

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

**DÉPARTEMENT DES SCIENCES ALIMENTAIRES**

*Laboratoire 3BS*

---

# *Mémoire*

*Présenté par : M<sup>lle</sup> BENMEZIANE Farida*  
*En vue de l'obtention du Diplôme de magister en Sciences Alimentaires*  
*Option : Sciences Alimentaires*

## *Thème*

---

# **Evaluation du degré de la pollution inorganique des trois bassins du port de Béjaïa**

---

*Devant la commission de jury composée de :*

**Président : M<sup>f</sup> MOALI A.**

**Directeur du mémoire : M<sup>f</sup> CHIBANE M.**

**Co-directeur du mémoire : M<sup>f</sup> MADANI K.**

**Examineurs : M<sup>f</sup> MEKHLOUFI L.  
: M<sup>f</sup> KACI Y.**

Professeur (UAMB)

Professeur (UAMB)

Maître de conférences (UAMB)

Professeur (UAMB)

Maître de conférences (USTHB)

**Année universitaire : 2007/2008**

*« A la lumière de la connaissance, l'heureux résultat semble presque aller de soi ; tout étudiant (...) peut l'appréhender sans trop de difficulté. Mais les longues années de tâtonnements, de recherches dans le noir, avec leur lancinante tension, l'alternance des périodes de confiance et de découragement, puis finalement la sortie vers la lumière, seuls ceux qui ont éprouvé cela peuvent le comprendre. » A. Einstein (1934).*

## ❧ Remerciements ❧

Il m'est agréable ici de remercier tous ceux qui m'ont aidé à réaliser cette thèse, d'abord M<sup>r</sup> *CHIBANE M.*, pour avoir accepté mon encadrement, ainsi que M<sup>r</sup> *MADANI K.*, pour son accueil au sein du laboratoire *3BS*, la confiance qu'il a su m'accorder et la liberté qu'il m'a laissée dans le déroulement de mes recherches, je tiens à lui exprimer ma plus vive reconnaissance pour sa disponibilité, ses conseils, sa gentillesse et son encouragement.

J'adresse ma profonde reconnaissance à M<sup>r</sup> *MOALI A.*, Professeur à l'université de Béjaïa pour avoir accepté de présider ce jury de mémoire.

Je témoigne toute ma gratitude à M<sup>r</sup> *MEKHOULFI L.* Professeur à l'université de Béjaïa et à M<sup>r</sup> *KACI Y.*, Maître de conférences à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene pour avoir mobilisé leur temps et leurs compétences afin de juger ce travail.

Mes remerciements iront en suite au personnel du laboratoire de la Spectrophotométrie d'Absorption Atomique, je tiens à remercier ici M<sup>me</sup> *BRADAI F.*, et M<sup>r</sup> *MAMMAS M.*, pour leur sympathie et gentillesse, il m'était très agréable de travailler avec eux !!

Ce travail n'a été possible que grâce à la participation de différents organismes. Je tiens donc à remercier ici : la DHW, l'ONA, la DMI, la direction de l'environnement et la station Météo particulièrement M<sup>r</sup> *ATMANI A.*

Je tiens aussi à remercier l'EPB pour avoir financé ce travail.

À ma famille, je ne saurais par quel bout commencer pour exprimer mon immense gratitude, entre autre, de m'avoir permis d'aller au plus loin dans les études ...un énorme merci à ma sœur *Malika* qui a pris la peine de lire attentivement tout ce document !!!

À tous mes ami(e)s.

Enfin, au-delà de l'aide scientifique, je voudrais, sans les nommer, remercier ceux qui présents ou non m'ont toujours apporté le soutien moral et affectif nécessaire dans les moments de découragements, et qui de cette façon, ont également contribué quelque part à l'élaboration de ce travail.

J'ai une pensée toute particulière pour mon très cher père qui malgré son absence me donne tous les jours la force et le courage de prendre la vie du bon côté, d'être le plus cool possible et de toujours voir la réalité de façon positive...

## *Sommaire*

<b>Sommaire</b>	<b>i</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>v</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>vii</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
 <b><u>CHAPITRE I : POLLUTION MARINE – MÉTAUX LOURDS</u></b> 	
<b>I.1. Pollution du milieu marin .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1.1. Définition de la pollution marine .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.1. Origine de la pollution marine .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2.1.1. Pollution atmosphérique .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2.2.2. Pollution tellurique .....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3.3. Pollution thermique .....</b>	<b>6</b>
<b>I.2. Métaux lourds .....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.1. Définition des métaux lourds .....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.2. Principales propriétés physico-chimiques des métaux lourds .....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.2.1. La solubilité .....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.2.2. La stabilité .....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.2.3. La volatilité .....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.2.4. Autres propriétés .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.3. Pourquoi l'homme utilise-t-il les métaux lourds ? .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.4. Sources et répartition des métaux traces .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.5. Formes physico-chimiques possibles des métaux dans le milieu marin ...</b>	<b>10</b>
<b>I.2.6. Mobilisation des métaux lourds .....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.7. Devenir des métaux dans l'environnement marin .....</b>	<b>12</b>
<b>I.2.8. Principaux métaux étudiés .....</b>	<b>12</b>
<b>I.2.8.1. Fer .....</b>	<b>12</b>
<b>I.2.8.2. Nickel .....</b>	<b>13</b>
<b>I.2.8.3. Chrome .....</b>	<b>14</b>
<b>I.2.8.4. Zinc .....</b>	<b>16</b>
<b>I.2.8.5. Plomb .....</b>	<b>17</b>
<b>I.2.8.6. Cobalt .....</b>	<b>18</b>
<b>I.2.8.7. Cadmium .....</b>	<b>19</b>
<b>I.2.8.8. Cuivre .....</b>	<b>20</b>

## CHAPITRE II : PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

<b>II.1.</b> Données naturelles .....	<b>22</b>
<b>II.1.1.</b> Cadre géographique .....	<b>22</b>
<b>II.1.2.</b> Cadre géologique et pédologie .....	<b>23</b>
<b>II.1.2.1.</b> Le Jurassique .....	<b>23</b>
<b>II.1.2.2.</b> Le Jurassique supérieur .....	<b>23</b>
<b>II.1.2.3.</b> Le Crétacé .....	<b>23</b>
<b>II.2.</b> Données climatiques .....	<b>25</b>
<b>II.2.1.</b> Pluviométrie .....	<b>25</b>
<b>II.2.2.</b> Température .....	<b>25</b>
<b>II.2.3.</b> Humidité .....	<b>26</b>
<b>II.3.</b> Aspects hydrodynamiques du site .....	<b>26</b>
<b>II.3.1.</b> Courants .....	<b>26</b>
<b>II.3.2.</b> Vent .....	<b>27</b>
<b>II.4.</b> Le site d'étude .....	<b>28</b>
<b>II.4.1.</b> Historique du site d'étude .....	<b>28</b>
<b>II.4.2.</b> Présentation de la zone d'étude (Port de Béjaïa) .....	<b>29</b>
<b>II.4.2.1.</b> Position géographique .....	<b>29</b>
<b>II.4.2.2.</b> Situation géographique .....	<b>29</b>
<b>II.4.2.3.</b> Mouillage .....	<b>29</b>
<b>II.4.2.4.</b> Accès au port .....	<b>30</b>
<b>II.4.2.5.</b> Bassins du port .....	<b>30</b>
<b>II.4.2.6.</b> Jetées et brise-lames .....	<b>30</b>
<b>II.5.</b> Anthropisation .....	<b>32</b>
<b>II.5.1.</b> Eaux usées domestiques (Réseau d'assainissement) .....	<b>32</b>
<b>II.5.1.1.</b> Estimation de la consommation .....	<b>34</b>
<b>II.5.1.2.</b> Estimation des débits moyens .....	<b>35</b>
<b>II.5.2.</b> Les effluents industriels .....	<b>35</b>
<b>II.6.</b> Les eaux pluviales .....	<b>38</b>

## CHAPITRE III : MATERIEL & MÉTHODES

<b>III.1.</b> Travaux effectués en mer .....	<b>39</b>
--	-----------

III.1.1. Échantillonnage et prélèvement .....	41
III.1.2. Mesures <i>in situ</i> .....	41
III.1.2.1. Température .....	41
III.1.2.2. pH.....	42
III.2 Travaux effectués au laboratoire .....	42
III.2.1. Détermination des paramètres physico-chimiques .....	42
III.2.1.1. L'oxygène dissous .....	42
III.2.1.2. Turbidité .....	42
III.2.1.3. Conductivité .....	43
III.2.2. Acidification .....	43
III.2.3. Détermination des métaux traces .....	43
III.2.3.1. Spectrophotométrie d'absorption atomique de flamme (SAA).....	44
a. Principe .....	44
b. Eléments constitutifs de l'appareil .....	44
III.2.3.2. Analyse de la phase dissoute (métaux dissous) .....	46
III.2.3.3 Analyse de la phase particulaire (métaux particulaires) .....	47
III.2.3.4. Préparation des solutions étalons .....	49
III.2.4. Dosage des métaux lourds avec la SAA .....	49
III.2.4.1. Dosage du fer .....	49
III.2.4.2. Dosage du nickel.....	50
III.2.4.3. Dosage du chrome .....	50
III.2.4.4. Dosage du Zinc .....	51
III.2.4.5. Dosage du plomb .....	51
III.2.4.6. Dosage du cobalt.....	52
III.2.4.7. Dosage du cadmium.....	52
III.2.4.8. Dosage du cuivre .....	53
<b><u>CHAPITRE IV : RÉSULTATS &amp; DISCUSSION</u></b>	
IV.1. Discussion et interprétation des résultats d'analyse physico-chimiques .....	57
IV.1.1. Température .....	57
IV.1.2. Potentiel Hydrogène (pH) .....	58
IV.1.3. Oxygène dissous .....	59
IV.1.4. Turbidité .....	60
IV.1.5. Conductivité .....	62
IV.2. Profil de distribution des métaux lourds dans les échantillons d'eau de mer .....	63
IV.2.1. Le Fer .....	63

---

IV.2.2. Le Nickel.....	64
IV.2.3. Le Chrome.....	65
IV.2.4. Le Zinc.....	66
IV.2.5. Le Plomb.....	67
IV.2.6. Le Cobalt.....	68
IV.2.7. Le Cadmium.....	68
IV.2.8. Le Cuivre.....	68
IV.3. Prédominance des métaux dissous et particuliers.....	68
IV.4. Interprétation des teneurs en métaux dissous et particuliers.....	69
IV.5. Partition des métaux traces.....	78
IV.6. Application statistique.....	81
IV.6.1. Corrélacion inter-élémentaire.....	81
IV.6.2. Corrélacion inter-métaux.....	82
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>85</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>88</b>
<b>ANNEXE I.....</b>	<b>101</b>
<b>ANNEXE II.....</b>	<b>103</b>
<b>ANNEXE III.....</b>	<b>106</b>
<b>ANNEXE IV.....</b>	<b>107</b>

## **Liste des tableaux**

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>I.1</b>	Origines et natures de différentes sources de pollution du milieu aquatique	<b>5</b>
<b>I.2</b>	Formes physico-chimiques possibles des métaux dans le milieu aquatique	<b>10</b>
<b>I.3</b>	Concentration en plomb inorganique ayant des effets sublétaux sur différents groupes d'organismes	<b>18</b>
<b>II.1</b>	Moyenne des précipitations inter-mensuelles	<b>25</b>
<b>II.2</b>	Température moyenne mensuelle	<b>25</b>
<b>II.3</b>	Humidité relative moyenne	<b>26</b>
<b>II.4</b>	Vitesse des vents moyenne	<b>27</b>
<b>II.5</b>	Localisation des points de rejets et le type de réseau au niveau des trois bassins du Port	<b>34</b>
<b>II.6</b>	Les unités industrielles polluantes au niveau de la ville de Béjaïa	<b>36 et 37</b>
<b>III.1</b>	Condition analytiques des mesures par la SAAF	<b>46</b>
<b>III.2</b>	Les différents électrolytes utilisés pour la préparation des solutions étalons	<b>49</b>
<b>III.3</b>	Résultats de mesure des paramètres physico-chimiques des eaux du port de Béjaïa	<b>54</b>
<b>III.4</b>	Teneur en métaux dissous de l'eau de mer ( $\mu\text{g/l}$ )	<b>55</b>
<b>III.5</b>	Teneurs en métaux particulaires de l'eau de mer ( $\text{mg/kg}$ )	<b>56</b>
<b>IV.1</b>	Tableau comparatif des résultats des éléments métalliques entre la région d'étude (Port de Béjaïa) et différentes régions du globe	<b>77</b>
<b>IV.2</b>	Coefficient de partition ( $K_d$ ) des métaux traces étudiés dans les eaux portuaires de Béjaïa	<b>79</b>
<b>IV.3</b>	Matrice de corrélation des métaux particulaires ( $p < 0.05$ )	<b>82</b>
<b>IV.4</b>	Matrice de corrélation des métaux dissous ( $p < 0.05$ )	<b>81</b>

## Liste des figures

<b>Nº</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>I.1</b>	Schéma des conséquences d'un polluant sur un écosystème aquatique	<b>7</b>
<b>I.2</b>	Cycle géochimique simplifié des métaux lourds	<b>9</b>
<b>I.3</b>	Réactions d'échanges du métal M avec les constituants organiques et inorganiques du milieu	<b>11</b>
<b>II.1</b>	Le golf de Béjaïa	<b>22</b>
<b>II.2</b>	Carte géologique de la ville de Béjaïa	<b>24</b>
<b>II.3</b>	Les courants Généraux de surface en baie de Béjaïa	<b>27</b>
<b>II.4</b>	Port de Béjaïa avec ces trois bassins, jetées et accès	<b>31</b>
<b>II.5</b>	Réseau d'assainissement de la partie Nord-Est de la ville de Béjaïa	<b>33</b>
<b>III.1</b>	Bouteille de prrélèvement en polyéthylène	<b>39</b>
<b>III.2</b>	Localisation des stations de prélèvement	<b>40</b>
<b>III.3</b>	Appareil représentant le Spectrophotomètre d'Absorption Atomique	<b>44</b>
<b>III.4</b>	Schéma du principe de fonctionnement du SAA de flamme	<b>45</b>
<b>III.5</b>	Système de filtration des eaux de mer	<b>49</b>
<b>III.6</b>	Dosage des éléments métalliques dissous et particulaire dans l'eau de mer	<b>48</b>
<b>IV.1</b>	Variation de la température des eaux portuaires de Béjaïa	<b>57</b>
<b>IV.2</b>	Variation du pH de l'eau de mer du port de Béjaïa	<b>58</b>
<b>IV.3</b>	Variation de la teneur en OD des eaux portuaires de Béjaïa	<b>59</b>
<b>IV.4</b>	Variation de la turbidité de l'eau de mer du port de Béjaïa	<b>61</b>
<b>IV.5</b>	Variation de la conductivité de l'eau de mer	<b>62</b>
<b>IV.6</b>	Variation des concentrations en fer dissous et particulaire dans les eaux de mer du port de Béjaïa	<b>64</b>
<b>IV.7</b>	Variation des concentrations en nickel dissous et particulaires dans les eaux portuaires	<b>65</b>
<b>IV.8</b>	Variation des teneurs en chrome dissous et particulaires dans les eaux du Port de Béjaïa	<b>66</b>
<b>IV.9</b>	Variation des concentrations en zinc dissous et particulaires dans les eaux portuaires	<b>67</b>
<b>IV.10</b>	Variation des teneurs en plomb particulaire dans les eaux du port de Béjaïa	<b>67</b>
<b>IV.11</b>	Variation des teneurs en cobalt dissous dans les eaux du port de Béjaïa	<b>68</b>
<b>IV.12</b>	Représentation des prédominances des micropolluants particulaires	<b>69</b>
<b>IV.13</b>	Représentation des prédominances des micropolluants dissous	<b>69</b>
<b>IV.14</b>	Co-variation (a) OD – pH et (b) Température – OD dans l'eau de mer	<b>82</b>
<b>IV.15</b>	Co-variation (a) : fer/zinc, (b) : fer/nickel dans les MES	<b>83</b>
<b>IV.16</b>	Co-variation du Chrome et nickel dissous dans les eaux portuaires de Béjaïa.	<b>84</b>

## *Liste des abréviations*

- **AEAP** : Agence de l'Eau Artois Picardie
- **ANOVA** : **A**nalysis **O**f **V**ariance
- **BCF** : **B**io**C**oncentration **F**actor (Facteur de **B**io**C**oncentration).
- **CEAEQ** : Centre d'Expertise en Analyses Environnementales du Québec
- **DHW** : Direction de l'Hydraulique de la Wilaya
- **DPAT** : Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire
- **DRE** : Direction Régionale de l'Environnement
- **EDTA** : Ethylène Diamine Tétracétique Acid
- **FOGEM** : Forum d'Observateurs et Gestionnaires des Etangs Méditerranéens
- **IAEA**: International Agency Energy Atomic
- **ICP-MS** : Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (Spectrométrie de Masse de Plasma d'Argon à Couplage Inductif).
- **IFREMER** : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER
- **JOM** : Journal Officiel de Monaco
- **MA** : Masse Atomique
- **MES** : Matières En Suspension
- **METAP** : Programme d'Assistance Technique pour l'Environnement en Méditerranée
- **MO** : Matières Organiques
- **MOD** : Matières Organiques Dissoutes
- **NA** : Numéro Atomique
- **NTA** : Acide Nitrolotriacétique
- **OFEFP** : Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage
- **OSPAR** : Oslo Paris Convention
- **PNUE** : Programme des Nations Unies pour l'Environnement
- **RINBIO** : Réseau Intégrateurs Biologiques
- **RNO** : Réseau National d'Observation de la Qualité du Milieu Marin
- **SAA** : Spectrophotométrie d'Absorption Atomique
- **SM** : Station Météo
- **STEP** : Station d'Épuration
- **UE** : Union Européenne

*Introduction  
générale*

## INTRODUCTION GENERALE

**D**epuis le début du siècle, l'environnement (atmosphérique, terrestre et aquatique) a été soumis à la pression croissante des activités industrielles et humaines dont les effets se sont faits rapidement sentir (Geffard, 2001).

La rapide croissance démographique, l'urbanisation accrue, l'expansion des activités industrielles, la prospection et l'exploitation des ressources naturelles, l'extension de l'irrigation et la propagation d'autres pratiques agricoles modernes ainsi que l'absence relative de réglementations concernant l'environnement, s'accompagnent inévitablement par des problèmes de pollution de l'environnement aquatique. En effet, du fait de l'activité humaine, au moins 100 000 substances pénètrent au milieu marin *via* l'atmosphère ou les eaux continentales exoréiques et qui sont considérées dangereuses pour l'environnement marin à cause de leur toxicité, leur persistance et leur bioaccumulation. Quelques unes de ces substances, comme les pesticides et les radioéléments artificiels, sont étrangères au milieu marin ; d'autres existent déjà naturellement mais leurs concentrations sont altérées par l'intervention humaine. C'est le cas, par exemple du plomb dans les eaux côtières dont la concentration a varié avec les changements dans l'utilisation de ses dérivés tétra-éthylés ou méthylés dans l'essence des voitures (Nakhlé, 2003 ; Baan et Groeneveld, 2002).

La contamination côtière est particulièrement intéressée, car elle est le résultat du déversement des déchets de deux sources principales industrielles et domestiques (UNEP, 1991). La nature hautement dynamique de l'environnement marin mène à des assimilations rapides de ces matériaux par des processus, tels que la dilution, la dispersion, l'oxydation, la dégradation ou la séquestration dans les sédiments. Dans une certaine mesure, cette conception ancienne de la capacité illimitée de dilution des océans aurait pu être confirmée, si tous les déchets rejetés dans les océans pouvaient se disperser et se dissoudre instantanément dans la masse totale des océans. Cependant, la capacité pour de telles assimilations est limitée entraînant ainsi des conséquences fâcheuses pour l'environnement (Fatoki et Mathabatha, 2001 ; Walldichuk, 1978).

Les déchets rejetés contiennent, en plus des polluants classiques (matières oxydables, nutriments), un grand nombre de micropolluants, et en particulier des éléments traces

métalliques dont le premier accident s'est déjà manifesté à Minamata au Japon en 1953. Certains de ces éléments sont dits "oligo-éléments", car ils sont indispensables au métabolisme des êtres vivants en très faible dose, mais peuvent être toxiques lorsque leurs concentrations dépassent un certain seuil ; c'est le cas du fer, cuivre et zinc par exemple, certains autres comme le mercure, cadmium et plomb ne sont pas nécessaires à la vie et sont préjudiciables.

Les zones portuaires sont les plus menacées par la pollution du fait qu'elles sont considérées comme une énorme poubelle propre à recueillir tous les déchets de l'humanité dus principalement aux rejets, en grande partie incontrôlés d'effluents domestiques et industriels ; il s'agit des biotopes perturbés par excellence. C'est le cas du port de la wilaya de Bejaïa qui n'est pas à l'abri de cette menace, il est donc jugé nécessaire d'en évaluer l'état de pollution.

Notre étude s'inscrit dans le cadre d'une Convention de financement des mémoires de Magister entre l'Entreprise Portuaire de Bejaïa (**EPB**)-Université Abderahmane Mira-Béjaïa, le travail a été réalisé sous la direction de l'environnement du laboratoire de *Biophysique, Biochimie, Biomathématique et Scientométrie (3BS)* de l'université de Bejaïa qui a classé ce travail parmi ses préoccupations les plus importantes afin de contribuer à l'évaluation du degré de la pollution inorganique des trois bassins du port de Bejaïa.

Des échantillons d'eau de mer sont, de ce fait, prélevés des trois bassins au niveau de dix sept stations de prélèvements bien déterminées et des dosages des métaux traces sont alors réalisés. Les métaux recherchés sont au nombre de huit, six sont essentiels à la vie mais à de faibles concentrations : le zinc (**Zn**), le nickel (**Ni**), le cuivre (**Cu**), le fer (**Fe**), le cobalt (**Co**) et le chrome (**Cr**), les deux restants sont toxiques : le cadmium (**Cd**) et le plomb (**Pb**).

Ce travail a pour objectif de :

- Savoir si le port présente une pollution inorganique;
- Déterminer les variations spatiales que le milieu pourra éventuellement présenter;
- Déterminer le profil horizontal de distribution des éléments traces métalliques;
- Déterminer les corrélations inter-élémentaires et inter-métaux ;
- Pouvoir cerner les sources susceptibles d'être à l'origine de cette pollution.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Le premier sera consacré à une étude bibliographique où nous donnerons un aperçu général sur la pollution marine et insisterons sur tout ce qui concerne les éléments traces métalliques dans le milieu marin.
- Dans le deuxième, nous présenterons la zone d'étude.
- Le troisième, pour sa part, abordera les méthodes d'analyses suivies pour la réalisation des dosages des éléments métalliques et la mesure de certains paramètres physico-chimiques d'accompagnement.
- Quant au quatrième, il aura pour objet la présentation et la discussion des résultats obtenus ; enfin et pour conclure notre travail, nous reprendrons l'essentiel des résultats auxquels nous sommes arrivés dans une conclusion générale.

*Chapitre I : Pollution  
marine – Métaux lourds*

L'étude des métaux traces en milieu aquatique mobilise des recherches depuis plusieurs décennies. Leur caractère bioaccumulatif et leurs effets délétères à faibles concentrations expliquent la publication d'un nombre considérables d'ouvrages et d'articles scientifiques (Kantin et Marchand, 1997). Ces derniers concernent l'étude de leurs concentration, distribution, association, mobilisation, toxicité pour les microorganismes marins et l'humain et leur bioaccumulation le long de la chaîne trophique (Hirose, 2006 ; Verlecar *et al.*, 2006; Motelay-Massei *et al.*, 2005 ; Adamo *et al.*, 2003 ; Prego et Cobelo-García, 2003 ; Fatoki et Mathabatha, 2001 ; Munksgaard et Parry, 2001 ; Steimle *et al.*, 1994; Fowler *et al.*, 1983).

Actuellement, l'usage de nombre de ces métaux est réglementé, tant en ce qui concerne leur utilisation et leur rejet que les teneurs admissibles dans les milieux aquatiques (Kantin et Marchand, 1997).

En Algérie, plusieurs études ont été menées dans ce sens, portant sur l'étude de l'état de divers milieux aquatiques, il s'agit des Oueds (Seybouse d'Annaba, Bouaroua et Bousselem de Sétif, Soummam de Béjaïa,...etc.), des nappes, des baies (Alger, Annaba et Jijel,...etc.) (Derradji *et al.*, 2005 ; Matmed, 2004 ; Derradji *et al.*, 2003 ; Debieche, 2002).

## **I.1. Pollution du milieu marin**

Les développements urbains, industriels et agricoles ont un impact négatif sur le milieu marin, plus particulièrement les ports qui reçoivent des quantités importantes de déchets.

### **I.1.1. Définition de la pollution marine**

D'après la définition donnée par le groupe mixte d'experts OMI/FAO/Unesco-COI/OMM/OMS/AIEA/ONU/PNUE chargé d'étudier les aspects scientifiques de la protection de l'environnement marin (GESAMP) In Calamari et Naeve (1994), on entend par pollution du milieu marin " *L'introduction, directe ou indirecte, par l'homme, de substances ou d'énergie dans le milieu marin (y compris les estuaires) lorsqu'elle a des effets nuisibles tels que dommage aux ressources biologiques, risques pour la santé de l'homme, entrave aux activités maritimes, y compris la pêche, altération de la qualité de l'eau de mer du point de vue de son utilisation, et dégradation de valeurs d'agrément*".

On distingue trois grandes familles de pollution : pollution physique, chimique et biologique (voir tableau suivant) (Chouteau, 2004).

**Tableau I.1** : Origines et natures de différentes sources de pollution du milieu aquatique  
(Chouteau, 2004)

Types de pollution	Nature	Origines
Physique	Rejet d'eau chaude	Centrales thermiques, nucléaires.
	M.E.S	Rejets urbains, érosion des sols
Chimique	Matières organiques	Effluents domestiques, agricoles, agroalimentaires.
	Fertilisants (nitrates, phosphates)	Agriculture, lessives.
	<b>Métaux (Cd, Hg, Pb,.....)</b>	Industries, agricultures, déchets
	Pesticides (insecticides, herbicides et fongicides.....)	Industries, agriculture
	Organochlorés (PCB, Solvants)	Industries
	Composés organiques de synthèse	Industries
	Détergents	Effluents domestiques
	Hydrocarbures	Industrie pétrolière, transport
Biologique	Bactéries, virus, champignons,...	Effluents urbains, agricoles

De très nombreuses molécules sont donc susceptibles de polluer le milieu marin. Cependant, nous nous intéresserons dans cette étude à quelques métaux lourds (zinc, cadmium, cuivre,...) qui sont considérés des micropolluants puisqu'ils sont présents dans les différents compartiments de l'environnement à l'état de trace.

