissous de la présente étude avec d'autres oueds et rivières du monde. ....                                                             | 90  |
| Tableau III.10 : Valeurs de l'Indice de géoaccumulation (Igeo), Facteur d'enrichissement (FE) et Indice de la charge polluante (PLI) dans l'Oued El Harrach. ....                       | 92  |
| Tableau III.11 : Valeurs de l'Indice de géoaccumulation (Igeo), Facteur d'enrichissement (FE) et Indice de la charge polluante (PLI) dans l'Oued Mazafran. ....                         | 92  |
| Tableau III.12 : Valeurs des indices de risque écologique monomial (Er) et de risque écologique potentiel (RI) dans l'Oued El Harrach. ....                                             | 93  |
| Tableau III.13 : Valeurs des indices de risque écologique monomial (Er) et de risque écologique potentiel (RI) dans Oued Mazafran. ....                                                 | 94  |
| Tableau III.14 : Flux annuel des ETM en (tonne/an) dans l'oued El Harrach et l'oued Mazafran et comparaison avec d'autres oueds et rivières de la méditerranée. ....                    | 98  |
| Tableau III.15 : Matière organique et granulométrie au niveau de la baie d'Alger. ....                                                                                                  | 103 |
| Tableau III.16 : Matière organique et granulométrie au niveau de la baie de bou-Ismaïl. ....                                                                                            | 104 |
| Tableau III.17 : Concentration en métaux traces et de l'arsenic dans les sédiments superficiels au niveau de la baie d'Alger. ....                                                      | 124 |
| Tableau III.18 : Concentration en métaux traces et de l'arsenic dans les sédiments superficiels au niveau de la baie de Bou-Ismaïl. ....                                                | 125 |
| Tableau III.19: Corrélations entre la matière organique « MO », la granulométrie et la teneur en métaux traces et l'arsenic dans les sédiments des baies d'Alger et de Bou Ismaïl. .... | 126 |
| Tableau III.20: Les concentrations de métaux traces dans les sédiments ( $\mu\text{g/g ps}$ ) de la zone d'étude et différentes régions de la mer Méditerranée. ....                    | 127 |
| Tableau III.21: Valeurs de l'Indice de géoaccumulation (Igeo), du Facteur d'enrichissement (FE) et de l'Indice de la charge polluante (PLI) dans la baie d'Alger. ....                  | 130 |
| Tableau III.22: Valeurs de l'Indice de géoaccumulation (Igeo), du Facteur d'enrichissement (FE) et de l'Indice de la charge polluante (PLI) dans la baie de Bou-Ismaïl. ....            | 130 |
| Tableau III.23 : Les valeurs $\text{Er}^i$ selon l'intensité du risque écologique potentiel. ....                                                                                       | 130 |
| Tableau III.24 : Valeurs des indices de risque écologique monomial ( $\text{Er}^i$ ) et de risque écologique potentiel (RI) dans la baie d'Alger. ....                                  | 131 |
| Tableau III.25 : Valeurs des indices de risque écologique monomial ( $\text{Er}^i$ ) et de risque écologique potentiel (RI) dans la baie de Bou-Ismaïl. ....                            | 131 |

|                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau III.26 : Résultats en ETM dans les carottes sédimentaires (en $\mu\text{g/g}$ sauf le fer en $\text{mg/g}$ ). .....                                                           | 136 |
| Tableau III.27 : Valeurs de l'Indice de géoaccumulation (Igeo), du Facteur d'enrichissement (FE) et de l'Indice de la charge polluante (PLI) de la carotte de baie d'Alger. ....      | 139 |
| Tableau III.28 : Valeurs de l'Indice de géoaccumulation (Igeo), du Facteur d'enrichissement (FE) et de l'Indice de la charge polluante (PLI) de la carotte de baie de Marseille. .... | 139 |
| Tableau III.29 : Valeurs des indices de risque écologique monomial (Eri) et de risque écologique potentiel (RI) dans la carotte de baie d'Alger. ....                                 | 140 |
| Tableau III.30 : Valeurs des indices de risque écologique monomial (Eri) et de risque écologique potentiel (RI) dans la carotte de baie de Marseille. ....                            | 140 |
| Tableau 0.1 : Les valeurs du coefficient de distribution du $\log K_d$ dans l'oued El Harrach. .                                                                                      | 160 |
| Tableau 0.2 : Les valeurs du coefficient de distribution du $\log K_d$ dans l'oued Mazafran. ...                                                                                      | 161 |
| Tableau 0.3 : Les valeurs de l'indice de géo-accumulation (Igeo) dans l'oued El Harrach. .                                                                                            | 162 |
| Tableau 0.4 : Les valeurs de l'indice de géo-accumulation (Igeo) dans l'oued Mazafran. ....                                                                                           | 163 |
| Tableau 0.5 : Les valeurs facteur d'enrichissement (FE) dans l'oued El Harrach. ....                                                                                                  | 164 |
| Tableau 0.6 : Les valeurs facteur d'enrichissement (FE) dans l'oued Mazafran. ....                                                                                                    | 165 |
| Tableau 0.7 : Les valeurs de facteur de contamination (CF) et l'indice de charge polluante (PLI) dans l'oued El Harrach. ....                                                         | 166 |
| Tableau 0.8 : Les valeurs de facteur de contamination (CF) et l'indice de charge polluante (PLI) dans l'oued Mazafran. ....                                                           | 167 |
| Tableau 0.9 : Valeurs des indices de risque écologique monomial (Eri) et de risque écologique potentiel (RI) dans oued El Harrach. ....                                               | 168 |
| Tableau 0.10 : Valeurs des indices de risque écologique monomial (Eri) et de risque écologique potentiel (RI) dans oued Mazafran. ....                                                | 169 |
| Tableau 0.11 : Flux total mensuel en (kg/mois) des ETM dans l'oued El Harrach. ....                                                                                                   | 170 |
| Tableau 0.12 : Flux total mensuel en (kg/mois) des ETM dans l'oued Mazafran. ....                                                                                                     | 170 |
| Tableau 0.13 : Valeurs de Igeo dans la baie d'Alger. ....                                                                                                                             | 171 |
| Tableau 0.14 : Valeurs de Igeo dans la baie de Bou-Ismaïl. ....                                                                                                                       | 171 |
| Tableau 0.15 : Valeurs de FE dans la baie d'Alger. ....                                                                                                                               | 172 |
| Tableau 0.16 : Valeurs de FE dans la baie de Bou-Ismaïl. ....                                                                                                                         | 172 |
| Tableau 0.17 : Valeurs de CF et PLI dans la baie d'Alger. ....                                                                                                                        | 173 |
| Tableau 0.18 : Valeurs de CF et PLI dans la baie de Bou-Ismaïl. ....                                                                                                                  | 173 |
| Tableau 0.19 : Valeurs de Eri et RI dans la baie d'Alger. ....                                                                                                                        | 174 |
| Tableau 0.20 : Valeurs de Eri et RI dans la baie de Bou-Ismaïl. ....                                                                                                                  | 174 |

## **TABLE DES MATIERES**

**Remerciements**

**Liste des acronymes**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Table des matières**

**Résumé**

**Abstract**

**INTRODUCTION..... 18**

**I. Recherche bibliographique..... 23**

I.1 Origine et propriétés des éléments traces métalliques ..... 23

I.2 Spéciation et distribution des éléments traces métalliques (ETM) dans les systèmes aquatiques..... 28

I.3 Les ETMs dans les sédiments..... 31

**II. MATERIELS ET METHODES ..... 35**

II.1 Zone d'étude ..... 35

II.1.1 Bassin versant d'oued El Harrach ..... 35

II.1.2 Bassin versant de l'oued Mazafran ..... 39

II.1.3 Occupation des sols et densité de population ..... 40

II.1.4 Précipitation et débit (Oued El Harrach et oued Mazafran)..... 42

II.1.5 Le Rhône et son bassin versant ..... 44

II.2 Echantillonnage ..... 49

II.2.1 Stratégie d'échantillonnage ..... 49

II.2.2 Prélèvements d'eau dans l'oued El Harrach et Mazafran ..... 51

II.2.3 Prélèvements en mer ..... 51

II.2.4 Traitement des échantillons au laboratoire..... 52

II.3 Analyse des échantillons ..... 53

|             |                                                                                                      |           |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| II.3.1      | Analyse des éléments traces métalliques par ICP-MS et éléments majeurs par ICP-AES.....              | 53        |
| II.3.2      | Métaux traces et majeurs dans les sédiments marins .....                                             | 57        |
| II.3.3      | Métaux traces et majeurs particulaires (MES) .....                                                   | 58        |
| II.3.4      | Analyse du mercure total.....                                                                        | 59        |
| II.3.5      | Matière organique dans les sédiments marins.....                                                     | 60        |
| II.3.6      | Granulométrie laser .....                                                                            | 61        |
| II.4        | Évaluation de la contamination et des risques écologiques dans les sédiments marins et les MES ..... | 62        |
| II.4.1      | Indice de Géoaccumulation (Igeo) .....                                                               | 62        |
| II.4.2      | Facteur d'enrichissement.....                                                                        | 63        |
| II.4.3      | Indice de la charge polluante (PLI) .....                                                            | 64        |
| II.4.4      | Indice du risque écologique potentiel (IR).....                                                      | 64        |
| II.4.5      | Méthode des valeurs guides sédimentaires (QGSs) .....                                                | 64        |
| II.4.6      | Toxicité aiguë potentielle .....                                                                     | 66        |
| II.4.7      | Méthode de calcul des flux.....                                                                      | 66        |
| <b>III.</b> | <b>RESULTATS ET DISCUSSION .....</b>                                                                 | <b>70</b> |
| III.1       | Les oueds El Harrach et Mazafran.....                                                                | 70        |
| III.1.1     | Variation des paramètres environnementaux .....                                                      | 71        |
| III.1.2     | Variation des métaux traces dans les deux oueds (El Harrach et Mazafran) .....                       | 75        |
| III.1.3     | Analyses de corrélation .....                                                                        | 86        |
| III.1.4     | Fractionnement des ETM entre la phase dissoute et la phase particulaire ( $K_d$ ). .....             | 88        |
| III.1.5     | Comparaison globale.....                                                                             | 89        |
| III.1.6     | Evaluation de l'intensité de la contamination par les métaux traces particulaires                    | 91        |
| III.1.7     | Évaluation des risques écologiques liés aux métaux traces particulaires.....                         | 93        |
| III.1.8     | Flux des métaux traces .....                                                                         | 96        |
| III.2       | Sédiments de surface.....                                                                            | 99        |

|                                          |                                                                                                                       |            |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| III.2.1                                  | Granulométrie et matière organique au niveau des baies d'Alger et de Bou-Ismaïl                                       | 99         |
| III.2.2                                  | Variation spatiale des ETM au niveau des baies d'Alger et de Bou-Ismaïl.....                                          | 105        |
| III.2.3                                  | Corrélation entre les métaux traces, la granulométrie et la matière organique totale des sédiments superficiels ..... | 122        |
| III.2.4                                  | Évaluation de la contamination des sédiments marins par les ETM.....                                                  | 128        |
| III.2.5                                  | Évaluation des risques écologiques liés aux métaux traces .....                                                       | 130        |
| III.2.6                                  | Comparaison avec les Lignes directrices relatives à la qualité des sédiments SQGs (ERL-ERM et TEL-PEL). .....         | 132        |
| III.2.7                                  | Toxicité potentielle des sédiments .....                                                                              | 134        |
| III.3                                    | Sédiments profonds.....                                                                                               | 135        |
| III.3.1                                  | Variation verticale en ETM dans les carottes.....                                                                     | 135        |
| III.3.2                                  | Évaluation de l'impact anthropique .....                                                                              | 138        |
| III.3.3                                  | Évaluation des risques écologiques liés aux métaux traces .....                                                       | 139        |
| III.3.4                                  | Comparaison avec les Lignes directrices relatives à la qualité des sédiments SQGs (ERL-ERM et TEL-PEL). .....         | 140        |
| <b>CONCLUSION.....</b>                   |                                                                                                                       | <b>145</b> |
| <b>Références bibliographiques .....</b> |                                                                                                                       | <b>148</b> |
| <b>Annexe .....</b>                      |                                                                                                                       | <b>160</b> |

## RESUME

L'essentiel des apports de métaux traces en Méditerranée proviennent des rivières et des grands centres urbains, portuaires et industriels. Malgré de nombreux efforts, ces apports perdurent tout en se modifiant avec les changements globaux : évolution des débits des rivières, métaux émergents, nouvelles formes chimiques. Ces apports et le risque qu'ils constituent pour les écosystèmes côtiers ont été étudiés sur les côtes françaises, mais, pour la rive sud de la méditerranée, il n'y a que très peu d'informations pour l'instant. Notre étude s'attache à définir dans la région côtière d'Alger les flux et la spéciation des métaux traces issus des oueds El Harrach et Mazafran, l'état actuel et l'historique de la contamination des sédiments marins.

Un suivi temporel dans les eaux des oueds El Harrach et Mazafran a été réalisé durant vingt-quatre (24) campagnes de prélèvement entre Août 2017 et Juillet 2018, avec une fréquence d'un prélèvement bimensuel. En parallèle, une trentaine de stations ont été fait l'objet de prélèvement de sédiment superficiel en face l'embouchure des oueds. En plus, deux carottes sédimentaires ont été prélevé dans les baies d'Alger et de Marseille. Le dosage des métaux traces dans les échantillons d'eau et de sédiment a été effectué par ICP-MS. Ainsi, le taux de la matière organique et la granulométrie dans les échantillons de sédiment ont été déterminés. L'estimation des flux en ETM a été réalisé, ainsi que l'évaluation de risque de MES et des sédiments a été effectuée par l'application d'une approche écotoxicologique, basée sur le calcul de multiples indices.

Les résultats de cette étude indiquent que tous les métaux particuliers analysés dans les oueds proviennent de sources anthropogéniques ( $EF > 1,5$ ), avec une contamination plus élevée de Pb, Cd, Zn et Ni dissous et un léger degré de contamination de Cu et Zn particuliers ( $0 < I_{geo} < 1$ ). Un effet toxique significatif ( $\Sigma TU_i > 4$ ) des métaux particuliers combinés (Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, Ni et As) est observé dans les deux oueds. Les résultats de la présente étude ont montré également que les sédiments superficiels présentent un risque écologique faible pour les espèces vivantes. L'arsenic et le mercure sont les seuls métaux qui peuvent avoir un risque écologique potentiel. Ainsi, sauf l'arsenic, les autres métaux ont enregistré des concentrations élevées dans la baie d'Alger qu'en baie de Bou-Ismaïl. La valeur moyenne de l'RI des onze métaux traces dans la baie d'Alger montre à quel point le risque global est sévère ( $RI = 306$ ).

**Mot-clés :** métaux traces, apports continentaux, contamination, sédiment marin, écosystème côtier.

## ABSTRACT

Most trace metal inputs to the Mediterranean come from rivers and major urban, port and industrial centres. Despite numerous efforts, these inputs are continuing, while at the same time changing with global changes: changes in river flows, emerging metals, new chemical forms. These inputs and the risk they pose to coastal ecosystems have been studied on the French coast, but for the southern shore of the Mediterranean there is currently very little information available. Our study aims to define the flows and speciation of trace metals from the El Harrach and Mazafran wadis in the coastal region of Algiers, as well as the current state and history of marine sediment contamination.

Temporal monitoring of the waters of the El Harrach and Mazafran wadis was carried out during twenty-four (24) sampling campaigns between August 2017 and July 2018, with a frequency of bi-monthly sampling. At the same time, around thirty stations were sampled for surface sediment opposite the mouths of the wadis. In addition, two sediment cores were taken in the bays of Algiers and Marseille. Trace metals were measured in the water and sediment samples using ICP-MS. The organic matter content and granulometry of the sediment samples were also determined. TME fluxes were estimated, and the risk assessment of TSS and sediments was carried out using an ecotoxicological approach based on the calculation of multiple indices.

The results of this study indicate that all the particulate metals analysed in the wadis come from anthropogenic sources ( $EF > 1.5$ ), with higher contamination of dissolved Pb, Cd, Zn and Ni and a slight degree of contamination of particulate Cu and Zn ( $0 < I_{geo} < 1$ ). A significant toxic effect ( $\Sigma TU_i > 4$ ) of the combined particulate metals (Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, Ni and As) is observed in both wadis. The results of this study also showed that surface sediments present a low ecological risk for living species. Arsenic and mercury are the only metals with a potential ecological risk. With the exception of arsenic, the other metals recorded higher concentrations in Algiers Bay than in Bou-Ismaïl Bay. The mean RI value for the eleven trace metals in Algiers Bay shows a severe ecological risk ( $RI = 306$ ).

**Key words:** trace metals, continental inputs, contamination, marine sediment, coastal ecosystem.

## ملخص

تأتي معظم مدخلات المعادن الثقيلة إلى البحر الأبيض المتوسط من الأنهار والمراكز الحضرية والموانئ والمراكز الصناعية الكبرى. وعلى الرغم من الجهود العديدة المبذولة، فإن هذه المدخلات مستمرة، وفي الوقت نفسه تتغير مع التغيرات العالمية: التغيرات في تدفقات الأنهار، والمعادن الناشئة، والأشكال الكيميائية الجديدة. وقد تمت دراسة هذه المدخلات والمخاطر التي تشكلها على النظم الإيكولوجية الساحلية على الساحل الفرنسي، ولكن بالنسبة للساحل الجنوبي للبحر الأبيض المتوسط، لا يتوفر حاليًا سوى القليل جدًا من المعلومات المتاحة. تهدف دراستنا إلى تحديد تدفقات وأنواع المعادن الثقيلة من وادي الحراش ومازفران في المنطقة الساحلية للجزائر العاصمة، بالإضافة إلى الحالة الراهنة وتاريخ تلوث الرواسب البحرية.

تم إجراء الرصد الزمني لمياه وادي الحراش ومزفران خلال أربع وعشرين (24) حملة لأخذ العينات بين أوت 2017 وجويلية 2018، بتواتر أخذ عينات مرتين كل شهر. في الوقت نفسه، تم أخذ عينات من حوالي ثلاثين محطة للرواسب السطحية المقابلة لمصب الوديان. بالإضافة إلى ذلك، تم أخذ عينتين من الرواسب في خلجان الجزائر العاصمة ومرسيليا. تحليل المعادن الثقيلة في هذه العينات تم عن طريق تقنية المطياف الكتلية البلازمية المقرونة بالحث. كما تم قياس نسبة كل من المادة العضوية والجزيئات الدقيقة في العينات الرسوبية. وفُدرت تدفقات المعادن في المياه والرواسب، وتم إجراء تقييم لمخاطر المواد العضوية والرواسب باستخدام نهج السمية الإيكولوجية القائم على حساب مؤشرات متعددة.

تشير نتائج هذه الدراسة إلى أن جميع المعادن الثقيلة التي تم تحليلها في الوديان تأتي من مصادر بشرية المنشأ ( $EF > 1.5$ )، مع تلوث أعلى للرصاص المذاب، الكاديوم، الزنك والنيكل، مع درجة تلوث طفيفة النحاس والزنك في المواد العالقة ( $I_{geo} < 1$ ). لوحظ وجود تأثير سمي كبير ( $\Sigma TU_i > 4$ ) للمعادن الثقيلة مجتمعة (الرصاص والكاديوم والنحاس والزنك والكروم والنيكل والزرنيخ) في كلا الوديان. أظهرت نتائج هذه الدراسة أيضًا أن الرواسب السطحية تمثل خطرًا بيئيًا منخفضًا على الأنواع الحية. الزرنيخ والزرنيق هما المعدنان الوحيدان اللذان ينطويان على مخاطر بيئية محتملة. فباستثناء الزرنيخ، سجلت المعادن الأخرى تركيزات أعلى في خليج الجزائر منها في خليج بواسماعيل. يُظهر متوسط قيمة RI للمعادن الثقيلة الأحد عشر في خليج الجزائر مخاطر بيئية شديدة ( $RI = 306$ ).

**الكلمات الأساسية :** المعادن النزرة، المدخلات القارية، التلوث، الرواسب البحرية، النظام البيئي الساحلي.

# INTRODUCTION

## INTRODUCTION

La Méditerranée est un hot spot de biodiversité qui ne représente que 0,8% des océans mais abrite 4 à 18% de la diversité marine mondiale (Bianchi and Morri, 2000; Tuel and Eltahir, 2020; UNEP-MAP-RAC, 2008). Cependant, cette mer est aussi considérée depuis longtemps comme une des plus polluées au monde (Hinrichsen, 1990) où 33 points hot spot sont enregistrés (UNEP, 2012). Les importantes activités humaines des 21 pays qui la bordent (urbanisation, tourisme, agriculture, industrie, transport maritime aquaculture) y induisent des apports significatifs de polluants par les fleuves et rivières, mais aussi par les effluents directs, les eaux souterraines, les dépôts atmosphériques et les activités maritimes ou encore le lessivage des zones littorales par les pluies. Les éléments traces métalliques (ETM) ont une place particulièrement importante dans le grand nombre de polluants organiques et inorganiques déjà observé en Méditerranée, car ils comptent parmi les plus souvent détectés, à cause de leur utilisation sur l'ensemble du pourtour méditerranéen et de l'historique de leur extraction et traitement qui remontent aux premières civilisations.

La toxicité de certains de ces ETM pour les écosystèmes marins est connue depuis plusieurs années, et le fait est que le Méditerranée a déjà fait l'objet de mesures/lois/initiatives environnementales pour restreindre leurs apports. Le Plan d'action pour la Méditerranée (PAM) signé en 1975 et la Convention de Barcelona (1976) faisait référence à ceci, et l'initiative Horizon 2020 (H2020) a récemment encore souligné le besoin de réduction de ces apports. La Méditerranée est aussi soumise à plusieurs législations européennes prenant en compte la pollution, telle que la Directive Cadre pour la Stratégie Marine (MSFD; 2008/56/EC). Enfin, l'Initiative pour l'Approche Écosystémique (EcAP) qui cherche à développer l'approche écosystémique pour définir le bon état environnemental de cette mer, souligne-t-elle aussi le besoin toujours d'actualité de connaissance de ces polluants et de leur niveau.

Pourtant, en dépit de ces préoccupations et de demandes sociétales de plus en plus fortes pour un environnement sain, l'UNEP notait récemment qu'il y existe toujours un manque flagrant de connaissances sur l'impact des polluants, dont les métaux, sur les écosystèmes marins méditerranéens (UNEP/MAP 2012). Une des principales raisons avancées est celle d'une distribution spatiale des études très hétérogènes : très peu de travaux ont été publiés sur la rive sud de la Méditerranée, et encore moins sur une des sources polluantes en très fort développement ces dernières années : les métropoles côtières.

L'objectif de la thèse est de réaliser un état des lieux de la contamination actuelle et passée par les éléments traces métalliques des écosystèmes côtiers de deux grandes zones urbanisées que sont les baies de Marseille et d'Alger. L'environnement côtier de ces mégacités est devenu un enjeu majeur du littoral méditerranéen, confrontant une pression anthropique alimentant de nombreux rejets de polluants avec une demande accrue de la société pour le maintien d'un environnement de qualité. Si le premier volet (2010-2016) du programme Mermex-Mistrals a permis de mieux comprendre comment se font les apports de métaux dans des systèmes tels que la zone de Marseille et la baie de Toulon, il n'existe que très peu d'informations pour d'autres sites majeurs de Méditerranée. Il s'agira plus particulièrement de :

- 1) Préciser l'état de la contamination présente et passée des sédiments de la côte Algéroise et Marseillaise par les métaux traces ;
- 2) Évaluer pour la zone algéroise les flux de métaux apportés par les principaux intrants que sont les oueds ;
- 3) Prendre en compte la variabilité quantitative et qualitative (différents métaux, différentes spéciations, différentes matrices porteuses) de ces apports pour une bonne compréhension de leur devenir ;

Les zones d'études sélectionnées sont la Baie de Marseille et le grand Alger et son voisinage immédiat (la baie de Bou-Ismaïl et la baie d'Alger). Il s'agit de la zone pilote sélectionnée pour la mise en œuvre des actions du programme MERMEX/Algérie où des travaux d'observation sont en cours depuis 2012. Les résultats seront comparés sur Marseille avec les données acquises grâce au métaprogramme international Mermex- Chantier Mistrals (Mediterranean Integrated Studies at regional and Local Scales), dans lequel ces objectifs sont développés au sein de l'axe « Marine ecosystem responds to the inputs of contaminants in the coastal zones-MERITE ».

La stratégie de travail s'appuie sur un inventaire des données historiques acquises dans la zone et surtout sur de nouveaux suivis acquissent durant cette thèse. Il faut noter qu'un grand nombre de métaux traces sont analysés afin de cerner les métaux « classiques » (Zn, Pb, Cd, Ni, Cu, Cr, As, Hg). Ces analyses sont conduites au CEREGE sur une ICP-MS.

Deux grands axes d'études sont développés :

1. **Etude des flux des métaux traces par les oueds** : plusieurs oueds se déversent dans les trois baies de la zone d'étude. Deux d'entre eux, soumis à différentes pressions

anthropiques, sont suivis sur un cycle hydrologique annuel. L'oued El Harrach à proximité d'Alger centre traverse l'une des agglomérations d'Alger les plus dense ainsi que la zone industrielle la plus importante d'Alger et de l'Algérie, il s'agit d'un oued fortement contaminé (Yoshida et al., 2005). Le deuxième oued, soumis à une pression anthropique faible à modérée, c'est l'oued Mazafran à l'ouest d'Alger. Ces deux oueds ont fait l'objet d'un suivi pendant un cycle annuel sur la base d'un prélèvement bimensuelle (la fréquence est adaptée à la crue). Les prélèvements permettront de mesurer les paramètres environnementaux, la teneur en matière en suspension, les métaux traces en phases dissoutes et particulaires. Ces données constituent une des toutes premières évaluations de ces apports à l'échelle de l'Algérie.

2. **L'étude de l'historique de la contamination des sédiments marins :** des carottes sédimentaires sont aussi prélevées dans des zones de sédimentation (embouchure d'oued) pour reconstituer l'accumulation des métaux et l'historique de la contamination au cours du dernier siècle. Quelques travaux ont déjà été faits sur cette question. Matmed (2002) a montré que les sédiments profonds (440 et 960 m) sont exempts de toute contamination, mais des carottes à plus faible profondeur en face de l'embouchure de l'oued El Harrach montrent des contaminations en Cr, Zn et Cu (Boulahdid et al., 2013). Inal (2011) a aussi retrouvé des contaminations assez significatives dans les sédiments de l'embouchure de l'oued Mazafran. Enfin, deux carottes prélevées dans la baie ont été récemment analysées grâce à un programme d'échange CNRS-DPRGF entre le CEREGE et l'ENSSMAL. Malheureusement, elles ont révélé un niveau de surface très perturbé et ne peuvent donc pas être utilisées pour une reconstitution correcte.

Des carottages sont aussi réalisés dans la Baie de Marseille pour reconstituer ce même type de chroniques, et pouvoir si possible comparer les tendances historiques et récentes.

En parallèle, des prélèvements de sédiment superficiel sont réalisés pour définir la dispersion en surface de la contamination récente, et ce sur une zone couvrant la totalité de la zone d'étude. Cette contamination du sédiment superficiel reste en effet mal documentée. Rouibah et al. (2005) ont trouvé des concentrations élevées en plomb (jusqu'à 245 µg/g au port d'Alger et 50 µg/g à l'embouchure de l'oued El Harrach) et d'autres teneurs fortes ont aussi été observées pour le cuivre (Boudjellal et al. 1992), le mercure (Atroune and Boutaleb, 2012; Bachouche et al., 2017; Yoshida et al., 2007; Yoshida et al., 2005), le cadmium (Alomary and Belhadj, 2007), et enfin Cu, Pb et Zn (Ghiboub, 2015).

Malheureusement les données concernent très peu de métaux et les sites de prélèvements sont trop différenciés pour se faire une bonne idée de la répartition spatiale des zones.

Le présent travail est organisé en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, des rappels sur l'origine et les propriétés des éléments trace métallique, leurs distribution et spéciation et leurs comportements dans le sédiment.
- Le deuxième chapitre, décrit le milieu d'étude et ses caractéristiques naturels et anthropiques, le matériel utilisé pour les prélèvements des échantillons ainsi que les méthodologies appliquées sur terrain et au laboratoire pour la mesure des paramètres physicochimiques et l'analyse des ETM.
- Le troisième chapitre est consacré au traitement des données acquises dans les oueds (El Harrach et Mazafran), les sédiments superficiels et profonds, à leur analyse, discussion et un essai d'interprétation. Ce traitement et cette analyse sont basés sur le calcul des indices de contamination et de toxicité.

Enfin, une conclusion générale clôture ce travail.

# CHAPITRE I :

## RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

## I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

### I.1 Origine et propriétés des éléments traces métalliques

Les métaux traces se distinguent par leur faible abondance dans la croûte terrestre. L'expression 'éléments traces', ou 'éléments traces métalliques et métalloïdes' est préférée à celle de "métaux lourds" qui dérive d'une définition ancienne et obsolète liée à la densité volumique des éléments. Dans l'environnement, ces éléments sont persistants et non dégradables. Certains métaux traces sont des oligo-éléments qui sont indispensables à l'activité biologique et à la croissance cellulaire mais sont dangereux lorsqu'ils sont présents à des concentrations supérieures à un certain seuil (Rigaud, 2011). D'autres, en revanche, sont nocifs même à faible dose, et n'ont aucun effet bénéfique (Lesven et al., 2008). Ainsi, même à de faibles teneurs, le Cadmium, le Plomb et le mercure présentent un risque potentiel de toxicité dans l'écosystème naturel. (Lesven et al., 2008; Tessier et al., 2011). Le Cu et le Zn constituent une menace sérieuse lorsqu'ils sont présents en fortes concentrations, en raison de leur nature toxique, de leur persistance et de leur capacité à s'accumuler dans le chaîne trophique (Rigaud, 2011). Ces éléments sont naturellement présents à l'état de traces dans la croûte terrestre (< 100 ppm). Ils existent sous diverses formes chimiques, notamment les oxydes, les carbonates, les silicates et les sulfates. Ils peuvent ponctuellement être rencontrés en concentrations extrêmement élevées. Les éléments traces métalliques et métalloïdes (ETMM) peuvent être rejetés dans les environnements aquatiques et atmosphériques par une série de mécanismes naturels, tels que l'érosion et l'altération des roches, les émissions volcaniques, les incendies de forêt, les sources biogènes (Charriau, 2009; Sigg et al., 2001). En outre, les activités anthropiques contribuent également à l'émission d'ETM.

L'exploitation minière et la métallurgie, qui comprennent l'extraction et le traitement des métaux font partie de ces sources, tout comme les insecticides et les engrais utilisés dans l'agriculture, les centrales électriques et la fabrication de batteries, quelques processus industriels (tels que les tanneries, les papeteries, les cimenteries, ...), et les rejets d'eaux usées non traitées (Mason, 2013; Miller and Orbock Miller, 2007; Qian et al., 2018). Les ETM peuvent provenir de sources diffuses ou ponctuelles et peuvent exister dans l'environnement sous forme particulaire, volatile, dissoute ou solides (Bradl, 2005). Les principales sources d'ETM dans l'eau douce (rivières et lacs) sont les dépôts atmosphériques, les activités anthropiques ponctuelles (telles que le rejet d'effluents industriels non traités ou d'eaux usées) et le lessivage des sols. Plusieurs sources anthropiques sont présentes dans les eaux marines, en particulier dans les zones côtières. Ces sources peuvent être classées en deux catégories : les

sources focales, telles que les activités portuaires, le trafic maritime et l'aquaculture, et les sources diffuses, qui comprennent les apports des rivières, le ruissellement et les dépôts atmosphériques (Mason, 2013; Oursel et al., 2013).

**Le cadmium :** est classé comme un élément métallique très rare. Il présente une concentration d'environ 0,15 à 0,20  $\mu\text{g g}^{-1}$  dans la croûte terrestre (Adriano, 2001). Il s'agit de l'un des métaux polluants les plus dangereux résultant principalement des activités humaines. Le cadmium trouve des applications dans plusieurs industries, telles que la fabrication de batteries Cd-Ni, le cadmiage pour la protection anticorrosion de l'acier, et son utilisation comme stabilisateur pour les plastiques et les pigments. Les émissions de Cd dans l'environnement sont également dues à la production et l'application d'engrais phosphatés naturellement pollués ainsi que la combustion de produits pétroliers. À un  $\text{pH} < 8$ , le Cd dissous se trouve dans l'eau douce sous forme de  $\text{Cd}^{2+}$ , qui est le plus souvent complexé par des composés humiques (Karlsson et al., 2005). Même à de très faibles concentrations, il précipite avec les ions  $\text{S}^{2-}$  dans des conditions anoxiques. Avec un rayon ionique similaire à celui du  $\text{Ca}^{2+}$ , Il entre en compétition avec les ions calcium pour l'occupation des sites de fixation situés dans les branchies des poissons et des mollusques. La présence de ce métal peut provoquer diverses perturbations physiologiques et enzymatiques chez les poissons ainsi qu'une inhibition de la croissance du phytoplancton (Chowdhury et al., 2005; Sunda, 1989). En cas de déficit de Zinc, le phytoplancton peut utiliser le Cd comme substitut (Price and Morel, 1990). L'exposition au cadmium à des niveaux supérieurs au  $\mu\text{g L}^{-1}$  peut entraîner des dysfonctionnements urologiques (Chiffolleau et al., 2001). Rappelons ici la maladie itai-itai, qui présente des symptômes tels que fragilité des os, gêne articulaire, faible taux de globules rouges et maladie rénale, a été provoquée par la contamination de la rivière Jintsu par du cadmium lors de l'exploitation de mines de zinc au Japon (Baque, 2006).

**Le cuivre :** métal que l'on trouve en concentrations relativement élevées dans la croûte terrestre allant de 45 à 70  $\mu\text{g g}^{-1}$ . On le trouve généralement sous forme de sulfures (la bornite :  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ , la Covellite :  $\text{CuS}$ , la chalcopryrite :  $\text{CuFeS}_2$ , la chalcosine :  $\text{Cu}_2\text{S}$ ), de sulfo-sel (l'Enargite :  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) ou encore d'oxyde (Cuprite :  $\text{Cu}_2\text{O}$ ) (Alloway, 2013). Le cuivre est largement utilisé dans divers processus industriels en raison de sa ductilité, sa résistance à la corrosion, ainsi que ses capacités antibactériennes et antifongiques. Les principales sources de cuivre dans l'environnement qui sont causées par les activités humaines comprennent la combustion de combustibles fossiles et de dérivés du pétrole, tels que les carburants, l'incinération des ordures ménagères et l'utilisation de revêtements antisalissures (oxyde de cuivre, composés organiques,

Cu<sub>0</sub>), ainsi que les industries métallurgique et électrique. Les teneurs en cuivre dans les eaux continentales varient en moyenne de 3 à 5 g L<sup>-1</sup> (Flemming and Trevors, 1989). Comme il interagit pour générer du cuivre métallique et des ions Cu(II), il est principalement présent sous la forme divalente Cu(II), tandis que la forme monovalente Cu(I) n'est présente qu'en très faibles quantités puisqu'elle interagit pour générer du cuivre métallique et les ions Cu(II) (Alloway, 2013). À l'état complexé, le cuivre est lié à des ligands organiques et inorganiques, notamment des acides phénoliques, des polysaccharides, des peptides, des acides humiques et fulviques, des protéines, ainsi que des OH<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub>/CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. La stabilité du cuivre complexé organiquement est très élevée. Dans les d'eau douce et marins, il a été observé qu'une proportion significative, à savoir pas moins de 95 %, du cuivre est liée à la matière organique par complexation. La biodisponibilité et la toxicité du Cu sont fortement influencées par son degré de complexation avec des ligands organiques (Bruland et al., 2014).

Tous les organismes ont besoin de cuivre en petites quantités, mais il est toxique à forte teneurs. La principale source de toxicité du cuivre provient de ses interactions avec de nombreux composants cellulaires, notamment les enzymes, les protéines, les métabolites, les acides nucléiques, etc (Flemming and Trevors, 1989). Les hydroxy-complexes de cuivre, en particulier (Cu(OH)<sup>+</sup>) et Cu(OH)<sub>2</sub>(aq), ainsi que la forme de cuivre non liée Cu<sup>2+</sup>, sont considérés comme les plus toxiques et sont rapidement absorbés par les êtres vivants.

En revanche, la biodisponibilité du cuivre est considérablement réduite lorsqu'il forme des complexes avec des carbonates (tels que CuHCO<sub>3</sub><sup>+</sup>, CuCO<sub>3</sub> et Cu(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>2-</sup>), des chlorures (CuCl<sub>n</sub><sup>2n</sup>) ou de la matière organique (Brooks et al., 2008; He et al., 2001; Huang and Wang, 2003).

**Le plomb :** Les sources naturelles de plomb comprennent la cérusite (PbCO<sub>3</sub>), l'anglésite (PbSO<sub>4</sub>) et la galène (PbS). La galène est le principal réservoir de plomb, constituant environ 86,6 % de son poids total, on le trouve fréquemment en association avec d'autres minéraux (tels que Zn, Ag et Cu) (Alloway, 2013). La fabrication de batteries automobiles, les revêtements de câbles, l'alliages, et d'autres activités industrielles nécessite toujours du plomb. Bien qu'il y ait eu une baisse des émissions de plomb provenant des carburants depuis la mise en œuvre de l'obligation d'utiliser de l'essence sans plomb avec une limite de 0,013 g L<sup>-1</sup> à partir de l'année 2000, il convient de noter que l'Algérie n'a mis en œuvre cette règle que récemment, en juillet 2021. Le plomb présente une grande affinité pour plusieurs éléments sédimentaires dans les systèmes aquatiques, notamment les oxyhydroxydes de Fe et de Mn, les argiles, la matière

organique et les sulfures. Lorsque le milieu est pauvre en oxyhydroxydes de fer ou de manganèse et en matières organiques, il peut également former des associations avec les carbonates (Li et al., 2001; Shafer et al., 1997). Il est présent en concentrations relativement faibles dans les eaux non contaminées, dépassant rarement quelques  $\text{g l}^{-1}$ . Pour les eaux superficielles destinées à la production d'eau potable, l'OMS fixe un niveau de concentration guide de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  (WHO, 2004). La toxicité du plomb est à l'origine du saturnisme, une maladie caractérisée par une anémie, des troubles et des lésions du système nerveux. En outre, une exposition persistante au plomb peut entraîner la stérilité, des problèmes pendant la grossesse et des problèmes de développement chez les enfants (Merzouki et al., 2022).

**Le chrome :** Avec une teneur moyenne de l'ordre de  $100 \mu\text{g g}^{-1}$ , il est le 21<sup>e</sup> élément le plus abondant dans l'écorce terrestre (Barnhart, 1997). On le trouve dans de nombreux minerais, dont la chromite ( $\text{FeOCr}_2\text{O}_3$ ) est le minerai le plus important. Le Cr peut exister dans une large gamme d'états d'oxydation, de -2 à +6, mais seuls les complexes trivalents ( $\text{Cr}^{3+}$ ) ou hexavalents ( $\text{Cr}^{6+}$ ) sont suffisamment stables pour être présents en quantités significatives dans l'environnement naturel. Le chrome se trouve principalement dans les roches sous forme d'oxyde chromique trivalent ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), contrairement au chrome hexavalent, qui est rare dans la nature et provient principalement de processus industriels. Les industries métallurgiques, réfractaires et chimiques (chromage, tannage et production de pigments) sont les principaux émetteurs. Par exemple, les tanneries et les teintureries produisent parfois des effluents contenant de nombreux  $\text{g.L}^{-1}$  de chrome (Jaworski, 1980).

Dans les milieux aquatiques, le chrome trivalent peut exister en solution sous diverses formes. Ces formes comprennent le  $\text{Cr}^{3+}$  et  $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$  dans des conditions acides, et le  $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Cr}(\text{OH})_3(\text{aq})$  et  $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$  dans des conditions neutres et alcalines. Il n'est que faiblement soluble, formant des composés stables avec des substrats organiques ou inorganiques ou précipitant sous forme d'hydroxyde. En revanche, la forme hexavalente, très soluble dans l'eau, se présente généralement sous la forme des oxyanions  $\text{CrO}_4^{2-}$  et  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ . Le potentiel d'oxydoréduction, le pH et la disponibilité de ligands dans l'environnement influencent la présence de chrome (III) ou de chrome (VI). Seuls les milieux réducteurs ou extrêmement acides contiennent du Cr(III), tandis que les milieux oxydants et basiques ( $\text{pH} > 6-7$ ) exigent que le Cr(III) s'oxyde presque complètement en Cr(VI) (Ball and Izbicki, 2004; Johnson, 1990). La concentration totale de Cr et son degré d'oxydation déterminent sa toxicité. Contrairement aux composés hexavalents, plus nocif en raison de leur potentiel d'oxydation élevé et de leur facilité à traverser les membranes cellulaires (Gómez and Callao, 2006), le chrome (III) est un

oligo-élément vital impliqué dans le métabolisme du glucose, du cholestérol et des lipides chez les mammifères (Anderson, 1989). L'intoxication au chrome peut se produire par ingestion (les symptômes comprennent des nausées, des vomissements et une diarrhée hémorragique), par contact avec la peau (allergies) ou par inhalation.

**Le zinc :** est un élément assez abondant dans la croûte terrestre, dont la concentration moyenne est de 70-132  $\mu\text{g g}^{-1}$  dans les schistes, les dépôts argileux et les roches magmatiques (Baize, 1997). La sphalérite ( $\text{ZnS}$  (sulfure de zinc)) est la forme minérale la plus répandue du zinc, que l'on trouve très souvent associée aux sulfures d'autres éléments métalliques comme le cuivre, le cadmium, le fer, le plomb et l'étain. Dans les sédiments carbonatés, le zinc apparaît sous forme de smithsonite ( $\text{ZnCO}_3$ ). L'exploitation minière et les activités industrielles (telles que le traitement du minerai, le raffinage, la galvanisation, les pigments, la protection contre la corrosion et la peinture antirouille), la combustion de combustibles fossiles et l'épandage agricole sont les principales sources anthropiques de zinc. Le zinc peut se trouver dans l'eau sous trois formes : composés ionique, complexé avec des acides fulviques et humiques (ligands organiques), ou lié à des colloïdes inorganiques. Les teneurs en zinc sous forme cationique ( $\text{Zn}^{2+}$ ) sont plus élevées dans les eaux dont le pH est inférieur à 8, mais l'espèce neutre  $\text{ZnCO}_3$  prédomine dans les eaux dont le pH est supérieur à 8 (Stumm and Morgan, 2012). Dans les eaux à pH acide, le zinc forme également des complexes avec les sulfates et, dans les milieux extrêmement acides, peut précipiter sous forme de sels de sulfate extrêmes (Swedlund and Webster, 2001).

Le zinc est un oligo-élément nécessaire mais toxique à fortes teneurs. La phytotoxicité a été constatée dans des sols contaminés par le zinc (Chaney, 1993). Des doses de 2 à 8 mg.  $\text{Zinc. kg}^{-1} \text{ j}^{-1}$  provoquent chez l'homme des troubles gastro-intestinaux qui peuvent avoir des répercussions graves en cas d'ingestion des niveaux importante et prolongée de zinc (anémie, lésions pancréatiques, diminution du taux de lipoprotéines de haute densité (HDL).

**Le nickel :** Avec une teneur moyenne de l'ordre de 75  $\mu\text{g g}^{-1}$ , c'est le 24<sup>e</sup> élément le plus répandu dans la croûte terrestre (Alloway, 2013). La pentlandite, la pyrrhotite, la pyrite et la chalcopirite sont des exemples de minerais sulfurés qui sont exploités sous terre et représentent 65 % de la production mondiale de nickel. Les minéraux silicatés sont souvent exploités en surface. Les phénomènes naturels tels que le volcanisme et les incendies de forêt, ainsi que la combustion du pétrole et le secteur des métaux non ferreux, sont des sources d'apports de nickel (principalement sous forme de particules) dans l'environnement aquatique. À faible teneurs, le

nickel est un métal nécessaire, mais à des doses excessives, il peut être dangereux pour les êtres vivants (Kozlova et al., 2009; Lock and Janssen, 2002; Rooney et al., 2007). L'empoisonnement par le Ni affecte principalement les voies respiratoires chez l'homme, entraînant une inflammation de la muqueuse nasale et des organes respiratoires, et pouvant conduire au développement de tumeurs malignes des voies respiratoires (WHO, 1996).

**Le mercure :** Le mercure est le seul métal à l'état liquide dans les conditions normales de température et de pression. On le rencontre sous trois états fondamentaux dans l'environnement : vapeurs  $Hg_0$ , inorganiques  $Hg^{2+}$  et méthylés  $CH_3-Hg$  et  $(CH_3)_2-Hg$ .

Dans le milieu aquatique et après oxydation, le mercure élémentaire gazeux se transforme en mercure divalent  $Hg^{2+}$ , où deux réactions chimiques essentielles vont rentrer en compétition : la réduction et la méthylation, cette dernière donne la forme toxique du mercure, le méthylmercure qui se bio accumule facilement à travers la chaîne trophique.

La combustion de produits fossiles, la déforestation, l'exploitation minière et l'implantation de complexes hydroélectriques sont des activités anthropiques qui produisent et rejettent des particules de mercure dans l'environnement (Kehrig and Malm, 1999; Mergler, 2002). Le mercure est utilisé à plusieurs fins et comme constituant de plusieurs produits : batteries, thermomètres, baromètres, amalgames dentaires, peintures, teintures, interrupteurs, thermostats, fongicides, vaccins, et il est encore utilisé dans certains laboratoires de recherche. Le mercure est aussi largement employé dans l'orpillage artisanal pour s'amalgamer avec l'or (Mergler, 2002).

## **I.2 Spéciation et distribution des éléments traces métalliques (ETM) dans les systèmes aquatiques**

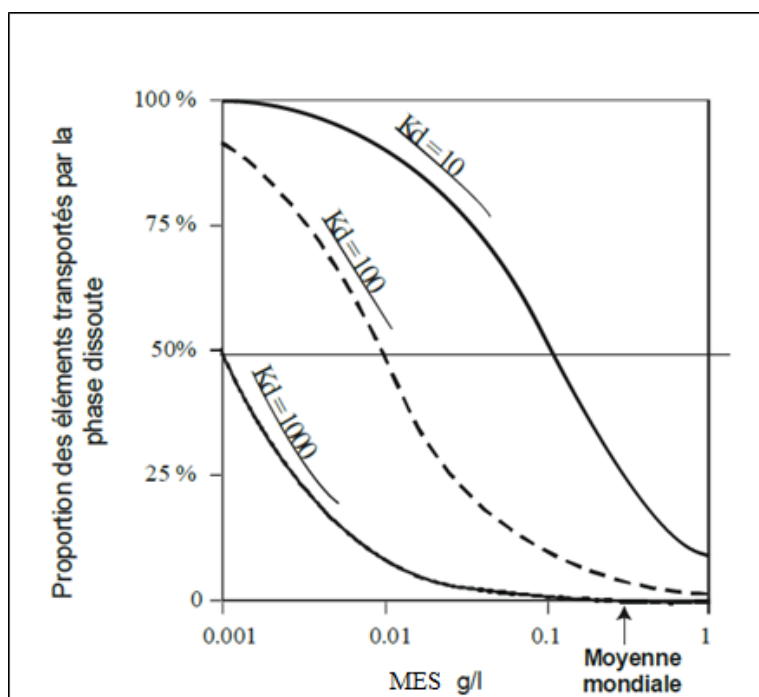
Les éléments traces métalliques peuvent être dissous, colloïdaux ou particulaires dans les milieux aquatiques. Ils peuvent s'accumuler dans les sédiments sous cette dernière forme. En réalité, la limite entre la phase dissoute et la phase particulaire est arbitrairement fixée à 0,45 micromètre. Ainsi, la fraction particulaire désigne la partie qui est physiquement retenue par le filtre, alors que la fraction dissoute est constituée des espèces aqueuses qui ne sont pas retenues par un filtre dont les pores ont un diamètre de 0,45  $\mu m$ . La fraction colloïdale est une composante de la phase dissoute, composée de minuscules particules insensibles aux forces gravitationnelles. Ces particules ont une taille comprise entre 1 nanomètre et 1 micromètre (Buffle and Chalmers, 1988; Everett, 2007).

La distribution des métaux traces entre les phases dissoutes et particulaires peut généralement être caractérisée par l'utilisation d'un coefficient de distribution ( $K_d$ ) ou de partage. Ce

coefficient représente la proportion entre la concentration de l'élément dans la phase particulaire (en  $\mu\text{g g}^{-1}$ ), et sa concentration dans la phase dissoute (en  $\mu\text{g L}^{-1}$ )

(Benoit et al., 1994). Les éléments qui adhèrent bien aux solides, comme le plomb (Pb), ont tendance à avoir des valeurs  $K_d$  élevées, contrairement aux éléments tels que le potassium (K), le calcium (Ca), le sodium (Na) et le magnésium (Mg) et qui sont facilement modifiables et mobilisables et donc caractérisés par de faibles valeurs  $K_d$  (voir figure I.1). La concentration et la nature des particules, ainsi que les propriétés physico-chimiques du milieu, jouent toutes un rôle dans le processus de partage entre les phases dissous et particulaire (Benoit et al., 1994; Ollivier et al., 2011).

Selon Berner and Berner (1987), la concentration moyenne de matières particulaires (MES) transportées par les rivières du monde entier est d'environ  $350 \text{ mg L}^{-1}$ , dont la composition minéralogique indique leur origine de leur source (Baque, 2006; Martin and Meybeck, 1979; Zhang et al., 1990). Compte tenu des coefficients de partage reportés dans les principaux cours d'eau du globe, et qui présentent une large gamme de 10 à 40 000 (Roy, 1996), on peut en déduire que la majeure partie des éléments traces métalliques (ETM) est principalement transportée sous forme de particules ( $K_d \geq 10$ ) (Baque, 2006).



**Figure I.1 :** La relation entre la concentration des matières en suspension et la fraction (en masse) des éléments transportés par la phase dissoute avec  $K_d$  coefficient de partage ou de distribution d'après Baque (2006).

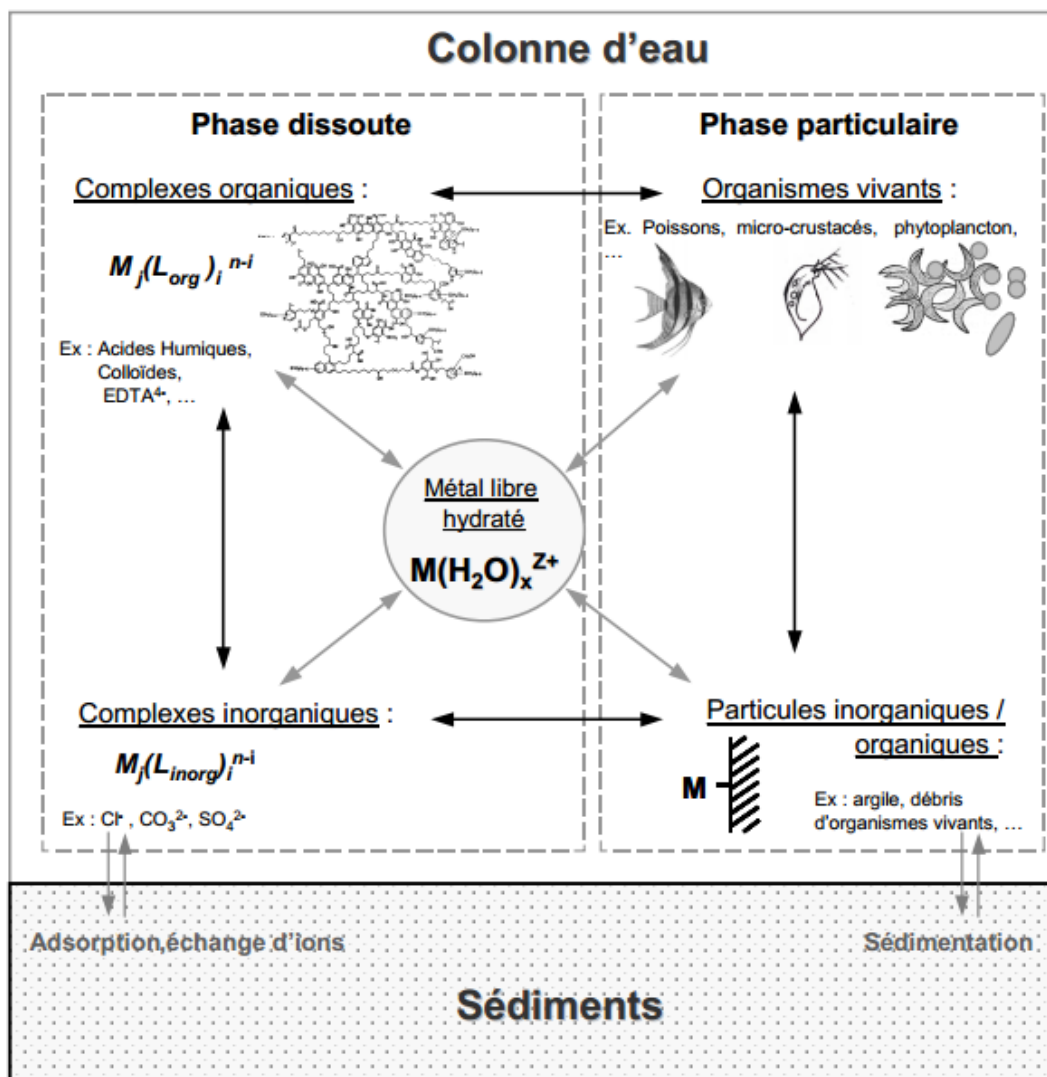
Les éléments traces métalliques peuvent être présents dans les particules par adsorption sur des phases organiques ou minérales, ou par incorporation dans la structure cristalline de minéraux spécifiques. Dans la fraction dissoute, les éléments traces métalliques (ETM) peuvent exister sous forme d'ions libres ou de complexes avec des ligands inorganiques tels que l'hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ), le chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), le sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), le bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) et le phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), ainsi qu'avec des ligands organiques tels que les acides aminés et les composés humiques présents dans la solution. La spéciation chimique d'un élément est déterminée par sa distribution sous ces diverses formes (Stumm and Morgan, 2012). La compréhension de la spéciation d'un élément est très importante car elle permet de comprendre et de prévoir son comportement dans les systèmes aquatiques, tout en influençant sa biodisponibilité et sa toxicité pour les espèces (Buffle and Chalmers, 1988; Tessier and Turner, 1995).

Cependant, le processus de spéciation des ETM est fortement influencé par les caractéristiques physico-chimiques du milieu environnant, ainsi que par la multitude de réactions se produisant à l'interface entre les phases solide et liquide. Les trois principaux mécanismes régissant la transformation des ETM d'un état à l'autre sont les suivants :

- La précipitation : désigne la transformation d'une substance d'un état dissous à un état solide. Les métaux subissent principalement des précipitations sous forme d'hydroxydes, de carbonates, de phosphates ou de sulfures dans l'environnement aquatique naturel (Alloway, 2013; Sigg et al., 2001).
- L'adsorption : est le phénomène par lequel les éléments trace métalliques (ETM) adhèrent à la surface solide d'un substrat. Les particules qui peuvent participer à ce type d'adsorption comprennent des particules fines telles que les argiles (en particulier les aluminosilicates comme l'illite, la smectite et la montmorillonite), ainsi que les oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse, et la matière organique particulaire. Les ETM qui ont été physiquement liés peuvent être libérés dans la solution par le processus de désorption, qui est le mécanisme inverse de l'adsorption (Warren and Haack, 2001).
- La complexation : est un processus chimique au cours duquel se forment des liaisons ioniques ou covalentes. Le processus de complexation est sélectif, la liaison se produisant exclusivement entre des composants possédant une configuration électronique appropriée (Sigg et al., 2001). Les ligands englobent une série d'espèces chimiques qui peuvent être classées en deux catégories principales : les ligands inorganiques, tels que l'hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ), le chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), le sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et le carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), et les ligands organiques, y compris les minuscules acides

carboxyliques, les acides fulviques et humiques, les protéines, les thiols et d'autres encore.

La figure I.2 illustre les interactions qui régissent le comportement des éléments traces métalliques (ETM) dans l'environnement aquatique (Buffle and Chalmers, 1988).



**Figure I.2 :** Relations entre un métal M et les constituants organiques et inorganiques de l'environnement aquatique (Buffle and Chalmers (1988)).

### I.3 Les ETMs dans les sédiments

Les sédiments marins constituent un compartiment diversifié et complexe. Un dépôt sédimentaire constitué de matériaux détritiques minéraux et organiques peut être classé en deux catégories en fonction de son origine : allochtone et autochtone. Les dépôts allochtones proviennent des phénomènes d'érosion des roches et du sol dans l'ensemble du bassin versant adjacent, ce qui représente un apport horizontal. D'autre part, les dépôts autochtones résultent

de la précipitation de composés minéraux tels que les carbonates ou de composés organiques tels que les algues planctoniques mortes, ce qui représente un apport vertical (Bonnet, 2000). Le transport et le dépôt d'éléments traces métalliques (ETM) provenant des rivières, en conjonction avec des matières particulaires, entraînent leur accumulation dans les sédiments marins. Par conséquent, ce processus pourrait donner lieu à des concentrations élevées d'ETM dans les écosystèmes côtiers pollués. Dans le milieu marin, les sédiments présentent des caractéristiques doubles, à la fois puits et source secondaire de contamination, influencées par les conditions physico-chimiques (Kalnejais et al., 2010; Vdović et al., 2006).

Les sédiments sont caractérisés par la présence de deux phases distinctes : la phase solide, qui correspond au sédiment lui-même, et la phase liquide, appelée eau interstitielle. Les deux phases subissent des échanges continus de matière, ce qui conduit à un état d'équilibre. Les ETM sont associés à diverses fractions sédimentaires sous différentes formes dans les sédiments. Ces formes comprennent la liaison avec les carbonates, les oxydes et hydroxydes de fer ou de manganèse, les silicates, la complexation avec des matières organiques telles que les acides humiques, ou être des ions libres. Les ETM sont en partie liés aux sulfures dans les sédiments anoxiques (Eggleton and Thomas, 2004; Leleyter et al., 2012; Li et al., 2001; Peng et al., 2009). Les différents constituants présents dans les dépôts sédimentaires sont communément appelés phases porteuses.

Tableau I.1 : Teneur moyenne en ETM dans les rivières en  $\mu\text{g/L}$  et dans la croûte continentale supérieure (CCS) en  $\mu\text{g g}^{-1}$ , à l'exception de Al et Fe en % (Gaillardet et al., 2003; Wedepohl, 1995).

| Elément | Concentration dans la CCS ( $\mu\text{g/g}$ ) | Concentration moyenne des rivières ( $\mu\text{g/L}$ ) |
|---------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Al      | 7,74 %                                        | 32                                                     |
| Fe      | 3,08 %                                        | 66                                                     |
| Mn      | 527                                           | 34                                                     |
| As      | 2                                             | 0,62                                                   |
| Cd      | 0,102                                         | 0,08                                                   |
| Co      | 11,6                                          | 0,15                                                   |
| Cr      | 35                                            | 0,7                                                    |
| Cu      | 14,3                                          | 1,5                                                    |
| Ni      | 18,6                                          | 0,8                                                    |
| Pb      | 17                                            | 0,08                                                   |
| V       | 53                                            | 0,71                                                   |
| Zn      | 52                                            | 0,6                                                    |
| Hg      | 0.056                                         | -                                                      |

Le tableau I.2 présente une vue d'ensemble des phases porteuses des éléments traces métalliques (ETM) dans les fractions sédimentaires. La répartition des éléments traces métalliques (ETM)

entre les différentes fractions de sédiments joue un rôle crucial dans la dynamique globale des ETM au sein de l'écosystème. En fait, la modification des phases porteuses peut conduire à la libération ou à la capture des ETM qui leur sont liés. L'identification des phases porteuses dans les sédiments contribue à une meilleure compréhension des processus biogéochimiques qui se déroulent dans un environnement aquatique (Clark et al., 2000).

**Tableau I.2 :** Les phases porteuses de certains éléments traces métalliques dans les fractions sédimentaires (Eggleton and Thomas, 2004; Shaw et al., 1990; Wedepohl, 1995).

| Eléments traces métalliques & Métalloïdes | Phases porteuses                                                     |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| As                                        | Les sulfures, Oxydes de manganèse et fer et matière organique        |
| Cd                                        | Matière organique, Oxydes de manganèse et fer                        |
| Cr                                        | Oxydes de manganèse et fer                                           |
| Cu                                        | Les sulfures, Oxydes de manganèse et fer et matière organique        |
| Mo                                        | Sulfure (en milieu anoxique), associé au Mn et Fe (en milieu oxiqye) |
| Pb                                        | Les sulfures, Oxydes de manganèse et fer et matière organique        |
| Ni                                        | Les sulfures, Oxydes de manganèse et fer et matière organique        |
| U                                         | Oxydes de fer, phosphate, carbonates                                 |
| Zn                                        | Oxydes de manganèse et sulfure                                       |
| Hg                                        | Matière organique et sulfure                                         |

# **CHAPITRE II**

## **MATERIELS ET METHODES**

## II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dans cette partie, nous allons, en premier lieu, présenter notre zone d'étude qui comporte les bassins versants des deux oueds El Harrach et Mazafran et le bassin versant du Rhône, fleuve d'Europe, ainsi que ces trois baies respectives, baie d'Alger, Baie de Bou-Ismaïl et Baie de Marseille. En deuxième lieu, nous allons décrire notre stratégie d'échantillonnage. Par la suite, nous présentons les différents matériels et méthodes utilisés pour l'analyse des différents paramètres. En dernier lieu nous, détaillons les différents indices calculés pour l'évaluation de l'apport, l'accumulation et la contamination par les métaux traces dans la région algéroise et celle de Marseille.

### II.1 Zone d'étude

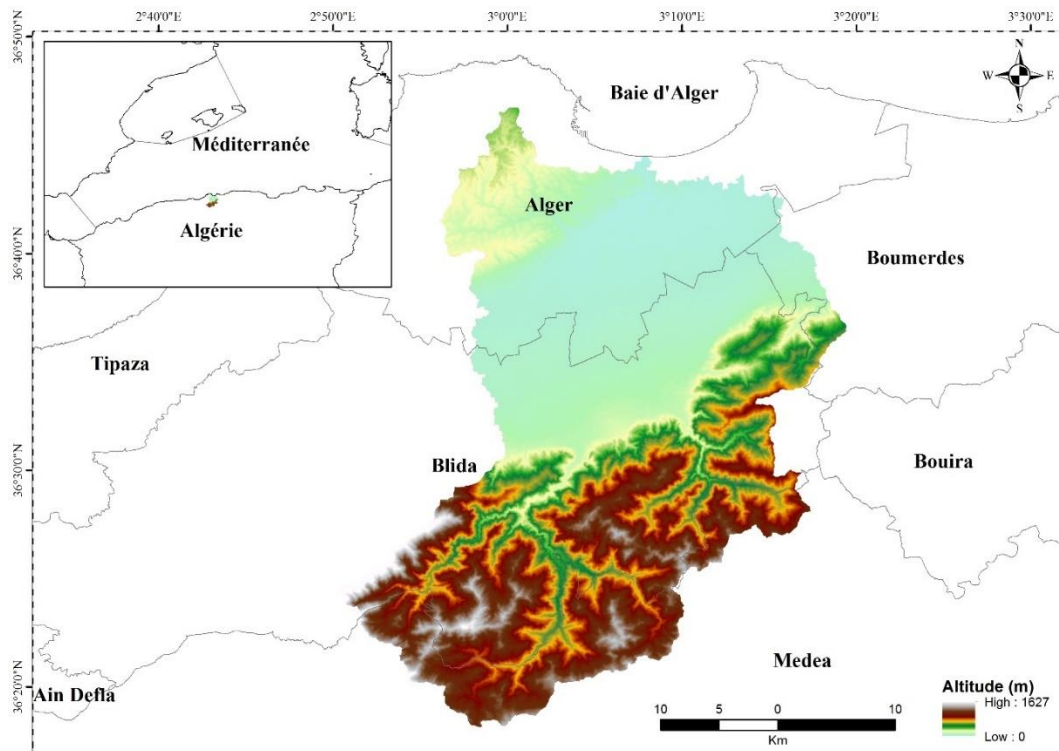
#### II.1.1 Bassin versant d'oued El Harrach

Le bassin versant de l'Oued El Harrach couvre une superficie d'environ 1200 km<sup>2</sup> (Fig. II.1). L'oued El Harrach est l'un des plus grands oueds qui traverse la plaine de la Mitidja. Il est situé au centre nord de l'Algérie et prend sa source dans l'Atlas Blidéen, qui fait partie de l'Atlas Teleen, et traverse la plaine de la Mitidja pour se jeter dans la baie d'Alger. La longueur totale de l'oued El Harrach est d'environ 67 km, dont près de 18,2 km s'étendent de la capitale à son embouchure en mer Méditerranée, tandis que le reste s'étend sur la longueur des wilayas de Blida et de Médéa.

Les principaux affluents de cet oued sont : •

- ❖ L'Oued Djamaa, issu de l'Atlas Blidéen (B.V.=225 Km<sup>2</sup>) ;
- ❖ L'Oued Baba Ali avec l'Oued Terro, issus de la Mitidja (B.V.=166 Km<sup>2</sup>) ;
- ❖ L'Oued Smar, issu de la Mitidja, cours d'eau récepteur des zones industrielles d'Oued Smar et EL Harrach Sud (B.V.=117 Km<sup>2</sup>) ;
- ❖ L'Oued El Kerma, issu du sahel (B.V.=74 Km<sup>2</sup>) ;
- ❖ L'Oued Ouchaiah issu du sahel, cours d'eau récepteur des communes et quartiers urbains fortement peuplés (kouba, birkhadem ...) à un (01) kilomètre de l'embouchure de l'Oued El Harrach (B.V.=22 Km<sup>2</sup>) ;
- ❖ L'Oued Adda cours d'eau récepteur des quartiers urbains d'El Harrach et des Eucalyptus.

Selon les données des deux stations hydrométriques de l'Oued Smar l'Oued Baraki, les valeurs inter annuelles des débits mesurés pendant la période 1983-2005 sont de 5,37 m<sup>3</sup>/s en période sèche et de 3000m<sup>3</sup> /s en temps de crue ([Athmani, 2022](#)).



**Figure II.1** : Situation géographique du Bassin Versant de l'oued El Harrach.

Selon le recensement des zones industrielles réalisé par [Louati \(2015\)](#), la zone d'étude couvre toutes les zones industrielles, les zones d'activités commerciales et les unités éparées d'un tissu industriel, commercial ou agricole, implantés sur le bassin versant de l'oued El Harrach. Une grande partie des établissements industriels se répartissent dans la wilaya d'Alger, notamment les zones industrielles et les zones d'activités. Pour la wilaya de Blida, la zone industrielle se définit par les unités éparées et les deux zones d'activités (ZA Larbaa et Bouinan). Par ailleurs, en ce qui concerne la wilaya de Media, la zone d'étude touche les zones montagneuses dépourvues totalement des industries. Par contre, pour la wilaya de Boumerdes on peut signaler uniquement deux communes rurales dont le tissu est non industriel (Tab. II.1 et Fig. II.2).

De ce fait, l'oued El Harrach reçoit les eaux usées provenant des unités localisées principalement dans :

- ❖ La zone industrielle de l'oued Smar, qui compte pas moins de 228 unités industrielles.
- ❖ La zone industrielle d'El Harrach : compte 47 unités industrielles.
- ❖ La zone industrielle de Gué de Constantine, compte 32 unités industrielles.

Les eaux usées provenant de ces unités sont chargées de multiples polluants, puisqu'aucune n'est dotée d'une station d'épuration (Tab.II.2). Les eaux usées rejetées dans l'oued El Harrach sont estimées à 23.4 millions m<sup>3</sup> par an ([Meklati, 2009](#)).

Tableau II.1: Ensemble des zones industrielles et zones d'activités dans le bassin versant d'Oued El Harrach (Louati, 2015).

| Wilaya | Zone industrielle               | Zone d'activité      |
|--------|---------------------------------|----------------------|
| Alger  | ZI de Oued Smar                 | ZA d'El Achour       |
|        | ZI d'El Harrach                 | ZA de Baba Ali       |
|        | ZI de Gué de Constantine-Baraki | ZA d'Eucalyptus      |
|        | ZI d'El Karma                   | ZA de Kourifa        |
|        |                                 | ZA Lamirette         |
|        |                                 | ZA de l'Ouled Chebel |
|        |                                 | ZA de Dar El Beida   |
|        |                                 | ZA de Sidi Moussa    |
| Blida  |                                 | ZA de Bouinan        |
|        |                                 | ZA de Larbaa         |

Tableau II.2 : Les unités industrielles recensées par la Direction de l'Environnement (Moali et al., 2005).

| Dénomination | Activités       | Localisation    | Volume d'eau rejetée (m3/j) | Lieu de rejet   | Eléments polluants |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|
| ENAP         | Peinture        | ZI O-Smar       | 7                           | Oued Smar       | Hg                 |
| ENMTP        | Mécanique       | El Harrach      | 3                           | Oued Smar       | Hg                 |
| ENPC1        | Plastique       | Mohammadia      | -                           | Oued El Harrach | Hg                 |
| ENPC2        | Plastique       | Mohammadia      | -                           | Oued El Harrach | Hg                 |
| ENPEC        | Accumulateur    | ZI O-Smar       | 150                         | Oued Smar       | Pb, Hg             |
| TAN SEMMACHE | Tannerie        | ZI D-Beida      | 30                          | Oued Smar       | Cr, Pb, Hg         |
| TAN KEHRI    | Tannerie        | ZI D-Beida      | 120                         | Oued Smar       | Hg                 |
| EMB1         | Trans Fer Blanc | Gué Constantine | 320                         | Oued El Harrach | Pb, Hg             |
| BAG          | Bout à Gaz      | Gué Constantine | 100                         | Oued El Harrach | Hg                 |
| Ets KEHRI    | Tannerie        | Gué Constantine | 0.027                       | Oued El Harrach | Hg                 |
| AGENOR       | Métaux précieux | Baraki          | 3000                        | Oued El Harrach | Cu, Hg             |
| Raff d'Alger | Pétrole         | Baraki          | 7                           | Oued El Harrach | Hg                 |
| SAIDAL       | Médicaments     | ZI O-Smar       | -                           | Oued Smar       | Hg                 |
| CATEL1       | Câbles Télépho  | ZI O-Smar       | -                           | Oued Smar       | Cu                 |
| CATEL2       | Câbles Télépho  | ZI O-Smar       | 12                          | Oued Smar       | /                  |
| AVENTIS      | Médicaments     | ZI O-Smar       | -                           | Oued Smar       | /                  |
| IAP          | Institut        | ZI O-Smar       | -                           | Oued Smar       | /                  |
| SOACHLORE    | Prod Chlore     | Baba Ali        | -                           | Oued El Harrach | Hg                 |

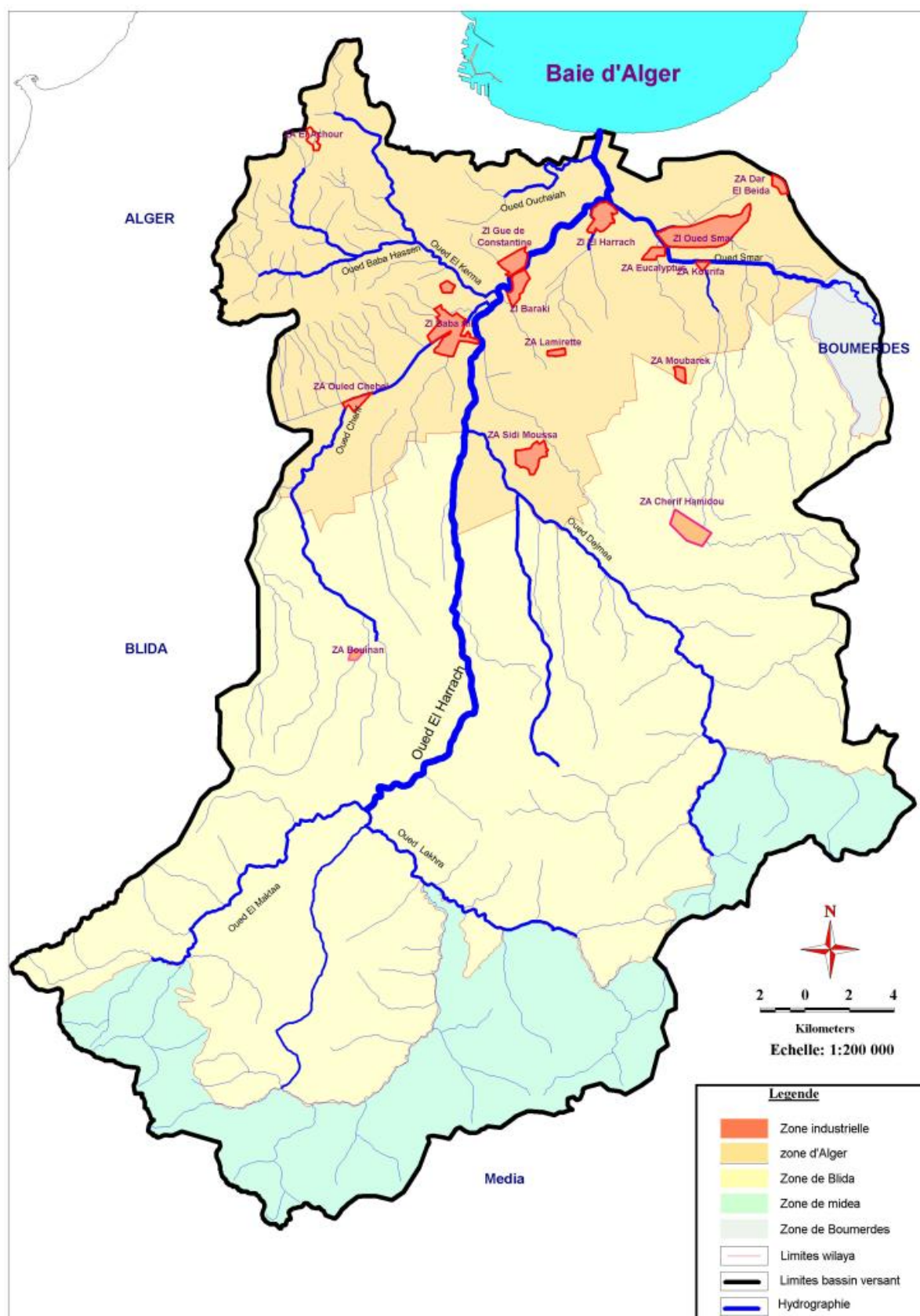
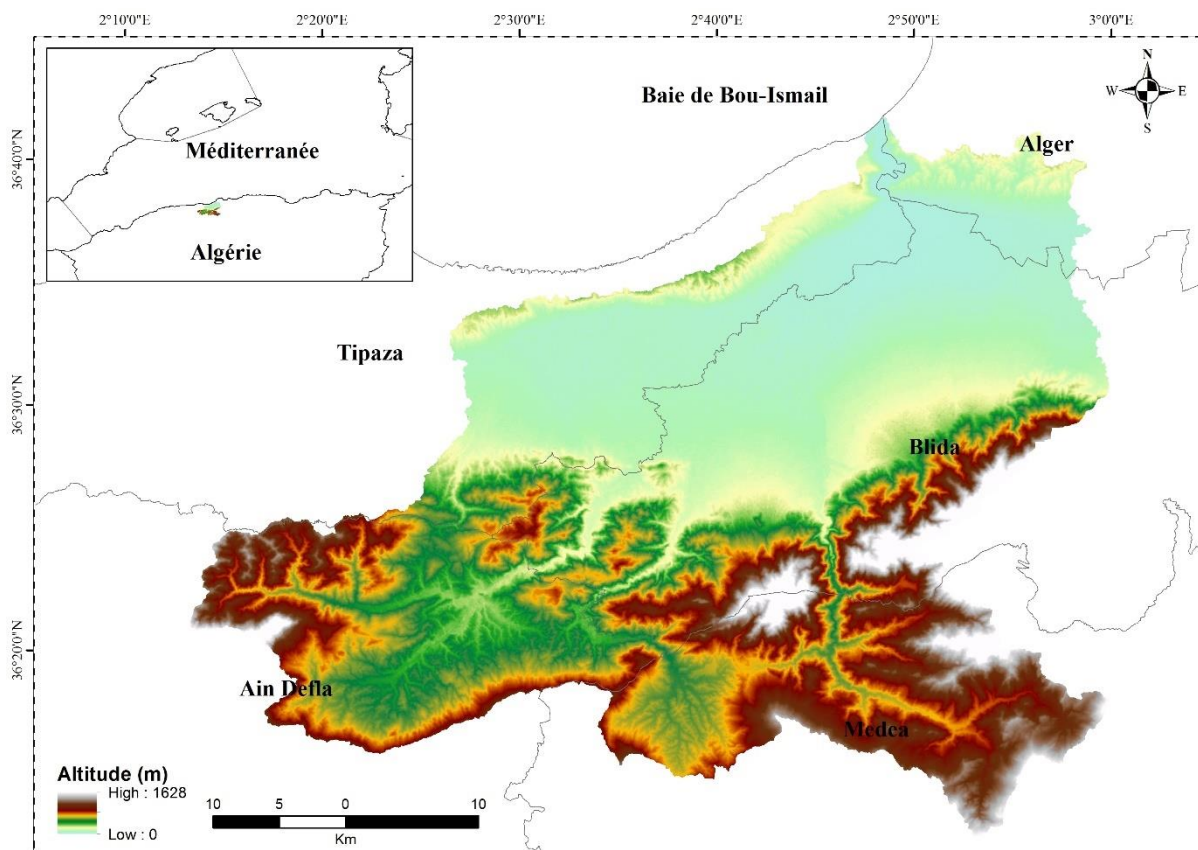


Figure II.2 : Répartition des zones industrielles au niveau du bassin versant de l'oued El Harrach (Louati, 2015).