## I.1.2. Origine de la pollution marine

### I.1.2.1. Pollution atmosphérique

L'atmosphère est un compartiment essentiel du cheminement de l'eau. Il constitue un récepteur géochimique et un milieu de transport préférentiel pour de nombreux éléments traces, faisant par ailleurs, partie intégrante du cycle biogéochimique des métaux et des polluants organiques persistants. La présence de divers éléments dans l'atmosphère (aérosols, métaux traces, anions, cations, micro-organismes) résulte de deux types de processus, à savoir : les processus anthropiques dus aux activités industrielles, et les apports d'origine naturelle. Les processus anthropiques sont à l'origine d'importantes émissions de polluants dans l'environnement et prennent progressivement le pas sur ceux d'origine naturelle (Nakhlé, 2003 ; Thévenot *et al.*, 2002). Les métaux traces font partie de ces éléments et molécules qui circulent dans l'atmosphère, en particulier Cd et Pb.

### **I.1.2.2. Pollution tellurique**

La pollution d'origine tellurique est la pollution émanant des territoires continentaux et atteignant la mer directement, par des émissaires en mer ou par dépôt ou déversements effectués sur la côte ou à partir de celle-ci ; et indirectement, par l'intermédiaire des fleuves, canaux ou autres cours d'eau, y compris des cours d'eau souterrains, ou du ruissellement (JOM, 2004).

### **I.1.2.3. Pollution thermique**

La pollution thermique est le fait du rejet d'eau de mer utilisée pour le refroidissement d'installations industrielles diverses : raffineries de pétrole, centrales thermiques,... etc. Le réchauffement est toujours de 6 °C à 7 °C au minimum et peut avoisiner 10 °C. L'élévation de la température en elle-même est une pollution, de plus, cet échauffement entraîne la diminution de la densité. Lorsque de l'eau douce ou saumâtre est pompée dans un fleuve ou un estuaire et rejetée dans l'estuaire ou la mer, à la pollution liée au facteur température s'ajoute, pour les peuplements typiquement marins, une pollution accessoire liée à l'abaissement de la salinité. De plus, les eaux rejetées par des usines peuvent s'être chargées en produits polluants et l'on retrouve alors les différents types de pollution chimiques dissoutes (Bellan et Pérès, 1979).

Une substance polluante peut avoir plusieurs effets à différents niveaux, le schéma ci-dessous illustre les conséquences d'un polluant sur un écosystème aquatique :

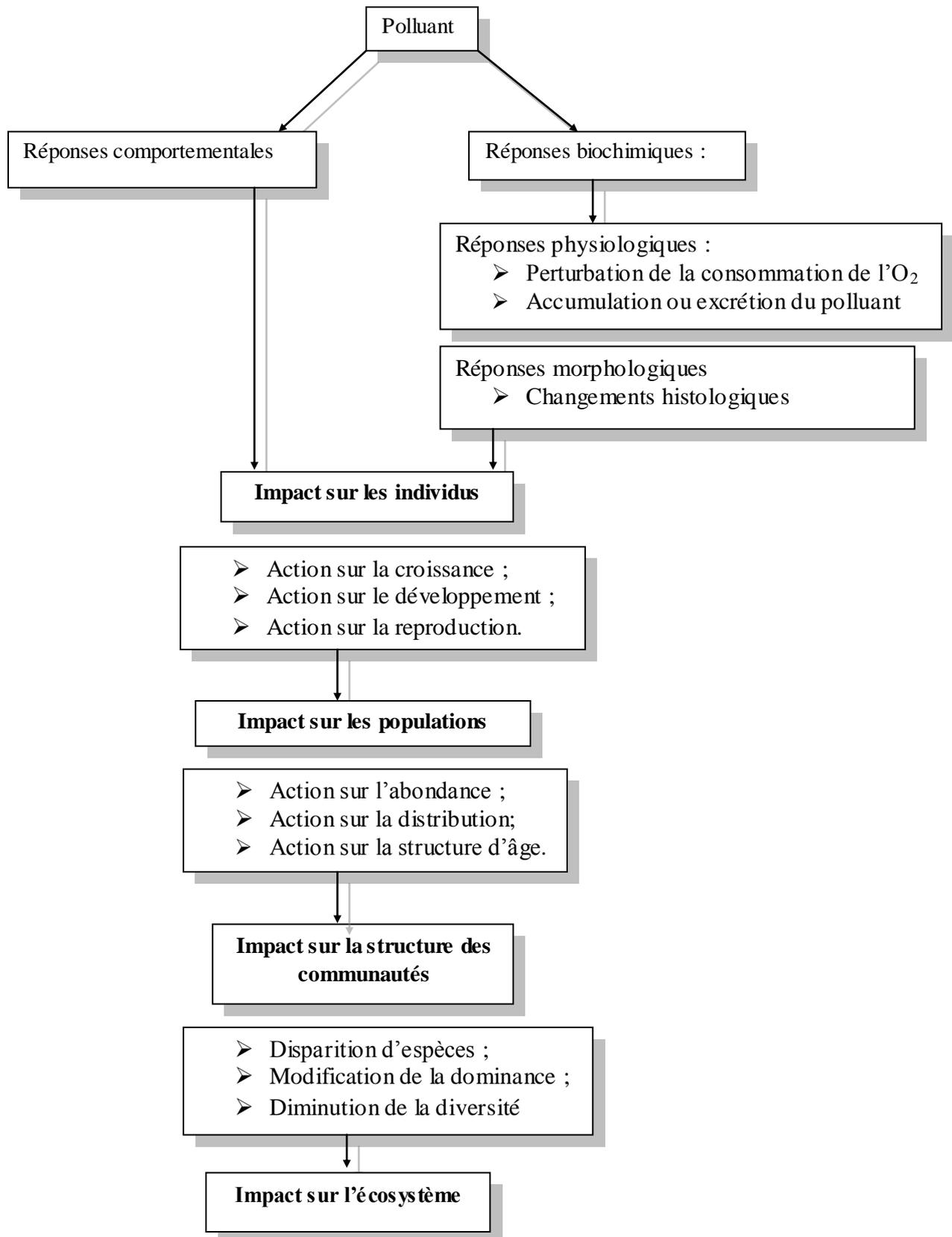


Figure I.1 : Schéma des conséquences d'un polluant sur un écosystème aquatique (Chouteau, 2004).

## **I.2. Métaux lourds**

### **I.2.1. Définition des métaux lourds**

Le protocole métaux lourds de la convention de Genève désigne par le terme « *métaux lourds* » les métaux ou dans certains cas les métalloïdes et leurs composés qui ont une masse volumique supérieure à  $4,5 \text{ g/cm}^3$ . Les métaux lourds sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais en général en quantité très faible. Les métaux sont dits présents « *en traces* » car leur concentration est inférieure à un pour mille dans la croûte terrestre, ou 0.1 pour mille dans les êtres vivants ( $< 100 \text{ mg/kg}$  Matière Sèche), ils sont également la « *trace* » du passé géologique et de l'activité de l'homme. En outre, la classification en métaux lourds est souvent discutée, car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement "*lourds*" (ex : zinc), tandis que certains éléments toxiques ne sont pas tous des métaux mais des métalloïdes (ex : l'arsenic). Pour ces différentes raisons, la plupart des scientifiques préfèrent à l'appellation "métaux lourds" celle d'"*éléments en traces métalliques* (ETM)" ou pas extension "*éléments traces*" ou "*métaux traces*" (Brugneaux *et al.*, 2004; Chiffolleau *et al.*, 2001; Boutonnet, 2000).

### **I.2.2. Principales propriétés physico-chimiques des métaux lourds**

#### **I.2.2.1. La solubilité**

La solubilité des métaux lourds dépend de l'élément concerné, du chimisme de la phase aqueuse (pH, potentiel redox, concentration en ligands) et des phases solides environnantes. Par exemple, l'hydrosolubilité des métaux lourds est fortement accrue par l'acidité.

#### **I.2.2.2. La stabilité**

Contrairement aux contaminants organiques, les métaux lourds sont indéfiniment stables en tant que tel et ne se dégradent pas dans l'environnement.

#### **I.2.2.3. La volatilité**

De façon générale, les métaux ne sont pas volatils, à l'exception du mercure dont le point d'ébullition est de  $357 \text{ °C}$  à une pression de  $101 \text{ kPa}$  (Hébrard-Labit et Meffray, 2004 ; Lémère *et al.*, 2001).

#### **I.2.2.4. Autres propriétés**

- Structure cristalline à température ambiante, à l'exception du mercure qui est liquide ;
- Aspect brillant ;
- Ductilité et malléabilité ;
- Électrons de conduction faiblement liés, d'où une propension à former des cations et des liaisons ioniques ; et
- Bonne, voire excellente conductivité thermique et électrique (Sirven, 2006).

#### **I.2.3. Pourquoi l'homme utilise-t-il les métaux lourds ?**

La problématique des métaux et des métaux lourds en particulier repose sur le fait qu'ils sont très utiles, voire indispensables à l'homme. En effet, de part leurs propriétés, ils entrent dans la composition d'une grande variété de produits, et se retrouvent à de nombreux niveaux: métallurgie, chimie, pharmacie, énergie, ...etc. Il semble donc assez difficile de s'en passer et de les substituer (Di Benedetto, 1997).

#### **I.2.4. Sources et répartition des métaux lourds**

Les métaux lourds proviennent principalement de l'érosion des roches, des sols et des sédiments où ils sont présents à l'état naturel, mais aussi majoritairement des activités humaines :

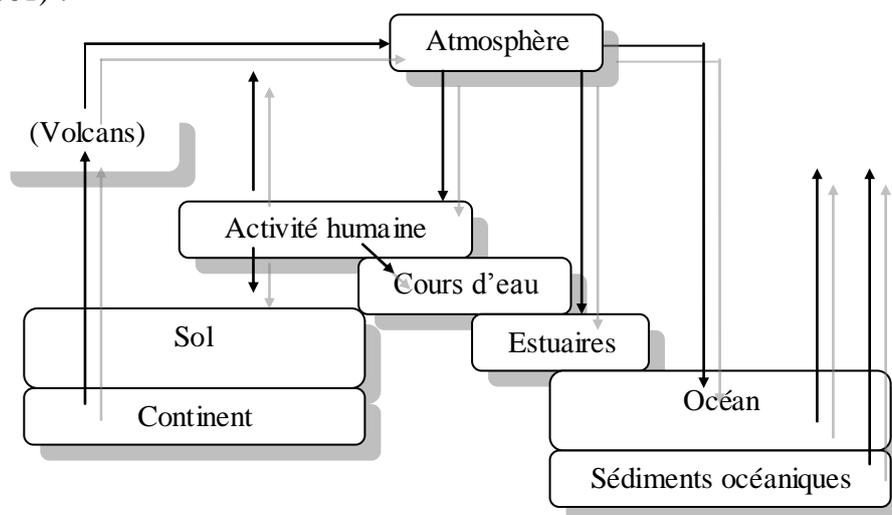
- Sources ponctuelles (rejet massif dans un espace géographique restreint) : mines, fonderies, industries diverses.
- Sources diffuses (rejet disséminé dans le milieu) : eaux de pluie, rejets des réseaux d'assainissement urbain, ruissellements des forêts et des zones agricoles, déchets des animaux sauvages (Geffard, 2001).

En effet, l'activité humaine modifie juste le cycle du métal considéré suivant deux modes :

- En augmentant la quantité d'élément mobilisé dans le cycle ;
- En changeant la répartition des métaux, les formes chimiques (ou spéciation), ce qui peut rendre ces derniers plus réactifs et donc potentiellement plus toxiques (Nicolau, 2005).

Ces modifications du cycle des éléments vont avoir des effets négatifs sur l'écosystème aquatique, sur les organismes qui y vivent et par conséquent sur la santé humaine ; l'homme étant au sommet de la chaîne alimentaire (Nicolau, 2005).

La figure ci-après illustre le cycle géochimique simplifié des métaux lourds selon Miquel (2001) :



**Figure I.2:** Cycle géochimique simplifié des métaux lourds (Miquel, 2001).

### I.2.5. Formes physico-chimiques possibles des métaux dans le milieu marin

Dans l'eau de mer, les métaux traces qui peuvent passer par plusieurs états d'oxydation sont sujets à un cycle redox dynamique. Ce cycle est partiellement alimenté par la photochimie et le plancton. De tout ceci émerge un schéma de relations complexes et dynamiques entre les organismes planctoniques et les métaux traces essentiels dans la couche d'eau de surface: acquisition, chélation, couplage, réduction, oxydation et solubilisation, par conséquent, les très faibles concentrations en métaux sont à la fois la cause et le résultat du système d'acquisition ultra-efficace du plancton et de la substitution courante de ces métaux par d'autres dans diverses fonctions biochimiques (Morel et Price, 2003).

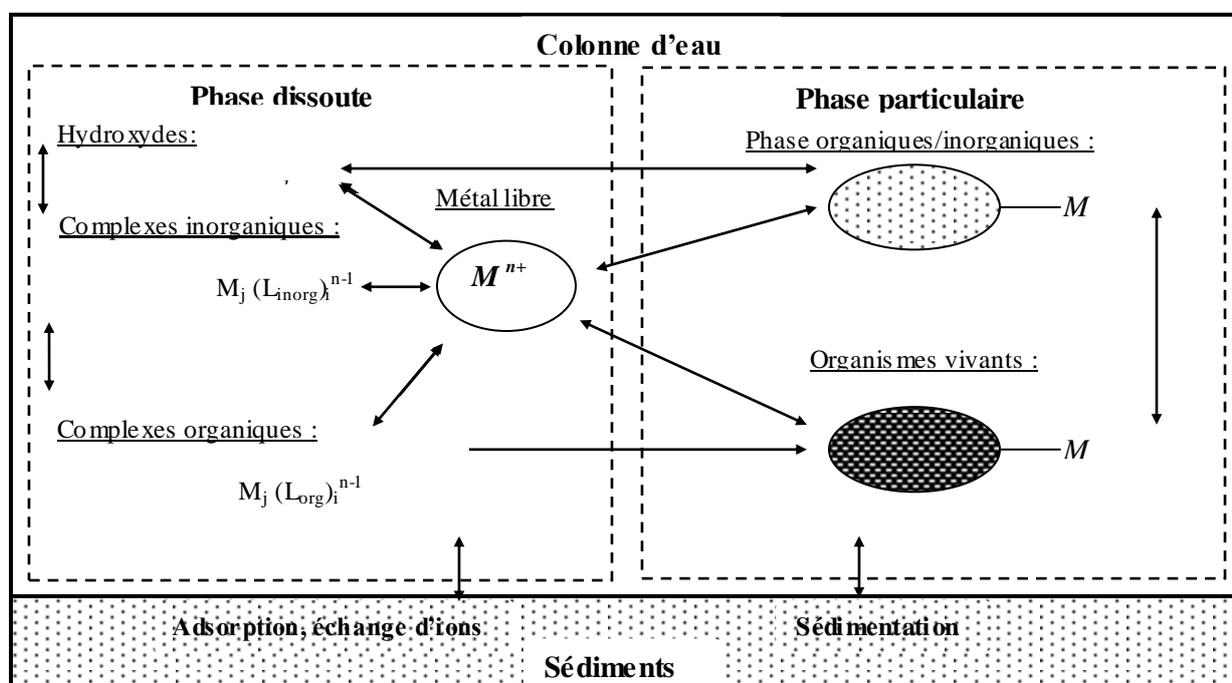
**Tableau I.2 :** Formes physico-chimiques possibles des métaux dans le milieu aquatique (Chouteau, 2004).

Formes physico-chimiques possibles		Exemple
Ions métalliques hydratés		$\text{Cd}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$
Complexes	Organique	Al-citrate, Cu-fulvate
	Inorganique	$\text{CuCO}_3$
Espèces colloïdales	Organique	$\text{Cu}^{2+}$ -acide humique
	Inorganique	$\text{Pb}^{2+}$ - $\text{MnO}_2$
Espèces particulaires		Métaux associés à des minéraux, sols, argiles, bactéries, micro-algues, matières organiques

Plusieurs réactions physico-chimiques ou biologiques conditionnant la spéciation d'un métal peuvent donc survenir dans un milieu aussi complexe que le milieu aquatique (Chouteau, 2004) :

- Les réactions de Complexation-Dissociation ;
- Les réactions de Précipitation-Solubilisation ;
- Les réactions Photochimiques ;
- Les réactions d'Adsorption-Désorption ;
- Les réactions Biologiques.

La figure suivante résume les réactions d'association/complexation/adsorption d'un métal vis-à-vis des constituants dissous et particulaires présents dans la colonne d'eau ainsi que les réactions d'échanges avec les sédiments.



**Figure I.3:** Réactions d'échanges du métal  $M$  avec les constituants organiques et inorganiques du milieu aquatique (d'après Buffle, 1988 In Garnier, 2004)

### I.2.6. Mobilisation des métaux lourds

Différents mécanismes sont à l'origine du phénomène de mobilisation des métaux à partir de leur support: réactions d'oxydoréductions, activité biologique, présence de chélatants, ou les perturbations physico-chimiques. Cependant, la mobilisation des métaux fixés dans les sédiments se produit, généralement, selon deux modalités : soit échange au niveau des eaux interstitielles du sédiment, échange qui est largement facilité lorsque les particules sédimentaires sont remises en suspension suite à l'agitation des masses d'eau (fortes crues à l'embouchure des fleuves, houles de fond,...etc.), soit que l'activité des

animaux fouisseurs favorise les échanges chimiques entre l'eau et le sédiment, il s'agit de la bioturbation (Fernandes, 2007 ; Bellan et Pérès, 1979).

### **I.2.7. Devenir des métaux dans l'environnement marin**

Les différentes formes chimiques sous lesquelles peuvent être retrouvés les métaux, dépendent de la physico-chimie du milieu. Par exemple, les métaux dissous peuvent précipiter en cas de changement de pH ou de conditions Redox. À mesure que le cours d'eau grandit, la concentration en carbone organique dissous augmente, ce qui favorise la formation de complexes stables entre les métaux et la MO. Par ailleurs, par l'activité bactérienne, les conditions peuvent devenir anoxiques et réductrices ; les métaux tendent alors à précipiter sous forme de sulfures métalliques. C'est également dans ces conditions réductrices que le mercure est méthylé par des bactéries réductrices de sulfate, puis très fortement accumulé par les organismes vivants (Le goff et Bonnomet, 2004).

### **I.2.8. Principaux métaux étudiés**

Les métaux étudiés dans le présent travail sont le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le fer (Fe), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le nickel (Ni), le chrome (Cr), et le cobalt (Co). Le choix de ces éléments repose tout d'abord, sur leur ubiquité en tant que contaminants chimiques et leur toxicité, particulièrement Cd et Pb qui justifient leur présence sur les sites des contaminants prioritaires des conventions et réglementations internationales (OSPAR, UE,...etc.) ; de plus ce sont les métaux qui ont été utilisés pour développer divers modèles de biodisponibilité et de toxicité dans plusieurs travaux effectués en maints laboratoires à travers le monde.

#### **I.2.8.1. Fer**

Par l'abondance dans la croûte terrestre, le fer (Fe) est le second des métaux et le quatrième des éléments, après l'oxygène, le silicium et l'aluminium. Malgré cette relative abondance au niveau des roches constituant la croûte terrestre, le fer n'est présent qu'en très faibles quantités dans l'eau de mer (Nordberg, 2006 ; Liu et Millero, 2002). C'est un élément métallique de NA 26 et de MA 55.84, il s'agit du plus important élément bioactif et d'un nutriment essentiel pour tous les organismes vivants. Il joue un rôle très important dans la pompe biologique du carbone (Bergquist et Boyle, 2006 ; Wu et Boyle, 2002).

Le fer est présent dans l'eau de mer à l'état dissous et en particules, sous forme dissoute, il peut exister sous deux états d'oxydation ( $Fe^{2+}$  et  $Fe^{3+}$ ), libre ou complexé (Liu et Millero, 2002). Sa solubilité augmente avec la diminution du pH, il est nécessaire à la vie aquatique, en tant que micronutriment (Hirose, 2006 ; Armstrong *et al.*, 2005).

D'après Hiemstra et Van Riemsdijk (2006), l'interaction Fe-MOD est fortement dépendante du pH. Les alcalino-terreux ( $Mg^{2+}$  et  $Ca^{2+}$ ) peuvent être considérés comme d'importants ions compétiteurs du fer pour l'interaction avec la MOD dans l'eau de mer, réduisant ainsi la complexation du fer d'un facteur d'environ 4 à 7.

La dégradation microbienne des particules organiques libère le fer dans les eaux profondes comme formes dissoutes où il réside pour 100 ans avant qu'il soit transféré vers les sédiments profonds (Wu et Boyle, 2002). Le fer ferrique est considéré la forme thermodynamiquement la plus stable dans les conditions oxygènes, de plus, elle est conventionnellement reconnue comme étant la forme prise directement par le phytoplancton (McKay *et al.*, 2004).

Quant à ses utilisations, le fer est utilisé dans la fabrication de fontes à base de fer et il est allié à différents métaux pour la production d'aciers. Le fer est également employé pour augmenter la densité des liquides de forage des puits de pétrole (Nordberg, 2006).

Dans les crustacés, l'accumulation du fer peut s'effectuer sous forme de granules dans des cellules spécifiques. Pour les crevettes et écrevisses, la majorité du fer (87 %) est stockée dans la carapace, dans les mollusques, le fer provient davantage de la nourriture que de l'eau et se trouve réparti de façon homogène dans les tissus mous.

D'après Rodier et Champsaur (2005), le fer ferreux est beaucoup plus toxique que le fer ferrique, l'hydroxyde de fer quant à lui, est dangereux dans le sens où il tend à se déposer sur les branchies de poissons entraînant ainsi leur colmatage. Pour les poissons, 25 à 60 % du fer total sont susceptibles d'être présents dans l'hémoglobine ; le foie, le sang et la bile contiennent de 50 à 100 fois plus de fer que les muscles ou les os. On estime que la répartition standard est : 60 % dans le foie, 12 % dans le squelette et 12 % dans les muscles (Bréchnac et Deville-Cavelin, 2002). Une consommation excessive peut provoquer de la sidérose et des dommages aux organes à cause d'un stockage excessif de fer (hémochromatose), de plus, le fer limite la croissance des algues dans plusieurs régions océaniques et peut également contrôler le taux de l'azote fixé (Wu et Boyle, 2002).

### **I.2.8.2. Nickel**

Le nickel (Ni) à l'état libre constitue 5 à 50 % en poids des météorites. Il se trouve dans plusieurs minerais associé au soufre, à l'oxygène, à l'antimoine, à l'arsenic ou à la silice (Sunderman, 2006), c'est un élément métallique de NA 28 et de MA 58.71.

Selon Eramet (2005) *In* Gouzy (2006), le nickel est un élément très répandu à la surface du globe, on en trouve dans divers milieux naturels :

- Air en zone urbaine : quelques  $\text{ng/m}^3$  ;
- Eau de mer : 0,1 à 0,5  $\mu\text{g/l}$ ;
- Eau potable : quelques  $\mu\text{g/l}$ .

Dans le milieu marin, l'affinité du nickel pour les oxyhydroxydes de fer ou de manganèse constitue la caractéristique essentielle de son comportement géochimique (Gouzy, 2006).

Le nickel est utilisé pour la fabrication de plus de 300 000 produits repartis entre les secteurs industriels, militaires, des transports, de la marine, de l'architecture et des produits destinés au public. Son principal secteur d'utilisation correspond aux aciers inoxydables (62%). Il entre également dans la composition de nombreux alliages en raison de ses caractéristiques de dureté et de résistance à la corrosion (12 %). Les autres formes d'utilisation sont les traitements de surfaces (10 %), les batteries nickel-cadmium et les catalyseurs nickel-aluminium (Gouzy, 2006).

Le nickel se bioaccumule dans les tissus des organismes aquatiques, mais il n'est pas évident qu'il est bio-concentré dans la chaîne trophique. Dans les plantes aquatiques, telles que les algues, les lichens, les mousses et les macrophytes, le BCF du nickel varie de 100 à 10 000. Pour les invertébrés aquatiques, le BCF est très étroit, il varie de 200 à 1000 pour le zooplancton et le benthos. Les poissons ont les BCF les plus bas allant de 220 à 330, ces résultats suppose que la concentration du nickel dans les tissus biologiques diminue généralement dans les niveaux trophiques les plus élevés de la chaîne alimentaire (MacDonald *et al.*, 2002).

Le nickel est un métal toxique à faible concentration, surtout dans des eaux acides, douces et en présence d'autres métaux, ces concentrations naturelles sont très faibles par rapport à ses concentrations bio-efficaces. Des anomalies de développement larvaire ont été observées chez l'huître à des concentrations élevées en sulfate de nickel (Lagarde, 2002 ; Taylor *et al.*, 1998).

### **I.2.8.3. Chrome**

Le chrome (Cr) ne se trouve pas à l'état natif, il existe sous plusieurs valences mais c'est surtout sous l'état trivalent ou hexavalent qu'on le trouve dans la nature, toutefois, le chrome trivalent ( $\text{Cr}^{3+}$ ) est l'état le plus répandu. C'est un métal blanc, brillant, dur et cassant de NA 24 et de MA 51.996 (Alzieu *et al.*, 1999).

Les concentrations en chrome dissous dans l'océan se situent dans une gamme assez réduite, depuis 150  $\text{ng/l}$  à la surface de l'océan mondial, où l'activité phytoplanctonique a

extrait une partie de cet élément, jusqu'à 350 ng/l dans les eaux profondes de l'océan pacifique, ces teneurs se retrouvent aussi dans les mers et les zones littorales (Alzieu *et al.*, 1999).

Le chrome existe sous plusieurs états d'oxydation depuis Cr (0), la forme métallique jusqu'à Cr<sup>6+</sup>, il se retrouve en phase dissoute totalement sous forme réduite (Cr<sup>3+</sup>) dans les bassins anoxiques alors que les eaux océaniques bien oxygénées favorisent la présence de la forme oxydée (Cr<sup>6+</sup>). En milieu océanique, l'incorporation partielle du chrome dissous aux fractions biogéniques siliceuses ou carbonatées provoque une légère diminution des concentrations au voisinage de la surface, la sédimentation et la minéralisation ultérieure de ces phases porteuses provoquent un enrichissement des eaux de fond. Ainsi, le profil vertical de concentration du chrome en milieu océanique est du même type que celui de la silice (Chiffolleau, 1994).

Le peu d'études sur la diagénèse précoce montrent une solubilisation du chrome dans les couches oxiqes du sédiment, avec pour conséquence un flux de chrome dissous vers les eaux sus-jacentes. Dans les couches sédimentaires plus profondes et anoxiques, le chrome libéré se retrouve totalement sous forme Cr<sup>3+</sup> et est enlevé très rapidement de la phase dissoute par adsorption (Chiffolleau, 1994).

A l'état pur, le chrome n'est utilisé que pour la fabrication d'aciers spéciaux, et pour le traitement de surface (dépôt anticorrosion dans l'industrie automobile et chromage). Ses sels sont utilisés comme pigments dans l'industrie textile, la céramique, la verrerie et la photographie (AEAP, 2003).

Le chrome ne s'accumule pas normalement chez les poissons, c'est pourquoi les teneurs sont faibles chez les espèces à la fois marines et d'eau douce capturées dans les sites industrialisés du monde. Les espèces marines collectées dans des zones industrialisées ont souvent des teneurs légèrement supérieures à celles mesurées dans des espèces d'eau douce. Cependant, ces teneurs excèdent rarement 3 mg/kg du poids sec, bien que des concentrations de l'ordre de 4 à 6 mg/kg du poids humide ont été trouvées chez la plie et le hareng en mer d'Irlande et de 6 mg/kg du poids sec chez le poisson lézard en Méditerranée (Chiffolleau, 1994).

La forme réduite (Cr<sup>3+</sup>) fait partie des éléments essentiels dans la vie animale, la forme oxydée (Cr<sup>6+</sup>) est par contre extrêmement toxique et cancérogène à forte dose pour l'homme ; elle provoque des anomalies dans le développement larvaire des bivalves. La teneur en cet

élément est réglementée dans les sédiments, le seuil sans effet dans les sédiments est estimé à 52.3 µg/g (Kantin et Pergent-Martini, 2007 ; Alzieu *et al.*, 1999).

#### **I.2.8.4 Zinc**

Le zinc (Zn) est très répandu dans la nature, il représente environ 0,02 % de l'écorce terrestre, autrement dit, sa teneur serait comprise entre 70 et 132 mg/kg. Le zinc est un élément de NA 30 et de MA 65.4 dont les propriétés chimiques sont comparables à celle des métaux de transition par sa capacité à former des complexes (Cabane, 2006 ; Nordberg, 2006 ; Rollin et Quiot, 2006).

Les niveaux de zinc dans l'eau de mer peuvent atteindre 450 µg/l, notamment dans les ports pollués, toutefois, dans les zones salubres du large, les valeurs s'échelonnent entre 1 et 5 µg/l et peuvent même avoisiner 0,02 µg/l (Scoullou et Constantianos, 1996).

La spéciation du zinc dans le compartiment aquatique est un phénomène très complexe qui dépend de nombreux facteurs abiotiques tels que le pH, la quantité de MOD,... etc. À pH supérieur à 8, le zinc se présente sous forme d'un hydroxyde divalent Zn(OH)<sub>2</sub> et donne des complexes avec les ligands organiques (acides fulviques et humiques) ou s'adsorbe sur les MES ; un pH faible est nécessaire pour maintenir le zinc en solution (Bisson, 2006a ; Alzieu *et al.*, 1999).

L'une des applications les plus courantes du métal est la protection des pièces d'acier par galvanisation contre la corrosion par les agents atmosphériques. Un grand nombre d'autres applications majeures tirent également parti de cette propriété: utilisation de plaques de zinc comme anodes pour la protection cathodique des coques de navires. Le zinc rentre également dans la fabrication de pigments de teinture, de vernis, de raticides, de produits phytosanitaires, de conduits d'évacuation des eaux pluviales (gouttières, tuyaux de descente,...etc.) et de piles (Kantin et Pergent-Martini, 2007; Nordberg, 2006 ; Desbordes, 2000). Dans les zones portuaires, le zinc est introduit à partir de la dissolution des masses de zinc pur fixées sur les parties immergées des bateaux (Bisson, 2006a ; Alzieu *et al.*, 1999).

L'accumulation du zinc dans l'organisme est régulée pour de nombreuses espèces, par exemple, chez les mollusques, les crustacés et les poissons, il se concentre principalement dans les branchies, mais les valeurs de BCF décroissent lorsque l'on monte dans la chaîne trophique, en conséquence, il semble que le potentiel de biomagnification soit faible (Bisson, 2006a ; Osset, 2001).

Le zinc est peu toxique pour l'homme, mais perturbe la croissance des larves d'huîtres, il diminue l'activité photosynthétique et provoque l'altération des branchies et des

retards de ponte des poissons ; les sels de zinc sont moins toxiques que ceux du cuivre ou du cadmium et présentent la particularité d'être moins nocifs pour les organismes marins que pour ceux d'eau douce, en raison de l'action protectrice des ions calcium (AEAP, 2000 ; Alzieu *et al.*, 1999 ; RNO, 1995).

#### **I.2.8.5. Plomb**

La concentration moyenne en plomb (Pb) dans la croûte terrestre est de l'ordre de 13 à 16 mg/kg, c'est un élément métallique de NA 82 et de MA 207.2, il est souvent présent dans l'environnement des régions industrialisées (Rollin et Quiot, 2006).

D'après Bisson *et al.* (2003), les concentrations du plomb dans les eaux sont les suivantes :

- Eaux douces de surface : 1 à 10 µg/l;
- Eaux de mer : < 50 ng/l;
- Eaux de pluie : < 3 µg/l.

Le plomb se trouve dans l'eau de mer principalement sous forme de carbonates  $PbCO_3$  (40 à 80 %) ou de chlorures  $PbCl_2$  (1 à 40 %) et  $PbCl^+$  (2 à 19 %), il présente une forte affinité pour la matière particulaire. Une approche modélisatrice faisant intervenir les MES comme un ligand, prévoit que le pourcentage de plomb adsorbé sur les MES décroît lorsque la chlorinité augmente. Dans l'océan, il est estimé qu'à peine 10 % du plomb se trouve sous forme particulaire (Cabane, 2006 ; Cossa *et al.*, 1993).

Les utilisations du plomb peuvent être classées en cinq secteurs principaux : produits semi-finis (tuyaux, tubes, feuilles, bandes, plomb de chasse, fils, siphons, capsules), câbles électriques, accumulateurs (un élément essentiel de toute automobile), alliages (soudure, imprimerie, antifriction) et chimie (oxydes, alkyl, ... etc.) (Cossa *et al.*, 1993).

Le plomb est bioaccumulé par les organismes marins, notamment les mollusques filtreurs qui l'accumulent facilement et malgré la présence de formes organiques du plomb, il n'a pas été mis en évidence de phénomène de biomagnification. Le facteur de bioaccumulation varie généralement entre 1000 et 100 000 selon les espèces considérées (Alzieu *et al.*, 1999 ; Taylor *et al.*, 1998).

Quant à la toxicité du plomb, le tableau suivant résume les concentrations en plomb inorganique à partir desquelles des effets sublétaux peuvent être observés sur différents groupes d'organismes.

**Tableau I.3 :** Concentration en plomb inorganique ayant des effets sublétaux sur différents groupes d'organismes d'après Alzieu *et al.* (1999)

Concentration en µg/l	Effets
0,5	retard de croissance pour le phytoplancton
10	effet négatif sur la production primaire
60 à 200	influence sur la biodiversité végétale observée en mésocosme
> 500	anomalies dans le développement embryonnaire des bivalves

Par ailleurs, le plomb et ses composés organiques ont été classés "2B" par le Centre International de Recherche du cancer, ç-à-d produits suspectés cancérogènes pour l'homme (Kantin et Pergent-Martini, 2007).

#### I.2.8.6. Cobalt

Le cobalt (Co) présente une concentration d'environ 0,002 % dans la croûte terrestre. Il est souvent associé au nickel, à l'argent, au plomb et au cuivre (Bisson *et al.*, 2006b). C'est un élément métallique de NA 27 et de MA 58,93.

D'après Bisson *et al.* (2006b), la concentration en cobalt dans les eaux douces et les eaux de mer varie de 0,1 à 5 µg/l. Les teneurs en cobalt dans les eaux océaniques varient de 0,5 à 10 ng/l environ.

Dans l'eau de mer, le cobalt soluble est présent sous les formes ioniques  $\text{Co}^{2+}$  et  $\text{CoCl}^+$  et sous les formes neutres  $\text{CoCO}_3$  et  $\text{CoSO}_4$  dans les proportions respectives de 54 %, 31 %, 7 % et 7 %, le cobalt serait donc présent dans l'eau de mer à 85 % sous forme cationique.

Cependant, l'affinité de l'ion  $\text{Co}^{2+}$  pour la MOD naturelle, les acides humiques et fulviques, est relativement faible (Massabuau *et al.*, 2006 ; Adam *et al.*, 2005). Par ailleurs, le pH du milieu influence la distribution du cobalt : plus le pH est élevé plus le cobalt est complexé, en particulier avec des carbonates aux dépens du cobalt libre (Bisson *et al.*, 2006b). La présence de polluants organiques dans le milieu aquatique modifie la distribution des spéciations du cobalt : les quantités du cobalt adsorbé sur les sédiments diminuent au profit du cobalt dissous et du cobalt précipité ou Co-précipité (Bisson *et al.*, 2006b).

Quant à son comportement géochimique, le cobalt est généralement considéré comme un élément peu mobile après enfouissement. Il a une forte affinité pour les oxyhydroxydes de fer et de manganèse (Adam *et al.*, 2005).

Le cobalt entre dans la composition de nombreux alliages utilisés dans les industries électrique, aéronautique et automobile (avec le chrome, le nickel, le molybdène, le béryllium, l'aluminium ou le cuivre) et dans des alliages très durs pour coupe rapide (avec le chrome, le

molybdène ou le tungstène). Il est employé dans la fabrication d'aimants, de métaux réfractaires, de pigments pour le verre et les céramiques, de siccatifs et de pigments dans l'industrie des peintures et des vernis, de fertilisants agricoles et d'additifs alimentaires pour animaux (Alvarez et Bouye, 2006).

Selon Marchand et Tissier (2006), les BCF pour les organismes aquatiques sont les suivants :

- BCF pour les poissons varie entre 160 et 400 ;
- BCF pour les mollusques filtreurs (moules) et non filtreurs varie de 1000 à 4000 ;
- BCF pour les crustacés varie de 2500 à 6500.

Cependant, l'accumulation ait lieu dans les viscères et la peau de poissons, qui sont des parties non comestibles et la biomagnification du cobalt n'ait pas lieu *via* la chaîne alimentaire (Kim *et al.*, 2006).

Pour la toxicité du cobalt, il faut souligner le fait qu'il s'agit d'un élément essentiel agissant notamment comme co-facteur d'enzymes ; cependant, le cobalt a attiré peu d'attention comme polluant en milieu marin et les données toxicologiques pertinentes sont peu nombreuses (Massabuau *et al.*, 2006). Outre le cobalt métal, le sulfate, le chlorure, l'oxyde et le sulfure de cobalt sont ses principales formes toxique, seules deux de ces formes toxiques ont été classées par l'UE pour leurs effets cancérigènes (Bisson *et al.*, 2006b).

#### **I.2.8.7. Cadmium**

Le cadmium (Cd) n'existe pas à l'état natif, c'est un élément métallique de NA 48 et de MA 112,41, c'est un métal rare de l'écorce terrestre avec une concentration moyenne d'environ 0,1 mg/kg. Sa production annuelle mondiale est d'environ 18.000 tonnes (Kantin et Pergent, 2004 ; PNUE, 1996).

D'après Choueiri (2000), l'ordre de grandeur des teneurs ( $\mu\text{g/l}$ ) en Cd dans les eaux est : Eau potable : 5 ; Eau rivière : 0.03 à 10 ; Eau de mer : 0.1 et Eau d'égout 6 à 85.

Dans l'eau de mer, le changement de spéciation du cadmium résulte de l'augmentation de la concentration en chlorures : les chloro-complexes ( $\text{CdCl}_2$ ,  $\text{CdCl}^+$ ,  $\text{CdCl}_3^-$  et  $\text{CdCl}_4^{-2}$ ) deviennent les formes les plus stables et dominantes dissoutes du cadmium correspondant aux espèces inorganiques. Il est à noter que le cadmium est aisément chélaté par la MOD formant ainsi des complexes organiques qui sont moins stables par rapport à d'autres éléments métalliques comme Zn ou Hg, également il l'est, par les chélatants de synthèse comme l'EDTA et la NTA. En eau de mer, les teneurs élevées en chlorures ont cependant tendance à réduire cette chélation organique du cadmium (Dange, 2002 ; Kantin et Marchand, 1997).

Quant à ses utilisations, le cadmium est principalement utilisé pour la fabrication de batteries et le traitement de surface des aciers (revêtements anti-corrosion, la galvanoplastie ou cadmiage s'appuyant sur les propriétés de résistance du cadmium en milieu chaud et humide). Il est également employé pour la décoration des porcelaines, en peinture, en caoutchouterie, en émaillerie et pour la fabrication d'antiseptiques et de pesticides (Kantin et Pergent-Martini, 2007 ; Martin-Garin et Simon, 2004).

Les BCF pour le cadmium sont plus élevés pour les producteurs primaires que pour les poissons, il diminue lorsque la dureté de l'eau croît. Des BCF compris entre 1 636 et 23143 (moyenne 7 535) ont été calculés pour les algues, entre 396 et 17 560 (moyenne 994) pour les invertébrés et entre 0,5 et 6 484 (moyenne 229) pour les poissons (Bisson *et al.*, 2005b).

D'après Alzieu *et al.* (1999), le cadmium présente des risques pour le consommateur humain, même à de faibles concentrations, il tend à s'accumuler dans le cortex rénal sur de longues périodes (50 ans) et à provoquer des dysfonctionnements urinaires chez les personnes âgées. Au niveau sublétal, des concentrations de 0.05 à 1.2 µg/l peuvent provoquer des effets physiologiques pour les larves de crustacés et des inhibitions de croissance pour le phytoplancton (Cabane, 2006).

#### **I.2.8.8. Cuivre**

Le cuivre (Cu) est un métal très répandu dans les cinq continents et présent dans la plupart des organismes vivants. La composition moyenne de la croûte terrestre en cuivre serait comprise entre 45 et 70 mg/kg, c'est un élément métallique de NA 29 de MA 63,5. Associé à des protéines, il joue un rôle important dans certaines fonctions biologiques comme le transport de l'oxygène par le sang chez les mollusques (hémocyanine) et dans les processus de métabolisation des substances exogènes (cytochrome oxydases) (Cabane, 2006 ; Nordberg, 2006 ; Rollin et Quiot, 2006 ; Alzieu *et al.*, 1999).

D'après Bisson *et al.* (2005a), la concentration du cuivre dans les eaux de mer serait < 0,25 µg/l.

En milieu marin, le cuivre se trouve peu lié aux acides humiques (10 %), car rapidement déplacé de ses complexes par le calcium et le magnésium, il est introduit sous forme particulière dans les océans. Etant rapidement adsorbé sur les sédiments riches en ligands, tels qu'hydroxydes de fer et de manganèse, le cuivre présente des teneurs pouvant atteindre des valeurs très élevées dans les zones sous influence des apports (Alzieu *et al.*, 1999).

Pour ses utilisations et en raison de ses propriétés électriques, plus de 75 % de la production de cuivre sont dévolus à l'électrotechnique. Ses autres applications les plus importantes sont les conduites d'eau, les matériaux de couverture de bâtiments, le matériel de cuisine, le matériel des laboratoires de chimie ou de pharmacie,...etc. Les sels de cuivre (sulfate, acétate, dérivés organiques) sont utilisés comme fongicides ou algicides en agriculture, pour les traitements chimiques de surface, la fabrication de peintures et de céramiques (Nordberg, 2006 ; Desbordes, 2000). L'utilisation de l'oxyde CuO comme matière active des peintures antisalissures marines constitue une source importante d'introduction dans les zones portuaires (Alzieu *et al.*, 1999).

Cependant, le phytoplancton peut accumuler du cuivre soluble; le zooplancton peut ingérer régulièrement des MO et/ou du phytoplancton enrichis en métaux. Avec le temps, cela peut aboutir à l'apparition d'espèces ou de souches résistantes au métaux, lesquelles, à leur tour, créent la possibilité d'une accumulation à long terme de cuivre dans les chaînes alimentaires planctoniques par cette voie, y compris donc dans les poissons qui se nourrissent avant tout du plancton (Scoullou et Constantianos, 1996).

La toxicité du cuivre vis-à-vis des organismes marins dépend des espèces considérées, de la solubilité de ses sels ainsi que du degré d'oxydation et de l'état de complexation du cuivre. De façon générale, la toxicité est plus élevée pour le cuivre à l'état d'oxydation +1 et décroît dans l'ordre +2 et 0. Les oxydes, CuO et Cu<sub>2</sub>O, très peu solubles, sont toxiques à des concentrations de l'ordre de 1 à 2 mg/l et les anions influencent la toxicité dans l'ordre décroissant : acétates, chlorures, sulfates, carbonates. Chez les poissons, il est à l'origine de retard de ponte et de croissance, de problèmes d'éclosabilité des œufs et l'altération branchiale (Cabane, 2006 ; Osset, 2001 ; AEAP, 2000 ; Alzieu *et al.*, 1999 ).

*Chapitre II :*  
*Présentation du site*  
*d'étude*

## II.1. Données naturelles

### II.1.1. Cadre géographique

Inséré entre les grands massifs du Djurdjura, des Bibans et des Babors, le territoire de la wilaya de Béjaïa s'étend sur une superficie de 322 348 ha. Il est marqué par la prédominance de reliefs montagneux (65%), il est coupé par la vallée de la Soummam et les plaines situées près du littoral :

- Au Nord : le massif du Bouhatem et le massif du Djurdjura ;
- Au Sud : le massif du Bouselam et les Babords ;
- Au milieu: la vallée de la Soummam (DPAT, 2006).

La population de la wilaya de Béjaïa était de près de 990 951 personnes d'après les estimations faites à la fin de l'année 2006 (DPAT, 2006).

Le golf de Béjaïa est sous forme d'un croissant ouvert vers le Nord ; la position géographique de Béjaïa et la disponibilité des ressources naturelles et humaines font de cette ville une région propice à tout développement accéléré (voir figure ci-après).



Figure II.1 : Le golf de Béjaïa (Encarta, 2008).

## **II.1.2. Cadre géologique et pédologie**

La ville de Béjaïa est construite sur des terrains appartenant principalement à deux systèmes de l'ère secondaire, qui sont successivement le Jurassique et le Crétacé.

### **II.1.2.1. Le Jurassique**

Il est caractérisé par le Lias inférieur et moyen ; ce système est représenté par l'étage Sinémurien caractérisé par des calcaires dolomitiques, la dolomitisation est souvent incomplète par les îlots de calcaires sublithographiques, le Charmouthien du Djebel Gouraya est caractérisé par des calcaires massifs et des calcaires stratifiés en grands bancs admettant des niveaux de marnes intercalaires, ces marnes sont des sources importantes en fer. Quand on remonte dans la série, les niveaux marneux prennent de plus en plus d'importance tandis que l'épaisseur des bancs calcaires diminue (Bétier *et al.*, 1960).

### **II.1.2.2. Le Jurassique supérieur**

Le système est caractérisé par des schistes rouges et verts et des calcaires lenticulaires inter-stratifiés. Les calcaires sont des calcaires oolithiques, quelques fois silicifiés, ou des calcaires à grains fins avec, dans certains bancs, des rognons de silex blanc (Bétier *et al.*, 1960).

### **II.1.2.3. Le Crétacé**

Le système est représenté par l'étage Sénonien (Crétacé supérieur), caractérisé par des faciès marno-schisteux avec de nombreuses lentilles de conglomérats ceintrant le Djebel Aghbalou et la bordure sud du Djebel Gouraya. Ces conglomérats à éléments de taille très variable sont accompagnés quelques fois de variables petits " Klippes sédimentaires" (Bétier *et al.*, 1960). Ce type de lithologie, du fait de sa grande sensibilité à l'érosion est relativement favorable à un apport significatif de matériel particulaire aux systèmes aquatiques.

En conclusion, la partie nord de notre région d'étude (Djebel Gouraya et Cap Carbon), est caractérisée essentiellement par des formations du Jurassique (calcaires riches en fer), alors que la partie sud (Cap Bouak jusqu'à l'avant-port) est caractérisée essentiellement par des formations du Crétacé (marneuses et conglomératiques, également riche en fer). Le lessivage de ce type de sol peut entraîner, lors des périodes de forte pluviosité, des quantités non négligeables de fer (dissous et particulaire).

La carte ci-après représente les différentes formations géologiques caractérisant la région d'étude.

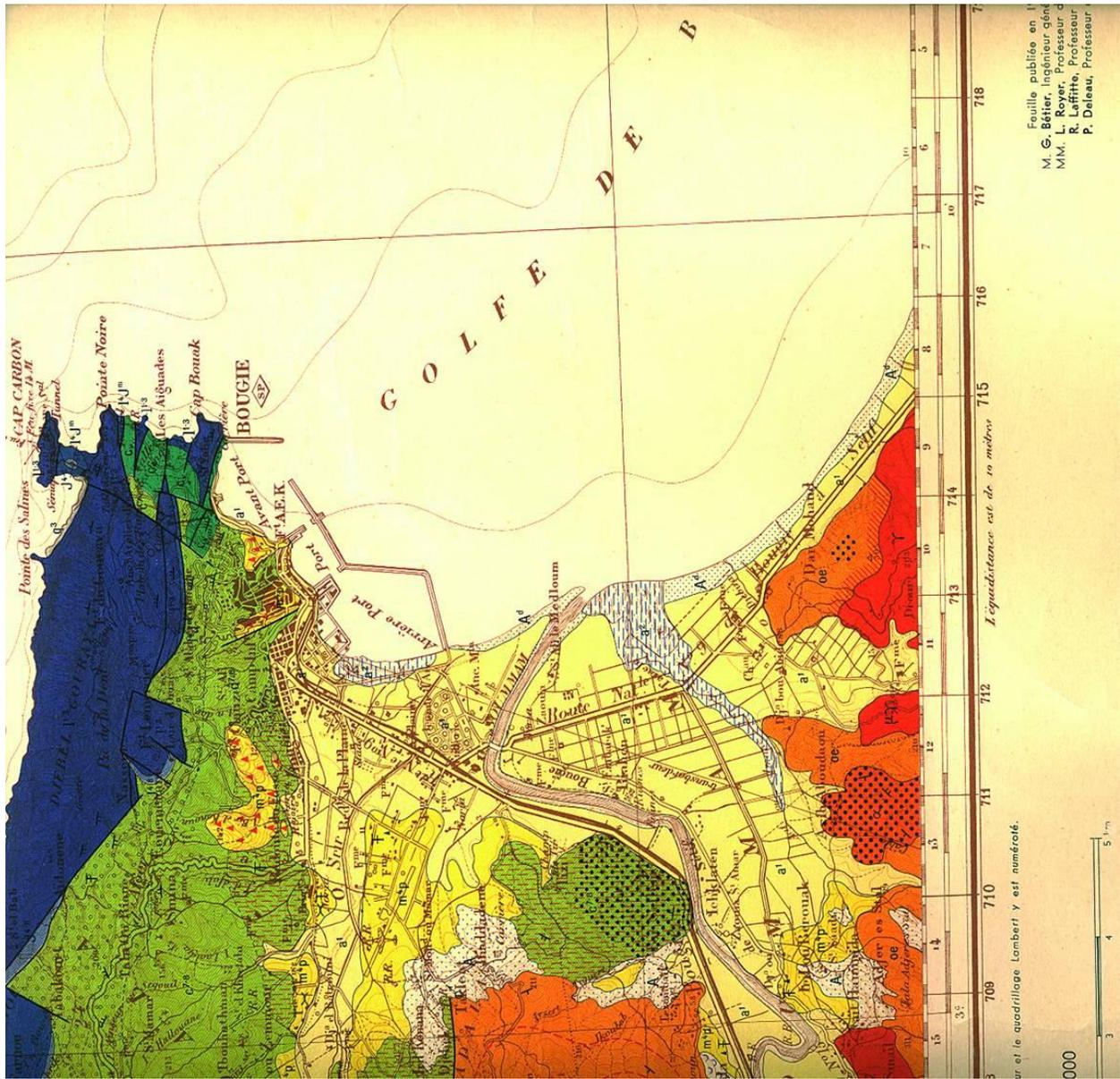


Figure II.2 : Carte géologique de la ville de Béjaïa (Bétier et al., 1960).

Légende :

- Jurassique
- Marnes crétacées
- Miocène
- Flysch numidien
- Roches volcaniques

## II.2 Données climatiques

### II.2.1. Pluviométrie

La région de Béjaïa est caractérisée par des averses importantes. Elle est considérée, par l'Office National de Météorologie comme l'une des villes les plus pluvieuses du pays. Elle reçoit en moyenne de 800 à 1200 mm d'eau de pluie par an.

Pendant l'année 2007, la ville de Béjaïa a enregistré des hauteurs de pluies considérablement importantes, consignées dans le tableau suivant :

**Tableau II.1 :** Moyenne des précipitations inter-mensuelles (mm) (Station météo, 2007).

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Hauteur de pluie (mm)	9	20	175	132	12	10	3	7	63	149	175	207

### II.2.2. Température

L'année 2007 est caractérisée par les températures moyennes présentées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau II.2 :** Températures moyennes mensuelles (°C) (Station météo, 2007).

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Température (°C)	12	14	13	16	19	22	25	26	23	20	14	11

Le tableau II.2 montre que la zone d'étude est caractérisée par un climat doux et humide en hiver et chaud et sec en été, ces caractéristiques indiquent un climat méditerranéen. Les moyennes mensuelles les plus élevées sont observées essentiellement pendant la période allant de mai à octobre avec des températures variant de 19 °C à 26 °C. Par contre, les températures les plus basses, de 11 °C à 13 °C, sont enregistrées durant la saison s'étalant de décembre à mars, avec un minimum en décembre (11 °C). Les autres mois présentent des températures intermédiaires (14 à 16°C) (voir le digramme ombrothermique, *annexe I*, figure 1).