### II.1.2 Bassin versant de l'oued Mazafran

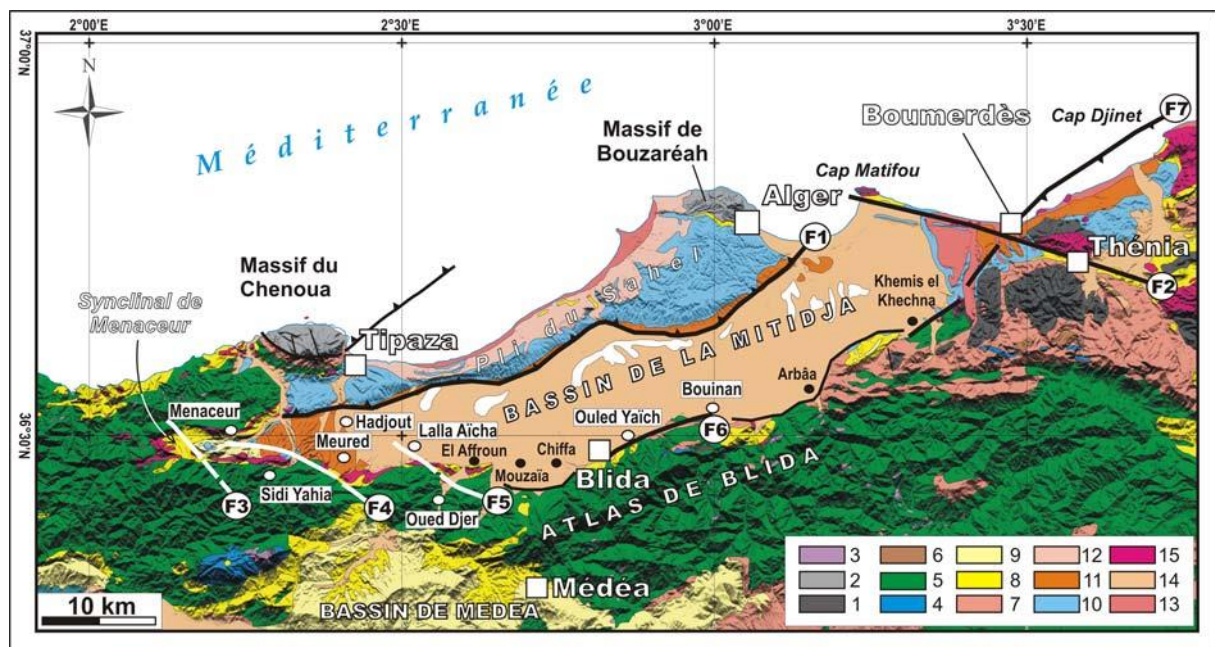
Le bassin versant de l'oued Mazafran est l'un des bassins les plus importants du de la côte algéroise, couvrant environ 1900 km<sup>2</sup> (Fig. II.3). Il est situé dans la région centrale de la Mitidja. L'oued Mazafran a trois principaux affluents qui sont : « Oued Djer », « Bou Roumi » et « Chiffa », tous ces oueds prennent leur source dans les montagnes de l'Atlas tellien et traversent la plaine de la Mitidja pour se rejoindre en aval et former une seule oued " Oued Mazfran" (Bouras et al., 2020). Le bassin de Mazafran est caractérisé par un climat méditerranéen typique en deux saisons. Pendant la saison estivale, un simple courant d'eau coule dans l'oued alimenté principalement par des décharges d'origine anthropique. Cependant, pendant la saison hivernale, l'afflux d'eau est assez élevé et des inondations parfois très violentes se produisent, en particulier au début de l'automne (Bouras et al., 2021). Le débit liquide instantané enregistré dans l'oud Mazafran varie de quelques m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> à plus de 750 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> lors des fortes crues hivernales (Pauc, 1989). L'apport annuel moyen est égal à 320\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, tandis que le débit liquide annuel moyen est de 10,14 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (Messaoud Nacer et al., 2006).



**Figure II.3 :** Situation géographique du bassin versant de l'oued Mazafran.

Le bassin versant de l'oued El Harrach et l'oued Mazafran comprend deux entités géologiques (Fig. II.4) :

- I. L'Atlas Blideen : il est composé de formations jurassiques et crétacées formées de grès micacés et de calcaires métamorphosés. Les formations d'âge secondaire affleurent principalement dans les parties nord et la limite ouest de l'atlas Blideen (Ayme et al., 1953).
- II. La plaine de la Mitidja : elle couvre la partie centrale du bassin et remplie de sédiments détritiques du Pliocène et d'âges plus récents. Elle contient des alluvions quaternaires et des argiles limoneuses. Elle constitue le dépôt du bassin de la Mitidja et du Sahel d'Alger le long de la côte de la baie de Bou Ismail. Ces dépôts constituent la principale source de charge solide transportée par l'oued Mazafran.



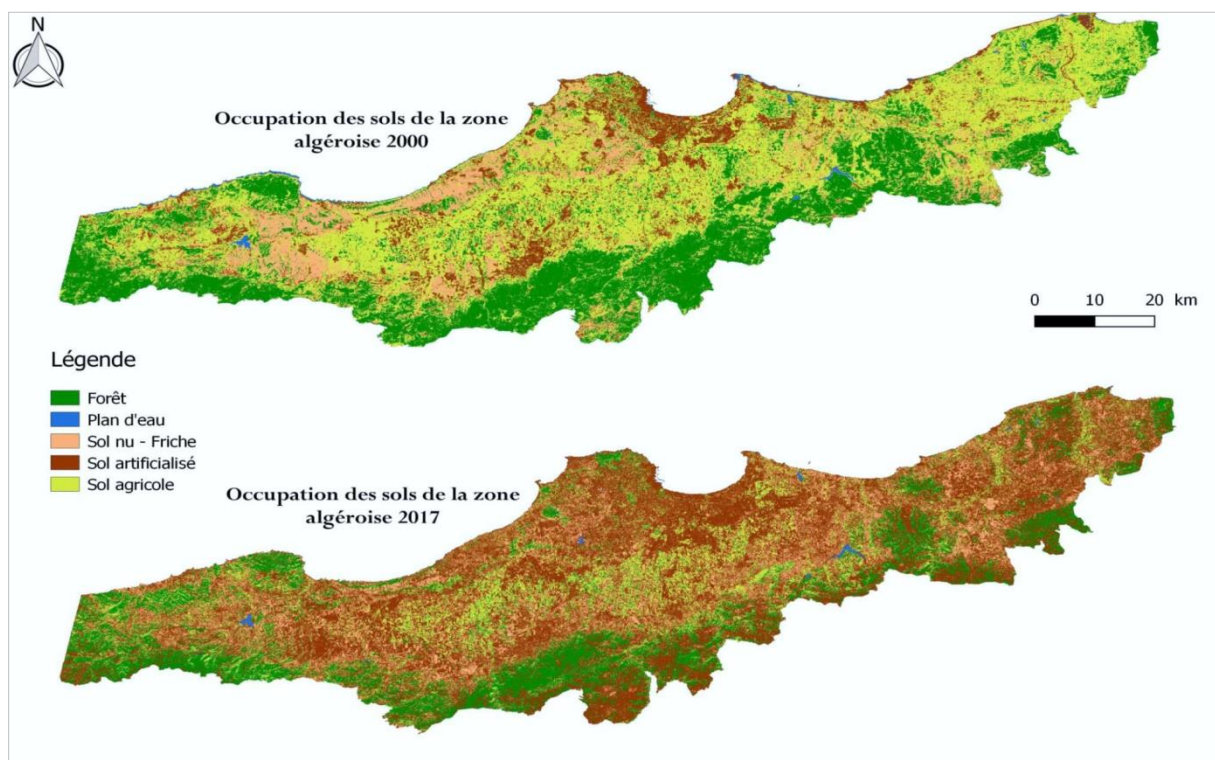
**Figure II.4 :** Carte géologique (sur relief, données topographiques SRTM-3) du bassin de la Mitidja et ses environs (Guemache et al., 2010).

1 : Terrains métamorphiques ; 2 : Socle primaire ; 3 : Trias ; 4 : Jurassique ; 5 : Crétacé ; 6 : Eocène ; 7 : Oligocène ; 8 : Miocène anté-nappes ; 9 : Miocène post-nappes ; 10 : Pliocène ; 11 : Villafranchien ; 12 : Calabrien ; 13 : Quaternaire marin ; 14 : Quaternaire continental ; 15 : Magmatisme indifférencié. F1 : Faille du Sahel ; F2 : Faille de Thénia (Thenia Fault) ; F3 : Faille de Menaceur – Sidi Yahia ; F4 : Faille de Hadjout – Meurad ; F5 : Faille d'Oued Djer – Lalla Aïcha ; F6 : Faille d'Ouled Yaïch – Bouinan ; F7 : Faille de Boumerdès.

### II.1.3 Occupation des sols et densité de population

Le BV de l'oued El Harrach s'étale sur 4 wilayas qui sont par ordre d'importance : Alger, Blida, Média et Boumerdes. Alors que, le BV de l'oued Mazafran s'étale sur cinq wilayas qui sont par ordre d'importance : Blida, Tipaza, Ain defla, Media et Alger. Comme la montre la Figure II.5,

la zone côtière d'Alger offre un exemple particulièrement frappant du développement croissant du littoral méditerranéen (Khelil et al., 2019). Près de 40% de la population algérienne est concentrée sur 2% du territoire national (PAM, 2015). Cette tendance se reflète particulièrement dans la zone d'étude où la population a augmenté de manière significative, montrant un processus de littoralisation en cours. La population de la wilaya d'Alger a augmenté de 43 % en 20 ans (1988-1998). Les wilayas de Boumerdes et Tipaza ont des taux de croissance de 19,5% et 12,8% (Khelil et al., 2019) . Une forte pression s'exerce sur la wilaya d'Alger, ce qui entraînera une "diffusion de la population au niveau des wilayas avoisinantes (Blida, Tipaza et Boumerdes)" (Madani, 2009). Bien que de nombreuses mesures d'aménagement et de planification ont été mises en place en vue d'une utilisation plus durable de l'espace côtier (Rabehi et al., 2018), cette confluence de facteurs a entraîné un développement urbain important dans la zone côtière d'Alger, dont 44 % de la surface est considérée comme urbanisée (Khelil et al., 2019). De ce fait, la wilaya d'Alger a perdu des terres agricoles fertiles au cours des deux dernières décennies. Les wilayas de Tipaza, Blida et Boumerdes s'orientent également dans cette direction. En outre, la zone utilisée pour les activités liées au tourisme est touchée, ce qui entraîne des changements de plus en plus insoutenables dans l'utilisation des terres. Globalement, l'activité du secteur touristique de la wilaya d'Alger a diminué de plus de 50 % (Khelil et al., 2019).



**Figure II.5 :** Occupation des sols de la zone algéroise (2001-2017) (Khelil, 2021).

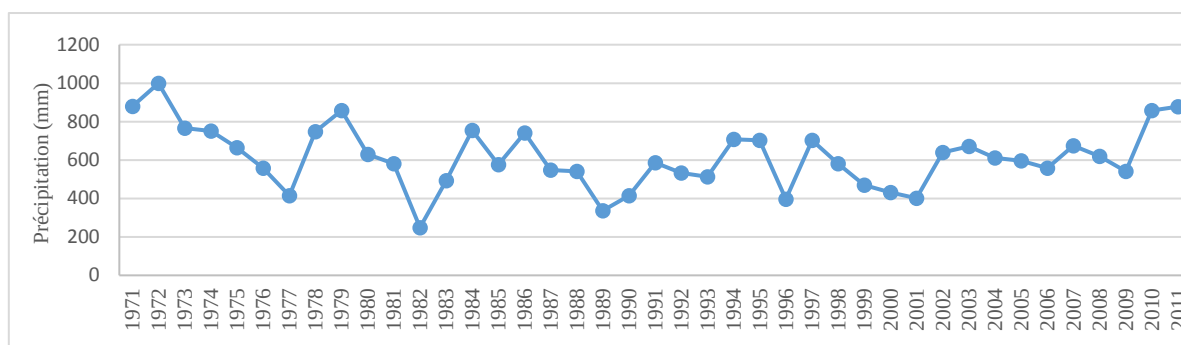
### II.1.4 Précipitation et débit (Oued El Harrach et oued Mazafran)

D'après les données des précipitations fournies par ANRH (Agence National des ressources hydraulique) (Tab. II.3 et Fig. II.6 ; II.7) entre 1971 et 2011 de la station BARAKI- PONT (Code station : 021418), et entre 1981 et 2011 dans la station FER A CHEVAL (Code station : 021201) dans le bassin versant de l'oued El Harrach et l'oued Mazafran, respectivement, les précipitations moyennes mensuelles calculées sur toute la période montre que les mois les plus pluvieux (période froide et humide) s'étend du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mars, avec des valeurs qui varient de 61,3 à 103 mm et de 53,3 à 91,4 mm dans les deux bassins versants (El Harrach et Mazafran, respectivement), le maximum de précipitations est observé au mois de Décembre. Tandis que, Juin, Juillet et Août sont les mois les plus secs avec une précipitation inférieure à 9 mm. Ce climat est typiquement méditerranéen avec une tendance semi-aride (des hivers très doux, et des étés chauds).

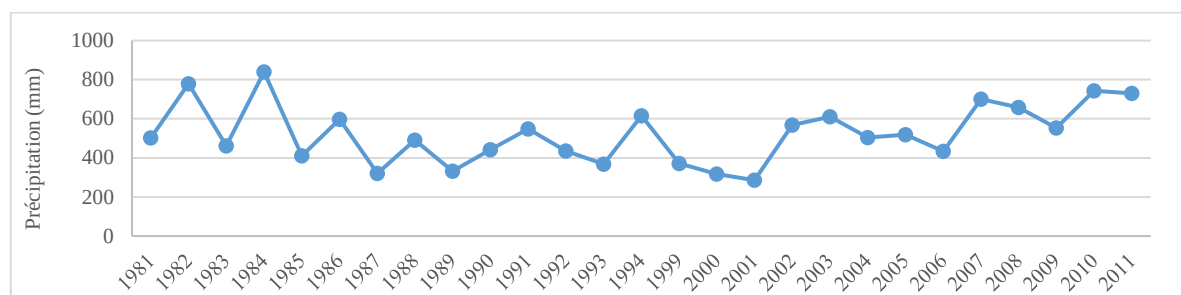
**Tableau II.3 :** Précipitation moyenne mensuelle en (mm) dans la station BARAKI-PONT et station FER A CHEVAL.

| BV de l'oued<br>El Harrach | Période<br>(1971-2011) | Sept | Oct  | Nov        | Dec        | Jan  | Fév  | Mars | Avr  | Mai  | Juin | Juillet    | Aout | Moy.<br>annuel |
|----------------------------|------------------------|------|------|------------|------------|------|------|------|------|------|------|------------|------|----------------|
|                            | Précipitation<br>(mm)  | 30,9 | 61,3 | <b>100</b> | <b>103</b> | 81,1 | 81,6 | 63,8 | 49,8 | 35,1 | 8,8  | <b>4,2</b> | 7    | <b>622</b>     |
| BV de l'oued<br>Mazafran   | Période<br>(1981-2011) | Sept | Oct  | Nov        | Dec        | Jan  | Fév  | Mars | Avr  | Mai  | Juin | Juillet    | Aout | Moy.<br>annuel |
|                            | Précipitation<br>(mm)  | 23.1 | 53.7 | 88.0       | 91.4       | 69.4 | 65.9 | 53.3 | 36.8 | 31.8 | 4.5  | 1.1        | 9.6  | <b>523.7</b>   |

Ainsi, Dans la station BARAKI-PONT (BV de l'oued El Harrach), les précipitations moyennes annuelles pour les années 1971 à 2011 ont été de 622 mm, avec un maximum de 999,2 mm enregistré en 1972 et un minimum 248,8 mm observé en 1982. Alors que, dans le BV de l'oued Mazafran (station FER A CHEVAL), les précipitations moyennes annuelles pour les années 1981 à 2011 ont été de 523,7 mm, avec un maximum de 839,9 mm enregistré en 1984 et un minimum 285,8 mm observé en 2001. Les précipitations dans la zone d'étude sont très irrégulières dans le temps et dans l'espace, reflétant de fortes pluies (atteignant parfois 202 mm) sur un petit nombre de jours au cours de l'année (Meddi et al., 2017).



**Figure II.6:** Précipitation interannuelle dans le BV de l'oued El Harrach (station BARAKI-PONT).



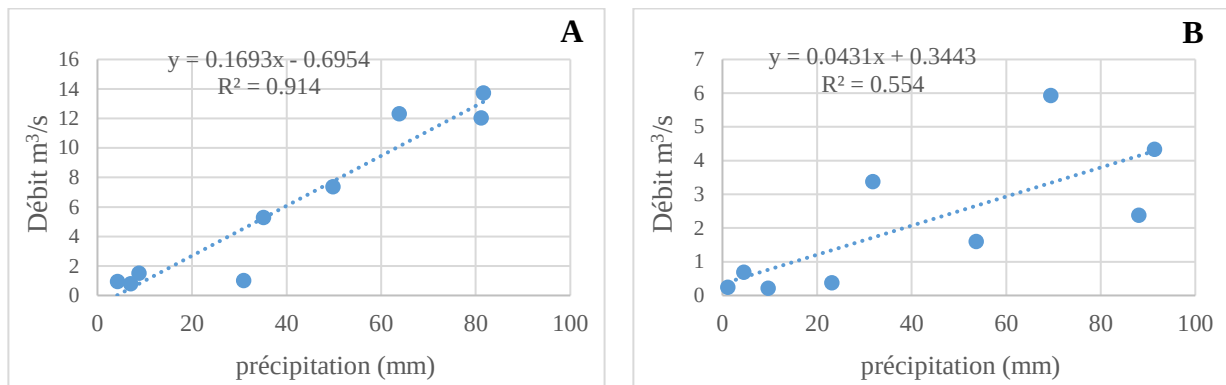
**Figure II.7 :** Précipitation interannuelle dans le BV de l'oued Mazafran (station FER A CHEVAL).

Selon les données des deux stations hydrométriques BARAKI- PONT et FER A CHEVAL entre la période s'étalant de 1971 à 2007 et de 1981 à 2013 (Tab. II.4), le débit moyen annuel est de  $5,84 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $3,76 \text{ m}^3/\text{s}$  en aval de l'oued El Harrach et Mazafran, respectivement. Ces deux oueds sont caractérisés par un étiage long allant du mois de juin jusqu'à mois d'octobre avec un débit inférieur à  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspond aux mois les plus secs, tandis que, les mois les plus pluvieux sont caractérisés par les débits les plus importantes. Cependant, le débit journalier des deux oueds est très irrégulier, selon [Aroua and Berezowska-Azzag \(2009\)](#), le débit journalier dans l'oued El Harrach peut passer de zéro en période sèche à  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$  en temps de crue. La plupart des flux de métaux particuliers (80 à 90%) délivrés par les rivières se produisent dans un laps de temps très court (moins de 12%) ([Radakovitch et al., 2008](#)).

**Tableau II.4 :** débit moyen mensuel en aval d'oued El Harrach et l'oued Mazafran.

| BV de l'oued El Harrach | Période (1971-2007)             | Sept | Oct  | Nov  | Dec  | Jan   | Fév   | Mars  | Avr  | Mai  | Juin | Juillet | Aout | Moy. annuel |
|-------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|---------|------|-------------|
|                         | Débit ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 1,01 | 1,40 | 3,82 | 7,36 | 12,05 | 13,74 | 12,33 | 7,39 | 5,29 | 1,52 | 0,94    | 0,81 | <b>5,84</b> |
| BV de l'oued Mazafran   | Période (1981-2013)             | Sept | Oct  | Nov  | Dec  | Jan   | Fév   | Mars  | Avr  | Mai  | Juin | Juillet | Aout | Moy. annuel |
|                         | Débit ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 0,38 | 1,61 | 2,38 | 4,34 | 5,94  | 9,87  | 10,55 | 4,85 | 3,38 | 0,69 | 0,24    | 0,21 | <b>3,76</b> |

Il faut noter que ces données de débit ont servi pour le calcul des flux de MES et des métaux traces dissous et particuliers dans les deux oueds El Harrach et Mazafran.



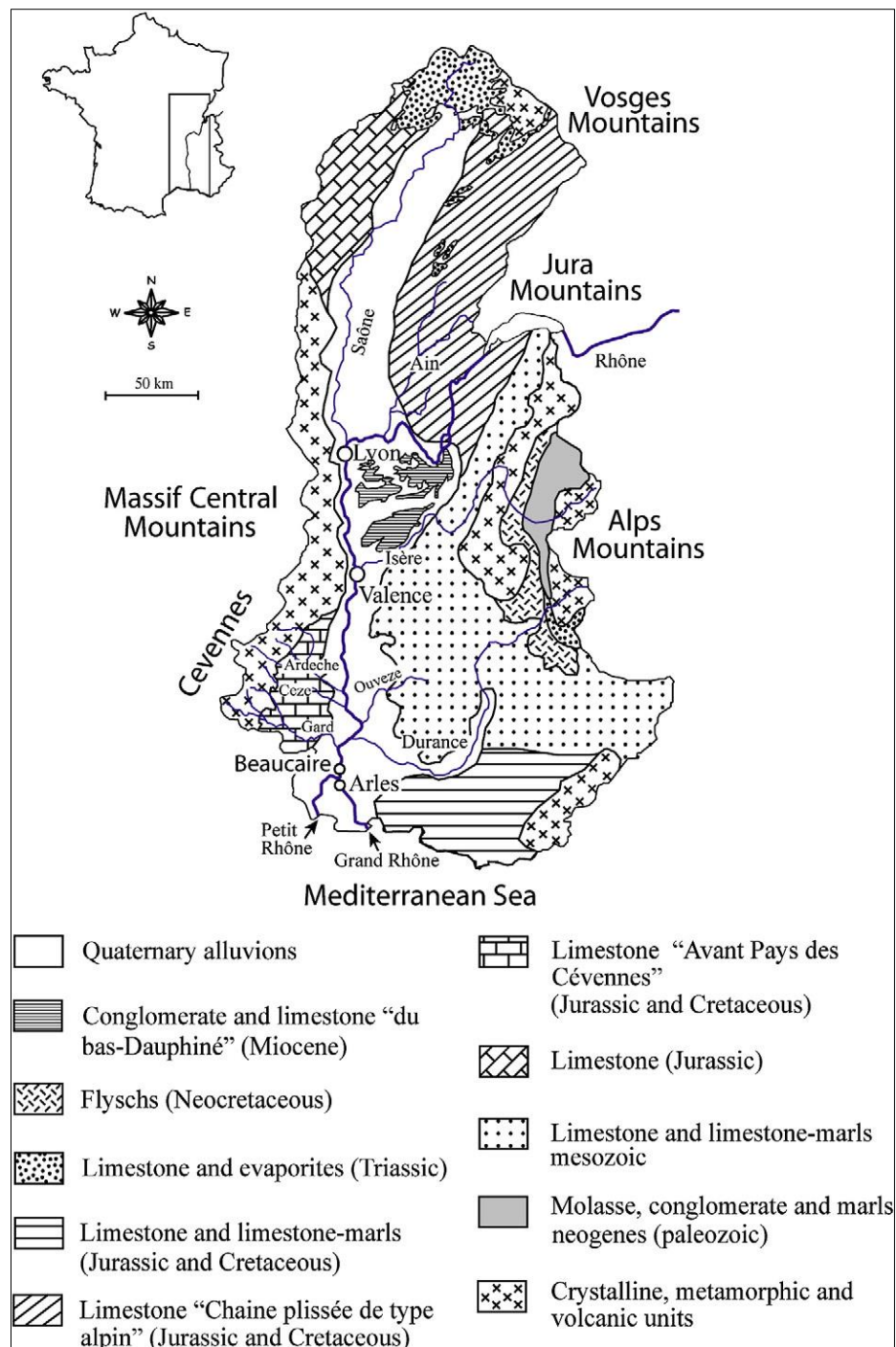
**Figure II.8 :** Corrélation entre les précipitations et le débit moyens mensuels dans les stations : **(A)** BARAKI- PONT ; **(B)** FER A CHEVAL.

### II.1.5 Le Rhône et son bassin versant

Le Rhône a une longueur de 816 km. Il a un bassin versant de 98 800 km<sup>2</sup> et un débit moyen de 1700 m<sup>3</sup>/s à Beaucaire (60 km de l'embouchure) (Ollivier et al., 2011) (Fig. II.9). Depuis la construction du barrage d'Assouan en 1968 et la réduction consécutive du débit du Nil, le Rhône est, actuellement, le principal cours d'eau de la mer Méditerranée. Le Rhône prend sa source en Suisse. Les Alpes, le Jura, les Cévennes et les Vosges forment la majeure partie de son bassin hydrographique avec des altitudes maximales respectives de 4807, 1718, 1699 et 1424 mètres. Le caractère montagneux de la rivière et l'énorme volume déversé annuellement par rapport à sa longueur ont conduit à la construction de 66 barrages hydroélectriques sur la rivière et ses affluents. Environ 7 % du débit annuel est stocké dans ces réservoirs (Pont et al., 2002).

Les montagnes alpines (bassins versants du Rhône, de l'Isère et de la Durance) sont principalement composées de roches sédimentaires (alluvions, sables, grès, conglomérats, schistes, calcaires, dolomies et schistes), auxquelles s'ajoutent quelques roches cristallines siliceuses et métamorphiques (granites et gneiss). Les montagnes du Jura et des Vosges au nord (bassin versant de la Saône) sont principalement calcaires, tandis que les montagnes des Cévennes à l'ouest (bassin versant de l'Ardèche et de la Cèze) sont principalement siliceuses cristallines, avec quelques dépôts sédimentaires sur leurs bords. Le Rhône se divise en deux branches inégales "Grand Rhône" et "Petit Rhône" à cinquante kilomètres en amont de son embouchure. Le Grand Rhône, d'une longueur de 52 kilomètres, draine environ 90 % des eaux, mais cette proportion peut atteindre 85 % en cas de crue. Le "Petit Rhône" a une longueur de 60 km et se caractérise par un parcours sinueux (Ibañez et al., 1997).

Les fortes variations climatologiques observées sur le bassin versant englobent les régimes pluviométriques océaniques, continentaux et méditerranéens. Le régime hydrologique du Rhône résulte de la fonte des glaciers, de la fonte des neiges et des pluies (Ollivier et al., 2011). Les débits plus élevés au printemps sont dus à la fonte saisonnière des glaciers et de la neige (principalement dans la région des Alpes), mais les variations de débit les plus importantes sont dues à des tempêtes isolées qui se produisent généralement dans la partie inférieure du bassin versant, comme les Alpes du Sud ou les Cévennes. Par conséquent, le débit solide de la rivière présente une forte variation interannuelle. Son débit solide extrapolé sur plusieurs années varie entre 1,2 et  $22,7 \times 10^6 \text{ t.an}^{-1}$  sur la base de la mesure des particules en suspension au cours de plusieurs périodes (1992 à 1996 et 2001 à 2003) (Ollivier et al., 2010; Ollivier et al., 2011; Pont, 1997; Pont et al., 2002; Sempéré et al., 2000).



**Figure II.9 :** Carte géologique du bassin versant du Rhône (Ollivier et al., 2011).

#### II.1.5.1 Etat de pollution de la baie de Marseille

La pollution marine est l'un des problèmes prioritaires de l'environnement méditerranéen. Cette pollution provient de multiples sources. Le Plan d'Action pour la Méditerranée a montré que peu de grandes villes étaient responsables d'une fraction importante des apports des zones urbaines et devraient être considérées comme des points chauds.

La baie de Marseille, directement affecté par les flux de contamination chimique résultant de l'agglomération urbaine de Marseille (Fig. II.10). selon [Sauzade et al. \(2009\)](#) ces entrées concernent principalement :

- ❖ Les rejets du réseau d'assainissement qui draine les eaux usées domestiques et industrielles ;
- ❖ Les cours d'eau semi-artificiels et les exutoires des eaux pluviales non traitées ;
- ❖ Les effluents du système principal d'assainissement qui sont traités par une grande station d'épuration primaire et secondaire (STEP), d'une capacité de 1,8 million d'habitants équivalents.

Les cours d'eau sont principalement des oueds côtiers dont les bassins versants couvrent 560 km<sup>2</sup>. La zone urbaine est bordée par la Méditerranée sur sa façade occidentale avec une longueur de côte linéaire de 50 km (en dehors des îles). Côté ville, la baie de Marseille comprend trois secteurs principaux :

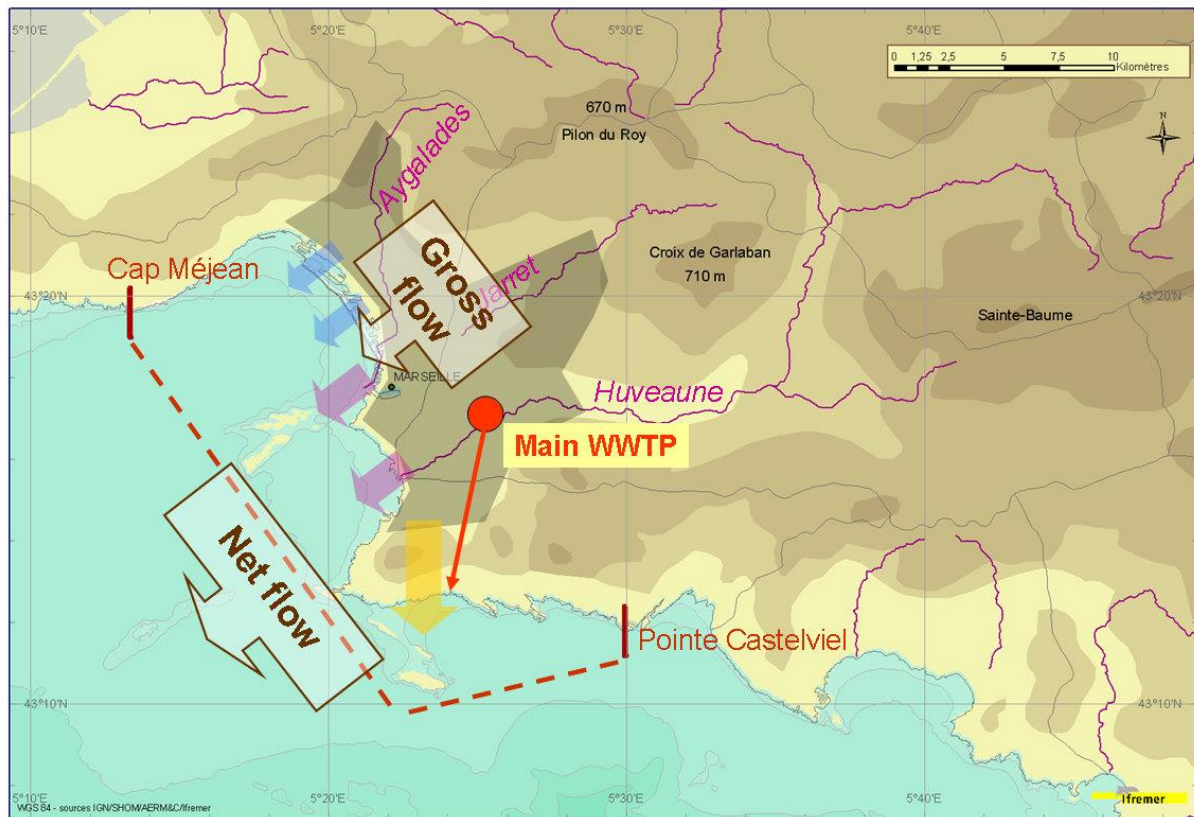
- ❖ Le port nord fortement urbanisé, avec des installations industrielles et commerciales liées aux activités portuaires ;
- ❖ Le port du sud urbanisé avec des activités balnéaires, qui reçoit le flux naturel de l'oued principale, Huveaune, ne coule que pendant les conditions de tempête ;
- ❖ Le front de mer sud au relief très escarpé, qui reçoit dans la crique de Cortiou à la fois l'exutoire principal de la station d'épuration et le débit de l'Huveaune dans des conditions normales.

Le plateau continental est étroit dans ce secteur et la profondeur dans la baie augmente pour atteindre 100 mètres près de sa limite extérieure.

La pollution par les métaux traces dans le golfe de Lion et la baie de Marseille ainsi que les apports du Rhône a fait l'objet de plusieurs travaux ([Delile et al., 2021](#); [Delile et al., 2020](#); [Ollivier et al., 2010](#); [Ollivier et al., 2006](#); [Ollivier et al., 2011](#); [Oursel et al., 2013](#); [Oursel et al., 2014a](#); [Oursel et al., 2014b](#); [Radakovitch et al., 2008](#); [Roussiez et al., 2006](#); [Roussiez et al., 2005](#)).

Au niveau de Marseille, une plus large gamme de contaminants métalliques (comme le Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn) est présente dans les sédiments à des concentrations supérieures aux valeurs

guides (Briand et al., 2022). Ces signes de contamination sont similaires à ceux mis en évidence en 2016 par Bouchoucha et al. (2018).



**Figure II.10 :** Flux de pollution de l'agglomération marseillaise (Sauzade et al., 2009).

#### II.1.5.2 Intrusion du Rhône dans la baie de Marseille

Marseille est la deuxième plus grande ville de France avec une population de plus d'un million d'habitants. Les activités humaines impactent fortement le milieu marin de la baie de Marseille, notamment lors des inondations (Oursel et al., 2014a), lorsque de fortes concentrations de nutriments et de produits chimiques sont rejetées dans la mer par la station d'épuration. Cependant, même pendant ces inondations extrêmes, le débit d'eau associé est bien inférieur à l'apport moyen des produits chimiques et des nutriments du Rhône dans le golfe de Lion. Le Rhône ne se jette pas directement dans la baie de Marseille mais se situe à environ 35 km à l'ouest. Il représente le plus grand apport d'eau douce dans la mer Méditerranée avec un apport moyen d'environ 1700 m<sup>3</sup>/s (Pont et al., 2002). Le Rhône reçoit de nombreux apports anthropiques le long de son parcours vers la Méditerranée, y compris divers rejets industriels, les sorties des stations d'épuration et les ruissellements des régions agricoles entraînant de grandes quantités de produits chimiques stockés et transportés sous forme de matière organique et inorganique (Pujo-Pay et al., 2006). Selon les travaux de Fraysse et al. (2014) sur les

intrusions d'eau diluée du Rhône dans la baie de Marseille au cours de la période d'étude de 2007 à 2011, ont montré que les intrusions du Rhône se sont produites en moyenne 7,6 fois par an et ont touché plus fréquemment la partie nord de la baie. Une classification des événements d'intrusion en trois catégories est proposée (courte durée, moyenne et longue) en fonction de leur durée et de leur étendue spatiale. Les intrusions semblaient être déterminées par : (i) le forçage du vent, (ii) la présence d'un tourbillon à méso-échelle, (iii) le volume du débit du fleuve Rhône, et (iv) la variation de la profondeur de la thermocline (Frayssé et al., 2014). Une intrusion a un impact important sur le fonctionnement biogéochimique de la baie de Marseille en apportant de grandes quantités de produits chimiques dans la baie. Par conséquent, l'impact écologique dépend fortement du type d'intrusion, les grandes intrusions ont l'impact le plus élevé (Frayssé et al., 2014).

## II.2 Echantillonnage

### II.2.1 Stratégie d'échantillonnage

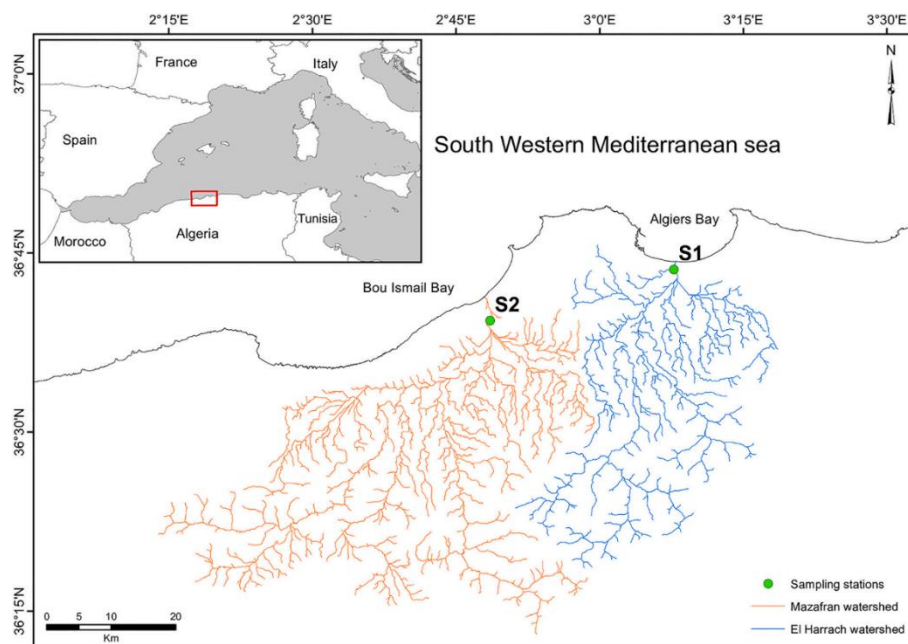
La zone d'étude comporte la zone algéroise (baie d'Alger et de Bou-Ismaïl), ainsi que les deux oueds qui se déversent dans ces deux baies. La baie de Marseille a été retenue comme partie de la zone d'étude, ce qui permettra de faire une étude comparative entre la rive nord et la rive sud de la mer méditerranée.

Afin de déterminer les apports naturels et anthropiques des éléments traces métalliques dans la zone algéroise, deux sites de prélèvement ont été retenus,

- Le site S1 (36°43'51,31''N / 3°7'41,35''E) (Fig. II.11) situé dans l'oued El Harrach, à 1,5 Km de l'exutoire de l'oued vers la baie d'Alger au niveau du pont El Harrach ;
- Le site S2 (36°39'34,20''N / 2°48'36,57''E) (Fig. II.11) situé dans l'oued Mazafran, à 12 Km de l'exutoire de l'oued vers la baie de Bou-Ismaïl au niveau du pont de Magtaâ Kheira.

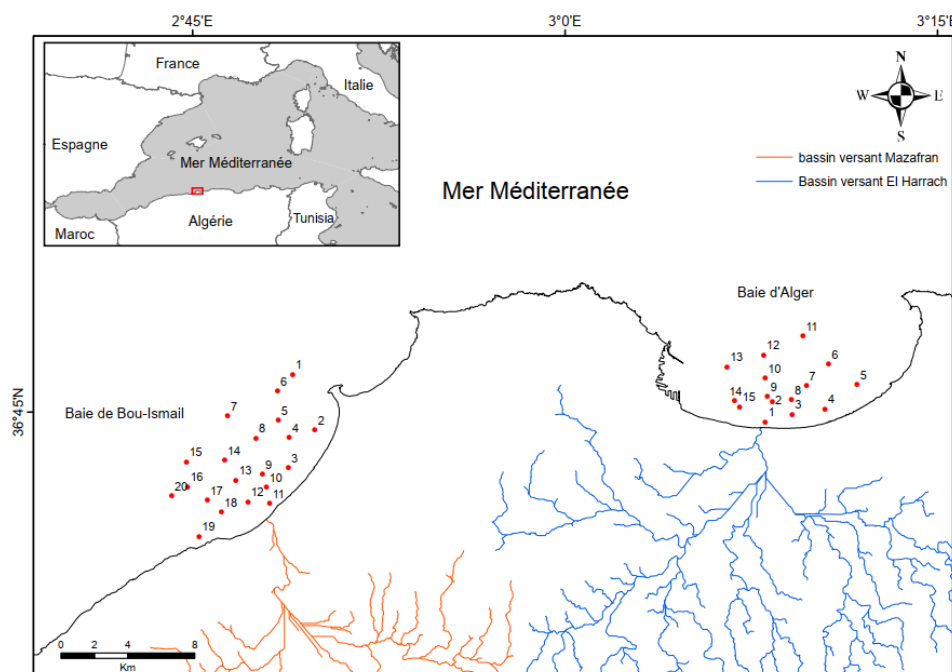
La sélection des deux stations repose sur deux points essentiels :

- La faisabilité de faire un prélèvement manuel sans risque pour le préleveur ;
- L'absence de toute influence maritime sur l'échantillon prélevé, afin de caractériser la charge polluante en élément trace métallique entrant vers la mer Méditerranée.



**Figure II.11** : Sites de prélèvement au niveau de l’oued El Harrach et l’oued Mazafran.

Afin de déterminer l’impact des rejets des oueds El Harrach et Mazafran et définir la dispersion en surface de la contamination récente dans les sédiments superficiels, deux campagnes de prélèvement de sédiment marin ont été réalisées en face l’embouchure des deux oueds. La première campagne réalisée en baie d’Alger en mars 2016 où le prélèvement de 15 stations de sédiment superficiels a été effectué. Tandis que la deuxième campagne a été faite en baie de Bou-Ismaïl en juillet 2017 où 20 stations de prélèvement de sédiment superficiel ont été échantillonnées (Fig. II.12).



**Figure II.12** : Positionnement des stations de prélèvement du sédiment marin superficiel au niveau des deux baies (Alger et Bou-Ismaïl).

L'étude de l'historique de la contamination des sédiments marin et la reconstitution de l'accumulation des métaux au cours du dernier siècle a été réalisée par le prélèvement des carottes sédimentaires dans des zones de sédimentation (embouchure d'oued). Deux carottes sédimentaires ont été prélevées : i) la première carotte en baie d'Alger : 36°46'53"N, 3°7'59"E à une profondeur de 48 m, ii) la deuxième carotte a été prélevée en baie de Marseille (rade de Marseille) : 43°17,795'N, 05°17,756'E à une profondeur de 69 m.

### II.2.2 Prélèvements d'eau dans l'oued El Harrach et Mazafran

Le suivi temporel dans les eaux des oueds a été réalisé durant vingt-quatre (24) campagnes de prélèvement, avec une fréquence d'un prélèvement bimensuel (deux prélèvements par mois). Elles ont eu lieu entre Août 2017 et Juillet 2018. Une attention particulière a été accordée à la nature et à la propreté du matériel utilisé pour le stockage des échantillons afin d'éviter tout risque de contamination ([AQUAREF, 2015](#); [Loire-Bretagne, 2006](#)). L'eau a été prélevée manuellement à l'aide d'un seau et une corde sur un pont (stations S1 et S2).

Sur le terrain, les échantillons d'eau destinées à l'analyse des métaux trace dissous ont été filtrés à l'aide de filtre à seringue de 0,22 µm dans des flacons de 30 ml et acidifiée avec de l'acide nitrique (trois à quatre gouttes de l'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) pour obtenir un pH ~1). Ils ont été ensuite conservés au congélateur jusqu'au jour de l'analyse. Pour l'analyse des métaux traces particulaires, l'eau prélevée a été mise dans des flacons en polyéthylène, qui ont été rincées précédemment avec l'eau de l'oued à plusieurs reprises. Les eaux prélevées ont été conservées dans une glacière et transportées directement et rapidement au laboratoire ([Ollivier et al., 2011](#); [Radakovitch et al., 2008](#)).

La mesure des paramètres physico-chimiques (pH, température, conductivité) a été également effectuée sur le terrain à l'aide d'un appareil multisondes (Testr 35 series (PCSTestr 35)) étalonné avant chaque campagne de prélèvement.

### II.2.3 Prélèvements en mer

Le prélèvement de sédiment superficiel a été effectué au moyen d'une benne preneuse en acier inoxydable de type Van Veen d'un poids d'environ 5 Kg. Les deux campagnes ont été réalisées à bord du bateau Baba-Aroudj (baie d'Alger) et l'embarcation El Awras (baie de Bou-Ismaïl). Une fois la benne remontée sur le bateau ou l'embarcation, les échantillons sont prélevés à l'aide d'une spatule en plastique qui est à chaque fois rincée pour éviter toute contamination. L'échantillon est prélevé en évitant le sédiment en contact avec les parois de la benne. Ils sont

ensuite mis dans des sacs en plastiques sur lesquels sont inscrites les coordonnées de chaque station, la profondeur, la date et la zone d'étude (Claude Alzieu, 2000).

Le prélèvement de la carotte sédimentaire a été réalisé par un carottier de type "Corer-coreschneider" en baie d'Alger à bord du bateau Baba-Aroudj le 23/08/2017. Le carottier a une longueur de 1 m et un diamètre de 8,5 cm. Il pénètre dans le sédiment meuble par gravité et crée un trou qui représente la carotte de sédiment en question. Cette dernière est retenue dans un tube en PVC par un système spécifique de fermeture juste après la sortie du carottier du sédiment. La carotte prélevée a une profondeur de 34 cm. Tandis que, la carotte de Marseille a été prélevée en tête de canyon de Cassidaigne le 3/10/2018 par un carottier interface type "UWITEC" à bord du NO Antédon II lors de l'école de terrain en mer des étudiants du M2 « Géosciences de l'Environnement ». La carotte a une profondeur de 28 cm.

Le positionnement des prélèvements de sédiments par benne et par carottier a été effectué à l'aide d'un DGPS (Differential Global Positioning System) et la profondeur par un Echosondeur.

## **II.2.4 Traitement des échantillons au laboratoire**

### **II.2.4.1 Filtration des échantillons aqueux**

Au laboratoire, 100 ml d'échantillons d'eau (eau prélevé des deux oueds) ont été rapidement filtrés à travers des filtres en acétate de cellulose (SARTORIUS) de 0,2 µm pré-pesés. Les filtres contenant les particules en suspension ont été pesés à nouveau après séchage à l'étuve (40° C pendant 24H) pour déterminer le poids des matières en suspension (MES) avant la digestion acide pour l'analyse des métaux traces particulaire (Rodier et al., 2009).

La concentration de MES est donnée par l'expression :

$$[\text{MES}] \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = [(\text{P}_2 - \text{P}_1) / \text{V}]$$

Où :

- **P<sub>1</sub>** : poids du filtre avant filtration (mg) ;
- **P<sub>2</sub>** : poids du filtre après filtration (mg) ;
- **V** : volume d'eau filtrée (L).

### **II.2.4.2 Traitement des sédiments marins**

Les carottes sédimentaires sont découpées à l'aide d'un dispositif spécifique au sectionnement selon les épaisseurs de tranches de sédiments choisies pour mieux cerner la variation de la concentration des métaux en fonction de la profondeur :

- Tranches de 0,5 cm d'épaisseur de la surface de la carotte jusqu'à 2 cm de profondeur ;
- Tranches de 1 cm d'épaisseur de 2 à 10 cm de profondeur ;
- Tranches de 2 cm de 10 cm jusqu'à la base de la carotte.

Les échantillons de sédiments marins (superficiel et profond) destinés à l'analyse des métaux traces sont congelés à -18°C, alors que les échantillons destinés à la mesure de la granulométrie ont été conservés au réfrigérateur (4°C).

Les échantillons de sédiments destinés à l'analyse des métaux traces ont subi une série de traitements consécutifs :

#### **a. Lyophilisation**

Il s'agit d'un procédé de séchage sous vide à basse température pour les produits liquides déjà surgelés. Les échantillons du sédiment congelés sont placés au lyophilisateur du type CHRIST pendant 48 heures sous vide ( $10^{-1}$  bar) et à très basses températures (-50 C° à -60 C°). La lyophilisation consiste à éliminer progressivement l'eau du produit précédemment congelé (phase solide) jusqu'à la phase vapeur, sans passer par la phase liquide. Ce changement d'état s'appelle la sublimation.

Ce moyen de déshydratation est préférable à celui de l'évaporation dans l'étuve parce que dans ce dernier cas l'augmentation de température peut conduire à la perte des métaux les plus volatiles en particulier le mercure ([Charlou and Joanny, 1983](#)).

#### **b. Broyage**

Les échantillons de sédiments lyophilisés sont broyés à l'aide d'un mortier en porcelaine jusqu'à l'obtention d'une poudre fine. Cette dernière est récupérée dans des piluliers en plastique et stockée jusqu'au jour d'analyse.

### **II.3 Analyse des échantillons**

#### **II.3.1 Analyse des éléments traces métalliques par ICP-MS et éléments majeurs par ICP-AES**

Le service d'analyse chimique élémentaire "LA-ICP-MS" (Fig. II.13) est labellisé "plateforme technique Aix-Marseille Université". Ce service réalise l'analyse chimique élémentaire en solution de 90% des éléments du tableau périodique par ICP-MS ou ICP-AES.

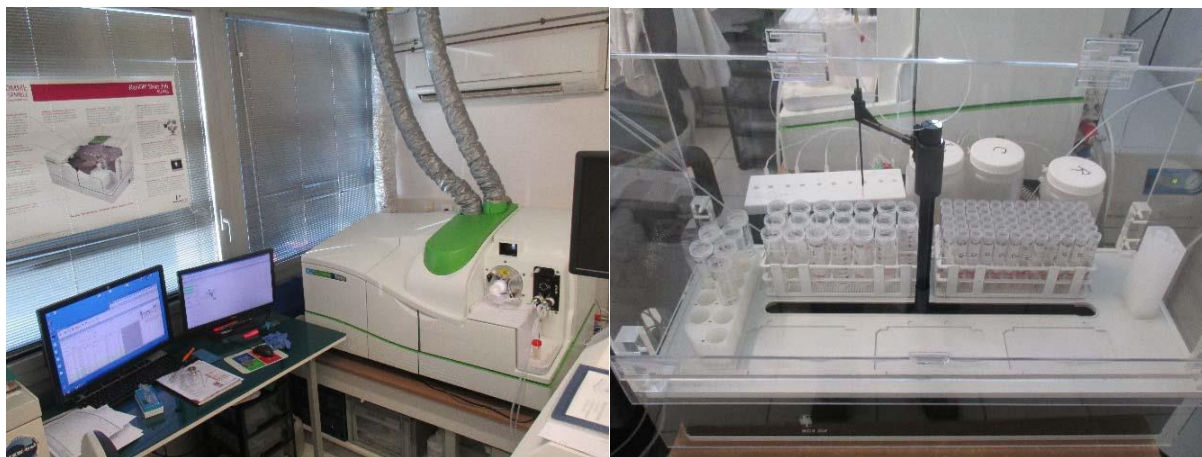
##### **II.3.1.1 ICP-MS Quadripolaire Perkin Elmer NexIon 300X**

Cet appareil permet:

- L'Analyse chimique élémentaire de 90% des éléments du tableau périodique ;
- Le dosage de traces ( $\mu\text{g/L}$ ) et d'ultra-traces ( $\text{pg/L}$ ) ;

- Le Travail en mode collision (He) pour minimiser les interférences spectrales : par exemple la limite de quantification de As75 est de l'ordre de 10 pg/L même en présence d'HCl.

Le Passeur rapide d'échantillon ESI SC-4 DX FAST qui permet de réduire les temps d'analyses et l'analyse de grandes séries d'échantillons (jusqu'à 240 échantillons).

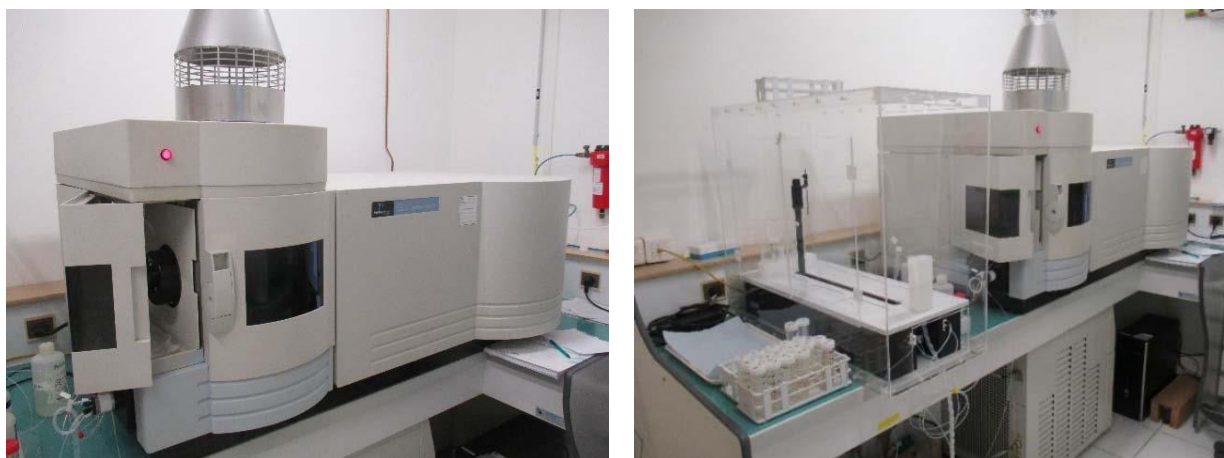


**Figure II.13 :** ICP-MS Quadripolaire Perkin Elmer NexIon 300X.

### II.3.1.2 ICP-AES PERKIN ELMER 4300 DV

Cet appareil permet le:

- Dosage de majeurs et mineurs (mg/L) ;
- Analyses en visée axiale ou radiale selon la sensibilité recherchée ;
- Détection simultanée par CCD ce qui permet un temps d'analyse inférieur à 2'30s quel que soit le nombre d'éléments à analyser. Ceci est aussi possible par l'utilisation d'un passeur rapide d'échantillon ESI SC-4 DX FAST.

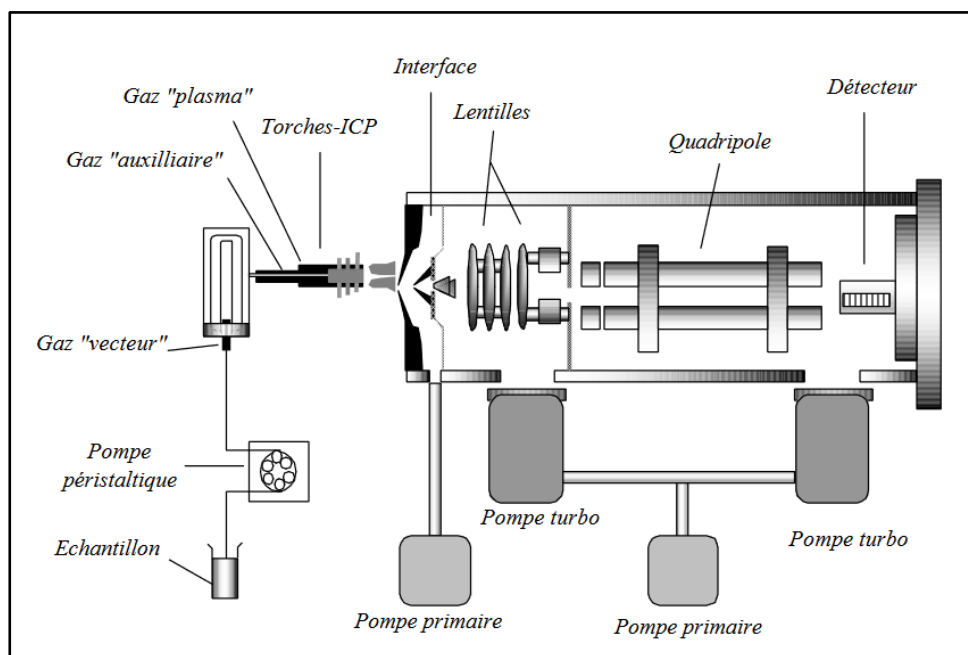


**Figure II.14 :** ICP-AES Perkin elmer 4300 dv

### II.3.1.3 Généralités relatives au principe des ICP-MS

Schématiquement, une ICP-MS comprend quatre parties importantes (Fig. II.15) : (Bouhnik-Le Coz et al., 2001).

- Un système d'introduction couplé à un générateur d'ions, en l'occurrence une torche à plasma d'argon à très haute température ;
- Une interface et un système de focalisation des ions ;
- Un séparateur de masse de type quadripôle ;
- Un détecteur d'ions.



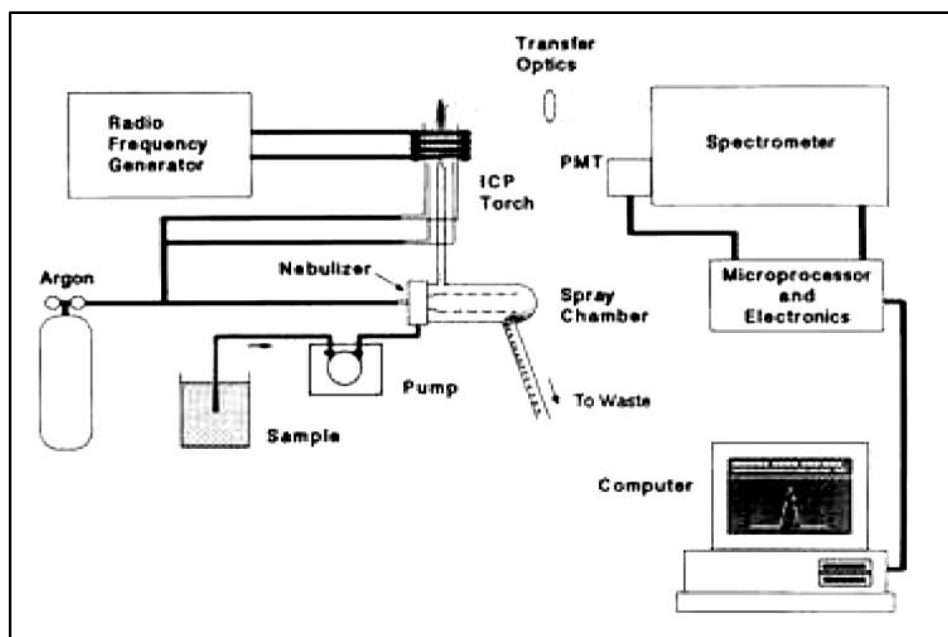
**Figure II.15 :** Schéma type d'une ICP-MS.

### II.3.1.4 Généralités relatives au principe des ICP-AES

Un spectromètre ICP-AES peut être divisé en quatre parties (Fig. II.16) :

- Le système d'introduction de l'échantillon ;
- Le système d'atomisation et d'excitation ;
- Le système optique;
- Le système de détection.

Les composés d'un spectromètre ICP-AES sont illustrés sur la figure suivante :



**Figure II.16** : Schéma de l'appareillage d'un spectromètre ICP-AES.

### II.3.1.5 Corrections de dérive, d'interférence et de blanc

#### a) Les dérives au cours du temps

Les résultats d'une mesure par ICP-MS sont donnés en nombre de coups par seconde pour un rapport masse/charge donné. Ceci impose que la réponse coup/concentration du système ait été préalablement établie. Ceci implique également que les effets de dérive de l'instrument induit, par exemple, par un bouchage progressif des cônes au cours du temps, soient corrigés,

Deux types de standardisation sont possibles pour corriger de tels effets :

**1) Standardisation externe** : cette standardisation consiste à intercaler entre les échantillons à analyser, à un pas de temps régulier, des solutions standards multi-élémentaires, synthétiques ou naturelles, et de concentrations connues. Cette méthode a l'avantage de pouvoir corriger les effets de dérive survenant sur la totalité du spectre de masses. A l'inverse, elle a comme inconvénient de pouvoir introduire des biais dans les corrections, liés aux éventuelles différences de matrice entre les échantillons et les solutions standards.

**2) Standardisation interne** : cette deuxième standardisation consiste à ajouter un élément de concentration connue et peu, ou non présent dans les échantillons. L'élément le plus fréquemment utilisé est l'indium ( $\text{In}_{115}$ ) (ou  $\text{Rh}_{103}$ ). A l'inverse de la précédente, cette correction n'est pas sujette au problème des différences de matrice. Par contre, elle peut s'avérer peu efficace pour des éléments ayant un rapport masse/charge très différent de celui de l'indium, comme les éléments légers par exemple.

**b) Les interférences**

Comme nous l'avons indiqué plus haut, le pouvoir séparateur des ICP-MS étant fonction du rapport masse/charge, des interférences peuvent se produire au niveau du détecteur induisant des erreurs dans la mesure des concentrations de certains éléments. Quatre grands types d'interférences sont à considérer :

- 1) Celles dues à l'existence de deux isotopes de même masse pour deux éléments différents ; exemple :  $^{87}\text{Rb}$  (+) sur  $^{87}\text{Sr}$  (+), et inversement ;
- 2) Celles dues à la formation d'oxydes et/ou d'hydroxydes ; exemple :  $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}$  (+) sur  $^{56}\text{Fe}$ (+), ou  $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}_2\text{H}$  (+) sur  $^{57}\text{Fe}$  (+) ;
- 3) Les interférences dues aux ions ou aux molécules ionisées doublement chargées ; exemple  $^{138}\text{Ba}$  (++) sur  $^{69}\text{Ga}$  (+) ;
- 4) Celles dues aux molécules poly atomiques de type ArNa, ArCl.

**c) Les blancs**

Un troisième groupe de corrections communément effectuées lors des analyses par ICP-MS est la soustraction des blancs dus aux pollutions du système lui-même (effets de mémoire) ou aux pollutions des réactifs et matériels utilisés lors de la préparation des échantillons.

**II.3.1.6 Etalonnage et standards de référence**

L'étalonnage des ICP-MS est classiquement effectué à l'aide de solutions "étalons" préparées à partir de solutions mères du commerce, aux concentrations élémentaires certifiées. La justesse des résultats est quant à elle établie en analysant successivement des standards internationaux aux concentrations certifiées par les fournisseurs et/ou ayant fait l'objet d'analyses croisées et répétées par plusieurs laboratoires. En général, on essaie d'utiliser des standards internationaux de même type que nos échantillons.

**II.3.2 Métaux traces et majeurs dans les sédiments marins**

Les concentrations en éléments traces et majeurs dans les carottes et les sédiments superficielles ont été analysées au laboratoire du Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement (CEREGE, Aix-en-Provence, France). Dans notre étude, on a appliqué la méthode EPA, 3051A (ISO 14869-3, 2017) qui permet l'extraction du métal totale adsorbé à la surface des grains par une digestion effectuée par une combinaison d'acides fluorhydrique (HF), nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) et chlorhydrique (HCl) avec ajout de peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Tout d'abord, tous les sédiments lyophilisés ont été réduits en poudre par un mortier d'agate, puis une quantité de  $100 \pm 5$  mg de cet échantillon a été pesée dans des tubes micro-ondes en téflon (15 ml), et 2 ml d'HCl à 37 %, 2 ml de  $\text{HNO}_3$  à 68 %, 1 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  à 35

% et 1 ml de HF à 47 % ont été progressivement ajoutés dans les tubes. L'excès de HF a été neutralisé par complexation avec  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Par la suite, les mélanges ont été digérés dans des conditions de température et de pression élevées dans un four à micro-onde à chambre de réaction unique (Milestone UltraWAVE® micro-onde (Fig. II.17)). Un lot de 12 échantillons est automatiquement descendu dans la chambre de réaction, la chambre est scellée et pressurisée avec un gaz inerte ( $\text{N}_2$ , 99,5 Linde, pression 30 bars), puis une procédure de digestion en cinq étapes est appliquée, l'énergie micro-onde est autorégulée pour atteindre les critères de température (étape 1 : rampe de T à 120° C en 15 min, étape 2 : reste 120° C pendant 15 min, étape 3 rampe : à 220° C en 15 min, étape 4 : maintenue à 220° C pendant 20 min et étape 5 : refroidissement à température ambiante, pression relâchée et portoir levé automatiquement). Après refroidissement, les résidus de la digestion ont été dilués avec du  $\text{HNO}_3$  ultra pur à 2 % dans des tubes en polyéthylène de 50 ml et stockés à 4 °C. Les concentrations totales de métaux traces (Mn, V, Co, Ni, Cr, Cu, Zn, Pb, As et Cd) et d'éléments majeurs (Fe) ont été mesurées à l'aide de la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP- MS, Perkin Elmer NexION 300X, USA) et la spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-AES, Perkin Elmer Optima 4300 DV, USA), respectivement,

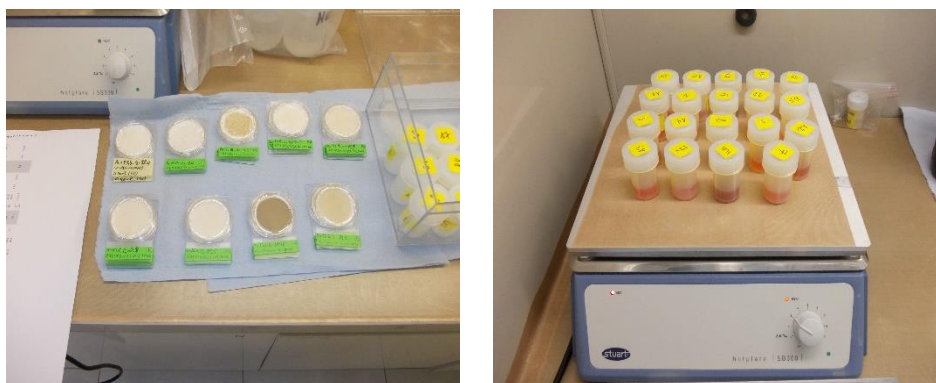


**Figure II.17 :** Minéralisation des échantillons par micro-onde.

### II.3.3 Métaux traces et majeurs particulières (MES)

Onze éléments traces sélectionnés (Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, Ni, Co, Mn, As, V et Fe) dans les MES ont été déterminés après une digestion acide sur plaque chauffante effectuée dans des tubes en téflon nettoyés à l'acide (Fig. II.18). Pour les échantillons prélevés sur filtres en acétate, les filtres ont été préalablement desséchés pour estimer le poids des MES, puis ils ont été humidifiés afin de les insérer dans les tubes en téflon (Ollivier et al., 2010; Radakovitch et al., 2008). Tous les réactifs sont de qualité analytique, 3 ml de HCl (37%), 4 ml de  $\text{HNO}_3$  (68%), 20 gouttes de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (35%) et 0,5 ml de HF (47–51%) ont été progressivement ajoutés dans les

tubes. Les mélanges ont été digérés sur une plaque chauffante (Fig. II.18) à 170° C (pendant 2 h), puis à 250° C pendant environ 2 jours (Benhalima et al., 2022; Delile et al., 2020). Les solutions d'échantillons étaient toutes claires, indiquant que les échantillons des MES s'étaient complètement décomposés. Les solutions ont ensuite été diluées avec du HNO<sub>3</sub> ultra pur à 2% dans des tubes en PE de 50 ml et stockés à 4 °C. Les échantillons sont ensuite analysés selon la méthode décrite dans la section (II.3.2).



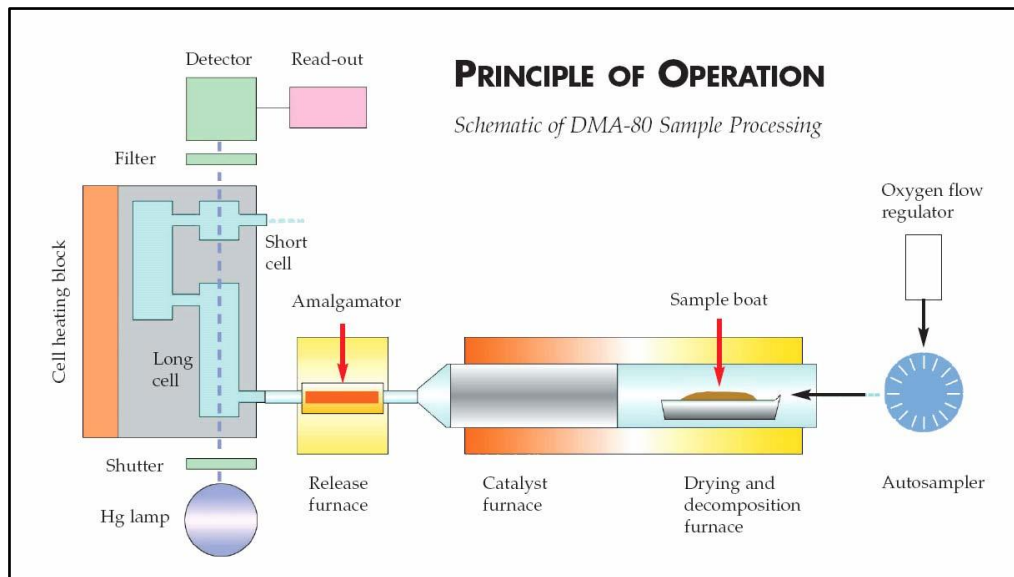
**Figure II.18 :** Digestion des filtres sur la plaque chauffante.

### II.3.4 Analyse du mercure total

Pour la détermination du mercure total, l'analyseur direct de mercure DMA-80 (Milestone) de la plateforme AETE-ISO "Plateforme AETE-ISO, OSU-OREME/Université de Montpellier" a été utilisé. L'étalonnage de l'instrument et la procédure analytique ont été effectués conformément à la norme EPA 7473. Les mesures ont été effectuées sur environ 0,1 g de sédiment sans aucun prétraitement. La limite de quantification (LQ) était de 0,02 ng/g. le control de qualité a été réalisé par un échantillon de référence « Stream Sediment NCS DC 73310 ».

L'analyseur DMA-80 se compose de quatre compartiments (i) four de décomposition (ii) four catalyseur (iii) four de libération (amalgamateur) et (iv) SAA. Les échantillons de sédiments sont introduits dans l'analyseur de mercure DMA-80 par le passeur automatique intégré. Avant la combustion, l'échantillon est initialement séché dans un flux d'oxygène qui traverse un tube en quartz situé à l'intérieur d'un four à résistance. L'échantillon est ensuite décomposé thermiquement sous oxygène. Les gaz de combustion sont par la suite décomposés dans une colonne catalytique à 750°C, où sont aussi piégés les halogénures et oxydes. Les produits de décomposition restants sont alors transportés jusqu'à l'amalgamateur d'or qui piège sélectivement le mercure. Le flux continu d'oxygène élimine tous gaz résiduels ou produits de décomposition. L'amalgamateur est alors rapidement chauffé, désorbant la vapeur de mercure

vers les cellules de mesure où la hauteur du pic d'absorbance est mesurée à 253.7 nm. Le programme entier de température et le cycle de mesure durent moins de cinq minutes par échantillon (Maggi et al., 2009; Roy and Bose, 2008). La Figure II.19 présente le principe de l'analyseur de mercure.



**Figure II.19 :** Principe de fonctionnement de l'analyseur de mercure DMA 80.

### II.3.5 Matière organique dans les sédiments marins

L'une des méthodes d'évaluation de la teneur de la matière organique dans le sédiment est la perte au feu (Rodier et al., 2009). L'évaluation de la matière organique se fait par la méthode de perte au feu ; le principe de la méthode repose sur l'incinération des échantillons de sédiment séchés ou lyophilisés dans un four à moufle à 550° C pendant 4 heures afin de brûler toute la matière organique suivant la méthode décrite par (Heiri et al., 2001).

#### Mode opératoire:

- Décongélation du sediment;
- Pesée des échantillons de sédiment lyophilisés dans des creusets avec une balance de précision, on obtient alors le poids (P1) ;
- Incinérer les échantillons pesés au four à moufle à 550 °C pendant 4 heures ;
- On effectue une deuxième pesée (P2) qui est le poids du sédiment calciné ;
- La différence du poids entre P1 et P2 représente le poids de la matière organique contenu dans le sédiment.

$$\text{M.O. (g)} = \text{P1-P2}$$

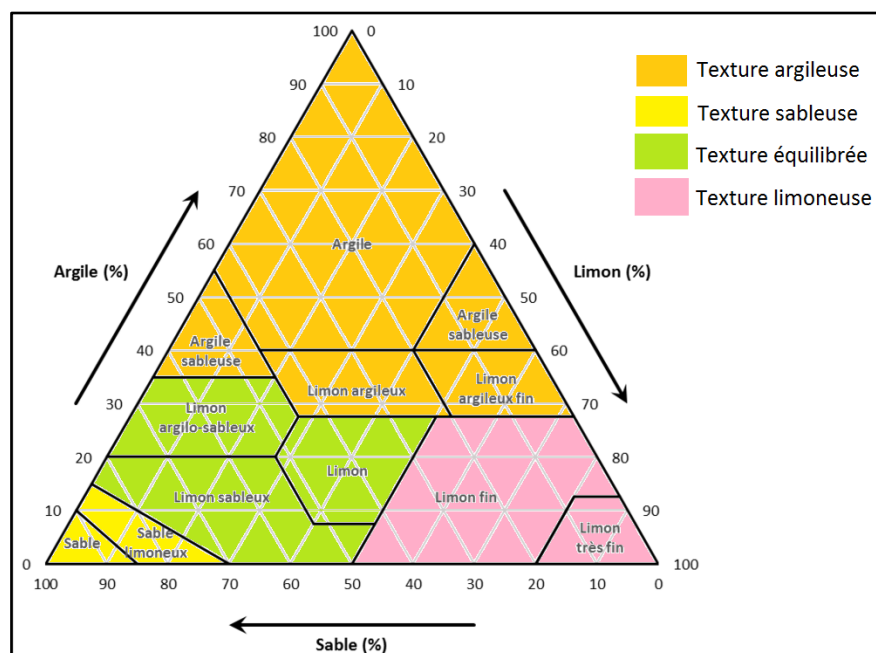
Le taux de la matière organique (MO) est exprimé par la formule suivante :

$$\text{MO (\%)} = ((\text{P1-P2}) / \text{P1}) * 100$$

### II.3.6 Granulométrie laser

La granulométrie des sédiments de surface a été mesurée au CEREGE par un granulomètre laser de type LS 13320 Beckman Coulter ((Beckman Coulter, Fullerton, CA, USA). Avant la mesure avec cet appareil (plage de mesure : 0,04–2000  $\mu\text{m}$ ), le composant organique de l'échantillon d'eau a été oxydé à l'aide d'une solution de peroxyde d'hydrogène à 30 % ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) à 200° C. La fraction restante a ensuite été remise en suspension dans une solution d'hexamétaphosphate à 0,3 % et sous-échantillonnée sous agitation (800 tr/min) pour correspondre aux fenêtres d'obscurcissement optimale du laser et du système de polarisation de la lumière entre 8% et 16% et entre 50% et 70%, respectivement. Le modèle de calcul de la taille volumétrique des particules a été réalisé conformément à la théorie de Fraunhofer et de Mie. Un indice de réfraction de l'ordre de la kaolinite a été utilisé pour la phase solide ( $\text{RI} = 1,56$ ). Chaque échantillon a été analysé 6 fois (90 s chacune) avec une circulation d'eau à 80% et le résultat finalement enregistré est une moyenne des 5 derniers passages, car quelques bulles d'air altèrent parfois le premier passage juste après la phase de rinçage (Lepage et al., 2022; Lepage et al., 2019). La reproductibilité de la taille de l'échantillon basée sur des mesures répétées indépendantes du même échantillon n'a pas dépassé 2 % de résidu.