### II.2.3. Humidité

Durant l'année 2007, la ville de Béjaïa s'est caractérisée par une humidité relative (H.R) assez élevée variant entre 72 % et 80 %, ce qui est montré dans le tableau suivant :

**Tableau II. 3 :** Humidité relative moyenne (%) (Station météo, 2007).

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
<b>H.R moyenne (%)</b>	74	76	77	83	73	77	78	72	60	80	78	80

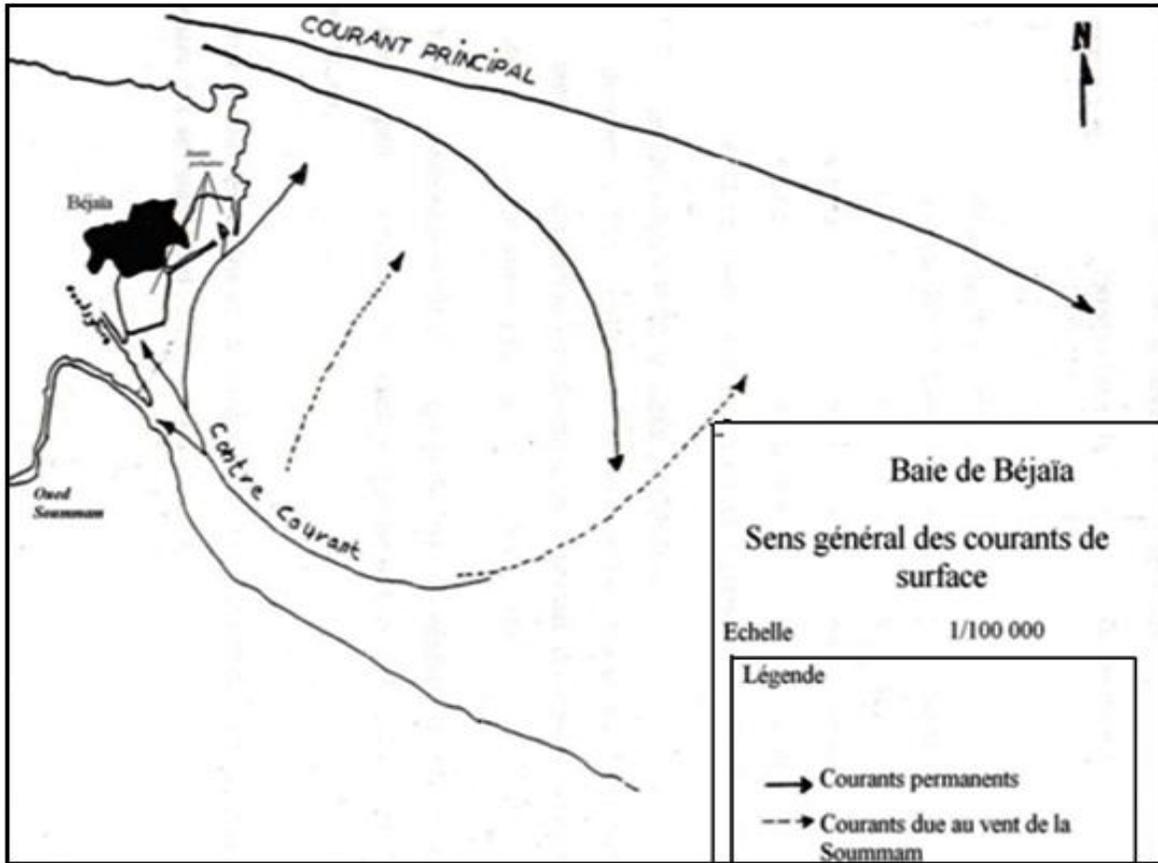
Lors des retombées atmosphériques, l'humidité élevée contribue considérablement à l'entraînement des polluants se trouvant dans les aérosols atmosphériques, constituant ainsi une source non négligeable de la pollution des sols mais également des milieux aquatiques (voir *annexe IV*).

## II.3. Aspects hydrodynamiques du site

### II.3.1. Courants

Au niveau de la baie de Béjaïa, les courants de l'Atlantique n'affectent pas la frange côtière, seuls les courants locaux sont à prendre en compte dans l'étude de l'hydrodynamisme côtier. Au large du littoral algérien, le courant Atlantique porte à l'Est.

Dans la partie Ouest de la baie, se fait sentir un contre courant qui porte à l'Ouest puis tourne au Nord-Ouest et même au Nord devant l'embouchure de l'Oued Soummam, finalement, il s'infléchit vers l'Est et le Nord-Est devant la ville (figure ci-dessous).



**Figure II.3:** Les courants généraux de surface dans la baie de Béjaïa (Le Claire, 1972 *In* Mazouz et Hamana, 1994).

### II.3.2. Vent

La situation de la ville accrochée au flanc du mont Gouraya de 700 m d'altitude, lui confère une protection contre les vents du Nord. Les vents dominants dans cette région sont ceux du Nord-Est à Est en été et d'Ouest à Nord-Ouest en hiver (Direction Hydraulique de la Wilaya, 2006).

Notons que les marées sont inexistantes, mais des différences de niveau peuvent atteindre 50 cm.

Les vitesses moyennes du vent Nord-Ouest du site sont données dans le tableau ci-après.

**Tableau II. 4 :** Vitesse moyenne des vents (m/s) (Direction Hydraulique de la Wilaya, 2006).

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Vitesse moyenne (m/s)	4,7	4,3	3,9	3,5	3,6	3,5	3,6	9,4	3,5	4,1	4,5	4,9

## **II.4. Le site d'étude**

### **II.4.1. Historique du site d'étude**

Située au cœur de l'espace méditerranéen, Béjaïa ville millénaire, possède de nombreux sites naturels et vestiges historiques datant de plus de 10 000 ans ainsi que de nombreux sites archéologiques, recelant des objets d'origine remontant au néolithique (du site : <http://www.portdebejaia.com.dz/epb.htm>).

Les premières nefes qui fréquentèrent les abris naturels du littoral bougiote furent phéniciennes. Ils trouvèrent douceur et tranquillité dans les eaux de la rade de Béjaïa et installèrent un comptoir commercial à proximité. La Saldæ romaine leur succéda et devint port d'embarquement de blé du grenier de Rome. Ce n'est qu'au 11<sup>ème</sup> siècle que la berbère Bgâïeth, devenue Ennaciria, prit une place prépondérante dans le monde de l'époque. Le port devint alors un centre de communication important grâce aux transactions commerciales avec notamment Marseille, Gêne et Naples (du site : <http://www.portdebejaia.com.dz/epb.htm>).

Après les Hammadites, d'autres dynasties musulmanes, à savoir les Almoahades, les Hafsidés et les Mérinides, s'installèrent à Béjaïa. Sous la domination espagnole puis turque allant de 1512 à 1833, l'activité s'était réduite au transport de bois de construction pour la marine.

Les infrastructures actuelles ont commencé à être érigées à la fin du siècle dernier, les ouvrages de protection furent entamés en 1870 et ceux d'accostage en 1879. La construction de l'ancien port fut achevée en 1911, au milieu des années 1930 a été mis en exploitation l'arrière port et, en 1987, le port a été prolongé du nouveau quai, infrastructure la plus importante et la plus moderne du port actuel (du site : <http://www.portdebejaia.com.dz/epb.htm>).

Les installations permettant la réception des pétroliers furent construites en 1958 et c'est en 1960 qu'a été chargé le premier pétrolier. De 1950 à nos jours, l'activité portuaire a connu de profonds changements dans la structure du trafic. Il s'y traite annuellement plus de 5 millions de tonnes de marchandises générales, un chiffre qui ne fait qu'augmenter chaque année. Le port de Béjaïa est le deuxième port d'Algérie avec plus de 23 % de parts de marché (du site : <http://www.portdebejaia.com.dz/epb.htm>).

Parce que le port de Béjaïa affirme, année après année, sa position de grand port méditerranéen et vu qu'il développe de nouveaux outils performants, il offre des atouts exceptionnels et une excellente qualité de service :

- Il possède une situation géographique privilégiée et des atouts nautiques remarquables ;

- C'est un port polyvalent avec des infrastructures de stockage et de traitement adéquats à chaque type de produit ;
- Un excellent rendement de manutention ;
- De bonnes liaisons routières et ferroviaires ;
- Un port connu pour sa sécurité ; et
- Un port certifié aux normes *ISO 9001* et *ISO 14001* (du site : <http://www.portdebejaia.com.dz/epb.htm>).

#### **II.4.2. Présentation de la zone d'étude (Port de Béjaïa)**

Avec ses infrastructures routières et ferroviaires, le port de Béjaïa constitue un atout stratégique pour toute la région aussi bien pour le transport de marchandises que celui des voyageurs. Sa consistance est composée de 03 bassins d'une superficie de plus de 156 ha, d'un terre-plein de 50 ha de quais cernés par deux jetées.

##### **II.4.2.1. Position géographique**

Le port de Béjaïa se situe à 1,5 km au Sud du Cap Carbon et du côté Ouest du Golf de Béjaïa (coordonnées **36°45'24"** de latitude Nord et **05°05'50"** de longitude Est) (Entreprise Portuaire de Béjaïa, 2006).

##### **II.4.2.2. Situation géographique**

Le port de Béjaïa dessert un hinterland composé de sept wilayas du Sud-Est du pays. La ville et le port de Béjaïa disposent de ce fait des dessertes routières reliant l'ensemble des villes du pays, de voies ferroviaires et d'un aéroport international. Le port, situé dans la baie de la ville, est délimité par l'arrêté n° 93/1015/DRAG de Monsieur le Wali de Béjaïa ainsi :

- Au Nord par la route nationale N° 9 ;
- Au Sud par les jetées de fermeture et du large sur une longueur de 2 750 m ;
- À l'Est par la jetée Est ;
- À l'Ouest par la zone industrielle de Béjaïa (Entreprise Portuaire de Béjaïa, 2006).

##### **II.4.2.3. Mouillage**

Connue pour être l'une des meilleures côtes algériennes, la rade de Béjaïa offre d'excellentes potentialités en matière de protection et des fonds propices à un bon mouillage, avec des profondeurs allant de 10 m à plus de 20 m. Abrisée de tous les vents sauf ceux du Nord-

Est à l'Est, la rade est limitée par une ligne imaginaire s'étendant du Cap Carbon au Cap Aokas. (Enterprise Portuaire de Béjaïa, 2006).

#### **II.4.2.4. Accès au port**

L'accès au Port se fait par trois passes, à savoir ;

- La passe principale d'accès, large de 320 m et draguée de 10 à 13,5 m ;
- La passe Abdelkader, large de 110 m et draguée à 12 m ;
- La passe de la Casbah, située entre le vieux port et l'arrière port, sa largeur est de 125 m et draguée à 12 m (Enterprise Portuaire de Béjaïa, 2006).

Les navires de marchandises générales accèdent aux bassins du vieux port et de l'arrière port respectivement par le biais de ces deux dernières passes.

#### **II.4.2.5. Bassins du port**

Le port de Béjaïa est constitué de trois bassins :

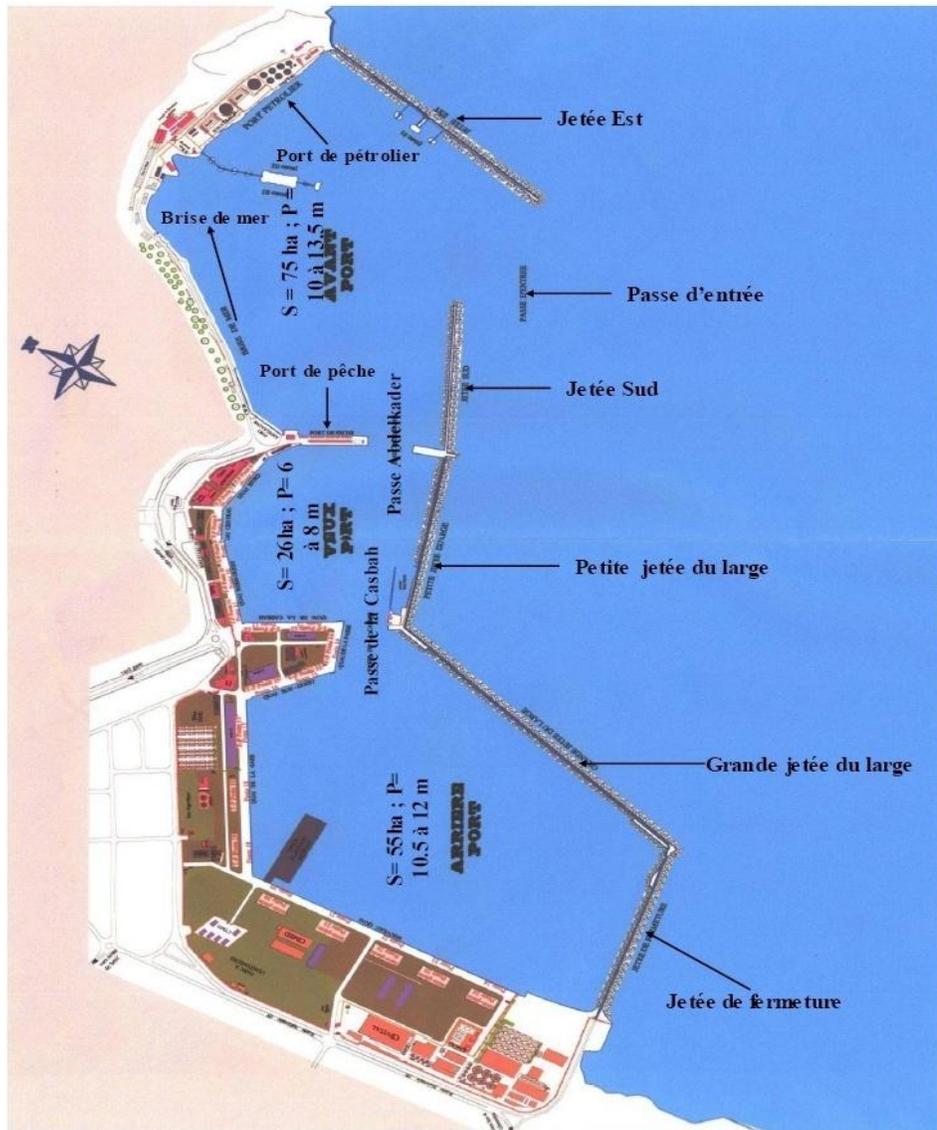
- Bassin de l'avant port : sa superficie est de 75 ha et ses profondeurs varient entre 10 m et 13,5 m. Disposant d'installations spécialisées, l'avant port est destiné à traiter les navires pétroliers. Ce bassin comporte un seul quai et il existe des canaux qui permettent l'amarrage de grands navires;
- Bassin du vieux port : Sa superficie est de 26 ha et ses profondeurs de quai varient entre 6 à 8 m, il est séparé du bassin de l'avant port par la passe Abdelkader. Il comporte cinq quais d'environ 1090 m qui permettent l'accostage des navires de tirants d'eau de 6,1 à 8,3 m ;
- Bassin de l'arrière port : sa superficie est de 55 ha et les tirants d'eau varient entre 10,5 m et 12 m, il est séparé du bassin du vieux port par la passe Casbah (Enterprise Portuaire de Béjaïa, 2006).

#### **II.4.2.6. Jetées et brise-lames**

- À l'Est : jetée Est avec une longueur de 650 m, une dalle et un mur de couronnement à 2,0 m surmontent la jetée sur toute sa longueur ;
- Au Sud : jetée en chevrons composée de trois éléments dont la longueur atteint 2 750 m :
  - Jetée sud avec une longueur de 450 m, une dalle et un mur de couronnement de 6 m de large surmontent la jetée sur toute sa longueur ;

- Jetée du large avec une longueur de 1500 m, une dalle et un mur de couronnement de 4 m de large constituent la route d'accès à un petit port de plaisance ;
- Jetée de fermeture avec une longueur de 800 m, une dalle et un mur de couronnement de 4 m de large utilisé comme route d'accès (Enterprise Portuaire de Béjaïa, 2006).

La figure ci-dessous illustre les trois bassins du port de Béjaïa, avec toutes les jetées et accès :



Avec **S** : Superficie ; **P** : Profondeur.

**Figure II.4** : Port de Béjaïa avec ces trois bassins, jetées et accès (Enterprise Portuaire de Béjaïa, 2006).

## **II.5. Anthropisation**

Béjaïa, wilaya côtière du centre-Est, s'ouvrant sur la mer méditerranée avec une façade maritime de plus de 100 km (DPAT, 2006), représente l'exutoire de toutes les pollutions drainées par ses cours d'eaux où par les agglomérations urbaines et toutes sortes d'activités socio-économiques implantées sur le littoral.

### **II.5.1. Eaux usées domestiques (Réseau d'assainissement)**

La ville de Béjaïa est pourvue d'une station d'épuration biologique d'une capacité de traitement de 80.000 d'équivalent- habitants (METAP, 1993). Actuellement, la STEP est à l'arrêt pour des travaux de réhabilitation, de ce fait, tous les rejets de l'ancien réseau, n'ayant jamais été branché à la STEP, débouchent sans traitement en plein port. En fait, la ville de Béjaïa est dotée de deux réseaux d'assainissement, l'un très ancien, vétuste, sous-dimensionné, datant de la période coloniale, de type unitaire débouchant dans le port, l'autre relativement récent, suit l'extension de la ville et est de type séparatif. Ce dernier réseau est doté de deux stations de relevage (METAP, 1993).

Par manque d'informations, une seule carte du réseau d'assainissement de la partie Nord-Est de la ville de Béjaïa est disponible, elle est établie en 1998 par Géosystem, d'après laquelle, il existe huit points de rejets au niveau des trois bassins du Port (figure 8).

A noter qu'un appel d'offre international à été lancé pour l'étude, diagnostic et réhabilitation du réseau d'assainissement de la ville de Béjaïa.

En effet, les eaux usées domestiques sont considérées une source potentielle de la pollution du port de Béjaïa, ; sachant que la haute ville n'est pas raccordée au réseau d'assainissement existant, c'est la raison pour laquelle la DHW a lancé un projet visant la réalisation d'un collecteur principal d'assainissement (station de relevage) ramenant toutes les eaux de l'ancienne ville à la STEP permettant ainsi leur traitement avant de les rejeter en pleine mer. Ces eaux sont composés d'apports physiologiques (matières fécales et urines humaines), d'apports divers (eaux de vannes de toilettes, déchets solides rejetés dans les toilettes...), et d'eaux à usage domestiques (de lavabo, de bains et de douche, éviers, de vaisselle...).

**Figure II.5** : Réseau d'assainissement de la partie Nord-Est de la ville de Béjaïa

Le tableau ci-après résume les points de rejets et leur localisation au niveau des trois bassins portuaires :

**Tableau II.5 :** Localisation des points de rejets et le type de réseau au niveau des trois bassins portuaires.

Point de rejet	Type de réseau	Rejet final
<b>R1</b>	Canal collectant les eaux usées et les eaux pluviales	Bassin de l'avant port
<b>R2</b>	Réseau d'assainissement d'eaux usées existant	Bassin du vieux port
<b>R3</b>	Réseau d'assainissement d'eaux usées existant	Bassin du vieux port
<b>R4</b>	Canal collectant les eaux usées et les eaux pluviales	Bassin de l'arrière port
<b>R5</b>	Réseau unitaire existant	Bassin de l'arrière port
<b>R6</b>	Réseau unitaire existant	Bassin de l'arrière port
<b>R7</b>	Réseau unitaire existant	Bassin de l'arrière port
<b>R8</b>	Oued Salomon canalisé	Bassin de l'arrière port

**II.5.1.1. Estimation de la consommation**

La norme de consommation actuelle est fixée à 150 l/hab. j.

Les rejets sont estimés à 80 % de la consommation journalière.

$$Q_{\text{rej/hab.j}} = 150 \times 0,8 = 120 \text{ l/hab. j.}$$

La norme de consommation future est fixée à 200 l/hab. j.

Les rejets sont estimés à 80 % de la consommation journalière.

$$Q_{\text{rej/hab.j}} = 200 \times 0,8 = 160 \text{ l/hab. j.}$$

La population future se calcule à l'aide de la loi des accroissements géométriques donnée par la formule des intérêts composés :

$$P_n = P_o (1+T)^n$$

Tel que : Pn : population future à l'horizon considéré ;

Po : population de l'année de référence ;

T : taux d'accroissement ;

n : nombre d'années séparant les horizons considérés (Direction Hydraulique de la Wilaya, 2006).

### II.5.1.2. Estimation des débits moyens

Le débit moyen des eaux usées se détermine à partir du débit moyen de consommation totale. Il est évalué à 80 % du débit de consommation.

Le calcul du débit actuel moyen des eaux usées domestiques est donné par la formule suivante :

$$Q_{ma} = Na. D. Cr / 86400$$

Et le débit futur moyen est donné par la formule suivante :

$$Q_{mf} = Nf. D'. Cr / 86400$$

Tel que :  $Q_{ma}$  : Débit moyen actuel ;

$Q_{mf}$  : Débit moyen futur ;

$Na$  : Nombre d'habitants actuel ;

$Nf$  : Nombre d'habitants futur ;

$D$  : Dotation (l/hab. j) = 150 l/hab. j ;

$D'$  : Dotation (l/hab. j) = 200 l/hab. j ;

$Cr$  : Coefficient de rejet égale à 80 % (Direction Hydraulique de la Wilaya, 2006).

D'après la DPAT (2006), la distribution de la population fait ressortir que 42,58 % des habitants vivent dans les chefs-lieux (à Béjaïa-ville), avec un taux d'accroissement de l'ordre de 1,23 %, le débit des rejets augmente lui aussi, augmentant ainsi la quantité d'eaux usées évacuées dans le milieu marin ce qui peut avoir des impacts négatifs sur l'écosystème marin en général, et le port en particulier.

### II.5.2. Les effluents industriels

La ville de Béjaïa concentre une activité économique très importante qui se traduit par l'existence de plusieurs unités industrielles. L'activité industrielle produit des effluents chimiques à large spectre dont la quasi-totalité est rejetée sans aucun traitement ou dans certains cas, avec un traitement inadéquat, ce qui explique l'existence de leurs résidus dans leurs rejets, affectant ainsi la mer, en particulier, les eaux du port et ses activités. Ces effluents peuvent contenir des polluants, entre autres, les métaux à caractère toxique (métaux lourds).

Le tableau ci-après montre les unités industrielles les plus polluantes au niveau de la ville de Béjaïa.

Tableau II.6: Les unités industrielles polluantes au niveau de la ville de Béjaïa (DPAT, 2006)

Nom De L'Unité	Rejets solides		Rejets liquides				Rejets atmosphériques		
	Type de Déchets	Qté. Rejetée	Type de Trait.	Volume d'Eau Usée rejetée	Type de Traitement	Rejet Final	S T E P	Nature des Emissions	Type de Trait.
Co.GB ENCG 04Chemins	Fut de 200 Kg	46 u /j	Décharge Publique	401,5m <sup>3</sup>	Bassin décantation	Oued Soumam	/	Vapeur	Néant
Co.GB UP7 Unité margarine Route des Aurès Béjaïa	-Terre Décobranse usée:  - Boues minérales et Organiques Brai de distillation  -Mucilage- Bidon d'acide phosphorique - Bidon de colle- Sac de soude  -Charbon actif	-839,5 T/ an  - 2190 T/ an  -460T/an  -545 T/an  - 9490U/ an  -365 U/ an  -58400 U/ an  -0,45 T/an	„ „ „ „ Cédé aux Personnel  Décharge public  Melangé avec la boue	950m <sup>3</sup> /J	STEP	Oued-Ghir	STEP	Néant	Néant

Nom De L'Unité	Rejets solides		Rejets liquides					Rejets atmosphériques			
	Type de Déchets	Qté. Rejetée	Type de Trait.	Volume d'Eau Usée rejetée	Type de Traitement	Rejet Final	S T E P	Nature des Emissions	Type de Trait.		
<b>CEVITAL</b> SPA Raffinerie d'Huile, Margarine Nouveau quai port de Béjaia	-Terre décolorante usée	1825T/an	Déc.Pub.	25m <sup>3</sup> /h	Physico chimique et biologiques	Mer	Capacité 3m <sup>3</sup> /h	Poussières	Système de dépoussiérage		
	Boue de la STEP	20 T/an	“					Fumées		/	
	- Ecumes- Déchets d'emballage, Films plastique en bois-	3650T/an /	“								
	Bouteilles PET	36500 u/an	“							Vapeur d'eau (débit) 5T/ h évaporée	Néant
	Intercalaires	100000u /an	“								
<b>TRANSBOIS</b> ex ENATB Arrière Port Béjaia	-Ecorce de bois -Poussières de bois Colle	/ 300 Kg / J 0,72 T/ an	Décharge. Publique “ Stockée dans Futs	16 762 m <sup>3</sup> /J	Néant	Mer	/	Poussière de bois	Filtres anti - Poussières		
<b>ICOTAL</b> (SPA) Arrière port Béjaia	-Chutes de tissus- Emballage en plastique- Emballage en carton	8,1T/ an 24 T/ an /	Récup. Par Alfaditex Remila “	/	/	/	/	Vapeur dégagée par les baraques (2K /J) Vapeur de chaudière	Néant		

A cela s'ajoute d'autres sources, à savoir :

- Chutes accidentelles de divers produits lors du chargement ou du déchargement des marchandises, surtout les navires céréaliers ;
- Le dock flottant, au niveau du bassin de l'arrière port, appartenant à l'entreprise nationale de la réparation navale (E.R.E.N.A.V), qui peut engendrer, à son tour, une pollution chimique des eaux du port par ses activités de réparation ;
- L'Oued Soummam, est considéré une source de pollution non négligeable des eaux du port par le charriage de matières organiques et inorganiques diverses, particulièrement en période de forte pluies (transfert par les contres courants à l'intérieur du port).

## **II.6. Les eaux pluviales**

Au niveau de la ville de Béjaïa, les eaux pluviales sont collectées par des conduites enterrées, ces conduites sont sous-dimensionnées d'une part et manquent d'entretien d'autre part ce qui conduit à des débordements d'eau lors de chutes de pluies.