Les sédiments peuvent avoir des granulométries très différentes. On distingue les argiles de taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$ , les limons de 2 à 50  $\mu\text{m}$  et les sables de 50  $\mu\text{m}$  à 2 mm. Les sédiments peuvent alors être typés selon la teneur respective de ces trois composés en utilisant, par exemple, un système de coordonnées triangulaires (Fig. II.20).



**Figure II.20 :** Diagramme triangulaire de classification des sédiments en fonction de leur texture.

#### II.4 Évaluation de la contamination et des risques écologiques dans les sédiments marins et les MES

Les méthodes d'analyse de la contamination des sédiments comparent l'état actuel des sédiments avec leur état antérieur à l'ère industrielle. Certaines de ces méthodes tiennent même compte des effets de la contamination par les métaux traces sur les organismes vivants. Ces méthodes d'évaluation peuvent être classées en trois groupes principaux : 1) celles qui exposent l'étendue de la pollution anthropique dans les sédiments, 2) celles qui évaluent plutôt l'impact de la contamination sur l'écosystème et 3) celles qui présentent la limite et/ou des valeurs de référence (Balik and Tunca, 2015). Les valeurs de référence les plus couramment utilisées sont celles proposées par Turekian and Wedepohl (1961). Dans cette étude, nous avons choisi l'utilisation d'un fond géochimique local (Athmani et al., 2022; Inal, 2020; Inal et al., 2018). Pour évaluer la qualité des sédiments recueillis dans cette étude, les méthodes d'évaluation présentées ci-dessous ont été utilisées.

##### II.4.1 Indice de Géoaccumulation (Igeo)

L'indice de géo-accumulation (Igeo) introduit par Müller (1969) a été utilisé pour évaluer le degré de pollution par les métaux traces dans les particules en suspension (MES) et les sédiments marins (Guendouzi et al., 2021; Turner and Millward, 2000) qui est représenté ci-dessous :

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1,5 B_n)$$

Où  $C_n$  est la concentration en métaux traces et  $B_n$  est la valeur de fond géochimique. Dans ce document, nous utilisons une valeur du fond géochimique locale établie par Inal et al. (2018). Pour tenir compte des éventuelles variations des valeurs du fond géochimique, un facteur de 1,5 est appliqué. Cette méthode permet d'évaluer le degré de pollution métallique en fonction de sept classes d'enrichissement basées sur les valeurs numériques croissantes de l'indice (Tab. II.5).

**Tableau II.5 :** Intensité de la contamination métallique en fonction des valeurs de l'indice (Igeo), d'après Müller (1986).

| Classe | Valeur                  | Intensité de la pollution                  |
|--------|-------------------------|--------------------------------------------|
| 0      | $I_{geo} \leq 0$        | Pas de pollution                           |
| 1      | $0 \leq I_{geo} \leq 1$ | De non polluer à modérément polluer        |
| 2      | $1 \leq I_{geo} \leq 2$ | Modérément pollué                          |
| 3      | $2 \leq I_{geo} \leq 3$ | De modérément polluer à fortement polluer  |
| 4      | $3 \leq I_{geo} \leq 4$ | Fortement pollué                           |
| 5      | $4 \leq I_{geo} \leq 5$ | De fortement polluer à extrêmement polluer |
| 6      | $5 < I_{geo}$           | Extrêmement pollué                         |

#### II.4.2 Facteur d'enrichissement

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

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

Où  $(C_n/C_{Fe})$  est le rapport des concentrations mesurées de métaux traces dans les sédiments par les valeurs de fond géochimique. Dans cette étude, le fer (Fe) a été utilisé comme traceur conservateur (Schiff and Weisberg, 1999). Sept classes d'enrichissement basées sur les valeurs de EF (Kouidri et al., 2016) ont été considérées (Tab. II.6):

**Tableau II.6 :** niveau d'enrichissement métallique en fonction des valeurs de l'indice (Igeo).

| Valeur de FE   | Niveau d'enrichissement           |
|----------------|-----------------------------------|
| $EF < 1$       | Pas d'enrichissement              |
| $1 < EF < 3$   | Enrichissement mineur             |
| $3 < EF < 5$   | Enrichissement modéré             |
| $5 < EF < 10$  | Enrichissement modérément sévère  |
| $10 < EF < 25$ | Enrichissement sévère             |
| $25 < EF < 50$ | Enrichissement très sévère        |
| $EF > 50$      | Enrichissement extrêmement sévère |

### II.4.3 Indice de la charge polluante (PLI)

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

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n}$$

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

Où CF est le facteur de contamination (Hakanson, 1980), C<sub>n</sub> est la concentration en métaux traces et B<sub>n</sub> est la valeur de fond géochimique, Ainsi, une valeur de PLI > 1 suggère que le site est contaminé, alors qu'un PLI ≥ 1 indique une absence de pollution (Arienzo et al., 2020; Guendouzi et al., 2021).

### II.4.4 Indice du risque écologique potentiel (IR)

L'indice de risque écologique potentiel (IR) développé par Hakanson (1980) est une approche pour estimer le niveau de risque que les métaux traces posent aux organismes. Le RI est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$RI = \sum Er_i = \sum C_f^i \times T_r^i$$

Où, Er<sub>i</sub> est le facteur de risque, C<sub>f</sub><sup>i</sup> est le facteur de contamination du métal sélectionné i, et T<sub>r</sub><sup>i</sup> est le facteur de réponse toxique pour le métal i, qui reflète ses niveaux de toxicité et la sensibilité des espèces à cette toxicité. La valeur T<sub>r</sub><sup>i</sup> est égale à 1 pour Mn et Zn ; 2 pour Cr et V ; 5 pour Pb, Co, Ni et Cu ; 10 pour As ; 30 pour le Cd ; et 40 pour Hg (Xu et al., 2008).

Selon Hakanson (1980), il existe une gamme de quatre cas pour les valeurs d'IR : risque faible (<150), modéré (150–300), sévère (300–600) et sérieux (>600).

### II.4.5 Méthode des valeurs guides sédimentaires (QGSS)

Les valeurs guides sédimentaires (SQG, sediment quality guideline) sont de plus en plus utilisées afin d'aider à l'interprétation des données, de servir de points de référence ou de classer les cours d'eau en fonction de la toxicité potentielle des sédiments. Elles ont été développées sur des fondements théoriques, empiriques ou sur une combinaison de ces deux approches (McCauley et al., 2000; Wenning, 2005).

#### II.4.5.1 Valeurs guides sédimentaires de type ERL (effect range low) et ERM (effect range medium), TEL (Threshold Effect Level) et PEL (Probable Effect Level)

Ces valeurs guides sont déterminées de manière empirique à partir de la compilation de nombreuses études menées en milieu naturel ou en laboratoire. Ces études ont permis de relier les mesures chimiques (concentrations en contaminants) et toxicologiques (tests de toxicité et informations sur la communauté benthique) réalisées conjointement sur les sédiments (Geffard, 2001; Wenning, 2005). Des concentrations spécifiques ayant des niveaux particuliers d'effet ou de non-effet sur les organismes benthiques sont alors définies à partir d'algorithmes,

Les seuils ERL-ERM et TEL-PEL (Tab. II.7) permettent de distinguer les gammes de concentrations qui, vis à vis des organismes benthiques, sont :

- Rarement associées à des effets toxiques (inférieur à l'ERL, TEL) ;
- Occasionnellement associées à des effets toxiques (compris entre l'ERL-l'ERM, et TEL-PEL) ;
- Fréquemment associées à des effets toxiques (supérieur à l'ERM, PEL),

La méthode du quotient ERM moyen (m-ERM-Q) et PEL moyen (m-PEL-Q) est appliquée pour déterminer l'effet d'un mélange des ETM (Carr et al., 1996; Long and MacDonald, 1998; Long et al., 2000), en utilisant l'équation :

$$m - ERM - Q = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{C_i}{ERM_i} \right)}{n}$$

$$m - PEL - Q = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{C_i}{PEL_i} \right)}{n}$$

- $C_i$  est la concentration du métal  $i$  dans le sédiment ;
- $ERM_i$  sont les valeurs de référence pour le métal  $i$  et  $n$  est le nombre de métaux ;
- $PEL_i$  sont les valeurs de référence pour le métal  $i$  et  $n$  est le nombre de métaux.

Long et al. (2000) ont relié le m-ERM-Q à la probabilité de toxicité comme suit : Un m-ERM-Q  $< 0,1$  a une probabilité de toxicité de 9 %, tandis que  $0,11 < m-ERM-Q < 0,5$  a une probabilité de 21 % d'être toxique, Cependant,  $0,51 < m-ERM-Q < 1,5$  à 49 % de probabilité de toxicité et  $m-ERM-Q > 1,5$  a environ 76 % de probabilité d'être toxique. Tandis que pour m-PEL-Q, les valeurs  $< 0,1$ ,  $0,11-1,5$ ,  $1,51-2,3$  et  $> 2,3$  correspondent respectivement à 8 %, 21 %, 49 % et 73 % de probabilité de toxicité dans les sédiments (Long et al., 2000).

**Tableau II.7** : Valeurs guides sédimentaires de type ERL et ERM, et de type TEL et PEL utilisés dans cette étude pour le système marin et le système eau douce.

| Métaux<br>(µg/g) | Sédiment marins (Long et al., 1995; Macdonald et al., 1996) |      |      |      | Matières en suspension (MacDonald et al., 2000) |     |       |      |
|------------------|-------------------------------------------------------------|------|------|------|-------------------------------------------------|-----|-------|------|
|                  | ERL                                                         | ERM  | TEL  | PEL  | ERL                                             | ERM | TEL   | PEL  |
| Pb               | 46,7                                                        | 218  | 30,2 | 112  | 35                                              | 110 | 35    | 91,3 |
| Cr               | 81                                                          | 370  | 52,3 | 160  | 80                                              | 145 | 37,3  | 90   |
| Ni               | 20,9                                                        | 51,6 | 15,9 | 42,8 | 30                                              | 50  | 18    | 36   |
| Cu               | 34                                                          | 270  | 18,7 | 108  | 70                                              | 390 | 35,7  | 197  |
| Zn               | 150                                                         | 410  | 124  | 271  | 120                                             | 270 | 123   | 315  |
| As               | 8,2                                                         | 70   | 7,24 | 41,6 | 33                                              | 85  | 5,9   | 17   |
| Cd               | 1,2                                                         | 9,6  | 0,68 | 4,21 | 5                                               | 9   | 0,596 | 353  |
| Hg               | 0,15                                                        | 0,71 | 0,13 | 0,7  | -                                               | -   | -     | -    |

#### II.4.6 Toxicité aiguë potentielle

La toxicité aiguë potentielle ( $\Sigma TU$ ) des contaminants métalliques est définie comme la somme des unités toxiques individuelles qui, à leur tour, sont définies comme le rapport de la concentration du métal analysé ( $C_i$ ) à sa valeur PEL ( $PEL_i$ ) (Pedersen et al., 1998).

$$\sum (TU_i) = \sum \left( \frac{C_i}{PEL_i} \right)$$

Par conséquent, dans notre étude, la toxicité aiguë potentielle ( $\Sigma TU$ ) a été calculée afin de normaliser les différentes toxicités des métaux étudiés, ce qui permet la comparaison de leurs effets relatifs. Il a été rapporté plus tôt que les valeurs PEL sont meilleures pour prédire la nature toxique des métaux que les valeurs ERL (Swarnalatha et al., 2013; Zabetoglou et al., 2002). Selon les résultats des essais biologiques (Pedersen et al., 1998), une valeur somme de  $\Sigma TU$  inférieure à 4 indique l'absence d'effets toxiques significatifs (mortalité) par les métaux, mais lorsque le  $\Sigma TU$  est supérieur à 6, une mortalité importante est enregistrée.

#### II.4.7 Méthode de calcul des flux

Le calcul des flux des métaux trace est basé sur la méthode développée par (Delile et al., 2020; Poulier et al., 2019). Pour évaluer les flux de contaminants à une résolution mensuelle, nous avons calculé dans un premier temps les flux de MES comme le produit des mesures des débits moyen mensuelle (section II.1.4) et des concentrations moyennes mensuelle de MES à chaque station :

$$F_{MES} = \sum_{\text{Aout 2017}}^{\text{Juillet 2018}} (\alpha * Q * C_{MES})$$

- $F_{MES}$  : flux de MES (t/ans) ;
- $Q$  : débit moyen mensuelle ( $m^3/s$ );
- $C_{MES}$  : concentration moyenne mensuelle de MES ( $g/m^3$ ).
- $\alpha$  : coefficient de conversion

Le flux particulaire (flux moyen mensuelle) en élément trace métallique est calculé par l'équation suivante :

$$F_{P.i} = \sum_{Aout\ 2017}^{Juillet\ 2018} (\alpha * F_{MES} * C_{P.i})$$

- $F_{P.i}$  : flux particulaire (t/ans) d'un métal i ;
- $F_{MES}$  : flux de MES (flux moyen mensuelle) (g/s);
- $C_{P.i}$  : concentration moyenne mensuelle du métal i en MES ( $\mu g/g$ ).
- $\alpha$  : coefficient de conversion

Le flux dissout (flux moyen mensuelle) en élément trace métallique est calculé par l'équation suivante :

$$F_{D.i} = \sum_{Aout\ 2017}^{Juillet\ 2018} (\alpha * Q * C_{Di})$$

- $F_{D.i}$  : flux dissout (t/ans) d'un métal i ;
- $Q$  : débit moyen mensuelle ( $m^3/s$ ) ;
- $C_{Di}$  : concentration moyenne mensuelle du métal dissout i ( $g/m^3$ ).
- $\alpha$  : coefficient de conversion

Le flux total en élément trace métallique est obtenu en faisant la somme entre le flux particulaire et le flux dissous.

# **CHAPITRE III**

## **RESULTATS ET DISCUSSION**

### III. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie nous allons présenter et discuté l'essentiel des résultats des paramètres environnementaux, métaux traces, granulométrie et la matière organique des différents compartiments étudiés à savoir : les eaux des oueds El Harrach et Mazafran; les sédiments de surface des baies d'Alger et de Bou-Ismaïl et en dernier lieu les sédiments profonde des carottes prélevées dans la baie d'Alger et la baie de Marseille (France).

#### III.1 Les oueds El Harrach et Mazafran

La contamination par les métaux traces dans le milieu aquatique est une menace mondiale en raison de leur abondance, de leur toxicité, de leur persistance et de leur accumulation qui en résulte dans les écosystèmes aquatiques (Benedicto et al., 2011; Guendouzi et al., 2021; Marengo et al., 2018). De nombreuses recherches ont fait l'objet d'analyse des métaux traces dans les oueds et rivières (Delile et al., 2020; Gaillardet et al., 2003; Hayzoun, 2014; Hayzoun et al., 2015; Meybeck and Helmer, 1989; Ollivier et al., 2006; Ollivier et al., 2011; Oursel et al., 2013; Oursel et al., 2014a; Oursel et al., 2014b; Radakovitch et al., 2008; Yiğiterhan et al., 2011). Les oueds et rivières sont considérées comme des voies de transport essentielles pour les nombreux effluents contenant des métaux rejetés par les grandes agglomérations et d'autres activités anthropogéniques, qui finissent par pénétrer dans l'environnement marin (Tomczak et al., 2019).

Les études sur les métaux particuliers et dissous dans les oueds d'Algérie sont rares et la plupart ne sont pas publiées. A notre connaissance, aucune recherche ne s'est focalisée, pour l'instant, sur l'aspect de l'évaluation des flux et des risques des métaux traces particuliers et dissous dans de tels écosystèmes fluviaux en Algérie.

Dans cette partie nous allons (1) évaluer les variations des paramètres environnementaux et les concentrations de 11 métaux traces dans l'eau (phase dissoute et particulaire (MES)) de deux oueds polluées qui se terminent dans la région côtière centrale de l'Algérie, et de définir la relation entre les métaux dissous et particuliers en utilisant l'approche  $K_d$  ; (2) comparer nos données avec celles d'autres études fluviales dans le monde ; (3) évaluer le risque environnemental des métaux particuliers en utilisant l'indice de géo-accumulation (Igeo), le facteur d'enrichissement (EF) et l'indice de charge polluante (PLI) en utilisant le Fe comme indice de référence et (4) évaluer le risque écologique de la toxicité des métaux particuliers en comparant nos résultats avec les lignes directrices relatives à la qualité des sédiments SQGs (ERL-ERM et TEL-PEL) et en utilisant l'indice de risque écologique potentiel (RI), unités de

toxicité (TU) et toxicité aiguë potentielle ( $\Sigma TU_i$ ) ; (5) pour la première fois en Algérie, une estimation des flux des métaux traces est réalisée.

### III.1.1 Variation des paramètres environnementaux

Les paramètres environnementaux tels que la température de l'eau, le pH, la conductivité et les particules en suspension (MES) ont été mesurés deux fois par mois dans les oueds El Harrach et Mazafran (Fig. III.1 ; Tab. III.1). Les valeurs de la variation bimensuelle des paramètres environnementaux étaient significativement plus élevées ( $p < 0,001$ ) dans les deux oueds.

Pendant la période d'étude (août 2017 à juillet 2018), la température de l'eau (Fig. III.1a) montre la même variation bimensuelle dans les deux oueds ( $p > 0,05$ ), avec un cycle saisonnier clair de la température de l'eau, c'est-à-dire que la température de l'eau a suivi la fluctuation de la température atmosphérique, qui a montré un maximum en été et un minimum en hiver. Une différence maximale de température entre les deux oueds ( $2,9^\circ\text{C}$ ) a été observée en janvier avec une température plus élevée dans l'oued El Harrach.

D'après les valeurs temporelles de pH (Fig. III.1b), les eaux des deux oueds sont alcalines ce qui reflète l'abondance des roches carbonatées dans les deux bassins, avec des moyennes de  $7,80 \pm 0,25$  (gamme 7,43-8,47) et  $7,90 \pm 0,20$  (gamme 7,52-8,30) mesurées dans les oueds El Harrach et Mazafran, respectivement ( $p > 0,05$ ). Deux pics de pH ont été enregistrés dans les deux oueds pendant la même période (mars et avril 2018) ( $p > 0,05$ ).

Les valeurs moyennes de conductivité dans les eaux des deux oueds étaient de  $1474 \pm 590$   $\mu\text{S}/\text{cm}$  (plage 676–3130) et  $1245 \pm 300$   $\mu\text{S}/\text{cm}$  (plage 531–1649) dans les oueds El Harrach et Mazafran ( $p < 0,001$ ), respectivement (Fig. III.1c), ces valeurs dépassent la gamme normale de conductivité reportée dans la plupart des rivières naturelles (10 à 1000  $\mu\text{S cm}^{-1}$  ([Chapman et al., 1996](#))) traduisent l'impact des effluents domestiques et industriels dans les eaux des deux oueds El Harrache et Mazafran. La plus grande différence de conductivité entre les deux oueds a été enregistrée en juin ( $p > 0,05$ ), ce qui peut être expliqué par l'entrée de l'embouchure de l'oued El Harrach dans la mer et l'intrusion d'eau de mer qui en résulte, c'est-à-dire que le milieu devient de plus en plus estuarien à cette période.

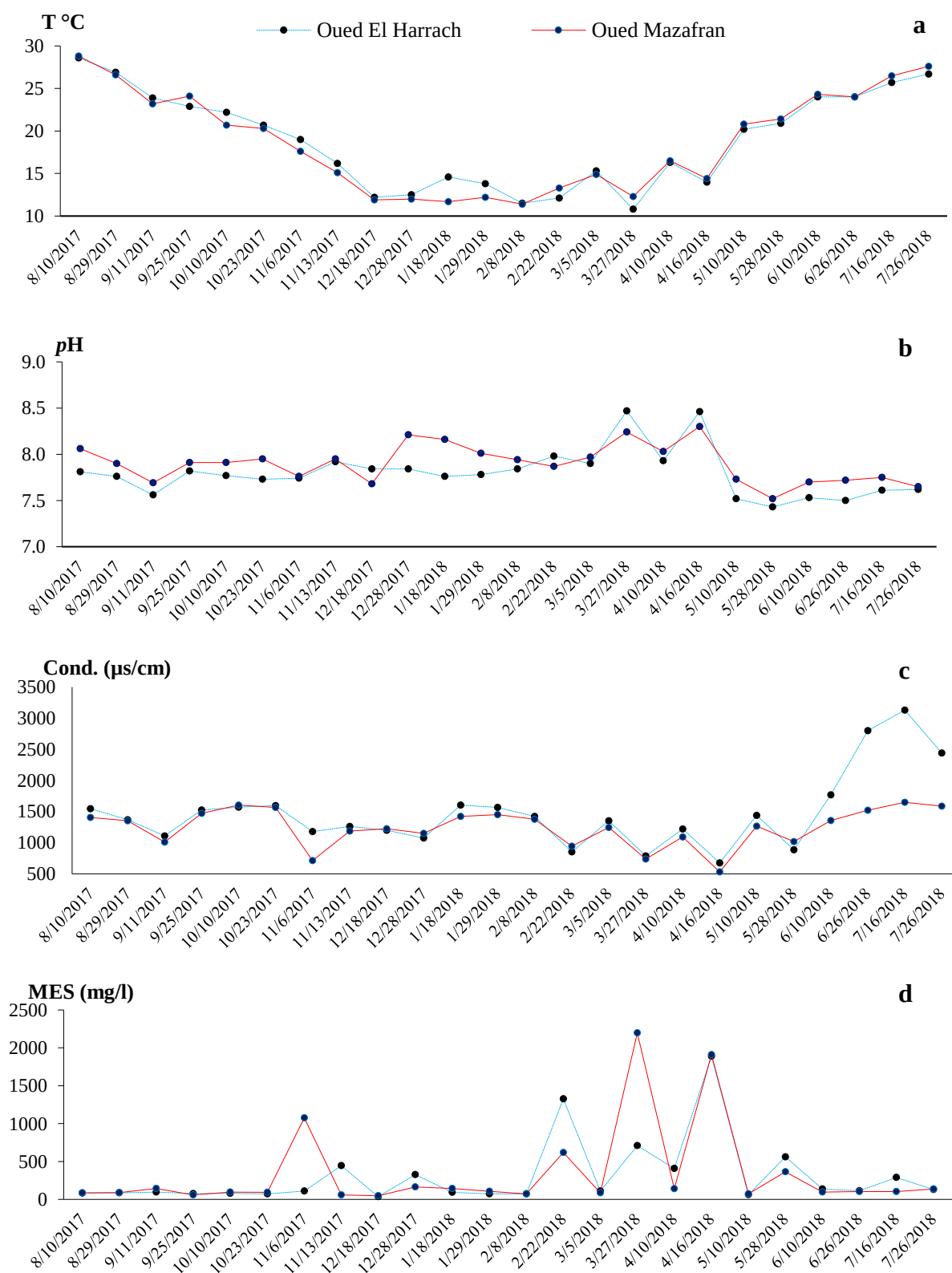
Les concentrations de matière en suspension (MES) (Fig. III.1d) variaient entre 35 et 1888 mg/L dans l'oued El Harrach et 47-2197 mg/L dans l'oued Mazafran ( $p > 0,05$ ). Nous avons observé une tendance saisonnière avec des valeurs plus élevées de MES à la fin du mois d'octobre 2017 dans l'oued Mazafran, et de février à avril dans les deux oueds ( $p > 0,05$ ).

Typiquement, les matières en suspensions (MES) variaient de 30 à 165 mg/L ( $p > 0,05$ ), à l'exception des pics élevés ( $> 300$  mg/L) mesurés en hiver et au printemps lors des période de crue dans les deux oueds.

Selon ([Bouras et al., 2021](#)), le débit de matières en suspension est de 42 t/km<sup>2</sup>/an dans l'oued Mazafran, En comparaison avec les autres oueds algériens, ce débit est assez faible ce qui est probablement lié aux roches cristallines (éruptives et métamorphiques) présentes dans les parties amont de l'oued. Ainsi, les niveaux élevés de MES observés sont probablement causés par le lessivage des terres agricoles adjacentes pendant les périodes de forts débits.

**Tableau III.1** : Paramètres environnementaux de l'eau des oueds El Harrach et Mazafran.

| Date       | Oued El Harrach |           |            |               | Oued Mazafran |           |            |             |
|------------|-----------------|-----------|------------|---------------|---------------|-----------|------------|-------------|
|            | T °C            | pH        | Cond µs/cm | MES mg/L      | T °C          | pH        | Cond µs/cm | MES mg/L    |
| 08/10/2017 | 28,6±0,9        | 7,81±0,32 | 1545±63    | 83,75±3,42    | 28,8±0,9      | 8,06±0,33 | 1404±57    | 87,5±3,6    |
| 08/29/2017 | 26,9±0,9        | 7,76±0,32 | 1370±56    | 87,50±3,58    | 26,6±1,0      | 7,90±0,32 | 1352±55    | 90,0±3,7    |
| 09/11/2017 | 23,9±1,0        | 7,56±0,31 | 1108±45    | 96,25±3,93    | 23,2±1,0      | 7,69±0,31 | 1008±41    | 145,0±5,9   |
| 09/25/2017 | 22,9±1,1        | 7,82±0,32 | 1525±62    | 75,00±3,07    | 24,1±1,0      | 7,91±0,32 | 1473±60    | 58,8±2,4    |
| 10/10/2017 | 22,2±1,0        | 7,77±0,32 | 1573±64    | 80,00±3,27    | 20,7±1,1      | 7,91±0,32 | 1602±65    | 95,8±3,9    |
| 10/23/2017 | 20,7±1,1        | 7,73±0,32 | 1596±65    | 73,33±3,00    | 20,3±1,1      | 7,95±0,32 | 1567±64    | 94,3±3,9    |
| 11/06/2017 | 19,0±1,2        | 7,74±0,32 | 1180±48    | 109,60±4,48   | 17,6±1,2      | 7,76±0,32 | 713±29     | 1074,2±43,9 |
| 11/13/2017 | 16,2±1,2        | 7,92±0,32 | 1262±52    | 446,67±18,26  | 15,1±1,3      | 7,95±0,32 | 1186±48    | 58,8±2,4    |
| 12/18/2017 | 12,2±1,5        | 7,84±0,32 | 1201±49    | 34,97±1,43    | 11,9±1,6      | 7,68±0,31 | 1225±50    | 47,3±1,9    |
| 12/28/2017 | 12,5±1,4        | 7,84±0,32 | 1075±44    | 325,50±13,31  | 12,0±1,5      | 8,21±0,34 | 1150±47    | 164,8±6,7   |
| 01/18/2018 | 14,6±1,3        | 7,76±0,32 | 1603±66    | 92,00±3,76    | 11,7±1,6      | 8,16±0,33 | 1424±58    | 144,0±5,9   |
| 01/29/2018 | 13,8±1,4        | 7,78±0,32 | 1565±64    | 74,00±3,02    | 12,2±1,5      | 8,01±0,33 | 1450±59    | 107,0±4,4   |
| 02/08/2018 | 11,5±1,5        | 7,84±0,32 | 1424±58    | 74,00±3,02    | 11,4±1,5      | 7,94±0,32 | 1379±56    | 73,0±3,0    |
| 02/22/2018 | 12,1±1,5        | 7,98±0,33 | 853±35     | 1325,00±54,16 | 13,3±1,4      | 7,87±0,32 | 942±39     | 619,0±25,3  |
| 03/05/2018 | 15,3±1,4        | 7,90±0,32 | 1353±55    | 110,00±4,50   | 14,9±1,4      | 7,97±0,33 | 1244±51    | 86,0±3,5    |
| 03/27/2018 | 10,8±1,6        | 8,47±0,35 | 788±32     | 708,75±28,97  | 12,3±1,5      | 8,24±0,34 | 739±30     | 2197,0±89,8 |
| 04/10/2018 | 16,3±1,3        | 7,93±0,32 | 1221±50    | 407,46±16,66  | 16,5±1,3      | 8,03±0,33 | 1094±45    | 139,0±5,7   |
| 04/16/2018 | 14,0±1,3        | 8,46±0,35 | 676±28     | 1888,00±77,17 | 14,4±1,3      | 8,30±0,34 | 531±22     | 1909,0±78,0 |
| 05/10/2018 | 20,2±1,1        | 7,52±0,31 | 1438±59    | 63,00±2,58    | 20,8±1,1      | 7,73±0,32 | 1266±52    | 72,5±3,0    |
| 05/28/2018 | 20,9±1,1        | 7,43±0,30 | 885±36     | 559,00±22,85  | 21,4±1,1      | 7,52±0,31 | 1020±42    | 363,0±14,8  |
| 06/10/2018 | 24,0±1,0        | 7,53±0,31 | 1769±72    | 138,00±5,64   | 24,3±1,0      | 7,70±0,31 | 1358±56    | 96,0±3,9    |
| 06/26/2018 | 24,0±1,0        | 7,50±0,31 | 2800±115   | 114,00±4,66   | 24,0±1,0      | 7,72±0,32 | 1520±62    | 104,0±4,3   |
| 07/16/2018 | 25,7±1,0        | 7,61±0,31 | 3130±128   | 288,00±11,77  | 26,5±1,0      | 7,75±0,32 | 1649±67    | 104,0±4,3   |
| 07/26/2018 | 26,7±1,0        | 7,62±0,31 | 2440±100   | 131,00±5,35   | 27,6±1,0      | 7,65±0,31 | 1587±65    | 138,0±5,6   |



**Figure III.1 :** Paramètres environnementaux bimensuels enregistrés dans les eaux de l’oued El Harrach et l’oued Mazafran (août 2017-juillet 2018), a, température, b, pH, c, conductivité, d, particules en suspension (MES).

### III.1.2 Variation des métaux traces dans les deux oueds (El Harrach et Mazafran)

Les concentrations certifiées et les concentrations mesurées des métaux traces dans trois matériaux de référence standard sont répertoriées dans le tableau III.2. Tous les résultats sont conformes aux valeurs certifiées (soit entre 85 et 115% des valeurs certifiées).

Les concentrations des métaux dissous dans les oueds El Harrach et Mazafran pendant le programme de surveillance, d'Août 2017 à Juillet 2018, sont résumées dans les Figures III.2 et III.3 et les tableaux 11 et 12.

**Tableau III.2:** Analyse des matériaux de référence certifiés : valeurs certifiées (Cert, Val.) et valeurs mesurées (Meas, Val.) (Moyenne  $\pm$  s.d,  $\mu\text{g/g}$  poids sec).

| Metals | STSD-3     |                   | MESS-4            |                   | Light Sandy Soil n° 7002 |                   |
|--------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
|        | Cert. Val. | Meas. Val         | Cert. Val.        | Meas. Val.        | Cert. Val.               | Meas. Val.        |
| Pb     | 40         | 44,74 $\pm$ 1,07  | 21,50 $\pm$ 1,20  | 19,44 $\pm$ 0,49  | 58,90 $\pm$ 4,90         | 56,52 $\pm$ 2,31  |
| Cd     | 1          | 1,11 $\pm$ 0,12   | 0,28 $\pm$ 0,04   | 0,25 $\pm$ 0,02   | 0,31 $\pm$ 0,04          | 0,38 $\pm$ 0,02   |
| Cu     | 39         | 35,15 $\pm$ 0,11  | 32,90 $\pm$ 1,80  | 29,43 $\pm$ 0,42  | 29,30 $\pm$ 0,60         | 30,60 $\pm$ 1,25  |
| Zn     | 204        | 214,27 $\pm$ 2,36 | 147,00 $\pm$ 6,00 | 145,33 $\pm$ 1,26 | 69,00 $\pm$ 7,70         | 78,83 $\pm$ 3,22  |
| Cr     | 80         | 61,52 $\pm$ 0,12  | 94,30 $\pm$ 1,80  | 81,78 $\pm$ 1,23  | 179,00 $\pm$ 8,00        | 178,42 $\pm$ 7,66 |
| Ni     | 30         | 30,72 $\pm$ 0,68  | 42,80 $\pm$ 1,60  | 36,38 $\pm$ 0,29  | 42,00 $\pm$ 1,70         | 50,26 $\pm$ 2,05  |
| Co     | 16         | 15,22 $\pm$ 0,20  | 13,00 $\pm$ 0,80  | 11,09 $\pm$ 0,15  | 12,60 $\pm$ 0,90         | 13,04 $\pm$ 0,53  |
| Mn     | 2,73       | 2,75 $\pm$ 0,03   | 0,30 $\pm$ 0,01   | 0,28 $\pm$ 0,01   | 0,95 $\pm$ 0,04          | 0,68 $\pm$ 0,03   |
| As     | 28         | 25,13 $\pm$ 0,75  | 21,70 $\pm$ 2,80  | 21,47 $\pm$ 0,44  | 32,40 $\pm$ 1,90         | 37,75 $\pm$ 1,54  |
| V      | 134        | 125,08 $\pm$ 1,25 | 216,00 $\pm$ 8,00 | 199,54 $\pm$ 2,93 | 54,90 $\pm$ 6,80         | 60,85 $\pm$ 2,49  |
| Fe     | 44         | 41,75 $\pm$ 0,21  | 39,90 $\pm$ 1,60  | 36,44 $\pm$ 2,40  | -                        | -                 |

STSD-3: Stream Sediment Reference Materials 3, MESS-4: Canadian Certified Reference Materials Project, and

Light Sandy Soil n° 7002.

#### III.1.2.1 Métaux traces dissous

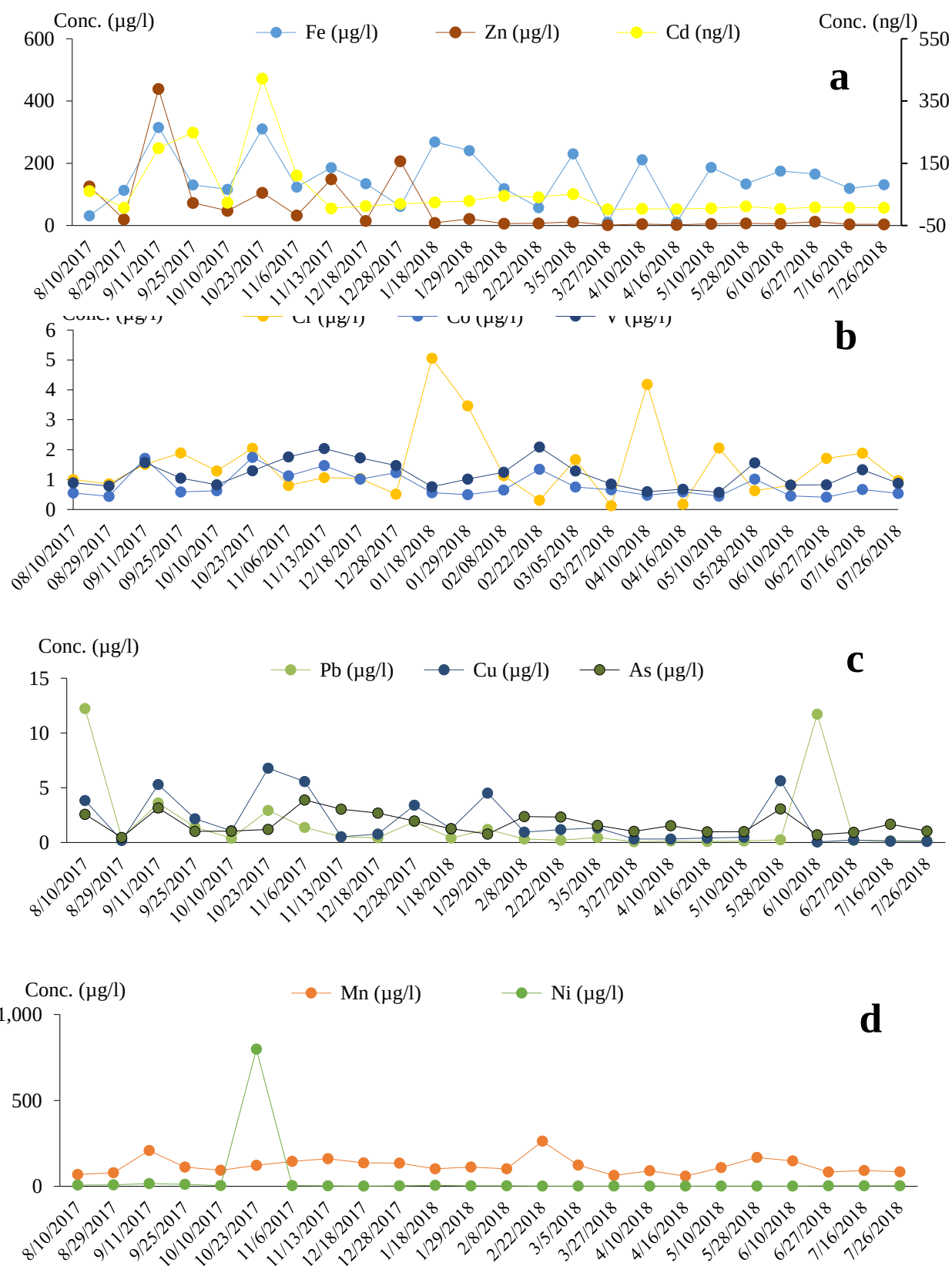
En général, la gamme des concentrations est un meilleur paramètre pour représenter la quantification des métaux que la moyenne arithmétique, puisque la concentration maximale du métal ((e,g, Ni et Pb) a influencé leur concentration moyenne. Les concentrations en métaux dissous dans l'oued El Harrach varient selon quatre ordres de grandeur (Fig. III.2 ; Tab. III.3) dans lesquels Fe, Mn et Zn sont les plus élevés [0, 350]  $\mu\text{g/L}$  sauf en septembre (438,67  $\pm$  6, 58  $\mu\text{g Zn/L}$ ), suivis par Cr, Cu et Ni [0, 16]  $\mu\text{g/L}$  sauf en octobre (797,70  $\pm$  24,73  $\mu\text{g Ni/L}$ ) ; suivis par Co, As, V et Pb [0, 4]  $\mu\text{g/L}$  sauf en août et juin avec 12,23  $\pm$  0,10 et 11,71  $\pm$  0,26  $\mu\text{g Pb /L}$ , respectivement. Le Cadmium (Cd) est le plus bas avec une gamme de 0 –250 ng/l sauf en octobre (422,00  $\pm$  31,23 ng/l). Au cours du programme de surveillance des eaux de l'oued El Harrach, le cadmium (Cd) a présenté sa concentration maximale (422,00  $\pm$  31,23 ng/l) en mois

d'octobre, alors que les concentrations de Pb ( $12,23 \pm 0,10 \mu\text{g/l}$ ) et d'As ( $3,88 \pm 0,17 \mu\text{g/l}$ ) ont été maximales en août et en novembre, respectivement.

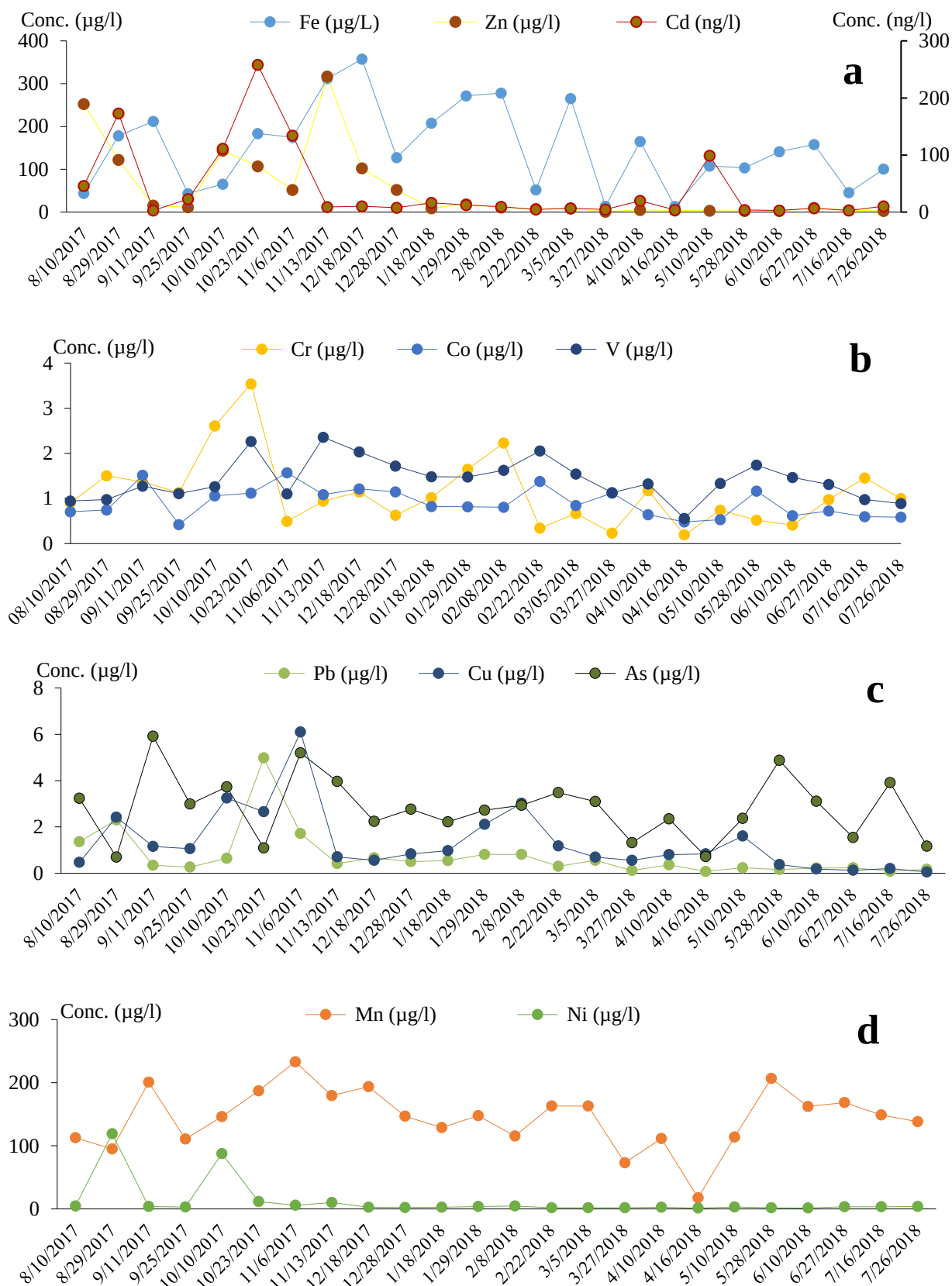
Dans l'oued Mazafran, la concentration en métaux dissous variait selon six ordres de grandeur (Fig. III.3 ; Tab. III.4) où Fe et Zn étaient les plus élevés [ $0, 400$ ]  $\mu\text{g/L}$ , suivis de Mn [ $15, 250$ ]  $\mu\text{g/L}$ , Ni [ $0, 14$ ]  $\mu\text{g/L}$  sauf en août ( $118,97 \pm 3,57 \mu\text{g Ni/L}$ ) et en octobre ( $87,61 \pm 1,93 \mu\text{g Ni/L}$ ), Pb, Cu, Cr, As et V [ $0, 7$ ]  $\mu\text{g/L}$  et Co [ $0,2$ ]  $\mu\text{g/L}$ , Cd était le plus bas à  $0\text{--}60 \text{ ng/L}$  sauf en août ( $173,00 \pm 17,65 \text{ ng/L}$ ), en octobre ( $111,00 \pm 13,54$  et  $258,00 \pm 24,51 \text{ ng/L}$ ), en novembre ( $134,00 \pm 20,77 \text{ ng/L}$ ) et en mai ( $98,80 \pm 19,56 \text{ ng/L}$ ). Les niveaux de concentration des métaux dissous dans l'oued Mazafran sont les plus élevés pour : Pb ( $4,98 \pm 0,02 \mu\text{g/L}$ ) et Cd ( $258,00 \pm 24,51 \text{ ng/L}$ ) en octobre ; et pour As ( $5,92 \pm 0,36 \mu\text{g/L}$ ) en septembre.

Les plus fortes concentrations de métaux dissous (p, ex, Pb, Cd, Ni et Zn) dans les deux oueds ont été observées entre mois de juin et d'octobre. La pluviométrie étant très faible dans cette région, les phénomènes de lessivage des sols sont négligeables et les débits fluviaux ne sont pas significativement modifiés durant cette période. En conclusion, les concentrations maximales de ces métaux dissous sont causées essentiellement par des activités anthropiques plutôt que par l'influence des processus géochimiques et la géologie locale.

Les concentrations dissoutes des métaux Pb, Cd, Cu, Zn, Cr et Ni sont plus disponibles dans l'oued El Harrach que dans l'oued Mazafran. Cependant, les concentrations dissoutes de Co, Mn, As, V et Fe sont plus disponibles dans l'oued Mazafran ( $p < 0,001$ ). Dans l'ensemble, les concentrations des métaux dissous dans les deux oueds ont suivi un ordre décroissant similaire, i.e,  $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{V} > \text{Co} > \text{Cd}$  ( $p > 0,05$ ).



**Figure III.2** Variation bimensuelle de la concentration des métaux traces dissous dans l'oued El Harrach



**Figure III.3 :** Variation bimensuelle de la concentration des métaux traces dissous dans l'oued Mazafran,

**Tableau III.3** : Valeurs bimensuelles de la concentration des métaux traces dissous dans l'oued El Harrach.

| Date              | Concentrations des métaux dissous |                    |                  |                    |                  |                     |                  |                     |                  |                  |                     |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|------------------|---------------------|
|                   | Pb (µg/L)                         | Cd (ng/L)          | Cu (µg/L)        | Zn (µg/L)          | Cr (µg/L)        | Ni (µg/L)           | Co (µg/L)        | Mn (µg/L)           | As (µg/L)        | V (µg/L)         | Fe (µg/L)           |
| 08/10/2017        | 12,23±0,10                        | 61,00±9,46         | 3,84±0,09        | 125,86±1,13        | 1,00±0,02        | 7,36±0,16           | 0,56±0,01        | 69,05±0,69          | 2,58±0,13        | 0,89±0,02        | 31,69±0,10          |
| 08/29/2017        | 0,39±0,01                         | 7,00±4,02          | 0,18±0,01        | 19,61±0,22         | 0,86±0,04        | 8,05±0,21           | 0,44±0,01        | 78,78±2,05          | 0,46±0,09        | 0,79±0,01        | 113,23±0,68         |
| 09/11/2017        | 3,61±0,04                         | 199,00±21,89       | 5,28±0,09        | 438,67±6,58        | 1,51±0,06        | 14,95±0,39          | 1,71±0,02        | 207,42±2,49         | 3,15±0,22        | 1,57±0,03        | 315,59±3,79         |
| 09/25/2017        | 1,40±0,02                         | 249,00±3,49        | 2,17±0,13        | 72,61±0,51         | 1,89±0,06        | 10,76±0,39          | 0,59±0,02        | 111,26±2,67         | 1,02±0,06        | 1,05±0,03        | 130,31±2,22         |
| 10/10/2017        | 0,40±0,01                         | 24,00±2,90         | 1,06±0,03        | 47,58±0,62         | 1,29±0,01        | 3,42±0,06           | 0,63±0,04        | 92,71±0,83          | 1,04±0,03        | 0,83±0,03        | 116,40±1,86         |
| 10/23/2017        | 2,92±0,06                         | 422,00±31,23       | 6,78±0,14        | 105,61±1,27        | 2,05±0,07        | 797,70±24,73        | 1,74±0,03        | 121,71±2,19         | 1,19±0,14        | 1,29±0,03        | 310,58±3,11         |
| 11/06/2017        | 1,39±0,01                         | 111,00±4,22        | 5,57±0,12        | 32,37±0,10         | 0,80±0,02        | 4,47±0,13           | 1,12±0,03        | 144,65±1,45         | 3,88±0,17        | 1,76±0,05        | 123,82±2,35         |
| 11/13/2017        | 0,53±0,01                         | 5,00±5,23          | 0,53±0,02        | 149,04±3,28        | 1,07±0,07        | 2,88±0,16           | 1,47±0,08        | 161,27±4,19         | 3,04±0,09        | 2,04±0,03        | 186,20±3,35         |
| 12/18/2017        | 0,43±0,02                         | 12,35±2,49         | 0,78±0,01        | 15,19±0,41         | 1,04±0,03        | 1,87±0,04           | 1,01±0,04        | 136,51±3,28         | 2,67±0,10        | 1,73±0,05        | 134,88±2,70         |
| 12/28/2017        | 1,92±0,04                         | 19,95±2,57         | 3,40±0,05        | 207,09±4,56        | 0,51±0,01        | 2,73±0,04           | 1,23±0,03        | 134,34±1,15         | 1,96±0,08        | 1,47±0,01        | 62,05±0,87          |
| 01/18/2018        | 0,40±0,01                         | 24,70±1,19         | 1,25±0,04        | 8,80±0,12          | 5,06±0,04        | 5,08±0,09           | 0,56±0,01        | 102,25±3,89         | 1,26±0,05        | 0,76±0,02        | 268,54±1,34         |
| 01/29/2018        | 1,20±0,03                         | 29,45±4,24         | 4,51±0,06        | 21,10±0,13         | 3,46±0,01        | 3,12±0,04           | 0,50±0,02        | 111,61±3,13         | 0,77±0,08        | 1,01±0,04        | 240,82±1,69         |
| 02/08/2018        | 0,33±0,01                         | 45,60±5,97         | 0,96±0,03        | 6,40±0,05          | 1,13±0,02        | 2,27±0,04           | 0,65±0,01        | 101,79±2,54         | 2,36±0,06        | 1,24±0,02        | 118,67±0,59         |
| 02/22/2018        | 0,21±0,01                         | 40,85±8,42         | 1,18±0,05        | 7,28±0,31          | 0,30±0,00        | 1,88±0,09           | 1,35±0,03        | 262,00±2,88         | 2,33±0,02        | 2,09±0,01        | 57,52±0,40          |
| 03/05/2018        | 0,46±0,01                         | 51,30±1,74         | 1,33±0,04        | 11,79±0,35         | 1,67±0,05        | 1,96±0,01           | 0,75±0,03        | 122,65±1,96         | 1,55±0,06        | 1,29±0,01        | 230,54±3,00         |
| 03/27/2018        | 0,07±0,01                         | 1,90±1,23          | 0,32±0,01        | 1,45±0,05          | 0,13±0,00        | 1,02±0,02           | 0,66±0,01        | 63,38±1,08          | 1,02±0,05        | 0,85±0,01        | 11,06±0,29          |
| 04/10/2018        | 0,14±0,01                         | 3,80±0,37          | 0,32±0,01        | 4,41±0,12          | 4,18±0,05        | 1,19±0,02           | 0,48±0,01        | 90,00±2,43          | 1,53±0,07        | 0,59±0,01        | 211,40±1,06         |
| 04/16/2018        | 0,08±0,01                         | 2,85±1,00          | 0,42±0,01        | 1,95±0,08          | 0,17±0,01        | 1,04±0,00           | 0,58±0,01        | 59,03±0,77          | 0,96±0,02        | 0,68±0,03        | 10,78±0,09          |
| 05/10/2018        | 0,14±0,01                         | 5,70±1,72          | 0,47±0,03        | 5,20±0,19          | 2,06±0,06        | 1,43±0,03           | 0,44±0,01        | 109,36±1,42         | 1,00±0,05        | 0,57±0,02        | 186,66±2,61         |
| 05/28/2018        | 0,26±0,01                         | 11,40±1,29         | 5,64±0,05        | 7,42±0,01          | 0,63±0,02        | 1,44±0,03           | 1,01±0,01        | 168,47±1,85         | 3,06±0,06        | 1,56±0,03        | 133,79±2,14         |
| 06/10/2018        | 11,71±0,26                        | 3,80±1,37          | 0,05±0,01        | 5,73±0,18          | 0,81±0,03        | 1,35±0,06           | 0,46±0,01        | 147,67±0,59         | 0,70±0,01        | 0,82±0,02        | 175,05±0,70         |
| 06/26/2018        | 0,21±0,01                         | 8,55±1,21          | 0,23±0,00        | 12,72±0,38         | 1,71±0,03        | 2,06±0,05           | 0,41±0,01        | 82,55±2,56          | 0,93±0,07        | 0,82±0,02        | 165,46±4,30         |
| 07/16/2018        | 0,16±0,01                         | 7,60±3,56          | 0,12±0,03        | 4,21±0,11          | 1,89±0,02        | 2,30±0,04           | 0,67±0,01        | 91,32±1,00          | 1,67±0,08        | 1,33±0,02        | 119,87±1,08         |
| 07/26/2018        | 0,18±0,01                         | 6,65±3,31          | 0,10±0,01        | 3,61±0,15          | 0,97±0,00        | 2,30±0,02           | 0,54±0,02        | 84,95±0,59          | 1,05±0,05        | 0,87±0,03        | 131,80±0,53         |
| <b>Moy. ± s,d</b> | <b>1,70±3,29</b>                  | <b>56,44±99,72</b> | <b>1,94±2,15</b> | <b>54,82±98,40</b> | <b>1,51±1,22</b> | <b>36,78±162,11</b> | <b>0,82±0,41</b> | <b>118,95±47,05</b> | <b>1,72±0,94</b> | <b>1,16±0,45</b> | <b>149,45±84,57</b> |

**Tableau III.4 :** Valeurs bimensuelles de la concentration des métaux traces dissous dans l'oued Mazafran.

| Date              | Concentrations métaux dissous |                    |                  |                    |                  |                    |                  |                     |                  |                  |                     |
|-------------------|-------------------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|---------------------|------------------|------------------|---------------------|
|                   | Pb (µg/L)                     | Cd (ng/L)          | Cu (µg/L)        | Zn (µg/L)          | Cr (µg/L)        | Ni (µg/L)          | Co (µg/L)        | Mn (µg/L)           | As (µg/L)        | V (µg/L)         | Fe (µg/L)           |
| 08/10/2017        | 1,36±0,02                     | 46,00±6,67         | 0,48±0,03        | 252,56±1,26        | 0,90±0,04        | 4,56±0,10          | 0,71±0,03        | 112,79±1,13         | 3,24±0,21        | 0,94±0,05        | 43,86±1,40          |
| 08/29/2017        | 2,30±0,04                     | 173,00±17,65       | 2,42±0,09        | 122,01±0,85        | 1,50±0,03        | 118,97±3,57        | 0,74±0,03        | 95,00±1,52          | 0,70±0,08        | 0,98±0,02        | 178,51±1,96         |
| 09/11/2017        | 0,35±0,01                     | 3,00±6,62          | 1,16±0,02        | 15,28±0,50         | 1,36±0,07        | 3,70±0,17          | 1,51±0,03        | 200,67±3,01         | 5,92±0,36        | 1,27±0,03        | 212,03±2,33         |
| 09/25/2017        | 0,27±0,01                     | 23,00±6,79         | 1,06±0,06        | 11,54±0,30         | 1,13±0,02        | 3,07±0,08          | 0,42±0,02        | 110,93±2,33         | 2,99±0,11        | 1,11±0,03        | 43,39±0,56          |
| 10/10/2017        | 0,65±0,02                     | 111,00±13,54       | 3,25±0,12        | 143,73±0,72        | 2,61±0,08        | 87,61±1,93         | 1,06±0,02        | 146,04±1,31         | 3,73±0,10        | 1,26±0,03        | 65,08±0,72          |
| 10/23/2017        | 4,98±0,02                     | 258,00±24,51       | 2,66±0,05        | 106,88±1,07        | 3,54±0,13        | 11,63±0,64         | 1,12±0,04        | 187,21±2,43         | 1,10±0,10        | 2,26±0,05        | 183,84±3,49         |
| 11/06/2017        | 1,72±0,02                     | 134,00±20,77       | 6,10±0,13        | 51,91±0,36         | 0,49±0,02        | 5,58±0,18          | 1,57±0,05        | 233,20±4,20         | 5,20±0,08        | 1,10±0,05        | 174,79±3,67         |
| 11/13/2017        | 0,42±0,01                     | 9,00±3,83          | 0,71±0,02        | 316,81±1,90        | 0,94±0,06        | 10,06±0,21         | 1,08±0,03        | 179,49±2,51         | 3,96±0,25        | 2,35±0,01        | 311,67±2,18         |
| 12/18/2017        | 0,66±0,02                     | 10,45±3,80         | 0,56±0,03        | 102,40±1,02        | 1,15±0,01        | 2,59±0,06          | 1,21±0,05        | 193,85±6,01         | 2,24±0,11        | 2,03±0,05        | 357,35±3,22         |
| 12/28/2017        | 0,50±0,01                     | 7,60±2,53          | 0,84±0,01        | 51,84±0,73         | 0,63±0,00        | 2,13±0,02          | 1,15±0,05        | 146,81±0,88         | 2,76±0,05        | 1,72±0,02        | 127,11±0,76         |
| 01/18/2018        | 0,55±0,02                     | 16,15±5,62         | 0,98±0,04        | 8,82±0,26          | 1,02±0,01        | 2,64±0,01          | 0,82±0,01        | 128,68±3,60         | 2,22±0,08        | 1,48±0,03        | 208,12±0,21         |
| 01/29/2018        | 0,82±0,01                     | 12,35±3,58         | 2,11±0,07        | 18,09±0,54         | 1,65±0,01        | 3,85±0,10          | 0,82±0,03        | 147,82±1,18         | 2,72±0,06        | 1,48±0,04        | 271,60±5,43         |
| 02/08/2018        | 0,81±0,01                     | 9,50±3,55          | 3,02±0,06        | 10,88±0,20         | 2,23±0,01        | 4,53±0,10          | 0,81±0,03        | 115,34±2,54         | 2,93±0,06        | 1,63±0,04        | 277,98±1,67         |
| 02/22/2018        | 0,30±0,01                     | 4,75±1,25          | 1,18±0,02        | 7,20±0,03          | 0,34±0,00        | 1,82±0,02          | 1,38±0,01        | 163,04±1,30         | 3,49±0,18        | 2,05±0,03        | 52,07±0,16          |
| 03/05/2018        | 0,56±0,02                     | 6,65±1,00          | 0,70±0,03        | 8,36±0,04          | 0,67±0,02        | 1,95±0,02          | 0,84±0,02        | 163,00±1,96         | 3,09±0,14        | 1,54±0,04        | 265,55±0,53         |
| 03/27/2018        | 0,12±0,00                     | 4,75±0,79          | 0,56±0,01        | 1,11±0,07          | 0,23±0,01        | 1,64±0,06          | 1,12±0,01        | 73,12±1,97          | 1,32±0,01        | 1,13±0,02        | 13,68±0,22          |
| 04/10/2018        | 0,36±0,01                     | 19,95±3,63         | 0,81±0,01        | 5,03±0,12          | 1,17±0,01        | 2,54±0,07          | 0,64±0,01        | 111,60±2,68         | 2,35±0,07        | 1,32±0,03        | 164,75±0,99         |
| 04/16/2018        | 0,08±0,00                     | 3,80±0,79          | 0,84±0,02        | 3,60±0,12          | 0,19±0,00        | 1,27±0,05          | 0,48±0,01        | 17,56±0,39          | 0,71±0,10        | 0,56±0,01        | 13,09±0,12          |
| 05/10/2018        | 0,24±0,00                     | 98,80±19,56        | 1,61±0,01        | 3,40±0,06          | 0,74±0,00        | 2,82±0,07          | 0,53±0,01        | 113,91±2,73         | 2,36±0,11        | 1,33±0,03        | 107,87±1,19         |
| 05/28/2018        | 0,16±0,01                     | 3,80±2,06          | 0,38±0,01        | 2,47±0,03          | 0,52±0,02        | 1,87±0,03          | 1,16±0,02        | 206,54±3,72         | 4,88±0,26        | 1,74±0,04        | 103,57±0,62         |
| 06/10/2018        | 0,23±0,01                     | 2,85±3,24          | 0,19±0,02        | 2,60±0,08          | 0,41±0,03        | 1,56±0,02          | 0,62±0,02        | 162,23±2,92         | 3,11±0,10        | 1,47±0,03        | 141,28±3,25         |
| 06/26/2018        | 0,23±0,00                     | 6,65±2,85          | 0,13±0,01        | 9,91±0,32          | 0,97±0,03        | 3,53±0,06          | 0,72±0,01        | 168,46±3,71         | 1,55±0,02        | 1,31±0,04        | 157,82±0,95         |
| 07/16/2018        | 0,09±0,00                     | 2,85±1,96          | 0,21±0,01        | 4,55±0,20          | 1,45±0,02        | 3,28±0,04          | 0,60±0,01        | 148,96±4,77         | 3,91±0,14        | 0,97±0,04        | 45,62±0,91          |
| 07/26/2018        | 0,17±0,01                     | 10,45±2,09         | 0,06±0,00        | 2,53±0,06          | 1,00±0,02        | 3,86±0,05          | 0,59±0,01        | 138,12±2,35         | 1,17±0,04        | 0,88±0,03        | 100,44±0,80         |
| <b>Moy. ± s,d</b> | <b>0,75±1,05</b>              | <b>40,76±66,18</b> | <b>1,33±1,37</b> | <b>52,65±83,84</b> | <b>1,12±0,78</b> | <b>11,96±28,61</b> | <b>0,90±0,32</b> | <b>144,35±47,05</b> | <b>2,82±1,37</b> | <b>1,41±0,45</b> | <b>150,88±97,43</b> |

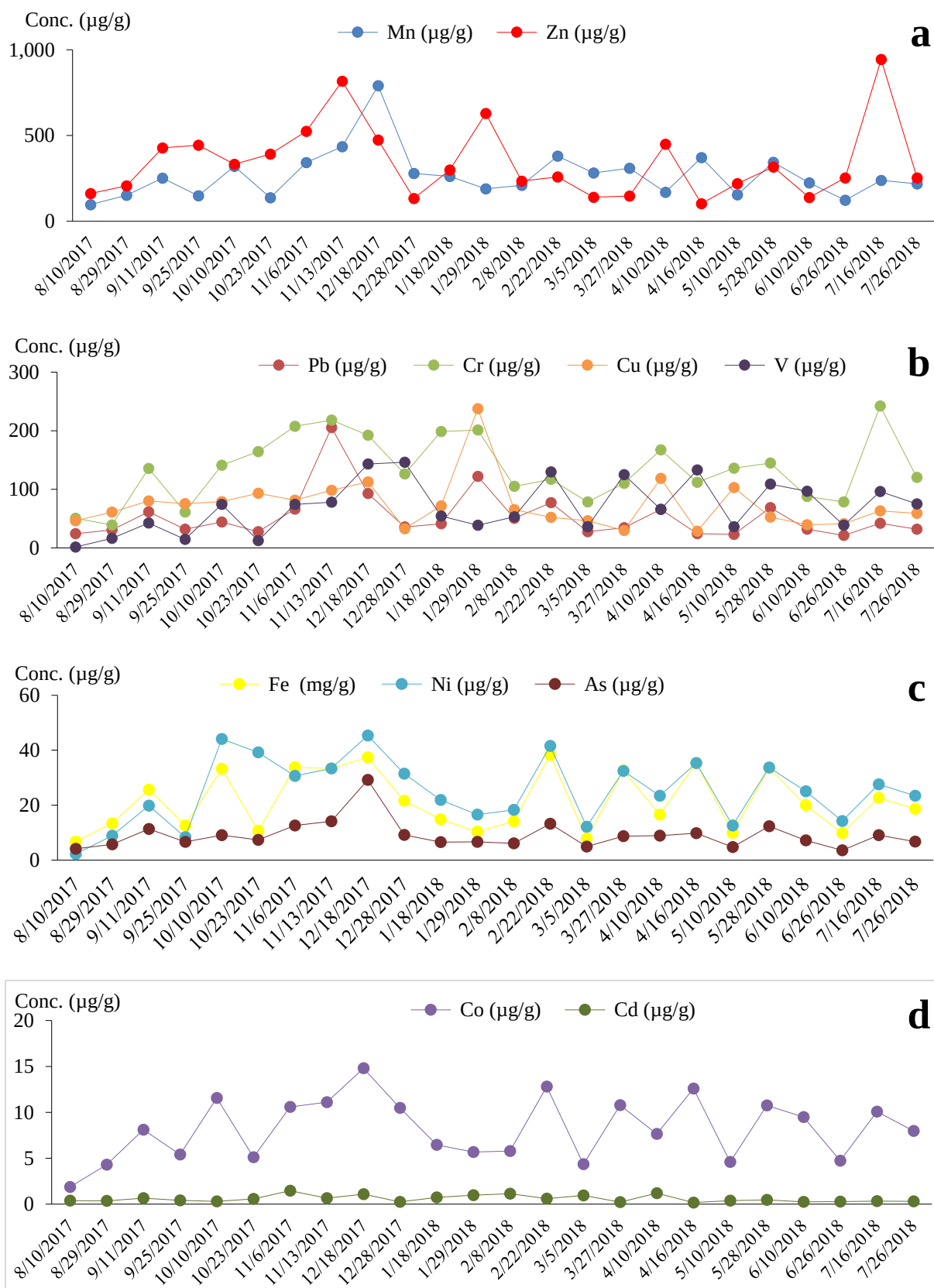
### III.1.2.2 Métaux traces particulières

Étant donné que les éléments traces métalliques sont souvent associés aux particules ([Förstner and Salomons, 1983](#)), les teneurs en métaux particuliers peuvent fournir des renseignements importants sur l'intensité de la pollution des sites étudiés.

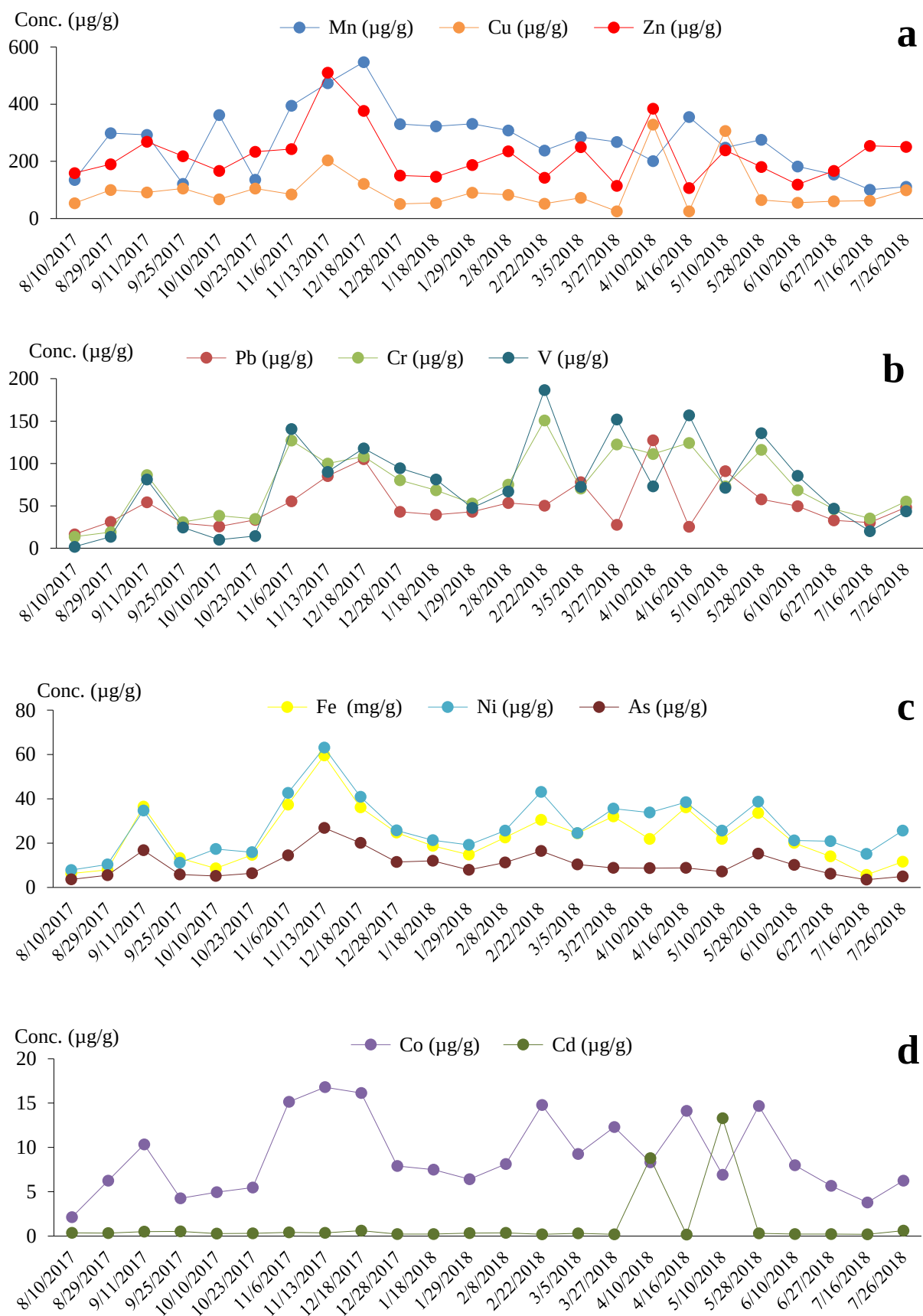
Les métaux traces particuliers dans l'oued El Harrach varient de six ordres de grandeur (Fig. III.4 ; Tab. III.5) dans lesquels le Fe est le plus élevé [5-40] mg/g, suivi du Zn [100-950] µg/g, suivi de Mn [100-450] µg/g, Pb, Cr, Cu et V [0-250] µg/g, Fe, Ni et As [0-50] µg/g (mg/g pour Fe), Co est inférieur à 16 µg/g et le Cd est le plus bas à 2 µg/g. Dans cet oued, les concentrations maximales de métaux traces particuliers tels que le Pb ( $205,50 \pm 8,40$  µg/g) et le Cd ( $1,46 \pm 0,06$  µg/g) ont été mesurées en novembre, et l'As ( $29,21 \pm 0,76$  µg/g) est mesurée en Décembre.

Dans l'oued Mazafran, quatre ordres de grandeur sont observés pour les niveaux de métaux particuliers (Fig. III.5 ; Tab. III.6), dans lequel les concentrations du Fe été les plus élevés [5-70] mg Fe/g, suivies par le Mn et Zn [100-600] µg/g, suivies par Pb, Cr, V et Cu [10-200] µg/g, à l'exception des mois d'avril et de mai, où les niveaux les plus élevés enregistrés étaient pour le Cu avec  $328,46 \pm 3,94$  et  $306,17 \pm 3,67$  µg Cu/g, respectivement, ensuite le Ni 5-70 µg/g. En revanche, les concentrations en Co, As et Cd étaient les plus faibles et varient dans la gamme de 0-30 µg/g pour cette période. Dans l'oued Mazafran, les concentrations en métaux traces particuliers tels que le Pb ( $127,36 \pm 1,53$  µg/g), As ( $26,87 \pm 1,10$  µg/g) et Cd ( $13,28 \pm 0,25$  µg/g) sont plus élevées en avril, en novembre et en décembre, respectivement.

En général, les métaux particuliers : le Pb, le Zn, le Cr et le Mn sont plus disponibles dans l'oued El Harrach ( $p < 0,001$ ), par contre le Cd, le Cu, le Ni, le Co, le Fe, le As et le V sont plus disponibles dans l'oued Mazafran ( $p < 0,001$ ). D'après les concentrations moyennes des métaux particuliers observées dans les deux oueds, on constate la diminution de ces concentrations dans l'ordre suivant :  $Fe > Zn > Mn > Cr > Cu > V > Pb > Ni > As > Co > Cd$  ( $p > 0,05$ ).



**Figure III.4 :** Variation bimensuelle des concentrations des métaux traces particuliers dans l'oued El Harrach.



**Figure 5 :** Variation bimensuelle des concentrations des métaux traces particuliers dans l'oued Mazafran.

**Tableau III.5** : Valeurs bimensuelles de concentrations des métaux traces particulières dans l'oued El Harrach.

| Date              | Concentrations des métaux particulières |                  |                    |                      |                     |                    |                  |                      |                  |                    |                    |
|-------------------|-----------------------------------------|------------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------|------------------|----------------------|------------------|--------------------|--------------------|
|                   | Pb (µg/g)                               | Cd (µg/g)        | Cu (µg/g)          | Zn (µg/g)            | Cr (µg/g)           | Ni (µg/g)          | Co (µg/g)        | Mn (µg/g)            | As (µg/g)        | V (µg/g)           | Fe (mg/g)          |
| 08/10/2017        | 24,25±0,99                              | 0,37±0,02        | 46,27±1,89         | 162,31±6,63          | 50,37±2,06          | 2,24±0,09          | 1,87±0,08        | 97,39±3,98           | 4,10±0,17        | 1,49±0,06          | 6,75±0,28          |
| 08/29/2017        | 30,71±1,26                              | 0,36±0,01        | 61,07±2,50         | 206,43±8,44          | 39,29±1,61          | 8,93±0,36          | 4,29±0,18        | 152,14±6,22          | 5,71±0,23        | 16,07±0,66         | 13,43±0,55         |
| 09/11/2017        | 61,36±2,51                              | 0,65±0,03        | 80,19±3,28         | 427,27±17,47         | 135,71±5,55         | 19,81±0,81         | 8,12±0,33        | 250,97±10,26         | 11,36±0,46       | 42,53±1,74         | 25,71±1,05         |
| 09/25/2017        | 32,08±1,31                              | 0,42±0,02        | 75,42±3,08         | 443,33±18,12         | 61,25±2,50          | 8,33±0,34          | 5,42±0,22        | 149,17±6,10          | 6,67±0,27        | 14,58±0,60         | 12,63±0,52         |
| 10/10/2017        | 44,38±1,81                              | 0,31±0,01        | 79,06±3,23         | 332,50±13,59         | 140,94±5,76         | 44,06±1,80         | 11,56±0,47       | 321,25±13,13         | 9,06±0,37        | 74,38±3,04         | 33,28±1,36         |
| 10/23/2017        | 27,84±1,14                              | 0,57±0,02        | 93,18±3,81         | 392,05±16,03         | 164,20±6,71         | 39,20±1,60         | 5,11±0,21        | 136,93±5,60          | 7,39±0,30        | 12,50±0,51         | 10,74±0,44         |
| 11/06/2017        | 66,24±2,71                              | 1,46±0,06        | 81,39±3,33         | 525,18±21,47         | 207,66±8,49         | 30,66±1,25         | 10,58±0,43       | 343,07±14,02         | 12,59±0,51       | 74,09±3,03         | 33,80±1,38         |
| 11/13/2017        | 205,50±8,40                             | 0,65±0,03        | 98,32±4,02         | 817,44±33,41         | 218,10±8,91         | 33,40±1,37         | 11,10±0,45       | 434,98±17,78         | 14,18±0,58       | 78,08±3,19         | 33,35±1,36         |
| 12/18/2017        | 92,88±3,25                              | 1,07±0,08        | 112,60±3,15        | 473,48±8,05          | 192,45±2,50         | 45,38±0,50         | 14,79±0,35       | 790,00±15,80         | 29,21±0,76       | 143,07±1,14        | 37,46±0,79         |
| 12/28/2017        | 35,59±0,39                              | 0,26±0,02        | 32,61±0,49         | 133,06±0,40          | 126,08±1,01         | 31,48±0,60         | 10,47±0,18       | 279,38±3,07          | 9,16±0,20        | 146,26±1,32        | 21,61±0,06         |
| 01/18/2018        | 41,27±0,62                              | 0,73±0,06        | 71,85±0,50         | 298,86±5,38          | 198,45±4,56         | 21,93±0,22         | 6,45±0,12        | 260,87±2,35          | 6,52±0,21        | 54,49±1,20         | 14,88±0,34         |
| 01/29/2018        | 121,89±1,95                             | 0,98±0,02        | 237,76±3,33        | 628,43±6,28          | 201,36±0,40         | 16,54±0,26         | 5,67±0,17        | 189,19±2,27          | 6,70±0,04        | 38,61±0,42         | 10,35±0,13         |
| 02/08/2018        | 50,39±1,06                              | 1,15±0,07        | 65,53±0,07         | 233,63±1,64          | 105,32±1,69         | 18,32±0,37         | 5,77±0,6         | 209,46±5,45          | 6,14±0,18        | 53,10±1,01         | 14,14±0,14         |
| 02/22/2018        | 76,98±1,85                              | 0,58±0,03        | 52,31±0,63         | 258,75±0,52          | 116,94±0,23         | 41,57±0,62         | 12,81±0,32       | 380,38±5,71          | 13,21±0,38       | 129,66±0,26        | 38,29±0,46         |
| 03/05/2018        | 27,68±0,80                              | 0,94±0,04        | 46,25±0,79         | 140,15±0,70          | 78,66±0,87          | 12,13±0,28         | 4,35±0,03        | 281,82±8,45          | 4,97±0,07        | 36,18±0,33         | 7,86±0,16          |
| 03/27/2018        | 34,52±2,21                              | 0,22±0,01        | 29,94±0,45         | 147,42±2,06          | 110,28±1,54         | 32,48±0,32         | 10,78±0,11       | 308,64±20,06         | 8,75±0,31        | 125,20±2,00        | 32,61±0,55         |
| 04/10/2018        | 65,82±2,96                              | 1,19±0,03        | 118,56±0,36        | 449,42±6,74          | 167,50±2,35         | 23,47±0,19         | 7,64±0,08        | 168,50±3,54          | 8,93±0,08        | 65,72±0,66         | 16,55±0,18         |
| 04/16/2018        | 24,49±0,44                              | 0,17±0,00        | 28,49±0,23         | 102,66±0,41          | 111,76±0,34         | 35,38±0,64         | 12,58±0,15       | 370,76±2,97          | 9,80±0,33        | 133,08±1,06        | 35,35±0,21         |
| 05/10/2018        | 22,91±0,62                              | 0,39±0,02        | 103,05±1,96        | 219,83±3,96          | 135,91±0,27         | 12,59±0,33         | 4,60±0,10        | 154,76±3,10          | 4,79±0,06        | 36,20±0,11         | 9,87±0,04          |
| 05/28/2018        | 68,79±4,06                              | 0,47±0,03        | 52,54±1,00         | 316,21±2,21          | 144,78±1,01         | 33,69±0,54         | 10,74±0,19       | 344,36±13,77         | 12,30±0,22       | 109,03±0,87        | 33,56±0,17         |
| 06/10/2018        | 31,98±0,83                              | 0,24±0,03        | 39,58±0,12         | 138,92±1,94          | 87,86±0,97          | 25,02±0,40         | 9,49±0,18        | 224,64±5,17          | 7,17±0,07        | 96,54±1,06         | 20,03±0,12         |
| 06/26/2018        | 21,31±0,28                              | 0,27±0,02        | 41,13±1,23         | 253,08±6,83          | 78,40±1,72          | 14,26±0,43         | 4,73±0,09        | 122,81±2,70          | 3,59±0,14        | 38,80±0,66         | 9,79±0,05          |
| 07/16/2018        | 41,90±0,38                              | 0,32±0,02        | 63,09±1,39         | 943,30±7,55          | 242,28±4,36         | 27,59±0,55         | 10,07±0,25       | 237,85±5,47          | 9,08±0,24        | 96,37±0,87         | 22,69±0,45         |
| 07/26/2018        | 31,92±0,70                              | 0,29±0,01        | 59,05±0,65         | 253,23±0,51          | 120,31±1,32         | 23,40±0,51         | 7,96±0,19        | 217,56±5,44          | 6,74±0,15        | 74,94±0,75         | 18,63±0,26         |
| <b>Moy. ± s.d</b> | <b>53,45±40,89</b>                      | <b>0,59±0,36</b> | <b>73,72±43,37</b> | <b>345,71±216,21</b> | <b>134,83±55,36</b> | <b>25,08±11,96</b> | <b>8,21±3,37</b> | <b>267,79±143,37</b> | <b>9,09±5,18</b> | <b>70,46±43,89</b> | <b>21,39±10,71</b> |

**Tableau III.6** : Valeurs bimensuelles des concentrations des métaux traces particulières dans l'oued Mazafran.

| Date              | Concentrations des métaux particulières |                  |                    |                     |                    |                    |                  |                      |                   |                    |                    |
|-------------------|-----------------------------------------|------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|----------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
|                   | Pb (µg/g)                               | Cd (ug/g)        | Cu (µg/g)          | Zn (µg/g)           | Cr (µg/g)          | Ni (µg/g)          | Co (µg/g)        | Mn (µg/g)            | As (µg/g)         | V (µg/g)           | Fe (mg/g)          |
| 08/10/2017        | 16,43±0,67                              | 0,36±0,01        | 53,93±2,20         | 159,29±6,51         | 13,57±0,55         | 7,86±0,32          | 2,14±0,09        | 135,36±5,53          | 3,57±0,15         | 1,79±0,07          | 6,32±0,26          |
| 08/29/2017        | 31,25±1,28                              | 0,35±0,01        | 100,00±4,09        | 189,93±7,76         | 19,10±0,78         | 10,42±0,43         | 6,25±0,26        | 298,61±12,21         | 5,56±0,23         | 13,54±0,55         | 7,99±0,33          |
| 09/11/2017        | 54,31±2,22                              | 0,52±0,02        | 91,90±3,76         | 268,45±10,97        | 86,21±3,52         | 34,66±1,42         | 10,34±0,42       | 292,93±11,97         | 16,72±0,68        | 81,03±3,31         | 36,41±1,49         |
| 09/25/2017        | 29,26±1,20                              | 0,53±0,02        | 105,32±4,31        | 218,62±8,94         | 30,85±1,26         | 11,17±0,46         | 4,26±0,17        | 121,81±4,98          | 5,85±0,24         | 24,47±1,00         | 13,24±0,54         |
| 10/10/2017        | 25,55±1,04                              | 0,27±0,01        | 67,58±2,76         | 166,76±6,82         | 38,46±1,57         | 17,31±0,71         | 4,95±0,20        | 362,09±14,80         | 5,22±0,21         | 10,16±0,42         | 8,63±0,35          |
| 10/23/2017        | 33,54±1,37                              | 0,30±0,01        | 105,49±4,31        | 233,54±9,55         | 34,45±1,41         | 15,85±0,65         | 5,49±0,22        | 135,67±5,55          | 6,40±0,26         | 14,33±0,59         | 14,66±0,60         |
| 11/06/2017        | 55,37±2,26                              | 0,43±0,02        | 84,88±3,47         | 243,23±9,94         | 126,92±5,19        | 42,66±1,74         | 15,14±0,62       | 394,48±16,12         | 14,42±0,59        | 140,67±5,75        | 37,38±1,53         |
| 11/13/2017        | 85,07±3,48                              | 0,37±0,02        | 204,10±8,34        | 510,45±20,87        | 100,00±4,09        | 63,06±2,58         | 16,79±0,69       | 473,51±19,36         | 26,87±1,10        | 89,93±3,68         | 59,51±2,43         |
| 12/18/2017        | 105,11±4,52                             | 0,61±0,09        | 121,58±1,46        | 376,44±6,02         | 108,29±0,76        | 40,87±0,53         | 16,13±0,10       | 547,17±21,34         | 20,07±0,14        | 117,88±1,18        | 36,13±0,22         |
| 12/28/2017        | 42,95±0,43                              | 0,22±0,01        | 51,45±0,31         | 150,52±0,75         | 80,17±0,64         | 25,67±0,08         | 7,91±0,04        | 330,10±3,63          | 11,47±0,07        | 94,49±1,42         | 24,75±0,10         |
| 01/18/2018        | 39,50±0,75                              | 0,22±0,03        | 54,81±1,10         | 146,41±1,17         | 68,32±1,50         | 21,27±0,83         | 7,51±0,23        | 322,92±5,81          | 12,02±0,20        | 81,14±0,49         | 18,81±0,41         |
| 01/29/2018        | 42,84±1,46                              | 0,34±0,01        | 90,73±1,00         | 187,64±1,31         | 52,81±0,53         | 19,21±0,15         | 6,41±0,05        | 331,78±12,94         | 7,90±0,14         | 47,61±1,05         | 14,81±0,33         |
| 02/08/2018        | 53,28±1,65                              | 0,36±0,04        | 82,97±1,00         | 235,05±0,47         | 75,18±0,53         | 25,62±0,10         | 8,14±0,17        | 308,22±7,71          | 11,30±0,37        | 66,84±0,60         | 22,49±0,49         |
| 02/22/2018        | 50,14±1,50                              | 0,21±0,01        | 52,15±0,68         | 142,78±0,57         | 150,60±0,75        | 43,07±0,60         | 14,78±0,24       | 238,29±7,15          | 16,43±0,21        | 186,49±0,56        | 30,53±0,15         |
| 03/05/2018        | 77,90±1,17                              | 0,31±0,01        | 72,90±1,75         | 249,63±3,74         | 70,47±0,63         | 24,46±0,44         | 9,27±0,13        | 284,88±4,27          | 10,34±0,17        | 72,38±1,45         | 24,38±0,24         |
| 03/27/2018        | 27,56±1,02                              | 0,19±0,03        | 25,79±0,52         | 115,00±1,73         | 122,43±1,96        | 35,52±0,43         | 12,31±0,10       | 267,64±13,38         | 8,78±0,20         | 151,79±0,46        | 32,06±0,16         |
| 04/10/2018        | 127,36±1,53                             | 8,78±0,14        | 328,46±3,94        | 384,08±2,30         | 111,05±0,89        | 33,85±0,68         | 8,33±0,17        | 201,44±2,22          | 8,66±0,02         | 73,09±0,73         | 21,82±0,41         |
| 04/16/2018        | 25,42±0,43                              | 0,18±0,02        | 25,29±0,43         | 106,76±1,39         | 124,02±2,11        | 38,42±0,88         | 14,12±0,08       | 355,68±3,20          | 8,85±0,13         | 156,93±2,04        | 36,15±0,72         |
| 05/10/2018        | 90,93±3,00                              | 13,28±0,25       | 306,17±3,67        | 238,91±5,49         | 73,04±0,51         | 25,56±0,28         | 6,91±0,12        | 248,28±6,46          | 7,18±0,06         | 71,31±0,14         | 21,83±0,13         |
| 05/28/2018        | 57,78±1,68                              | 0,30±0,01        | 65,32±1,70         | 180,48±3,07         | 116,15±1,74        | 38,64±0,97         | 14,66±0,38       | 275,48±7,44          | 15,22±0,14        | 135,77±0,68        | 33,59±0,64         |
| 06/10/2018        | 49,73±0,55                              | 0,22±0,02        | 55,87±0,34         | 119,25±2,62         | 68,38±0,96         | 21,19±0,44         | 7,99±0,09        | 182,29±3,46          | 10,12±0,82        | 85,37±1,54         | 20,04±0,22         |
| 06/26/2018        | 32,79±0,85                              | 0,24±0,02        | 60,37±0,42         | 166,80±2,84         | 46,24±0,55         | 20,85±0,35         | 5,67±0,14        | 153,85±4,62          | 6,14±0,17         | 46,78±0,14         | 14,05±0,25         |
| 07/16/2018        | 30,33±1,27                              | 0,19±0,02        | 62,57±1,00         | 254,26±4,83         | 35,04±0,32         | 15,14±0,35         | 3,78±0,04        | 100,96±3,74          | 3,48±0,15         | 20,03±0,06         | 5,66±0,06          |
| 07/26/2018        | 48,29±1,50                              | 0,62±0,03        | 98,97±2,38         | 250,84±6,02         | 55,11±1,32         | 25,64±0,95         | 6,25±0,18        | 111,11±1,33          | 4,91±0,40         | 43,65±0,83         | 11,54±0,31         |
| <b>Moy. ± s.d</b> | <b>51,36±27,63</b>                      | <b>1,23±3,10</b> | <b>98,69±76,47</b> | <b>220,63±94,52</b> | <b>75,29±37,99</b> | <b>27,41±12,96</b> | <b>8,98±4,28</b> | <b>269,77±114,62</b> | <b>10,31±5,67</b> | <b>76,15±51,44</b> | <b>23,03±12,86</b> |

### III.1.3 Analyses de corrélation

Afin d'identifier les relations entre les paramètres environnementaux et les concentrations de métaux traces dissous et particulaires dans les deux oueds, les coefficients de corrélation ont été calculés (Tab. III.7).

Une corrélation négative significative est observée entre la température et les métaux particuliers, e.g, T et Pb (- 0,32) ; T et Cr (- 0,35) ; T et As (- 0,44) ; T et Fe (- 0,45) ; T et Ni (- 0,47) ; T et Co (- 0,49) ; T et Mn (- 0,56) ; et T et V (- 0,56). Par conséquent, une diminution de la température de l'eau de l'oued s'accompagne d'une augmentation de la teneur en métaux dans les matières en suspensions.

Une corrélation positive hautement significative a été trouvée entre le Co particulaire et le Ni (0,90), ces deux métaux particuliers (Co et Ni) ont une corrélation positive significative avec certains métaux dissous tels que Mn (0,32), As (0,29) et V (0,44). Ainsi, le Co et le Ni particuliers ont un comportement similaire à celui de Mn, As et V dissous.

Une corrélation positive significative est également notée entre le Co dissous et le Mn dissous et particulaire (0,68 et 0,39), Ni (0,36 et 0,51), As (0,54 et 0,53) et V (0,65 et 0,31), respectivement. Le Co dissous a également une corrélation positive avec le Cu dissous (0,50), avec le Zn (0,45) et Cd (0,40), ainsi qu'avec le Fe particulaire (0,46) et le Pb (0,29). Le Co dissous affiche le plus de corrélations avec les autres métaux dissous et particuliers dans cette étude.

Une corrélation positive hautement significative a été trouvée entre le Fe dissous et le Mn (0,71). Ces deux métaux dissous ont une forte corrélation positive significative avec Co (0,93 et 0,73), Ni (0,89 et 0,65), As (0,83 et 0,82) et V (0,76 et 0,57). Ainsi, il apparaît que Fe, Mn, Co, Ni, As et V dissous ont des comportements similaires dans les oueds El Harrach et Mazafran. En ce qui concerne le Ni particulaire, une corrélation positive hautement significative est notée avec les métaux particuliers Co (0,90), Fe (0,89), As (0,78) et V (0,76), respectivement.

Dans cette étude, à l'exception du Pb et du Cu particuliers, le Cd dissous et particulaire a montré qu'il y avait une très faible corrélation significative entre ces phases et les autres métaux ( $-0,15 < r < 0,08$ ). Dans une moindre mesure, aucune corrélation significative ( $r = 0$ ) n'a été trouvée entre le Cd particulaire et le Cu dissous.

**Tableau III.7 :** Matrice de corrélation entre les paramètres environnementaux de l'eau, les métaux traces dissous (µg/L) et les métaux traces particulaires (µg/g p,s) dans les deux oueds.

|         | T            | pH           | Cond         | SPM          | Fe µg/L     | Mn µg/L     | Pb µg/L | Cr µg/L      | Co µg/L     | Ni µg/L     | Cu µg/L     | Zn µg/L     | As µg/L     | Cd µg/L      | V µg/L      | Fe µg/g     | Mn µg/g     | Pb µg/g     | Cr µg/g     | Co µg/g     | Ni µg/g     | Cu µg/g     | Zn µg/g     | As µg/g     | Cd µg/g | V µg/g |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|---------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|--------|
| T       | 1,00         |              |              |              |             |             |         |              |             |             |             |             |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| pH      | <b>-0,54</b> | 1,00         |              |              |             |             |         |              |             |             |             |             |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Cond    | <b>0,49</b>  | <b>-0,48</b> | 1,00         |              |             |             |         |              |             |             |             |             |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| SPM     | <b>-0,35</b> | <b>0,53</b>  | <b>-0,52</b> | 1,00         |             |             |         |              |             |             |             |             |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Fe µg/L | -0,17        | <b>-0,33</b> | 0,16         | <b>-0,48</b> | 1,00        |             |         |              |             |             |             |             |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Mn µg/L | -0,06        | <b>-0,35</b> | -0,21        | -0,17        | <b>0,35</b> | 1,00        |         |              |             |             |             |             |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Pb µg/L | <b>0,30</b>  | -0,18        | 0,12         | -0,16        | 0,03        | 0,01        | 1,00    |              |             |             |             |             |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Cr µg/L | 0,02         | -0,20        | <b>0,38</b>  | <b>-0,39</b> | <b>0,46</b> | -0,09       | 0,04    | 1,00         |             |             |             |             |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Co µg/L | -0,25        | -0,04        | <b>-0,37</b> | 0,13         | 0,27        | <b>0,68</b> | -0,01   | -0,17        | 1,00        |             |             |             |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Ni µg/L | 0,09         | -0,07        | 0,08         | -0,09        | 0,26        | -0,04       | 0,11    | 0,13         | <b>0,36</b> | 1,00        |             |             |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Cu µg/L | -0,02        | -0,20        | -0,18        | -0,06        | 0,24        | 0,23        | 0,28    | 0,15         | <b>0,50</b> | <b>0,45</b> | 1,00        |             |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Zn µg/L | 0,15         | -0,04        | -0,07        | -0,19        | 0,27        | 0,25        | 0,25    | 0,03         | <b>0,45</b> | 0,13        | <b>0,34</b> | 1,00        |             |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| As µg/L | -0,02        | -0,14        | <b>-0,29</b> | -0,11        | 0,06        | <b>0,63</b> | -0,11   | -0,22        | <b>0,54</b> | -0,13       | 0,22        | 0,20        | 1,00        |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Cd µg/L | 0,20         | -0,11        | 0,04         | -0,16        | 0,25        | 0,13        | 0,28    | 0,26         | <b>0,40</b> | <b>0,70</b> | <b>0,64</b> | <b>0,37</b> | -0,09       | 1,00         |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| V µg/L  | <b>-0,35</b> | -0,03        | -0,18        | -0,14        | <b>0,31</b> | <b>0,69</b> | -0,07   | -0,16        | <b>0,65</b> | -0,01       | 0,16        | <b>0,30</b> | <b>0,48</b> | 0,11         | 1,00        |             |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Fe µg/g | <b>-0,45</b> | 0,19         | <b>-0,50</b> | <b>0,44</b>  | 0,04        | <b>0,33</b> | -0,22   | <b>-0,44</b> | <b>0,46</b> | -0,19       | -0,02       | 0,10        | <b>0,37</b> | -0,24        | <b>0,48</b> | 1,00        |             |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Mn µg/g | <b>-0,56</b> | 0,21         | <b>-0,37</b> | 0,20         | 0,17        | 0,26        | -0,21   | -0,23        | <b>0,39</b> | -0,14       | 0,03        | 0,10        | 0,26        | -0,19        | <b>0,45</b> | <b>0,71</b> | 1,00        |             |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Pb µg/g | <b>-0,32</b> | -0,06        | -0,19        | -0,09        | <b>0,33</b> | <b>0,33</b> | -0,17   | 0,01         | <b>0,29</b> | -0,13       | 0,03        | 0,10        | 0,24        | -0,15        | <b>0,48</b> | <b>0,40</b> | <b>0,43</b> | 1,00        |             |             |             |             |             |             |         |        |
| Cr µg/g | <b>-0,35</b> | -0,15        | 0,02         | 0,19         | 0,16        | -0,02       | -0,16   | 0,18         | 0,26        | 0,10        | 0,20        | -0,07       | -0,03       | -0,06        | 0,11        | <b>0,41</b> | <b>0,36</b> | <b>0,47</b> | 1,00        |             |             |             |             |             |         |        |
| Co µg/g | <b>-0,49</b> | 0,14         | <b>-0,46</b> | <b>0,48</b>  | 0,02        | <b>0,32</b> | -0,22   | <b>-0,42</b> | <b>0,45</b> | -0,16       | -0,05       | 0,00        | <b>0,29</b> | -0,25        | <b>0,43</b> | <b>0,93</b> | <b>0,73</b> | <b>0,37</b> | <b>0,47</b> | 1,00        |             |             |             |             |         |        |
| Ni µg/g | <b>-0,47</b> | 0,13         | <b>-0,40</b> | <b>0,38</b>  | 0,09        | <b>0,32</b> | -0,26   | <b>-0,34</b> | <b>0,51</b> | 0,11        | 0,02        | 0,03        | <b>0,29</b> | -0,13        | <b>0,44</b> | <b>0,89</b> | <b>0,65</b> | <b>0,38</b> | <b>0,49</b> | <b>0,90</b> | 1,00        |             |             |             |         |        |
| Cu µg/g | -0,06        | -0,10        | -0,02        | <b>-0,31</b> | <b>0,33</b> | 0,08        | -0,11   | 0,23         | -0,08       | 0,02        | 0,08        | 0,06        | 0,07        | 0,10         | 0,17        | 0,06        | 0,04        | <b>0,58</b> | 0,09        | -0,01       | 0,14        | 1,00        |             |             |         |        |
| Zn µg/g | 0,03         | -0,28        | <b>0,36</b>  | -0,22        | <b>0,34</b> | 0,09        | -0,11   | <b>0,31</b>  | 0,16        | 0,07        | 0,14        | 0,18        | 0,05        | 0,11         | 0,25        | 0,20        | 0,20        | <b>0,62</b> | <b>0,67</b> | 0,16        | 0,20        | <b>0,36</b> | 1,00        |             |         |        |
| As µg/g | <b>-0,44</b> | 0,03         | <b>-0,36</b> | 0,08         | 0,27        | <b>0,46</b> | -0,18   | -0,25        | <b>0,53</b> | -0,09       | 0,01        | 0,17        | <b>0,47</b> | -0,16        | 0,63        | <b>0,83</b> | <b>0,82</b> | <b>0,49</b> | <b>0,39</b> | <b>0,81</b> | <b>0,78</b> | 0,15        | <b>0,30</b> | 1,00        |         |        |
| Cd µg/g | -0,02        | -0,03        | -0,07        | -0,12        | -0,01       | -0,07       | -0,09   | -0,03        | -0,15       | -0,03       | -0,00       | -0,11       | 0,02        | 0,06         | 0,03        | -0,01       | -0,04       | <b>0,36</b> | -0,00       | -0,06       | 0,04        | <b>0,78</b> | 0,08        | -0,05       | 1,00    |        |
| V µg/g  | <b>-0,56</b> | 0,24         | <b>-0,47</b> | <b>0,62</b>  | -0,23       | 0,15        | -0,23   | <b>-0,51</b> | <b>0,31</b> | -0,25       | -0,14       | -0,22       | 0,18        | <b>-0,41</b> | 0,26        | <b>0,76</b> | <b>0,57</b> | 0,21        | <b>0,45</b> | <b>0,88</b> | <b>0,76</b> | -0,16       | -0,07       | <b>0,61</b> | -0,02   | 1,00   |

### III.1.4 Fractionnement des ETM entre la phase dissoute et la phase particulaire ( $K_d$ )

La répartition des métaux traces entre les différentes phases, c'est-à-dire les formes dissoutes et particulaires, affecte leur transport vers l'océan et fournit des informations importantes sur leurs interactions avec le biote, leur cycle biogéochimique et leur bilan élémentaire (Fang and Wang, 2022; Prabakaran et al., 2020). Log  $K_d$  pourrait être considéré comme un indice important pour mieux comprendre la circulation des contaminants entre les différents compartiments environnementaux (Pavoni et al., 2020).

Pour tous les métaux analysés (Fe, Mn, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd et V), les valeurs calculées du Log  $K_d$  étaient comprises entre 2 et 6 (Tab. IV.1 et IV.2, annexes). Cette gamme de valeurs est typique pour les eaux douces (Tomczak et al., 2019). Dans l'eau des deux oueds, Fe, Pb et Cu avaient les valeurs de Log  $K_d$  les plus élevées, suivies par le Cr, ce qui indique que ces éléments sont très réactifs avec les MESs. La même observation a été rapportée dans la rivière Isonzo/ Soča (golfe de Trieste, nord de la mer Adriatique) par Pavoni et al. (2020). Selon Tomczak et al. (2019), les métaux caractérisés par des valeurs de Log  $K_d$  élevées forment des complexes stables avec la phase particulaire, ce qui implique que les métaux particulaires sont prédominants au niveau des deux oueds.

Le Mn présente les valeurs de Log  $K_d$  les plus faibles, ce qui confirme son affinité avec la phase dissoute dans les deux oueds. Le manganèse est un élément sensible à l'oxydoréduction, et le fait que le Mn particulaire augmente lorsque le Mn total dissous diminue et vice versa est probablement dû à la prévalence relative des processus d'oxydation et de réduction ou de dissolution (Pavoni et al., 2020).

Parmi les 11 métaux, moins de 10% (5 sur 48) de tous les échantillons ont dépassé la valeur de 6 pour le Log  $K_d$ , c'est-à-dire le Log  $K_d$  calculé pour le Fe le 27 mars et le 16 avril dans les deux oueds, et le Log  $K_d$  du Cu le 26 juillet dans l'oued Mazafran. Deux valeurs de Log  $K_d$  (inférieures à 2) ont été enregistrées pour le Ni pendant les échantillonnages du 23 octobre et du 8 août dans les oueds El Harrach et Mazafran, respectivement.

Les valeurs de Log  $K_d$  sont connues pour être affectées par certains facteurs environnementaux, tels que le pH, le carbone organique dissous et particulaire, la salinité et la température (Alkhatib et al., 2016) ainsi que le rapport masse/volume (Barreto et al., 2011) et la taille des particules (Fan et al., 2017).

### III.1.5 Comparaison globale

Les concentrations moyennes des métaux dissous le Cu, le Zn, le Co, le V et le Fe dans les deux oueds sont du même ordre de grandeur. Cependant, une différence entre les concentrations moyennes particulière de Cd, Cu, Zn et Cr est observée dans ces oueds.

Contrairement au Cu dissous, les concentrations moyennes dissoutes des autres métaux analysés dans les oueds El Harrach et Mazafran sont supérieures à celles rapportées dans une compilation des moyennes globales des métaux dissous pour les rivières ([Gaillardet et al., 2003](#)). D'autre part, par rapport à une compilation mondiale similaire des métaux traces particuliers dans les eaux douces ([Viers et al., 2009](#)), les concentrations moyennes des métaux particuliers (Pb, Ni, Co, Mn, As, V et Fe) dans les deux oueds étaient plus faibles que celles considérées comme des valeurs moyennes mondiales.

**Tableau III.8 :** comparaison entre métaux traces particulaires de la présente étude avec d'autres oueds et rivières du monde.

|                         | Oueds/Rivières   | Pb<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Cd<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Cu<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Zn<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Cr<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Ni<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Co<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Mn<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | As<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | V<br>( $\mu\text{g/g}$ ) | Fe<br>( $\text{mg/g}$ ) |
|-------------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Cet étude               | Oued El Harach   | 53,45                     | 0,59                      | 73,72                     | 345,71                    | 134,83                    | 25,08                     | 8,21                      | 267,79                    | 9,09                      | 70,46                    | 21,39                   |
| Cet étude               | Oued Mazafran    | 51,36                     | 1,23                      | 98,69                     | 220,63                    | 75,29                     | 27,41                     | 8,98                      | 269,77                    | 10,31                     | 76,15                    | 23,03                   |
| (Viers et al., 2009)    | Moyenne rivières | 61,1                      | 1,55                      | 75,9                      | 208                       | 130                       | 74,5                      | 22,5                      | 1679                      | 36,3                      | 129                      | 58,1                    |
| (Hayzoun, 2014)         | Sebou (Maroc)    | 53                        | 0,80                      | 110                       | 340                       | 810                       | 63                        | 9,0                       | 380                       | 9,9                       | 160                      | 21                      |
| (Ollivier et al., 2011) | Rhône (France)   | 47,42                     | 0,62                      | 51,44                     | 187,7                     | 93,24                     | 48,18                     | 13,91                     | 873,39                    | /                         | 103,39                   | 29,90                   |

**Tableau III.9 :** comparaison entre métaux traces dissous de la présente étude avec d'autres oueds et rivières du monde.

|                           | Oueds/Rivières   | Pb<br>( $\mu\text{g/l}$ ) | Cd<br>( $\text{ng/l}$ ) | Cu<br>( $\mu\text{g/l}$ ) | Zn<br>( $\mu\text{g/l}$ ) | Cr<br>( $\mu\text{g/l}$ ) | Ni<br>( $\mu\text{g/l}$ ) | Co<br>( $\mu\text{g/l}$ ) | Mn<br>( $\mu\text{g/l}$ ) | As<br>( $\mu\text{g/l}$ ) | V<br>( $\mu\text{g/l}$ ) | Fe<br>( $\mu\text{g/l}$ ) |
|---------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Cet étude                 | Oued El Harach   | 1,70                      | 56,44                   | 1,94                      | 54,82                     | 1,51                      | 36,78                     | 0,82                      | 118,95                    | 1,72                      | 1,16                     | 149,45                    |
| Cet étude                 | Oued Mazafran    | 0,75                      | 40,76                   | 1,33                      | 52,65                     | 1,12                      | 11,96                     | 0,90                      | 144,35                    | 2,82                      | 1,41                     | 150,88                    |
| (Gaillardet et al., 2003) | Moyenne rivières | 0,079                     | 0,08                    | 1,48                      | 0,60                      | 0,7                       | 0,801                     | 0,148                     | 34                        | 0,62                      | 0,71                     | 66                        |
| (Hayzoun, 2014)           | Sebou (Maroc)    | 0,53                      | 0,07                    | 1,7                       | 41                        | 8,5                       | 5,4                       | 0,50                      | 49                        | 1,2                       | 3,6                      | 77                        |
| (Benabdelkader, 2019)     | Tafna (Algérie)  | 0,19                      | 0,01                    | 5,26                      | -                         | 0,46                      | 0,65                      | 0,31                      | 18,86                     | -                         | -                        | 40,28                     |
| (Ollivier et al., 2011)   | Rhône (France)   | 0,07                      | /                       | 2,08                      | 2,7                       | /                         | 0,98                      | /                         | /                         | 1,9                       | 0,7                      | /                         |

### III.1.6 Evaluation de l'intensité de la contamination par les métaux traces particuliers

Les valeurs de l'indice de la géoaccumulation (Igeo) pour l'oued El Harrach (Tab. III.10) diminuent dans l'ordre suivant :  $Zn > Cu > Pb > Cr \sim Cd > Mn \sim As > Co \sim Ni > Fe > V$ . Dans l'oued Mazafran (Tab. III.11), les valeurs de l'Igeo diminuent comme suit :  $Cu > Zn > Pb > Cd > Mn \sim As > Ni > Co > Cr > Fe > V$ . Selon Müller (1969), les valeurs Igeo calculées pour ces oueds indiqueraient qu'elles sont toutes les deux légèrement polluées par le Zn et le Cu particuliers ( $0 < Igeo < 1$ ) et qu'il n'y a pas d'indication de pollution par les autres métaux particuliers ( $Igeo < 0$ ).

Selon les catégories de facteur d'enrichissement établies par Birch (2022), il existe dans l'oued El Harrach (Tab. III.10) un enrichissement sévère en Zn particulaire ( $10 < FE < 25$ ), un enrichissement modérément sévère en Cu particulaire ( $5 < FE < 10$ ), un enrichissement modéré en Pb, Cr et Cd particuliers ( $3 < FE < 5$ ) et seulement un enrichissement mineur ( $FE < 1$ ) en As, Co, Ni, Fe et V particuliers. Dans l'oued Mazafran (Tab. III.11), les données indiquent un enrichissement modérément sévère en Cu, Zn et Cd particuliers, un enrichissement modéré en Pb particulaire et un enrichissement mineur en Mn, As, Co, Ni, Cr et V particuliers. En outre, des enrichissements très sévères de Cd particulaire avec des valeurs de FE de 41,52 et 62,80 ont été observés dans l'oued Mazafran le 10 avril et le 10 mai, respectivement, ainsi que des enrichissements sévères de Cu particulaire (22,84 et 21,29) et un enrichissement modérément sévère de Zn particulaire (9,56 et 5,94) et de Pb (8,86 et 6,32), respectivement, les mêmes jours (Tab. IV.6, annexes). Ainsi, ces résultats donnent une indication claire de la pollution anthropique pour certains métaux traces dans les eaux des deux oueds.

De plus, à l'exception des concentrations particulières en Co et V, selon les critères EF de Zhang and Liu (2002) et Arienzo et al. (2020), une partie importante de tous les métaux particuliers analysés dans notre étude provient de sources anthropiques ( $FE > 1,5$ ), c'est-à-dire qu'ils proviennent d'apports non cristallins. En effet, l'environnement de l'oued El Harrach est très perturbé et très varié. L'eau de l'oued est fortement contaminée et dégage des odeurs nauséabondes. Ce degré de pollution peut être attribué aux eaux usées provenant du versement des zones industrielles d'El Harrach, Baba Ali et Oued Smar directement dans l'oued sans traitement approprié. Par ailleurs, l'oued Mazafran reçoit de nombreux rejets d'eaux usées et rejets d'unités industrielles utilisant des colorants à base de métaux (Cd, Cr ... etc.). La station d'épuration de Kolea, située en amont de l'oued, pourrait être une source du carbone organique particulaire (COP) (Bouras et al., 2021). En outre, les terres agricoles adjacentes sont fertilisées

par les engrais azotés et phosphatés et traitées à l'aide des produits phytosanitaires tels que les herbicides, fongicides ... ect.

Cependant, les valeurs moyennes de l'indice de charge polluante (PLI) étaient similaires avec  $0,88 \pm 0,35$  dans l'oued El Harrach et  $0,85 \pm 0,36$  dans l'oued Mazafran. Les deux valeurs moyennes sont inférieures à 1, ce qui suggère une absence de pollution causée par les métaux particuliers analysés (Tabl. III.10 et Tabl. III.11).

Il est intéressant de noter que ces indices et critères d'utilisation qui ont été développés ne conduisent pas toujours à la même conclusion.

**Tableau III.10 :** Valeurs de l'Indice de géoaccumulation (Igeo), Facteur d'enrichissement (FE) et Indice de la charge polluante (PLI) dans l'Oued El Harrach.

| Métal | Igeo  |       |       | FE    |      |       | PLI  |      |      |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|
|       | Moy   | Min   | Max   | Moy   | Min  | Max   | Moy  | Min  | Max  |
| Fe    | -2,05 | -3,52 | -1,02 | -     | -    | -     |      |      |      |
| Mn    | -1,21 | -2,51 | 0,51  | 1,90  | 1,32 | 5,02  |      |      |      |
| Pb    | -0,20 | -1,26 | 2,01  | 4,30  | 1,05 | 17,87 |      |      |      |
| Cr    | -0,60 | -2,24 | 0,38  | 3,14  | 1,22 | 8,09  |      |      |      |
| Co    | -1,50 | -3,49 | -0,51 | 1,49  | 1,02 | 2,04  |      |      |      |
| Ni    | -1,53 | -4,78 | -0,44 | 1,57  | 0,42 | 4,59  |      |      |      |
| Cu    | 0,35  | -0,84 | 2,22  | 7,22  | 1,22 | 34,86 |      |      |      |
| Zn    | 1,03  | -0,47 | 2,73  | 10,70 | 1,58 | 32,98 |      |      |      |
| As    | -1,26 | -2,44 | 0,58  | 1,80  | 1,06 | 3,10  |      |      |      |
| Cd    | -0,61 | -2,14 | 0,96  | 3,75  | 0,50 | 12,29 |      |      |      |
| V     | -2,18 | -7,28 | -0,67 | 1,07  | 0,07 | 2,25  |      |      |      |
|       |       |       |       |       |      |       | 0,88 | 0,26 | 1,78 |

**Tableau III.11 :** Valeurs de l'Indice de géoaccumulation (Igeo), Facteur d'enrichissement (FE) et Indice de la charge polluante (PLI) dans l'Oued Mazafran.

| Métal | Igeo  |       |       | FE   |      |       | PLI  |      |      |
|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|
|       | Moy   | Min   | Max   | Moy  | Min  | Max   | Moy  | Min  | Max  |
| Fe    | -1,98 | -3,77 | -0,38 |      |      |       |      |      |      |
| Mn    | -1,17 | -2,45 | -0,02 | 1,99 | 1,09 | 5,87  |      |      |      |
| Pb    | -0,17 | -1,63 | 1,32  | 3,97 | 1,07 | 8,86  |      |      |      |
| Cr    | -1,53 | -3,78 | -0,30 | 1,43 | 0,70 | 2,57  |      |      |      |
| Co    | -1,40 | -3,29 | -0,32 | 1,55 | 1,04 | 2,88  |      |      |      |
| Ni    | -1,33 | -2,97 | 0,04  | 1,64 | 1,06 | 3,36  |      |      |      |
| Cu    | 0,66  | -1,01 | 2,69  | 8,50 | 1,06 | 22,84 |      |      |      |
| Zn    | 0,52  | -0,42 | 1,84  | 7,03 | 1,60 | 24,38 |      |      |      |
| As    | -1,11 | -2,49 | 0,46  | 1,88 | 0,97 | 2,76  |      |      |      |
| Cd    | -0,84 | -2,08 | 4,15  | 6,31 | 0,51 | 62,80 |      |      |      |
| V     | -2,14 | -7,02 | -0,32 | 1,04 | 0,09 | 2,03  |      |      |      |
|       |       |       |       |      |      |       | 0,85 | 0,26 | 1,59 |

### III.1.7 Évaluation des risques écologiques liés aux métaux traces particuliers

Les valeurs moyennes de  $Er^i$  calculées pour l'oued El Harrach diminuent dans l'ordre suivant : Cd (35,14) > Cu (10,84) > Pb (7,86) > As (6,99) > Zn (3,64) > Ni (3,06) > Co (2,93) > Cr (2,17) > V (0,91) > Mn (0,37) (Tab. III.12), tandis que dans l'oued Mazafran, les valeurs moyennes d' $Er^i$  diminuent comme suit : Cd (73,58) > Cu (14,51) > As (7,93) > Pb (7,55) > Ni (3,34) > Co (3,21) > Zn (2,32) > Cr (1,21) > V (0,98) > Mn (0,73) (Tab. III.13). Selon la classification de [Hakanson \(1980\)](#) un risque écologique potentiel considérable de Cd (87,59) a été observé au mois de novembre et un risque modéré du même métal a été enregistré de décembre à avril dans l'oued El Harrach. Dans l'oued Mazafran, pendant les périodes de prélèvement du 10 avril et du 10 mai 2018, un risque potentiellement désastreux de pollution par le Cd, 526,83 et 796,97, respectivement, et un risque modéré par Cu, 48,30 et 45,02, ont été notés (Tab. IV.9 et IV.10, annexes).

Selon les valeurs moyennes de l'indice de risque écologique potentiel (RI), les MES des deux oueds présentent un risque faible ( $RI < 150$ ), avec  $RI = 74,27 \pm 33,34$ , intervalle 36,18-139,78, et  $RI = 114,60 \pm 198,04$ , gamme 34,28 - 871,09 dans les oueds El Harrach et Mazafran, respectivement. Deux pics de RI ont été enregistrés dans l'oued Mazafran les 10 avril et 10 mai 2018 avec des valeurs de RI de 614,41 et 871,09, respectivement. Par conséquent, les MES durant cette période d'observation présentait un risque écologique très élevé ( $RI > 600$ ). Ces deux pics sont influencés par les valeurs  $Er^i$  maximales de Cd (526,83 et 796,97), Cu (48,30 et 45,02) et Pb (18,73 et 13,37), respectivement. Il est à noter qu'au cours de ces deux périodes d'échantillonnage, les concentrations de Cd particulière étaient 700 et 1080 fois supérieures à la concentration moyenne globale de ce métal particulière (Tab. IV.9 et IV.10, annexes).

**Tableau III.12** : Valeurs des indices de risque écologique monomial ( $Er$ ) et de risque écologique potentiel (RI) dans l'Oued El Harrach.

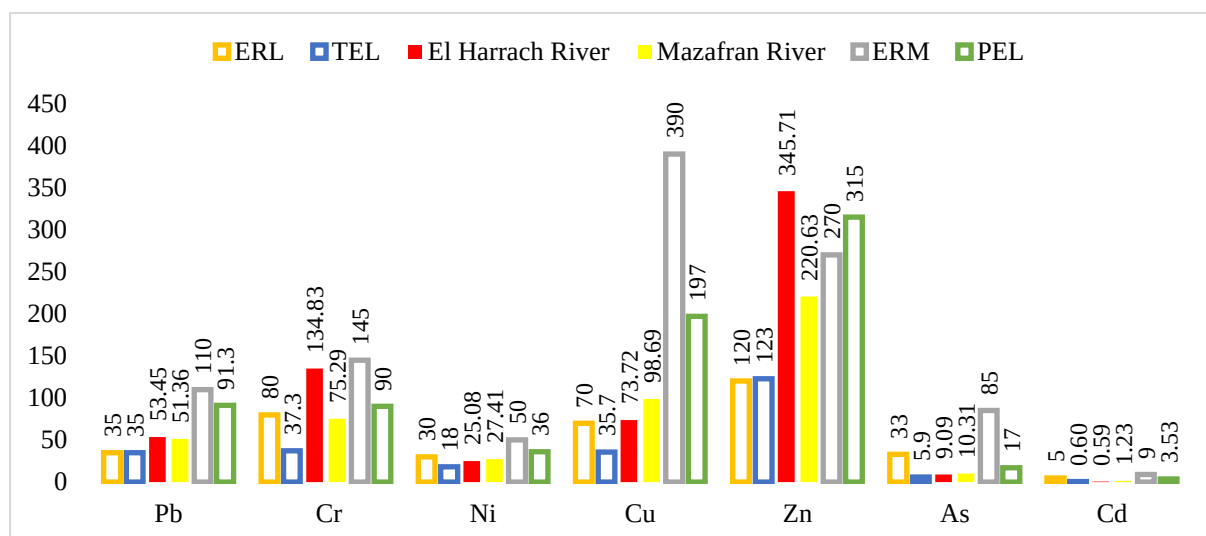
|                                 | Valeurs $Er$     |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  | RI               |
|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                                 | Mn               | Pb               | Cr               | Co               | Ni               | Cu               | Zn               | As               | Cd               | V                |                  |
| Min                             | 0,26             | 3,13             | 0,63             | 0,67             | 0,27             | 4,19             | 1,08             | 2,76             | 10,23            | 0,02             | 36,18            |
| Max                             | 2,14             | 30,22            | 3,91             | 5,28             | 5,53             | 34,97            | 9,93             | 22,47            | 87,59            | 1,89             | 139,7            |
| Moy,<br>Echelle<br>de<br>risque | 0,73             | 7,86             | 2,17             | 2,93             | 3,06             | 10,84            | 3,64             | 6,99             | 35,14            | 0,91             | 74,27            |
|                                 | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible |

**Tableau III.13 :** Valeurs des indices de risque écologique monomial (Er) et de risque écologique potentiel (RI) dans Oued Mazafran.

|                                 | Valeurs Er       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                      |                  | RI               |
|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|------------------|------------------|
|                                 | Mn               | Pb               | Cr               | Co               | Ni               | Cu               | Zn               | As               | Cd                   | V                |                  |
| Min                             | 0,27             | 2,42             | 0,22             | 0,77             | 0,96             | 3,72             | 1,12             | 2,68             | 10,67                | 0,02             | 34,28            |
| Max                             | 1,48             | 18,73            | 2,43             | 6,00             | 7,69             | 48,30            | 5,37             | 20,67            | 796,9                | 2,41             | 871,0            |
| Moy,<br>Echelle<br>de<br>risque | 0,73             | 7,55             | 1,21             | 3,21             | 3,34             | 14,51            | 2,32             | 7,93             | 73,53                | 0,98             | 114,6            |
|                                 | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>faible | risque<br>modér<br>é | risque<br>faible | risque<br>faible |

Dans les oueds El Harrach et Mazafran, les concentrations moyennes des métaux particuliers Ni, As et Cd sont inférieures aux valeurs ERL (effects range low). Le Pb et le Cu particuliers se situent entre les valeurs ERL et ERM (effects range medium) proposées par [MacDonald et al. \(2000\)](#), alors le Pb et le Cu sont occasionnellement associés à des effets toxiques. La concentration en Zn particulaire est considérablement supérieure à la valeur ERM dans l'oued El Harrach (Fig. III.6). Dans les fourchettes d'effets probables définies par les valeurs ERL et ERM, l'incidence des effets néfastes du Ni, de l'As et du Cd particuliers est considérée comme très faible "effets minimes" avec des valeurs de 1,9 %, 5,0 % et 6,6 %, respectivement. Enfin, la probabilité d'incidence des effets biologiques dus à la toxicité du Pb et du Zn dans les deux oueds est de 33 %.

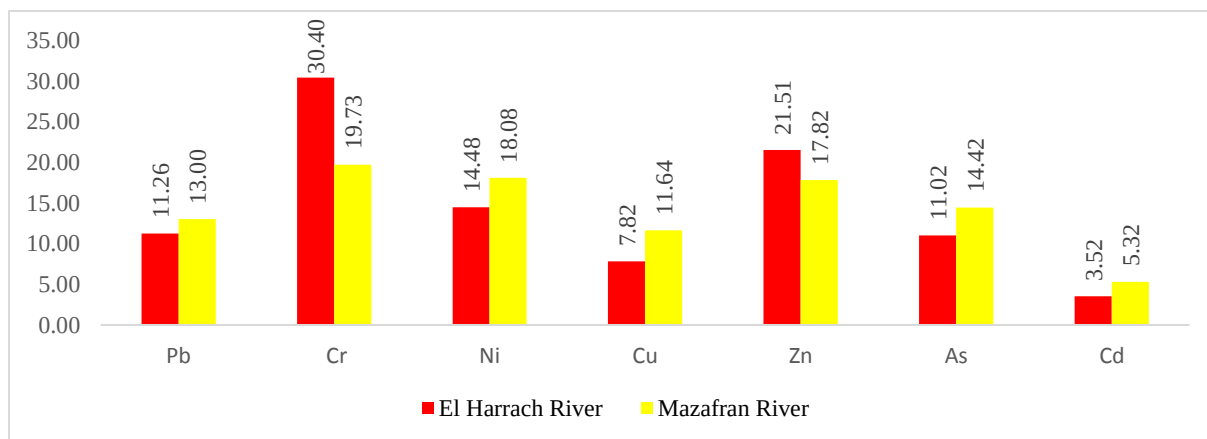
Dans l'oued Mazafran, la concentration moyenne de métaux particuliers tels que le Pb, le Cr, le Ni, le Cu, le Zn, l'As et le Cd se situe entre les valeurs de niveau d'effets de seuil (TEL) et de niveau d'effets probables (PEL) publiées par [MacDonald et al. \(2000\)](#). Dans l'oued El Harrach, la concentration moyenne du Cd particulaire était proche de la valeur TEL, alors que les concentrations moyennes de Pb, Ni, Cu et As particuliers se situent entre les valeurs TEL et PEL (Fig. III.6). En revanche, les concentrations moyennes du Cr et du Zn particuliers dans l'oued El Harrach sont supérieures aux valeurs PEL, avec 52,9 % et 64,8 % d'effets dans la gamme des effets probables, respectivement.



**Figure III.6 :** Comparaison des teneurs en métaux traces particuliers ( $\mu\text{g/g}$ ) avec les valeurs ERL, ERM et TEL, PEL (MacDonald et al., 2000).

En ce qui concerne les valeurs de toxicité aiguë potentielle ( $\Sigma\text{TU}_i$ ) dans l'oued El Harrach (4,95) et l'oued Mazafran (4,32), des effets toxiques significatifs par un mélange de métaux (e.g, Pb, Cr, Ni, Cu, Zn, As et Cd) sont possibles ( $\Sigma\text{TU}_i > 4$ ) d'après les résultats de la bio-analyse de l'amphipode *Corophium volutator* réalisé par Pedersen et al. (1998).

La contribution monomial des métaux traces particuliers ( $\text{TU}_i$ ) à la somme des unités toxiques ( $\Sigma\text{TU}_i$ ) montre que les principales contributions à la toxicité proviennent du Cr particulaire (30,40 %) suivi du Zn particulaire (21,51 %) dans l'oued El Harrach. Néanmoins, compte tenu de la contribution importante du Cr dans la somme des unités toxiques  $\Sigma\text{TU}$ , et compte tenu de son caractère cancérigène, les apports de ce métal dans le milieu marin via ce fleuve doivent être mieux surveillés, et sa toxicité réelle doit être profondément étudiée. Les contributions à la toxicité des autres métaux particuliers sont inférieures à 20 % dans les deux oueds (Fig. III.7). Les contributions des métaux traces particuliers comme le Pb, Ni, Cu, As et Cd au  $\Sigma\text{TU}_i$  sont moindres dans l'oued El Harrach que dans l'oued Mazafran. En revanche, le Cr et le Zn particuliers apportent une plus grande contribution dans l'oued El Harrach par rapport à l'oued Mazafran. La contribution métallique particulaire (%) des unités toxiques ( $\Sigma\text{TU}_i$ ) suit l'ordre  $\text{Cd} < 5\% < \text{Cu} < 10\% < \text{Pb} < \text{Ni} < \text{As} < 15\% < \text{Zn} < 25\% < \text{Cr} < 35\%$  dans l'oued El Harrach, par rapport à l'ordre dans l'oued Mazafran, c'est-à-dire  $\text{Cd} < 10\% < \text{Pb} < \text{Cu} < \text{As} < 15\% < \text{Cr} < \text{Ni} < \text{Zn} < 25\%$ .



**Figure III.7 :** Taux de contribution de chaque métal ( $TU_i / \Sigma TU_i$ ) (%) dans la somme des unités toxiques ( $\Sigma TU_i$ ).

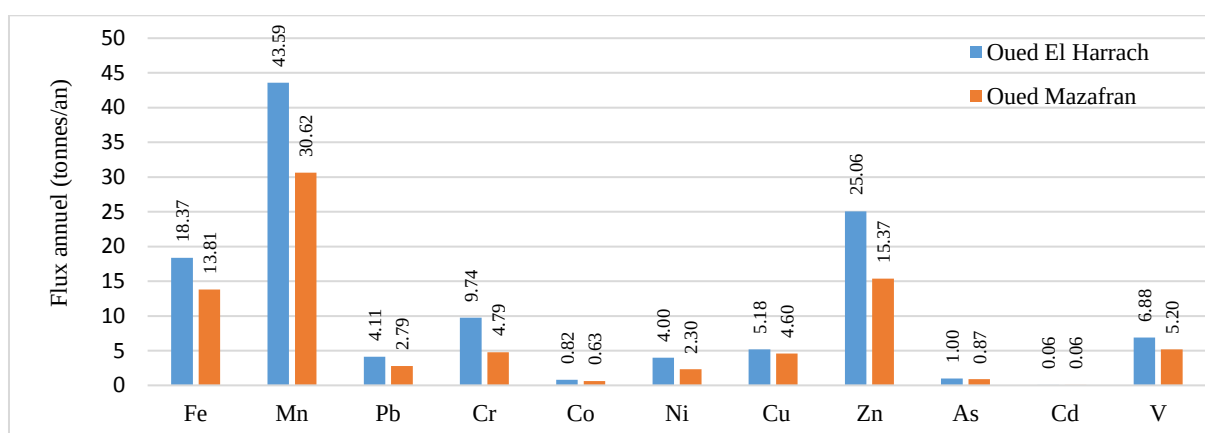
### III.1.8 Flux des métaux traces

Les résultats de flux des métaux traces dans l'oued El Harrach et l'oued Mazafran calculés sur la base des concentration moyennes mensuelles des ETM dans la phase dissoute et particulaire et les débits moyens mensuels sont présentés dans la figure III.8 et le tableau III.14. Le flux annuel total (tonne/ans) des ETM dans l'oued El Harrach décroît dans l'ordre : Fe (1836,71) > Mn (43,59) > Zn (25,06) > Cr (9,74) > V (6,88) > Cu (5,18) > Pb (4,11) > Ni (4) > As (1) > Co (0,82) > Cd (0,06), de même, le flux annuel total (tonne/ans) des ETM dans l'oued Mazafran décroît comme suit : Fe (1381,26) > Mn (30,62) > Zn (15,37) > V (5,2) > Cr (4,79) > Cu (4,6) > Pb (2,79) > Ni (2,3) > As (0,87) > Co (0,63) > Cd (0,06). La phase particulaire contribue essentiellement dans le flux total par rapport à la phase dissoute, en raison de leur capacité à absorber ou à adsorber les métaux (Salomons and Förstner, 1984). Le facteur de contribution de la phase particulaire par rapport à la phase dissoute dans le flux total pour chaque métal dans les deux oueds suit l'ordre : Fe (67) > Cr (34) > Pb (32) > V (29) > Cu (20) > Cd (13) > Co (5) > Zn (3) > Ni (2) = As (2). L'exception est faite pour Mn où le flux dissout de ce métal est presque égal au flux particulaire avec un facteur d'environ 1, cela a été démontré dans la section III.1.4 où on trouve des valeurs faibles de  $K_d$  indiquant l'affinité du Manganèse à la phase dissoute.

Malgré sa superficie inférieure, l'oued El Harrach (1250 km<sup>2</sup>) exporte des charges de métaux traces significativement plus importantes vers la mer par rapport à l'oued Mazafran (1900 km<sup>2</sup>). Cela indique l'augmentation de la production industrielle et agricole dans le bassin versant de l'oued El Harrach que celui de Mazafran. Une variabilité inter-mensuelle du flux total des ETM

est observée. Cependant, les mois caractérisés par une grande précipitation ont enregistré les flux les plus importante (Tab. IV.11 et IV.12, annexes).

Ainsi, la comparaison des flux en ETM des deux oueds (El Harrach et Mazafran) avec d'autres oueds de la mer méditerranée, dont les superficies de leurs bassins versant sont proches, donne un même ordre de grandeur pour les oueds : l'Aude, Têt, Orb et Herault (Radakovitch et al., 2008), tandis que l'oued Axios (Karageorgis et al., 2003) caractérisée par des flux importants que ceux enregistrés dans notre étude. Cependant, le Rhône, plus grand fleuve se déversant en mer méditerranée, présente des flux gigantesques par rapport aux deux oueds (El Harrach et Mazafran).



**Figure III.8 :** Variation du flux annuel total des EMT en tonne/ans dans l'oued El Harrach et Mazafran (flux du fer sont divisées par 100).

**Tableau III.14 :** Flux annuel des ETM en (tonne/an) dans l'oued El Harrach et l'oued Mazafran et comparaison avec d'autres oueds et rivières de la méditerranée.

|                            | Riviere          | Bassin versant<br>(km <sup>2</sup> ) | Flux<br>(t/ans) | Fe                   | Mn    | Pb    | Cr    | Co   | Ni     | Cu     | Zn     | As    | Cd    | V     |
|----------------------------|------------------|--------------------------------------|-----------------|----------------------|-------|-------|-------|------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Cette étude                | El<br>Harrach    | 1250                                 | dissous         | 25,54                | 21,8  | 0,13  | 0,3   | 0,14 | 1,94   | 0,31   | 5,33   | 0,31  | 0,01  | 0,21  |
|                            |                  |                                      | particulaire    | 1811,17              | 21,79 | 3,98  | 9,45  | 0,68 | 2,06   | 4,87   | 19,73  | 0,7   | 0,05  | 6,67  |
|                            |                  |                                      | totale          | 1836,71              | 43,59 | 4,11  | 9,74  | 0,82 | 4      | 5,18   | 25,06  | 1     | 0,06  | 6,88  |
| Cette étude                | Mazafran         | 1900                                 | dissous         | 21,5                 | 16,64 | 0,08  | 0,13  | 0,11 | 0,73   | 0,19   | 5,04   | 0,33  | 0,003 | 0,18  |
|                            |                  |                                      | particulaire    | 1359,76              | 13,98 | 2,71  | 4,66  | 0,52 | 1,57   | 4,41   | 10,33  | 0,55  | 0,05  | 5,02  |
|                            |                  |                                      | totale          | 1381,26              | 30,62 | 2,79  | 4,79  | 0,63 | 2,3    | 4,6    | 15,37  | 0,87  | 0,06  | 5,2   |
| (Karageorgis et al., 2003) | Axios            | 24437                                | dissous         | -                    | -     | 24    | 8     | -    | 17     | 20     | 63     | 12    | 3     | -     |
|                            |                  |                                      | particulaire    | -                    | -     | 35    | 58    | -    | 26     | 17     | 79     | 3     | 2     | -     |
|                            |                  |                                      | totale          | -                    | -     | 59    | 66    | -    | 43     | 37     | 142    | 15    | 5     | -     |
| (Bettiol et al., 2005)     | Venice<br>lagoon | 1850                                 | totale          | -                    | 61    | 3     | 3,5   | -    | 3,9    | 6,6    | 18     | 4,6   | 0,06  | -     |
| (Radakovitch et al., 2008) | Aude             | 4830                                 | Particulaire    | -                    | -     | 5,5   | 16,2  | 2,2  | 7,4    | 13,9   | 20,2   | -     | 0,077 | -     |
| (Radakovitch et al., 2008) | Tet              | 1400                                 | Particulaire    | -                    | -     | 2,9   | 5,3   | 1,0  | 2,5    | 5,4    | 11,6   | -     | 0,024 | -     |
| (Radakovitch et al., 2008) | Orb              | 1400                                 | Particulaire    | -                    | -     | 5,3   | 5,3   | 1,0  | 2,9    | 3,1    | 11,1   | -     | 0,039 | -     |
| (Radakovitch et al., 2008) | Herault          | 2820                                 | Particulaire    | -                    | -     | 10,8  | 10,7  | 1,5  | 5,4    | 10,2   | 27,2   | -     | 0,13  | -     |
| (Ollivier et al., 2011)    | Rhône            | 99000                                | dissous         | -                    | -     | 3,4   | -     | -    | 45,75  | 105,75 | 141    | 88,85 | -     | 34,5  |
|                            |                  |                                      | particulaire    | 0,21*10 <sup>6</sup> | 5546  | 356   | 707,5 | 104  | 369,5  | 330    | 1291,5 | -     | 4,455 | 789,5 |
|                            |                  |                                      | totale          | -                    | -     | 359,4 | -     | -    | 415,25 | 435,75 | 1432,5 | -     | -     | 824   |

### III.2 Sédiments de surface

Au cours des dernières décennies, un grand nombre d'études ont démontré que la contamination par les métaux traces est devenue un grave problème environnemental (Alomary and Belhadj, 2007; Arienzo et al., 2020; Atroune and Boutaleb, 2012; Bachouche et al., 2017; Birch, 2017; Carr et al., 1996; Ghiboub, 2015; Gülşen-Rothmund et al., 2023; Inal, 2011; Inal et al., 2018). En particulier dans les endroits où se trouvent de nombreuses sources de pollution industrielles et domestiques telles que les zones estuariennes, côtières et continentales qui interagissent activement entre la mer et la terre et réagissent avec sensibilité aux processus naturels et aux activités humaines.

Les résultats d'observations des oueds El Harrach et Mazafran ont révélé une importante pollution par le Pb, Cd, Cu, Ni and Zn et les autres métaux causée par les effluents industriels incontrôlés. Cependant, on ne savait pas si les sédiments superficiels des baies d'Alger et de Bou-Ismaïl étaient également contaminés par les métaux traces provenant de l'oued El Harrach et l'oued Mazafran qui se déversent directement dans les deux baies, respectivement. Nous avons collecté un total de 15 échantillons de sédiments superficiels (A-01 à 15) dans la Baie d'Alger et 20 autres échantillons (B-01 à 20) dans la baie de Bou-Ismaïl, au large des embouchures des deux oueds El Harrach et Mazafran, respectivement. L'objectif est de (1) déterminer le taux de la MO et la granulométrie des sédiments de surface, (2) examiner la distribution spatiale des métaux traces (3) évaluer l'état de la contamination des sédiments par les métaux traces en utilisant l'indice de géo-accumulation (Igeo), le facteur d'enrichissement (EF) et l'indice de charge polluante (PLI) et (4) évaluer le risque écologique et la toxicité des sédiments superficiels en comparant nos résultats avec les lignes directrices relatives à la qualité des sédiments SQGs (ERL-ERM et TEL-PEL) et en utilisant l'indice de risque écologique potentiel (RI), unités de toxicité (TU) et toxicité aiguë potentielle ( $\Sigma TU_i$ ).

#### III.2.1 Granulométrie et matière organique au niveau des baies d'Alger et de Bou-Ismaïl

Les teneurs en matière organique, sable, limon et d'argile de toutes les stations ainsi que la granulométrie moyenne sont indiquées dans les figures (III.9, III.10, III.11 et III.12) et les tableaux (III.15 et III.16). Les sédiments superficiels de la zone Algéroise (baie d'Alger et de Bou-Ismaïl) se composent de cinq types de sédiments (sable, sable limoneux, limon sableux, limon fin et limon très fin). La taille moyenne des grains varient entre 12,85-154,92  $\mu\text{m}$ , avec une moyenne de  $77,81 \pm 54,62 \mu\text{m}$  dans la baie d'Alger, et entre 4,95-340,52  $\mu\text{m}$ , avec une moyenne de  $130,67 \pm 85,53 \mu\text{m}$  dans la baie de Bou-Ismaïl.

Dans l'ensemble, les sédiments de la baie d'Alger sont dominés par le limon, caractérisés comme :

- Limon très fin (stations A06, A07, A10, A11 et A12) ;
- Limon fin (stations A04, A08 et A13), qui représente environ 54% de tous les stations et sa granulométrie moyenne est de  $34,46 \pm 27,61 \mu\text{m}$  ;
- Le sable, dont 7 stations sur 15 appartiennent à la catégorie des sables (stations A03, A05 et A15) ;
- Le sable limoneux (stations A01 et A02) ;
- Le limons sableux (stations A09 et A14), qui se trouvent près de l'embouchure d'oued El Harrach.

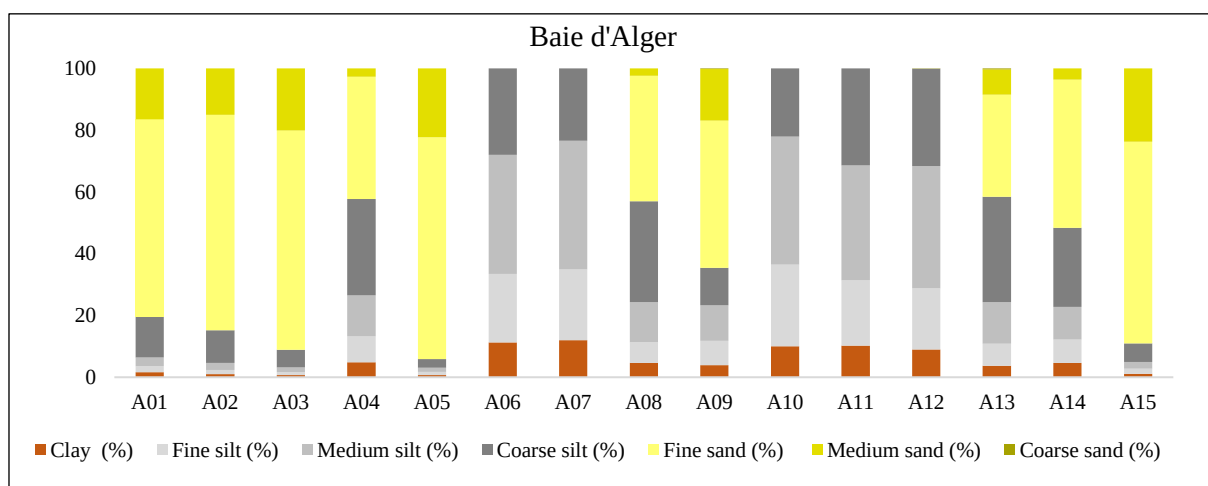
A l'inverse, la baie de Bou-Ismaïl est dominée par des sédiments de texture Sableuse (50% des stations), caractérisés comme :

- Sable (stations B02, B03, B11, B12 et B18) ;
- Sable limoneux (stations B01, B05, B10, B17, B19), sa granulométrie moyenne est de  $182,28 \pm 59,57 \mu\text{m}$  qui représente des stations les plus côtières (à l'exception des stations B01 et B05) ;
- Une texture équilibrée caractérisée comme limon sableux représenté par les stations B07, B09, B13 et B14, situées au large de l'embouchure de l'oued Mazafran ;
- Une texture limoneuse, dont 5 stations sur 20 caractérisées comme limon fin et une seule station (B15) de type limon très fin.

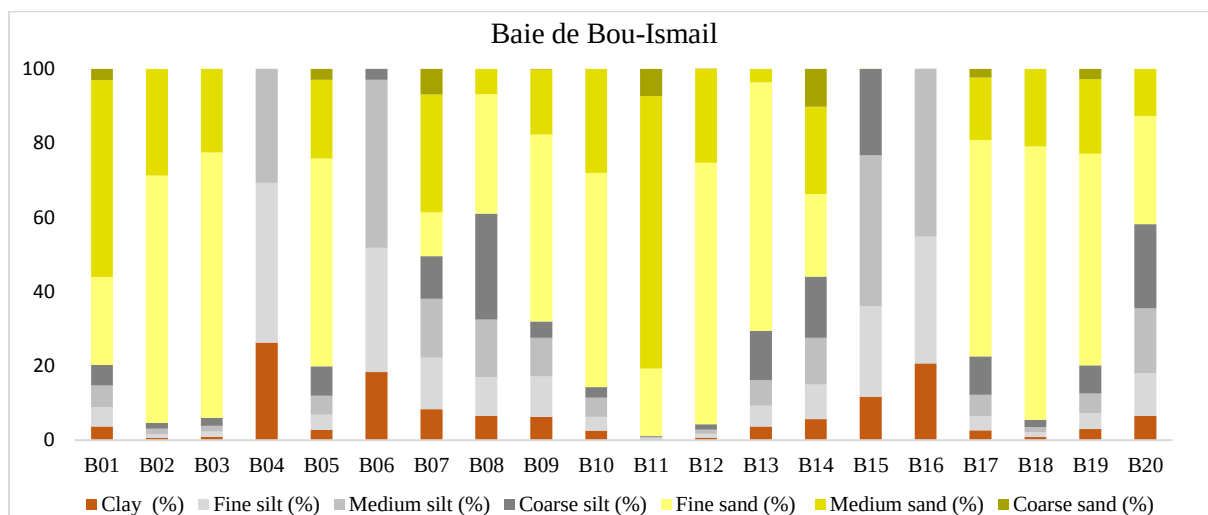
Cette variation dans la texture des sédiments dans les deux baies peut être expliquée par la nature des apports charriés par les deux oueds (El Harrach et Mazafran) qui se déversent dans les baies d'Alger et de Bou-Ismaïl, respectivement ; ainsi, l'hydrodynamisme affecte la répartition et la taille des grains des sédiments marins ([Liu et al., 2011](#)).

Le contenu en matière organique dans les sédiments superficielle après calcination à  $550^{\circ}\text{C}$  est élevé sur toutes les stations. Le taux de la MO variait entre 8,60 et 18,62 %, avec une moyenne  $13,05 \pm 3,38$  dans la baie d'Alger, et entre 2,75 et 9,74 %, avec une moyenne de  $6,17 \pm 2,24$  dans la baie de Bou-Ismaïl, avec une accumulation de la MO plus élevée dans les stations les plus au large. Cette distribution qui suit une pente raide (côte-large) a été mise en évidence dans les travaux d'[Inal \(2020\)](#). Cela démontre le rôle crucial que joue la bathymétrie dans la distribution de la matière organique, car les sédiments profonds seraient différents de ceux trouvés dans les zones les plus côtières en apparence ([Leclaire, 1972](#)). Ainsi, cette répartition de la matière organique est contrôlée par la granulométrie. Cependant, dans la baie d'Alger, les sédiments

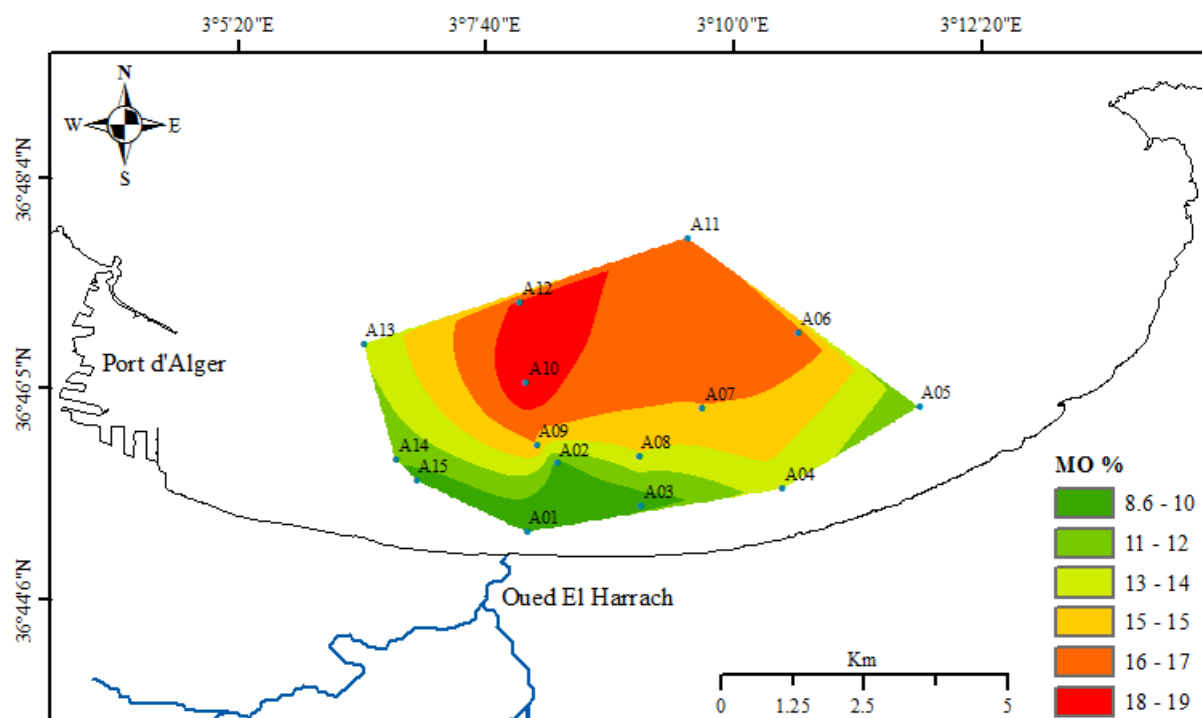
limoneux sont caractérisés par un taux plus élevé de la MO, entre 12,34 et 18,62 %. Cela explique l'affinité de la matière organique aux particules fines. La station A10 présente le taux de MO le plus élevé (18,62%), alors que la station A01 présente le taux le plus faible de MO (8,6 %). Un apport anthropique de MO (10,38%) semble être certain au site A05, alors que, dans cette station le pourcentage de sédiments fins est faible (94,15% de sable). En revanche, les sédiments sableux dans la baie de Bou-Ismaïl sont caractérisés par un taux faible en matière organique entre 2,75 et 5,30 %. La station B15 a enregistré le taux le plus élevé en MO (9,74 %), tandis que la station B11 présente le taux le plus faible de MO (2,75%). Une origine anthropique explique probablement la teneur très élevée de MO observée dans la baie d'Alger (port d'Alger et les apports de l'oued El Harrach).



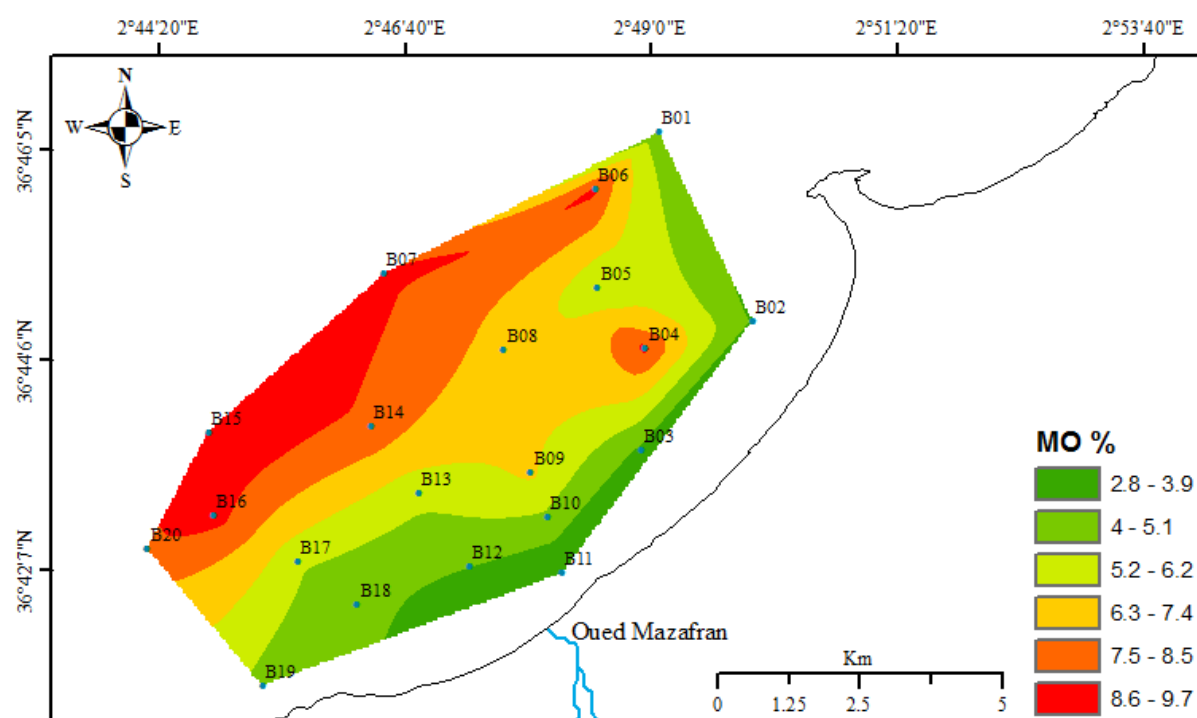
**Figure III.9 :** Granulométries des sédiments dans la baie d'Alger.