Le réseau d'eaux pluviales se déverse directement dans les bassins du port, ce qui peut affecter ces eaux de façon significative.

Au niveau du bassin de l'arrière port, il existe trois exutoires principaux collectant les eaux pluviales, à savoir :

- Exutoire Fort Abdelkader qui draine toute la haute ville de Béjaïa en partant de Sidi Touati et des oliviers vers l'aval ;
- Exutoire carrefour du port qui draine le bassin versant de la zone limitée par les Bois Sacrés en amont et l'avenue Mustapha Ben Boulaïd en aval ; et
- Exutoire Bitouri (Oued Danous) collectant les eaux pluviales de la plaine (rue de la Liberté) se déversant directement vers l'Oued Danous et Salomon (Direction Hydraulique de la Wilaya, 2006).

*Chapitre III :*  
*Matériel & Méthodes*

Le dosage des éléments traces métalliques dans le milieu marin nécessite un contrôle permanent des différentes étapes car il existe des risques de contamination des échantillons, tant au moment du prélèvement qu'à celui du traitement et de l'analyse au laboratoire. Pour cela, un soin particulier a été apporté aux prélèvements et aux méthodes de dosage. En outre, et afin d'éviter les contaminations, tout instrument et toute verrerie utilisés sont minutieusement nettoyés et conditionnés selon le protocole suivant :

- Lavage aux détergents commerciaux ;
- Rinçage à l'eau courante (eau du robinet) ;
- Rinçage à l'eau bi-distillée ;
- Rinçage à l'eau acidulée (50 %) préparée à partir d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) concentré à 53,25 % (Merck, Suprapur), pour analyse ;
- Rinçage à l'eau bi-distillée ;
- Séchage à l'étuve pendant quelques minutes.

Ces opérations doivent être effectuées impérativement avant chaque utilisation du matériel.

### **III.1. Travaux effectués en mer**

Les échantillons d'eau de mer sont prélevés dans des bouteilles en polyéthylène (voir photo ci-dessous), au niveau de stations bien déterminées.



**Figure III.1 :** Bouteille de prélèvement en polyéthylène

Le site d'échantillonnage figure sur la carte suivante :

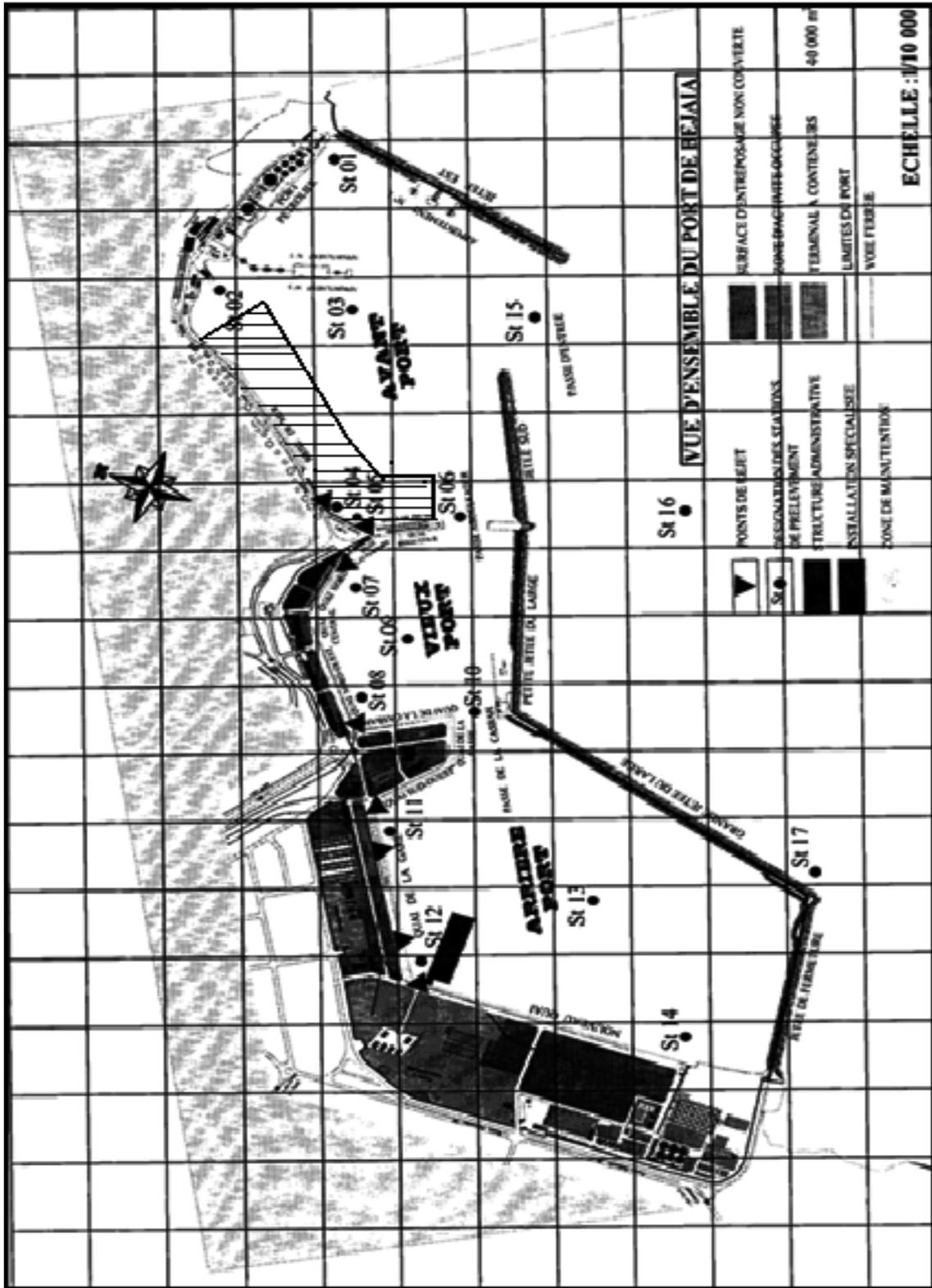


Figure III.2 : Localisation des stations de prélèvement

### III.1.1. Échantillonnage et prélèvement

Le prélèvement d'un échantillon d'eau de mer est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté, il conditionne les résultats analytiques et leurs interprétations.

En utilisant un canot, nous avons prélevé dans la colonne d'eau et pendant une campagne de prélèvement ayant eu lieu le 20/11/2007 vers 09 h du matin, des échantillons d'eau de mer au niveau de dix sept stations (14 à l'intérieur des bassins portuaires et 03 à l'extérieur) (voir figure III.2) dans des bouteilles en polyéthylène d'un litre préalablement rincées deux fois successivement avec de l'eau à analyser, ces bouteilles ont été ensuite remplies d'eau jusqu'au débordement pour éviter toute éventuelle réaction chimique ; ces échantillons sont destinés au dosage des métaux lourds. Des flacons en verres destinés à la mesure d'autres paramètres physico-chimiques ont été également remplis et bouchés de manière qu'il n'ait pas d'introduction de bulles d'air et que les bouchons ne soient pas éjectés au cours du transport. Les flacons et les bouteilles ont été étiquetés et numérotés soigneusement selon le numéro de la station de prélèvement. L'opération de prélèvement s'est terminée vers 11 h du matin, soit une durée d'environ 2 heures.

Notons que, pour effectuer le prélèvement d'eau, nous avons utilisé une bouteille en polyéthylène d'un litre, attachée à une corde qui, à son tour, est liée à un poids facilitant l'immersion de la bouteille.

Une fois tous les échantillons collectés et toutes les mesures *in-situ* sont faites, les échantillons ont été transportés dans une glacière maintenue à une température constante de 4°C jusqu'au laboratoire de l'université.

### III.1.2. Mesures *in situ*

Nous avons effectué quelques mesures *in-situ*, à savoir, la température et le pH. L'état de mer est relevé par simple observation (voir tableau I, *annexe II*).

#### III.1.2.1. Température

La température de l'eau de mer est l'un des descripteurs de base pour la connaissance du milieu étudié. Elle permet de connaître dans quelles conditions évoluent les organismes qui y vivent ; elle influe sur plusieurs paramètres chimiques, physiques et biologiques (Armstrong *et al.*, 2005 ; saade, 2005).

La mesure de ce paramètre est effectuée sur le terrain sur une eau de mer prélevée dans un bécher à l'aide d'un thermomètre (intégré dans un pH-mètre de terrain) de précision  $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ , les résultats obtenus sont portés dans le tableau III.3.

### **III.1.2.2. pH**

Le pH représente la concentration d'ions hydrogène dans une solution, il a une influence majeure sur les formes physiques et chimiques du métal et des composants métalliques dans l'environnement aquatique, du fait qu'il contrôle la solubilité et la concentration des métaux (CEAEQ, 2006a ; Gendronneau *et al.*, 2006 ; Anonyme, 1997). En outre, le rôle du pH est primordial pour les phénomènes d'adsorption/désorption et il est généralement admis que l'adsorption augmente avec le pH.

Le pH est mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre de marque *Testo-206*, en plongeant la sonde dans l'eau de mer à examiner et la lecture est faite après stabilisation de la valeur affichée. Il est nécessaire d'effectuer trois mesures pour s'assurer de la constance de la valeur obtenue (voir tableau III.3 pour les résultats obtenus).

## **III.2. Travaux effectués au laboratoire**

### **III.2.1. Détermination des paramètres physico-chimiques**

De retour au laboratoire, la mesure de certains paramètres physico-chimiques a été réalisée, à savoir :

#### **III.2.1.1. L'oxygène dissous**

L'oxygène dissous est, après la température et la salinité, le paramètre océanographique le mieux documenté, il intervient dans tous processus biologiques permettant la vie marine (Gendronneau *et al.*, 2006).

Il est mesuré à l'aide d'un oxymètre de paillasse de marque *WTW Inolab* ; sonde : *Cellox 325*, les résultats enregistrés sont rapportés dans le tableau III.3.

#### **III.2.1.2. Turbidité**

Ce paramètre est représentatif de la présence de particules dans l'eau, essentiellement de la vase dans un secteur. La remise en suspension des sédiments est le fait de l'agitation de l'eau par les vents, les courants et les grandes marées entraînant une hausse de la turbidité (Fillon, 2006).

La turbidité est mesurée en traçant une courbe d'étalonnage (voir courbe 9, *annexe I*) avec différentes concentrations en gel de silice, les échantillons d'eau de mer sont analysés par un spectrophotomètre UV-VIS de marque *Analytica jena/SPECORD 50*, en mesurant la densité optique, en se rapportant à la courbe d'étalonnage établie, on obtient les résultats en mg/l. Le tableau III.3 résume les résultats obtenus.

### **III.2.1.3. Conductivité**

La conductivité (aussi appelée conductance spécifique) est la mesure de la capacité d'une eau à conduire un courant électrique ; autrement dit, elle fournit des informations sur le degré de minéralisation des eaux analysées. Elle est reliée à la concentration et à la nature des substances dissoutes (CEAEQ, 2006b ; Armstrong *et al.*, 2005).

La conductivité est mesurée de retour au laboratoire avec un conductimètre de palliase de marque *HANNA EC – 215*, en plongeant la sonde du conductimètre dans l'eau de mer à examiner. Elle est exprimée en unités de *millisiemens* par centimètre ; les résultats obtenus sont rapportés dans le tableau III.3.

### **III.2.2. Acidification**

De retour au laboratoire les échantillons sont aussitôt conservés, la préservation des échantillons se fait par addition d'environ 1 ml d'acide nitrique concentré. Cela est suffisant pour acidifier les échantillons à un  $\text{pH} < 2$ . L'attaque acide permet non seulement d'éviter la précipitation, empêcher la croissance de bactéries, empêcher l'adsorption sur les parois, mais aussi pour la stabilisation de certaines espèces chimiques (Thierrin *et al.*, 2003).

### **III.2.3. Détermination des métaux traces**

Les métaux lourds dans l'eau de mer se distinguent en deux groupes : les métaux dissous et les métaux particulaires. La filtration d'un échantillon d'eau est nécessaire à chaque fois qu'une distinction est faite entre métaux totaux et métaux dissous, et que la teneur en MES risque de fausser les résultats (Chiffolleau *et al.*, 2002).

Le dosage des métaux traces dans les échantillons d'eau de mer est effectué par la spectrophotométrie d'absorption atomique en mode flamme.

### III.2.3.1. Spectrophotométrie d'absorption atomique de flamme (SAA) :

#### Aspect Théorique

Comme mentionné précédemment, la détermination des métaux traces dans les échantillons d'eau de mer, se fait par la SAA de flamme, de marque *Shimadzu* de référence *SAA 6501F* (voir photo ci-dessous).



**Figure III.3** : Appareil représentant le Spectrophotomètre d' Absorption Atomique  
(*Shimadzu SAA 6501F*)

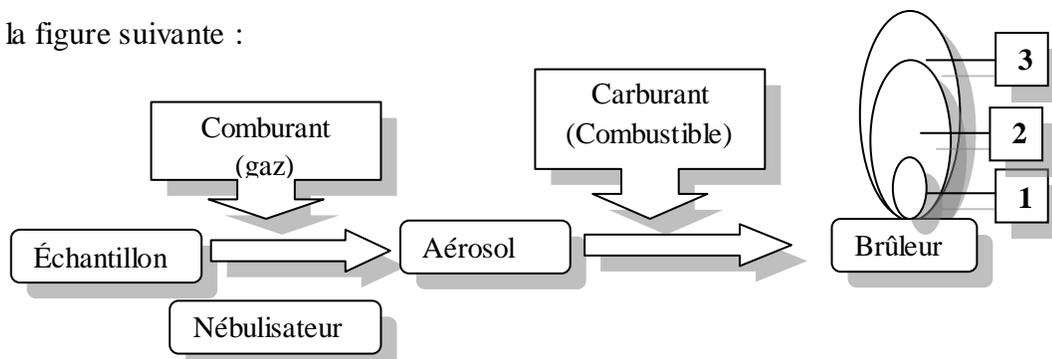
#### a. Principe

La SAA est une méthode très utilisée pour doser des métaux présents en solution en analyse chimique. C'est une méthode de dosage rapide, précise et permet la détection d'éléments en faibles concentrations. Cette méthode repose sur le fait que tout corps chimique est capable d'absorber les radiations (photons) qu'il émet lui-même dans certaines conditions. Cette absorption se produit au niveau de l'atome et chaque atome ne peut absorber qu'un seul photon (Emblanch *et al.*, 2004).

#### b. Eléments constitutifs de l'appareil

- Source de radiation ;
- Source d'atomisation ;
- Monochromateur ;
- Détecteur ; et
- Imprimante (quelque fois). L'appareil avec lequel nous avons effectué nos dosages en est dépourvu.

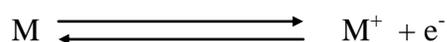
L'atomisation spectrophotométrique des métaux se passe comme suit : La solution de l'analyte (usuellement aqueuse) est nébulisée, c'est-à-dire pulvérisé sous la forme d'un fin brouillard, et amenée dans la flamme dans le flux de carburant ou de comburant gazeux, comme décrit dans la figure suivante :



**Figure III.4** : Schéma du principe de fonctionnement du SAA de flamme (Dechelette et Palvadeau, 2004).

Lorsqu'un échantillon nébulisé est amené dans la flamme :

- Le solvant (eau dans notre cas) s'évapore de la zone 1, appelé zone primaire ;
- Les particules finement divisées qui en résultent sont amenée dans la région centrale (zone 2), appelée interzonale, c'est la partie la plus chaude de la flamme, les atomes et les ions monoatomiques se transforment à l'état gazeux, à partir de particules solides :



C'est également dans cette région que se produit l'excitation induisant l'émission atomique.

- Enfin, les atomes et les ions atteignent la partie extérieure de la flamme (zone 3), ou zone de combustion secondaire (Dechelette et Palvadeau, 2004).

Cette analyse quantitative est basée sur la réalisation d'une courbe d'étalonnage :

$$\text{Absorbance} = f([\text{étalon}]).$$

La quantité d'énergie absorbée est directement proportionnelle au nombre d'atomes à doser.

La concentration de l'élément à doser est donnée par la loi de **Beer et Lambert** :

$$\boxed{\text{Log}(I / I_0) = K \cdot L \cdot C}$$

Avec :  $I_0$  : intensité du faisceau lumineux incident ;

$I$  : intensité du faisceau lumineux après absorption ;

$K$  : constante dépendant de la fréquence caractéristique de l'élément à doser ;

$L$  : longueur du trajet optique dans la flamme contenant l'élément à doser ;

$C$  : concentration de l'élément à doser.

Pour doser un élément, le spectrophotomètre calcule l'absorbance de l'échantillon à partir de la mesure des deux intensités. Puis, grâce à la droite d'étalonnage (on travaille toujours dans la partie linéaire de la courbe) établie expérimentalement, il en déduit la concentration de l'élément dans l'échantillon.

**Tableau III.1:** Condition analytiques des mesures par la SAA (valeurs tirées du catalogue *Shimadzu SAA 6501F*).

Métal	Conditions analytiques						Limite de détection (ppm)
	Débit d'aspiration (l/min)	Hauteur de la flamme (mm)	Largeur de la fente (nm)	Courant (mA / mA)	Longueur d'onde (nm)	Source d'atomisation	
Cd	1,8	7	0,5	8/0-8/100	228,8	Flamme	0,01
Co	2,2	7	0,2	12/0-12/100	240,7	Flamme	0,007
Cu	1,8	7	0,5	6/0 - 6/100	324,8	Flamme	0,005
Cr	2,8	9	0,5	10/0-10/600	357,9	Flamme	0,005
Zn	2	7	0,5	8/0 - 10/300	213,9	Flamme	0,002
Fe	2,2	7	0,2	12/0-12/400	248,3	Flamme	0,01
Pb	2	7	0,5	10/0 - 8/300	283,3	Flamme	0,01
Ni	2,2	7	0,2	12/0-12/400	232,0	Flamme	0,01

*N.B :* la correction du bruit du fond se fait par la lampe à Deutérium.

### III.2.3.2. Analyse de la phase dissoute (métaux dissous)

La SAA de flamme a été largement utilisée pour la détermination des éléments traces, du fait de son équipement relativement simple. Cependant, la détermination directe des éléments à l'état de trace par cette technique est limitée, du fait de leur présence à de faibles concentrations ou de l'interférence des autres matrices. Ce qui nécessite, dans le cas du dosage de ces éléments métalliques, une étape de préconcentration et/ou de séparation de ces éléments de la matrice interférente (Saraçoğlu et Elçi, 2002).

#### \*Préparation des échantillons pour la SAA

Dans notre cas, la détermination des métaux lourds dans la phase aqueuse (métaux dissous) se passe en deux étapes : concentration par chauffage en milieu acide (Audren et Nguyen, 2005),

suivi du dosage proprement dit. La concentration des échantillons d'eau de mer filtrés et acidifiés comme décrit précédemment, a lieu par évaporation dans une étuve, permettant de réduire le volume initiale de manière significative, ainsi d'éliminer le sel (par cristallisation) induisant des interférences lors de l'analyse.

### III.2.3.3 Analyse de la phase particulaire (métaux particuliers)

La filtration a lieu par passage de la solution à travers une membrane sous une faible pression. Par convention, on considère que la phase particulaire correspond aux matières solides retenues sur une membrane de porosité nominale  $0,45 \mu\text{m}$  (Chiffolleau *et al.*, 2002).

Cependant, des particules de diamètre inférieur peuvent passer au travers des pores de cette dimension, elles représentent la phase colloïdale. Le choix du seuil de coupure dissous / particulaire reste arbitraire et dépend plus des possibilités techniques de séparation que d'une réalité physique, mais on considère que les particules ayant un diamètre inférieur à  $0,45 \mu\text{m}$  sont considérées comme faisant partie de la phase dissoute (Nicolau, 2005 ; Devez, 2004).

La figure ci-après illustre le dispositif de filtration utilisé dans notre cas.

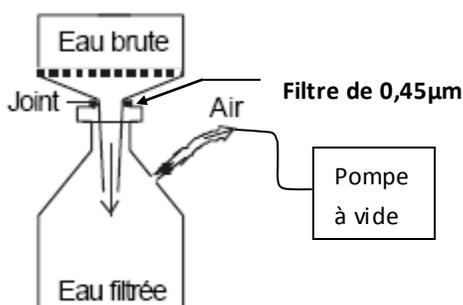


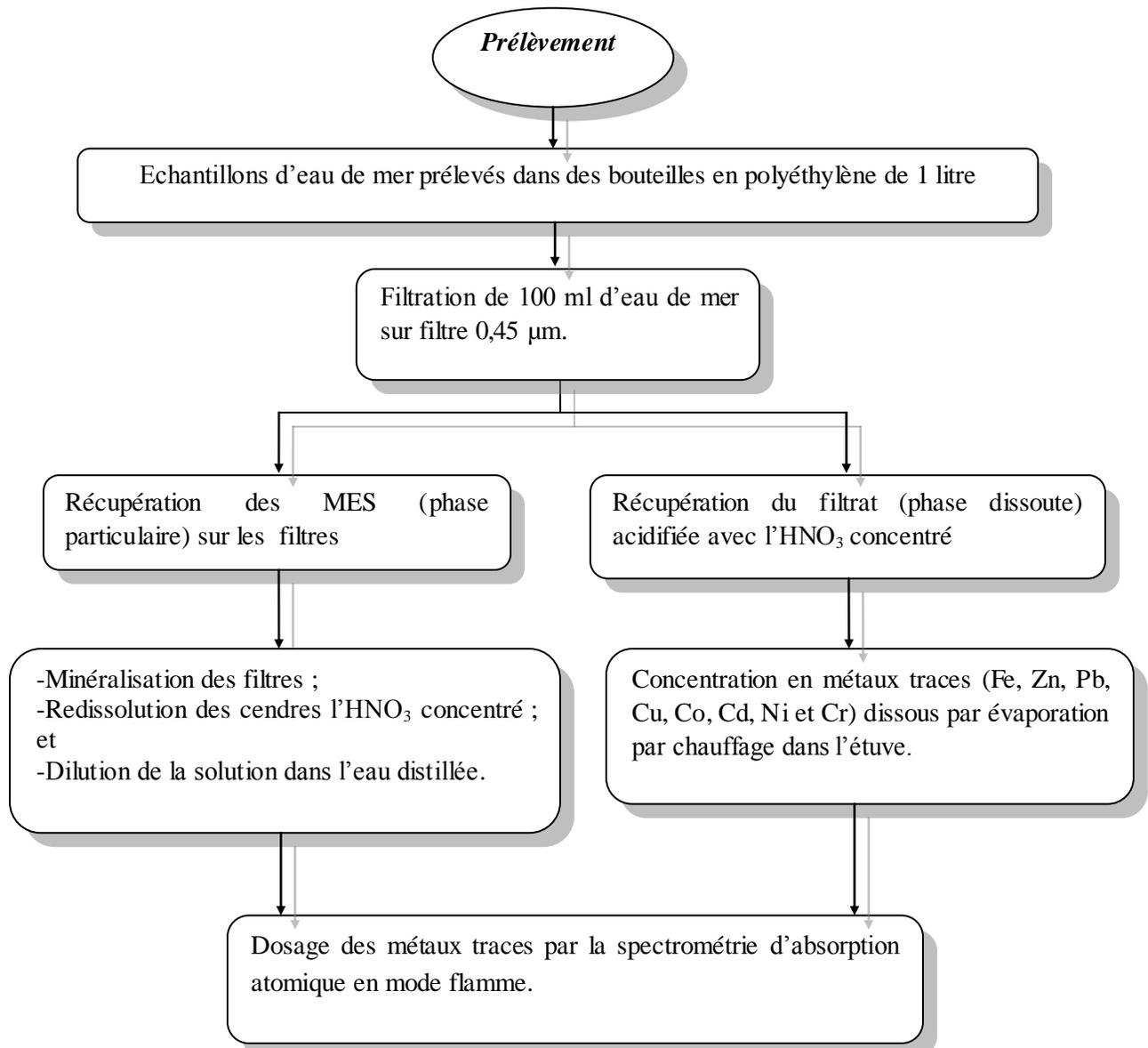
Figure III.5 : Système de filtration des eaux de mer

#### \*Préparation des échantillons pour la SAA

Après avoir filtré un certain volume d'eau de mer sur filtre de porosité nominale  $0,45 \mu\text{m}$ , la masse des matières particulaires est calculée ; les filtres récupérés dans des creusets ont subi une digestion acide ( $\text{HNO}_3$  concentré) dans un four à moufle à  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ ; cette minéralisation a pour but de faire passer tout métal présent dans l'échantillon sous forme soluble et de détruire les composés organiques susceptibles de donner lieu à des interférences au moment du dosage tels que les détergents synthétiques, complexes organophosphatés, polymères extracellulaires et polysaccharides mucilagineux ; les creusets sont agités de temps à autre pour assurer une bonne immersion de la membrane.

Après avoir obtenus un résidu sec, les creusets sont retirés du four et laissés refroidir dans un dessiccateur. La redissolution des cendres est effectuée par ajout de 5 ml d' $\text{HNO}_3$  à 20 %. Les solutions sont laissées se reposer pendant environ 5 minutes, puis sont mélangées de manière à assurer une bonne dissolution des métaux dans l'acide ; les solutions sont récupérées dans des fioles de 50 ml, auxquelles de l'eau distillée est rajoutée pour ajuster le volume. Enfin, elles sont faites passées dans le spectrophotomètre (Jones et Laslett, 1994).

La figure ci-après résume les différentes étapes suivies pour effectuer le dosage des métaux traces dans l'eau de mer.



**Figure III.6 :** Dosage des éléments métalliques dissous et particulaire dans l'eau de mer

### III.2.3.4. Préparation des solutions étalons

Les différents électrolytes utilisés pour la préparation des solutions étalons sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III.2 :** Les différents électrolytes utilisés pour la préparation des solutions étalons

<i>Formule des électrolytes</i>	<i>Poids moléculaire en (g/mol)</i>
CuSO <sub>4</sub> . 5 H <sub>2</sub> O	249,68
Fe <sub>2</sub> O <sub>12</sub> S <sub>3</sub>	489,94
Zn	65,39
Co SO <sub>4</sub>	281,10
NiSO <sub>4</sub> . 6 H <sub>2</sub> O	262,85
3CdSO <sub>4</sub> .8 H <sub>2</sub> O	769,52
PbCl <sub>2</sub>	278,106
K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	194,20

A partir de ces électrolytes, une solution mère, de concentration connue est préparée pour chaque élément en faisant dissoudre le composé dans de l'eau distillée à l'aide de l'HNO<sub>3</sub> concentré, à partir de laquelle sont préparées des dilutions de façon à couvrir la gamme de mesure de la SAA. Chaque série de solution étalon correspondant à l'élément recherché est alors pulvérisée dans la flamme de l'appareil, ce dernier trace alors une courbe des absorbances en fonction de la concentration, on obtient alors pour chaque élément une courbe d'étalonnage (ces courbes sont présentés dans l'*annexe I*, courbes 1 à 8).