**Figure III.10 :** Granulométries des sédiments dans la baie de Bou-Ismaïl.



**Figure III.11 :** Distribution spatiale du MO (%) au niveau de la baie d'Alger.



**Figure III.12 :** Distribution spatiale du MO (%) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

Tableau III.15 : Matière organique et granulométrie au niveau de la baie d'Alger.

| Station           | Latitude      | Longitude    | Profondeur (m) | MO% (550°C) | taille moyen. grains (µm) | Argile (%) | limon fin (%) | limon moyen (%) | limon grossier (%) | Limon total (%) | sable fin (%) | sable moyen (%) | sable grossier (%) | sable total (%) | Type de sédiment |
|-------------------|---------------|--------------|----------------|-------------|---------------------------|------------|---------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------------|-----------------|------------------|
| A01               | 36°44'43,77"N | 3°8'2,89"E   | 8,00           | 8,60        | 123,51                    | 1,60       | 2,04          | 2,78            | 13,29              | 18,10           | 63,83         | 16,47           | 0,00               | 80,30           | Sable limoneux   |
| A02               | 36°45'23,04"N | 3°8'20,22"E  | 15,00          | 9,81        | 128,52                    | 1,00       | 1,35          | 2,31            | 10,59              | 14,25           | 69,71         | 15,04           | 0,00               | 84,75           | Sable limoneux   |
| A03               | 36°44'58,14"N | 3°9'7,63"E   | 9,00           | 8,93        | 144,66                    | 0,65       | 0,98          | 1,55            | 5,68               | 8,22            | 71,02         | 20,11           | 0,00               | 91,13           | Sable            |
| A04               | 36°45'8,13"N  | 3°10'27,03"E | 25,00          | 12,95       | 60,97                     | 4,80       | 8,47          | 13,26           | 31,19              | 52,93           | 39,60         | 2,67            | 0,00               | 42,27           | limon fin        |
| A05               | 36°45'54,60"N | 3°11'44,52"E | 14,00          | 10,38       | 154,92                    | 0,72       | 1,03          | 1,34            | 2,77               | 5,13            | 71,90         | 22,25           | 0,00               | 94,15           | Sable            |
| A06               | 36°46'35,80"N | 3°10'35,96"E | 39,00          | 16,59       | 14,56                     | 11,26      | 22,23         | 38,47           | 28,03              | 88,74           | 0,00          | 0,00            | 0,00               | 0,00            | limon très fin   |
| A07               | 36°45'53,40"N | 3° 9'42,00"E | 28,00          | 15,22       | 12,85                     | 11,98      | 22,92         | 41,64           | 23,46              | 88,02           | 0,00          | 0,00            | 0,00               | 0,00            | limon très fin   |
| A08               | 36°45'26,10"N | 3° 9'6,36"E  | 18,00          | 13,38       | 65,42                     | 4,59       | 6,79          | 12,96           | 32,69              | 52,44           | 40,62         | 2,34            | 0,00               | 42,97           | Limon fin        |
| A09               | 36°45'33,00"N | 3° 8'8,40"E  | 19,00          | 15,21       | 117,14                    | 3,93       | 7,90          | 11,50           | 12,10              | 31,50           | 47,65         | 16,73           | 0,18               | 64,57           | Limon sableux    |
| A10               | 36°46'8,16"N  | 3° 8'2,64"E  | 32,00          | 18,62       | 13,37                     | 10,03      | 26,41         | 41,44           | 22,12              | 89,97           | 0,00          | 0,00            | 0,00               | 0,00            | limon très fin   |
| A11               | 36°47'29,92"N | 3° 9'33,47"E | 50,00          | 16,69       | 16,23                     | 10,24      | 21,13         | 37,27           | 31,36              | 89,76           | 0,00          | 0,00            | 0,00               | 0,00            | limon très fin   |
| A12               | 36°46'53,40"N | 3° 7'59,04"E | 48,00          | 17,24       | 16,45                     | 9,00       | 19,83         | 39,53           | 31,64              | 91,00           | 0,01          | 0,00            | 0,00               | 0,01            | limon très fin   |
| A13               | 36°46'29,91"N | 3° 6'30,82"E | 32,00          | 12,34       | 75,83                     | 3,72       | 7,11          | 13,51           | 34,14              | 54,76           | 33,02         | 8,23            | 0,28               | 41,52           | limon fin        |
| A14               | 36°45'24,54"N | 3° 6'49,20"E | 19,00          | 10,73       | 75,84                     | 4,64       | 7,60          | 10,56           | 25,62              | 43,77           | 47,91         | 3,68            | 0,00               | 51,59           | Limon sableux    |
| A15               | 36°45'12,98"N | 3° 7'0,79"E  | 13,00          | 9,06        | 146,91                    | 1,09       | 1,65          | 2,19            | 6,00               | 9,85            | 65,29         | 23,77           | 0,00               | 89,06           | Sable            |
| <b>Min.</b>       |               |              |                | 8,60        | 12,85                     | 0,65       | 0,98          | 1,34            | 2,77               | 5,13            | 0,00          | 0,00            | 0,00               | 0,00            |                  |
| <b>Max.</b>       |               |              |                | 18,62       | 154,92                    | 11,98      | 26,41         | 41,64           | 34,14              | 91,00           | 71,90         | 23,77           | 0,28               | 94,15           |                  |
| <b>Moy. ± s.d</b> |               |              |                | 13,05±3,38  | 77,81±54,62               | 5,28±4,13  | 10,50±9,27    | 18,02±16,48     | 20,71±11,18        | 49,23±33,68     | 36,70±29,37   | 8,75±9,21       | 0,03±0,08          | 45,49±37,68     |                  |

Tableau III.16 : Matière organique et granulométrie au niveau de la baie de bou-Ismaïl.

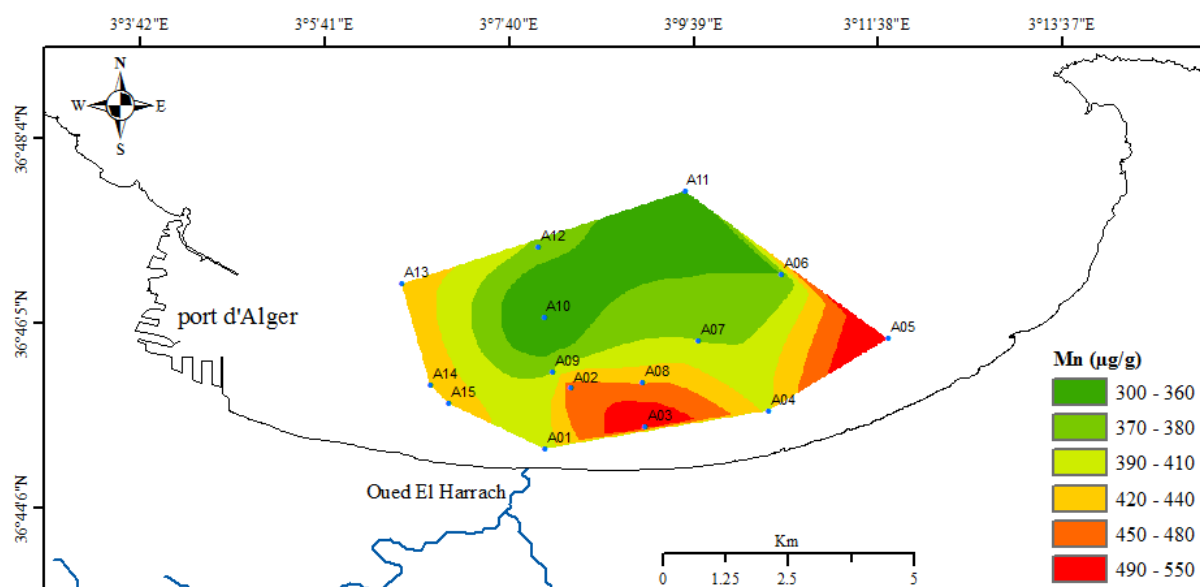
| Station    | Latitude      | Longitude    | Profondeur<br>(m) | MO%<br>(550°C) | taille moyen<br>grain (µm) | argile (%) | limon fin<br>(%) | limon<br>moyen (%) | limon<br>grossier<br>(%) | limon total<br>(%) | sable fin<br>(%) | sable moyen<br>(%) | sable<br>grossier<br>(%) | sable total<br>(%) | Type de<br>sédiment |
|------------|---------------|--------------|-------------------|----------------|----------------------------|------------|------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|
| B01        | 36°46'15,10"N | 2°49'3,85"E  |                   | 4,32           | 222,11                     | 3,72       | 5,18             | 5,78               | 5,74                     | 16,70              | 23,52            | 52,99              | 3,06                     | 79,57              | Sable limoneux      |
| B02        | 36°44'27,90"N | 2°49'57,50"E |                   | 3,82           | 167,59                     | 0,61       | 0,98             | 1,48               | 1,54                     | 4,00               | 66,63            | 28,76              | 0,00                     | 95,39              | Sable               |
| B03        | 36°43'14,50"N | 2°48'54,00"E |                   | 3,69           | 151,73                     | 0,94       | 1,39             | 1,56               | 2,11                     | 5,06               | 71,44            | 22,55              | 0,00                     | 93,99              | Sable               |
| B04        | 36°44'12,50"N | 2°48'56,30"E |                   | 8,83           | 4,95                       | 26,26      | 43,08            | 30,67              | 0,00                     | 73,74              | 0,00             | 0,00               | 0,00                     | 0,00               | limon fin           |
| B05        | 36°44'46,50"N | 2°48'29,40"E |                   | 5,00           | 168,17                     | 2,75       | 4,10             | 5,11               | 7,97                     | 17,18              | 55,96            | 21,19              | 2,93                     | 80,07              | Sable limoneux      |
| B06        | 36°45'42,40"N | 2°48'27,80"E |                   | 8,82           | 8,05                       | 18,36      | 33,46            | 45,20              | 2,98                     | 81,64              | 0,00             | 0,00               | 0,00                     | 0,00               | limon fin           |
| B07        | 36°44'54,60"N | 2°46'27,80"E |                   | 8,83           | 202,77                     | 8,36       | 13,86            | 15,86              | 11,47                    | 41,19              | 11,80            | 31,71              | 6,94                     | 50,45              | Limon sableux       |
| B08        | 36°44'11,50"N | 2°47'36,00"E |                   | 6,95           | 63,28                      | 6,51       | 10,48            | 15,47              | 28,58                    | 54,53              | 32,12            | 6,83               | 0,00                     | 38,96              | limon fin           |
| B09        | 36°43'1,70"N  | 2°47'51,40"E |                   | 6,47           | 117,38                     | 6,26       | 10,92            | 10,37              | 4,44                     | 25,73              | 50,28            | 17,55              | 0,18                     | 68,01              | Limon sableux       |
| B10        | 36°42'36,50"N | 2°48'1,10"E  |                   | 4,88           | 155,12                     | 2,55       | 3,76             | 5,17               | 2,83                     | 11,75              | 57,66            | 28,04              | 0,00                     | 85,69              | Sable limoneux      |
| B11        | 36°42'4,90"N  | 2°48'9,20"E  |                   | 2,75           | 340,52                     | 0,26       | 0,28             | 0,35               | 0,28                     | 0,91               | 18,11            | 73,41              | 7,32                     | 98,83              | Sable               |
| B12        | 36°42'8,20"N  | 2°47'16,80"E |                   | 3,95           | 160,49                     | 0,67       | 1,01             | 1,14               | 1,49                     | 3,64               | 70,40            | 25,28              | 0,00                     | 95,69              | Sable               |
| B13        | 36°42'50,10"N | 2°46'47,70"E |                   | 5,42           | 89,57                      | 3,72       | 5,57             | 6,87               | 13,33                    | 25,76              | 66,84            | 3,67               | 0,00                     | 70,52              | Limon sableux       |
| B14        | 36°43'27,90"N | 2°46'20,50"E |                   | 8,30           | 207,90                     | 5,71       | 9,29             | 12,56              | 16,50                    | 38,35              | 22,25            | 23,47              | 10,23                    | 55,94              | Limon sableux       |
| B15        | 36°43'24,70"N | 2°44'48,10"E |                   | 9,74           | 13,70                      | 11,75      | 24,31            | 40,68              | 23,25                    | 88,24              | 0,00             | 0,00               | 0,00                     | 0,00               | limon très fin      |
| B16        | 36°42'37,20"N | 2°44'50,90"E |                   | 9,22           | 6,83                       | 20,67      | 34,13            | 45,12              | 0,08                     | 79,33              | 0,00             | 0,00               | 0,00                     | 0,00               | limon fin           |
| B17        | 36°42'11,40"N | 2°45'38,70"E |                   | 5,30           | 147,23                     | 2,64       | 3,84             | 5,71               | 10,39                    | 19,94              | 58,23            | 16,82              | 2,36                     | 77,42              | Sable limoneux      |
| B18        | 36°41'47,30"N | 2°46'12,90"E |                   | 4,04           | 150,71                     | 0,81       | 1,31             | 1,40               | 1,95                     | 4,66               | 73,66            | 20,87              | 0,00                     | 94,52              | Sable               |
| B19        | 36°41'0,90"N  | 2°45'19,10"E |                   | 4,74           | 159,12                     | 2,97       | 4,37             | 5,24               | 7,61                     | 17,23              | 56,97            | 20,09              | 2,74                     | 79,81              | Sable limoneux      |
| B20        | 36°42'18,90"N | 2°44'13,50"E |                   | 8,24           | 76,19                      | 6,57       | 11,42            | 17,50              | 22,67                    | 51,58              | 29,17            | 12,69              | 0,00                     | 41,85              | limon fin           |
| Min.       |               |              |                   | 2,75           | 4,95                       | 0,26       | 0,28             | 0,35               | 0,00                     | 0,91               | 0,00             | 0,00               | 0,00                     | 0,00               |                     |
| Max.       |               |              |                   | 9,74           | 340,52                     | 26,26      | 43,08            | 45,20              | 28,58                    | 88,24              | 73,66            | 73,41              | 10,23                    | 98,83              |                     |
| Moy. ± s.d |               |              |                   | 6,17±2,24      | 130,67±85,53               | 6,61±7,28  | 11,14±12,60      | 13,66±14,88        | 8,26±8,58                | 33,06±28,96        | 38,25±27,29      | 20,30±18,32        | 1,79±3,02                | 60,34±35,52        | Limon sableux       |

### III.2.2 Variation spatiale des ETM au niveau des baies d'Alger et de Bou-Ismaïl

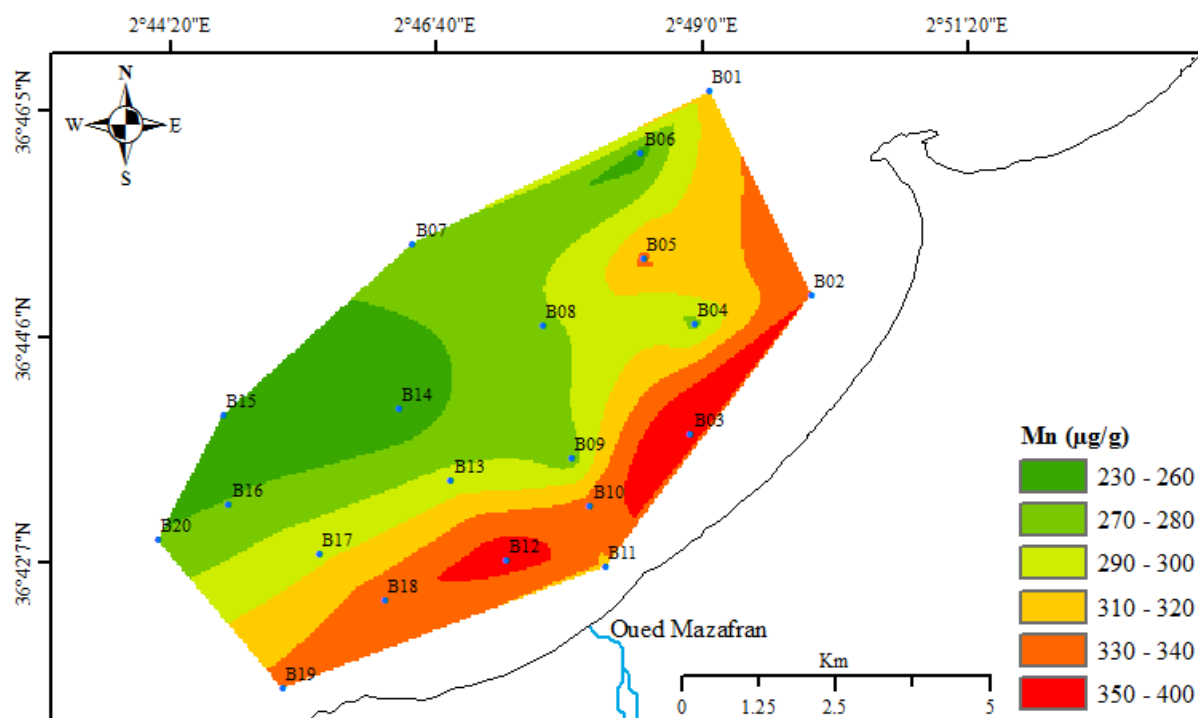
Les teneurs en métaux traces sont répertoriées dans les tableaux III.17 et III.18 et les cartes de répartition spatiale (Fig. III.13 à III.36). Les sédiments superficiels contiennent une large gamme de concentrations et des distributions de métaux traces complexes.

#### III.2.2.1 Manganèse (Mn)

La teneur en Mn se situe dans l'intervalle de concentration de 298,91 à 556,28  $\mu\text{g/g}$ , avec la valeur moyenne de  $414,73 \pm 69,23$   $\mu\text{g/g}$  dans la baie d'Alger. Pour la baie de Bou-Ismaïl, l'intervalle de concentration s'étend de 227,85 à 401,19  $\mu\text{g/g}$ , avec la valeur moyenne de  $296,07 \pm 46,13$   $\mu\text{g/g}$ . Les sites à forte teneur en Mn sont localisés principalement dans la région côtière, notamment dans la zone d'eaux peu profondes (Fig. III.13 et III.14).



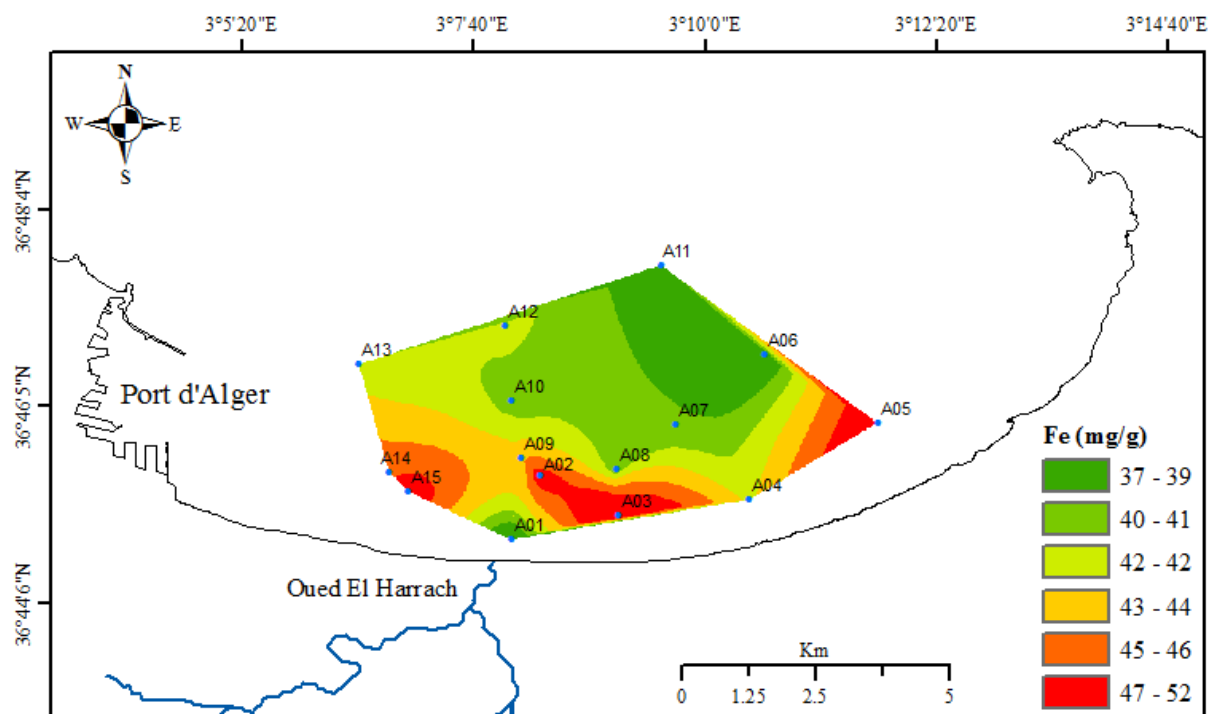
**Figure III.13 :** Distribution spatiale du manganèse ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.



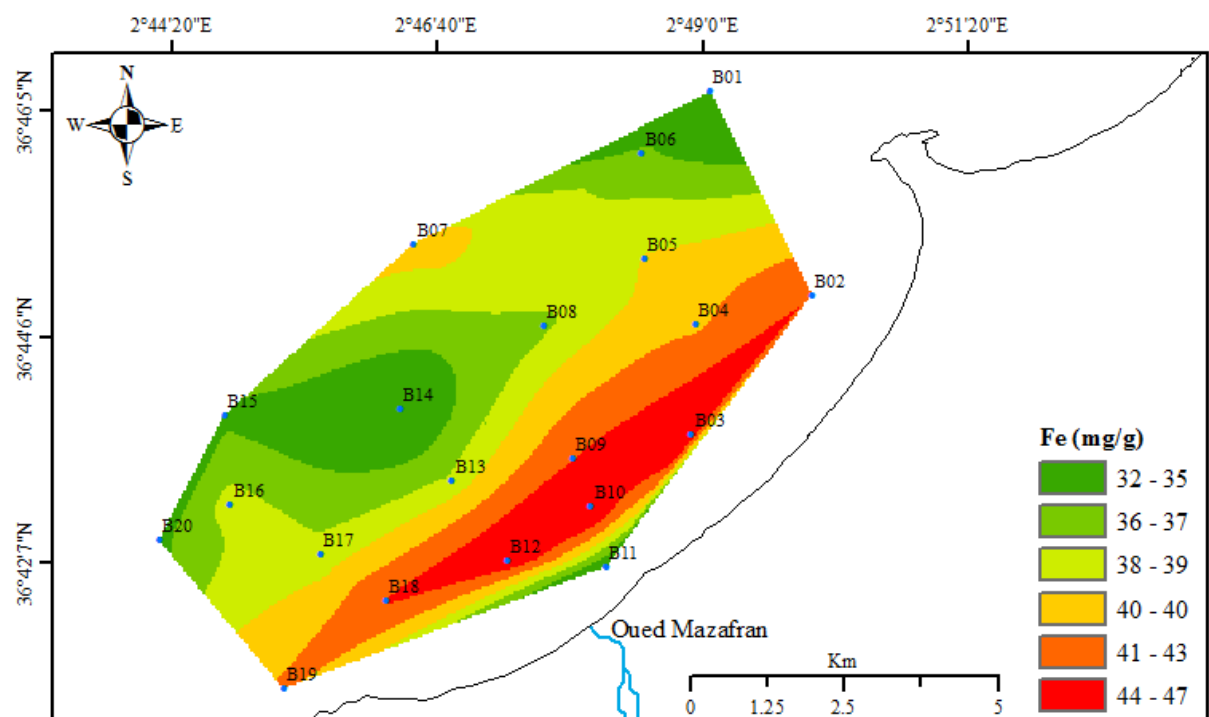
**Figure III.14 :** Distribution spatiale du manganèse ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

### III.2.2.2 Fer (Fe)

La distribution spatiale du fer dans les deux baies est semblable à celle du manganèse, ce qui peut indiquer les relations peu probables entre la réduction du manganèse et du fer (Burdige, 1993). La teneur en fer se situe dans la fourchette de 36,85 à 51,78 mg/g et la valeur moyenne est de  $42,86 \pm 4,86$  mg/g dans la baie d'Alger. Tandis que les teneurs du fer dans la baie de Bou-Ismaïl varient de 31,56 à 46,65 mg/g avec une valeur moyenne de  $38,81 \pm 4,38$  mg/g. Ces valeurs sont très proches dans les deux baies, ainsi que les teneurs en fer les plus élevées sont enregistrées près de l'embouchure des deux oueds (stations A03 et B10).



**Figure III.15:** Distribution spatiale du fer (mg/g) au niveau de la baie d'Alger.

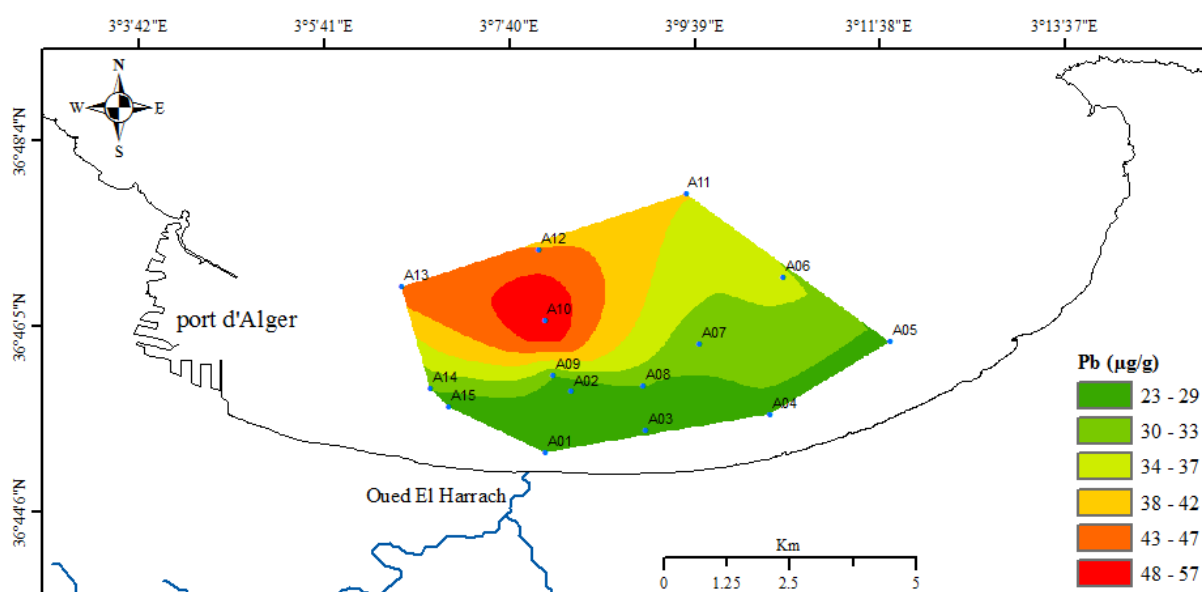


**Figure III.16 :** Distribution spatiale du fer (mg/g) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

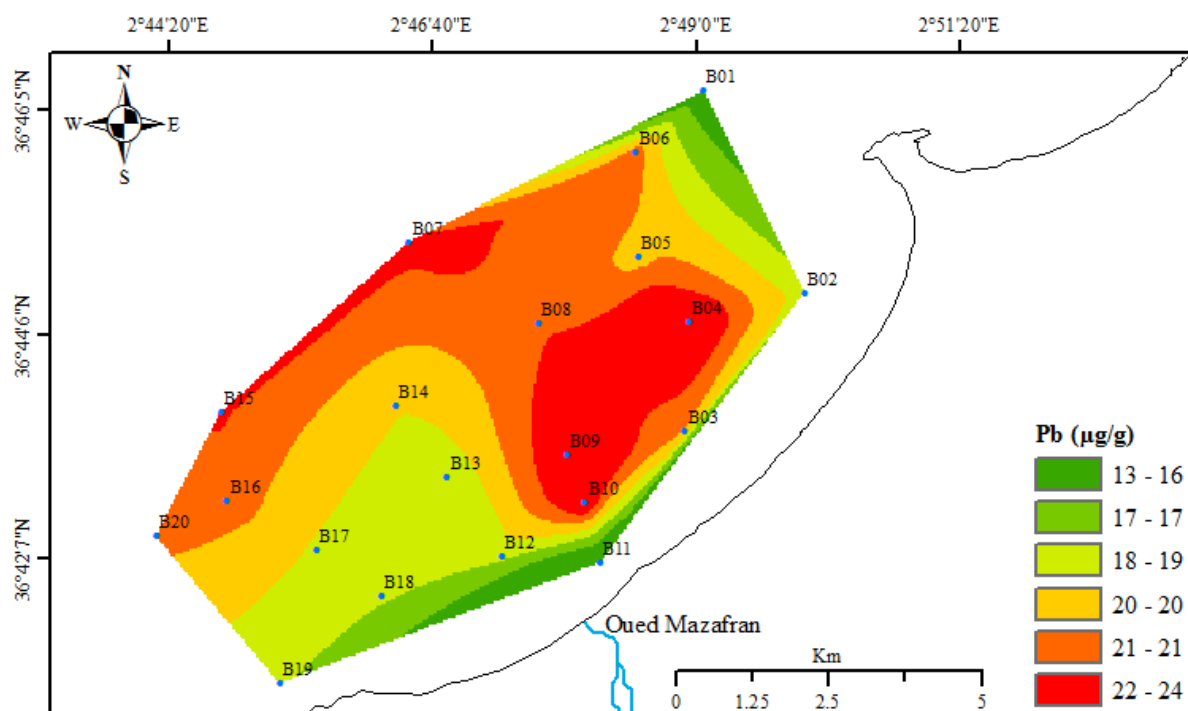
### III.2.2.3 Plomb (Pb)

Les teneurs en Pb sont relativement modérées. Elles se situent dans la gamme de concentration allant de 22,60 à 56,69  $\mu\text{g/g}$  dans la baie d'Alger avec une concentration moyenne de  $32,30 \pm 9,25 \mu\text{g/g}$  et de 12,47 à 24,15  $\mu\text{g/g}$ , avec une valeur moyenne de  $19,52 \pm 2,97$  dans la baie

de Bou-Ismaïl. La station A10 enregistre la valeur la plus élevée en plomb ( $56,69 \mu\text{g/g}$ ) qui enregistre aussi le maximum de MO (18,62%). Cela peut signifier que la concentration élevée en Pb dans les sédiments côtiers est en relation avec l'augmentation de la teneur en matière organique et l'abondance de particules fines (Salomons et al., 1984). Cette valeur dépasse le fond géochimique local ( $23,6 \mu\text{g/g}$ ) (Aroua et al., 2023). Les sources du Pb dans l'environnement de la baie d'Alger sont probablement en relation avec le port d'Alger et ses activités commerciales qui nécessitent un trafic maritime intense et aussi avec les rejets d'eaux usées urbaines et industrielles acheminées par l'oued El Harrach. En revanche, les concentrations en plomb mesurées dans la baie de Bou-Ismaïl sont relativement faibles et inférieures au fond géochimique local.



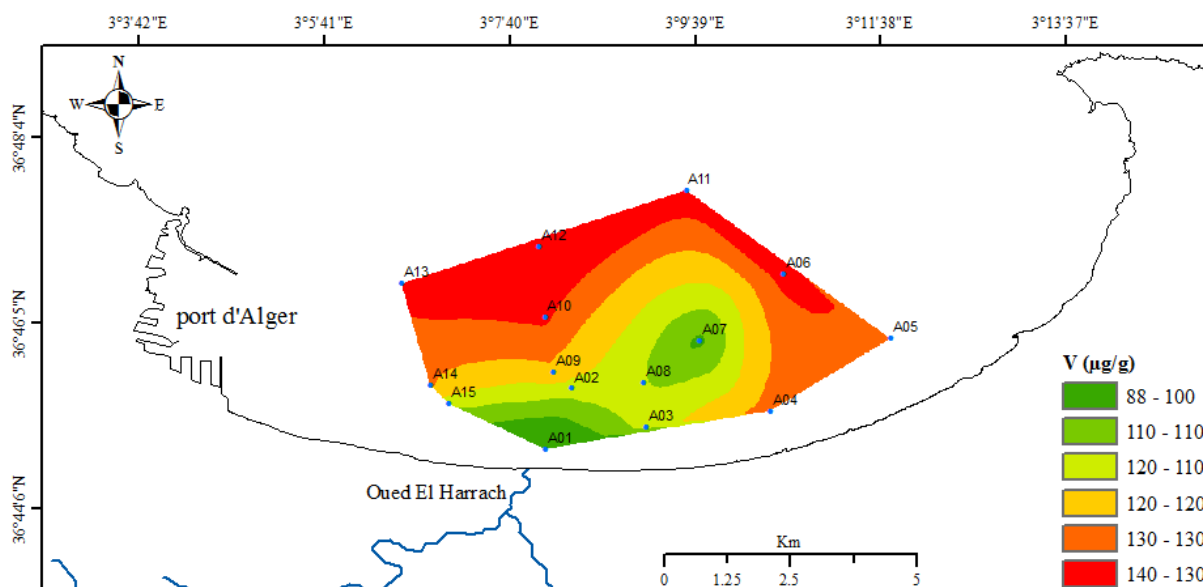
**Figure III.17:** Distribution spatiale du plomb ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.



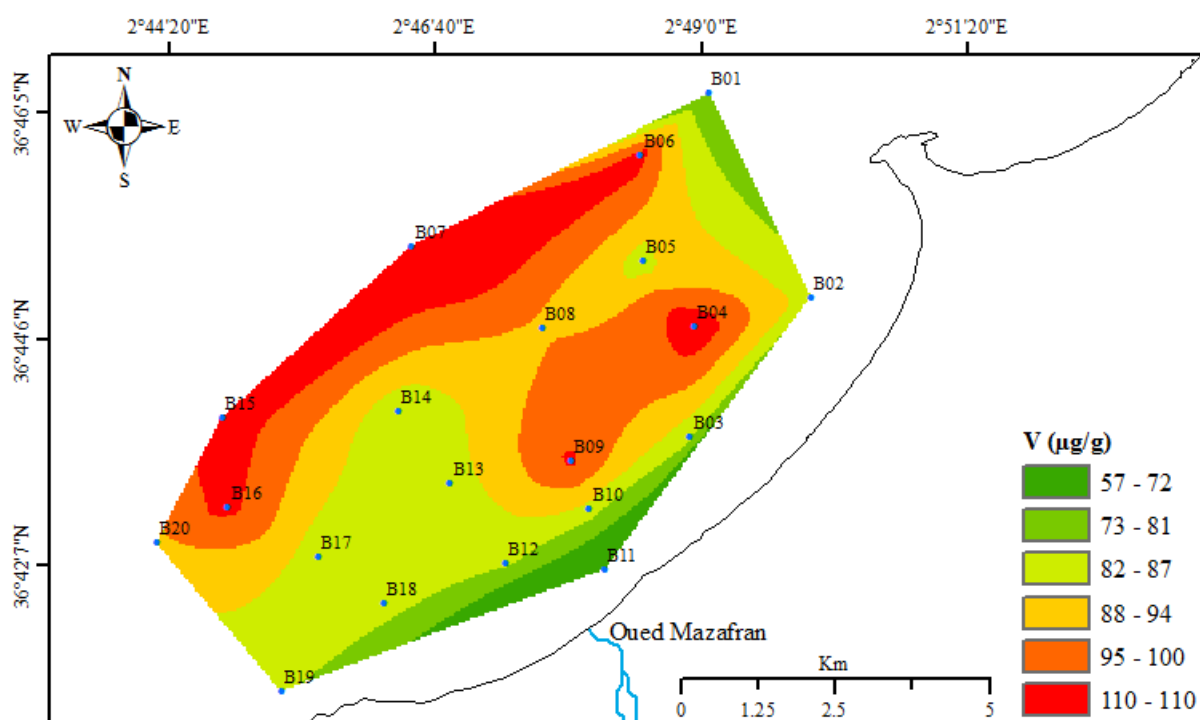
**Figure III.18 :** Distribution spatiale du plomb ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

#### III.2.2.4 Vanadium (V)

La distribution spatiale des teneurs en vanadium (V) dans les sédiments superficiels de la baie d'Alger et de Bou-Ismaïl fluctuent entre 87,38-132,57  $\mu\text{g/g}$  et 56,64-114,57  $\mu\text{g/g}$ , avec une valeur moyenne de  $116,93 \pm 12,47$  et  $89,54 \pm 14,00$   $\mu\text{g/g}$ , respectivement. A l'inverse du manganèse et du fer. Les stations à fortes teneurs en vanadium sont principalement localisées dans les eaux du large, notamment dans la zone d'eaux profondes. Les concentrations du vanadium mesurées dans les deux baies sont inférieures au fond géochimique local. Dans la baie d'Alger, le vanadium augmente en teneur dans un gradient de concentration qui n'est pas en relation avec l'embouchure de l'oued El Harrach et peut être en relation indirecte avec le port d'Alger (Fig. III.19). Cependant, pour la baie de Bou-Ismaïl, les gradients de concentration sont en relations directes avec l'embouchure de l'oued Mazafran et le port de sidi Fredj (Fig. III.20). Ces gradients semblent être liés au mode de dépôt des particules sédimentaires les plus fines et suggèrent des origines semblables (Roussiez et al., 2006; Roussiez et al., 2005), ce qui peut être confirmé par les corrélations positives et significatives entre le vanadium et les particules fines (Tab. III.19).



**Figure III.19:** Distribution spatiale du vanadium ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.

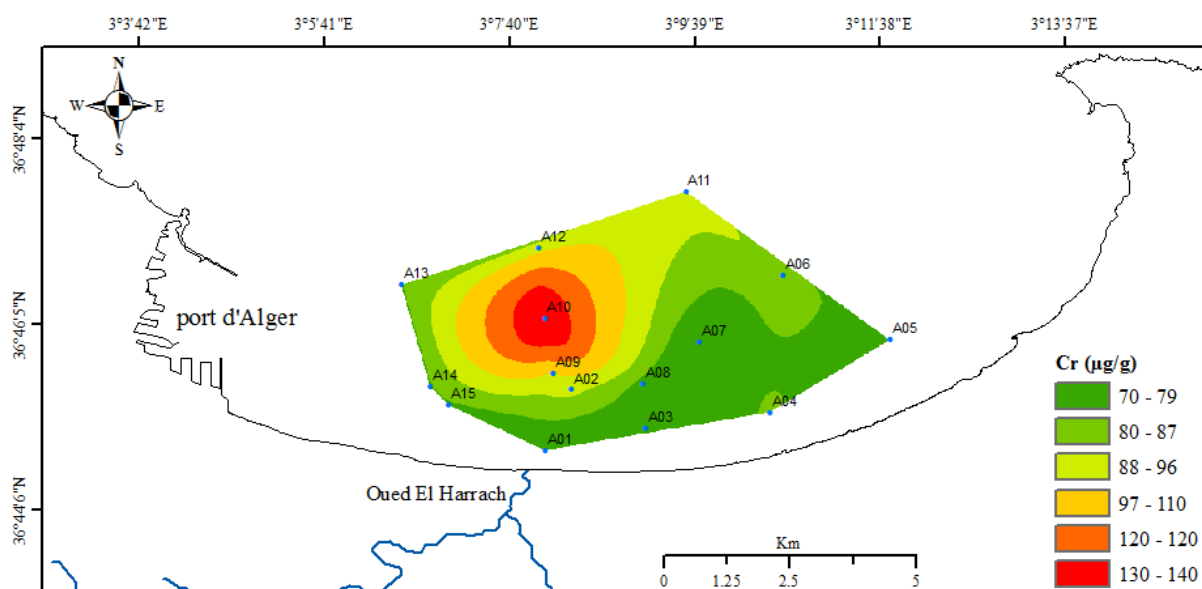


**Figure III.20 :** Distribution spatiale du vanadium ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

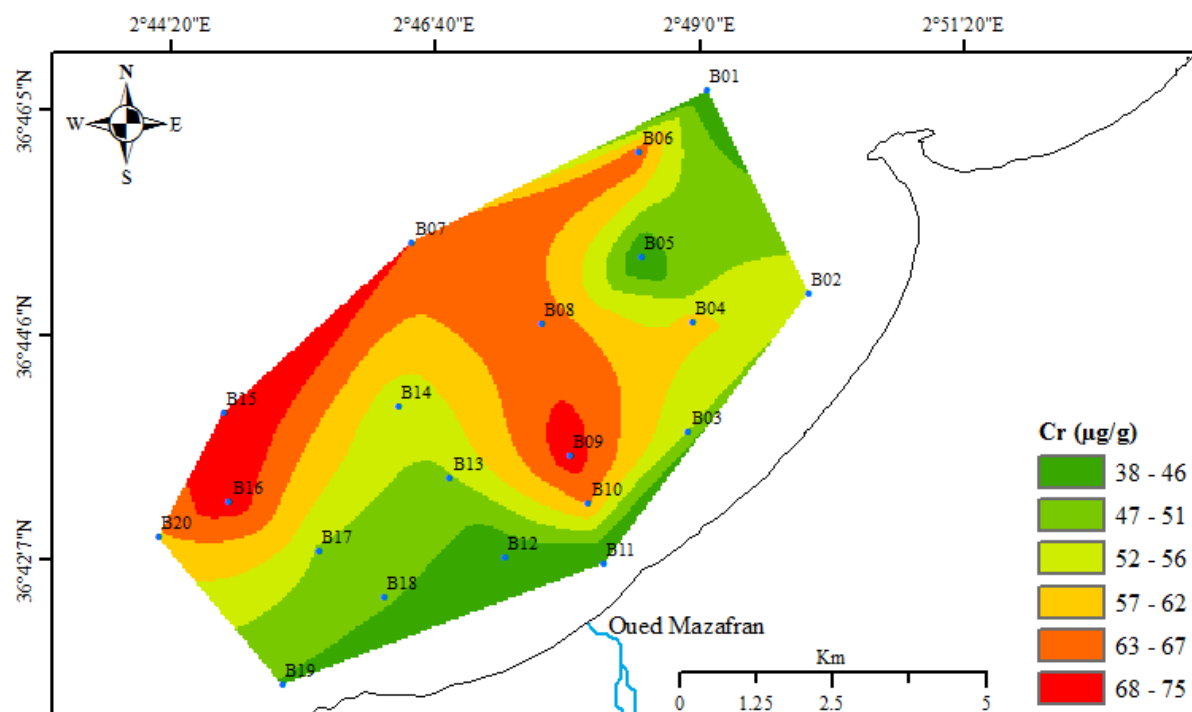
### III.2.2.5 Chrome (Cr)

Les teneurs en chrome sont comprises entre 70,03 et 143,82  $\mu\text{g/g}$ , avec une valeur moyenne de  $84,76 \pm \mu\text{g/g}$  dans la baie d'Alger, et entre 37,51 et 74,71  $\mu\text{g/g}$ , avec une valeur moyenne de  $55,41 \pm 11,73 \mu\text{g/g}$  dans la baie de Mazafran. La valeur du chrome la plus élevée (143,82  $\mu\text{g/g}$ ) a été observée à la station A10, qui correspond au maximum de plomb (56,69  $\mu\text{g/g}$ ) et de MO (18,62%) (Tab. III.17). Ceci démontre que cet élément a tendance à se fixer aux particules

finer du sédiment (Zhang et al., 2002). Le maximum du chrome dans la baie d'Alger dépasse largement le fond géochimique local de  $98,2 \mu\text{g/g}$ . En revanche, pour la baie de Bou-Ismaïl, toutes les concentrations en chrome mesurées sont inférieures à la valeur de ce fond géochimique local.



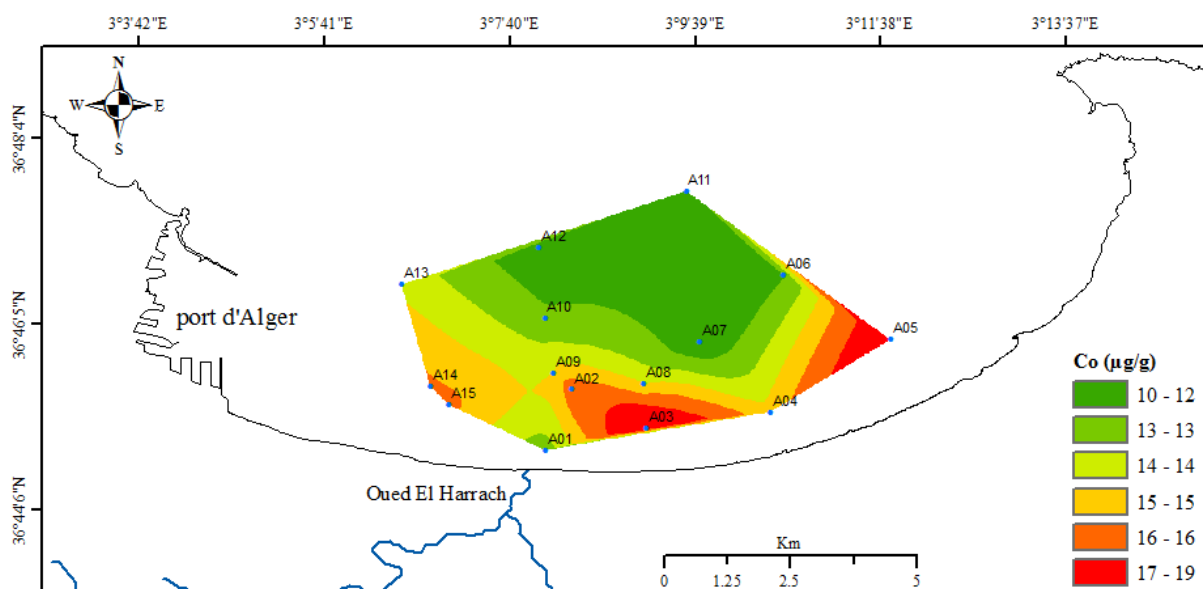
**Figure III.21:** Distribution spatiale du chrome ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.



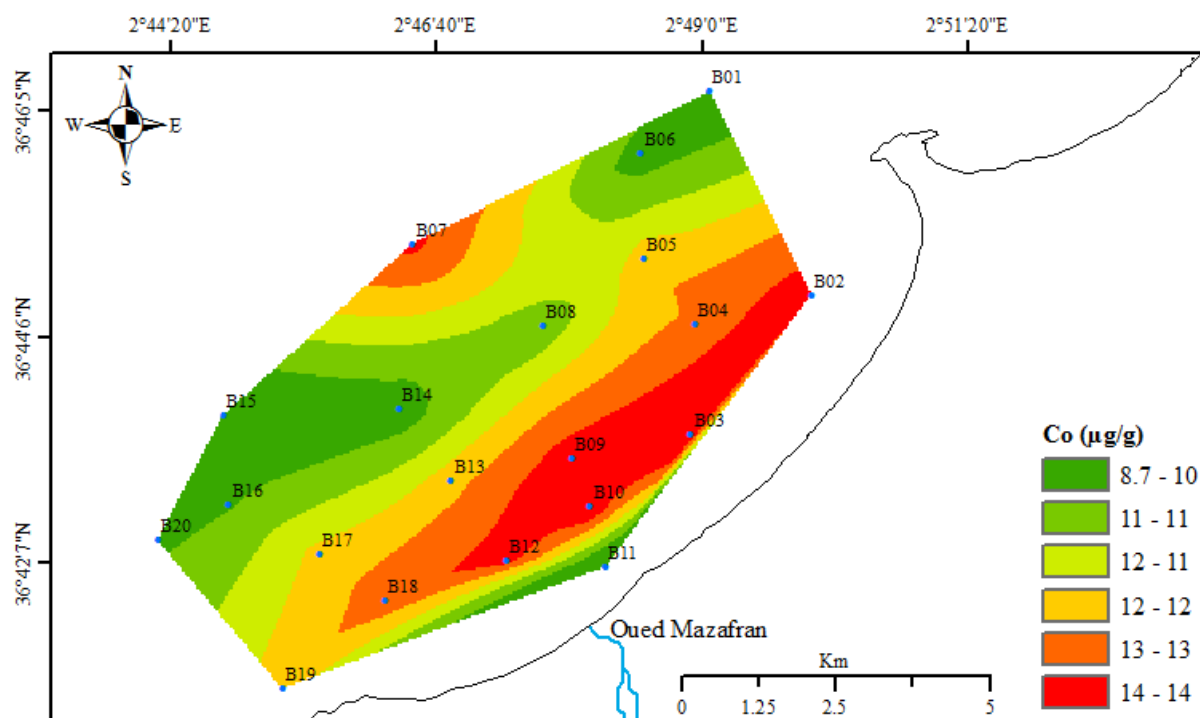
**Figure III.22 :** Distribution spatiale du chrome ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

### III.2.2.6 Cobalt (Co)

Les cartes de distribution du cobalt dans les sédiments superficiels des deux baies sont quasiment identiques à celles du manganèse et de fer (la différence se manifeste uniquement dans les gammes des valeurs), ce qui peut être confirmé par les corrélations positives et significatives entre le cobalt d'une part et le fer et le manganèse d'autre part. Ces trois métaux peuvent avoir les mêmes origines, comportements et évolution dans les sédiments marins (Stockdale et al., 2010). Cependant, les teneurs en cobalt dans la baie d'Alger et de Bou-Ismaïl varient entre 10,42 et 18,76  $\mu\text{g/g}$ , avec une valeur moyenne de  $13,73 \pm 2,63 \mu\text{g/g}$ , et entre 8,65 et 13,55  $\mu\text{g/g}$ , avec une moyenne de  $11,26 \pm 1,61 \mu\text{g/g}$ , respectivement. Le maximum du cobalt (18,76  $\mu\text{g/g}$ ) est observé à la station A03, coïncidant avec le maximum du fer (51,78  $\mu\text{g/g}$ ). Les concentrations mesurées pour le cobalt dans la baie de Bou-Ismaïl sont inférieures au fond géochimique.



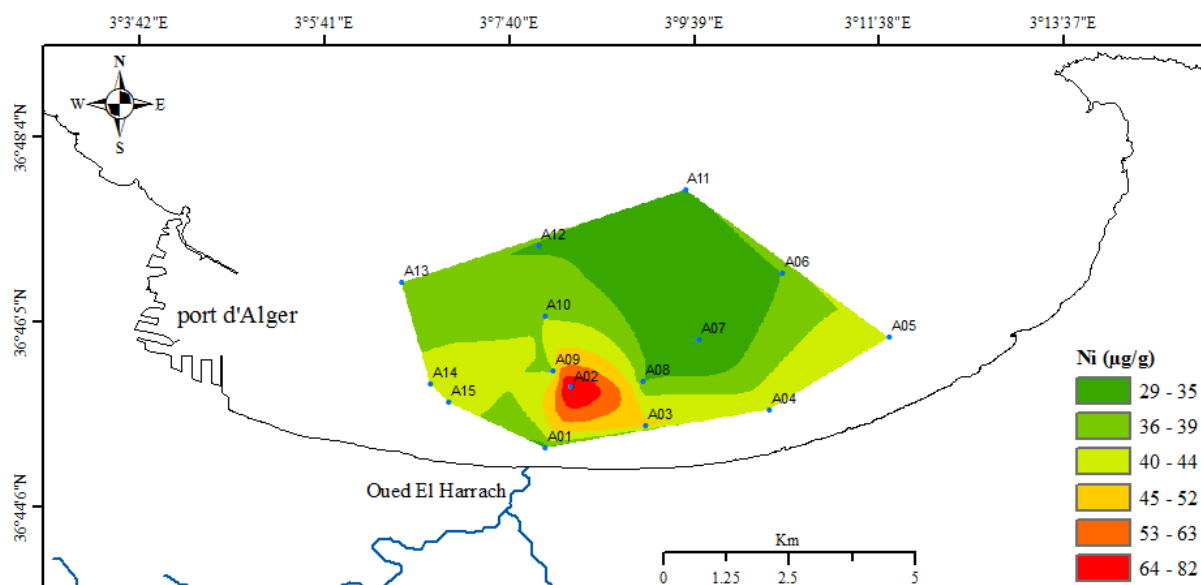
**Figure III.23:** Distribution spatiale du cobalt ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.



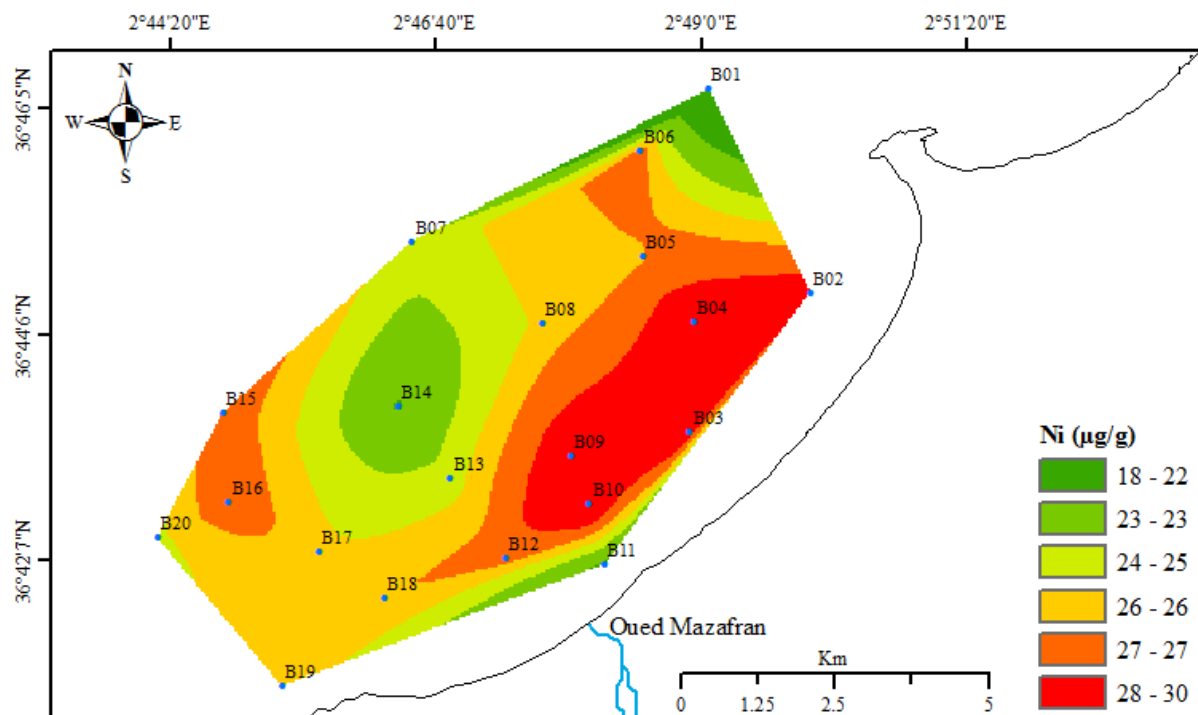
**Figure III.24 :** Distribution spatiale du cobalt (µg/g) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

#### III.2.2.7 Nickel (Ni)

Les teneurs en nickel fluctuent entre 28,94 et 82,25 µg/g avec une valeur moyenne de  $40,67 \pm 12,18$  µg/g dans la baie d'Alger. Dans la baie de Bou-Ismaïl, les concentrations sont dans l'intervalle qui s'étend de 17,64 à 30,41 µg/g, avec une valeur moyenne  $25,67 \pm 3,07$  µg/g. Les valeurs les plus élevées en Ni ont été enregistrées au niveau de la baie d'Alger avec un maximum mesuré à la station A02, située en face l'embouchure de l'oued el Harrach. Ceci peut évoquer un apport anthropique dans cette zone. Ces valeurs de nickel dépassent la valeur du fond géochimique de 33,7 µg/g. La distribution spatiale du nickel est similaire à celles du Co, Fe et Mn. Cela peut être confirmé par les corrélations positives et significatives ( $r > 0,52$ ) (Tab. III.19).



**Figure III.25:** Distribution spatiale du nickel ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.

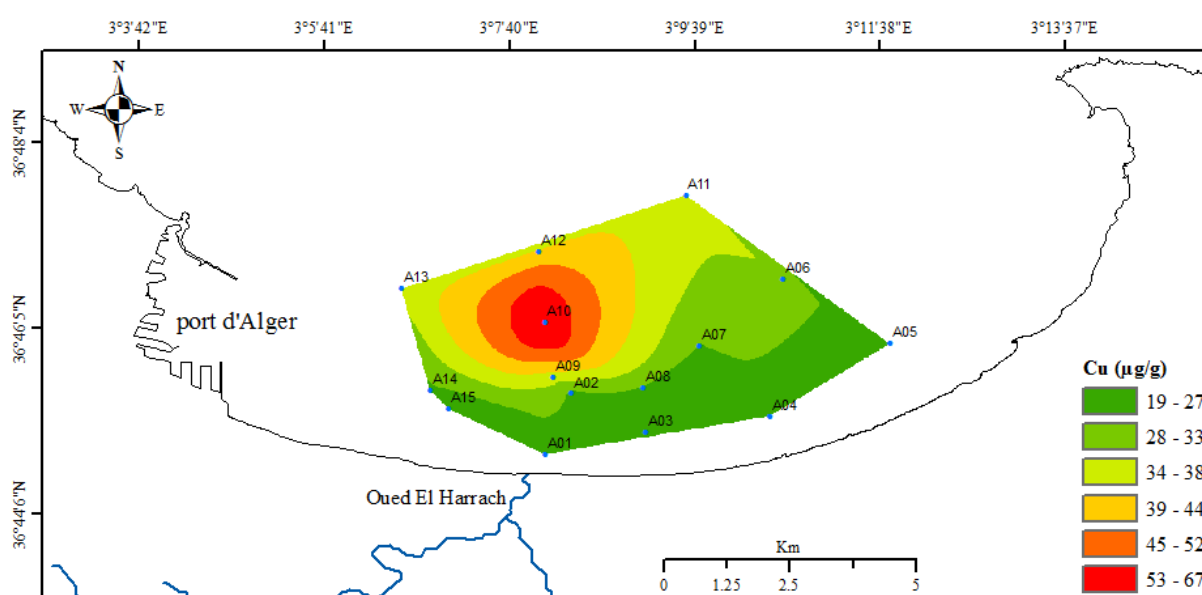


**Figure III.26 :** Distribution spatiale du nickel ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

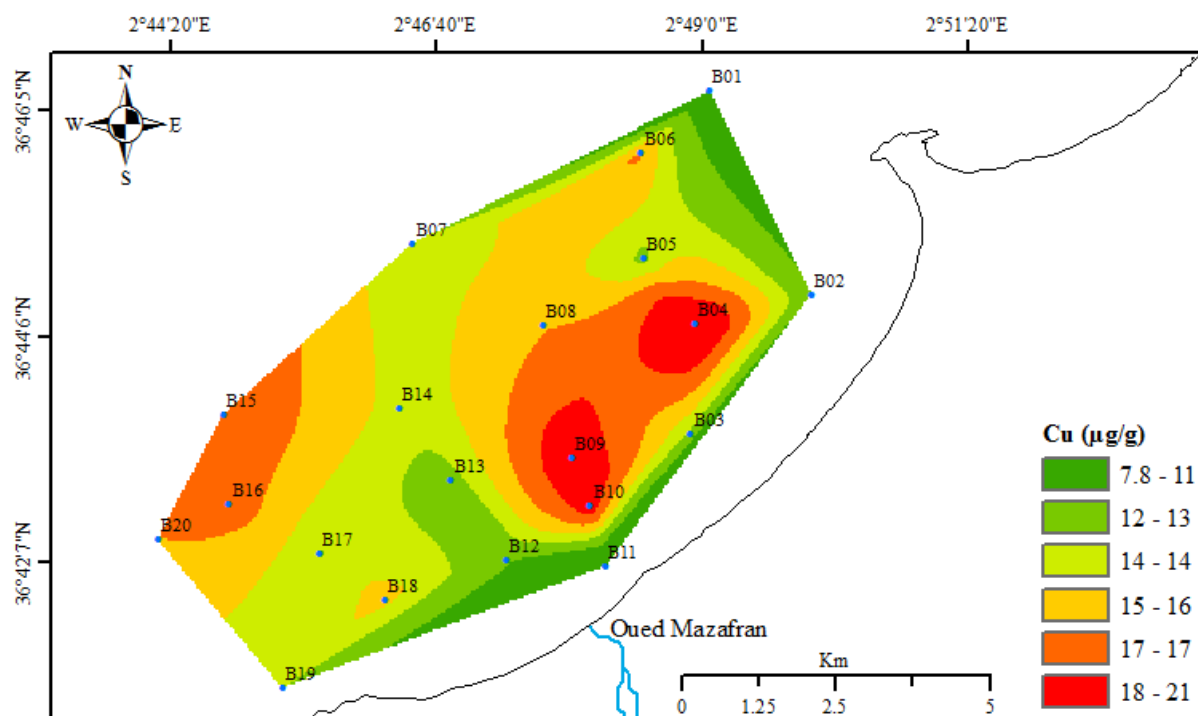
### III.2.2.8 Cuivre (Cu)

Les valeurs du cuivre dans les sédiments superficiels de la zone d'étude varient entre 18,64 et 67,30 $\mu\text{g/g}$ , avec une valeur moyenne  $30,35 \pm 12,03 \mu\text{g/g}$  dans la baie d'Alger. Dans la baie de Bou-Ismaïl, l'intervalle des concentrations obtenues est 7,73-21,35 $\mu\text{g/g}$ , avec une valeur moyenne  $14,24 \pm 3,36 \mu\text{g/g}$ . Dans la baie d'Alger, à l'exception de la station A05 (18,64  $\mu\text{g/g}$  de Cu), toutes les autres ont enregistré des concentrations en cuivre supérieures au fond

géochimique qui est de l'ordre de  $21,9 \mu\text{g/g}$  (Aroua et al., 2023). La concentration maximale est mesurée à la station A10 ( $67,3 \mu\text{g/g}$  de Cu), qui coïncide avec le maximum observé pour le Pb et Cr. Les fortes teneurs en cuivre dans la baie d'Alger peuvent être originaires de la dégradation et l'oxydation de la matière organique (Tankere-Muller et al., 2007). Ceci peut être confirmé par des corrélations positives et significatives entre le cuivre et la MO ( $r = 0,83$ ). Cela s'ajoute les apports liés aux diverses activités humaines telles que la navigation en bateaux, et les rejets industriels, notamment la réparation navale (ERENAV) au niveau du port d'Alger. En revanche, les concentrations du cuivre mesurées dans la baie de Bou-Ismaïl sont inférieures au fond géochimique et peuvent être naturelles.



**Figure III.27:** Distribution spatiale du cuivre ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.

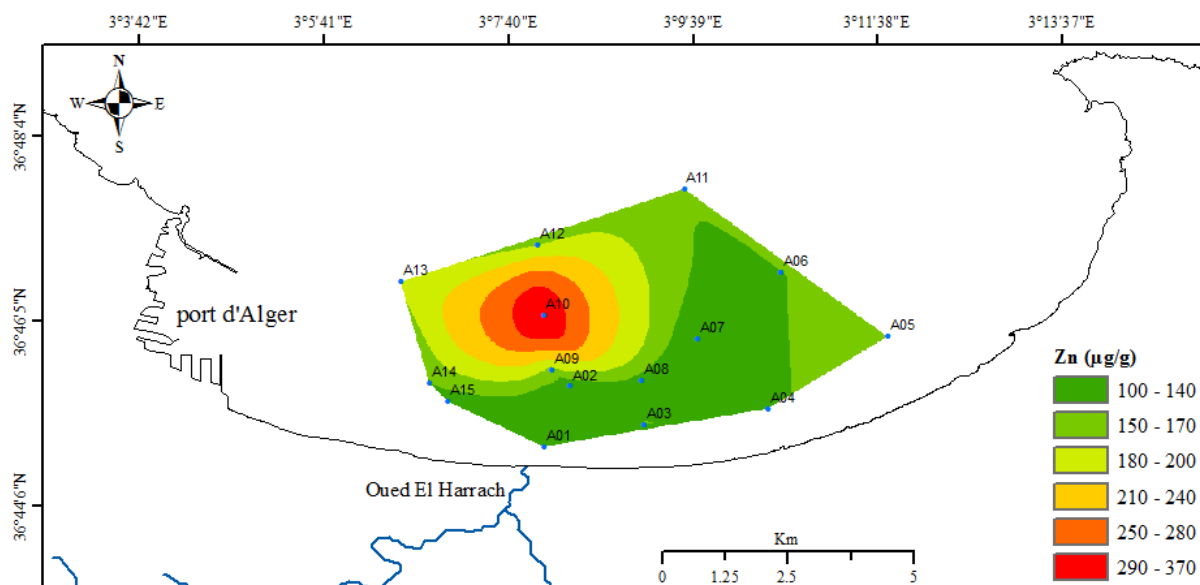


**Figure III.28 :** Distribution spatiale du cuivre ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

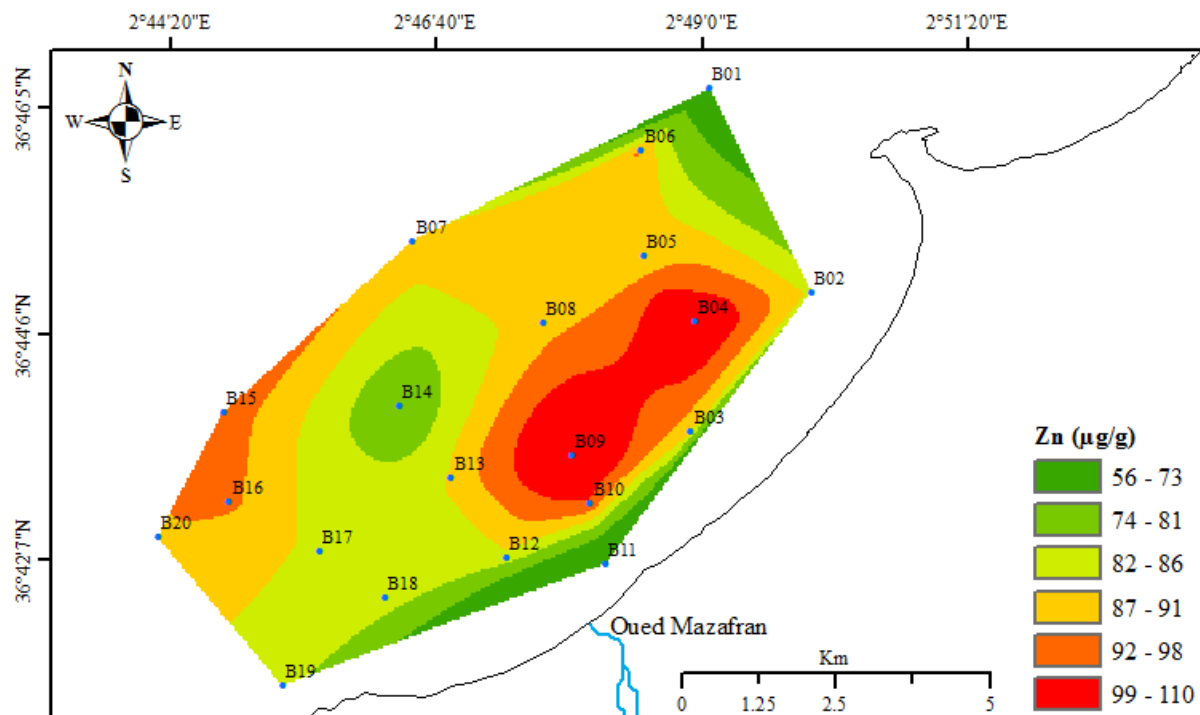
### III.2.2.9 Zinc (Zn)

Dans la baie d'Alger, les valeurs du zinc sont relativement élevées et varient entre 103,64 et 373,65  $\mu\text{g/g}$ , avec une valeur moyenne de  $153,59 \pm 63,81 \mu\text{g/g}$  (Fig. III.29) ; alors que dans la baie de Bou-Ismaïl les concentrations du zinc sont modérées et varient dans l'intervalle de 55,40-112,41  $\mu\text{g/g}$ , avec une valeur moyenne  $86,73 \pm 13,05 \mu\text{g/g}$ . La valeur maximale (373,65  $\mu\text{g/g}$ ) est observée dans la station A10, à l'embouchure de l'oued El-Harrach avec une valeur supérieure à celle du fond géochimique (101  $\mu\text{g/g}$ ) de plus d'un facteur de trois fois. Cette station A10 enregistre les teneurs les plus importantes des métaux : Zn (373,65 $\mu\text{g/g}$ ), Cu (67,3  $\mu\text{g/g}$ ), Cr (143,82 $\mu\text{g/g}$ ), Pb (56,96 $\mu\text{g/g}$ ) et Cd (0,51 $\mu\text{g/g}$ ). La position de cette station A10 et la nature vaseuse de ses sédiments peuvent expliquer ces fortes teneurs liées à l'affinité de ces éléments pour les argiles et la matière organique. Pour les teneurs les plus élevées du Zinc, on constate qu'elles sont très marquées près du port. En effet, ceci est évident du fait de l'existence de l'entreprise de la réparation navale (ERENAV) dans le port d'Alger, mais surtout pour l'utilisation du zinc dans la protection anodique des coques des navires et autres.

Pour le zinc mesuré dans la baie de Bou-Ismaïl, globalement, les teneurs restent naturelles et inférieures au fond géochimique à l'exception des stations B04 (110,77 $\mu\text{g/g}$ ) et B09 (112,41 $\mu\text{g/g}$ ).



**Figure III.29:** Distribution spatiale du zinc ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.

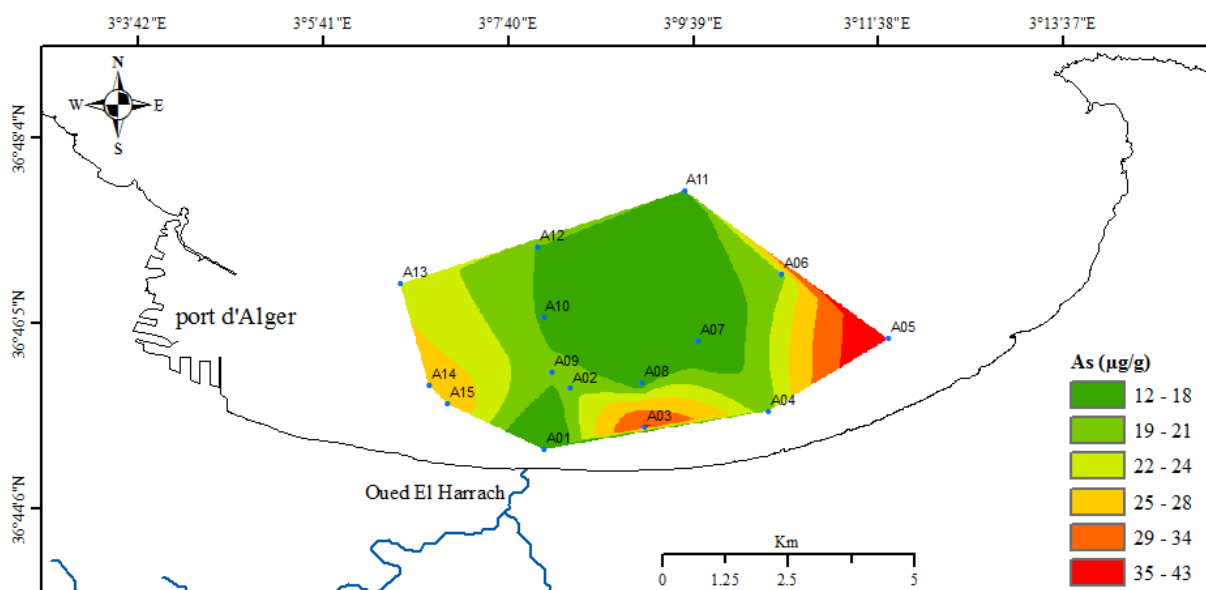


**Figure III.30 :** Distribution spatiale du zinc ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

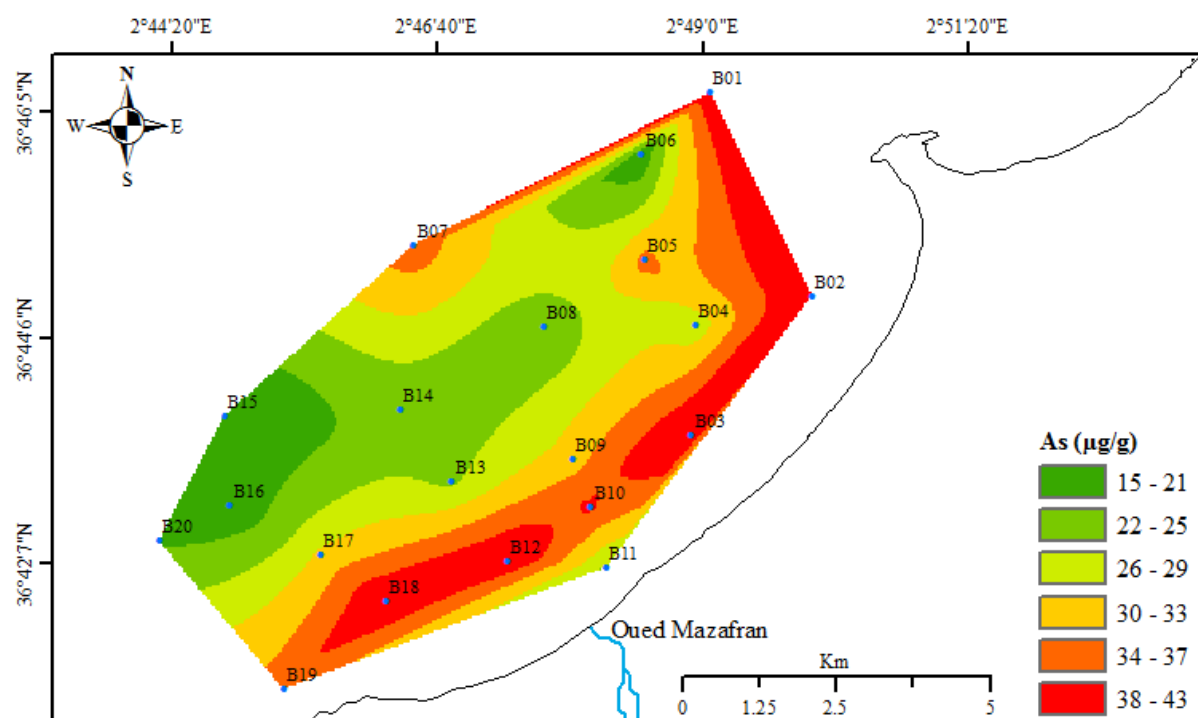
#### III.2.2.10 Arsenic (As)

La répartition spatiale de l'arsenic dans les sédiments superficiels dans les baies d'Alger et de Bou-Ismaïl est similaire à celle du fer ( $r^2 = 0,52$ ) (Tab. III.17). En effet, Les valeurs de ce métalloïde varient dans l'intervalle de 11,87-43,59  $\mu\text{g/g}$  et 14,85-42,71  $\mu\text{g/g}$  et une valeur moyenne de  $21,88 \pm 8,23$   $\mu\text{g/g}$  et  $30,18 \pm 9,72$   $\mu\text{g/g}$  dans les baies d'Alger et baie de Bou-Ismaïl, respectivement. Contrairement aux autres métaux, des teneurs importantes en arsenic sont

enregistrées au niveau de la baie de Bou-Ismaïl avec une moyenne qui est plus que le double de la valeur du fond géochimique local (17,68  $\mu\text{g/g}$ ). Les fortes teneurs en As sont observées dans les stations A05 (43,59  $\mu\text{g/g}$ ) et B03 (42,71), elles sont en accord avec celles trouvées par Inal et al. (2018) dans les sédiments superficiels de la côte centrale algérienne et par Aroua et al., (2023) et Athmani et al., (2022) dans des carottes sédimentaires de la côte algéroise. Etant donné que l'arsenic sert généralement de marqueur du ruissellement agricole (Bai et al., 2012; Sun et al., 2012), il indique l'utilisation croissante de composés d'arsenic comme engrais, fumier et produits agrochimiques dans les champs agricoles (Mao et al., 2020). Nous notons que l'oued Mazafran traverse les grandes zones agricoles de la Mitidja.