### III.2.4. Dosage des métaux lourds avec la SAA

#### III.2.4.1. Dosage du fer

##### a) Principe

la SAA est une technique d'analyse qui utilise les propriétés qu'ont les atomes neutres d'absorber à une certaine longueur d'onde un quantum d'énergie.

##### Établissement de la courbe d'étalonnage

Dans une série de fioles jaugées de 50 ml préparer les dilutions suivantes :

N <sup>o</sup> de tubes	T	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Solution étalon à 10 mg/l de Fe (ml)	0	2,5	5	10	15	20	25	30	35	40	45
HNO <sub>3</sub> (ml)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eau distillée (ml)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Equivalent en mg/l de Fe	0	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9

**b) Mode opératoire**

Mettre une quantité de la solution du métal dans un flacon. Introduire le tube d'aspirateur dans l'échantillon afin d'aspirer une certaine quantité qui sera entraînée vers la flamme de l'appareil, cette dernière atomise la solution et on aura l'absorbance correspondant à l'élément à doser. Effectuer la lecture à la longueur d'onde 248,3 nm.

**c) Expression des résultats**

La concentration en fer est exprimée en  $\mu\text{g/l}$  d'eau de mer (phase dissoute) et  $\text{mg/kg}$  des MES (phase particulaire).

**III.2.4.2. Dosage du nickel****a) Principe**

la SAA est une technique d'analyse qui utilise les propriétés qu'ont les atomes neutres d'absorber à une certaine longueur d'onde un quantum d'énergie.

**Établissement de la courbe d'étalonnage**

Dans une série de fioles jaugées de 50 ml préparer les dilutions suivantes :

N° de tubes	T	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Solution étalon à 10 mg/l de Ni (ml)	0	2,5	5	10	15	20	25	30	35	40	45
HNO <sub>3</sub> (ml)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eau distillée (ml)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Equivalent en mg/l de Ni	0	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9

**b) Mode opératoire** (pareil pour le fer).

Effectuer la lecture à la longueur d'onde 232,0 nm.

**c) Expression des résultats**

La concentration en nickel est exprimée en  $\mu\text{g/l}$  d'eau de mer (phase dissoute) et  $\text{mg/kg}$  des MES (phase particulaire).

**III.2.4.3. Dosage du chrome****a) Principe**

la SAA est une technique d'analyse qui utilise les propriétés qu'ont les atomes neutres d'absorber à une certaine longueur d'onde un quantum d'énergie.

**Établissement de la courbe d'étalonnage**

Dans une série de fioles jaugées de 50 ml préparer les dilutions suivantes :

Nº de tubes	T	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Solution étalon à 10 mg/l de Cr (ml)	0	2,5	5	10	15	20	25	30	35	40	45
HNO <sub>3</sub> (ml)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eau distillée (ml)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Equivalent en mg/l de Cr	0	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9

**b) Mode opératoire** (pareil pour le fer).

Effectuer la lecture à la longueur d'onde 357,9 nm.

**c) Expression des résultats**

La concentration en chrome est exprimée en µg/l d'eau de mer (phase dissoute) et mg/kg des MES (phase particulaire).

#### III.2.4.4. Dosage du Zinc

**a) Principe**

la SAA est une technique d'analyse qui utilise les propriétés qu'ont les atomes neutres d'absorber à une certaine longueur d'onde un quantum d'énergie.

**Établissement de la courbe d'étalonnage**

Dans une série de fioles jaugées de 50 ml préparer les dilutions suivantes :

Nº de tubes	T	I	II	III	IV	V	VI	VIII	IX
Solution étalon à 10 mg/l de Zn (ml)	0	1	1	1,5	2	2,5	3	4	4,5
HNO <sub>3</sub> (ml)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eau distillée (ml)	50	100	50	50	50	50	50	50	50
Equivalent en mg/l de Zn	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9

**b) Mode opératoire** (pareil pour le fer)

Effectuer la lecture à la longueur d'onde 213,9 nm.

**c) Expression des résultats**

La concentration en zinc est exprimée en µg/l d'eau de mer (phase dissoute) et mg/kg des MES (phase particulaire).

#### III.2.4.5. Dosage du plomb

**a) Principe**

la SAA est une technique d'analyse qui utilise les propriétés qu'ont les atomes neutres d'absorber à une certaine longueur d'onde un quantum d'énergie.

**Établissement de la courbe d'étalonnage**

Dans une série de fioles jaugées de 50 ml préparer les dilutions suivantes :

N° de tubes	T	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Solution étalon à 100 mg/l de Pb (ml)	0	1,25	1,5	2,5	3,5	5	7,5	10	12,5
HNO <sub>3</sub> (ml)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eau distillée (ml)	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Equivalent en mg/l de Pb	0	2,5	3	5	7	10	15	20	25

b) Mode opératoire (pareil pour le fer).

Effectuer la lecture à la longueur d'onde 283,3 nm.

**c) Expression des résultats**

La concentration en plomb est en µg/l d'eau de mer (phase dissoute) et mg/kg des MES (phase particulaire).

**III.2.4.6. Dosage du cobalt****a) Principe**

la SAA est une technique d'analyse qui utilise les propriétés qu'ont les atomes neutres d'absorber à une certaine longueur d'onde un quantum d'énergie.

**Établissement de la courbe d'étalonnage**

Dans une série de fioles jaugées de 50 ml préparer les dilutions suivantes :

N° de tubes	T	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Solution étalon à 10 mg/l de Co (ml)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
HNO <sub>3</sub> (ml)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eau distillée (ml)	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Equivalent en mg/l de Co	0	1	2	3	4	5	6	7	8

b) Mode opératoire (pareil pour le fer).

Effectuer la lecture à la longueur d'onde 240,7 nm.

**c) Expression des résultats**

La concentration en cobalt est exprimée en µg/l d'eau de mer (phase dissoute) et mg/kg des MES (phase particulaire).

**III.2.4.7. Dosage du cadmium****a) Principe**

la SAA est une technique d'analyse qui utilise les propriétés qu'ont les atomes neutres d'absorber à une certaine longueur d'onde un quantum d'énergie.

### Établissement de la courbe d'étalonnage

Dans une série de fioles jaugées de 50 ml préparer les dilutions suivantes :

Nº de tubes	T	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Solution étalon à 10 mg/l de Cd (ml)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
HNO <sub>3</sub> (ml)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eau distillée (ml)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Equivalent en mg/l de Cd	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

b) Mode opératoire (pareil pour le fer).

Effectuer la lecture à la longueur d'onde 228.8 nm.

c) Expression des résultats

La concentration en cadmium est en µg/l d'eau de mer (phase dissoute) et mg/kg des MES (phase particulaire).

### III.2.4.8. Dosage du cuivre

a) Principe

la SAA est une technique d'analyse qui utilise les propriétés qu'ont les atomes neutres d'absorber à une certaine longueur d'onde un quantum d'énergie.

### Établissement de la courbe d'étalonnage

Dans une série de fioles jaugées de 50 ml préparer les dilutions suivantes :

Nº de tubes	T	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Solution étalon à 10 mg/l de Cu (ml)	0	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40	45
HNO <sub>3</sub> (ml)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eau distillée (ml)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Equivalent en mg/l de Cu	0	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9

b) Mode opératoire (pareil que pour le fer).

Effectuer la lecture à la longueur d'onde 324,8 nm.

c) Expression des résultats

La concentration en cuivre en µg/l d'eau de mer (phase dissoute) et mg/kg des MES (phase particulaire).

Les tableaux suivants rassemblent les résultats obtenus pour tous les paramètres mesurés durant la campagne de prélèvement

**Tableau III.3:** Résultats de mesure des paramètres physico-chimiques des eaux du port de Béjaïa

Paramètre Station	Température (°C)	pH	Conductivité (ms/cm)	Oxygène dissous (mg/l)	Turbidité (mg/l)
S <sub>1</sub>	<b>17,7 ± 0,21</b>	7,71 ± 0,02	30,9 ± 0,40	<b>6,5 ± 0,20</b>	47,6 ± 0,40
S <sub>2</sub>	18,1 ± 0,17	7,76 ± 0,04	30,96 ± 0,36	5,1 ± 0,10	<b>77,6 ± 1,97</b>
S <sub>3</sub>	18,1 ± 0,2	7,78 ± 0,02	30,9 ± 0,50	5,6 ± 0,17	44,4 ± 2,60
S <sub>4</sub>	18,2 ± 0,17	7,79 ± 0,01	31,1 ± 0,36	5,2 ± 0,17	39 ± 1,20
S <sub>5</sub>	18,2 ± 0,17	7,75 ± 0,03	31 ± 0,62	6,45 ± 0,06	47,8 ± 0,40
S <sub>6</sub>	18,2 ± 0,2	7,73 ± 0,02	30,76 ± 0,60	5,4 ± 0,26	44,1 ± 0,50
S <sub>7</sub>	18,1 ± 0,15	7,76 ± 0,03	30,8 ± 0,46	5,1 ± 0,10	51,2 ± 5,80
S <sub>8</sub>	18,2 ± 0,1	7,75 ± 0,04	<b>31,3 ± 0,53</b>	5 ± 0,10	42,3 ± 2,10
S <sub>9</sub>	18,4 ± 0,1	7,72 ± 0,03	30,83 ± 0,45	6,1 ± 0,20	27,6 ± 2,51
S <sub>10</sub>	18,1 ± 0,26	7,69 ± 0,02	30,8 ± 0,35	5,4 ± 0,60	67,9 ± 8,22
S <sub>11</sub>	<b>18,7 ± 0,3</b>	7,57 ± 0,02	28,93 ± 1,10	<b>3,2 ± 0,26</b>	52,6 ± 2,60
S <sub>12</sub>	18,4 ± 0	<b>7,54 ± 0,03</b>	<b>27,93 ± 0,83</b>	3,4 ± 0,20	71,2 ± 8,80
S <sub>13</sub>	18,2 ± 0,2	7,71 ± 0,02	29 ± 0,82	5 ± 0,20	<b>14 ± 1,67</b>
S <sub>14</sub>	18,2 ± 0,17	7,7 ± 0,02	30,3 ± 0,62	6,07 ± 0,25	52,8 ± 7,79
S <sub>15</sub>	18,2 ± 0,1	7,8 ± 0,03	30,03 ± 0,67	5,9 ± 0,17	24,4 ± 6,00
S <sub>16</sub>	18,3 ± 0,17	<b>7,82 ± 0,03</b>	30,43 ± 0,90	5,6 ± 0,52	23,1 ± 0,90
S <sub>17</sub>	18 ± 0,17	7,78 ± 0,02	30,03 ± 0,64	4,3 ± 0,35	21,6 ± 1,20
<b>Moyenne ± écart type</b>	18,19 ± 0,20	7,73 ± 0,074	30,35 ± 0,92	5,25 ± 0,93	44,07 ± 18,01

*Les valeurs en gras représentent les maxima et les minima.*

Tableau III.4 : Teneur en métaux dissous de l'eau de mer du port de Béjaïa ( $\mu\text{g/l}$ ).

Paramètre Station	Fe	Zn	Ni	Cr	Co	Pb	Cu	Cd
S <sub>1</sub>	401,9	116,75	184,2	788,8	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>2</sub>	222,2	93,5	189	194,7	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>3</sub>	259,7	205,75	268	472,6	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>4</sub>	581,6	8,5	<b>2636,35</b>	<b>1034,4</b>	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>5</sub>	463,5	66,5	254,7	181,9	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>6</sub>	319,7	35,25	172,3	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>7</sub>	312	111,5	35,15	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>8</sub>	<b>29,87</b>	8	153,45	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>9</sub>	251,4	26	43,45	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>10</sub>	313,6	25,25	53,6	<b>107,9</b>	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>11</sub>	43,07	169,25	<b>28,2</b>	422,6	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>12</sub>	428,1	144,25	98,05	241,7	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>13</sub>	492,8	37,25	41,7	175,6	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>14</sub>	374,2	<b>210,75</b>	62,95	407,9	< LD	< LD	< LD	< LD
S <sub>15</sub>	461,5	90	39,7	137,3	<b>12,5</b>	< LD	< LD	< LD
S <sub>16</sub>	<b>625,3</b>	<b>6,5</b>	37,5	409,4	<b>38</b>	< LD	< LD	< LD
S <sub>17</sub>	598,6	7,5	52	121,2	28,4	< LD	< LD	< LD
<b>Moyenne <math>\pm</math> écart type</b>	363,47 $\pm$ 172,81	80,15 $\pm$ 70,05	255,90 $\pm$ 618,69	361,23 $\pm$ 279,47	26,30 $\pm$ 12,87	/	/	/

Les valeurs en gras représentent les maxima et les minima.

Tableau III.5: Teneurs en métaux particuliers de l'eau de mer du port de Béjaïa (mg/kg)

Paramètre Station	Fe	Zn	Ni	Cr	Co	Pb	Cu	Cd
S <sub>1</sub>	36368	1813	11058	20473	< LD	3632	< LD	< LD
S <sub>2</sub>	40507	888	2202	<b>28210</b>	< LD	2621	< LD	< LD
S <sub>3</sub>	50054	1708	3910	<b>1974</b>	< LD	2069	< LD	< LD
S <sub>4</sub>	<b>103104</b>	<b>4304</b>	<b>24138</b>	3821	< LD	833	< LD	< LD
S <sub>5</sub>	72422	1553	23106	4756	< LD	2733	< LD	< LD
S <sub>6</sub>	19087	1563	435	5544	< LD	<b>6700</b>	< LD	< LD
S <sub>7</sub>	35792	1006	470	11285	< LD	1335	< LD	< LD
S <sub>8</sub>	46459	1868	473	7673	< LD	2308	< LD	< LD
S <sub>9</sub>	36182	470	15346	11611	< LD	1946	< LD	< LD
S <sub>10</sub>	38093	1569	821	19897	< LD	2717	< LD	< LD
S <sub>11</sub>	33487	3583	1501	11182	< LD	3103	< LD	< LD
S <sub>12</sub>	<b>5189</b>	881	68	3263	< LD	<b>738</b>	< LD	< LD
S <sub>13</sub>	20514	1250	238	13982	< LD	3456	< LD	< LD
S <sub>14</sub>	32062	2095	443	27551	< LD	5410	< LD	< LD
S <sub>15</sub>	41959	1127	<b>27</b>	23346	< LD	2816	< LD	< LD
S <sub>16</sub>	24795	<b>408</b>	41	21458	< LD	5863	< LD	< LD
S <sub>17</sub>	19892	15010	125	3730	< LD	3730	< LD	< LD
<b>Moyenne ± écart type</b>	38586,2± 22311,92	1570,47 ± 1030,91	4964,82 ± 8212,95	13590,3± 8605,56	/	3059,41± 1661,25	/	/

Les valeurs en gras représentent les maxima et les minima.

*N.B* : Pour la comparaison des résultats, l'analyse de la variance, ANOVA (*STATISTICA, Kernel version 5.5 A*) est utilisée et le degré de signification de données est pris à la probabilité  $P < 0,05$ .

*Chapitre IV : Résultats  
& Discussion*

L'analyse des résultats est une étape déterminante, vu qu'elle révèle les principales sources d'éléments déjà analysés et leur origine ainsi que les facteurs influençant leurs variations.

Bien qu'une extrapolation à partir du nombre d'échantillons étudiés soit délicate, cette étude préliminaire nous a permis principalement d'avoir d'une part, une image actuelle sur la variation de la concentration des métaux étudiés et les paramètres physico-chimiques d'accompagnement d'eau de mer du port de Béjaïa, d'autre part d'estimer l'état actuel de pollution de ce dernier.

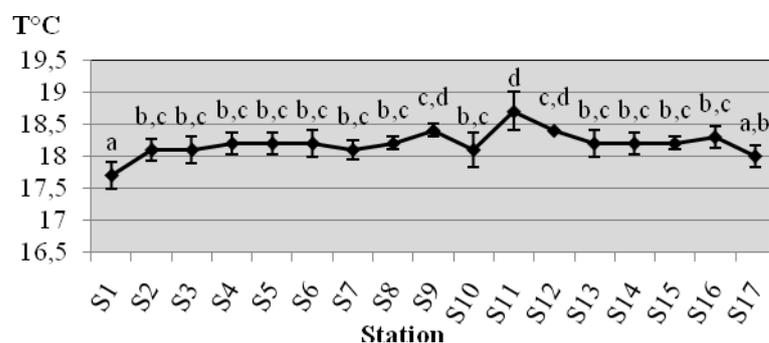
## IV.1 Discussion et interprétation des résultats d'analyse physico-chimiques

### IV.1.1. Température

La température de l'eau est un paramètre très important pour la vie aquatique car beaucoup d'autres paramètres en sont fonction. Les températures enregistrées varient de manière significative d'une station à l'autre de 17.7 °C à 18.7 °C (à  $p < 0.05$ ), soit une moyenne de 18.19 °C et un écart type de (0.20) qui indique une faible variabilité de ce paramètre.

La variation de la température est perceptible à partir de la station 02. Elle atteint son maximum à la station 11 avec toutefois une élévation relativement considérable à la 9<sup>ème</sup> station, puis tend à reprendre sa stabilité à partir de la 12<sup>ème</sup> station jusqu'à la dernière, avec une fluctuation à peine perceptible au niveau des stations 12 et 16.

La figure ci-dessous illustre la variation de la température de l'eau de mer au cours de la campagne de prélèvement



**Figure IV.1 :** Variation de la température des eaux portuaires de Béjaïa

Les barres verticales représentent les écart types.  
Des lettres différentes indiquent des différences entre stations.

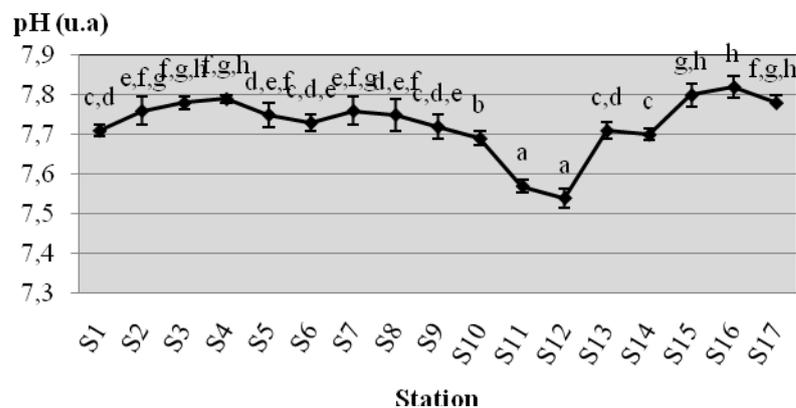
Ces valeurs de température enregistrées sont dues à la température ambiante régnant au moment du prélèvement qui était de 19 °C. En outre, la forte pluviométrie (Annexe II,

tableau II) qu'a connu la ville de Béjaïa durant cette période a eu sa propre influence en baissant la température. La valeur la plus élevée est enregistrée au niveau de la 11<sup>ème</sup> station du bassin de l'arrière port où deux points de rejets existent. Cette élévation s'interprète éventuellement par le fait qu'au moment du prélèvement, il y a eu un déversement d'eaux usées de température plus ou moins élevée.

#### IV.1.2. Potentiel Hydrogène (pH)

Les valeurs du pH relevées pendant la campagne de prélèvement varient de manière significative d'une station à l'autre, elles sont comprises entre 7.54 et 7.82 (à  $p < 0.05$ ), soit une moyenne de 7.73 avec un écart type de (0.07) qui indique une faible dispersion des distributions du pH.

Au niveau de la station 02, le pH augmente progressivement jusqu'à la 4<sup>ème</sup> station, où on remarque une diminution progressive pour atteindre une valeur minimale de 7.54 à la station 12, puis il reprend son augmentation jusqu'à la station 17. La figure suivante illustre les variations du pH de l'eau de mer durant la campagne de prélèvement.



**Figure IV.2 :** Variation du pH de l'eau de mer du port de Béjaïa

*Les barres verticales représentent les écarts types.  
Des lettres différentes indiquent des différences entre stations.*

Toutes les stations montrent un pH beaucoup plus proche de l'alcalinité que de la neutralité ; les pH les plus bas sont enregistrés au niveau des stations 11 et 12 (se trouvant à proximité des points de rejets) de 7.57 et 7.54 respectivement; cela est due probablement aux déversements d'eaux usées, particulièrement les rejets industriels (rejets acides). La tendance de l'augmentation du pH peut être expliquée vraisemblablement que naturellement les eaux de haute mer sont à un pH aux alentours de 8 (FOGEM, 2005), alors que la station 16

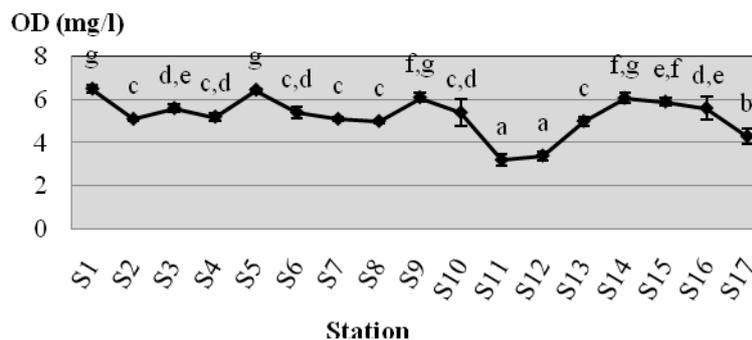
(présentant la valeur maximale) est à un pH inférieur, ceci peut être dû à une influence des eaux de la Soummam.

En milieu saumâtre et en mer, le pH se situe généralement autour de 8, le pH de préférence des poissons d'eau de mer est entre 8 et 8.5 (FOGEM, 2005), ce qui sous entend que les eaux portuaires sont un milieu défavorable pour le développement des poissons.

#### IV.1.3. Oxygène Dissous (OD)

Les résultats obtenus montrent clairement que la teneur en OD varie significativement d'une station à l'autre entre 3.2 à 6.5 mg/l (à  $p < 0.05$ ), soit une moyenne de 5.25 mg/l et un écart type de 0.93.

La figure IV.3 montre que la teneur en OD diminue de la 1<sup>ème</sup> station-montrant la teneur maximale (6.5 mg/l)- à la 4<sup>ème</sup>, puis atteint un taux proche du maximum à la station 05 avec une valeur de 6.45 mg/l, à partir de laquelle les teneurs reprennent leur variation jusqu'à la 11<sup>ème</sup> station où on a enregistré la valeur minimale (3.2 mg/l), puis elles reprennent leur fluctuation dans le reste des stations.



**Figure IV.3 :** Variation de la teneur en OD des eaux portuaires de Béjaïa.

*Les barres verticales représentent les écart types.  
Des lettres différentes indiquent des différences entre stations.*

Les stations 11, 12 et 17 enregistrent des valeurs inférieures à 5 mg/l ; les stations 11 et 12 avoisinant les points de rejets et se trouvant dans un bassin fermé, l'arrière port, ont présenté les teneurs en OD les plus faibles (3.2 mg/l et 3.4 mg/l respectivement), ces valeurs sont probablement dues à l'accumulation des rejets, principalement riches en MO et en matières minérales, générés par les établissements industriels et les réseaux d'assainissement. Cela suggère que la zone entourant les stations 11 et 12 dans le bassin de l'arrière port (où le brassage des masses d'eau est faible) est une zone confinée en comparaison avec les autres points, ce qui peut entraîner ainsi une situation d'anoxie.

Par ailleurs, la station 17 se situant loin des points de rejets a présenté également une teneur en OD plus ou moins faible (4.3 mg/l), ceci peut être imputable aux MO et minérales charriées par l'Oued Soummam vu le courant qui passe de ce dernier vers la région portuaire, et étant donnée que la station 17 se situe à proximité de l'embouchure de l'Oued Soummam.

En effet, selon Gendronneau *et al.* (2006), on estime que :

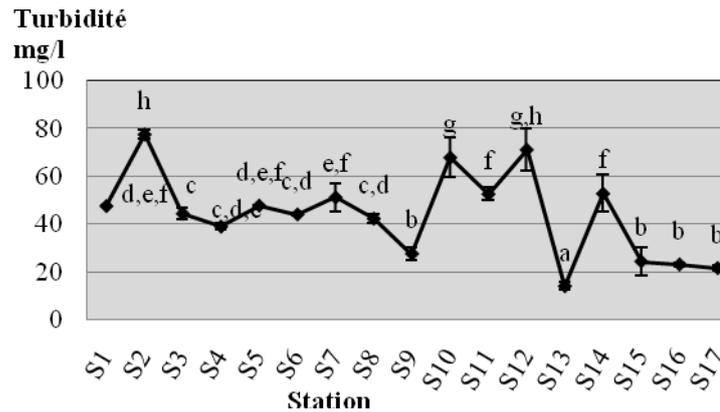
- Au delà de 5 mg/l, il n'y a pas d'effets négatifs sur le biotope ;
- Entre 2 mg/l et 5 mg/l, on observe des zones d'évitement par la faune ;
- En dessous de 2 mg/l, il y a anoxie, qui peut se traduire par des mortalités massives.

Gavriil et Angelidis (2005) rapportent, dans leur étude au niveau de la baie de Kalloni (l'île de Lesbos, Grèce), des valeurs allant de 8.2 à 11.2 mg/l pendant octobre 1999, et durant mars 2000, les concentrations ont varié de 10 à 12 mg/l, alors qu'en septembre 2000, ils ont enregistré les teneurs les plus faibles allant de 5.2 à 6 mg/l probablement à cause des températures élevées de la saison.

Globalement, les teneurs en OD enregistrées sont assez faibles. Cependant, d'après Aminot et Kérouel (2004) et Gendronneau *et al.* (2006), le suivi de l'OD ne révèle pas d'anoxie significative; dans certains cas, la teneur en OD diminue après un épisode pluvieux, ce qui pourrait s'expliquer par des apports, depuis le bassin versant, de substances consommatrices d'oxygène, en lien avec l'augmentation de la turbidité.