**Figure III.31:** Distribution spatiale de l'arsenic ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie d'Alger.

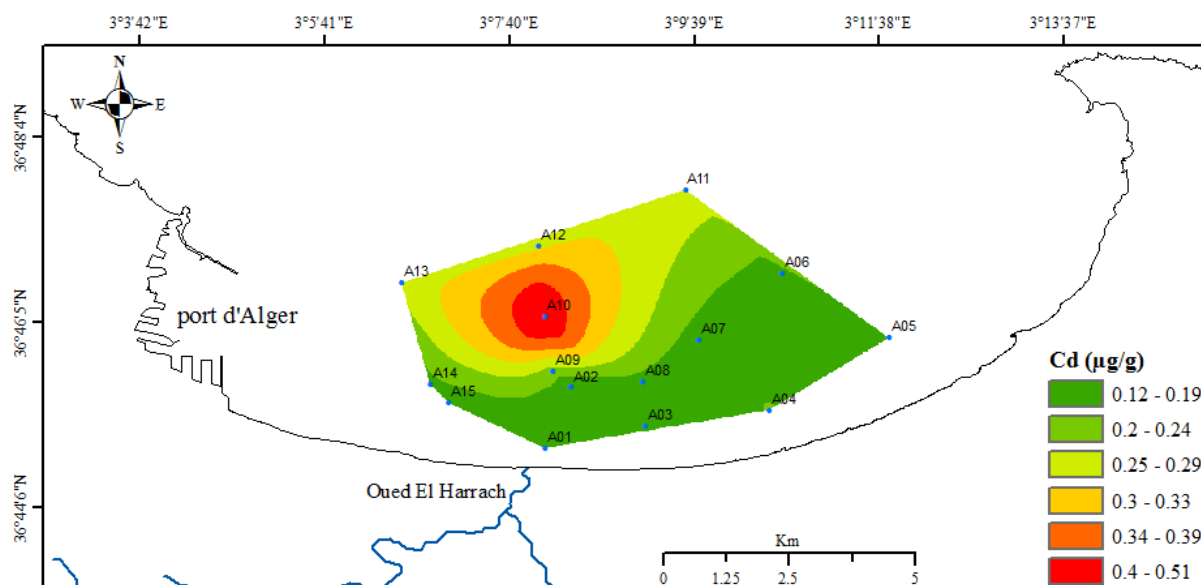


**Figure III.32 :** Distribution spatiale de l'arsenic ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

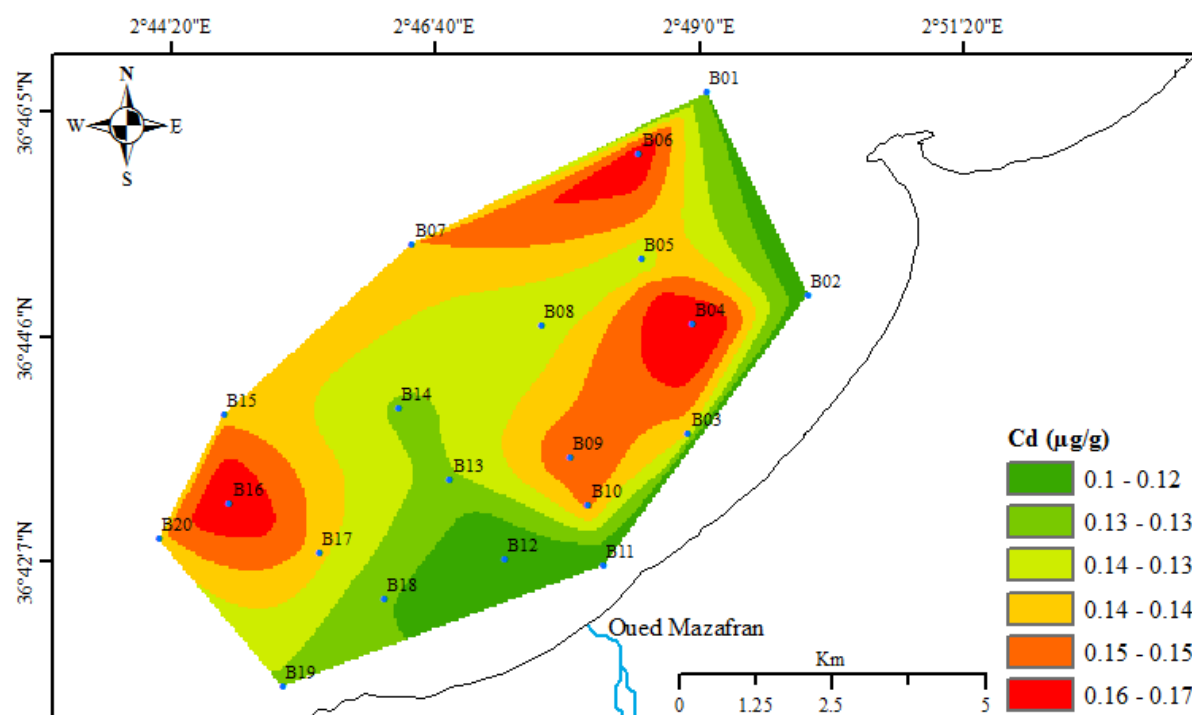
### III.2.2.11 Cadmium (Cd)

Les concentrations du cadmium fluctuent entre 0,12 et 0,51  $\mu\text{g/g}$  avec une valeur moyenne de  $0,20 \pm 0,10 \mu\text{g/g}$  dans la baie d'Alger. Dans la baie de Bou-Ismaïl, les concentrations de ce métal varient entre 0,10 et 0,17  $\mu\text{g/g}$ , avec une valeur moyenne de  $0,13 \pm 0,02 \mu\text{g/g}$ . La carte de distribution du cadmium dans les sédiments superficiels des deux baies (Fig. III.33 et III.34) est similaire à la distribution de la majorité des métaux, notamment le Cu, le Cr, le Pb et le Zn. Au même titre plusieurs autres métaux, la teneur la plus élevée en Cd est enregistrée au niveau de la station A10 (0,51  $\mu\text{g/g}$  de Cd) de la baie d'Alger qu'on peut classer comme un point hot spot dans ce travail. Ces valeurs en cadmium corroborent celles observées par [Bachouche et al. \(2017\)](#) et [Inal et al. \(2018\)](#). Cependant, les teneurs mesurées dans la baie de Bou-Ismaïl restent beaucoup plus naturelles et inférieures au fond géochimique.

Dans la nature, le cadmium se trouve principalement sous forme minérale dans de rares minerais, tels que le sulfure de cadmium (la greenockite), le carbonate de cadmium (l'otavite) et autres. Dans la technologie, le cadmium est largement utilisé, notamment dans les pigments, les piles alcalines ... ect. Cette utilisation contribue à augmenter sa concentration dans les sédiments ([Sin et al., 2001](#)).



**Figure III.33:** Distribution spatiale du cadmium ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau des baies d'Alger.



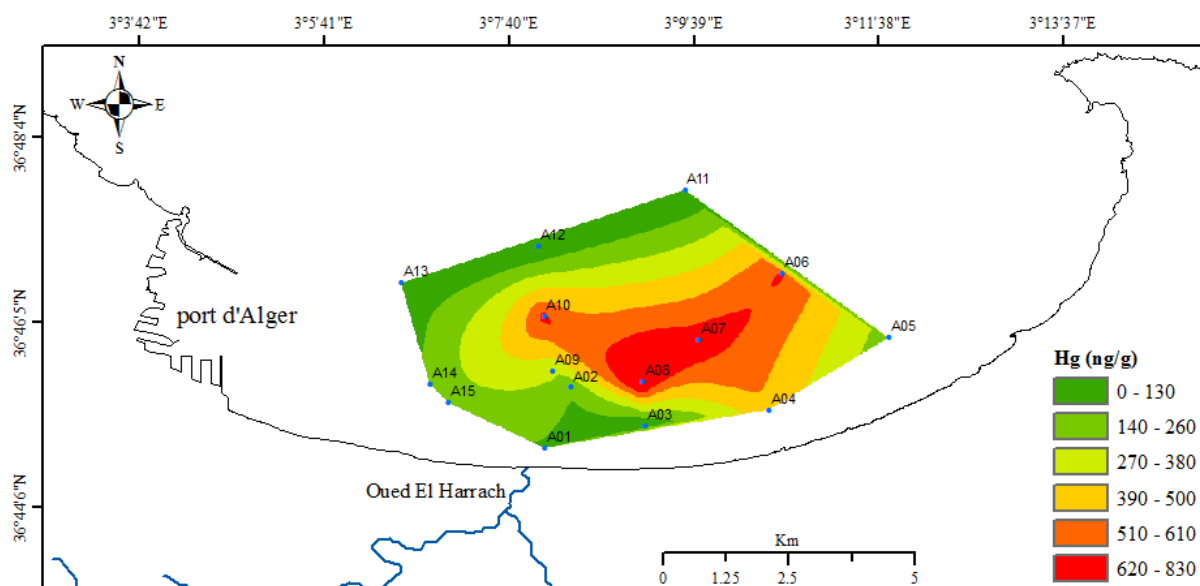
**Figure III.34 :** Distribution spatiale du cadmium ( $\mu\text{g/g}$ ) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

### III.2.2.12 Mercure (Hg)

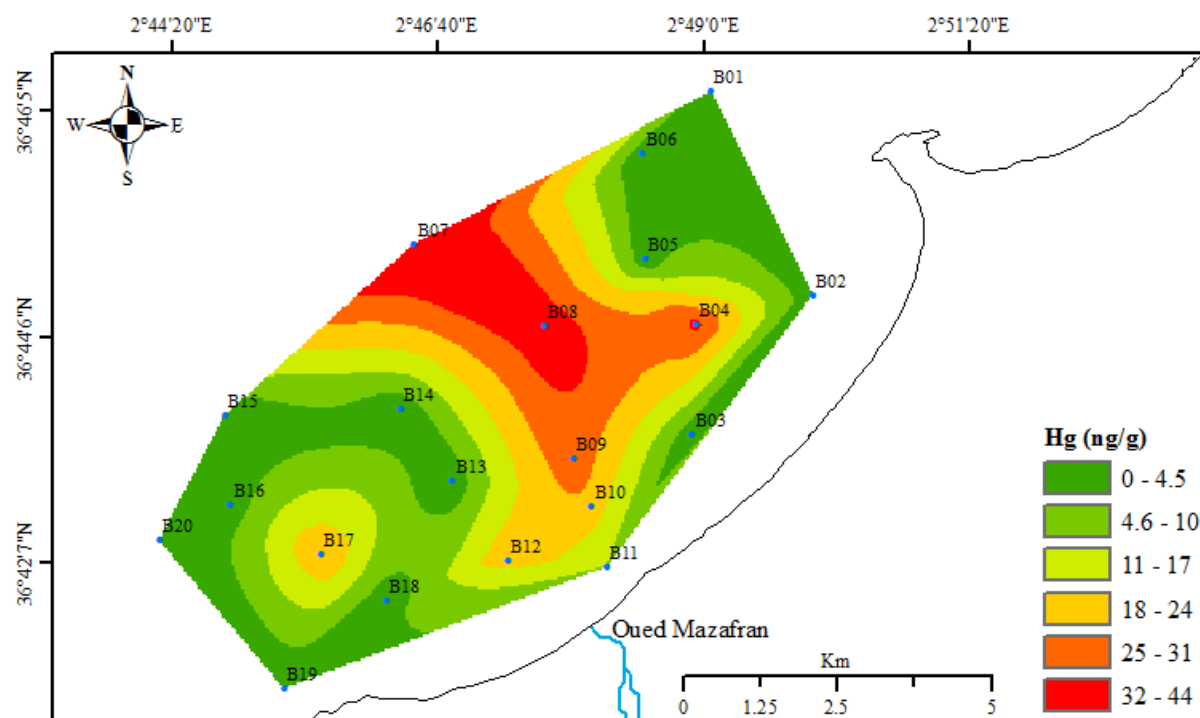
Les concentrations du mercure se situent entre 10,84 et 828,10 ng/g dans la baie d'Alger avec une valeur moyenne de  $365,10 \pm 269,01$  ng/g. Dans la baie de Bou-Ismaïl, l'intervalle de variation des teneurs est entre 0,82 et 44,25 ng/g, avec une valeur moyenne de  $24,69 \pm 13,57$  ng/g. Les fortes concentrations du mercure dans la baie d'Alger concordent avec celles relevées par [Bachouche et al. \(2017\)](#); [Yoshida et al. \(2007\)](#) qui atteignent une valeur maximale de 2440

ppb et 1207 ng/g, respectivement. Alors que, des concentrations de 136 et 177 ng/g sont relevé dans les sédiments d'Alger plage et Rais Hamidou, respectivement, par Guendouzi et al. (2015). Les valeurs élevées de mercure trouvées dans la baie d'Alger sont probablement dues aux apports anthropiques de l'oued El Harrach, selon les valeurs trouvées dans les eaux d'oued El Harrach par Bouchelouche and Arab (2020) qui atteignait 5 µg/L.

Nous signalons ici l'histoire des potiches de mercure perdues au niveau de quelques quais du port d'Alger lors des opérations d'exportation du mercure par l'Algérie dans les années 70. Un rapport historique existe et date de 1978. Ce rapport signale qu'environ 76 potiches (emballage sous forme de flacon en acier spécifique pour l'élément Hg et pèse environ 35 kg) de mercure perdues accidentellement dans le fond marin des quais. Plusieurs tentatives d'engagement des travaux de repêchage/récupération de ces potiches qui s'avèrent longues et onéreuses. Comme le fond marin (sédiments) se trouve à l'état d'anoxie totale, l'acier ne se corrode pas (milieu réducteur), l'opération de repêchage a été annulée et différée dans le temps. Donc, le risque de déversement de ce mercure dans les sédiments est écarté temporairement pour l'instant. Cependant, il est impératif de ne pas mettre ce cas environnemental dans les oubliettes. Il faut lui prêter une attention particulière pour programmer le repêchage/récupération en profitant des opportunités qui peuvent s'offrir, notamment lors des opérations du dragage du port.



**Figure III.35:** Distribution spatiale du mercure (ng/g) au niveau de la baie d'Alger.



**Figure III.36 :** Distribution spatiale du mercure (ng/g) au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

### III.2.3 Corrélation entre les métaux traces, la granulométrie et la matière organique totale des sédiments superficiels

Les corrélations entre les métaux traces, la granulométrie et la matière organique, peuvent refléter la ou les sources de pollution et la dispersion des métaux traces associés aux sédiments (Wang et al., 2015). Les éléments présentant des corrélations élevées peuvent partager des sources communes, des affinités et des comportements analogues lors de la réactions de transformation et de la migration sous certaines formes et conditions physico-chimiques (Wang et al., 2012). Pour explorer les corrélations entre les métaux traces, l'analyse de corrélation de Pearson (Tab. III.19) peut clairement faire apparaître deux groupes indiqués dans ce qui suit :

**Groupe 1 :** très forte corrélation positive entre le Cd, Cr, Cu, Zn, Pb avec un  $r > 0,8$  (Tab. III.19), cela corrobore les cartes de distribution spatiale (section III.2.2) (même allure de distribution spatiale). Ces métaux pouvaient avoir des comportements similaires et des sources communes. En plus, une corrélation significative est enregistrée entre ces métaux, la fraction limoneuse et la MO ( $0,5 < r < 0,9$ ), ce qui suggère que la matière organique a agi comme un puits ou une source pour ces métaux dans les sédiments (Komada et al., 2016; Martínez-Santos et al., 2015). Cependant, une corrélation significative est observée entre le Cd, Cr, Cu, Zn, Pb et le V et Hg avec ( $0,5 < r < 0,7$ ). Les coefficients de corrélation élevés entre les métaux donnent des

indications sur leur origine. [Kükrer et al. \(2014\)](#) soulignent qu'une forte corrélation entre deux métaux peut indiquer la même source de pollution.

**Groupe 2 :** corrélation hautement significative entre les couples de métaux : Fe-Mn (0,64), Fe-Co (0,87), Fe-Ni (0,62), Mn-Co (0,81), Mn-Ni (0,62) et Co-Ni (0,61), à l'exception du nickel, il y a une forte corrélation positive entre le Fe, Mn, Ni et le sable fin avec un coefficient  $r > 0,5$ , et pas de corrélation entre ces métaux et la matière organique. Le coefficient de corrélation entre le Ni et le sable fin et entre le Ni et la MO est de 0,35, 0,32, respectivement.

Cependant, aucune relation n'a été trouvée entre les métaux traces étudiés et l'arsenic sauf le fer avec un coefficient de  $r = 0,53$  et dans une moindre mesure avec le cobalt ( $r = 0,37$ ). L'absence de corrélation entre l'arsenic et les métaux signifie que ce métalloïde n'est pas contrôlés par un seul facteur ([Kükrer et al., 2014](#)). En outre, une forte corrélation positive est enregistrée entre l'As et le sable avec  $r = 0,56$ , tandis qu'une corrélation hautement significative mais négative est observée entre As et la MO d'une part et l'As est le limon d'autre part avec un  $r > 0,58$ .

**Tableau III.17 :** Concentration en métaux traces et de l'arsenic dans les sédiments superficiels au niveau de la baie d'Alger.

| Station        | Mn (µg/g)    | Fe (mg/g)  | Pb (µg/g)  | V (µg/g)     | Cr (µg/g)   | Co (µg/g)  | Ni (µg/g)   | Cu (µg/g)   | Zn (µg/g)    | As (µg/g)  | Cd (µg/g) | Hg (ng/g)     |
|----------------|--------------|------------|------------|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|--------------|------------|-----------|---------------|
| A01            | 393,43±12,98 | 36,85±0,88 | 26,25±0,34 | 87,38±3,15   | 70,04±2,87  | 12,05±0,41 | 34,19±1,26  | 23,31±1,14  | 103,64±3,01  | 11,87±0,19 | 0,16±0,01 | 119,66±4,89   |
| A02            | 466,90±16,34 | 48,25±1,59 | 22,60±0,47 | 111,13±5,00  | 89,96±4,68  | 15,90±0,62 | 82,25±3,62  | 25,65±0,97  | 121,09±3,51  | 20,26±1,42 | 0,12±0,02 | 139,21±5,69   |
| A03            | 535,26±13,38 | 51,78±0,93 | 25,26±0,33 | 110,34±3,86  | 70,05±3,08  | 18,76±0,51 | 45,31±1,77  | 20,27±0,36  | 139,61±2,65  | 34,84±1,29 | 0,12±0,01 | 10,84±0,44    |
| A04            | 406,16±21,53 | 41,81±1,05 | 27,56±0,94 | 122,76±5,28  | 80,32±3,69  | 14,13±0,61 | 41,53±1,70  | 24,78±0,94  | 132,59±5,17  | 19,20±0,58 | 0,19±0,04 | 473,04±19,34  |
| A05            | 556,28±18,91 | 49,94±1,20 | 27,04±0,62 | 122,68±4,78  | 71,91±3,31  | 18,39±0,68 | 41,88±1,47  | 18,64±0,52  | 163,71±6,38  | 43,59±0,65 | 0,15±0,02 | 193,02±7,89   |
| A06            | 358,69±7,17  | 37,27±1,01 | 34,45±0,41 | 127,72±5,75  | 83,84±4,61  | 11,47±0,49 | 35,47±1,28  | 31,47±1,07  | 137,43±3,02  | 19,90±1,27 | 0,16±0,02 | 623,25±25,48  |
| A07            | 384,06±36,49 | 39,55±1,11 | 29,57±2,10 | 98,88±4,15   | 70,03±2,87  | 10,42±0,43 | 28,94±1,27  | 26,78±0,72  | 115,34±5,31  | 15,15±0,95 | 0,16±0,03 | 669,76±27,38  |
| A08            | 438,38±15,34 | 39,60±0,55 | 28,65±0,72 | 108,28±3,14  | 76,28±2,29  | 13,84±0,47 | 35,64±1,18  | 26,58±0,58  | 128,39±3,21  | 15,93±0,18 | 0,16±0,01 | 828,10±33,85  |
| A09            | 382,56±11,09 | 43,02±0,73 | 28,94±0,64 | 118,68±4,04  | 94,55±3,69  | 13,80±0,39 | 38,49±1,31  | 34,90±0,80  | 151,40±3,03  | 18,17±0,56 | 0,21±0,04 | 294,51±12,04  |
| A10            | 298,91±10,76 | 39,72±1,03 | 56,69±1,36 | 126,32±5,05  | 143,82±5,61 | 11,84±0,37 | 38,89±1,09  | 67,30±2,62  | 373,65±10,09 | 17,68±0,48 | 0,51±0,05 | 646,02±26,41  |
| A11            | 327,27±10,80 | 38,23±0,61 | 37,27±0,45 | 128,76±5,41  | 92,06±4,70  | 10,82±0,34 | 34,55±1,80  | 35,95±1,69  | 142,56±4,70  | 17,55±0,46 | 0,27±0,03 |               |
| A12            | 375,62±24,42 | 41,27±1,16 | 41,82±1,63 | 132,57±5,57  | 92,83±3,90  | 10,57±0,42 | 34,91±1,57  | 39,33±1,61  | 164,57±5,10  | 17,96±0,86 | 0,28±0,04 |               |
| A13            | 431,86±10,80 | 40,93±1,06 | 44,59±0,62 | 127,09±4,70  | 78,80±2,92  | 13,51±0,34 | 37,07±0,89  | 35,03±0,91  | 172,02±5,33  | 22,89±0,69 | 0,27±0,03 |               |
| A14            | 439,06±14,05 | 45,68±0,64 | 29,18±0,73 | 121,14±2,67  | 78,65±2,52  | 15,16±0,30 | 39,74±1,23  | 25,67±0,80  | 136,98±1,78  | 25,60±0,69 | 0,17±0,04 | 180,52±7,38   |
| A15            | 426,47±14,93 | 48,97±1,18 | 24,57±0,57 | 110,22±4,19  | 78,32±3,45  | 15,26±0,49 | 41,16±1,23  | 19,63±0,80  | 120,90±2,66  | 27,66±1,08 | 0,15±0,03 | 203,25±8,31   |
| <b>Min</b>     | 298,91       | 36,85      | 22,60      | 87,38        | 70,03       | 10,42      | 28,94       | 18,64       | 103,64       | 11,87      | 0,12      | 10,84         |
| <b>Max</b>     | 556,28       | 51,78      | 56,69      | 132,57       | 143,82      | 18,76      | 82,25       | 67,30       | 373,65       | 43,59      | 0,51      | 828,10        |
| <b>Moy ±sd</b> | 414,73±69,23 | 42,86±4,87 | 32,30±9,25 | 116,93±12,47 | 84,76±18,42 | 13,73±2,63 | 40,67±12,18 | 30,35±12,03 | 153,59±63,81 | 21,88±8,23 | 0,20±0,10 | 365,10±269,01 |

**Tableau III.18** : Concentration en métaux traces et de l'arsenic dans les sédiments superficiels au niveau de la baie de Bou-Ismaïl.

| Station        | Mn (µg/g)    | Fe (mg/g)  | Pb (µg/g)  | V (µg/g)    | Cr (µg/g)   | Co (µg/g)  | Ni (µg/g)  | Cu (µg/g)  | Zn (µg/g)   | As (µg/g)  | Cd (µg/g) | Hg (ng/g)   |
|----------------|--------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-----------|-------------|
| B01            | 308,55±4,89  | 31,56±0,44 | 13,97±0,08 | 72,11±1,59  | 40,47±0,65  | 9,19±0,07  | 17,64±0,12 | 9,22±0,05  | 62,46±0,81  | 41,15±1,15 | 0,12±0,01 |             |
| B02            | 341,28±12,49 | 42,39±2,18 | 18,03±0,20 | 84,35±0,17  | 53,99±0,32  | 13,00±0,18 | 28,46±0,60 | 11,58±0,37 | 84,61±0,51  | 41,99±0,13 | 0,11±0,00 | 0,82±0,03   |
| B03            | 401,19±9,52  | 45,17±1,55 | 20,15±0,16 | 82,87±0,41  | 51,19±0,41  | 13,55±0,15 | 28,63±0,37 | 12,58±0,13 | 86,77±1,56  | 42,71±0,51 | 0,13±0,01 |             |
| B04            | 268,50±4,61  | 39,97±1,40 | 24,15±0,65 | 109,12±2,62 | 58,28±1,40  | 11,96±0,14 | 28,99±0,58 | 21,35±0,32 | 110,77±1,77 | 26,38±0,77 | 0,17±0,01 | 33,34±1,36  |
| B05            | 325,74±6,29  | 38,66±1,32 | 19,62±0,12 | 83,42±1,08  | 38,67±0,50  | 11,65±0,16 | 25,82±0,39 | 12,42±0,22 | 85,87±1,63  | 35,26±0,25 | 0,13±0,01 |             |
| B06            | 243,59±2,85  | 35,90±1,05 | 21,07±0,40 | 104,85±0,52 | 66,25±0,33  | 9,60±0,22  | 26,77±0,54 | 15,82±0,30 | 91,40±1,55  | 16,31±0,13 | 0,16±0,02 |             |
| B07            | 268,33±7,16  | 39,53±1,37 | 21,87±0,55 | 114,57±1,03 | 66,93±0,80  | 12,73±0,25 | 23,99±0,67 | 13,15±0,16 | 88,92±1,07  | 36,09±0,47 | 0,14±0,01 | 44,25±1,81  |
| B08            | 270,09±6,35  | 36,62±0,98 | 21,21±0,51 | 92,61±0,37  | 67,06±0,67  | 10,24±0,13 | 24,95±0,35 | 15,33±0,31 | 87,51±1,23  | 21,69±0,15 | 0,13±0,01 | 37,97±1,55  |
| B09            | 264,33±5,87  | 42,49±2,28 | 23,13±0,49 | 102,87±1,13 | 70,47±0,92  | 13,00±0,39 | 29,16±0,70 | 19,30±0,69 | 112,41±2,02 | 31,47±0,69 | 0,15±0,02 | 29,46±1,20  |
| B10            | 331,69±10,54 | 46,65±1,70 | 23,49±0,75 | 85,37±0,60  | 62,50±0,44  | 13,51±0,23 | 30,41±0,09 | 18,82±0,21 | 96,26±0,58  | 38,09±0,88 | 0,14±0,01 | 20,43±0,84  |
| B11            | 313,95±6,00  | 33,32±0,95 | 12,47±0,21 | 56,64±0,57  | 37,51±0,45  | 8,65±0,21  | 21,26±0,26 | 7,73±0,12  | 55,40±0,55  | 25,08±0,68 | 0,10±0,01 | 9,83±0,40   |
| B12            | 367,46±5,92  | 45,72±2,49 | 18,08±0,22 | 83,20±1,25  | 40,70±0,37  | 12,94±0,08 | 27,00±0,54 | 11,57±0,23 | 85,17±1,36  | 42,36±1,10 | 0,10±0,01 | 21,98±0,90  |
| B13            | 284,19±2,66  | 37,21±0,61 | 17,40±0,56 | 83,45±1,17  | 50,81±0,81  | 11,59±0,22 | 24,08±0,65 | 12,22±0,23 | 86,31±1,55  | 24,41±1,29 | 0,12±0,01 |             |
| B14            | 237,19±4,94  | 32,90±0,66 | 18,98±0,02 | 82,42±1,90  | 52,62±0,21  | 9,52±0,14  | 21,36±0,15 | 13,71±0,29 | 74,44±0,15  | 22,21±0,27 | 0,12±0,03 |             |
| B15            | 227,85±4,00  | 34,93±1,02 | 21,61±0,39 | 107,05±0,54 | 74,71±1,57  | 9,07±0,17  | 26,98±0,51 | 17,21±0,45 | 94,61±2,27  | 14,85±0,67 | 0,14±0,01 |             |
| B16            | 257,08±3,27  | 37,74±1,08 | 21,01±0,21 | 104,20±0,63 | 71,66±0,50  | 9,95±0,12  | 27,10±0,41 | 16,76±0,17 | 92,27±0,46  | 15,79±0,30 | 0,17±0,00 |             |
| B17            | 292,12±9,03  | 37,31±1,53 | 18,57±0,32 | 83,03±1,08  | 50,48±0,81  | 11,44±0,13 | 25,05±0,20 | 12,84±0,21 | 83,93±0,92  | 30,13±0,93 | 0,13±0,01 | 24,12±0,99  |
| B18            | 333,25±3,08  | 42,61±1,03 | 17,45±0,33 | 84,13±0,76  | 47,37±0,95  | 12,15±0,13 | 25,70±0,18 | 14,69±0,04 | 82,49±0,91  | 41,75±1,17 | 0,12±0,01 |             |
| B19            | 327,53±4,89  | 40,79±1,03 | 17,59±0,25 | 82,32±1,15  | 45,56±0,36  | 11,53±0,13 | 25,58±0,08 | 12,96±0,10 | 82,57±0,25  | 35,60±1,14 | 0,12±0,02 |             |
| B20            | 257,52±2,15  | 34,79±1,55 | 20,62±0,43 | 92,15±0,46  | 60,88±0,97  | 9,88±0,26  | 24,39±0,15 | 15,48±0,14 | 90,36±1,08  | 20,34±0,45 | 0,14±0,01 |             |
| <b>Min</b>     | 227,85       | 31,56      | 12,47      | 56,64       | 37,51       | 8,65       | 17,64      | 7,73       | 55,40       | 14,85      | 0,10      | 0,82        |
| <b>Max</b>     | 401,19       | 46,65      | 24,15      | 114,57      | 74,71       | 13,55      | 30,41      | 21,35      | 112,41      | 42,71      | 0,17      | 44,25       |
| <b>Moy ±sd</b> | 296,07±46,13 | 38,81±4,38 | 19,52±2,97 | 89,54±14,00 | 55,41±11,73 | 11,26±1,61 | 25,67±3,07 | 14,24±3,36 | 86,73±13,05 | 30,18±9,72 | 0,13±0,02 | 24,69±13,57 |

**Tableau III.19:** Corrélations entre la matière organique « MO », la granulométrie et la teneur en métaux traces et l'arsenic dans les sédiments des baies d'Alger et de Bou Ismail.

|                 | OM %<br>(550 °C) | OM %<br>(1000 °C) | Grain<br>size<br>(µm) | Clay<br>(%) | Fine<br>silt (%) | Medium<br>silt (%) | Coarse<br>silt (%) | Total Silt<br>(%) | Fine<br>sand (%) | Medium<br>sand (%) | Coarse<br>sand (%) | Total<br>Sand<br>(%) | Fe<br>(mg/g) | Mn<br>(µg/g) | As<br>(µg/g) | Cd<br>(µg/g) | Co<br>(µg/g) | Cr<br>(µg/g) | Cu<br>(µg/g) | Zn<br>(µg/g) | Ni<br>(µg/g) | Pb<br>(µg/g) | V<br>(µg/g) | Hg<br>(ng/g) |
|-----------------|------------------|-------------------|-----------------------|-------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| OM % (550 °C)   | 1,00             |                   |                       |             |                  |                    |                    |                   |                  |                    |                    |                      |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Grain size (µm) | -0,49            | -0,24             | 1,00                  |             |                  |                    |                    |                   |                  |                    |                    |                      |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Clay (%)        | 0,37             | 0,24              | -0,42                 | 1,00        |                  |                    |                    |                   |                  |                    |                    |                      |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Fine silt (%)   | 0,49             | 0,36              | -0,45                 | 0,98        | 1,00             |                    |                    |                   |                  |                    |                    |                      |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Medium silt (%) | 0,71             | 0,55              | -0,49                 | 0,79        | 0,88             | 1,00               |                    |                   |                  |                    |                    |                      |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Coarse silt (%) | 0,71             | 0,61              | -0,42                 | 0,39        | 0,52             | 0,84               | 1,00               |                   |                  |                    |                    |                      |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Total Silt (%)  | 0,75             | 0,57              | -0,54                 | 0,78        | 0,85             | 0,96               | 0,84               | 1,00              |                  |                    |                    |                      |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Fine sand (%)   | -0,48            | -0,49             | 0,30                  | -0,77       | -0,82            | -0,86              | -0,68              | -0,84             | 1,00             |                    |                    |                      |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Medium sand (%) | -0,68            | -0,35             | 0,73                  | -0,51       | -0,54            | -0,60              | -0,54              | -0,71             | 0,24             | 1,00               |                    |                      |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Coarse sand (%) | -0,29            | 0,09              | 0,64                  | -0,05       | -0,07            | -0,11              | -0,11              | -0,15             | -0,27            | 0,65               | 1,00               |                      |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Total Sand (%)  | -0,71            | -0,53             | 0,62                  | -0,83       | -0,89            | -0,95              | -0,78              | -0,98             | 0,85             | 0,71               | 0,18               | 1,00                 |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Fe (mg/g)       | -0,08            | -0,16             | 0,14                  | -0,33       | -0,35            | -0,41              | -0,44              | -0,44             | 0,64             | -0,01              | -0,33              | 0,46                 | 1,00         |              |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Mn (µg/g)       | 0,23             | -0,14             | 0,08                  | -0,45       | -0,45            | -0,34              | -0,23              | -0,30             | 0,53             | -0,08              | -0,32              | 0,34                 | 0,64         | 1,00         |              |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| As (µg/g)       | -0,62            | -0,44             | 0,37                  | -0,28       | -0,32            | -0,47              | -0,52              | -0,58             | 0,45             | 0,44               | 0,14               | 0,56                 | 0,53         | 0,06         | 1,00         |              |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Cd (µg/g)       | 0,65             | 0,67              | -0,23                 | 0,30        | 0,46             | 0,57               | 0,54               | 0,55              | -0,41            | -0,38              | -0,15              | -0,50                | -0,13        | -0,12        | -0,35        | 1,00         |              |              |              |              |              |              |             |              |
| Co (µg/g)       | 0,10             | -0,11             | 0,08                  | -0,34       | -0,36            | -0,41              | -0,42              | -0,38             | 0,63             | -0,12              | -0,32              | 0,40                 | 0,87         | 0,81         | 0,37         | -0,06        | 1,00         |              |              |              |              |              |             |              |
| Cr (µg/g)       | 0,81             | 0,73              | -0,34                 | 0,17        | 0,32             | 0,49               | 0,54               | 0,52              | -0,25            | -0,53              | -0,30              | -0,47                | 0,08         | 0,14         | -0,47        | 0,85         | 0,21         | 1,00         |              |              |              |              |             |              |
| Cu (µg/g)       | 0,83             | 0,68              | -0,41                 | 0,30        | 0,46             | 0,63               | 0,62               | 0,62              | -0,39            | -0,55              | -0,33              | -0,58                | -0,06        | 0,04         | -0,52        | 0,91         | 0,03         | 0,94         | 1,00         |              |              |              |             |              |
| Zn (µg/g)       | 0,71             | 0,62              | -0,32                 | 0,19        | 0,36             | 0,50               | 0,50               | 0,47              | -0,27            | -0,44              | -0,28              | -0,43                | 0,09         | 0,12         | -0,26        | 0,93         | 0,18         | 0,90         | 0,93         | 1,00         |              |              |             |              |
| Ni (µg/g)       | 0,32             | 0,08              | -0,07                 | -0,21       | -0,19            | -0,14              | -0,11              | -0,10             | 0,35             | -0,24              | -0,33              | 0,13                 | 0,52         | 0,62         | -0,20        | 0,10         | 0,61         | 0,47         | 0,31         | 0,28         | 1,00         |              |             |              |
| Pb (µg/g)       | 0,84             | 0,69              | -0,43                 | 0,32        | 0,48             | 0,67               | 0,66               | 0,66              | -0,41            | -0,60              | -0,33              | -0,62                | -0,03        | 0,08         | -0,42        | 0,91         | 0,08         | 0,91         | 0,97         | 0,94         | 0,22         | 1,00         |             |              |
| V (µg/g)        | 0,78             | 0,54              | -0,37                 | 0,32        | 0,38             | 0,44               | 0,35               | 0,51              | -0,18            | -0,66              | -0,32              | -0,48                | 0,32         | 0,36         | -0,20        | 0,49         | 0,52         | 0,73         | 0,61         | 0,60         | 0,47         | 0,67         | 1,00        |              |
| Hg (ng/g)       | 0,85             | 0,58              | -0,41                 | 0,25        | 0,35             | 0,64               | 0,70               | 0,69              | -0,46            | -0,56              | -0,25              | -0,64                | -0,24        | 0,19         | -0,61        | 0,50         | -0,08        | 0,59         | 0,66         | 0,53         | 0,15         | 0,68         | 0,50        | 1,00         |

Les corrélations significatives ( $p < 0,05$ ) sont indiquées en **gras**.

**Tableau III.20:** Les concentrations de métaux traces dans les sédiments ( $\mu\text{g/g}$  ps) de la zone d'étude et différentes régions de la mer Méditerranée.

| Sites                          | Mn ( $\mu\text{g/g}$ ) | Fe (mg/g) | Pb ( $\mu\text{g/g}$ ) | V ( $\mu\text{g/g}$ ) | Cr ( $\mu\text{g/g}$ ) | Co ( $\mu\text{g/g}$ ) | Ni ( $\mu\text{g/g}$ ) | Cu ( $\mu\text{g/g}$ ) | Zn ( $\mu\text{g/g}$ ) | As ( $\mu\text{g/g}$ ) | Cd ( $\mu\text{g/g}$ ) | Hg (ng/g) | Reference                        |
|--------------------------------|------------------------|-----------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------|----------------------------------|
| Côte Algéroise                 |                        | 1,291     | 5,7                    |                       | 8,8                    |                        | 13,9                   | 4,7                    | 20,4                   |                        | 1,1                    |           | (Alomary and Belhadj, 2007)      |
| Golf Pozzuoli (Italie)         |                        | 24,0      | 141,2                  |                       | 17,6                   |                        | 6,0                    | 18,6                   | 216,5                  | 25,4                   | 0,5                    | 700       | (Arienzo et al., 2020)           |
| Côte Algéroise                 | 327                    | 23,46     | 20                     |                       | 25                     |                        |                        | 24                     | 95                     |                        | 0,43                   | 320       | (Bachouche et al., 2017)         |
| Fond sédiments                 |                        |           | 33                     |                       | 40                     | 16                     | 30                     | 27                     | 97                     | 16                     | 0,5                    | 100       | (Birch, 2017)                    |
| Turquie                        | 587,91                 | 43,70     | 15,16                  | 52,13                 | 235,72                 | 59,53                  | 1093,53                | 22,28                  | 61,86                  | 25,12                  |                        |           | (Gülşen-Rothmund et al., 2023)   |
| Côte centrale Agrérienne       | 381,4                  | 37,6      | 28,0                   | 138,2                 | 105,8                  | 13,9                   | 36,9                   | 23,1                   | 114,5                  | 21,3                   | 0,15                   |           | (Inal et al., 2018)              |
| Baie d'Alger                   | 414,73                 | 42,86     | 32,30                  | 116,93                | 84,76                  | 13,73                  | 40,67                  | 30,35                  | 153,59                 | 21,88                  | 0,2                    | 365,10    | Cette étude                      |
| Baie de Bou-Ismaïl             | 296,07                 | 38,81     | 19,52                  | 89,54                 | 55,41                  | 11,26                  | 25,67                  | 14,24                  | 86,73                  | 30,18                  | 0,13                   | 24,69     | Cette étude                      |
| Fond géochimique local         | 371                    | 40,5      | 23,6                   | 136                   | 98,2                   | 12,9                   | 33,7                   | 21,9                   | 101                    | 11,1                   | 0,13                   |           | (Aroua et al., 2023)             |
| Croûte continentale supérieure | 527                    |           | 17                     | 53                    | 35                     | 11,6                   | 18,6                   | 14,3                   | 52                     | 2                      | 0,102                  | 56        | (Wedepohl, 1995)                 |
| Moyenne de la croûte           | 950                    | 56,3      | 12,5                   | 135                   | 100                    | 25                     | 75                     | 55                     | 70                     | 1,8                    | 0,2                    | 80        | (Taylor, 1964)                   |
| Méditerranée orientale         |                        |           | 5- 373,90              | 4,6- 157,30           | 14,8-694,00            | 1,1-99                 | 9,1-808,0              | 2,9-365,30             | 11,6-982,20            | 3,1- 178,5             | 0,02-10,5              | 10-14,92  | (Lipizer et al., 2022)           |
| Espagne                        |                        | 14,8      | 5,4                    |                       | 15,6                   |                        | 8,0                    | 3,2                    | 30,5                   | 15,7                   | 0,19                   | 40        | (Martínez-Guijarro et al., 2019) |

### III.2.4 Evaluation de la contamination des sédiments marins par les ETM

L'estimation du niveau de contamination par les métaux trace étudiés (Mn, Fe, Pb, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg) des sédiments superficiels de la baie d'Alger et de Bou-Ismaïl a été réalisée par le Calcul des indices géochimiques tel que d'Indice de géoaccumulation (Igeo), Facteur d'enrichissement (FE) et Indice de la charge polluante (PLI). Les valeurs moyennes, minimums et maximums pour les trois indices sont résumées dans le tableau III.21 (baie Alger) et tableau III.22 (baie Bou-Ismaïl).

#### III.2.4.1 Indice de géoaccumulation (Igeo)

L'indice Igeo permet d'évaluer la contamination en comparant les concentrations actuelles et préindustrielles. Les valeurs moyennes de l'indice de géoaccumulation (Igeo) pour la baie d'Alger (Tab. III.21) diminuent dans l'ordre suivant : Hg (1,52) > As (0,31) > Cd (-0,05) = Zn (-0,05) > Pb (-0,18) ~ Cu (-0,20) > Ni (-0,36) > Mn (-0,44) > Fe (-0,51) ~ Co (-0,52) > V (-0,81) ~ Cr (-0,82). Alors que, dans la baie de Bou-Ismaïl (Tab. III.22), les valeurs moyennes de l'Igeo diminuent comme suit : As (0,78) > Cd (-0,58) > Fe (-0,65) > Co (-0,80) ~ Zn (-0,82) > Pb (-0,88) > Mn (-0,93) > Ni (-0,99) > V (-1,21) > Cu (-1,25) > Cr (-1,44) > Hg (-2,27). Selon (Müller, 1986), les valeurs Igeo calculées pour les deux baies indiqueraient que les sédiments de la baie d'Alger sont modérément pollués par le mercure et l'arsenic ( $0 < Igeo < 2$ ), alors que les sédiments superficiels de la baie de Bou-Ismaïl sont Modérément pollué par l'arsenic, et qu'il n'y a pas d'indication de pollution par les autres métaux traces ( $Igeo \leq 0$ ). Les stations A10, A12 et A13 ont enregistré une pollution modérée ( $0 < Igeo < 2$ ) en Pb, Cu, Zn et Cd (Tab. IV.13, annexes). Cette pollution peut être expliquée par la situation de ces stations près du port d'Alger, due aux effluents ou rejets non traités provenant de différentes activités (vidange, nettoyage, peinture, soudure et ballast des navires), alors qu'une forte pollution en mercure est enregistrée dans les stations A04 (2,49), A06 (2,89), A07 (3,00), A08 (3,30), A10 (2,94). Cela démontre l'influence des eaux usées provenant des zones industrielles d'El Harrach, de Baba Ali et d'Oued Smar, dans la partie sud d'Alger, qui se déversent dans l'oued El Harrach. Ainsi, l'unité SOACHLORE utilise le mercure comme catalyseur pour la fabrication du chlore (gaz), de l'hydrogène (gaz) et de la lessive de Soude par l'électrolyse d'une solution saturée de chlorure de sodium (Louati, 2015), et rejette  $51,860 \mu\text{g L}^{-1}$  de mercure selon Bouragba et al. (2017).

#### III.2.4.2 Facteur d'enrichissement (FE)

Selon les catégories de facteur d'enrichissement établies par Birch (2022), il existe dans les sédiments superficiels de la baie d'Alger (Tab. III.21) un enrichissement modérément sévère

en mercure ( $5 < FE < 10$ ), un enrichissement mineur en Mn, Pb, Co, Ni, Cu, Zn, As et Cd ( $1 < EF < 3$ ) et pas d'enrichissement pour le Cr et V ( $FE < 1$ ). Dans la baie de Bou-Ismaïl (Tab. III.22), les données indiquent un enrichissement mineur en arsenic et en cadmium ( $FE = 2,81$  et  $1,07$ , respectivement), et pas d'enrichissement pour le Mn, Fe, Pb, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Hg ( $FE < 1$ ). Certains travaux considèrent qu'un facteur d'enrichissement proche de 1 indique une origine géogénique du métal, alors que FE supérieur à 10 devrait déduire des sources non cristallines (Valdés et al., 2005). En outre, des enrichissements sévères en mercure ont été observés dans la baie d'Alger aux stations A06 (12,09), A07 (12,25), A08 (15,12), A10 (11,76) (Tab. IV.15, annexes), ainsi qu'un enrichissement modéré en zinc a été enregistré à la station B01 ( $FE = 4,76$ ). Les valeurs de FE les plus élevées apparaissent dans la baie d'Alger, avec l'Igeo le plus élevé pour le mercure. Ces résultats fournissent une indication claire de la pollution de certains métaux traces dans les deux baies provenant des zones industrielles à travers les oueds El Harrach et Mazafran, qui drainent une partie importante de la pollution anthropique. Par conséquent, les zones contaminées peuvent être considérées comme des risques écologiques potentiels.

#### III.2.4.3 Indice de la charge polluante (PLI)

Le PLI introduit par Tomlinson et al. (1980) a été utilisé dans la présente étude pour évaluer la qualité environnementale des sédiments et comparer la charge globale en métaux dans les sédiments à chaque site. Les valeurs de l'indice de la charge polluante fluctuent entre un minimum de 1,03 et un maximum de 1,90, avec une moyenne de 1,31 dans la baie d'Alger, alors que les valeurs de PLI dans la baie de Bou-Ismaïl varient entre 0,58 et 0,95, avec une moyenne de 0,84. Deux classes de la valeur de PLI ont été identifiées : Lorsque  $PLI < 1$ , indique une absence de pollution des sédiments côtiers ; en revanche, avec  $PLI > 1$ , suggère que le site est contaminé (sédiments moyennement à fortement pollués). Dans la baie d'Alger, les résultats montrent une contamination de certains métaux traces, où la qualité des sédiments pourrait être détériorée en particulier par le Hg, l'As, le Cd, le Pb, le Zn et le Cu (Tab. IV.17, annexes). En effet, la baie de Alger était auparavant classée comme un point chaud prioritaire en mer Méditerranée (UNEP/WHO, 1999). Cependant, pour la baie de Bou-Ismaïl, l'indice de charge calculé a révélé que la pollution métallique était relativement faible ( $PLI < 1$ ) par rapport à la baie d'Alger qui présentait un enrichissement modéré pour certains métaux traces mentionnés ci-dessus.

**Tableau III.21:** Valeurs de l'Indice de géoaccumulation (Igeo), du Facteur d'enrichissement (FE) et de l'Indice de la charge polluante (PLI) dans la baie d'Alger.

| Métal | Igeo  |       |       | FE   |      |       | PLI  |      |      |
|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|
|       | Moy   | Min   | Max   | Moy  | Min  | Max   | Moy  | Min  | Max  |
| Mn    | -0,44 | -0,90 | 0,00  | 1,05 | 0,82 | 1,22  |      |      |      |
| Fe    | -0,51 | -0,72 | -0,23 | -    | -    | -     |      |      |      |
| Pb    | -0,18 | -0,65 | 0,68  | 1,33 | 0,80 | 2,45  |      |      |      |
| V     | -0,81 | -1,22 | -0,62 | 0,82 | 0,63 | 1,02  |      |      |      |
| Cr    | -0,82 | -1,07 | -0,03 | 0,83 | 0,56 | 1,49  |      |      |      |
| Co    | -0,52 | -0,89 | -0,04 | 1,00 | 0,80 | 1,16  |      |      |      |
| Ni    | -0,36 | -0,80 | 0,70  | 1,13 | 0,88 | 2,05  |      |      |      |
| Cu    | -0,20 | -0,82 | 1,03  | 1,35 | 0,69 | 3,13  |      |      |      |
| Zn    | -0,05 | -0,55 | 1,30  | 1,46 | 0,99 | 3,77  |      |      |      |
| As    | 0,31  | -0,49 | 1,39  | 1,83 | 1,18 | 3,18  |      |      |      |
| Cd    | -0,05 | -0,74 | 1,38  | 1,53 | 0,70 | 3,98  |      |      |      |
| Hg    | 1,52  | -2,95 | 3,30  | 6,47 | 0,15 | 15,12 |      |      |      |
|       |       |       |       |      |      |       | 1,31 | 1,03 | 1,90 |

**Tableau III.22:** Valeurs de l'Indice de géoaccumulation (Igeo), du Facteur d'enrichissement (FE) et de l'Indice de la charge polluante (PLI) dans la baie de Bou-Ismaïl.

| Métal | Igeo  |       |       | FE   |      |      | PLI  |      |      |
|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
|       | Moy   | Min   | Max   | Moy  | Min  | Max  | Moy  | Min  | Max  |
| Mn    | -0,93 | -1,29 | -0,47 | 0,83 | 0,68 | 1,07 |      |      |      |
| Fe    | -0,65 | -0,94 | -0,38 | -    | -    | -    |      |      |      |
| Pb    | -0,88 | -1,51 | -0,55 | 0,87 | 0,64 | 1,06 |      |      |      |
| V     | -1,21 | -1,85 | -0,83 | 0,69 | 0,51 | 0,91 |      |      |      |
| Cr    | -1,44 | -1,97 | -0,98 | 0,60 | 0,37 | 0,88 |      |      |      |
| Co    | -0,80 | -1,16 | -0,51 | 0,91 | 0,81 | 1,01 |      |      |      |
| Ni    | -0,99 | -1,52 | -0,73 | 0,80 | 0,67 | 0,93 |      |      |      |
| Cu    | -1,25 | -2,09 | -0,62 | 0,68 | 0,43 | 0,99 |      |      |      |
| Zn    | -0,82 | -1,45 | -0,43 | 0,90 | 0,67 | 1,11 |      |      |      |
| As    | 0,78  | -0,17 | 1,36  | 2,81 | 1,53 | 4,76 |      |      |      |
| Cd    | -0,58 | -0,94 | -0,17 | 1,07 | 0,69 | 1,39 |      |      |      |
| Hg    | -2,27 | -6,68 | -0,92 | 0,45 | 0,01 | 0,81 |      |      |      |
|       |       |       |       |      |      |      | 0,84 | 0,58 | 0,95 |

### III.2.5 Évaluation des risques écologiques liés aux métaux traces

Le facteur de risque écologique potentiel pour chaque métal,  $Er^i$ , a été évalué selon la méthode proposée par [Hakanson \(1980\)](#). Cet indice a été utilisé pour évaluer le risque global des métaux traces dans les sédiments, en combinant les effets environnementaux et toxicologiques. Les valeurs  $Er^i$  peuvent être classées en cinq catégories selon l'intensité du risque écologique potentiel ([Hakanson, 1980](#)):

**Tableau III.23 :** Les valeurs  $Er^i$  selon l'intensité du risque écologique potentiel.

| Valeur $Er^i$         | Niveau de risque    |
|-----------------------|---------------------|
| $< 40$                | Risque faible       |
| $40 \leq Er^i < 80$   | Risque modéré       |
| $80 \leq Er^i < 160$  | Risque considérable |
| $160 \leq Er^i < 320$ | Risque élevé        |
| $160 \leq Er^i < 320$ | Risque élevé        |

À partir de cet indice, on a calculé l'indice de risque écologique potentiel RI, qui correspond à la somme de tous les facteurs de risque  $Er^i$ . Les valeurs  $Er^i$  de Mn, Pb, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn et As dans les sédiments superficiels de la baie d'Alger (Tab. III.24) et (Tab. IV.19, annexes) étaient tous inférieurs à 40, plaçant ces métaux à un faible niveau de risque écologique. Cependant, la moyenne de  $Er^i$  pour le Cadmium place ce métal à un niveau de risque modéré, avec un pic de 117 (Tab. IV.19, annexes) dans la station A10 signale un risque considérable pour le Cd. Les valeurs  $Er^i$  du mercure fluctuent entre 8-591 avec une moyenne 261, présentant un risque révére pour ce métal. Cependant, les valeurs  $Er^i$  dans la baie de Bou-Ismaïl sont inférieures à 40 (Tab. III.25) et (Tab. IV.20, annexes) indiquant un risque faible pour les métaux étudiés. La valeur moyenne de l'RI des onze métaux traces dans la baie d'Alger montre à quel point le risque global est sévère. En outre, les stations A08 et A10 présentent un risque grave pour la somme des métaux traces ( $RI > 600$ ) (Tab. IV.19, annexes). Ce risque est dû en particulier aux fortes teneurs en mercure et cadmium. En revanche, les sédiments superficiels de la baie de Bou-Ismaïl présentent un risque faible pour la somme des métaux traces étudiés ( $RI < 150$ ).

**Tableau III.24 :** Valeurs des indices de risque écologique monomial ( $Er^i$ ) et de risque écologique potentiel (RI) dans la baie d'Alger.

|        | $Er^i$ |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | RI     |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        | Mn     | Pb     | V      | Cr     | Co     | Ni     | Cu     | Zn     | As     | Cd     | Hg     |        |
| MAX    | 1,50   | 12,01  | 1,95   | 2,93   | 7,27   | 12,20  | 15,36  | 3,70   | 39,27  | 116,98 | 591,50 | 672,14 |
| MIN    | 0,81   | 4,79   | 1,29   | 1,43   | 4,04   | 4,29   | 4,26   | 1,03   | 10,70  | 27,01  | 7,75   | 95,99  |
| MOY    | 1,12   | 6,84   | 1,72   | 1,73   | 5,32   | 6,03   | 6,93   | 1,52   | 19,72  | 47,10  | 260,78 | 306,65 |
| Risque | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | modéré | Élevé  | Sévère |

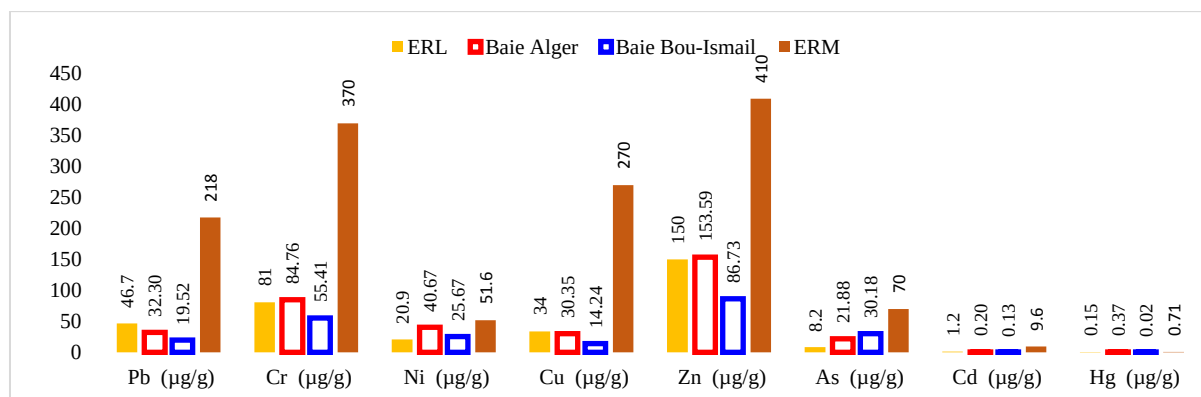
**Tableau III.25 :** Valeurs des indices de risque écologique monomial ( $Er^i$ ) et de risque écologique potentiel (RI) dans la baie de Bou-Ismaïl.

|        | $Er^i$ |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | RI     |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        | Mn     | Pb     | V      | Cr     | Co     | Ni     | Cu     | Zn     | As     | Cd     | Hg     |        |
| MAX    | 1,08   | 5,12   | 1,68   | 1,52   | 5,25   | 4,51   | 4,87   | 1,11   | 38,48  | 39,867 | 31,60  | 116,87 |
| MIN    | 0,61   | 2,64   | 0,83   | 0,76   | 3,35   | 2,62   | 1,76   | 0,55   | 13,37  | 23,483 | 0,58   | 65,39  |
| MOY    | 0,80   | 4,14   | 1,32   | 1,13   | 4,36   | 3,81   | 3,25   | 0,86   | 27,19  | 30,408 | 17,63  | 85,19  |
| Risque | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible |

### III.2.6 Comparaison avec les Lignes directrices relatives à la qualité des sédiments SQGs (ERL-ERM et TEL-PEL).

Le risque toxicologique des métaux traces dans les sédiments marins a été évalué en comparant les concentrations moyennes mesurées avec les SQGs (Fig. III.37 ; III.38).

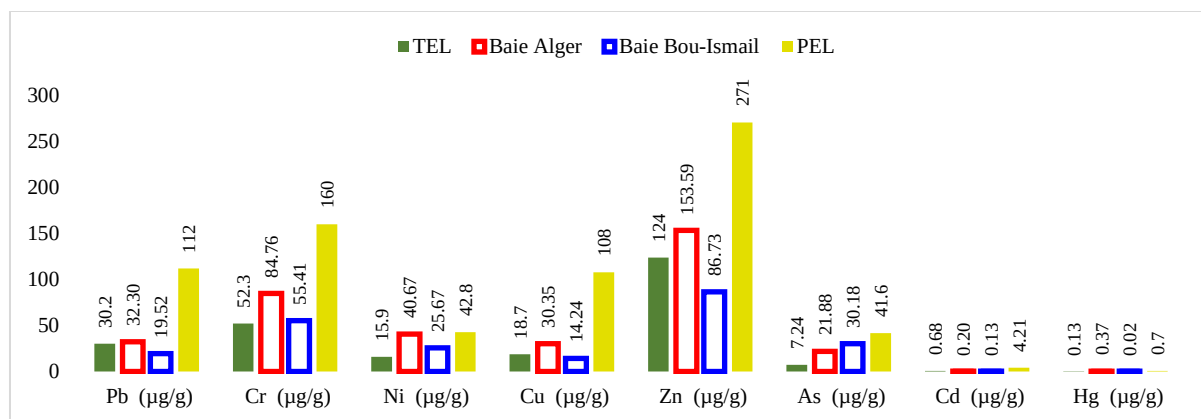
Dans les sédiments superficiels de la baie d'Alger, les concentrations moyennes du Pb, Cu et Cd sont inférieures aux valeurs ERL, il est peu probable que ces métaux nuisent aux organismes vivants dans les sédiments. Le pourcentage d'incidence des effets biologiques lié au Pb, Cu et Cd est de 8%, 9,4% et 6,6%, respectivement (Long et al., 1995). Tandis que, les teneurs moyennes en Cr, Ni, Zn, As, Hg sont comprises entre les valeurs ERL-ERM, ce qui signifie qu'un effet toxique est occasionnellement associée à ces métaux et le pourcentage d'incidence des effets biologiques lié à ces métaux est de 21,1%, 16,7%, 47,0%, 11,1%, 23,5%, respectivement (Long et al., 1995). En revanche, les concentrations en Pb, Cr, Cu, Zn, Cd et Hg dans les sédiments superficiels de la baie de Bou-Ismaïl sont inférieures aux valeurs ERL et ces métaux ne devraient pas avoir d'effets nuisibles sur les espèces vivantes dans les sédiments. Le pourcentage de l'incidence des effets biologiques lié à ces métaux est de 8%, 2,9%, 9,4%, 6,1%, 6,6% et 8,3%, respectivement (Long et al., 1995).



**Figure III.37 :** Comparaison des teneurs en ETM avec ERL, ERM dans les deux baies (Long et al., 1995).

Concernant les valeurs TEL-PEL, à l'exception du cadmium qui a une concentration moyenne inférieure au TEL, indiquant que les biotes sont rarement exposés à des effets toxiques liés à ce métal, les autres métaux Pb, Cr, Ni, Cu, Zn, As et Hg présentent des concentrations moyennes comprises entre TEL-PEL. Par conséquent, ces résultats impliquent que les organismes vivants à l'intérieur ou à proximité des sédiments peuvent avoir des effets biologiques néfastes, le pourcentage d'incidence des effets biologiques indésirables liés à ces métaux (Pb, Cr, Ni, Cu, Zn, As et Hg) est de l'ordre de : 25,8%, 15,4%, 8,4%, 21,9%, 27,2%, 12,9% et 23,6%,

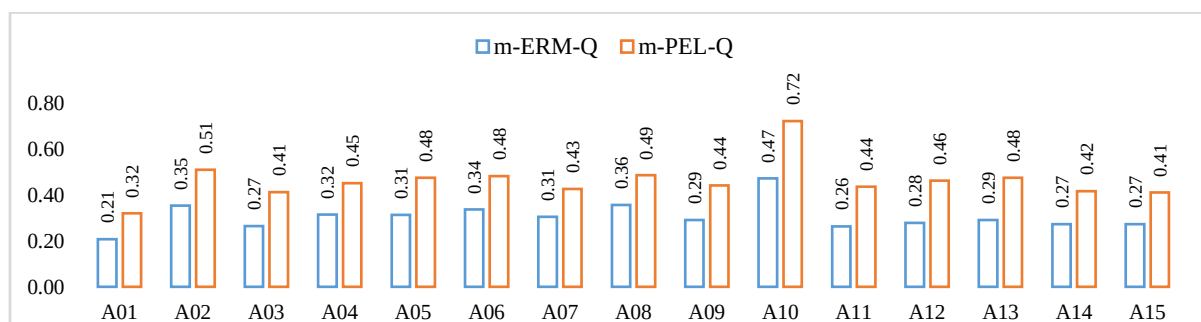
respectivement (Macdonald et al., 1996). Cependant, les concentrations moyennes du Pb, Cu, Zn, Cd, Hg dans les sédiments de la Baie de Bou-Ismaïl sont inférieures aux valeurs TEL (des effets indésirables ne devraient se produire que rarement Pb (5,8%), Cu (9%), Zn (3,8%), Cd (5,6%), Hg (7,8%)), alors que celles du Cr, Ni et As sont comprises entre TEL-PEL, ce qui indique que des effets biologiques néfastes associés à ces métaux peuvent survenir occasionnellement.



**Figure III.38 :** Comparaison des teneurs en ETM avec TEL, PEL dans les deux baies (Macdonald et al., 1996).

Pour l'évaluation de la toxicité des métaux traces combinés, le m-ERM-Q et m-PEL-Q sont calculés sur la base des concentrations moyennes de Pb, Cr, Cu Ni, Zn, As, Cd et Hg.

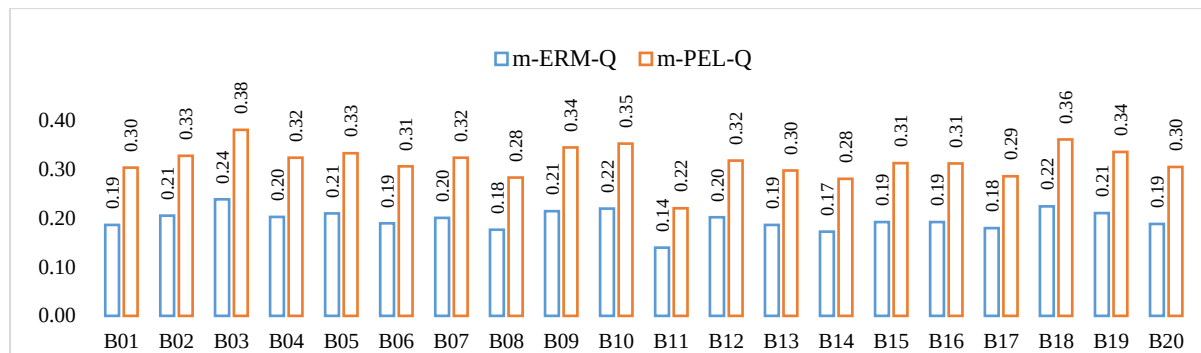
Dans la baie d'Alger (Fig. III.39), les valeurs de m-ERM-Q varient entre 0,21 et 0,47 avec une moyenne 0,31, indiquant que ces métaux ont 21% la possibilité d'être toxiques. Alors que, les valeurs de m-PEL-Q fluctuent entre 0,32 et 0,72 avec une moyenne de 0,46. Cela signifie que les huit métaux étudiés présentent 21% la possibilité d'être toxiques (Long et al., 2000).



**Figure III.39 :** Valeurs de m-ERM-Q et m-PEL-Q dans la baie d'Alger.

Pour la baie de Bou-Ismaïl (Fig. III.40), le m-ERM-Q varie de 0,14 à 0,24 avec une valeur moyenne de 0,2, indiquant que la combinaison de Pb, Cr, Cu Ni, Zn, As, Cd et Hg peut avoir

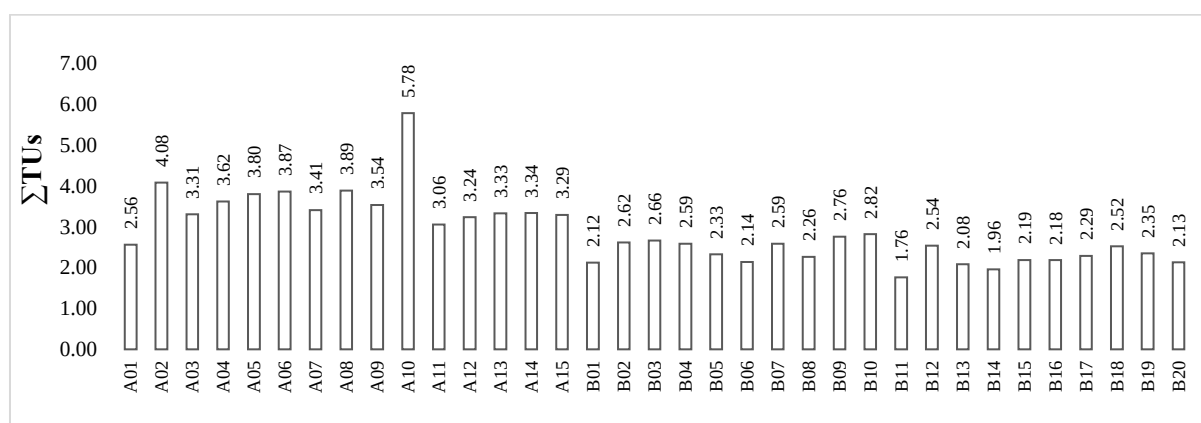
une probabilité de 21% d'être toxique. Tandis que, le m-PEL-Q varie de 0,22 à 0,38 avec une moyenne de 0,38, soit une possibilité de 21% d'être toxique (Long et al., 2000).



**Figure III.40 :** Valeurs de m- ERM-Q et m- PEL- Q dans la baie de Bou-Ismaïl.

### III.2.7 Toxicité potentielle des sédiments

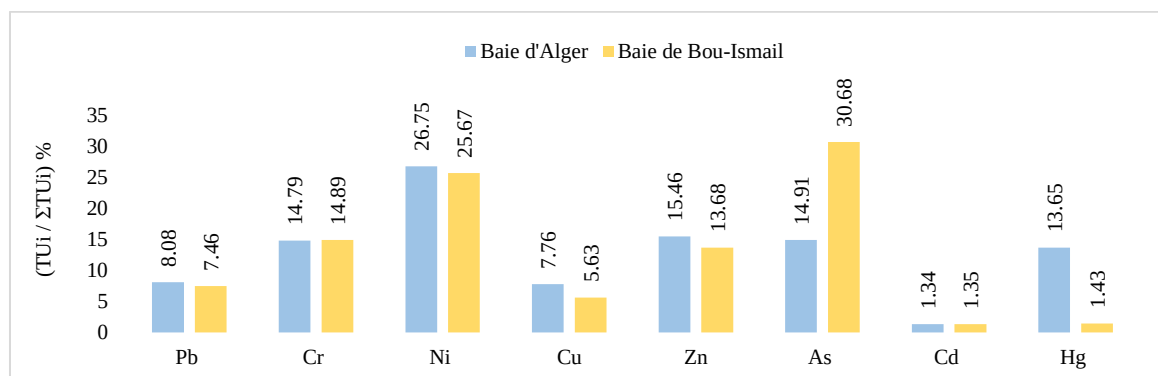
La toxicité potentielle des contaminants dans les échantillons de sédiments peut être estimée comme la somme des unités toxiques (TU), définie comme le rapport de la concentration mesurée du métal  $i$  à la  $PEL_i$ . Les valeurs de la somme des unités toxiques ( $\sum TUs$ ) calculée pour chaque station (Fig. III.41) varient entre 2,56 et 5,78 avec une moyenne de  $3,61 \pm 0,71$  dans la baie d'Alger, tandis que, dans la baie de Bou-Ismaïl, les valeurs ( $\sum TUs$ ) fluctuent entre 1,76 et 2,82 avec une moyenne de  $2,34 \pm 0,28$ . Sur toutes les stations analysées de la zone d'étude, seulement deux stations, A02 (4,08) et A10 (5,78) qui ont dépassé la valeur 4 pour la somme des unités toxiques ( $\sum TUs$ ), indiquant qu'une toxicité importante par les métaux traces est enregistrée à cet endroit.



**Figure III.41 :** Valeurs de la toxicité potentielle ( $\sum TUs$ ) des sédiments de la baie d'Alger (A01-A15) et de la baie de Bou-Ismaïl (B01-B20).

La contribution de la toxicité de chaque métal ( $TU_i$ ) à la somme des unités toxiques ( $\sum TU_i$ ) montre que les principales contributions à la toxicité proviennent de l'arsenic dans la baie de

Bou-Ismaïl (30,68%) suivi du Ni (26,75% et 25,67%, dans les baies d'Alger et Bou-Ismaïl, respectivement). Selon Inal et al. (2018), la forte contribution du Ni à la somme des unités toxiques ( $\Sigma TU_i$ ) peut être liée à leurs valeurs PEL plutôt faibles, et non à des sources anthropiques importantes. Tandis que, les autres métaux présentent une contribution à la  $\Sigma TU_i$  inférieure à 20%.



**Figure III.42 :** la contribution de chaque métal ( $TU_i / \Sigma TU_i$ ) (%) à la valeur de toxicité potentielle ( $\Sigma TU_i$ ).

### III.3 Sédiments profonds

#### III.3.1 Variation verticale en ETM dans les carottes

Les profils en profondeur des ETM analysés dans les deux carottes de sédiments (carotte d'Alger et de Marseille) sont présentés dans la figure III.43. Les valeurs des concentrations mesurées (min-max-moyenne) sont répertoriées dans le tableau III.26.

Dans la carotte de la baie d'Alger, Les concentrations moyennes en Fe, Mn, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, et V sont  $32.87 \pm 2.08$ ,  $227.83 \pm 16.45$ ,  $44.37 \pm 2.56$ ,  $87.90 \pm 6.89$ ,  $10.11 \pm 0.79$ ,  $32.23 \pm 2.13$ ,  $34.76 \pm 2.06$ ,  $162.43 \pm 8.75$ ,  $17.49 \pm 1.55$ ,  $0.30 \pm 0.03$ ,  $122.13 \pm 7.13$ , respectivement. Les distributions verticales de Fe, Mn, V, Co, Ni et Pb ont montré des tendances similaires et ont diminué légèrement du fond jusqu'aux sédiments de surface. À l'inverse, les concentrations de Cd et de Zn ont montré des tendances à la hausse à partir du fond vers la surface avec des fluctuations évidentes dans la partie supérieure de la carotte. Cependant, les teneurs en As ont montré des tendances à la hausse dans les 18 cm supérieurs de la carotte. Alors que, le chrome (Cr) a suivi une tendance similaire au cuivre (Cu) et les concentrations maximales des deux éléments ont été trouvées à 12 cm de profondeur. Les concentrations moyennes mesurées en Pb, Cu, Zn, As et Cd ont été supérieures au fond géochimique local. En effet, les échantillons prélevés dans la baie d'Alger suggèrent un rôle significatif des sites urbains et industriels d'Alger. En particulier le Cu, Zn, As et Cd qui ont atteints respectivement, des teneurs jusqu'à 38.1, 180, 20.5 et 0.39  $\mu\text{g.g}^{-1}$  dans les couches supérieures. Les concentrations élevées de

métaux s'expliquent également par un apport élevé de contaminants anthropiques provenant du port d'Alger et probablement des rejets directs d'eaux grises par les navires dans la zone maritime (Ytreberg et al., 2020).

Dans la carotte de la baie de Marseille, les teneurs moyennes en Fe, Mn, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, et V sont  $24,34 \pm 1,77$ ,  $458,91 \pm 38,47$ ,  $50,73 \pm 6,16$ ,  $50,85 \pm 3,49$ ,  $7,5 \pm 0,8$ ,  $31,04 \pm 2,53$ ,  $19,2 \pm 1,89$ ,  $95,88 \pm 8$ ,  $13,7 \pm 3,1$ ,  $0,11 \pm 0,02$ ,  $76,81 \pm 6,48$ , respectivement. Les valeurs des concentrations obtenues ont été comparées aux valeurs seuils N1 et N2 (Tab III.26) fixés par l'Arrêté interministériel du 14 juin 2000 (révisé en 2008) relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire. Ces seuils ont été définis à partir des concentrations médianes mesurées sur des sédiments prélevés sur l'ensemble du littoral français et concernent une gestion aquatique des sédiments. La valeur N2 étant définie comme le double de la valeur N1. Cependant, les teneurs mesurées en Pb, Cr, Ni, Cu, Zn, As et Cd restent inférieures au niveau N1 sur l'intégralité des profils sédimentaires indiquant une absence de contamination de la rade de Marseille par ces éléments. Sur l'ensemble des profils sédimentaires, il y a une tendance à la baisse des niveaux d'ETM des couches inférieures aux couches de surface, avec un minimum observé pour tous les métaux dans la profondeur 5,5 cm. Cependant, une nette augmentation en Mn dans les couches superficielles avec un maximum de  $526,77 \mu\text{g/g}$  a été enregistré en surface de la carotte.

**Tableau III.26 :** Résultats en ETM dans les carottes sédimentaires (en  $\mu\text{g/g}$  sauf le fer en  $\text{mg/g}$ ).

| Carotte/métal     | Fe    | Mn     | Pb    | Cr    | Co    | Ni    | Cu    | Zn     | As    | Cd    | V      |
|-------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| Baie d'Alger      |       |        |       |       |       |       |       |        |       |       |        |
| Moyenne           | 32,87 | 227,83 | 44,37 | 87,90 | 10,11 | 32,23 | 34,76 | 162,43 | 17,49 | 0,30  | 122,13 |
| Ecart type        | 2,08  | 16,45  | 2,56  | 6,89  | 0,79  | 2,13  | 2,06  | 8,75   | 1,55  | 0,03  | 7,13   |
| Maximum           | 37    | 270    | 50,3  | 101   | 12,1  | 37,8  | 38,1  | 180    | 20,5  | 0,39  | 138    |
| Minimum           | 29,9  | 201    | 39,6  | 77,5  | 9     | 29    | 30,8  | 144    | 15,4  | 0,23  | 113    |
| Baie de Marseille |       |        |       |       |       |       |       |        |       |       |        |
| Moyenne           | 24,34 | 458,91 | 50,73 | 50,85 | 7,50  | 31,04 | 19,20 | 95,88  | 13,70 | 0,11  | 76,81  |
| Ecart type        | 1,77  | 38,47  | 6,16  | 3,49  | 0,80  | 2,53  | 1,89  | 8,00   | 3,10  | 0,02  | 6,48   |
| Médiane           | 24,76 | 462,58 | 49,57 | 51,60 | 7,39  | 31,85 | 19,45 | 95,93  | 14,02 | 0,12  | 78,07  |
| Maximum           | 26,39 | 526,77 | 61,60 | 56,52 | 9,16  | 35,38 | 21,95 | 108,41 | 20,67 | 0,13  | 85,52  |
| Minimum           | 19,35 | 355,68 | 40,41 | 43,74 | 5,89  | 25,13 | 15,75 | 79,02  | 9,27  | 0,07  | 62,65  |
| Fond géochimique  |       |        |       |       |       |       |       |        |       |       |        |
| Alger             | 40,5  | 371    | 23,6  | 98,2  | 12,9  | 33,7  | 21,9  | 101    | 11,1  | 0,13  | 136    |
| Marseille         |       |        | 13,6  | 13    |       | 10,7  | 6,8   | 20     | 8,1   | 0,042 |        |
| Seuil N1          |       |        | 100   | 90    |       | 37    | 45    | 276    | 25    | 1,2   |        |
| Seuil N2          |       |        | 200   | 180   |       | 74    | 90    | 552    | 50    | 2,4   |        |

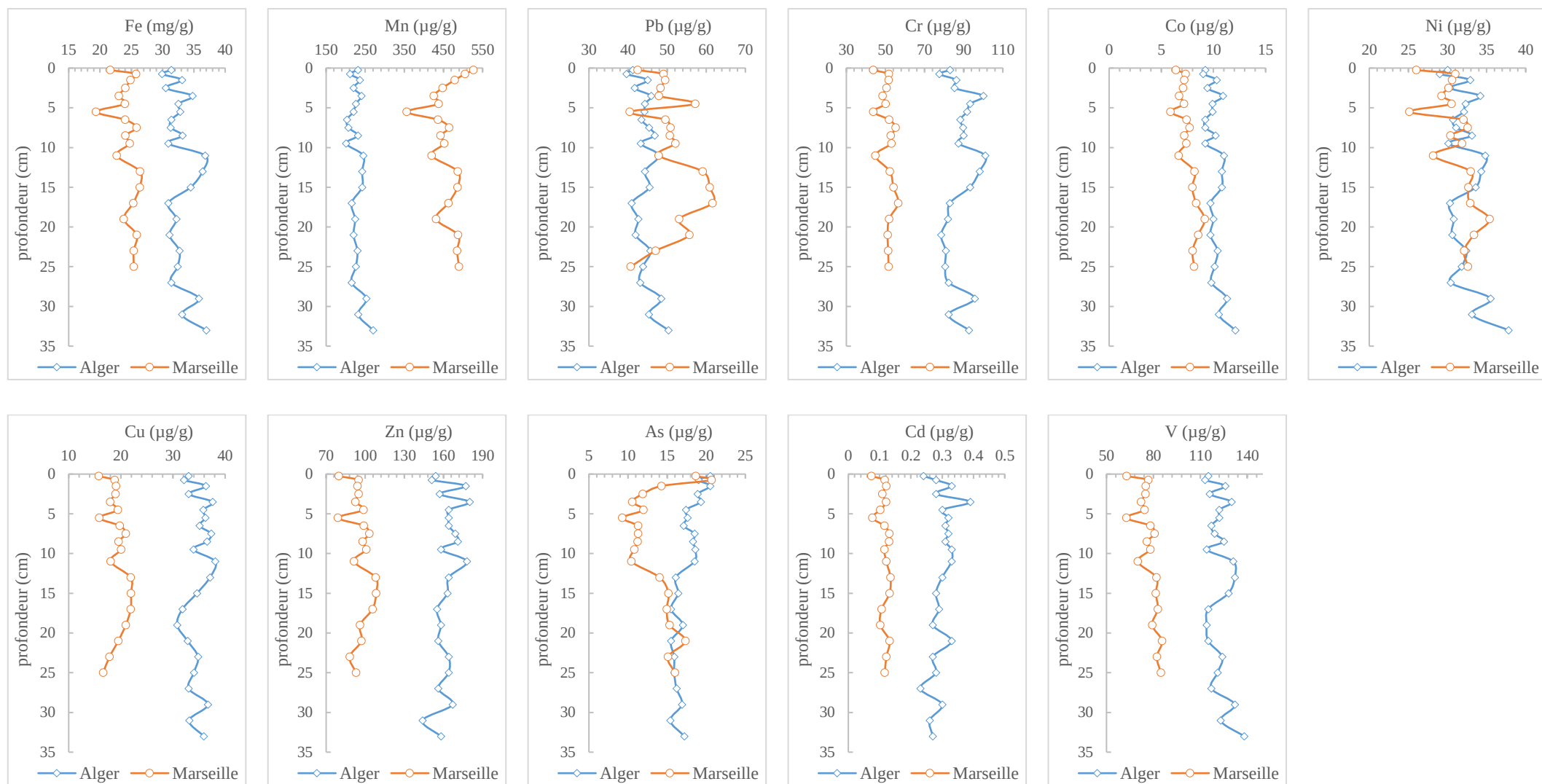


Figure III.43 : Distribution verticale des ETM de la carotte d'Alger et Marseille.

### III.3.2 Évaluation de l'impact anthropique

L'évaluation de la contamination des profils sédimentaires par les différents métaux traces est réalisée par le calcul des indices géochimiques tel que : l'indice de géoaccumulation (Igeo), Facteur d'enrichissement (FE) et l'Indice de la charge polluante (PLI). Les valeurs moyennes, minimums et maximums pour les trois indices sont résumées dans le tableau III.27 (carotte d'Alger) et tableau III.28 (carotte de Marseille).

Dans la carotte de la baie d'Alger, l'indice de géoaccumulation (Igeo) présente des valeurs inférieures à 0 pour le Fe, Mn, Cr, Co, Ni, et V, ce qui indique l'absence de la pollution par ces métaux, alors que les valeurs de Igeo sont comprises entre 0 et 1 pour le Pb, Cu, Zn, As, Cd classant les sédiments de non pollués à modérément pollués par ces métaux. En revanche, les valeurs d'Igeo dans la carotte de la baie de Marseille sont comprises entre 0 et 1 pour As, Cd, Cu et Ni, et entre 1 et 2 pour le Pb, Cr et Zn, indiquant une pollution modérée par ces métaux.

Par rapport aux teneurs naturelles du fond géochimique la carotte d'Alger présente un enrichissement mineur avec des valeurs moyennes de FE inférieures à 3 pour tous les métaux analysés. Par contre, la carotte de Marseille présente des teneurs en ETM excessivement élevées avec des valeurs de FE calculées allant jusqu'à 12 pour le plomb, 13 pour le chrome, 10 pour le nickel et 16 pour le zinc, indiquant un enrichissement sévère. Alors que le FE est de 9 pour l'arsenic et le cuivre, et 8 pour le cadmium, indiquant un enrichissement modérément sévère. Malgré les fortes concentrations en ETM trouvées dans la baie d'Alger, la carotte de Marseille a montré les valeurs de FE les plus élevées. Cela est dû aux valeurs de fond géochimique utilisées pour la normalisation qui sont plus élevées dans la côte centrale algérienne.

Les valeurs du PLI varient entre 1,07 et 1,25 avec une moyenne de 1,15 dans la carotte de la baie d'Alger ; tandis que, dans la carotte de baie de Marseille, les valeurs de PLI fluctuent entre 1,57 et 1,98 avec une moyenne de 1,82. Par conséquent, les valeurs de  $PLI > 1$  indiquent une présence de la pollution métallique modérée dans les deux baies. Ainsi, lorsque la pollution métallique augmente dans les sédiments, la valeur de la PLI augmente également

**Tableau III.27 :** Valeurs de l'Indice de géoaccumulation (Igeo), du Facteur d'enrichissement (FE) et de l'Indice de la charge polluante (PLI) de la carotte de baie d'Alger.

| Métal | Igeo  |       |       | FE   |      |      | PLI  |      |      |
|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
|       | Moy   | Min   | Max   | Moy  | Min  | Max  | Moy  | Min  | Max  |
| Fe    | -0.89 | -1.02 | -0.72 | -    | -    | -    |      |      |      |
| Mn    | -1.29 | -1.47 | -1.04 | 0.76 | 0.71 | 0.80 |      |      |      |
| Pb    | 0.32  | 0.16  | 0.51  | 2.32 | 2.09 | 2.49 |      |      |      |
| Cr    | -0.75 | -0.93 | -0.54 | 1.10 | 1.02 | 1.19 |      |      |      |
| Co    | -0.94 | -1.10 | -0.68 | 0.97 | 0.92 | 1.03 |      |      |      |
| Ni    | -0.65 | -0.80 | -0.42 | 1.18 | 1.13 | 1.23 |      |      |      |
| Cu    | 0.08  | -0.09 | 0.21  | 1.96 | 1.77 | 2.20 |      |      |      |
| Zn    | 0.10  | -0.07 | 0.25  | 1.99 | 1.71 | 2.17 |      |      |      |
| As    | 0.07  | -0.11 | 0.30  | 1.95 | 1.61 | 2.38 |      |      |      |
| Cd    | 0.60  | 0.24  | 1.00  | 2.82 | 2.27 | 3.49 |      |      |      |
| V     | -0.74 | -0.85 | -0.56 | 1.11 | 1.05 | 1.13 |      |      |      |
|       |       |       |       |      |      |      | 1.15 | 1.07 | 1.25 |

**Tableau III.28 :** Valeurs de l'Indice de géoaccumulation (Igeo), du Facteur d'enrichissement (FE) et de l'Indice de la charge polluante (PLI) de la carotte de baie de Marseille.

| Métal | Igeo  |       |       | FE   |      |       | PLI  |      |      |
|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|
|       | Moy   | Min   | Max   | Moy  | Min  | Max   | Moy  | Min  | Max  |
| Al    | -1.52 | -2.63 | -0.97 | -    | -    | -     |      |      |      |
| Pb    | 1.30  | 0.99  | 1.59  | 7.30 | 4.34 | 12.88 |      |      |      |
| Cr    | 1.38  | 1.17  | 1.54  | 7.64 | 5.55 | 13.88 |      |      |      |
| Ni    | 0.95  | 0.65  | 1.14  | 5.66 | 4.03 | 10.03 |      |      |      |
| Cu    | 0.91  | 0.63  | 1.11  | 5.53 | 3.54 | 9.56  |      |      |      |
| Zn    | 1.67  | 1.40  | 1.85  | 9.40 | 6.19 | 16.43 |      |      |      |
| As    | 0.14  | -0.39 | 0.77  | 3.35 | 2.15 | 9.51  |      |      |      |
| Cd    | 0.85  | 0.23  | 1.10  | 5.30 | 3.32 | 8.79  |      |      |      |
|       |       |       |       |      |      |       | 1,82 | 1,57 | 1,98 |

### III.3.3 Évaluation des risques écologiques liés aux métaux traces

Les valeurs du risque écologique potentiel sont présentées individuellement et globalement dans le tableau III.29 et le tableau III.30. Selon cette analyse, les indices de risque des métaux sont les suivants As (68.43) > Zn (15.75) > Mn (9.40) > Ni (7.94) > Co (4.78) > Cr (3.92) > Cd (1.80) > Pb (1.79) > Cu (1.61) > Fe (0.61) et Cd (81.88) > Pb (18.65) > As (16.91) > Ni (14.5) > Cu (14.12) > Cr (7.82) > Zn (4.79) dans la carotte d'Alger et de Marseille, respectivement. Les valeurs les plus élevées de ( $Er^i$ ) sont celles de l'As dans la carotte d'Alger indiquant un risque modéré. Tandis que le Cd a enregistré les valeurs les importantes dans la carotte de Marseille indiquant la présence d'un risque écologique considérable causé par ce métal. Cependant, la carotte de baie d'Alger a une valeur moyenne de RI inférieure à 150 et présente un risque

écologique faible, alors que, la carotte de Marseille présente un risque modéré avec une valeur moyenne de RI de 158,67.

**Tableau III.29** : Valeurs des indices de risque écologique monomial (Eri) et de risque écologique potentiel (RI) dans la carotte de baie d'Alger.

|        | Er <sup>i</sup> |        |        |        |        |        |        |        |        |        | RI     |
|--------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        | Fe              | Mn     | Pb     | Cr     | Co     | Ni     | Cu     | Zn     | As     | Cd     |        |
| MAX    | 0.73            | 10.66  | 2.06   | 4.69   | 5.61   | 8.70   | 1.78   | 18.47  | 90.00  | 2.03   | 141.37 |
| MIN    | 0.54            | 8.39   | 1.58   | 3.49   | 4.30   | 7.03   | 1.43   | 13.87  | 53.08  | 1.66   | 98.17  |
| MOY    | 0.61            | 9.40   | 1.79   | 3.92   | 4.78   | 7.94   | 1.61   | 15.75  | 68.43  | 1.80   | 116.03 |
| Risque | Faible          | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Modéré | Faible | Faible |

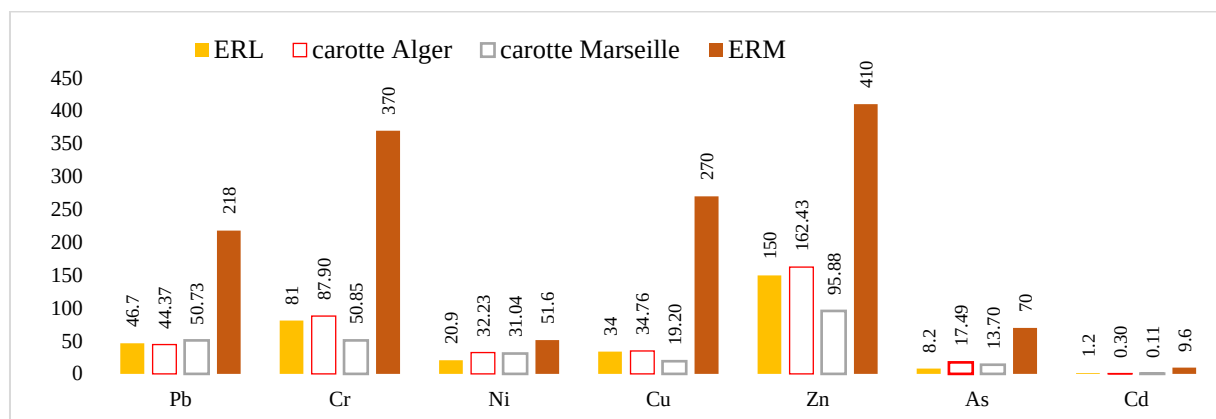
**Tableau III.30** : Valeurs des indices de risque écologique monomial (Eri) et de risque écologique potentiel (RI) dans la carotte de baie de Marseille.

|        | Er <sup>i</sup> |        |        |        |        |        |              | RI     |
|--------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|--------|
|        | Pb              | Cr     | Ni     | Cu     | Zn     | As     | Cd           |        |
| MAX    | 22.65           | 8.69   | 16.53  | 16.14  | 5.42   | 25.52  | 96.23        | 180.41 |
| MIN    | 14.86           | 6.73   | 11.74  | 11.58  | 3.95   | 11.44  | 52.90        | 114.90 |
| MOY    | 18.65           | 7.82   | 14.50  | 14.12  | 4.79   | 16.91  | 81.88        | 158.67 |
| Risque | Faible          | Faible | Faible | Faible | Faible | Faible | Considérable | Modéré |

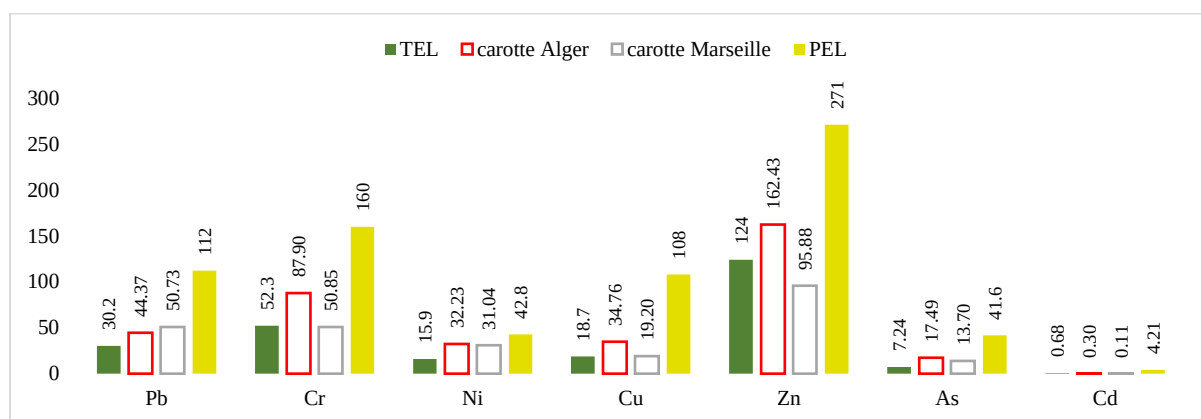
### III.3.4 Comparaison avec les Lignes directrices relatives à la qualité des sédiments SQGs (ERL-ERM et TEL-PEL).

Le risque écologique des métaux traces dans les sédiments a été évalué en comparant les concentrations moyennes présentes dans les carottes avec les SQGs respectives (Fig. III.44 et III.45). Les concentrations moyennes du Cd sont inférieures aux seuils ERL et TEL pour les deux carottes d'Alger et de Marseille. Cependant, les concentrations moyennes du Pb, Cr, Ni, Cu, Zn et As dans la carotte A sont comprises entre les seuils TEL et PEL indiquant que les espèces vivantes à proximité des sédiments sont occasionnellement associées à des effets toxiques par ces métaux. Ainsi, le pourcentage de l'incidence des effets biologiques indésirables liés à ces métaux (Pb, Cr, Ni, Cu, Zn, As) est de l'ordre de 25.8%, 15.4%, 8.4%, 21.9%, 27.2%, 12.9%, respectivement. A l'exception du Pb ayant des concentrations inférieures aux seuils ERL (rarement associées à des effets toxiques), les concentrations du Cr, Ni, Cu, Zn, As se situent entre les seuils ERL et ERM avec un pourcentage d'incidence des effets toxiques de l'ordre de 21,1%, 16,7%, 29,1%, 47%, 11,1%, respectivement. Cependant, dans la carotte M, les concentrations du Pb, Ni et As sont comprises entre les seuils ERL-ERM et TEL-PEL, ce qui signifie qu'un effet toxique est occasionnellement associées à ces métaux.

Alors que, les concentrations moyennes du Cr et Zn sont inférieures aux seuils ERL et TEL, il est peu probable que ces métaux nuisent aux organismes vivants dans les sédiments.

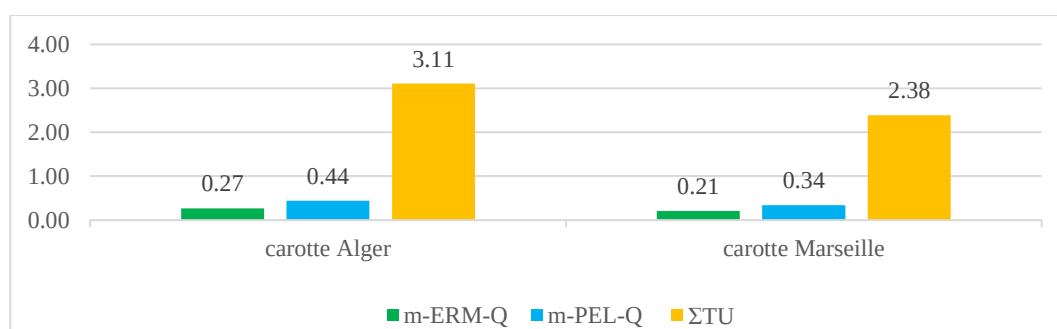


**Figure III.44 :** Comparaison des teneurs en ETM avec ERL, ERM dans les deux carottes d'Alger et de Marseille (Long et al., 1995).



**Figure III.45 :** Comparaison des teneurs en ETM avec TEL, PEL dans les deux carottes d'Alger et de Marseille (Macdonald et al., 1996).

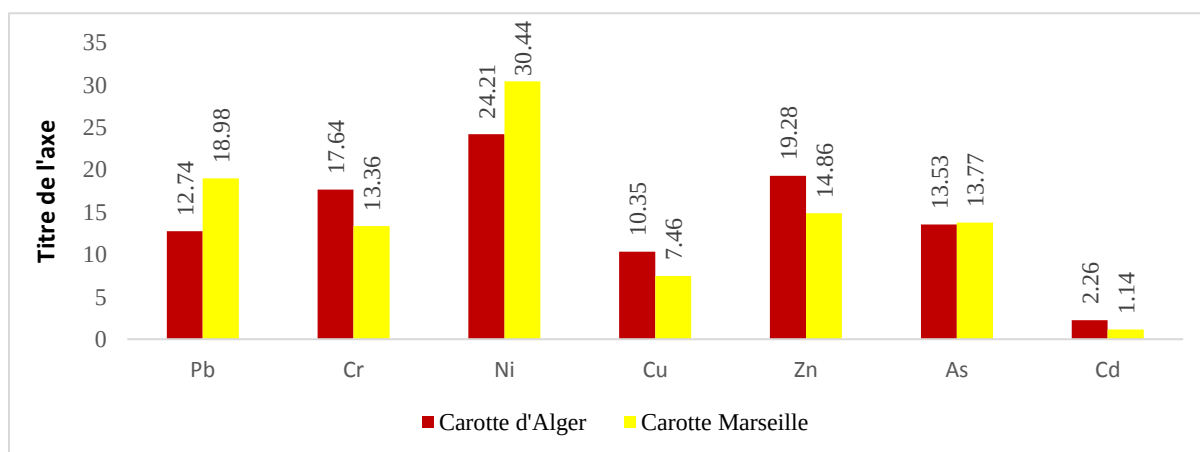
La valeur moyenne de m- ERM-Q (Fig. III.46) est de 0,27 et 0,21 dans la carotte d'Alger et de Marseille, respectivement, indiquant que ces métaux ont 21% la possibilité d'être toxiques. Alors que la valeur moyenne de m- PEL- Q est de 0,44 et 0,34 dans les deux carottes, respectivement, ce qui coïncide avec une probabilité de 21 % d'être toxiques pour les espèces vivantes selon les probabilités de toxicité des quotients m-ERM et m-PEL (Long et al., 2000).



**Figure III.46 :** Valeurs moyennes de m- ERM-Q et m- PEL- Q dans les deux carottes.

Concernant les valeurs de la somme des unités toxiques  $\Sigma T_{Ui}$  pour chaque carotte (Fig. III.46) calculées sur la base des concentrations de Cd, Cr, As, Cu, Ni, Pb et Zn varient de 2,89 à 3,40 avec une moyenne de 3,11 dans la carotte de baie d'Alger, et entre 1,90 à 2,65 avec une moyenne de 2,38 dans la carotte de baie de Marseille. Selon le classement de la toxicité potentielle de [Pedersen et al. \(1998\)](#), toutes les valeurs  $\Sigma T_{Ui}$  des deux carottes sont inférieures à 4, une valeur en dessous de laquelle aucun effet toxique significatif de ces métaux n'a été observé sur l'amphipode C lors des tests de bio-essai réalisés par [Pedersen et al. \(1998\)](#).

En ce qui concerne la contribution de chaque ETM ( $T_{Ui}$ ) à la somme des unités toxiques ( $\Sigma T_{Ui}$ ) (Fig. III.47), les principales contributions à la toxicité dans les sédiments de la carotte d'Alger et de Marseille est due au Ni (24,21% et 30,44%, respectivement). La contribution en pourcentage des autres métaux traces (Pb, Cr, Cu Zn et As) est entre 10% et 20%. En outre, la contribution du cadmium au  $\Sigma TU$  est négligeable (inférieure à 2% dans les deux carotte). Globalement, la contribution en pourcentage des unités toxiques sur la base des PEL suit l'ordre Ni > Zn > Cr > As > Pb > Cu > Cd et Ni > Pb > Zn > As > Cr > Cu > Cd dans la carotte d'Alger et de Marseille, respectivement.



**Figure III.47 :** Pourcentage de contribution à la toxicité de différents métaux dans la carotte d'Alger et de Marseille.

# Conclusion

## CONCLUSION

L'objet de cette thèse est une approche pour approfondir la compréhension du rôle des cours d'eau dans la dynamique des polluants, notamment les métaux traces. A cette fin, les Oueds El Harrach et Mazafran ont été étudiés pendant un cycle annuel avec les paramètres nécessaires et appropriés. Ces cours d'eau anthropisés, traversent une grande partie des agglomérations d'Alger et de Blida ainsi que les plus importantes zones industrielles où ils collectent les rejets urbains et industriels, en majorité, sans traitement préalable. L'étude de la dispersion et de l'accumulation des contaminants ainsi que l'inventaire de l'archive géochimique et des pollutions antérieures ont été programmés aux lieux de déversement de ces cours d'eau en baie d'Alger et de Bou-Ismaïl. A titre de comparaison avec la rive nord de la mer méditerranée, un aperçu d'une étude similaire est réalisé dans la baie de Marseille où se jette le Rhône.

Les principales conclusions à tirer du suivis des oueds El Harrach et Mazafran sont :

- Les eaux des deux oueds sont alcalines, caractérisées par une fluctuation saisonnière de température et une teneur en particules en suspension allant de 30 à 2.197 mg/l ;
- Le fer, le Mn et le Zn sont les métaux les plus disponibles dans l'eau et les MES ;
- En plus, des fluctuations importantes en métaux particuliers et dissous sont observées, avec des concentrations plus marquées en Pb, Co, Cd et Zn enregistrées dans les MES ;
- En ce qui concerne les valeurs calculées de  $\text{Log } K_d$ , tous les métaux analysés dans cette étude à l'exception du Mn forment des complexes stables avec les MES ;
- Une « catégorie de non-pollution » ( $\text{PLI} < 1$ ) a été trouvée pour les métaux particuliers examinés, contrairement à une situation légèrement polluée ( $0 < \text{Igeo} < 1$ ) dans les deux oueds ;
- Tous les métaux particuliers analysés, à l'exception de Co et V, proviennent très probablement de sources anthropiques ( $\text{EF} > 1,5$ ) ;
- Un risque écologique faible ( $\text{IR} < 150$ ) a été observé dans les deux oueds ;

Cependant, l'investigation et les analyses devront être étendues à d'autres compartiments environnementaux comme les sédiments des oueds, afin de mieux étudier la variabilité spatiale et temporelle du comportement des métaux en fonction des processus biogéochimiques dans ces milieux.

L'étude des sédiments superficiels nous a permis de caractériser l'étendue de la contamination des métaux traces. Nos résultats ont révélé que :

- L'As en face l'embouchure des deux oueds et le Hg en face l'oued El Harrach pourraient être associés aux apports d'une pollution anthropique.
- Les concentrations moyennes de Cr, de Ni, de Hg, de Zn et d'As dans la plupart des stations de la baie d'Alger sont supérieures aux seuils ERL (Effect Range Low).
- A l'exception de l'Arsenic, les concentrations de cuivre, de Zn, de Cd et de Pb sont toutes inférieures aux seuils ERL dans la baie de Bou-Ismaïl.
- Hormis l'arsenic, les autres métaux ont enregistré des concentrations élevées dans la baie d'Alger qu'en baie de Bou-Ismaïl.

En ce qui concerne l'étude de l'histoire de la contamination en ETM dans les carottes sédimentaires (carottes des baies d'Alger et de Marseille), les résultats ont révélé que :

- Les sédiments de la baie d'Alger ont des concentrations moyennes en ETM plus élevées que ceux de la baie de Marseille.
- Sur l'ensemble des profils de distribution des métaux dans la carotte de Marseille, il y a une tendance à la baisse des niveaux d'ETM des couches sédimentaires profondes que celles de surface.

L'étude préliminaire a dévoilé une concentration élevée de Hg et d'As dans les sédiments de la région Algéroise. Une autre pollution par des métaux traces comme le Cu, Pb, Cr, Zn et Cd a été détectée dans les eaux de l'Oued El-Harrach et Mazafran. Ces pollutions par des métaux traces sont probablement causées par la décharge des déchets : eaux de rejets industriels.

Enfin, comme cette étude est une première du genre en Algérie, elle constitue une originalité qui pourra être considérée comme une référence pour les futurs travaux s'intéressant à l'étude de la qualité des cours d'eau, notamment l'oued El Harrach et l'oued Mazafran. Les résultats obtenus dans cette thèse montrent la complexité du système étudié et permettent d'envisager des investigations futures complémentaires :

1. Echantillonnage à haute résolution temporelle à l'aide d'un préleveur automatique couplé à un débitmètre afin d'identifier les changements de composition et de flux des eaux transportés par les deux oueds et d'étudier le comportement des ETM lors des événements hydrologiques brutaux.
2. Analyser davantage d'échantillons d'eaux usées industrielles, de boues, de sédiments et d'eau, afin de mieux comprendre l'état de la pollution.

# BIBLIOGRAPHIQUE

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adriano, D.C., (2001) Bioavailability of Trace Metals, Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. Springer New York, New York, NY, pp. 61-89.
- Alkhatib, E.A., Chabot, T., Grunzke, D. (2016) Prediction of metal remobilization from sediments under various physical/chemical conditions "Design of experiments Cd, Co and Pb". *Journal of Hydrogeology and Hydrologic Engineering* 5(2).
- Alloway, B.J. (2013) Heavy Metals in Soils. Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Springer, Dordrecht Heidelberg New York London.
- Alomary, A.A., Belhadj, S. (2007) Determination of heavy metals (Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) by ICP-OES and their speciation in Algerian Mediterranean Sea sediments after a five-stage sequential extraction procedure. *Environmental monitoring assessment* 135, 265-280.
- Anderson, R.A. (1989) Essentiality of chromium in humans. *Science of the Total Environment* 86, 75-81.
- AQUAREF (2015) Opérations d'échantillonnage en milieu marin dans le cadre des programmes de surveillance DCE (matrices : eau, sédiment et biote) - Recommandations techniques Edition 2015.
- Arienzo, M., Ferrara, L., Toscanesi, M., Giarra, A., Donadio, C., Trifuoggi, M. (2020) Sediment contamination by heavy metals and ecological risk assessment: The case of Gulf of Pozzuoli, Naples, Italy. *Marine Pollution Bulletin* 155, 111149.
- Aroua, M., Boulahdid, M., Radakovitch, O., Benhalima, M., Guendouzi, Y., Fowler, S.W., Ambrosi, J.-P. (2023) Sediment pollution: An assessment of anthropogenic and geogenic trace element contributions along the central Algerian coast. *Marine Pollution Bulletin* 186, 114398.
- Aroua, N., Berezowska-Azzag, E., (2009) Contribution à l'étude de la vulnérabilité urbaine au risque d'inondation dans un contexte de changement climatique. Cas de la vallée de oued el harrach à Alger, Fifth Urban Research Symposium: Cities and Climate Change: Responding to the Urgent Agenda, Marseille, France, p. 20.
- Athmani, H., (2022) Etude géochimique des métaux traces dans les milieux marins et lacustres, Thèse de Doctorat. Faculté des Sciences et de la technologie, Université Mohamed Khider Biskra, p. 233.
- Athmani, H., Mostefa, B., Radakovitch, O., Angeletti, B., Ambrosi, J.-P., Hocini, N. (2022) Trace metal contamination in sediment cores from Algiers Bay (Algeria). *Arabian Journal of Geosciences* 15, 1107.
- Atroune, F., Boutaleb, A. (2012) Les métaux lourds dans les sédiments superficiels de la baie d'Alger: Influence de l'Oued El Harrach sur leur distribution. *Bulletin du service géologique National* 23, 169-178.
- Bachouche, S., Houma, F., Gomiero, A., Rabah, B. (2017) Distribution and environmental risk assessment of heavy metal in surface sediments and red mullet (*Mullus barbatus*) from Algiers and BouIsmaïl Bay (Algeria). *Environmental Modeling & Assessment* 22, 473-490.
- Bai, J., Xiao, R., Zhang, K., Gao, H. (2012) Arsenic and heavy metal pollution in wetland soils from tidal freshwater and salt marshes before and after the flow-sediment regulation regime in the Yellow River Delta, China. *Journal of Hydrology* 450, 244-253.
- Baize, D. (1997) Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France): Références et stratégies d'interprétation. Programme ASPITET. 1-410.
- Balik, İ., Tunca, E. (2015) A review of sediment contamination assessment methods. *Turkish Journal of Maritime Marine Sciences* 1, 7-17.
- Ball, J.W., Izbicki, J.A. (2004) Occurrence of hexavalent chromium in ground water in the western Mojave Desert, California. *Applied Geochemistry* 19, 1123-1135.

- Baque, D., (2006) Perturbations anthropiques du réseau hydrographique du bassin de la Garonne, cas des métaux et des nitrates. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, p. 476.
- Barnhart, J. (1997) Occurrences, Uses, and Properties of Chromium. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 26, S3-S7.
- Barreto, S.R.G., Barreto, W.J., Deduch, E.M. (2011) Determination of partition coefficients of metals in natural tropical water. *CLEAN–Soil, Air, Water* 39, 362-367.
- Benabdelkader, A., (2019) Sources et transferts des éléments majeurs et traces dans le bassin versant de la Tafna (Algérie) : approches géochimiques et hydrochimiques. Université de toulouse; université Abou Beker Belkaid (Tlemcen), p. 270.
- Benedicto, J., Andral, B., Martínez-Gómez, C., Guitart, C., Deudero, S., Cento, A., Scarpato, A., Caixach, J., Benbrahim, S., Chouba, L., Boulahdid, M., Galgani, F. (2011) A large scale survey of trace metal levels in coastal waters of the Western Mediterranean basin using caged mussels (*Mytilus galloprovincialis*). *Journal of Environmental Monitoring* 13, 1495-1505.
- Benhalima, M., Boulahdid, M., Guendouzi, Y., Radakovitch, O., Aroua, M., Fowler, S.W., Ambrosi, J.-P., Angeletti, B. (2022) Occurrence, contamination level and ecological risk assessment of dissolved and particulate trace elements in rivers entering the southwestern Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin* 180, 113723.
- Benoit, G., Oktay-Marshall, S., Cantu li, A., Hood, E., Coleman, C., Corapcioglu, M., Santschi, P. (1994) Partitioning of Cu, Pb, Ag, Zn, Fe, Al, and Mn between filter-retained particles, colloids, and solution in six Texas estuaries. *Marine Chemistry* 45, 307-336.
- Berner, E.K., Berner, R.A. (1987) The global water cycle. *Geochemistry and environment*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Bettiol, C., Collavini, F., Guerzoni, S., Molinaroli, E., Rossini, P., Zaggia, L., Zonta, R. (2005) Atmospheric and riverine inputs of metals, nutrients and persistent organic pollutants into the lagoon of Venice. *Hydrobiologia* 550, 151-165.
- Bianchi, C.N., Morri, C. (2000) Marine biodiversity of the Mediterranean Sea: situation, problems and prospects for future research. *Marine Pollution Bulletin* 40, 367-376.
- Birch, G. (2017) Determination of sediment metal background concentrations and enrichment in marine environments—a critical review. *Science of the Total Environment* 580, 813-831.
- Birch, G. (2022) A review and critical assessment of sedimentary metal indices used in determining the magnitude of anthropogenic change in coastal environments. *Science of the Total Environment*, 158129.
- Bonnet, C., (2000) Développement de bioessais sur sédiments et applications à l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés. Thèse de doctorat, université de Metz, p. 326.
- Bouchelouche, D., Arab, A. (2020) Bioaccumulation of heavy metals in an aquatic insect (*Baetis pavidus*; Baetidae; Ephemeroptera) in the El Harrach Wadi (Algeria). *Arabian Journal of Geosciences* 13, 1-14.
- Bouchoucha, M., Tomasino, C., Brach-Papa, C., (2018) Rapport de synthèse de la campagne d'évaluation de la qualité chimique de sédiments (ROCCHSED) 2016 en Méditerranée, p. 39.
- Bouhnik-Le Coz, M., Petitjean, P., Serrat, E., Gruau, G., (2001) Validation d'un protocole permettant le dosage simultané des cations majeurs et traces dans les eaux douces naturelles par ICP-MS, p. 78.
- Boulahdid, M., Errahmani, D.T., Noureddine, A., Hocini, N., Ounadi, F. (2013) Les métaux traces dans les sédiments de la baie d'Alger. *Rapp. Comm. int. Mer. M*, dit. 40, 833p.
- Bouragba, S., Komai, K., Nakayama, K. (2017) Heavy metals transport simulation by physically based distributed modeling approach (case study: Harrach River, Algeria). *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)* 73, I\_1159-I\_1164.

- Bouras, A.E.F., Nacer, N.M., Buscail, R., Zoubida, N. (2020) Supplies of suspended matter by surface water of the Mazafran drainage basin (western Algiers, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences* 13, 1-8.
- Bouras, A.E.F., Nacer, N.M., Metouchi, A., Nemer, Z. (2021) Assessment of particulate matter fluxes in the Mazafran wadi (Algeria). *Arabian Journal of Geosciences* 14, 1-7.
- Bradl, H., (2005) Sources and origins of heavy metals, *Interface science and technology*. Elsevier, pp. 1-27.
- Briand, M., Herlory, O., Brach-Papa, C., Brochen, M., Chavanon, F., Chouteau, L., Connes, C., Coudray, S., de Vogüé, B., Gerigny, O., (2022) Campagne SUCHIMED 2021. Surveillance de la contamination chimique en Méditerranée. ontrat de coopération public-public spécifique d'application de la convention-cadre Agence de l'Eau RMC / Ifremer n° 1000837, p. 150.
- Brooks, S.J., Bolam, T., Tolhurst, L., Bassett, J., La Roche, J., Waldock, M., Barry, J., Thomas, K.V. (2008) Dissolved organic carbon reduces the toxicity of copper to germlings of the macroalgae, *Fucus vesiculosus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 70, 88-98.
- Bruland, K.W., Middag, R., Lohan, M.C., (2014) Controls of Trace Metals in Seawater, *Treatise on Geochemistry* (Second Edition). Elsevier, Oxford, pp. 19-51.
- Buffle, J., Chalmers, R.A. (1988) Complexation reactions in aquatic systems.
- Burdige, D. (1993) The biogeochemistry of manganese and iron reduction in marine sediments. *Earth-Science Reviews* 35, 249-284.
- Carr, S.R., Chapman, D.C., Long, E.R., Windom, H.L., Thursby, G., Sloane, G.M., Wolfe, D.A. (1996) Sediment quality assessment studies of Tampa Bay, Florida. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal* 15, 1218-1231.
- Chaney, R., (1993) Zinc phytotoxicity, Zinc in Soils and Plants: Proceedings of the International Symposium on 'Zinc in Soils and Plants' held at The University of Western Australia, 27-28 September, 1993. Springer, pp. 135-150.
- Chapman, P.M., Paine, M.D., Arthur, A.D., Taylor, L.A. (1996) A triad study of sediment quality associated with a major, relatively untreated marine sewage discharge. *Marine Pollution Bulletin* 32, 47-64.
- Charlou, J., Joanny, M. (1983) Dosage du mercure et d'autres métaux (Pb, Zn, Cu, Cd, Co, Ni, Cr, Mn) dans les sédiments marins par absorption atomique. *Manuel des analyses chimiques en milieu marin*, Centre National pour l'exploitation des Océans, Brest, 285-295.
- Charriau, A., (2009) Etude de la contamination organique et métallique associée aux sédiments du district hydrographique international de l'Escaut. *Ecole Doctorale Sciences de la matière, du rayonnement et de l'environnement*. Thèse de doctorat, Université Lille1, p. 241.
- Chiffolleau, J., Claisse, D., Cossa, D., Ficht, A., Gonzalez, J.-L., Guyot, T., Michel, P., Miramand, P., Oger, C., Petit, F. (2001) La contamination métallique. *Programme Scientifique Seine Aval*, fascicule. 8, 39.
- Chowdhury, M., Baldisserotto, B., Wood, C. (2005) Tissue-specific cadmium and metallothionein levels in rainbow trout chronically acclimated to waterborne or dietary cadmium. *Archives of Environmental Contamination Toxicology* 48, 381-390.
- Clark, M., Davies-McConchie, F., McConchie, D., Birch, G. (2000) Selective chemical extraction and grain size normalisation for environmental assessment of anoxic sediments: validation of an integrated procedure. *Science of the Total Environment* 258, 149-170.
- Claude Alzieu, B.A., Marie-Christine Bertrand, Pierre Boissery, Sylvain Dauré, Jacques Patrone, Pierre Rebouillon, Hervé Thébault, (2000) Les guides méthodologiques du RLM *Evaluation de la contamination chimique et radiologique du sédiment*. Ifremer. RLM, p. 60.
- Delile, H., Gruat, A., Coquery, M., Masson, M., Dabrin, A., Le Coz, J., Miege, C., Lagouy, M., Radakovitch, O., (2021) Evaluation multi-échelle des flux de MES et de contaminants associés dans le bassin du Rhône. INRAE; IRSN.

- Delile, H., Masson, M., Miège, C., Le Coz, J., Poulier, G., Le Bescond, C., Radakovitch, O., Coquery, M. (2020) Hydro-climatic drivers of land-based organic and inorganic particulate micropollutant fluxes: The regime of the largest river water inflow of the Mediterranean Sea. *Water research* 185, 116067.
- Eggleton, J., Thomas, K.V. (2004) A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. *Environment international* 30, 973-980.
- Everett, D.H. (2007) Basic principles of colloid science. Royal society of chemistry.
- Fan, J., Zhao, G., Sun, J. (2017) Binary component sorption of cadmium, and copper ions onto Yangtze River sediments with different particle sizes. *Sustainability* 9, 2089.
- Fang, Z., Wang, W.-X. (2022) Dynamics of trace metals with different size species in the Pearl River Estuary, Southern China. *Science of The Total Environment* 807, 150712.
- Flemming, C.A., Trevors, J.T. (1989) Copper toxicity and chemistry in the environment: a review. *Water, Air, and Soil Pollution* 44, 143-158.
- Förstner, U., Salomons, W. (1983) Trace element speciation in surface waters: interactions with particulate matter. 245-273.
- Fraysse, M., Pairaud, I., Ross, O.N., Faure, V.M., Pinazo, C. (2014) Intrusion of Rhone River diluted water into the Bay of Marseille: Generation processes and impacts on ecosystem functioning. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119, 6535-6556.
- Gaillardet, J., Viers, J., Dupré, B. (2003) Trace elements in river waters. *Treatise on geochemistry* 5, 605.
- Geffard, O., (2001) Toxicité potentielle des sédiments marins et estuariens contaminés: évaluation chimique et biologique, biodisponibilité des contaminants sédimentaires. Thèse de doctorat. Bordeaux 1. France, p. 376.
- Ghiboub, A., (2015) Les éléments en traces métalliques dans les sédiments du littoral algérois, Thèse Magister ENSSMAL, p. 112.
- Gómez, V., Callao, M.P. (2006) Chromium determination and speciation since 2000. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 25, 1006-1015.
- Guemache, M.A., Djellit, H., Ymmel, H., Gharbi, S., Dorbath, C.J.B.o.G.A.C.S. (2010) The post-Astian BouinaneSoumâa fault (area of Blida, southern border of the Mitidja Basin, Algeria): neotectonic expression and implication in seismic hazard assessment. *Bulletin of Geological Algeria Card Service* 21, 75-94.
- Guendouzi, Y., Boulahdid, M., Hacene, O.R., Inal, A., Boudjellal, B., Fowler, S.W. (2021) Contamination level and ecological risk assessment of particulate trace metals in Southwestern Mediterranean Sea. *Regional Studies in Marine Science* 46, 101876.
- Guendouzi, Y., Ghalmi, R., Boudjellal, B., El morhit, M. (2015) Impact des métaux traces sur l'écosystème à *Posidonia oceanica* dans La Baie d'Alger (Impact of metals traces on the ecosystem at *Posidonia oceanica* in the Bay of Algiers). *Journal of Materials and Environmental Science* 6, 918-923.
- Gülşen-Rothmund, H.İ., Arslan, Ş., Kurtuluş, B., Tunca, E., Avşar, U., Avşar, Ö. (2023) Assessment of trace metal pollution in the coastal sediments of Fethiye-Göcek Bay (SW Turkey) and evaluation of pollution sources. *Marine Pollution Bulletin* 186, 114387.
- Hakanson, L. (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research* 14, 975-1001.
- Hayzoun, H., (2014) Caractérisation et quantification de la charge polluante anthropique et industrielle dans le bassin du Sebou. Université de Toulon; Université Sidi Mohamed ben Abdellah (Fès, Maroc), Faculté des Sciences et Techniques. Université de Toulon; Université Sidi Mohamed ben Abdellah (Fès, Maroc), p. 176.
- Hayzoun, H., Garnier, C., Durrieu, G., Lenoble, V., Le Poupon, C., Angeletti, B., Ouammou, A., Mounier, S. (2015) Organic carbon, and major and trace element dynamic and fate in a large

- river subjected to poorly-regulated urban and industrial pressures (Sebou River, Morocco). *Science of the Total Environment* 502, 296-308.
- He, M., Wang, Z., Tang, H. (2001) Modeling the ecological impact of heavy metals on aquatic ecosystems: a framework for the development of an ecological model. *Science of the Total Environment* 266, 291-298.
- Heiri, O., Lotter, A.F., Lemcke, G. (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of paleolimnology* 25, 101-110.
- Hinrichsen, D., (1990) *Our common seas: coasts in crisis*. Earthscan Publications Ltd, Great Britain, p. 193.
- Huang, S., Wang, Z. (2003) Application of anodic stripping voltammetry to predict the bioavailable/toxic concentration of Cu in natural water. *Applied Geochemistry* 18, 1215-1223.
- Ibañez, C., Pont, D., Prat, N. (1997) Characterization of the Ebre and Rhone estuaries: A basis for defining and classifying salt - wedge estuaries. *Limnology Oceanography* 42, 89-101.
- Inal, A. (2011) *Les métaux traces dans les sédiments de la baie de Bou-Ismaïl : Surveillance de la pollution et étude des processus géochimiques*, ENSSMAL. Thèse de Magister, 136.
- Inal, A., (2020) *Les métaux traces dans les sédiments marins et les espèces démersales de la côte algérienne : contribution à l'évaluation du risque écologique*, ENSSMAL, Thèse de Doctorat, p. 296.
- Inal, A., Boulahdid, M., Angelleti, B., Radakovitch, O. (2018) Levels and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of fishing grounds along Algerian coast. *Marine Pollution Bulletin* 136, 322-333.
- Jaworski, J.F. (1980) Effects of Chromium, Alkali, Halides, Arsenic, Asbestos, Mercury, Cadmium in the Canadian Environment. NRCC.
- Johnson, C.A. (1990) Rapid ion-exchange technique for the separation and preconcentration of chromium(VI) and chromium(III) in fresh waters. *Analytica Chimica Acta* 238, 273-278.
- Kalneja, L.H., Martin, W.R., Bothner, M.H. (2010) The release of dissolved nutrients and metals from coastal sediments due to resuspension. *Marine Chemistry* 121, 224-235.
- Karageorgis, A., Nikolaidis, N., Karamanos, H., Skoulikidis, N. (2003) Water and sediment quality assessment of the Axios River and its coastal environment. *Continental Shelf Research* 23, 1929-1944.
- Karlsson, T., Persson, P., Skyllberg, U. (2005) Extended X-ray absorption fine structure spectroscopy evidence for the complexation of cadmium by reduced sulfur groups in natural organic matter. *Environmental science technology* 39, 3048-3055.
- Kehrig, H.d.A., Malm, O. (1999) Methylmercury in fish as a tool for understanding the Amazon mercury contamination. *Applied Organometallic Chemistry* 13, 689-696.
- Khelil, N., (2021) *La gestion intégrée de la zone côtière algéroise : entre doctrine et pratique*, Thèse de Doctorat. ENSSMAL, p. 209.
- Khelil, N., Larid, M., Grimes, S., Le Berre, I., Peuziat, I. (2019) Challenges and opportunities in promoting integrated coastal zone management in Algeria: Demonstration from the Algiers coast. *Ocean Coastal Management* 168, 185-196.
- Komada, T., Burdige, D.J., Magen, C., Li, H.-L., Chanton, J. (2016) Recycling of organic matter in the sediments of Santa Monica Basin, California Borderland. *Aquatic Geochemistry* 22, 593-618.
- Koudri, M., Benabdellah, I., Ghouali, R., Bernoussi, A., Lagha, A. (2016) Enrichment and geoaccumulation of heavy metals and risk assessment of sediments from coast of Ain Temouchent (Algeria). *Arabian Journal of Geosciences* 9, 1-9.

- Kozlova, T., Wood, C.M., McGeer, J.C. (2009) The effect of water chemistry on the acute toxicity of nickel to the cladoceran *Daphnia pulex* and the development of a biotic ligand model. *Aquatic Toxicology* 91, 221-228.
- Kükrer, S., Şeker, S., Abacı, Z.T., Kutlu, B. (2014) Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of northern littoral zone of Lake Çıldır, Ardahan, Turkey. *Environmental monitoring assessment* 186, 3847-3857.
- Leclaire, L. (1972) La sédimentation holocène sur le versant méridional du bassin algero-baleares (Precontinent algérien). *Mémoires du Muséum National d'histoire Naturelle, Paris, nouvelle série, C, Sciences de la terre., Tome XXIV, fascicule unique*, 391p.
- Leleyter, L., Rousseau, C., Biree, L., Baraud, F. (2012) Comparison of EDTA, HCl and sequential extraction procedures, for selected metals (Cu, Mn, Pb, Zn), in soils, riverine and marine sediments. *Journal of Geochemical Exploration* 116, 51-59.
- Lepage, H., Gruat, A., Thollet, F., Le Coz, J., Coquery, M., Masson, M., Dabrin, A., Radakovitch, O., Labille, J., Ambrosi, J.-P. (2022) Concentrations and fluxes of suspended particulate matter and associated contaminants in the Rhône River from Lake Geneva to the Mediterranean Sea. *Earth System Science Data* 14, 2369-2384.
- Lepage, H., Masson, M., Delanghe, D., Le Bescond, C. (2019) Grain size analyzers: results of an intercomparison study. *SN Applied Sciences* 1, 1-14.
- Lesven, L., Gao, Y., Billon, G., Leermakers, M., Ouddane, B., Fischer, J.-C., Baeyens, W. (2008) Early diagenetic processes aspects controlling the mobility of dissolved trace metals in three riverine sediment columns. *Science of the Total Environment* 407, 447-459.
- Li, X., Shen, Z., Wai, O.W.H., Li, Y.-S. (2001) Chemical Forms of Pb, Zn and Cu in the Sediment Profiles of the Pearl River Estuary. *Marine Pollution Bulletin* 42, 215-223.
- Lipizer, M., Berto, D., Cermelj, B., Fafandjel, M., Formalewicz, M., Hatzianestis, I., Ilijanić, N., Kaberi, H., Kralj, M., Matijevic, S. (2022) Trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Eastern Mediterranean sediments: Concentration ranges as a tool for quality control of large data collections. *Marine Pollution Bulletin* 185, 114181.
- Liu, S., Shi, X., Liu, Y., Zhu, Z., Yang, G., Zhu, A., Gao, J. (2011) Concentration distribution and assessment of heavy metals in sediments of mud area from inner continental shelf of the East China Sea. *Environmental Earth Sciences* 64, 567-579.
- Lock, K., Janssen, C.R. (2002) Ecotoxicity of nickel to *Eisenia fetida*, *Enchytraeus albidus* and *Folsomia candida*. *Chemosphere* 46, 197-200.
- Loire-Bretagne, A.d.l.E., (2006) Le prélèvement d'échantillons en rivière. *Techniques d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques. Guide technique Bretagne*, p. 134.
- Long, E., MacDonald, D. (1998) Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems. *Human and Ecological Risk Assessment* 4, 1019-1039.
- Long, E.R., MacDonald, D.D., Severn, C.G., Hong, C.B. (2000) Classifying probabilities of acute toxicity in marine sediments with empirically derived sediment quality guidelines. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal* 19, 2598-2601.
- Long, E.R., MacDonald, D.D., Smith, S.L., Calder, F.D. (1995) Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental management* 19, 81-97.
- Louati, B., (2015) Etude de dépollution industrielle du bassin versant de l'oued el harrach, Thèse Magister. Université Badji Mokhtar, p. 208.
- Macdonald, D.D., Carr, R.S., Calder, F.D., Long, E.R., Ingersoll, C.G. (1996) Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. *Ecotoxicology* 5, 253-278.
- MacDonald, D.D., Dipinto, L.M., Field, J., Ingersoll, C.G., Lvong, E.R., Swartz, R.C. (2000) Development and evaluation of consensus-based sediment effect concentrations for

- polychlorinated biphenyls. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal* 19, 1403-1413.
- Madani, S.Z. (2009) Alger d'aujourd'hui: une ville à la recherche de ses marques sociales. *Insaniyat/إنسانيات*. *Revue algérienne d'anthropologie et de sciences sociales*, 33-55.
- Maggi, C., Berducci, M.T., Bianchi, J., Giani, M., Campanella, L. (2009) Methylmercury determination in marine sediment and organisms by Direct Mercury Analyser. *Analytica Chimica Acta* 641, 32-36.
- Mao, L., Liu, L., Yan, N., Li, F., Tao, H., Ye, H., Wen, H. (2020) Factors controlling the accumulation and ecological risk of trace metal (loid) s in river sediments in agricultural field. *Chemosphere* 243, 125359.
- Marengo, M., Durieux, E.D., Ternengo, S., Lejeune, P., Degrange, E., Pasqualini, V., Gobert, S. (2018) Comparison of elemental composition in two wild and cultured marine fish and potential risks to human health. *Ecotoxicology environmental safety* 158, 204-212.
- Martin, J.-M., Meybeck, M. (1979) Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry* 7, 173-206.
- Martínez-Guijarro, R., Paches, M., Romero, I., Aguado, D. (2019) Enrichment and contamination level of trace metals in the Mediterranean marine sediments of Spain. *Science of the Total Environment* 693, 133566.
- Martínez-Santos, M., Probst, A., García-García, J., Ruiz-Romera, E. (2015) Influence of anthropogenic inputs and a high-magnitude flood event on metal contamination pattern in surface bottom sediments from the Deba River urban catchment. *Science of the Total Environment* 514, 10-25.
- Mason, R.P. (2013) Trace metals in aquatic systems. John Wiley & Sons.
- McCauley, D.J., DeGraeve, G., Linton, T.K. (2000) Sediment quality guidelines and assessment: overview and research needs. *Environmental Science & Policy* 3, 133-144.
- Meddi, M., Toumi, S., Assani, A.A. (2017) Application of the L-moments approach to the analysis of regional flood frequency in Northern Algeria. *International Journal of Hydrology Science Technology* 7, 77-102.
- Mergler, D. (2002) Review of neurobehavioral deficits and river fish consumption from the Tapajós (Brazil) and St. Lawrence (Canada). *Environmental Toxicology Pharmacology* 12, 93-99.
- Merzouki, H., Chatoui, R., Daghor, L., Brhich, A., Midhat, L., Ellaite, M., Merzouki, M., (2022) Trace Metals and Food Risks, in: Chatoui, H., Merzouki, M., Moummou, H., Tilaoui, M., Saadaoui, N., Brhich, A. (Eds.), *Nutrition and Human Health: Effects and Environmental Impacts*. Springer International Publishing, Cham, pp. 193-204.
- Messaoud Nacer, N., Remini, B., Kadour, B.H., Habi, M. (2006) Water pollution problems. Methodological and legislative aspects. The case of surface waters of the Mazafran plain (Mitidja, Algeria). *TSM number* 5, 89-97.
- Meybeck, M., Helmer, R. (1989) The quality of rivers: from pristine stage to global pollution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 75, 283-309.
- Miller, J.R., Orbock Miller, S.M. (2007) Sediment-Trace Metal Interactions. *Contaminated Rivers: A Geomorphological-Geochemical Approach to Site Assessment Remediation*, 33-67.
- Müller, G. (1969) Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal* 2, 108-118.
- Müller, G. (1986) Schadstoffe in sedimenten-sedimente als schadstoffe. *Mitt, Österreichische Geologische Gesellschaft* 79, 107-126.
- Ollivier, P., Hamelin, B., Radakovitch, O. (2010) Seasonal variations of physical and chemical erosion: A three-year survey of the Rhone River (France). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 907-927.

- Ollivier, P., Radakovitch, O., Hamelin, B. (2006) Unusual variations of dissolved As, Sb and Ni in the Rhône River during flood events. *Journal of Geochemical Exploration* 88, 394-398.
- Ollivier, P., Radakovitch, O., Hamelin, B. (2011) Major and trace element partition and fluxes in the Rhône River. *Chemical Geology* 285, 15-31.
- Oursel, B., Garnier, C., Durrieu, G., Mounier, S., Omanović, D., Lucas, Y. (2013) Dynamics and fates of trace metals chronically input in a Mediterranean coastal zone impacted by a large urban area. *Marine Pollution Bulletin* 69, 137-149.
- Oursel, B., Garnier, C., Pairaud, I., Omanović, D., Durrieu, G., Syakti, A.D., Le Poupon, C., Thouvenin, B., Lucas, Y. (2014a) Behaviour and fate of urban particles in coastal waters: Settling rate, size distribution and metals contamination characterization. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 138, 14-26.
- Oursel, B., Garnier, C., Zebracki, M., Durrieu, G., Pairaud, I., Omanović, D., Cossa, D., Lucas, Y. (2014b) Flood inputs in a Mediterranean coastal zone impacted by a large urban area: dynamic and fate of trace metals. *Marine Chemistry* 167, 44-56.
- PAM, M.c.d.l.e.P.R., (2015) Stratégie nationale de gestion intégrée des zones côtières en Algérie in: (Appui PAM-MedPartnership, U. (Ed.), p. 94.
- Pauc, H. (1989) L'intrusion saline et la dynamique des matériaux en suspension au contact fluvio-marin: Regime de crue et regime d'etiage dans l'oued Mazafran (Ouest Algerois). *Marine geology* 87, 95-102.
- Pavoni, E., Crosera, M., Petranich, E., Adami, G., Faganeli, J., Covelli, S. (2020) Partitioning and mixing behaviour of trace elements at the Isonzo/Soča River mouth (Gulf of Trieste, northern Adriatic Sea). *Marine chemistry* 223, 103800.
- Pedersen, F., Bjørnstad, E., Andersen, H.V., Kjølholt, J., Poll, C. (1998) Characterization of sediments from Copenhagen Harbour by use of biotests. *Water Science and Technology* 37, 233-240.
- Peng, J.-f., Song, Y.-h., Yuan, P., Cui, X.-y., Qiu, G.-l. (2009) The remediation of heavy metals contaminated sediment. *Journal of hazardous materials* 161, 633-640.
- Pont, D. (1997) Les débits solides du Rhône à proximité de son embouchure: données récentes (1994-1995)/The discharge of suspended sediments near to the mouth of the Rhône recent statistics (1994-1995). *Géocarrefour* 72, 23-33.
- Pont, D., Simonnet, J.-P., Walter, A.-V. (2002) Medium-term changes in suspended sediment delivery to the ocean: consequences of catchment heterogeneity and river management (Rhône River, France). *Estuarine, Coastal Shelf Science* 54, 1-18.
- Poulier, G., Launay, M., Le Bescond, C., Thollet, F., Coquery, M., Le Coz, J. (2019) Combining flux monitoring and data reconstruction to establish annual budgets of suspended particulate matter, mercury and PCB in the Rhône River from Lake Geneva to the Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment* 658, 457-473.
- Prabakaran, K., Eswaramoorthi, S., Nagarajan, R., Anandkumar, A., Franco, F.M. (2020) Geochemical behaviour and risk assessment of trace elements in a tropical river, Northwest Borneo. *Chemosphere* 252, 126430.
- Price, N., Morel, F. (1990) Cadmium and cobalt substitution for zinc in a marine diatom. *Nature* 344, 658-660.
- Pujo-Pay, M., Conan, P., Joux, F., Oriol, L., Naudin, J.J., Cauwet, G. (2006) Impact of phytoplankton and bacterial production on nutrient and DOM uptake in the Rhône River plume (NW Mediterranean). *Marine Ecology Progress Series* 315, 43-54.
- Qian, W., Gan, J., Liu, J., He, B., Lu, Z., Guo, X., Wang, D., Guo, L., Huang, T., Dai, M. (2018) Current status of emerging hypoxia in a eutrophic estuary: The lower reach of the Pearl River Estuary, China. *Estuarine, Coastal Shelf Science* 205, 58-67.

- Rabehi, W., Guerfi, M., Mahi, H. (2018) Cartographie de la vulnérabilité des communes de la baie d'Alger. Approche socio-économique et physique de la côte. Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography.
- Radakovitch, O., Roussiez, V., Ollivier, P., Ludwig, W., Grenz, C., Probst, J.-L. (2008) Input of particulate heavy metals from rivers and associated sedimentary deposits on the Gulf of Lion continental shelf. *Estuarine, coastal and shelf science* 77, 285-295.
- Rigaud, S., (2011) Dynamique et biodisponibilité des ETM dans les sédiments de l'étang de Berre. Thèse de doctorat de l'Université Paul Cézanne, Aix-Marseille III, p. 286.
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N. (2009) L'analyse de l'eau-9e éd. Dunod.
- Rooney, C.P., Zhao, F.-J., McGrath, S.P. (2007) Phytotoxicity of nickel in a range of European soils: Influence of soil properties, Ni solubility and speciation. *Environmental Pollution* 145, 596-605.
- Rouibah, M., Boulahdid, M., Boudejellal, B., Eddalia, N., Ounadi, F. (2005) Etude de la pollution du littoral algérois et du lac de Reghaia, ISMAL. p. 45.
- Roussiez, V., Ludwig, W., Monaco, A., Probst, J.-L., Bouloubassi, I., Buscail, R., Saragoni, G. (2006) Sources and sinks of sediment-bound contaminants in the Gulf of Lions (NW Mediterranean Sea): a multi-tracer approach. *Continental Shelf Research* 26, 1843-1857.
- Roussiez, V., Ludwig, W., Probst, J.-L., Monaco, A. (2005) Background levels of heavy metals in surficial sediments of the Gulf of Lions (NW Mediterranean): an approach based on 133Cs normalization and lead isotope measurements. *Environmental Pollution* 138, 167-177.
- Roy, N.K., Bose, S.S. (2008) Determination of Mercury in Thirty - three International Stream Sediment and Soil Reference Samples by Direct Mercury Analyser. *Geostandards Geoanalytical Research* 32, 331-335.
- Salomons, W., Förstner, U. (1984) *Metals in the Hydrocycle*. Springer Berlin. 349p.
- Salomons, W., Förstner, U., Salomons, W., Förstner, U. (1984) Sediments and the transport of metals. *Metals in the Hydrocycle*, 63-98.
- Sauzade, D., Andral, B., Gonzalez, J.-L., Pairaud, I., Verney, R., Zebracki, M., Cadiou, J.-F., Boissery, P. (2009) Pressure and state of the marine chemical contamination in the vicinity of a large coastal Mediterranean city, the case of Marseilles. Impact of large coastal Mediterranean cities on marine ecosystems Alexandria, Egypt, 10-12 February. 199.
- Schiff, K., Weisberg, S.B. (1999) Iron as a reference element for determining trace metal enrichment in Southern California coastal shelf sediments. *Marine Environmental Research* 48, 161-176.
- Sempéré, R., Charrière, B., Van Wambeke, F., Cauwet, G. (2000) Carbon inputs of the Rhône River to the Mediterranean Sea: Biogeochemical implications. *Global Biogeochemical Cycles* 14, 669-681.
- Shafer, M.M., Overdier, J.T., Hurley, J.P., Armstrong, D., Webb, D. (1997) The influence of dissolved organic carbon, suspended particulates, and hydrology on the concentration, partitioning and variability of trace metals in two contrasting Wisconsin watersheds (USA). *Chemical Geology* 136, 71-97.
- Shaw, T.J., Gieskes, J.M., Jahnke, R.A. (1990) Early diagenesis in differing depositional environments: the response of transition metals in pore water. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54, 1233-1246.
- Sigg, L., Behra, P., Stumm, W. (2001) *Chimie des milieux aquatiques*. Dunod Paris.
- Sin, S., Chua, H., Lo, W., Ng, L. (2001) Assessment of heavy metal cations in sediments of Shing Mun River, Hong Kong. *Environment international* 26, 297-301.
- Sinex, S., Helz, G. (1981) Regional geochemistry of trace elements in Chesapeake Bay sediments. *Environmental Geology* 3, 315-323.

- Stockdale, A., Davison, W., Zhang, H., Hamilton-Taylor, J. (2010) The association of cobalt with iron and manganese (oxyhydr) oxides in marine sediment. *Aquatic Geochemistry* 16, 575-585.
- Stumm, W., Morgan, J.J. (2012) *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*. John Wiley & Sons.
- Sun, Q., Liu, D., Liu, T., Di, B., Wu, F. (2012) Temporal and spatial distribution of trace metals in sediments from the northern Yellow Sea coast, China: implications for regional anthropogenic processes. *Environmental Earth Sciences* 66, 697-705.
- Sunda, W.G. (1989) Trace metal interactions with marine phytoplankton. *Biological oceanography* 6, 411-442.
- Swarnalatha, K., Letha, J., Ayoob, S. (2013) Ecological risk assessment of a tropical lake system. *Journal of Urban Environmental Engineering* 7, 323-329.
- Swedlund, P.J., Webster, J.G. (2001) Cu and Zn ternary surface complex formation with SO<sub>4</sub> on ferrihydrite and schwertmannite. *Applied Geochemistry* 16, 503-511.
- Tankere-Muller, S., Zhang, H., Davison, W., Finke, N., Larsen, O., Stahl, H., Glud, R.N. (2007) Fine scale remobilisation of Fe, Mn, Co, Ni, Cu and Cd in contaminated marine sediment. *Marine Chemistry* 106, 192-207.
- Taylor, S.R. (1964) Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 28, 1273-1285.
- Tessier, A., Turner, D.R. (1995) *Metal speciation and bioavailability in aquatic systems*. Wiley Chichester.
- Tessier, E., Garnier, C., Mullot, J.-U., Lenoble, V., Arnaud, M., Raynaud, M., Mounier, S. (2011) Study of the spatial and historical distribution of sediment inorganic contamination in the Toulon bay (France). *Marine Pollution Bulletin* 62, 2075-2086.
- Tomczak, W., Boyer, P., Krimissa, M., Radakovitch, O. (2019) K<sub>d</sub> distributions in freshwater systems as a function of material type, mass-volume ratio, dissolved organic carbon and pH. *Applied Geochemistry* 105, 68-77.
- Tomlinson, D., Wilson, J., Harris, C., Jeffrey, D. (1980) Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer meeresuntersuchungen* 33, 566.
- Tuel, A., Eltahir, E.A. (2020) Why is the Mediterranean a climate change hot spot? *Journal of Climate* 33, 5829-5843.
- Turekian, K.K., Wedepohl, K.H. (1961) Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin* 72, 175-192.
- Turner, A., Millward, G. (2000) Particle dynamics and trace metal reactivity in estuarine plumes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 50, 761-774.
- UNEP-MAP-RAC, S. (2008) *Action plan for the conservation of the coralligenous and other calcareous bio-concretions in the Mediterranean Sea*. UNEP MAP RAC-SPA publ., Tunis.
- UNEP, M. (2012) *Action Plan to implement the Protocol of the Barcelona Convention concerning the Protection of the Mediterranean Sea Against Pollution Resulting from Exploration and Exploitation of the Continental Shelf and the Seabed and its Subsoil*. <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822.7313>.
- Valdés, J., Vargas, G., Sifeddine, A., Ortlieb, L., Guinez, M. (2005) Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay (23°S), Northern Chile: geochemical and statistical approach. *Marine Pollution Bulletin* 50, 1558-1568.
- Vdović, N., Billon, G., Gabelle, C., Potdevin, J.-L. (2006) Remobilization of metals from slag and polluted sediments (Case Study: The canal of the Deûle River, northern France). *Environmental Pollution* 141, 359-369.

- Viers, J., Dupré, B., Gaillardet, J. (2009) Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database. *Science of The Total Environment* 407, 853-868.
- Wang, Y., Hu, J., Xiong, K., Huang, X., Duan, S. (2012) Distribution of heavy metals in core sediments from Baihua Lake. *Procedia Environmental Sciences* 16, 51-58.
- Wang, Y., Yang, L., Kong, L., Liu, E., Wang, L., Zhu, J.J.C. (2015) Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China. 125, 200-205.
- Warren, L.A., Haack, E.A. (2001) Biogeochemical controls on metal behaviour in freshwater environments. *Earth-Science Reviews* 54, 261-320.
- Wedepohl, K.H. (1995) The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 1217-1232.
- Wenning, R.J. (2005) Use of sediment quality guidelines and related tools for the assessment of contaminated sediments. SETAC.
- WHO (1996) Biological monitoring of chemical exposure in the workplace: guidelines. World Health Organization, Geneva.
- WHO (2004) Guidelines for drinking-water quality. Geneva. World Health Organization.
- Xu, Z.Q., Ni, S.J., Tuo, X., Zhang, C.J. (2008) Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. *Environ Sci Technol* 31, 112-115.
- Yiğiterhan, O., Murray, J.W., Tuğrul, S. (2011) Trace metal composition of suspended particulate matter in the water column of the Black Sea. *Marine Chemistry* 126, 207-228.
- Yoshida, M., Moali, M., Houas, O., Lakhdari, M. (2007) Concentration de l'élément potentiellement toxique dans les sédiments dans la Baie d'Alger. *Compte Rendu des Ateliers et Séminaire conjoints Algérie Japon sur les normes de qualité et les efforts de protection de l'environnement*, Alger, 96-106.
- Yoshida, M., Moali, M., Houas, O., Lakhdari, M., Nechaoui, L., Guerrida, D., Chatal, A., Oussalem, S., Makour, F., Khelifi, F. (2005) Environmental Pollution in Oued El Harrach area, Alger. A preliminary report on mercury and heavy metals contaminations. *Compte-Rendu du Séminaire sur les «Pollution et Protection de l'Environnement en Algérie»*, Alger 5, 19-37.
- Ytreberg, E., Eriksson, M., Maljutenko, I., Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Hassellöv, I.-M., Granhag, L. (2020) Environmental impacts of grey water discharge from ships in the Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin* 152, 110891.
- Zabetoglou, K., Voutsas, D., Samara, C. (2002) Toxicity and heavy metal contamination of surficial sediments from the Bay of Thessaloniki (Northwestern Aegean Sea) Greece. *Chemosphere* 49, 17-26.
- Zhang, C., Wang, L., Li, G., Dong, S., Yang, J., Wang, X. (2002) Grain size effect on multi-element concentrations in sediments from the intertidal flats of Bohai Bay, China. *Applied Geochemistry* 17, 59-68.
- Zhang, J., Huang, W.W., Liu, M.G., Zhou, Q. (1990) Drainage basin weathering and major element transport of two large Chinese rivers (Huanghe and Changjiang). *Journal of Geophysical Research: Oceans* 95, 13277-13288.
- Zhang, J., Liu, C. (2002) Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China—weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuarine, coastal and shelf science* 54, 1051-1070.