#### **IV.1.4. Turbidité**

Les résultats obtenus sont compris entre 14 et 77,6 mg/l avec une moyenne de 44.07 mg/l et un écart type de 18.01, ces concentrations varient de manière significative d'une station à l'autre (à  $p < 0.05$ ). Cette campagne a enregistré un pic important au niveau de la station 02 pour une valeur de 77.6 mg/l à partir de laquelle on constate une fluctuation des valeurs jusqu'à la station 13, où la valeur minimale est relevée qui est de 14 mg/l, puis les valeurs reprennent leur variation dans le reste des stations (voir représentation ci-après).



**Figure IV.4 :** Variation de la turbidité de l'eau de mer du port de Béjaïa

*Les barres verticales représentent les écart types.  
Des lettres différentes indiquent des différences entre stations.*

La 2<sup>ème</sup> station de l'avant port montre la valeur maximale, la station la plus trouble par rapport aux autres, cela vient du fait qu'elle reçoit des eaux usées domestiques générées par les habitations, restaurants, ...etc. se trouvant dans cette régions qui s'y déversent sans traitement, par conséquent, cette région est soumise continuellement à des rejets où les MES responsables de cette turbidité n'ont pas le temps de se déposer totalement ou que ces dernières sont peu sédimentables, ou encore du fait des courants marins qui empêchent ainsi la sédimentation de ces particules. De même que la station 12 montre une turbidité proche de la maxima, cela peut s'interpréter par le fait qu'elle se situe dans une zone soumise à des rejets d'eaux usées, à cela s'ajoute le fait qu'elle se localise dans un coin où beaucoup d'activités sont présentes, entre autres chargement et déchargement des marchandises entraînant la chute de produits en quantités non négligeables qui peut contribuer éventuellement à cette turbidité.

Malgré qu'elle se trouve dans un bassin fermé (l'arrière port), la station 13 enregistre la valeur la plus faible de la turbidité, cela peut être imputable au fait qu'elle se situe loin des rejets où toutes les particules se dispersent bien au sein des masses d'eau ou qu'elles sont rapidement enlevées de la surface par sédimentations du fait que cette zone se trouve dans un bassin fermé loin de l'influence des courants marins.

Ces teneurs plus ou moins élevées de la turbidité au niveau des bassins portuaires, sont à l'origine de la diminution des tirants d'eaux par sédimentation de ces particules en temps calme, engendrant ainsi la réduction des capacités de navigation, ces MES responsables de la turbidité peuvent modifier la nature des fonds marins en changeant la faune et la flore, la diffusion de l'oxygène dans les fonds, en outre, elle peut provoquer l'asphyxie des poissons

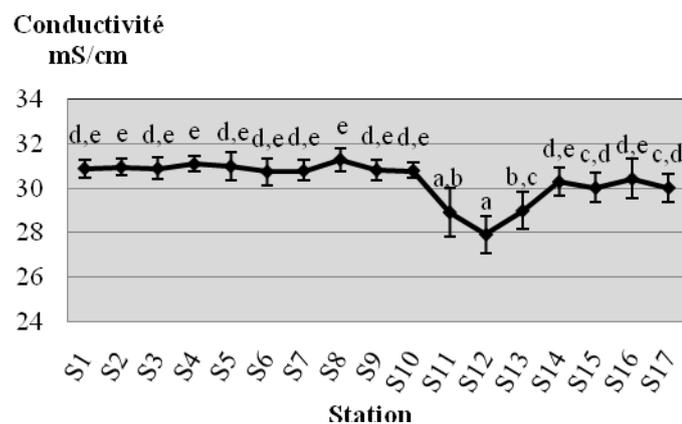
par colmatage des branchies et adsorber à leur surface des polluants chimiques et des bactéries.

Par ailleurs, dans la baie de Mobile (Alabama, Sud-Est des Etats Unies), Ingle (1952) In Moubet (1999), n'observe aucun dommage pour les poissons, même à proximité des opérations de dragages (20 – 25 m) (où la turbidité est élevée), ce qui mène à dire que les poissons évitent les zones où la turbidité est trop importante. Dans la baie de Chesapeake (Etats Unies), Ritchie (1970) n'a mis en évidence aucune baisse dans les captures de bars, ni aucun accroissement de la mortalité pour les poissons emprisonnés dans les cages à proximité d'une zone où s'effectuent des dépôts de dragages. L'état de branchies avant et après leur séjour dans l'eau ne présente aucun dommage (Moubet, 1999) ; des observations analogues ont été faites par Flemer *et al.* (1978). Toutefois, des mortalités importantes de poissons ont été observées suite à des crues importantes du Potomac (fleuve situé à la côte Est des Etats Unies) ayant provoqué l'augmentation de la turbidité (6 g/l) pendant 15 jours (Moubet, 1999).

#### IV.1.5. Conductivité

Les résultats rapportés dans le tableau XII, montrent que les valeurs de la conductivité varient de 27.93 mS/cm à 31.3 mS/cm, avec une moyenne de 30,35 mS/cm et un écart type de 0,92 mS/cm indiquant la faible variation dans la distribution des valeurs qui varient de manière significative d'une station à l'autre (à  $p < 0.05$ ).

Les variations de la conductivité sont à peine perceptibles de la 1<sup>ère</sup> à la 17<sup>ème</sup> station, à l'exception des stations 11, 12, et 13 du bassin de l'arrière port où les valeurs les plus faibles sont enregistrées. La figure ci-après illustre alors ces variations.



**Figure IV.5 :** Variation de la conductivité de l'eau de mer du port de Béjaïa

*Les barres verticales représentent les écart types.  
Des lettres différentes indiquent des différences entre stations.*

Les stations 11, 12 et 13 montrent les valeurs de conductivité les plus faibles où on enregistre la valeur minimale au niveau de la 12<sup>ème</sup> station (27.93 mS/cm). Cette diminution peut s'interpréter par le fait qu'il y a eu un déversement d'eaux usées dans ce bassin au moment du prélèvement induisant une certaine dilution des eaux de ce dernier.

La station 08 montre la valeur maximale par rapport aux autres stations qui est de 31.3 mS/cm, cela peut être expliqué par le volume des rejets domestiques ainsi qu'aux effluents industriels déversés aux alentours de cette station, ceci explique aussi les valeurs enregistrées au niveau des stations 04 et 05.

De manière générale, les conductivités relevées au cours de notre campagne de prélèvement sont dans les normes (à l'exception des stations 04, 05 et 08), car d'après Rodier et Champsaur (2005), la conductivité des eaux saumâtres et de l'eau de mer varie entre 10 000 et 30 000  $\mu$ S/cm.

## **IV.2. Profil de distribution des métaux lourds dans les échantillons d'eau de mer**

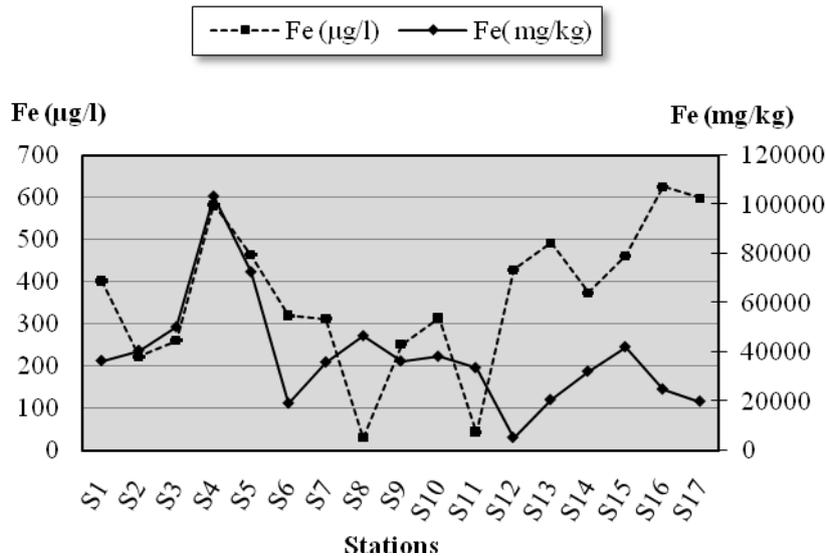
### **IV.2.1. Le Fer**

On constate d'après les teneurs en fer dissous obtenues que toute la surface échantillonnée présente des concentrations élevées. Elles varient entre un minimum de 29.87  $\mu$ g/l au niveau de la station 08 et un maximum de 625.3  $\mu$ g/l au niveau de la station 16, pour une moyenne de  $363,47 \pm 172.81$   $\mu$ g/l, avec un écart type élevé ce qui témoigne d'une grande variabilité de ce paramètre. La même observation est fait pour le fer particulaire, où toutes les stations montrent des concentrations considérables, celle-ci fluctuent entre un minimum de 5189 mg/kg au niveau de la station 12 et un maximum de 103104 mg/kg au niveau de station 04, avec une moyenne de  $38586,235 \pm 22311,92$  mg/kg et un écart type considérable.

La station 11 présente une concentration en fer dissous de 43.07  $\mu$ g/l assez proche de la valeur minimale du fait de l'absence de leurs sources génératrices ; les stations 04 et 17 présentent, quant à elles, des valeurs proches du maxima de 581.6 et 598.6  $\mu$ g/l respectivement.

La station 04 présente une teneur en fer considérablement élevée dans les deux phases (dissoute et particulaire)

La figure ci-après illustre les variations des concentrations en fer dissous et particulaire dans l'eau de mer



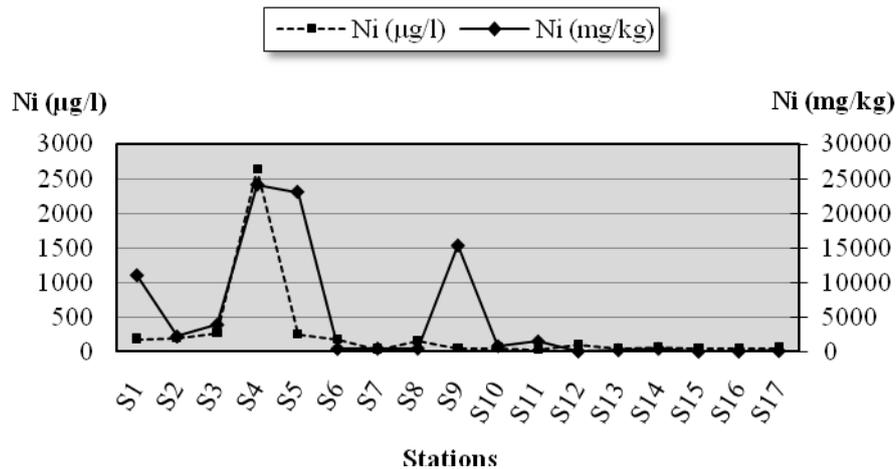
**Figure IV.6 :** Variation des concentrations en fer dissous et particulaire dans les eaux de mer du port de Béjaïa

#### IV.2.2. Le Nickel

On observe la présence du nickel au niveau de tout les bassins du port ; les concentrations enregistrées sont très importantes, elles varient entre un minimum de 27  $\text{mg/kg}$  au niveau de la station 15 et un maximum de 24138  $\text{mg/kg}$  au niveau de la station 04 qui avoisine un point de rejet ; pour une moyenne de  $4964,82 \pm 8212,95 \text{ mg/kg}$ , l'écart des concentrations est considérable entre les stations, ce qui suggère de sources de contamination importantes. La même constatation est faite pour le nickel dissous, où on remarque également la présence du nickel au niveau de toutes les stations. Les concentrations fluctuent entre un minimum de 28.2  $\mu\text{g/l}$  au niveau de la station 11 et un maximum de 2636,35  $\mu\text{g/l}$  au niveau de la station 04 ; pour une moyenne de  $255,9 \pm 618,69 \mu\text{g/l}$ , comme pour le nickel particulaire, l'écart des concentrations est considérable entre les stations, ce qui suppose de sources de contamination importantes.

Les stations 15 et 16 enregistrent les concentrations les plus faibles dans les deux phases et la station 04 présente la concentration maximale également dans les deux phases.

La figure ci-dessous illustre la distribution des concentrations en nickel dans la phase dissoute et particulaire.



**Figure IV.7:** Variation des teneurs en nickel dissous et particulaires dans les eaux portuaires

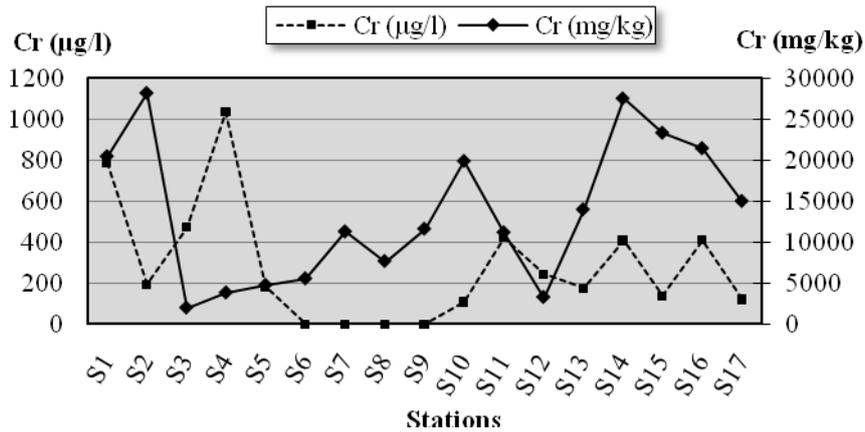
#### IV.2.3. Le Chrome

Considéré comme étant dangereux, le chrome présente des concentrations élevées dans la phase particulaire sur toute la surface échantillonnée. Elles varient entre 1974 mg/kg, concentration minimale relevée au niveau de la station 03 et 28210 mg/kg, concentration maximale relevée au niveau de la station 02, malgré que ces deux stations se situent dans le même bassin, l'avant port. La moyenne des résultats est de  $13590,35 \pm 8605,56$  mg/kg avec un écart type élevé, traduisant une très large variation des concentrations.

D'après les teneurs en chrome dissous obtenues, on constate qu'il est présent dans toutes les stations à des concentrations élevées par rapport à la littérature, leur moyenne est de  $361,23 \pm 279,47$  µg/l avec un écart type élevé témoignant d'une large variation de la dispersion des teneurs; à l'exception des stations 06, 07, 08 et 09 où il présente des concentrations inférieures à la limite de détection.

La concentration maximale en chrome dissous est relevée au niveau de la station 04, se trouvant à proximité d'un point de rejet présente une valeur de 1034.4 µg/l, alors que la concentration minimale enregistrée au niveau de la station 10 se situant au milieu de la passe Abdelkader a une valeur de 107.9 µg/l. La station 01 montre une concentration en chrome dissous assez élevée de 788.8 µg/l, pendant que les stations 15 et 17 présentent des concentrations assez basses par rapport aux autres.

La figure suivante représente la variation des teneurs en chrome dans la phase dissoute et particulaire au niveau des eaux portuaires de Béjaïa.



**Figure IV.8:** Variation des concentrations en chrome dissous et particulaire des eaux du port de Béjaïa

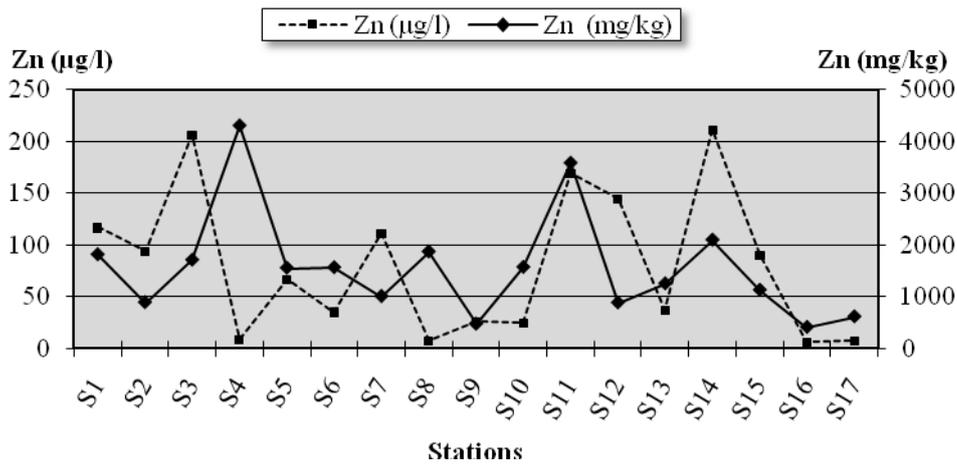
#### IV.2.4. Le Zinc

Les résultats obtenus montrent la présence du zinc particulaire à des teneurs considérables au niveau de toutes les stations, ces valeurs s'échelonnent entre un minimum de 408 mg/kg au niveau de la station 16 et un maximum de 4304 mg/kg au niveau de la station 04, pour une moyenne de 1570.47 mg/kg et un écart type de 1030.91 mg/kg traduisant une très forte variabilité des résultats. Toutefois, la station 09, se trouvant au milieu du bassin du vieux port, présente une concentration en zinc de 470 mg/kg proche de la minima, la station 11, soumise à des rejets de deux points, montre quant à elle, une concentration de 3583 mg/kg, proche de la maxima.

De la même manière que pour la phase dissoute, où des concentrations plus ou moins élevées caractérisent toute la surface échantillonnée, avec un minimum de 6.5 µg/l au niveau de la station 16 et un maximum de 210.75 µg/l au niveau de la station 14, avec une moyenne de 80.15 µg/l et un écart type de 70.05 µg/l qui indique une forte dispersion de la distribution du zinc dans la phase dissoute. Toutefois, la station 03 montre une concentration en zinc dissous de 205.75 µg/l assez proche de la valeur maximale, alors que les stations 04, 08 et 17 montrent des concentrations proches de la minima qui sont de 8.5, 8 et 7.5 µg/l respectivement.

A noter que la station 16 présente les concentrations en zinc les plus faibles dans les deux phases (particulaire et dissoute).

La figure suivante montre les variations des concentrations en zinc dissous et particulaire dans les eaux portuaires.



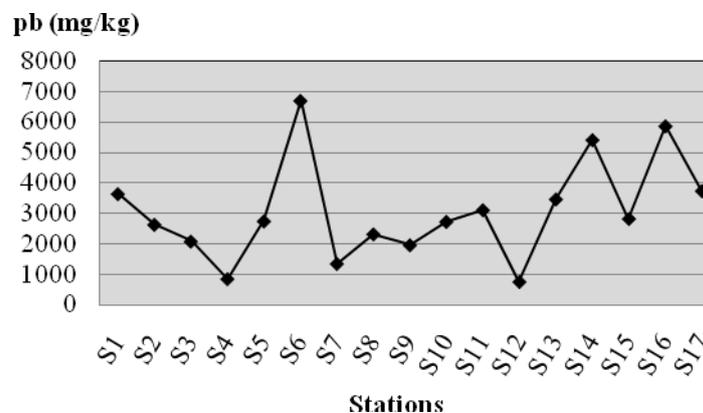
**Figure IV.9 :** Variation des concentrations en zinc dissous et particulaire dans les eaux portuaires

#### IV.2.5. Le Plomb

Le plomb, métal très toxique à de très faibles concentrations, a enregistré des teneurs très élevées dans la phase particulaire, traduisant une très grande contamination des trois bassins portuaires par ce métal. Les teneurs varient entre un minimum de 738 mg/kg à la station 12 et un maximum au niveau de la station 06 de 6700 mg/kg ; pour une moyenne de 3059.41 mg/kg et un écart type de 1661.25 mg/kg traduisant une très large variabilité des concentrations.

Quant au plomb dissous, toutes les valeurs enregistrées sont inférieures à la limite de détection, donc le plomb est absent au niveau de toute la surface échantillonnée.

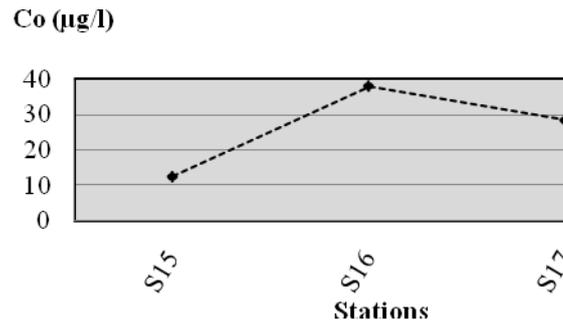
La figure ci-après illustre la variation des teneurs en plomb particulaire au niveau des trois bassins portuaires de Béjaïa.



**Figure IV.10 :** Variation des teneurs en plomb particulaire dans eaux du port de Béjaïa

#### IV.2.6. Le Cobalt

D'après les résultats obtenus, on constate que le cobalt présente des teneurs inférieures à la limite de détection; exception faite pour les stations se trouvant à l'extérieur des bassins portuaires 15, 16 et 17, où des concentrations respectivement de 12.5, 38 et 28.4  $\mu\text{g/l}$  ont été enregistrées mais cela dans la phase dissoute uniquement. Notons que la station 16 a enregistré la concentration maximale suivie de la station 17 et enfin, la station 15 qui a montré la teneur minimale, ce qui est montré dans la figure IV.11



**Figure IV.11:** Variation des teneurs en cobalt dissous dans les eaux du port de Béjaïa

#### IV.2.7. Le Cadmium

D'après l'analyse réalisée, le cadmium -considéré comme très dangereux- est absent dans toutes les stations et au niveau des deux phases (particulaire et dissoute) en fait, les teneurs en cadmium sont toutes inférieures à la limite de détection, ce qui témoigne de l'absence de ses sources génératrices dans les bassins portuaires.

#### IV.2.8. Profil du Cuivre

De la même manière que le cadmium, les concentrations en cuivre enregistrées sont toutes inférieures à la limite de détection, ce qui est traduit par des concentrations négatives et aléatoires ; l'absence du cuivre indique l'absence de ses sources génératrices.

### IV.3. Prédominance des métaux dissous et particuliers

Dans la phase particulaire, comme dans la phase dissoute, le fer est le métal le plus abondant, avec une prédominance de 62.48 %, suivi du chrome avec 22.01 %, du nickel avec 8.01 %, et seulement de 4.95 % pour le plomb et de 2.54 % pour le zinc. La distribution quantitative des teneurs en métaux dans les MES marines du port de Béjaïa donne l'ordre suivant: **Fe >> Cr >> Ni > Pb > Zn.**

Quant à la phase dissoute, le même ordre est observé sauf que le plomb est absent, le fer prédomine à 33.44 %, suivi du chrome avec 33.23 %, du nickel 23.54 %, et uniquement

de 7.37 % pour le zinc et de 2.42 % pour le cobalt. La distribution quantitative des teneurs en métaux dissous dans les eaux marines du port de Béjaïa suit l'ordre suivant: **Fe > Cr >> Ni > Zn > Co**.

Les figures suivantes représentent les prédominances des métaux dissous et particulaires dans les eaux de mer du port de Béjaïa.

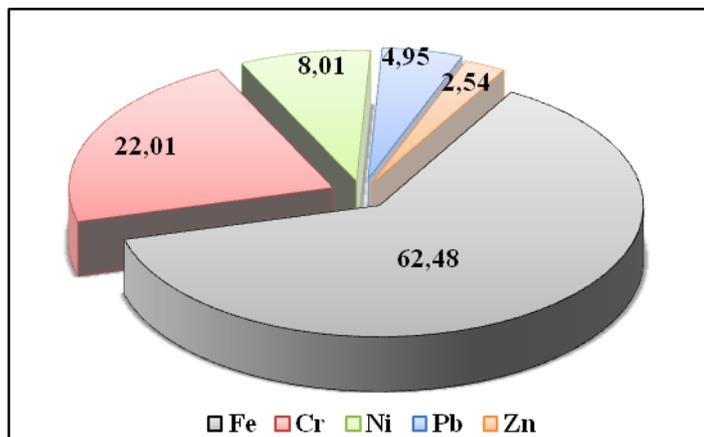


Figure IV. 12: Représentation des prédominances des micropolluants particulaires

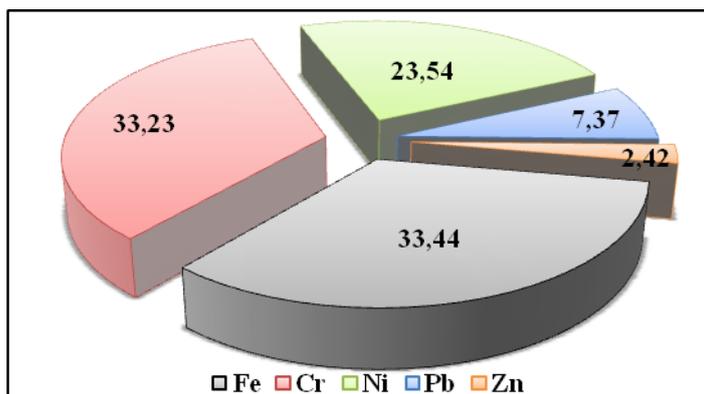


Figure IV.13 : Représentation des prédominances des micropolluants dissous

#### IV.4. Interprétation des teneurs en métaux dissous et particulaires

Les teneurs en métaux lourds obtenues (dissous et particulaires) dépassent généralement et de loin celles trouvées dans la littérature et celles naturellement présentes dans l'eau de mer (voir *annexe II*, tableau III), elles sont extrêmement élevées, ce qui n'est pas surprenant pour un milieu sujet à des hétérogénéités qui sont générées par diverses sources. Cette situation démontre l'existence d'une contamination chimique significative.

Les teneurs en éléments métalliques dans la phase particulaire dépassent largement celles dans la phase dissoute cela pour le Fe, Ni, Cr, Zn et Pb, d'ailleurs, ce dernier sous sa forme dissoute présente des teneurs inférieures à la limite de détection. Exception faite pour le

cobalt qui, au contraire, n'est détecté que sous forme dissoute mais uniquement au niveau des trois stations se trouvant à l'extérieur du port (15, 16 et 17).

L'élévation des teneurs en phase particulaire se justifie par le fait que les métaux sont apportés vers la mer soit sous forme particulaire (liées aux particules en suspension), ou encore que les MES déposées ont été remobilisées lors de la période de fortes pluies précédant le prélèvement, d'après Thévenot et Aumont (2006), si le pH augmente alors le pourcentage de fixation des cations augmente lui aussi, vu que les pH trouvés, dans le cadre de cette étude, s'approchent de l'alcalinité, alors cela a contribué à la fixation des métaux lourds sur le matériel particulaire.