# ANNEXES

## ANNEXE

**Tableau 0.1** : Les valeurs du coefficient de distribution du log  $K_d$  dans l'oued El Harrach.

| Date           | Fe (L/kg)   | Mn (L/kg)   | Pb (L/kg)   | Cr (L/kg)   | Co (L/kg)   | Ni (L/kg)   | Cu (L/kg)   | Zn (L/kg)   | As (L/kg)   | Cd (L/kg)   | V (L/kg)    |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 08/10/2017     | 5,33        | 3,15        | 3,30        | 4,70        | 3,53        | 2,48        | 4,08        | 3,11        | 3,20        | 3,79        | 3,22        |
| 08/29/2017     | 5,07        | 3,29        | 4,90        | 4,66        | 3,99        | 3,04        | 5,52        | 4,02        | 4,10        | 4,71        | 4,31        |
| 09/11/2017     | 4,91        | 3,08        | 4,23        | 4,95        | 3,68        | 3,12        | 4,18        | 2,99        | 3,56        | 3,51        | 4,43        |
| 09/25/2017     | 4,99        | 3,13        | 4,36        | 4,51        | 3,96        | 2,89        | 4,54        | 3,79        | 3,81        | 3,22        | 4,14        |
| 10/10/2017     | 5,46        | 3,54        | 5,05        | 5,04        | 4,26        | 4,11        | 4,87        | 3,84        | 3,94        | 4,11        | 4,95        |
| 10/23/2017     | 4,54        | 3,05        | 3,98        | 4,90        | 3,47        | 1,69        | 4,14        | 3,57        | 3,79        | 3,13        | 3,99        |
| 11/06/2017     | 5,44        | 3,38        | 4,68        | 5,41        | 3,97        | 3,84        | 4,16        | 4,21        | 3,51        | 4,12        | 4,62        |
| 11/13/2017     | 5,25        | 3,43        | 5,59        | 5,31        | 3,88        | 4,06        | 5,27        | 3,74        | 3,67        | 5,12        | 4,58        |
| 12/18/2017     | 5,44        | 3,76        | 5,33        | 5,27        | 4,16        | 4,39        | 5,16        | 4,49        | 4,04        | 4,94        | 4,92        |
| 12/28/2017     | 5,54        | 3,32        | 4,27        | 5,39        | 3,93        | 4,06        | 3,98        | 2,81        | 3,67        | 4,11        | 5,00        |
| 01/18/2018     | 4,74        | 3,41        | 5,02        | 4,59        | 4,06        | 3,64        | 4,76        | 4,53        | 3,71        | 4,47        | 4,86        |
| 01/29/2018     | 4,63        | 3,23        | 5,01        | 4,76        | 4,06        | 3,72        | 4,72        | 4,47        | 3,94        | 4,52        | 4,58        |
| 02/08/2018     | 5,08        | 3,31        | 5,19        | 4,97        | 3,95        | 3,91        | 4,83        | 4,56        | 3,42        | 4,40        | 4,63        |
| 02/22/2018     | 5,82        | 3,16        | 5,56        | 5,59        | 3,98        | 4,35        | 4,65        | 4,55        | 3,75        | 4,16        | 4,79        |
| 03/05/2018     | 4,53        | 3,36        | 4,78        | 4,67        | 3,76        | 3,79        | 4,54        | 4,08        | 3,51        | 4,26        | 4,45        |
| 03/27/2018     | 6,47        | 3,69        | 5,71        | 5,94        | 4,21        | 4,50        | 4,97        | 5,01        | 3,93        | 5,06        | 5,17        |
| 04/10/2018     | 4,89        | 3,27        | 5,66        | 4,60        | 4,20        | 4,30        | 5,57        | 5,01        | 3,77        | 5,50        | 5,05        |
| 04/16/2018     | 6,52        | 3,80        | 5,46        | 5,81        | 4,33        | 4,53        | 4,83        | 4,72        | 4,01        | 4,78        | 5,29        |
| 05/10/2018     | 4,72        | 3,15        | 5,20        | 4,82        | 4,01        | 3,94        | 5,34        | 4,63        | 3,68        | 4,83        | 4,80        |
| 05/28/2018     | 5,40        | 3,31        | 5,43        | 5,36        | 4,03        | 4,37        | 3,97        | 4,63        | 3,60        | 4,61        | 4,85        |
| 06/10/2018     | 5,06        | 3,18        | 3,44        | 5,04        | 4,32        | 4,27        | 5,87        | 4,38        | 4,01        | 4,81        | 5,07        |
| 06/26/2018     | 4,77        | 3,17        | 5,01        | 4,66        | 4,06        | 3,84        | 5,24        | 4,30        | 3,59        | 4,50        | 4,67        |
| 07/16/2018     | 5,28        | 3,42        | 5,41        | 5,11        | 4,18        | 4,08        | 5,72        | 5,35        | 3,73        | 4,63        | 4,86        |
| 07/26/2018     | 5,15        | 3,41        | 5,26        | 5,09        | 4,17        | 4,01        | 5,77        | 4,85        | 3,81        | 4,64        | 4,93        |
| <b>Moyenne</b> | <b>5,21</b> | <b>3,33</b> | <b>4,91</b> | <b>5,05</b> | <b>4,01</b> | <b>3,79</b> | <b>4,86</b> | <b>4,23</b> | <b>3,74</b> | <b>4,41</b> | <b>4,67</b> |

**Tableau 0.2 :** Les valeurs du coefficient de distribution du log  $K_d$  dans l'oued Mazafran.

| Date           | Fe (L/kg)   | Mn (L/kg)   | Pb (L/kg)   | Cr (L/kg)   | Co (L/kg)   | Ni (L/kg)   | Cu (L/kg)   | Zn (L/kg)   | As (L/kg)   | Cd (L/kg)   | V (L/kg)    |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 08/10/2017     | 5,16        | 3,08        | 4,08        | 4,18        | 3,48        | 3,24        | 5,05        | 2,80        | 3,04        | 3,89        | 3,28        |
| 08/29/2017     | 4,65        | 3,50        | 4,13        | 4,10        | 3,92        | 1,94        | 4,62        | 3,19        | 3,90        | 3,30        | 4,14        |
| 09/11/2017     | 5,23        | 3,16        | 5,19        | 4,80        | 3,83        | 3,97        | 4,90        | 4,24        | 3,45        | 5,24        | 4,80        |
| 09/25/2017     | 5,48        | 3,04        | 5,04        | 4,44        | 4,00        | 3,56        | 5,00        | 4,28        | 3,29        | 4,36        | 4,34        |
| 10/10/2017     | 5,12        | 3,39        | 4,60        | 4,17        | 3,67        | 2,30        | 4,32        | 3,06        | 3,15        | 3,39        | 3,91        |
| 10/23/2017     | 4,90        | 2,86        | 3,83        | 3,99        | 3,69        | 3,13        | 4,60        | 3,34        | 3,77        | 3,07        | 3,80        |
| 11/06/2017     | 5,33        | 3,23        | 4,51        | 5,41        | 3,98        | 3,88        | 4,14        | 3,67        | 3,44        | 3,51        | 5,11        |
| 11/13/2017     | 5,28        | 3,42        | 5,31        | 5,03        | 4,19        | 3,80        | 5,46        | 3,21        | 3,83        | 4,62        | 4,58        |
| 12/18/2017     | 5,00        | 3,45        | 5,20        | 4,98        | 4,12        | 4,20        | 5,34        | 3,57        | 3,95        | 4,77        | 4,76        |
| 12/28/2017     | 5,29        | 3,35        | 4,93        | 5,10        | 3,84        | 4,08        | 4,79        | 3,46        | 3,62        | 4,46        | 4,74        |
| 01/18/2018     | 4,96        | 3,40        | 4,86        | 4,83        | 3,96        | 3,91        | 4,75        | 4,22        | 3,73        | 4,14        | 4,74        |
| 01/29/2018     | 4,74        | 3,35        | 4,72        | 4,51        | 3,89        | 3,70        | 4,63        | 4,02        | 3,46        | 4,44        | 4,51        |
| 02/08/2018     | 4,91        | 3,43        | 4,82        | 4,53        | 4,00        | 3,75        | 4,44        | 4,33        | 3,59        | 4,57        | 4,61        |
| 02/22/2018     | 5,77        | 3,16        | 5,22        | 5,64        | 4,03        | 4,37        | 4,65        | 4,30        | 3,67        | 4,64        | 4,96        |
| 03/05/2018     | 4,96        | 3,24        | 5,15        | 5,02        | 4,04        | 4,10        | 5,02        | 4,47        | 3,52        | 4,67        | 4,67        |
| 03/27/2018     | 6,37        | 3,56        | 5,35        | 5,72        | 4,04        | 4,33        | 4,66        | 5,02        | 3,82        | 4,60        | 5,13        |
| 04/10/2018     | 5,12        | 3,26        | 5,54        | 4,98        | 4,12        | 4,12        | 5,61        | 4,88        | 3,57        | 5,64        | 4,74        |
| 04/16/2018     | 6,44        | 4,31        | 5,49        | 5,81        | 4,47        | 4,48        | 4,48        | 4,47        | 4,09        | 4,67        | 5,45        |
| 05/10/2018     | 5,31        | 3,34        | 5,58        | 5,00        | 4,12        | 3,96        | 5,28        | 4,85        | 3,48        | 5,13        | 4,73        |
| 05/28/2018     | 5,51        | 3,13        | 5,55        | 5,35        | 4,10        | 4,32        | 5,24        | 4,86        | 3,49        | 4,90        | 4,89        |
| 06/10/2018     | 5,15        | 3,05        | 5,33        | 5,22        | 4,11        | 4,13        | 5,47        | 4,66        | 3,51        | 4,90        | 4,77        |
| 06/26/2018     | 4,95        | 2,96        | 5,15        | 4,68        | 3,90        | 3,77        | 5,68        | 4,23        | 3,60        | 4,56        | 4,55        |
| 07/16/2018     | 5,09        | 2,83        | 5,53        | 4,38        | 3,80        | 3,66        | 5,47        | 4,75        | 2,95        | 4,82        | 4,31        |
| 07/26/2018     | 5,06        | 2,91        | 5,45        | 4,74        | 4,03        | 3,82        | 6,25        | 5,00        | 3,62        | 4,78        | 4,69        |
| <b>Moyenne</b> | <b>5,24</b> | <b>3,27</b> | <b>5,02</b> | <b>4,86</b> | <b>3,97</b> | <b>3,77</b> | <b>4,99</b> | <b>4,12</b> | <b>3,57</b> | <b>4,46</b> | <b>4,59</b> |

**Tableau 0.3** : Les valeurs de l'indice de géo-accumulation (Igeo) dans l'oued El Harrach.

| Date           | Fe           | Mn           | Pb           | Cr           | Co           | Ni           | Cu          | Zn          | As           | Cd           | V            |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 08/10/2017     | -3,52        | -2,51        | -1,07        | -1,88        | -3,49        | -4,78        | -0,14       | 0,19        | -2,25        | -1,01        | -7,28        |
| 08/29/2017     | -2,53        | -1,86        | -0,73        | -2,24        | -2,29        | -2,78        | 0,26        | 0,53        | -1,77        | -1,07        | -3,85        |
| 09/11/2017     | -1,59        | -1,14        | 0,27         | -0,45        | -1,37        | -1,63        | 0,65        | 1,58        | -0,78        | -0,21        | -2,45        |
| 09/25/2017     | -2,62        | -1,89        | -0,67        | -1,60        | -1,95        | -2,88        | 0,56        | 1,64        | -1,55        | -0,85        | -3,99        |
| 10/10/2017     | -1,22        | -0,78        | -0,20        | -0,40        | -0,86        | -0,48        | 0,63        | 1,22        | -1,11        | -1,26        | -1,64        |
| 10/23/2017     | -2,85        | -2,01        | -0,87        | -0,18        | -2,04        | -0,65        | 0,87        | 1,46        | -1,40        | -0,40        | -4,22        |
| 11/06/2017     | -1,20        | -0,69        | 0,38         | 0,16         | -0,99        | -1,00        | 0,67        | 1,88        | -0,63        | 0,96         | -1,65        |
| 11/13/2017     | -1,21        | -0,35        | 2,01         | 0,23         | -0,92        | -0,88        | 0,95        | 2,52        | -0,46        | -0,20        | -1,57        |
| 12/18/2017     | -1,05        | 0,51         | 0,86         | 0,05         | -0,51        | -0,44        | 1,14        | 1,73        | 0,58         | 0,51         | -0,70        |
| 12/28/2017     | -1,84        | -0,99        | -0,52        | -0,56        | -1,00        | -0,97        | -0,65       | -0,10       | -1,09        | -1,54        | -0,67        |
| 01/18/2018     | -2,38        | -1,08        | -0,31        | 0,09         | -1,70        | -1,49        | 0,49        | 1,07        | -1,58        | -0,04        | -2,09        |
| 01/29/2018     | -2,90        | -1,55        | 1,26         | 0,11         | -1,89        | -1,89        | 2,22        | 2,14        | -1,54        | 0,39         | -2,59        |
| 02/08/2018     | -2,45        | -1,40        | -0,02        | -0,82        | -1,86        | -1,75        | 0,36        | 0,71        | -1,67        | 0,61         | -2,13        |
| 02/22/2018     | -1,02        | -0,54        | 0,59         | -0,67        | -0,71        | -0,57        | 0,04        | 0,86        | -0,56        | -0,36        | -0,84        |
| 03/05/2018     | -3,30        | -0,97        | -0,88        | -1,24        | -2,27        | -2,34        | -0,14       | -0,02       | -1,97        | 0,32         | -2,68        |
| 03/27/2018     | -1,25        | -0,84        | -0,56        | -0,75        | -0,96        | -0,92        | -0,77       | 0,05        | -1,16        | -1,80        | -0,89        |
| 04/10/2018     | -2,23        | -1,71        | 0,37         | -0,15        | -1,46        | -1,39        | 1,22        | 1,66        | -1,13        | 0,67         | -1,82        |
| 04/16/2018     | -1,13        | -0,58        | -1,06        | -0,73        | -0,74        | -0,80        | -0,84       | -0,47       | -0,99        | -2,14        | -0,80        |
| 05/10/2018     | -2,97        | -1,84        | -1,15        | -0,45        | -2,19        | -2,29        | 1,01        | 0,63        | -2,02        | -0,95        | -2,68        |
| 05/28/2018     | -1,21        | -0,68        | 0,43         | -0,36        | -0,97        | -0,87        | 0,04        | 1,15        | -0,66        | -0,68        | -1,09        |
| 06/10/2018     | -1,95        | -1,30        | -0,67        | -1,08        | -1,15        | -1,30        | -0,37       | -0,04       | -1,44        | -1,63        | -1,27        |
| 06/26/2018     | -2,98        | -2,17        | -1,26        | -1,25        | -2,15        | -2,11        | -0,31       | 0,83        | -2,44        | -1,49        | -2,58        |
| 07/16/2018     | -1,77        | -1,22        | -0,28        | 0,38         | -1,06        | -1,16        | 0,31        | 2,73        | -1,10        | -1,22        | -1,27        |
| 07/26/2018     | -2,05        | -1,35        | -0,68        | -0,63        | -1,40        | -1,39        | 0,21        | 0,83        | -1,53        | -1,37        | -1,63        |
| <b>Moyenne</b> | <b>-2,05</b> | <b>-1,21</b> | <b>-0,20</b> | <b>-0,60</b> | <b>-1,50</b> | <b>-1,53</b> | <b>0,35</b> | <b>1,03</b> | <b>-1,26</b> | <b>-0,61</b> | <b>-2,18</b> |

**Tableau 0.4** : Les valeurs de l'indice de géo-accumulation (Igeo) dans l'oued Mazafran.

| Date           | Fe           | Mn           | Pb           | Cr           | Co           | Ni           | Cu          | Zn          | As           | Cd           | V            |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 08/10/2017     | -3,61        | -2,03        | -1,63        | -3,78        | -3,29        | -2,97        | 0,08        | 0,16        | -2,45        | -1,07        | -7,02        |
| 08/29/2017     | -3,28        | -0,89        | -0,71        | -3,28        | -1,75        | -2,56        | 0,97        | 0,41        | -1,81        | -1,11        | -4,10        |
| 09/11/2017     | -1,09        | -0,92        | 0,09         | -1,11        | -1,02        | -0,83        | 0,85        | 0,91        | -0,22        | -0,54        | -1,52        |
| 09/25/2017     | -2,55        | -2,18        | -0,80        | -2,59        | -2,30        | -2,46        | 1,05        | 0,62        | -1,74        | -0,50        | -3,25        |
| 10/10/2017     | -3,17        | -0,61        | -1,00        | -2,27        | -2,09        | -1,83        | 0,41        | 0,23        | -1,90        | -1,45        | -4,52        |
| 10/23/2017     | -2,40        | -2,03        | -0,60        | -2,43        | -1,94        | -1,96        | 1,05        | 0,71        | -1,61        | -1,30        | -4,02        |
| 11/06/2017     | -1,05        | -0,49        | 0,12         | -0,55        | -0,47        | -0,53        | 0,74        | 0,77        | -0,44        | -0,80        | -0,72        |
| 11/13/2017     | -0,38        | -0,22        | 0,74         | -0,90        | -0,32        | 0,04         | 2,00        | 1,84        | 0,46         | -1,01        | -1,37        |
| 12/18/2017     | -1,10        | -0,02        | 1,04         | -0,78        | -0,38        | -0,59        | 1,25        | 1,40        | 0,04         | -0,29        | -0,98        |
| 12/28/2017     | -1,64        | -0,74        | -0,25        | -1,21        | -1,41        | -1,26        | 0,01        | 0,08        | -0,77        | -1,76        | -1,30        |
| 01/18/2018     | -2,04        | -0,78        | -0,37        | -1,44        | -1,48        | -1,53        | 0,10        | 0,04        | -0,70        | -1,75        | -1,52        |
| 01/29/2018     | -2,39        | -0,74        | -0,25        | -1,82        | -1,71        | -1,68        | 0,83        | 0,40        | -1,30        | -1,14        | -2,29        |
| 02/08/2018     | -1,78        | -0,84        | 0,06         | -1,31        | -1,37        | -1,26        | 0,70        | 0,72        | -0,79        | -1,07        | -1,80        |
| 02/22/2018     | -1,34        | -1,21        | -0,02        | -0,30        | -0,51        | -0,51        | 0,03        | 0,00        | -0,25        | -1,87        | -0,32        |
| 03/05/2018     | -1,67        | -0,96        | 0,61         | -1,40        | -1,18        | -1,33        | 0,52        | 0,81        | -0,92        | -1,27        | -1,68        |
| 03/27/2018     | -1,27        | -1,05        | -0,89        | -0,60        | -0,77        | -0,79        | -0,98       | -0,31       | -1,15        | -2,00        | -0,62        |
| 04/10/2018     | -1,83        | -1,46        | 1,32         | -0,74        | -1,33        | -0,86        | 2,69        | 1,43        | -1,17        | 3,55         | -1,67        |
| 04/16/2018     | -1,10        | -0,64        | -1,00        | -0,58        | -0,57        | -0,68        | -1,01       | -0,42       | -1,14        | -2,08        | -0,57        |
| 05/10/2018     | -1,83        | -1,16        | 0,83         | -1,35        | -1,60        | -1,27        | 2,59        | 0,75        | -1,44        | 4,15         | -1,71        |
| 05/28/2018     | -1,20        | -1,01        | 0,18         | -0,68        | -0,52        | -0,67        | 0,36        | 0,34        | -0,36        | -1,31        | -0,78        |
| 06/10/2018     | -1,95        | -1,60        | -0,04        | -1,44        | -1,39        | -1,54        | 0,13        | -0,26       | -0,95        | -1,74        | -1,45        |
| 06/26/2018     | -2,46        | -1,85        | -0,64        | -2,01        | -1,89        | -1,56        | 0,24        | 0,23        | -1,67        | -1,64        | -2,31        |
| 07/16/2018     | -3,77        | -2,45        | -0,75        | -2,41        | -2,47        | -2,02        | 0,30        | 0,84        | -2,49        | -2,00        | -3,54        |
| 07/26/2018     | -2,75        | -2,32        | -0,08        | -1,76        | -1,75        | -1,26        | 0,96        | 0,82        | -1,99        | -0,27        | -2,41        |
| <b>Moyenne</b> | <b>-1,98</b> | <b>-1,17</b> | <b>-0,17</b> | <b>-1,53</b> | <b>-1,40</b> | <b>-1,33</b> | <b>0,66</b> | <b>0,52</b> | <b>-1,11</b> | <b>-0,84</b> | <b>-2,14</b> |

**Tableau 0.5** : Les valeurs facteur d'enrichissement (FE) dans l'oued El Harrach.

| Date           | Mn          | Pb          | Cr          | Co          | Ni          | Cu          | Zn           | As          | Cd          | V           |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 08/10/2017     | 2,02        | 5,45        | 3,10        | 1,02        | 0,42        | 10,40       | 13,05        | 2,41        | 5,70        | 0,07        |
| 08/29/2017     | 1,59        | 3,47        | 1,22        | 1,18        | 0,84        | 6,90        | 8,35         | 1,69        | 2,74        | 0,40        |
| 09/11/2017     | 1,37        | 3,62        | 2,20        | 1,16        | 0,97        | 4,73        | 9,03         | 1,75        | 2,61        | 0,55        |
| 09/25/2017     | 1,65        | 3,86        | 2,02        | 1,58        | 0,83        | 9,07        | 19,07        | 2,10        | 3,41        | 0,38        |
| 10/10/2017     | 1,35        | 2,02        | 1,76        | 1,28        | 1,67        | 3,61        | 5,43         | 1,08        | 0,97        | 0,74        |
| 10/23/2017     | 1,78        | 3,93        | 6,36        | 1,76        | 4,59        | 13,17       | 19,83        | 2,73        | 5,46        | 0,39        |
| 11/06/2017     | 1,42        | 2,97        | 2,56        | 1,15        | 1,14        | 3,65        | 8,44         | 1,48        | 4,46        | 0,73        |
| 11/13/2017     | 1,83        | 9,35        | 2,72        | 1,23        | 1,26        | 4,47        | 13,31        | 1,69        | 2,02        | 0,78        |
| 12/18/2017     | 2,95        | 3,76        | 2,14        | 1,46        | 1,52        | 4,56        | 6,87         | 3,10        | 2,95        | 1,27        |
| 12/28/2017     | 1,81        | 2,50        | 2,43        | 1,79        | 1,83        | 2,29        | 3,35         | 1,68        | 1,23        | 2,25        |
| 01/18/2018     | 2,45        | 4,21        | 5,55        | 1,60        | 1,86        | 7,33        | 10,91        | 1,74        | 5,05        | 1,22        |
| 01/29/2018     | 2,56        | 17,87       | 8,09        | 2,02        | 2,01        | 34,86       | 32,98        | 2,57        | 9,77        | 1,24        |
| 02/08/2018     | 2,07        | 5,41        | 3,10        | 1,50        | 1,63        | 7,03        | 8,97         | 1,72        | 8,38        | 1,25        |
| 02/22/2018     | 1,39        | 3,05        | 1,27        | 1,23        | 1,37        | 2,07        | 3,67         | 1,37        | 1,57        | 1,13        |
| 03/05/2018     | 5,02        | 5,34        | 4,16        | 2,04        | 1,94        | 8,93        | 9,68         | 2,51        | 12,29       | 1,53        |
| 03/27/2018     | 1,32        | 1,61        | 1,41        | 1,22        | 1,25        | 1,39        | 2,46         | 1,06        | 0,68        | 1,28        |
| 04/10/2018     | 1,42        | 6,03        | 4,21        | 1,70        | 1,78        | 10,87       | 14,75        | 2,14        | 7,45        | 1,32        |
| 04/16/2018     | 1,47        | 1,05        | 1,32        | 1,31        | 1,26        | 1,22        | 1,58         | 1,10        | 0,50        | 1,25        |
| 05/10/2018     | 2,20        | 3,52        | 5,73        | 1,72        | 1,61        | 15,85       | 12,10        | 1,93        | 4,07        | 1,22        |
| 05/28/2018     | 1,44        | 3,11        | 1,80        | 1,18        | 1,26        | 2,38        | 5,12         | 1,46        | 1,44        | 1,08        |
| 06/10/2018     | 1,57        | 2,42        | 1,83        | 1,75        | 1,57        | 3,00        | 3,77         | 1,42        | 1,25        | 1,60        |
| 06/26/2018     | 1,75        | 3,30        | 3,33        | 1,78        | 1,83        | 6,37        | 14,04        | 1,45        | 2,82        | 1,32        |
| 07/16/2018     | 1,47        | 2,80        | 4,44        | 1,64        | 1,53        | 4,22        | 22,59        | 1,59        | 1,46        | 1,41        |
| 07/26/2018     | 1,63        | 2,60        | 2,69        | 1,57        | 1,58        | 4,81        | 7,38         | 1,44        | 1,61        | 1,34        |
| <b>Moyenne</b> | <b>1,90</b> | <b>4,30</b> | <b>3,14</b> | <b>1,49</b> | <b>1,57</b> | <b>7,22</b> | <b>10,70</b> | <b>1,80</b> | <b>3,75</b> | <b>1,07</b> |

**Tableau 0.6** : Les valeurs facteur d'enrichissement (FE) dans l'oued Mazafran.

| Date           | Mn   | Pb   | Cr   | Co   | Ni   | Cu    | Zn    | As   | Cd    | V    |
|----------------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|
| 08/10/2017     | 3,00 | 3,94 | 0,89 | 1,25 | 1,56 | 12,95 | 13,69 | 2,24 | 5,83  | 0,09 |
| 08/29/2017     | 5,23 | 5,94 | 1,00 | 2,88 | 1,64 | 19,00 | 12,92 | 2,76 | 4,49  | 0,56 |
| 09/11/2017     | 1,13 | 2,26 | 0,99 | 1,05 | 1,20 | 3,83  | 4,00  | 1,82 | 1,47  | 0,74 |
| 09/25/2017     | 1,29 | 3,35 | 0,97 | 1,18 | 1,06 | 12,07 | 8,97  | 1,75 | 4,14  | 0,62 |
| 10/10/2017     | 5,87 | 4,49 | 1,86 | 2,11 | 2,53 | 11,89 | 10,50 | 2,40 | 3,29  | 0,39 |
| 10/23/2017     | 1,29 | 3,47 | 0,98 | 1,38 | 1,36 | 10,92 | 8,65  | 1,73 | 2,15  | 0,33 |
| 11/06/2017     | 1,48 | 2,25 | 1,41 | 1,49 | 1,44 | 3,45  | 3,53  | 1,53 | 1,19  | 1,25 |
| 11/13/2017     | 1,11 | 2,17 | 0,70 | 1,04 | 1,33 | 5,20  | 4,66  | 1,79 | 0,65  | 0,50 |
| 12/18/2017     | 2,12 | 4,41 | 1,25 | 1,65 | 1,42 | 5,11  | 5,66  | 2,20 | 1,75  | 1,09 |
| 12/28/2017     | 1,87 | 2,63 | 1,35 | 1,18 | 1,31 | 3,16  | 3,30  | 1,84 | 0,92  | 1,27 |
| 01/18/2018     | 2,40 | 3,19 | 1,51 | 1,47 | 1,42 | 4,42  | 4,23  | 2,54 | 1,22  | 1,44 |
| 01/29/2018     | 3,13 | 4,39 | 1,48 | 1,59 | 1,63 | 9,30  | 6,88  | 2,12 | 2,38  | 1,07 |
| 02/08/2018     | 1,92 | 3,59 | 1,39 | 1,33 | 1,43 | 5,60  | 5,68  | 1,99 | 1,63  | 0,99 |
| 02/22/2018     | 1,09 | 2,49 | 2,05 | 1,78 | 1,78 | 2,59  | 2,54  | 2,14 | 0,69  | 2,03 |
| 03/05/2018     | 1,64 | 4,85 | 1,20 | 1,40 | 1,26 | 4,54  | 5,56  | 1,68 | 1,32  | 0,99 |
| 03/27/2018     | 1,17 | 1,30 | 1,59 | 1,41 | 1,39 | 1,22  | 1,95  | 1,09 | 0,61  | 1,58 |
| 04/10/2018     | 1,29 | 8,86 | 2,12 | 1,41 | 1,95 | 22,84 | 9,56  | 1,58 | 41,52 | 1,11 |
| 04/16/2018     | 1,38 | 1,07 | 1,43 | 1,44 | 1,34 | 1,06  | 1,60  | 0,97 | 0,51  | 1,45 |
| 05/10/2018     | 1,59 | 6,32 | 1,39 | 1,17 | 1,47 | 21,29 | 5,94  | 1,31 | 62,80 | 1,09 |
| 05/28/2018     | 1,15 | 2,61 | 1,44 | 1,61 | 1,45 | 2,95  | 2,92  | 1,80 | 0,93  | 1,35 |
| 06/10/2018     | 1,27 | 3,77 | 1,42 | 1,47 | 1,33 | 4,23  | 3,23  | 2,00 | 1,15  | 1,42 |
| 06/26/2018     | 1,53 | 3,54 | 1,37 | 1,49 | 1,87 | 6,52  | 6,45  | 1,74 | 1,77  | 1,11 |
| 07/16/2018     | 2,49 | 8,13 | 2,57 | 2,46 | 3,36 | 16,77 | 24,38 | 2,44 | 3,42  | 1,18 |
| 07/26/2018     | 1,35 | 6,35 | 1,99 | 2,00 | 2,80 | 13,01 | 11,80 | 1,69 | 5,57  | 1,26 |
| <b>Moyenne</b> | 1,99 | 3,97 | 1,43 | 1,55 | 1,64 | 8,50  | 7,03  | 1,88 | 6,31  | 1,04 |

**Tableau 0.7** : Les valeurs de facteur de contamination (CF) et l'indice de charge polluante (PLI) dans l'oued El Harrach.

| Date           | CF   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | PLI         |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
|                | Fe   | Mn   | Pb   | Cr   | Co   | Ni   | Cu   | Zn   | As   | Cd   | V    |             |
| 10/08/2017     | 0,13 | 0,26 | 0,71 | 0,41 | 0,13 | 0,05 | 1,36 | 1,71 | 0,32 | 0,75 | 0,01 | <b>0,26</b> |
| 29/08/2017     | 0,26 | 0,41 | 0,90 | 0,32 | 0,31 | 0,22 | 1,80 | 2,17 | 0,44 | 0,71 | 0,10 | <b>0,47</b> |
| 11/09/2017     | 0,50 | 0,68 | 1,80 | 1,09 | 0,58 | 0,48 | 2,36 | 4,50 | 0,87 | 1,30 | 0,27 | <b>0,96</b> |
| 25/09/2017     | 0,24 | 0,40 | 0,94 | 0,49 | 0,39 | 0,20 | 2,22 | 4,67 | 0,51 | 0,83 | 0,09 | <b>0,55</b> |
| 10/10/2017     | 0,64 | 0,87 | 1,31 | 1,14 | 0,83 | 1,07 | 2,33 | 3,50 | 0,70 | 0,63 | 0,48 | <b>1,02</b> |
| 23/10/2017     | 0,21 | 0,37 | 0,82 | 1,32 | 0,37 | 0,96 | 2,74 | 4,13 | 0,57 | 1,14 | 0,08 | <b>0,69</b> |
| 06/11/2017     | 0,65 | 0,93 | 1,95 | 1,67 | 0,76 | 0,75 | 2,39 | 5,53 | 0,97 | 2,92 | 0,48 | <b>1,31</b> |
| 13/11/2017     | 0,65 | 1,18 | 6,04 | 1,76 | 0,79 | 0,81 | 2,89 | 8,60 | 1,09 | 1,31 | 0,50 | <b>1,51</b> |
| 18/12/2017     | 0,73 | 2,14 | 2,73 | 1,55 | 1,06 | 1,11 | 3,31 | 4,98 | 2,25 | 2,14 | 0,92 | <b>1,78</b> |
| 28/12/2017     | 0,42 | 0,76 | 1,05 | 1,02 | 0,75 | 0,77 | 0,96 | 1,40 | 0,70 | 0,52 | 0,94 | <b>0,80</b> |
| 18/01/2018     | 0,29 | 0,71 | 1,21 | 1,60 | 0,46 | 0,53 | 2,11 | 3,15 | 0,50 | 1,46 | 0,35 | <b>0,85</b> |
| 29/01/2018     | 0,20 | 0,51 | 3,59 | 1,62 | 0,40 | 0,40 | 6,99 | 6,62 | 0,52 | 1,96 | 0,25 | <b>1,01</b> |
| 08/02/2018     | 0,27 | 0,57 | 1,48 | 0,85 | 0,41 | 0,45 | 1,93 | 2,46 | 0,47 | 2,30 | 0,34 | <b>0,78</b> |
| 22/02/2018     | 0,74 | 1,03 | 2,26 | 0,94 | 0,91 | 1,01 | 1,54 | 2,72 | 1,02 | 1,17 | 0,84 | <b>1,18</b> |
| 05/03/2018     | 0,15 | 0,76 | 0,81 | 0,63 | 0,31 | 0,30 | 1,36 | 1,48 | 0,38 | 1,87 | 0,23 | <b>0,56</b> |
| 27/03/2018     | 0,63 | 0,84 | 1,02 | 0,89 | 0,77 | 0,79 | 0,88 | 1,55 | 0,67 | 0,43 | 0,81 | <b>0,81</b> |
| 10/04/2018     | 0,32 | 0,46 | 1,94 | 1,35 | 0,55 | 0,57 | 3,49 | 4,73 | 0,69 | 2,39 | 0,42 | <b>1,03</b> |
| 16/04/2018     | 0,69 | 1,01 | 0,72 | 0,90 | 0,90 | 0,86 | 0,84 | 1,08 | 0,75 | 0,34 | 0,86 | <b>0,78</b> |
| 10/05/2018     | 0,19 | 0,42 | 0,67 | 1,10 | 0,33 | 0,31 | 3,03 | 2,31 | 0,37 | 0,78 | 0,23 | <b>0,59</b> |
| 28/05/2018     | 0,65 | 0,93 | 2,02 | 1,17 | 0,77 | 0,82 | 1,55 | 3,33 | 0,95 | 0,94 | 0,70 | <b>1,10</b> |
| 10/06/2018     | 0,39 | 0,61 | 0,94 | 0,71 | 0,68 | 0,61 | 1,16 | 1,46 | 0,55 | 0,49 | 0,62 | <b>0,70</b> |
| 27/06/2018     | 0,19 | 0,33 | 0,63 | 0,63 | 0,34 | 0,35 | 1,21 | 2,66 | 0,28 | 0,54 | 0,25 | <b>0,49</b> |
| 16/07/2018     | 0,44 | 0,65 | 1,23 | 1,95 | 0,72 | 0,67 | 1,86 | 9,93 | 0,70 | 0,64 | 0,62 | <b>1,05</b> |
| 26/07/2018     | 0,36 | 0,59 | 0,94 | 0,97 | 0,57 | 0,57 | 1,74 | 2,67 | 0,52 | 0,58 | 0,48 | <b>0,75</b> |
| <b>Moyenne</b> | 0,41 | 0,73 | 1,57 | 1,09 | 0,59 | 0,61 | 2,17 | 3,64 | 0,70 | 1,17 | 0,45 | <b>0,88</b> |

Tableau 0.8 : Les valeurs de facteur de contamination (CF) et l'indice de charge polluante (PLI) dans l'oued Mazafran.

| Date           | CF   |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      | PLI         |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------------|
|                | Fe   | Mn   | Pb   | Cr   | Co   | Ni   | Cu   | Zn   | As   | Cd    | V    |             |
| 10/08/2017     | 0,12 | 0,37 | 0,48 | 0,11 | 0,15 | 0,19 | 1,59 | 1,68 | 0,27 | 0,71  | 0,01 | <b>0,26</b> |
| 29/08/2017     | 0,15 | 0,81 | 0,92 | 0,15 | 0,45 | 0,25 | 2,94 | 2,00 | 0,43 | 0,69  | 0,09 | <b>0,48</b> |
| 11/09/2017     | 0,71 | 0,79 | 1,60 | 0,70 | 0,74 | 0,85 | 2,70 | 2,83 | 1,29 | 1,03  | 0,52 | <b>1,07</b> |
| 25/09/2017     | 0,26 | 0,33 | 0,86 | 0,25 | 0,30 | 0,27 | 3,10 | 2,30 | 0,45 | 1,06  | 0,16 | <b>0,52</b> |
| 10/10/2017     | 0,17 | 0,98 | 0,75 | 0,31 | 0,35 | 0,42 | 1,99 | 1,76 | 0,40 | 0,55  | 0,07 | <b>0,48</b> |
| 23/10/2017     | 0,28 | 0,37 | 0,99 | 0,28 | 0,39 | 0,39 | 3,10 | 2,46 | 0,49 | 0,61  | 0,09 | <b>0,53</b> |
| 06/11/2017     | 0,72 | 1,07 | 1,63 | 1,02 | 1,08 | 1,04 | 2,50 | 2,56 | 1,11 | 0,86  | 0,91 | <b>1,21</b> |
| 13/11/2017     | 1,15 | 1,28 | 2,50 | 0,81 | 1,20 | 1,54 | 6,00 | 5,37 | 2,07 | 0,75  | 0,58 | <b>1,59</b> |
| 18/12/2017     | 0,70 | 1,48 | 3,09 | 0,87 | 1,15 | 1,00 | 3,58 | 3,96 | 1,54 | 1,23  | 0,76 | <b>1,46</b> |
| 28/12/2017     | 0,48 | 0,90 | 1,26 | 0,65 | 0,57 | 0,63 | 1,51 | 1,58 | 0,88 | 0,44  | 0,61 | <b>0,79</b> |
| 18/01/2018     | 0,36 | 0,88 | 1,16 | 0,55 | 0,54 | 0,52 | 1,61 | 1,54 | 0,92 | 0,44  | 0,52 | <b>0,73</b> |
| 29/01/2018     | 0,29 | 0,90 | 1,26 | 0,43 | 0,46 | 0,47 | 2,67 | 1,98 | 0,61 | 0,68  | 0,31 | <b>0,70</b> |
| 08/02/2018     | 0,44 | 0,84 | 1,57 | 0,61 | 0,58 | 0,62 | 2,44 | 2,47 | 0,87 | 0,71  | 0,43 | <b>0,86</b> |
| 22/02/2018     | 0,59 | 0,65 | 1,47 | 1,21 | 1,06 | 1,05 | 1,53 | 1,50 | 1,26 | 0,41  | 1,20 | <b>1,01</b> |
| 05/03/2018     | 0,47 | 0,77 | 2,29 | 0,57 | 0,66 | 0,60 | 2,14 | 2,63 | 0,80 | 0,62  | 0,47 | <b>0,88</b> |
| 27/03/2018     | 0,62 | 0,73 | 0,81 | 0,99 | 0,88 | 0,87 | 0,76 | 1,21 | 0,68 | 0,38  | 0,98 | <b>0,78</b> |
| 10/04/2018     | 0,42 | 0,55 | 3,75 | 0,90 | 0,60 | 0,83 | 9,66 | 4,04 | 0,67 | 17,56 | 0,47 | <b>1,49</b> |
| 16/04/2018     | 0,70 | 0,96 | 0,75 | 1,00 | 1,01 | 0,94 | 0,74 | 1,12 | 0,68 | 0,36  | 1,01 | <b>0,81</b> |
| 10/05/2018     | 0,42 | 0,67 | 2,67 | 0,59 | 0,49 | 0,62 | 9,00 | 2,51 | 0,55 | 26,57 | 0,46 | <b>1,32</b> |
| 28/05/2018     | 0,65 | 0,75 | 1,70 | 0,94 | 1,05 | 0,94 | 1,92 | 1,90 | 1,17 | 0,60  | 0,88 | <b>1,05</b> |
| 10/06/2018     | 0,39 | 0,49 | 1,46 | 0,55 | 0,57 | 0,52 | 1,64 | 1,26 | 0,78 | 0,45  | 0,55 | <b>0,69</b> |
| 27/06/2018     | 0,27 | 0,42 | 0,96 | 0,37 | 0,41 | 0,51 | 1,78 | 1,76 | 0,47 | 0,48  | 0,30 | <b>0,56</b> |
| 16/07/2018     | 0,11 | 0,27 | 0,89 | 0,28 | 0,27 | 0,37 | 1,84 | 2,68 | 0,27 | 0,38  | 0,13 | <b>0,41</b> |
| 26/07/2018     | 0,22 | 0,30 | 1,42 | 0,44 | 0,45 | 0,63 | 2,91 | 2,64 | 0,38 | 1,25  | 0,28 | <b>0,67</b> |
| <b>Moyenne</b> | 0,45 | 0,73 | 1,51 | 0,61 | 0,64 | 0,67 | 2,90 | 2,32 | 0,79 | 2,45  | 0,49 | <b>0,85</b> |

**Tableau 0.9** : Valeurs des indices de risque écologique monomial (Eri) et de risque écologique potentiel (RI) dans oued El Harrach.

| Date           | Er <sup>i</sup> |             |             |             |             |              |             |             |              |             | RI           |
|----------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
|                | Mn              | Pb          | Cr          | Co          | Ni          | Cu           | Zn          | As          | Cd           | V           |              |
| 10/08/2017     | 0,26            | 3,57        | 0,81        | 0,67        | 0,27        | 6,80         | 1,71        | 3,16        | 22,39        | 0,02        | 39,66        |
| 29/08/2017     | 0,41            | 4,52        | 0,63        | 1,53        | 1,09        | 8,98         | 2,17        | 4,40        | 21,43        | 0,21        | 45,37        |
| 11/09/2017     | 0,68            | 9,02        | 2,19        | 2,90        | 2,42        | 11,79        | 4,50        | 8,74        | 38,96        | 0,55        | 81,75        |
| 25/09/2017     | 0,40            | 4,72        | 0,99        | 1,93        | 1,02        | 11,09        | 4,67        | 5,13        | 25,00        | 0,19        | 55,14        |
| 10/10/2017     | 0,87            | 6,53        | 2,27        | 4,13        | 5,37        | 11,63        | 3,50        | 6,97        | 18,75        | 0,96        | 60,98        |
| 23/10/2017     | 0,37            | 4,09        | 2,65        | 1,83        | 4,78        | 13,70        | 4,13        | 5,68        | 34,09        | 0,16        | 71,49        |
| 06/11/2017     | 0,93            | 9,74        | 3,35        | 3,78        | 3,74        | 11,97        | 5,53        | 9,69        | 87,59        | 0,96        | 137,27       |
| 13/11/2017     | 1,18            | 30,22       | 3,52        | 3,96        | 4,07        | 14,46        | 8,60        | 10,91       | 39,18        | 1,01        | 117,11       |
| 18/12/2017     | 2,14            | 13,66       | 3,10        | 5,28        | 5,53        | 16,56        | 4,98        | 22,47       | 64,20        | 1,85        | 139,78       |
| 28/12/2017     | 0,76            | 5,23        | 2,03        | 3,74        | 3,84        | 4,80         | 1,40        | 7,05        | 15,46        | 1,89        | 46,20        |
| 18/01/2018     | 0,71            | 6,07        | 3,20        | 2,30        | 2,67        | 10,57        | 3,15        | 5,02        | 43,70        | 0,70        | 78,08        |
| 29/01/2018     | 0,51            | 17,93       | 3,25        | 2,02        | 2,02        | 34,97        | 6,62        | 5,15        | 58,78        | 0,50        | 131,74       |
| 08/02/2018     | 0,57            | 7,41        | 1,70        | 2,06        | 2,23        | 9,64         | 2,46        | 4,72        | 68,92        | 0,69        | 100,40       |
| 22/02/2018     | 1,03            | 11,32       | 1,89        | 4,57        | 5,07        | 7,69         | 2,72        | 10,16       | 35,03        | 1,67        | 81,16        |
| 05/03/2018     | 0,76            | 4,07        | 1,27        | 1,55        | 1,48        | 6,80         | 1,48        | 3,83        | 56,18        | 0,47        | 77,89        |
| 27/03/2018     | 0,84            | 5,08        | 1,78        | 3,85        | 3,96        | 4,40         | 1,55        | 6,73        | 12,96        | 1,62        | 42,77        |
| 10/04/2018     | 0,46            | 9,68        | 2,70        | 2,73        | 2,86        | 17,44        | 4,73        | 6,87        | 71,65        | 0,85        | 119,96       |
| 16/04/2018     | 1,01            | 3,60        | 1,80        | 4,49        | 4,31        | 4,19         | 1,08        | 7,54        | 10,23        | 1,72        | 39,97        |
| 10/05/2018     | 0,42            | 3,37        | 2,19        | 1,64        | 1,54        | 15,15        | 2,31        | 3,69        | 23,33        | 0,47        | 54,11        |
| 28/05/2018     | 0,93            | 10,12       | 2,34        | 3,84        | 4,11        | 7,73         | 3,33        | 9,46        | 28,18        | 1,41        | 71,43        |
| 10/06/2018     | 0,61            | 4,70        | 1,42        | 3,39        | 3,05        | 5,82         | 1,46        | 5,51        | 14,57        | 1,25        | 41,78        |
| 27/06/2018     | 0,33            | 3,13        | 1,26        | 1,69        | 1,74        | 6,05         | 2,66        | 2,76        | 16,05        | 0,50        | 36,18        |
| 16/07/2018     | 0,65            | 6,16        | 3,91        | 3,60        | 3,36        | 9,28         | 9,93        | 6,99        | 19,27        | 1,24        | 64,38        |
| 26/07/2018     | 0,59            | 4,69        | 1,94        | 2,84        | 2,85        | 8,68         | 2,67        | 5,18        | 17,40        | 0,97        | 47,82        |
| <b>Moyenne</b> | <b>0,73</b>     | <b>7,86</b> | <b>2,17</b> | <b>2,93</b> | <b>3,06</b> | <b>10,84</b> | <b>3,64</b> | <b>6,99</b> | <b>35,14</b> | <b>0,91</b> | <b>74,27</b> |

**Tableau 0.10** : Valeurs des indices de risque écologique monomial (Eri) et de risque écologique potentiel (RI) dans oued Mazafran.

| Date           | Er <sup>i</sup> |             |             |             |             |              |             |             |              |             | RI            |
|----------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|---------------|
|                | Mn              | Pb          | Cr          | Co          | Ni          | Cu           | Zn          | As          | Cd           | V           |               |
| 10/08/2017     | 0,37            | 2,42        | 0,22        | 0,77        | 0,96        | 7,93         | 1,68        | 2,75        | 21,43        | 0,02        | 38,16         |
| 29/08/2017     | 0,81            | 4,60        | 0,31        | 2,23        | 1,27        | 14,71        | 2,00        | 4,27        | 20,83        | 0,17        | 50,39         |
| 11/09/2017     | 0,79            | 7,99        | 1,39        | 3,69        | 4,23        | 13,51        | 2,83        | 12,86       | 31,03        | 1,05        | 78,58         |
| 25/09/2017     | 0,33            | 4,30        | 0,50        | 1,52        | 1,36        | 15,49        | 2,30        | 4,50        | 31,91        | 0,32        | 62,20         |
| 10/10/2017     | 0,98            | 3,76        | 0,62        | 1,77        | 2,11        | 9,94         | 1,76        | 4,02        | 16,48        | 0,13        | 40,58         |
| 23/10/2017     | 0,37            | 4,93        | 0,56        | 1,96        | 1,93        | 15,51        | 2,46        | 4,92        | 18,29        | 0,18        | 50,75         |
| 06/11/2017     | 1,07            | 8,14        | 2,05        | 5,41        | 5,20        | 12,48        | 2,56        | 11,09       | 25,91        | 1,82        | 74,66         |
| 13/11/2017     | 1,28            | 12,51       | 1,61        | 6,00        | 7,69        | 30,02        | 5,37        | 20,67       | 22,39        | 1,16        | 107,41        |
| 18/12/2017     | 1,48            | 15,46       | 1,75        | 5,76        | 4,98        | 17,88        | 3,96        | 15,44       | 36,79        | 1,52        | 103,54        |
| 28/12/2017     | 0,90            | 6,32        | 1,29        | 2,83        | 3,13        | 7,57         | 1,58        | 8,82        | 13,25        | 1,22        | 46,01         |
| 18/01/2018     | 0,88            | 5,81        | 1,10        | 2,68        | 2,59        | 8,06         | 1,54        | 9,25        | 13,33        | 1,05        | 45,41         |
| 29/01/2018     | 0,90            | 6,30        | 0,85        | 2,29        | 2,34        | 13,34        | 1,98        | 6,07        | 20,47        | 0,61        | 54,26         |
| 08/02/2018     | 0,84            | 7,84        | 1,21        | 2,91        | 3,12        | 12,20        | 2,47        | 8,69        | 21,37        | 0,86        | 60,68         |
| 22/02/2018     | 0,65            | 7,37        | 2,43        | 5,28        | 5,25        | 7,67         | 1,50        | 12,64       | 12,31        | 2,41        | 56,86         |
| 05/03/2018     | 0,77            | 11,46       | 1,14        | 3,31        | 2,98        | 10,72        | 2,63        | 7,95        | 18,66        | 0,93        | 59,78         |
| 27/03/2018     | 0,73            | 4,05        | 1,97        | 4,40        | 4,33        | 3,79         | 1,21        | 6,75        | 11,28        | 1,96        | 39,75         |
| 10/04/2018     | 0,55            | 18,73       | 1,79        | 2,98        | 4,13        | 48,30        | 4,04        | 6,66        | 526,83       | 0,94        | 614,41        |
| 16/04/2018     | 0,96            | 3,74        | 2,00        | 5,04        | 4,69        | 3,72         | 1,12        | 6,81        | 10,67        | 2,02        | 39,81         |
| 10/05/2018     | 0,67            | 13,37       | 1,18        | 2,47        | 3,12        | 45,02        | 2,51        | 5,53        | 796,97       | 0,92        | 871,09        |
| 28/05/2018     | 0,75            | 8,50        | 1,87        | 5,24        | 4,71        | 9,61         | 1,90        | 11,71       | 18,10        | 1,75        | 63,38         |
| 10/06/2018     | 0,49            | 7,31        | 1,10        | 2,86        | 2,58        | 8,22         | 1,26        | 7,78        | 13,44        | 1,10        | 45,65         |
| 27/06/2018     | 0,42            | 4,82        | 0,75        | 2,03        | 2,54        | 8,88         | 1,76        | 4,73        | 14,42        | 0,60        | 40,52         |
| 16/07/2018     | 0,27            | 4,46        | 0,57        | 1,35        | 1,85        | 9,20         | 2,68        | 2,68        | 11,25        | 0,26        | 34,28         |
| 26/07/2018     | 0,30            | 7,10        | 0,89        | 2,23        | 3,13        | 14,55        | 2,64        | 3,78        | 37,39        | 0,56        | 72,28         |
| <b>Moyenne</b> | <b>0,73</b>     | <b>7,55</b> | <b>1,21</b> | <b>3,21</b> | <b>3,34</b> | <b>14,51</b> | <b>2,32</b> | <b>7,93</b> | <b>73,53</b> | <b>0,98</b> | <b>114,60</b> |

**Tableau 0.11** : Flux total mensuel en (kg/mois) des ETM dans l'oued El Harrach.

|           | Fe        | Mn       | Pb      | Cr      | Co     | Ni      | Cu      | Zn      | As     | Cd    | V       |
|-----------|-----------|----------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|-------|---------|
| Août      | 2023,05   | 182,75   | 18,71   | 10,30   | 1,64   | 17,68   | 14,27   | 191,22  | 4,19   | 0,14  | 3,44    |
| September | 4880,57   | 461,97   | 17,03   | 26,52   | 4,53   | 36,81   | 27,19   | 766,79  | 7,48   | 0,71  | 9,83    |
| October   | 7114,28   | 466,99   | 16,57   | 50,03   | 6,83   | 1511,06 | 39,39   | 390,59  | 6,53   | 0,96  | 16,43   |
| November  | 94112,22  | 2589,20  | 384,15  | 596,29  | 42,74  | 124,77  | 278,00  | 2750,42 | 71,24  | 3,49  | 228,63  |
| December  | 106861,82 | 4568,99  | 251,35  | 581,09  | 66,98  | 181,79  | 299,17  | 3268,24 | 113,85 | 2,68  | 545,45  |
| Janvier   | 42015,26  | 4053,96  | 244,25  | 673,06  | 33,27  | 183,84  | 507,73  | 1724,56 | 50,45  | 3,16  | 153,34  |
| Février   | 612388,64 | 12900,40 | 1489,34 | 2607,15 | 249,11 | 765,01  | 1405,25 | 5950,29 | 302,86 | 21,57 | 2179,64 |
| Mars      | 277614,53 | 7063,37  | 429,18  | 1306,84 | 125,65 | 350,75  | 542,21  | 2162,47 | 135,20 | 8,67  | 1126,22 |
| Avril     | 572501,41 | 7353,67  | 994,70  | 3110,87 | 232,36 | 668,02  | 1623,19 | 6128,52 | 229,63 | 15,06 | 2196,99 |
| Mai       | 97857,37  | 3065,14  | 204,69  | 636,91  | 44,09  | 122,18  | 385,74  | 1269,33 | 66,36  | 2,01  | 334,77  |
| Juin      | 8081,02   | 540,29   | 36,74   | 46,28   | 5,24   | 16,48   | 20,62   | 133,77  | 5,87   | 0,15  | 36,86   |
| Juillet   | 11260,03  | 343,44   | 19,98   | 99,63   | 6,30   | 19,32   | 32,62   | 326,77  | 7,63   | 0,18  | 48,16   |

**Tableau 0.12** : Flux total mensuel en (kg/mois) des ETM dans l'oued Mazafran.

|           | Fe        | Mn      | Pb     | Cr      | Co     | Ni     | Cu      | Zn      | As     | Cd    | V       |
|-----------|-----------|---------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|--------|-------|---------|
| Août      | 754,22    | 124,49  | 3,99   | 2,68    | 1,11   | 63,26  | 8,37    | 205,00  | 2,40   | 0,14  | 1,66    |
| September | 11063,16  | 736,64  | 19,01  | 30,01   | 7,12   | 23,81  | 46,45   | 159,14  | 23,33  | 0,28  | 27,33   |
| October   | 7849,45   | 1213,25 | 35,83  | 41,69   | 10,09  | 326,45 | 71,29   | 920,24  | 18,90  | 1,35  | 18,65   |
| November  | 311698,04 | 5090,58 | 459,85 | 731,63  | 116,74 | 425,10 | 959,79  | 4478,56 | 183,19 | 3,37  | 754,72  |
| December  | 55197,65  | 3448,66 | 134,15 | 173,06  | 39,04  | 93,61  | 157,05  | 1670,91 | 66,38  | 0,85  | 208,94  |
| Janvier   | 62084,06  | 4738,49 | 154,64 | 236,12  | 44,73  | 152,95 | 282,09  | 909,26  | 98,28  | 1,31  | 252,53  |
| Février   | 238392,76 | 5967,05 | 470,94 | 1029,99 | 129,09 | 384,39 | 650,37  | 1899,39 | 204,44 | 2,66  | 1165,81 |
| Mars      | 420046,60 | 5626,70 | 785,85 | 1435,18 | 172,63 | 467,75 | 739,45  | 2763,32 | 170,27 | 3,77  | 1678,38 |
| Avril     | 260975,93 | 3066,59 | 687,66 | 1061,01 | 105,70 | 341,05 | 1594,90 | 2240,83 | 92,02  | 40,31 | 1040,64 |
| Mai       | 11397,47  | 403,31  | 30,43  | 39,41   | 5,93   | 17,33  | 76,93   | 90,21   | 11,25  | 2,84  | 44,70   |
| Juin      | 1166,23   | 114,59  | 2,74   | 4,04    | 0,85   | 2,93   | 3,76    | 12,93   | 1,98   | 0,02  | 5,03    |
| Juillet   | 639,29    | 89,73   | 2,80   | 3,83    | 0,69   | 3,46   | 5,68    | 19,57   | 1,75   | 0,03  | 2,74    |

**Tableau 0.13** : Valeurs de Igeo dans la baie d'Alger.

| stations | Mn    | Fe    | Pb    | V     | Cr    | Co    | Ni    | Cu    | Zn    | As    | Cd    | Hg    |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A01      | -0,50 | -0,72 | -0,43 | -1,22 | -1,07 | -0,68 | -0,56 | -0,50 | -0,55 | -0,49 | -0,32 | 0,51  |
| A02      | -0,25 | -0,33 | -0,65 | -0,88 | -0,71 | -0,28 | 0,70  | -0,36 | -0,32 | 0,28  | -0,68 | 0,73  |
| A03      | -0,06 | -0,23 | -0,49 | -0,89 | -1,07 | -0,04 | -0,16 | -0,70 | -0,12 | 1,07  | -0,74 | -2,95 |
| A04      | -0,45 | -0,54 | -0,36 | -0,73 | -0,87 | -0,45 | -0,28 | -0,41 | -0,19 | 0,21  | -0,05 | 2,49  |
| A05      | 0,00  | -0,28 | -0,39 | -0,73 | -1,03 | -0,07 | -0,27 | -0,82 | 0,11  | 1,39  | -0,42 | 1,20  |
| A06      | -0,63 | -0,70 | -0,04 | -0,68 | -0,81 | -0,75 | -0,51 | -0,06 | -0,14 | 0,26  | -0,27 | 2,89  |
| A07      | -0,54 | -0,62 | -0,26 | -1,04 | -1,07 | -0,89 | -0,80 | -0,29 | -0,39 | -0,14 | -0,28 | 3,00  |
| A08      | -0,34 | -0,62 | -0,31 | -0,91 | -0,95 | -0,48 | -0,50 | -0,31 | -0,24 | -0,06 | -0,25 | 3,30  |
| A09      | -0,54 | -0,50 | -0,29 | -0,78 | -0,64 | -0,49 | -0,39 | 0,09  | 0,00  | 0,13  | 0,12  | 1,81  |
| A10      | -0,90 | -0,61 | 0,68  | -0,69 | -0,03 | -0,71 | -0,38 | 1,03  | 1,30  | 0,09  | 1,38  | 2,94  |
| A11      | -0,77 | -0,67 | 0,07  | -0,66 | -0,68 | -0,84 | -0,55 | 0,13  | -0,09 | 0,08  | 0,47  | -     |
| A12      | -0,57 | -0,56 | 0,24  | -0,62 | -0,67 | -0,87 | -0,53 | 0,26  | 0,12  | 0,11  | 0,50  | -     |
| A13      | -0,37 | -0,57 | 0,33  | -0,68 | -0,90 | -0,52 | -0,45 | 0,09  | 0,18  | 0,46  | 0,45  | -     |
| A14      | -0,34 | -0,41 | -0,28 | -0,75 | -0,91 | -0,35 | -0,35 | -0,36 | -0,15 | 0,62  | -0,23 | 1,10  |
| A15      | -0,38 | -0,31 | -0,53 | -0,89 | -0,91 | -0,34 | -0,30 | -0,74 | -0,33 | 0,73  | -0,41 | 1,27  |

**Tableau 0.14** : Valeurs de Igeo dans la baie de Bou-Ismaïl.

| stations | Mn    | Fe    | Pb    | V     | Cr    | Co    | Ni    | Cu    | Zn    | As    | Cd    | Hg    |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| B01      | -0,85 | -0,94 | -1,34 | -1,50 | -1,86 | -1,07 | -1,52 | -1,83 | -1,28 | 1,31  | -0,75 | -     |
| B02      | -0,71 | -0,52 | -0,97 | -1,27 | -1,45 | -0,57 | -0,83 | -1,50 | -0,84 | 1,33  | -0,85 | -6,68 |
| B03      | -0,47 | -0,43 | -0,81 | -1,30 | -1,52 | -0,51 | -0,82 | -1,38 | -0,80 | 1,36  | -0,56 | -     |
| B04      | -1,05 | -0,60 | -0,55 | -0,90 | -1,34 | -0,69 | -0,80 | -0,62 | -0,45 | 0,66  | -0,17 | -1,33 |
| B05      | -0,77 | -0,65 | -0,85 | -1,29 | -1,93 | -0,73 | -0,97 | -1,40 | -0,82 | 1,08  | -0,64 | -     |
| B06      | -1,19 | -0,76 | -0,75 | -0,96 | -1,15 | -1,01 | -0,92 | -1,05 | -0,73 | -0,03 | -0,28 | -     |
| B07      | -1,05 | -0,62 | -0,69 | -0,83 | -1,14 | -0,60 | -1,08 | -1,32 | -0,77 | 1,12  | -0,49 | -0,92 |
| B08      | -1,04 | -0,73 | -0,74 | -1,14 | -1,14 | -0,92 | -1,02 | -1,10 | -0,79 | 0,38  | -0,63 | -1,15 |
| B09      | -1,07 | -0,52 | -0,61 | -0,99 | -1,06 | -0,57 | -0,79 | -0,77 | -0,43 | 0,92  | -0,42 | -1,51 |
| B10      | -0,75 | -0,38 | -0,59 | -1,26 | -1,24 | -0,52 | -0,73 | -0,80 | -0,65 | 1,19  | -0,46 | -2,04 |
| B11      | -0,83 | -0,87 | -1,51 | -1,85 | -1,97 | -1,16 | -1,25 | -2,09 | -1,45 | 0,59  | -0,90 | -3,09 |
| B12      | -0,60 | -0,41 | -0,97 | -1,29 | -1,86 | -0,58 | -0,90 | -1,51 | -0,83 | 1,35  | -0,94 | -1,93 |
| B13      | -0,97 | -0,71 | -1,02 | -1,29 | -1,54 | -0,74 | -1,07 | -1,43 | -0,81 | 0,55  | -0,65 | -     |
| B14      | -1,23 | -0,88 | -0,90 | -1,31 | -1,49 | -1,02 | -1,24 | -1,26 | -1,03 | 0,42  | -0,65 | -     |
| B15      | -1,29 | -0,80 | -0,71 | -0,93 | -0,98 | -1,09 | -0,91 | -0,93 | -0,68 | -0,17 | -0,52 | -     |
| B16      | -1,11 | -0,69 | -0,75 | -0,97 | -1,04 | -0,96 | -0,90 | -0,97 | -0,72 | -0,08 | -0,23 | -     |
| B17      | -0,93 | -0,70 | -0,93 | -1,30 | -1,54 | -0,76 | -1,01 | -1,36 | -0,85 | 0,86  | -0,54 | -1,80 |
| B18      | -0,74 | -0,51 | -1,02 | -1,28 | -1,64 | -0,67 | -0,98 | -1,16 | -0,88 | 1,33  | -0,72 | -     |
| B19      | -0,76 | -0,57 | -1,01 | -1,31 | -1,69 | -0,75 | -0,98 | -1,34 | -0,88 | 1,10  | -0,65 | -     |
| B20      | -1,11 | -0,80 | -0,78 | -1,15 | -1,27 | -0,97 | -1,05 | -1,09 | -0,75 | 0,29  | -0,53 | -     |

**Tableau 0.15 : Valeurs de FE dans la baie d'Alger.**

| stations | Mn   | Fe | Pb   | V    | Cr   | Co   | Ni   | Cu   | Zn   | As   | Cd   | Hg    |
|----------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| A01      | 1,17 | -  | 1,22 | 0,71 | 0,78 | 1,03 | 1,11 | 1,17 | 1,13 | 1,18 | 1,32 | 2,35  |
| A02      | 1,06 | -  | 0,80 | 0,69 | 0,77 | 1,03 | 2,05 | 0,98 | 1,01 | 1,53 | 0,79 | 2,09  |
| A03      | 1,13 | -  | 0,84 | 0,63 | 0,56 | 1,14 | 1,05 | 0,72 | 1,08 | 2,45 | 0,70 | 0,15  |
| A04      | 1,06 | -  | 1,13 | 0,87 | 0,79 | 1,06 | 1,19 | 1,10 | 1,27 | 1,68 | 1,40 | 8,18  |
| A05      | 1,22 | -  | 0,93 | 0,73 | 0,59 | 1,16 | 1,01 | 0,69 | 1,31 | 3,18 | 0,91 | 2,80  |
| A06      | 1,05 | -  | 1,59 | 1,02 | 0,93 | 0,97 | 1,14 | 1,56 | 1,48 | 1,95 | 1,36 | 12,09 |
| A07      | 1,06 | -  | 1,28 | 0,74 | 0,73 | 0,83 | 0,88 | 1,25 | 1,17 | 1,40 | 1,27 | 12,25 |
| A08      | 1,21 | -  | 1,24 | 0,81 | 0,79 | 1,10 | 1,08 | 1,24 | 1,30 | 1,47 | 1,29 | 15,12 |
| A09      | 0,97 | -  | 1,15 | 0,82 | 0,91 | 1,01 | 1,08 | 1,50 | 1,41 | 1,54 | 1,53 | 4,95  |
| A10      | 0,82 | -  | 2,45 | 0,95 | 1,49 | 0,94 | 1,18 | 3,13 | 3,77 | 1,62 | 3,98 | 11,76 |
| A11      | 0,93 | -  | 1,67 | 1,00 | 0,99 | 0,89 | 1,09 | 1,74 | 1,50 | 1,67 | 2,20 | -     |
| A12      | 0,99 | -  | 1,74 | 0,96 | 0,93 | 0,80 | 1,02 | 1,76 | 1,60 | 1,59 | 2,09 | -     |
| A13      | 1,15 | -  | 1,87 | 0,92 | 0,79 | 1,04 | 1,09 | 1,58 | 1,69 | 2,04 | 2,03 | -     |
| A14      | 1,05 | -  | 1,10 | 0,79 | 0,71 | 1,04 | 1,05 | 1,04 | 1,20 | 2,04 | 1,13 | 2,86  |
| A15      | 0,95 | -  | 0,86 | 0,67 | 0,66 | 0,98 | 1,01 | 0,74 | 0,99 | 2,06 | 0,93 | 3,00  |

**Tableau 0.16 : Valeurs de FE dans la baie de Bou-Ismaïl**

| stations | Mn   | Fe | Pb   | V    | Cr   | Co   | Ni   | Cu   | Zn   | As   | Cd   | Hg   |
|----------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| B01      | 1,07 | -  | 0,76 | 0,68 | 0,53 | 0,91 | 0,67 | 0,54 | 0,79 | 4,76 | 1,15 | -    |
| B02      | 0,88 | -  | 0,73 | 0,59 | 0,53 | 0,96 | 0,81 | 0,51 | 0,80 | 3,61 | 0,80 | 0,01 |
| B03      | 0,97 | -  | 0,77 | 0,55 | 0,47 | 0,94 | 0,76 | 0,52 | 0,77 | 3,45 | 0,91 | -    |
| B04      | 0,73 | -  | 1,04 | 0,81 | 0,60 | 0,94 | 0,87 | 0,99 | 1,11 | 2,41 | 1,35 | 0,60 |
| B05      | 0,92 | -  | 0,87 | 0,64 | 0,41 | 0,95 | 0,80 | 0,59 | 0,89 | 3,33 | 1,01 | -    |
| B06      | 0,74 | -  | 1,01 | 0,87 | 0,76 | 0,84 | 0,90 | 0,81 | 1,02 | 1,66 | 1,39 | -    |
| B07      | 0,74 | -  | 0,95 | 0,86 | 0,70 | 1,01 | 0,73 | 0,61 | 0,90 | 3,33 | 1,09 | 0,81 |
| B08      | 0,81 | -  | 0,99 | 0,75 | 0,76 | 0,88 | 0,82 | 0,77 | 0,96 | 2,16 | 1,07 | 0,75 |
| B09      | 0,68 | -  | 0,93 | 0,72 | 0,68 | 0,96 | 0,82 | 0,84 | 1,06 | 2,70 | 1,07 | 0,50 |
| B10      | 0,78 | -  | 0,86 | 0,54 | 0,55 | 0,91 | 0,78 | 0,75 | 0,83 | 2,98 | 0,95 | 0,32 |
| B11      | 1,03 | -  | 0,64 | 0,51 | 0,46 | 0,82 | 0,77 | 0,43 | 0,67 | 2,75 | 0,98 | 0,21 |
| B12      | 0,88 | -  | 0,68 | 0,54 | 0,37 | 0,89 | 0,71 | 0,47 | 0,75 | 3,38 | 0,69 | 0,35 |
| B13      | 0,83 | -  | 0,80 | 0,67 | 0,56 | 0,98 | 0,78 | 0,61 | 0,93 | 2,39 | 1,04 | -    |
| B14      | 0,79 | -  | 0,99 | 0,75 | 0,66 | 0,91 | 0,78 | 0,77 | 0,91 | 2,46 | 1,18 | -    |
| B15      | 0,71 | -  | 1,06 | 0,91 | 0,88 | 0,81 | 0,93 | 0,91 | 1,09 | 1,55 | 1,21 | -    |
| B16      | 0,74 | -  | 0,96 | 0,82 | 0,78 | 0,83 | 0,86 | 0,82 | 0,98 | 1,53 | 1,37 | -    |
| B17      | 0,85 | -  | 0,85 | 0,66 | 0,56 | 0,96 | 0,81 | 0,64 | 0,90 | 2,95 | 1,12 | 0,47 |
| B18      | 0,85 | -  | 0,70 | 0,59 | 0,46 | 0,90 | 0,72 | 0,64 | 0,78 | 3,57 | 0,87 | -    |
| B19      | 0,88 | -  | 0,74 | 0,60 | 0,46 | 0,89 | 0,75 | 0,59 | 0,81 | 3,18 | 0,95 | -    |
| B20      | 0,81 | -  | 1,02 | 0,79 | 0,72 | 0,89 | 0,84 | 0,82 | 1,04 | 2,13 | 1,21 | -    |

**Tableau 0.17** : Valeurs de CF et PLI dans la baie d'Alger.

| stations | CF   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       | PLI  |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
|          | Mn   | Fe   | Pb   | V    | Cr   | Co   | Ni   | Cu   | Zn   | As   | Cd   | Hg    |      |
| A01      | 1,06 | 0,91 | 1,11 | 0,64 | 0,71 | 0,93 | 1,01 | 1,06 | 1,03 | 1,07 | 1,20 | 2,14  | 1,03 |
| A02      | 1,26 | 1,19 | 0,96 | 0,82 | 0,92 | 1,23 | 2,44 | 1,17 | 1,20 | 1,83 | 0,94 | 2,49  | 1,28 |
| A03      | 1,44 | 1,28 | 1,07 | 0,81 | 0,71 | 1,45 | 1,34 | 0,93 | 1,38 | 3,14 | 0,90 | 0,19  | 1,04 |
| A04      | 1,09 | 1,03 | 1,17 | 0,90 | 0,82 | 1,10 | 1,23 | 1,13 | 1,31 | 1,73 | 1,45 | 8,45  | 1,36 |
| A05      | 1,50 | 1,23 | 1,15 | 0,90 | 0,73 | 1,43 | 1,24 | 0,85 | 1,62 | 3,93 | 1,12 | 3,45  | 1,39 |
| A06      | 0,97 | 0,92 | 1,46 | 0,94 | 0,85 | 0,89 | 1,05 | 1,44 | 1,36 | 1,79 | 1,25 | 11,13 | 1,38 |
| A07      | 1,04 | 0,98 | 1,25 | 0,73 | 0,71 | 0,81 | 0,86 | 1,22 | 1,14 | 1,37 | 1,24 | 11,96 | 1,24 |
| A08      | 1,18 | 0,98 | 1,21 | 0,80 | 0,78 | 1,07 | 1,06 | 1,21 | 1,27 | 1,44 | 1,26 | 14,79 | 1,36 |
| A09      | 1,03 | 1,06 | 1,23 | 0,87 | 0,96 | 1,07 | 1,14 | 1,59 | 1,50 | 1,64 | 1,63 | 5,26  | 1,38 |
| A10      | 0,81 | 0,98 | 2,40 | 0,93 | 1,46 | 0,92 | 1,15 | 3,07 | 3,70 | 1,59 | 3,90 | 11,54 | 1,90 |
| A11      | 0,88 | 0,94 | 1,58 | 0,95 | 0,94 | 0,84 | 1,03 | 1,64 | 1,41 | 1,58 | 2,08 | -     | 1,20 |
| A12      | 1,01 | 1,02 | 1,77 | 0,97 | 0,95 | 0,82 | 1,04 | 1,80 | 1,63 | 1,62 | 2,13 | -     | 1,27 |
| A13      | 1,16 | 1,01 | 1,89 | 0,93 | 0,80 | 1,05 | 1,10 | 1,60 | 1,70 | 2,06 | 2,05 | -     | 1,33 |
| A14      | 1,18 | 1,13 | 1,24 | 0,89 | 0,80 | 1,18 | 1,18 | 1,17 | 1,36 | 2,31 | 1,28 | 3,22  | 1,31 |
| A15      | 1,15 | 1,21 | 1,04 | 0,81 | 0,80 | 1,18 | 1,22 | 0,90 | 1,20 | 2,49 | 1,13 | 3,63  | 1,25 |

**Tableau 0.18** : Valeurs de CF et PLI dans la baie de Bou-Ismaïl.

| stations | CF   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | PLI  |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          | Mn   | Fe   | Pb   | V    | Cr   | Co   | Ni   | Cu   | Zn   | As   | Cd   | Hg   |      |
| B01      | 0,83 | 0,78 | 0,59 | 0,53 | 0,41 | 0,71 | 0,52 | 0,42 | 0,62 | 3,71 | 0,89 | -    | 0,72 |
| B02      | 0,92 | 1,05 | 0,76 | 0,62 | 0,55 | 1,01 | 0,84 | 0,53 | 0,84 | 3,78 | 0,83 | 0,01 | 0,64 |
| B03      | 1,08 | 1,12 | 0,85 | 0,61 | 0,52 | 1,05 | 0,85 | 0,57 | 0,86 | 3,85 | 1,02 | -    | 0,95 |
| B04      | 0,72 | 0,99 | 1,02 | 0,80 | 0,59 | 0,93 | 0,86 | 0,97 | 1,10 | 2,38 | 1,33 | 0,60 | 0,95 |
| B05      | 0,88 | 0,95 | 0,83 | 0,61 | 0,39 | 0,90 | 0,77 | 0,57 | 0,85 | 3,18 | 0,96 | -    | 0,85 |
| B06      | 0,66 | 0,89 | 0,89 | 0,77 | 0,67 | 0,74 | 0,79 | 0,72 | 0,90 | 1,47 | 1,23 | -    | 0,86 |
| B07      | 0,72 | 0,98 | 0,93 | 0,84 | 0,68 | 0,99 | 0,71 | 0,60 | 0,88 | 3,25 | 1,07 | 0,79 | 0,92 |
| B08      | 0,73 | 0,90 | 0,90 | 0,68 | 0,68 | 0,79 | 0,74 | 0,70 | 0,87 | 1,95 | 0,97 | 0,68 | 0,84 |
| B09      | 0,71 | 1,05 | 0,98 | 0,76 | 0,72 | 1,01 | 0,87 | 0,88 | 1,11 | 2,84 | 1,12 | 0,53 | 0,95 |
| B10      | 0,89 | 1,15 | 1,00 | 0,63 | 0,64 | 1,05 | 0,90 | 0,86 | 0,95 | 3,43 | 1,09 | 0,36 | 0,93 |
| B11      | 0,85 | 0,82 | 0,53 | 0,42 | 0,38 | 0,67 | 0,63 | 0,35 | 0,55 | 2,26 | 0,81 | 0,18 | 0,58 |
| B12      | 0,99 | 1,13 | 0,77 | 0,61 | 0,41 | 1,00 | 0,80 | 0,53 | 0,84 | 3,82 | 0,78 | 0,39 | 0,82 |
| B13      | 0,77 | 0,92 | 0,74 | 0,61 | 0,52 | 0,90 | 0,71 | 0,56 | 0,85 | 2,20 | 0,95 | -    | 0,82 |
| B14      | 0,64 | 0,81 | 0,80 | 0,61 | 0,54 | 0,74 | 0,63 | 0,63 | 0,74 | 2,00 | 0,95 | -    | 0,77 |
| B15      | 0,61 | 0,86 | 0,92 | 0,79 | 0,76 | 0,70 | 0,80 | 0,79 | 0,94 | 1,34 | 1,04 | -    | 0,85 |
| B16      | 0,69 | 0,93 | 0,89 | 0,77 | 0,73 | 0,77 | 0,80 | 0,77 | 0,91 | 1,42 | 1,27 | -    | 0,88 |
| B17      | 0,79 | 0,92 | 0,79 | 0,61 | 0,51 | 0,89 | 0,74 | 0,59 | 0,83 | 2,71 | 1,03 | 0,43 | 0,80 |
| B18      | 0,90 | 1,05 | 0,74 | 0,62 | 0,48 | 0,94 | 0,76 | 0,67 | 0,82 | 3,76 | 0,91 | -    | 0,89 |
| B19      | 0,88 | 1,01 | 0,75 | 0,61 | 0,46 | 0,89 | 0,76 | 0,59 | 0,82 | 3,21 | 0,95 | -    | 0,86 |
| B20      | 0,69 | 0,86 | 0,87 | 0,68 | 0,62 | 0,77 | 0,72 | 0,71 | 0,89 | 1,83 | 1,04 | -    | 0,84 |

**Tableau 0.19** : Valeurs de Eri et RI dans la baie d'Alger.

| stations | Er <sup>i</sup> |       |      |      |      |       |       |      |       |        |        | RI     |
|----------|-----------------|-------|------|------|------|-------|-------|------|-------|--------|--------|--------|
|          | Mn              | Pb    | V    | Cr   | Co   | Ni    | Cu    | Zn   | As    | Cd     | Hg     |        |
| A01      | 1,06            | 5,56  | 1,29 | 1,43 | 4,67 | 5,07  | 5,32  | 1,03 | 10,70 | 36,03  | 85,47  | 157,62 |
| A02      | 1,26            | 4,79  | 1,63 | 1,83 | 6,16 | 12,20 | 5,86  | 1,20 | 18,25 | 28,16  | 99,44  | 180,78 |
| A03      | 1,44            | 5,35  | 1,62 | 1,43 | 7,27 | 6,72  | 4,63  | 1,38 | 31,39 | 27,01  | 7,75   | 95,99  |
| A04      | 1,09            | 5,84  | 1,81 | 1,64 | 5,48 | 6,16  | 5,66  | 1,31 | 17,30 | 43,50  | 337,89 | 427,67 |
| A05      | 1,50            | 5,73  | 1,80 | 1,46 | 7,13 | 6,21  | 4,26  | 1,62 | 39,27 | 33,69  | 137,87 | 240,55 |
| A06      | 0,97            | 7,30  | 1,88 | 1,71 | 4,45 | 5,26  | 7,18  | 1,36 | 17,93 | 37,42  | 445,18 | 530,64 |
| A07      | 1,04            | 6,26  | 1,45 | 1,43 | 4,04 | 4,29  | 6,11  | 1,14 | 13,65 | 37,13  | 478,40 | 554,95 |
| A08      | 1,18            | 6,07  | 1,59 | 1,55 | 5,37 | 5,29  | 6,07  | 1,27 | 14,36 | 37,89  | 591,50 | 672,14 |
| A09      | 1,03            | 6,13  | 1,75 | 1,93 | 5,35 | 5,71  | 7,97  | 1,50 | 16,37 | 48,76  | 210,37 | 306,86 |
| A10      | 0,81            | 12,01 | 1,86 | 2,93 | 4,59 | 5,77  | 15,36 | 3,70 | 15,93 | 116,98 | 461,44 | 641,38 |
| A11      | 0,88            | 7,90  | 1,89 | 1,87 | 4,20 | 5,13  | 8,21  | 1,41 | 15,81 | 62,28  | -      | 109,58 |
| A12      | 1,01            | 8,86  | 1,95 | 1,89 | 4,10 | 5,18  | 8,98  | 1,63 | 16,18 | 63,81  | -      | 113,58 |
| A13      | 1,16            | 9,45  | 1,87 | 1,60 | 5,24 | 5,50  | 8,00  | 1,70 | 20,62 | 61,54  | -      | 116,68 |
| A14      | 1,18            | 6,18  | 1,78 | 1,60 | 5,88 | 5,90  | 5,86  | 1,36 | 23,07 | 38,40  | 128,94 | 220,14 |
| A15      | 1,15            | 5,21  | 1,62 | 1,60 | 5,91 | 6,11  | 4,48  | 1,20 | 24,92 | 33,85  | 145,18 | 231,22 |

**Tableau 0.20** : Valeurs de Eri et RI dans la baie de Bou-Ismaïl.

| stations | Er <sup>i</sup> |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       | RI     |
|----------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
|          | Mn              | Pb   | V    | Cr   | Co   | Ni   | Cu   | Zn   | As    | Cd    | Hg    |        |
| B01      | 0,83            | 2,96 | 1,06 | 0,82 | 3,56 | 2,62 | 2,11 | 0,62 | 37,07 | 26,82 |       | 78,47  |
| B02      | 0,92            | 3,82 | 1,24 | 1,10 | 5,04 | 4,22 | 2,64 | 0,84 | 37,82 | 24,99 | 0,58  | 83,22  |
| B03      | 1,08            | 4,27 | 1,22 | 1,04 | 5,25 | 4,25 | 2,87 | 0,86 | 38,48 | 30,54 |       | 89,87  |
| B04      | 0,72            | 5,12 | 1,60 | 1,19 | 4,63 | 4,30 | 4,87 | 1,10 | 23,77 | 39,87 | 23,82 | 110,99 |
| B05      | 0,88            | 4,16 | 1,23 | 0,79 | 4,52 | 3,83 | 2,84 | 0,85 | 31,76 | 28,87 |       | 79,72  |
| B06      | 0,66            | 4,46 | 1,54 | 1,35 | 3,72 | 3,97 | 3,61 | 0,90 | 14,69 | 36,98 |       | 71,90  |
| B07      | 0,72            | 4,63 | 1,68 | 1,36 | 4,93 | 3,56 | 3,00 | 0,88 | 32,51 | 31,98 | 31,60 | 116,87 |
| B08      | 0,73            | 4,49 | 1,36 | 1,37 | 3,97 | 3,70 | 3,50 | 0,87 | 19,54 | 29,15 | 27,12 | 95,80  |
| B09      | 0,71            | 4,90 | 1,51 | 1,44 | 5,04 | 4,33 | 4,41 | 1,11 | 28,35 | 33,72 | 21,04 | 106,57 |
| B10      | 0,89            | 4,98 | 1,26 | 1,27 | 5,24 | 4,51 | 4,30 | 0,95 | 34,31 | 32,67 | 14,60 | 104,97 |
| B11      | 0,85            | 2,64 | 0,83 | 0,76 | 3,35 | 3,15 | 1,76 | 0,55 | 22,59 | 24,15 | 7,02  | 67,67  |
| B12      | 0,99            | 3,83 | 1,22 | 0,83 | 5,01 | 4,01 | 2,64 | 0,84 | 38,17 | 23,48 | 15,70 | 96,73  |
| B13      | 0,77            | 3,69 | 1,23 | 1,03 | 4,49 | 3,57 | 2,79 | 0,85 | 21,99 | 28,60 |       | 69,02  |
| B14      | 0,64            | 4,02 | 1,21 | 1,07 | 3,69 | 3,17 | 3,13 | 0,74 | 20,00 | 28,65 |       | 66,32  |
| B15      | 0,61            | 4,58 | 1,57 | 1,52 | 3,51 | 4,00 | 3,93 | 0,94 | 13,37 | 31,35 |       | 65,39  |
| B16      | 0,69            | 4,45 | 1,53 | 1,46 | 3,86 | 4,02 | 3,83 | 0,91 | 14,23 | 38,24 |       | 73,22  |
| B17      | 0,79            | 3,93 | 1,22 | 1,03 | 4,44 | 3,72 | 2,93 | 0,83 | 27,14 | 30,88 | 17,23 | 94,13  |
| B18      | 0,90            | 3,70 | 1,24 | 0,96 | 4,71 | 3,81 | 3,35 | 0,82 | 37,61 | 27,36 |       | 84,46  |
| B19      | 0,88            | 3,73 | 1,21 | 0,93 | 4,47 | 3,80 | 2,96 | 0,82 | 32,07 | 28,64 |       | 79,50  |
| B20      | 0,69            | 4,37 | 1,36 | 1,24 | 3,83 | 3,62 | 3,53 | 0,89 | 18,32 | 31,22 |       | 69,08  |