Toutefois, comme déjà indiqué, le fer est le métal le plus abondant dans les deux phases, cela est dû au lessivage du territoire de la ville qui s'est produit lors des périodes de fortes pluies ayant eu lieu quelques jours avant le prélèvement (fin Octobre – début Novembre), entraînant le fer soit sous forme particulaire lié aux particules terrigènes, étant donné que le fer est parmi les métaux qui ont une importante affinité pour les particules, ou sous forme dissoute (dissolution par les eaux de pluie et entraînement en profondeur et dans les cours d'eau, par ruissellement). Ces valeurs abondantes du fer s'expliquent par la géologie de la région d'étude renfermant des formations principalement ferrugineuses (origine principalement lithogénique). En outre, ce métal peut avoir comme origine les eaux usées domestiques (canalisations corrodées du réseau d'assainissement) et industrielles (raffineries et industries de textile), également, les carburants, les pigments et peintures, la présence quasi-permanente de navires à l'intérieur des bassins portuaires possédant des coques métalliques rouillées qui relarguent du fer probablement sous forme dissoute, à cela s'ajoute les rejets de l'abattoir qui sont principalement riches en fer.

La station 04 présente la concentration maximale en fer particulaire (103104 mg/kg), cela peut être dû essentiellement aux travaux d'aménagement qui ont eu lieu dans cette zone du bassin de l'avant port, en apportant de grandes quantités de terre, aussi aux rejets domestiques ; alors que la station 16 montre la teneur maximale en fer dissous (625.3 µg/l), ce qui peut se justifier par la pollution apportée par les eaux de l'Oued Soummam, étant donné que la station 17 a montré une teneur proche du maximum (598.6 µg/l).

Plusieurs auteurs se sont confrontés à la même situation que la notre, où le fer est le métal qui prédomine le plus (Elmouden *et al.*, 2005 ; Beiras *et al.*, 2003 ; Charlotte *et al.*, 2003 ; Dassenakis *et al.*, 2003 ; Morillo *et al.*, 2002 ; Hornberger *et al.* 1999) ; Türkmen et Türkmen (2004), trouvent sur 15 échantillons prélevés mensuellement durant 12 mois (Aout 2001 – Juillet 2002), des teneurs en fer dans les MES (après digestion par HNO<sub>3</sub> concentré et

dosage par SAA de flamme) qui s'échelonnent entre 21894 et 55201 µg/g, ils expliquent ces teneurs élevées par les rejets des différentes installations industrielles se trouvant le long de la côte de leur site d'étude (Baie de d'Iskenderun ; Nord-est de la Méditerranée, Turquie) et entre 93 et 2405 µg/g rapportées par Rivaro *et al.* (1998) dans le bassin éolien au sud de la mer Tyrrhénienne en Méditerranée ; pendant que Morisson *et al.* (2001) In (Türkmen et Türkmen, 2004) enregistrent une valeur de 79200 µg/g dans la baie de Laucala (République des Fidji). Dans leur travaux, Rajkum et Persad (1994) trouvent, à l'Ouest de l'Inde, une concentration maximale en fer dissous de 1702.80 µg/l (après concentration sur résine et dosage par SAA de flamme) qui dépasse largement celle trouvée dans notre travail (625.3 µg/l) ; alors qu'une concentration maximale de 2910 ng/l en fer dissous est enregistrée par Munksgaard et Parry (2001) (après extraction par solvant l'APDC et analyse par ICP-MS) dans le port de Darwin (Nord de l'Australie), teneur extrêmement inférieure à la teneur maximale en fer enregistrée dans la présente étude.

Le chrome et le nickel, les métaux les plus abondants après le fer, montrent des teneurs assez élevées dans la phase dissoute et particulaire en comparaison avec la littérature, sachant que le nickel est considéré parmi les 33 substances et groupe de substances prioritaires (les plus recherchées) dans le cadre de la *Directive 2000/60/CE*<sup>1</sup>, *décision 2455/2001/CE*<sup>2</sup> (Marchand *et al.*, 2004).

Cette situation serait due aux rejets d'eaux usées (principalement industrielles) riches en chrome surtout l'industrie du textile, du céramique, de la verrerie et de la photographie et aux eaux usées domestiques du fait que, chez l'homme 80 % du chrome absorbé est éliminé par les fèces et surtout les urines (Rodier et Champsaur, 2005), le nickel peut avoir comme origine les rejets domestiques (riches en nickel), étant donné qu'il rentre dans la fabrication d'équipement de salle de bain, d'ustensiles de cuisine,.. etc. (Kantin et Pergent-Martini, 2007 ; Gouzy, 2006) et au fait que cet élément se trouve dans les moteurs, les hélices de navires, des pompes et de vannes.

On constate que le chrome dissous montre des concentrations inférieures à la limite de détection, au niveau des stations 06, 07, 08 et 09 du bassin du vieux port, ceci mène à dire que ce bassin n'est pas contaminé par ce métal ou, du moins, n'est pas assez affecté en comparaison aux bassins de l'avant et de l'arrière port, cela est expliqué par l'absence de

---

<sup>1</sup> *Directive 2000/60/CE* du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

<sup>2</sup> *Décision n° 2455/2001/CE* du Parlement européen et du Conseil du 20 novembre 2001 établissant la liste des substances prioritaires dans le domaine de l'eau et modifiant la directive 2000/60/CE.

sources potentielles génératrices de ce métal sous forme dissoute, ou encore, ce dernier est enlevé de la surface par adsorption sur les MES, ce qui explique son apparition dans ces mêmes stations sous forme particulaire.

Quant à la station 04, elle a enregistré la concentration maximale en nickel dissous et particulaire (2636,35 µg/l et 24138 mg/kg, respectivement) du fait de la présence de sources potentielles du nickel (probablement les eaux usées) au voisinage de cette station, qui se situe à proximité d'un point de rejet ; cette même station a montré également la teneur maximale en chrome dissous (1034.4 µg/l).

D'après Elmouden *et al.* (2005), ces éléments, chrome et nickel, sont généralement associés au réseau cristallin des aluminosilicates des sédiments et sont caractérisés par une faible mobilité et ils sont peu liés à la MO.

Dans leurs travaux, Türkmen et Türkmen (2004), trouvent des teneurs qui varient entre 262 – 1388 mg/kg et entre 261 – 915 mg/kg respectivement pour le chrome et le nickel, valeurs largement inférieures à celle trouvées dans la présente étude. Pareil pour Elmouden *et al.* (2005), où ils ont enregistré des concentrations de 37.9 mg/kg et 61.5 mg/kg pour le chrome et le nickel respectivement au niveau des MES (récupérées par décantation et dosage par ICP-MS) de l'estuaire fluvial d'Aït-Melloul (Maroc), interprétant ces teneurs par une origine lithogénique de ces métaux. Par contre, une valeur de 29 µg/g du nickel particulaire (Le Goff et Bonnomet, 2004) et entre 170 – 270 ng/l du nickel dissous (Kraepiel *et al.*, 1997 *In* Le Goff et Bonnomet, 2004) ont été trouvées dans le golf de Gascogne (Nord-Est de l'Atlantique) retenues comme des concentrations de référence. Alors que Muniz *et al.* (2004a), trouvent dans les sédiments prélevés au niveau de la baie de Montevideo (Uruguay), des concentrations en chrome allant de 68 à 1062 mg/kg (après digestion acide par l'HNO<sub>3</sub> et dosage par la SAA en four graphite), ces teneurs sont expliquées par les rejets non-traités des raffineries et des tanneries qui se jettent dans la baie sans aucun traitement. Des teneurs maximales en nickel dissous dans des échantillons d'eau de mer prélevés au niveau du port de Darwin et de la côte de Bing-Bong (Nord de l'Australie) de 329 ng/l et 187 ng/l respectivement ont été rapportées par Munksgaard et Parry (2001), ces valeurs sont extrêmement inférieures en comparaison à nos résultats.

Quant au zinc et au plomb, ils ne présentent pas de différences par rapport aux autres métaux, en fait, ils sont présents à des concentrations considérables dans la phase particulaire, sachant que le plomb est considéré parmi les 33 substances et groupe de substances prioritaires.

Cela laisse supposer que lors de la période pluvieuse précédant le prélèvement (fin octobre-début novembre), il y a eu un lessivage des sols, routes, toitures, chaussées, parkings, ...etc, qui a entraîné d'importantes quantités de particules chargées en métaux, en particulier, le zinc et le plomb, car d'après Nicolau (2005), ces deux métaux ont une affinité importante pour les particules. Un tel lessivage est à l'origine de la pollution la plus importante provenant des rejets urbains en temps de pluie ; en effet, il contribuerait pour 47 % de la charge totale en plomb contre 2 à 25 % pour le lessivage de l'atmosphère (Autugelle, 1996). D'après Rossi (2004), dans les rejets pluviaux, de nombreux composés se trouvent sous forme adsorbée sur les particules organiques ou minérales charriées par les eaux pluviales, c'est le cas particulièrement des métaux lourds (plus de 80 % sous forme adsorbée).

D'après Kafi-Benyahia (2006), le plomb est presque exclusivement associé aux MES donc peu mobile, le pourcentage de liaison est supérieur à 95% quelque soit le site et l'événement pluvieux, il est dit "*Réactif aux particules*" car ils s'associe rapidement avec la matière particulaire, tandis que le zinc est plus disponible car en partie présent sous forme dissoute, il semble être le métal le plus biodisponible dans les rejets urbains en temps de pluie, ce qui est en accord avec nos résultats.

D'après Gordon (2003) *In* Lestel, (2006), les lieux de stockage du zinc les plus courants sont :

- Automobile : 12 kg / voiture ;
- Habitat : 1 kg par m<sup>2</sup> de toiture ;
- Infrastructure: 500 g de zinc par m<sup>2</sup> d'acier galvanisé.

Ces concentrations élevées en plomb et en zinc peuvent être aussi dûes à la pollution atmosphérique (voir *annexe IV*) qui joue un rôle important dans les apports en métaux traces à la mer. Dans les zones côtières, une partie de ces apports se produit directement sur la surface de la mer, mais une grande partie se produit sur la surface des sols des bassins versants côtiers. Les contaminants déposés sont alors mobilisés par le ruissellement de surface pendant les pluies et transportés à la mer par les rivières, divers cours d'eau ou bien *via* les collecteurs d'eaux pluviales. Quand ces dépôts s'accumulent sur les sols pendant de longues périodes sèches, la première pluie peut alors transporter à la mer de fortes quantités de polluants en très peu de temps (Nicolau, 2005).

En plus des eaux de ruissellement en temps de pluie, ces fortes concentrations en plomb peuvent être imputables à des rejets d'eaux usées, particulièrement industrielles, notamment l'industrie de textile, usine de raffinage et de fonderies ; fabriques de ciment,

d'accumulateurs, de verre au plomb, de céramiques, de pigment au plomb, de câbles, les raffineries du sucre, les usines de papier, de peinture,...etc. Le zinc peut avoir pour origine les anodes utilisées pour la protection cathodique des coques de navires pouvant relarguer du zinc sous forme dissoute directement dans le port, ainsi qu'aux rejets domestiques riches en MO (produits du métabolisme humains : fèces et sueur, produits résultant de la vie quotidienne : nourriture, cosmétique et médicament, papier toilettes). En effet, de nombreuses études ont montré que ces éléments (zinc et plomb) sont préférentiellement liés à la fraction organique et aux oxydes de fer et de manganèse et qu'ils semblent souvent avoir une origine anthropique (Elmouden *et al.*, 2005), par conséquent, on peut les utiliser comme marqueur de pollution des eaux du port de Béjaïa.

Les teneurs en plomb dans la phase dissoute sont inférieures à la limite de détection, cela peut être lié au fait qu'il est rapidement enlevé de la surface par adsorption sur les MES (métal réactif aux particules).

La station 06 est la plus contaminée en plomb (6700 mg/kg), cela est du probablement, au fait qu'elle se situe au milieu de la passe Abdelkader où les bateaux de pêche y transitent souvent; contrairement à la station 12 se trouvant éloignée de toute zone de transition, qui a enregistré la teneur la plus faible en plomb (738 mg/kg).

La concentration maximale, quant au zinc particulaire, est détectée au niveau de la station 04 (4304 mg/kg), du fait qu'elle avoisine un point de rejet véhiculant des eaux usées et pluviales, pareil pour la station 11 où une concentration de 3583 mg/kg est relevée.

Par ailleurs, la station 14 enregistre la concentration la plus élevée en zinc dissous (210.75 µg/l), provenant probablement des installations industrielles se trouvant tout le long du nouveau quai, quant à la station 16, elle montre les concentrations les plus faibles en zinc dissous et particulaire, cela peut être expliqué par le fait qu'elle se situe loin de tout rejet ou que la pollution au zinc n'est pas transférée jusqu'à cette station.

Dans leur étude, Türkmen et Türkmen (2004), enregistrent une teneur maximale en plomb et en zinc dans les MES respectivement de  $783 \pm 110$  mg/kg et de  $1547 \pm 238$  mg/kg, quant à Morillo *et al.* (2002), ils enregistrent des teneurs maximales en plomb et zinc dans les sédiments du fleuve de l'Odiel (Espagne) (après digestion: HNO<sub>3</sub> et HClO<sub>4</sub> et dosage par la SAA de flamme) de 1080 et 3150 mg/kg respectivement, ayant une origine anthropique. Cependant, le PNUE (1996) donne la concentration en zinc à ne pas dépasser dans les eaux côtière, elle varie entre 0,20 - 210,0 µg/l.

Une concentration maximale en zinc dissous de 92.23 µg/l est rapportée par Rajkum et Persad (1994), teneur inférieure au résultat trouvé dans la présente étude (210.75 µg/l). Quant

à El-Hatimi *et al.* (2003), dans leurs travaux, ils apportent des concentrations en zinc et en plomb dans les sédiments (après extraction acide au métaborate et analyse par ICP-MS) de 1533 mg/kg et 610 mg/kg respectivement au niveau d'une canalisation débouchant dans le port de la baie de Tanger (Maroc), ils expliquent ces fortes teneurs par la présence d'atelier de fabrication de piles, de tanneries, ainsi qu'à la présence de raffineries de pétrole le long de leur site d'étude. Des concentrations de 69 – 103 µg/g du plomb ont été enregistrées dans les sédiments de la baie d'Izmir (Turquie) en 1997 (après digestion acide du sédiment : HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>-HCl et dosage par SAA à four graphite), ces teneurs ont été justifiées par l'effet de l'industrialisation (Kucuksezgin *et al.*, 2006), alors que Gavriil et Angelidis (2005) trouvent, dans leur étude au niveau de la baie de Kalloni (Sud-Ouest de l'île de Lesbos, Grèce), des concentrations en plomb particulaire (après digestions triacide HCl-HNO<sub>3</sub>-HF à haute pression et dosage par SAA à four graphite) allant de 348 à 551 µg/g, ils expliquent ces teneurs par un apport fluvial dans la baie et par les retombées atmosphériques en temps humide. Des teneurs en zinc et en plomb (après digestion des sédiments avec l' HNO<sub>3</sub> concentré et dosage par la SAA) de 312 ± 102 µg/g et de 85 ± 31 µg/g, respectivement, sont enregistrées par Muniz *et al.* (2004b), dans leur étude sur les sédiments prélevés au niveau du port de Montevideo (Uruguay), ces auteurs justifient ces valeurs par l'apport du zinc par les eaux domestiques et probablement par les précipitations qui ont eu lieu durant l'hiver ; et par la forte urbanisation (combustion des carburants, rejets urbains, trafic marin et les raffineries du pétrole) qui est à l'origine de l'introduction de quantités considérables du plomb dans le milieu marin.

Pour le cobalt, il n'est présent que sous forme dissoute et au niveau des trois stations se situant à l'extérieur du port (15, 16 et 17), ceci peut être dû aux eaux de l'Oued Soummam qui se jettent dans la mer, éventuellement riches en MO, étant donné que les quantités du cobalt adsorbé diminuent au profit du cobalt dissous quand la concentration en MO augmente (Bisson *et al.*, 2006b), et que le cobalt est transporté et dispersé dans la rade par les courants marins. Selon Gaudaire (1999), dans l'eau de mer le cobalt est à dominance cationique Co<sup>2+</sup> et CoCl<sup>+</sup>, néanmoins, ces formes cationiques peuvent être affectées par les entités présentes dans l'eau de mer (acides organiques, colloïdes) et par des processus tels que la complexation par les acides organiques et/ou la sorption à la surface des colloïdes, la conséquence de ces phénomènes est une évolution de la forme cationique du cobalt soluble vers une forme anionique difficilement détectable par les techniques de mesures généralement utilisées, ce qui fait qu'il n'est pas détecté dans le reste des stations sous sa forme dissoute. En outre, le

cobalt est préférentiellement adsorbé par les fractions de fine taille (< à 16 µm de diamètre) des matières solides en suspension ce qui explique en partie le résultat obtenu dans la phase particulaire.

Le cuivre et le cadmium sont présents à des concentrations inférieures à la limite de détection dans les deux phases (dissoute et particulaire), cela peut s'interpréter par le fait que l'activité industrielle implantée au niveau de la ville de Béjaïa ne génère pas le cadmium et le cuivre en grande quantités ; en outre et d'après la littérature, ces deux métaux proviennent essentiellement de l'activité agricole (produits phytosanitaires) et comme cette activité n'est pas assez présente au niveau de la ville de Béjaïa, cela peut éventuellement expliquer ces faibles teneurs, de ce fait, le cuivre et le cadmium sont les moins influencés par les activités humaines, dans le cadre de la présente étude.

Les travaux faits par Lewin (1976) *In* Biney *et al.* (1994), ont montré que l'eau du lac Nakuru au Kenya contenait 0,08 mg/l du cuivre ayant pour origine essentiellement les pesticides acheminés par ruissellement depuis les terres agricoles environnantes.

Néanmoins, les apports particulaires, sont moins problématiques ; après décantation, ces métaux viennent enrichir les couches superficielles du sédiment et constituer une source de pollution chronique qui sera donc davantage stockée dans les sédiments. L'équilibre avec l'eau sous-jacente et l'activité microbienne peuvent entraîner la remobilisation du métal, mais ce dernier ne sera diffusé que progressivement et posera donc moins de problèmes. A ce phénomène, peut s'ajouter la remise en suspension des sédiments provoquée par la bioturbation et les turbulences induites lors des orages (Nicolau, 2005). Ce qui peut provoquer une nouvelle contamination de la colonne d'eau, et un déplacement de la pollution plus en aval (Estebe, 1996). En ce sens, les MES et par suite les sédiments constituent une source potentielle de métaux, d'ailleurs Cossa *et al.* (1993), considèrent que les sédiments sont des puits géochimiques pour le plomb, de ce fait, ils sont utilisés comme enregistreurs de la chronologie de la contamination. Contrairement aux métaux particulaires, les apports en métaux dissous sont problématiques, du fait de la disponibilité importante de cette forme métallique, elles ont un impact direct sur les populations biologiques du milieu récepteur rendant ainsi cette forme plus chimiotoxique.

On dispose d'un certain nombre de données sur les concentrations en métaux traces dissous et particulaires dans les eaux de surfaces des océans, des mers et des cours d'eau. Le

tableau suivant présente une comparaison des résultats de la région étudiée et différentes régions du globe.

**Tableau IV.1** : Tableau comparatif des résultats des éléments métalliques entre la région d'étude (Port de Béjaïa) et différentes régions du globe.

Métaux	Présente étude *		Métaux particulaires (mg/kg)				Métaux dissous (µg/l)			
	Phase particulaire (mg/kg)	Phase dissoute (µg/l)	a	b	c	d	e (mg/l)	f	g	h (ng/l)
<b>Cd</b>	< LD	< LD	/	4.6 0	3.8	0.66	1.0- 4.0	1.13	< LD	11.0
<b>Pb</b>	738 - 6700 (3059,41)	< LD	/	87	51	/	1.0- 5.1	6.94	14.2	21.0
<b>Zn</b>	408 – 4304 (1570,47)	6,5- 210,75 (80.15)	62 - 1316	695	261	379	3.4-6. 2	92.23	194.7	498
<b>Cu</b>	< LD	< LD	22 - 500	92	73	/	2.2-1.3	1.13	244.0	521
<b>Cr</b>	1974 – 28210 (13590,35)	107,9- 1034,4 (361,23)	/	/	63	29.1	/	/	/	/
<b>Fe</b>	5189 – 103104 (38586,24)	29,87 - 625,3 (363,47)	1.08 – 6.67 %	/	23100	5.71 (mg/g)	6.9- 36.8	1702. 85	15.8	2910
<b>Ni</b>	27- 24138 (4964,82)	28,2- 2636,35 (255,90)	6 – 108	/	/	/	/	/	7.7	329
<b>Co</b>	< LD	12,5- 38 (26,30)	1.8 – 18.6	/	13	4.68	/	/	/	/

\*Valeurs entre parenthèses représentent les concentrations moyennes de la présente étude.

**a**: Valeurs minimales et maximales obtenues dans les MES de l'estuaire de Tanshui (Nord de Taïwan) (après minéralisation HCl à température ambiante et dosage par SAA à four graphite) (Fang et Lin, 2002).

**b**: Valeurs moyennes en métaux particulaires trouvées dans la rivière de Garonne (après digestion triacide : HCl, HNO<sub>3</sub> et HF et dosage par ICP-MS) (Masson *et al.*, 2006).

**c**: Teneurs totales en métaux traces dans les sédiments de l'étang du Rouillard (Verneuil, France) prélevés en février 2004 (suite à une minéralisation basée sur la fusion alcaline) (Moilleron *et al.*, 2004).

**d**: Concentrations en métaux rapportées par Hatje *et al.* (2003) au niveau des sédiments du Port Jackson (Australie) (métaux récupérés après extraction avec 0.05 M hydrochloride d'hydroxylamine dans 25% d'acide acétique (v/v) et dosage par ICP-MS).

**e**: Valeurs minimales et maximales des teneurs en métaux des eaux de mer du port d'Elizabeth (London) (après extraction APDC-MIBC et dosage par la SAA) (Fatoki et Mathabatha, 2001).

**f**: Teneurs maximales en éléments dissous dans les eaux de la côte Ouest de l'Inde (après concentration sur résine et dosage par SAA de flamme) (Rajkum et Persad, 1994).

**g**: Concentrations rapportées par Lee *et al.* (2008), dans l'eau de mer près de la ville de Masan (Corée du Sud) (métaux concentrés par filtration membranaire et dosés par ICP-MS).

**h**: Concentrations maximales enregistrés dans les eaux de mer du port de Darwin (Nord de l'Australie) (après extraction par solvant l'APDC et analyse par ICP-MS) (Munksgaard et Parry, 2001).

#### IV.5. Partition des métaux traces

Les variations des concentrations des métaux traces dans les bassins portuaires sont influencées aussi par bien les débits liquides que par la charge solide apportée par différentes sources (eaux pluviales, eaux usées industriels et domestiques et même les eaux de l'Oued Soummam).

Les niveaux apparents des éléments sont régulés par la distribution entre les phases solide et dissoute qui peut varier dans le temps et l'espace ; elle dépend des facteurs physico-chimiques de l'eau, des épisodes à forte pluviométrie qui mènent au transport de grandes quantités des MES sur lesquelles les métaux ont tendance à s'adsorber, même les variations saisonnières de la population en phytoplancton, sur lequel les métaux peuvent aussi s'adsorber, influent également sur la distribution des métaux.

La répartition des métaux est souvent représentée par le coefficient de distribution ou de partition ou encore coefficient de partage  $K_d$ , qui représente le rapport entre la concentration en élément adsorbé et la concentration à l'état dissous à l'équilibre. Il est généralement utilisé pour quantifier la sorption sur les sols, les sédiments ou les particules en suspension (Jeannot *et al.*, 2001), il est donné par la relation :

$$K_d = C_p / C_d \dots\dots\dots (1)$$

$C_p$  et  $C_d$  étant respectivement les concentrations des métaux dans la phase particulaire et dissoute; le  $K_d$  est exprimé en l/kg.

Dans le tableau ci-dessous, figurent les coefficients de partition  $K_d$  ( $\log K_d$ ) des différents métaux analysés, il est représenté à l'échelle du log, vu que les valeurs obtenues sont très élevées.

**Tableau IV.2 :** Coefficient de partition ( $K_d$ ) des métaux traces étudiés

Station	log $K_d$ Fe	Log $K_d$ Zn	log $K_d$ Ni	log $K_d$ Cr	MES (mg/l)
S <sub>1</sub>	4,96	4,19	4,78	4,41	46,5
S <sub>2</sub>	5,26	3,98	4,07	5,16	42
S <sub>3</sub>	5,28	3,92	4,16	3,62	39
S <sub>4</sub>	5,25	5,7	3,96	3,57	24
S <sub>5</sub>	5,19	4,37	4,96	4,42	36
S <sub>6</sub>	4,78	4,65	3,4	/	37,5
S <sub>7</sub>	5,06	3,96	4,13	/	35,5
S <sub>8</sub>	6,19	5,37	3,49	/	54,5
S <sub>9</sub>	5,16	4,26	5,55	/	45,5
S <sub>10</sub>	5,08	4,79	4,19	5,27	29
S <sub>11</sub>	5,89	4,33	4,73	4,42	59,5
S <sub>12</sub>	<b>4,08</b>	<b>3,79</b>	<b>2,84</b>	4,13	<b>221</b>
S <sub>13</sub>	4,62	4,53	3,76	4,9	50
S <sub>14</sub>	4,93	4	3,85	4,83	30,5
S <sub>15</sub>	4,96	4,1	2,83	5,23	37
S <sub>16</sub>	4,6	4,8	3,04	4,72	39,5
S <sub>17</sub>	4,52	4,91	3,38	5,09	60
<b>Moyenne</b>	<b>5,05</b>	<b>4,45</b>	<b>3,95</b>	<b>4,60</b>	<b>52,18</b>

Ces valeurs élevées du coefficient de partage ( $K_d$ ) témoignent d'une grande capacité des particules à piéger les métaux, cela est du probablement aux rejets (industriels et domestiques) chargés en MES, et aussi aux fortes pluies qui ont eu lieu avant le prélèvement. Ce phénomène traduit une diminution des concentrations des espèces dissoutes comparativement à celle des espèces particulières. La phase particulaire semble réagir plus lentement que la phase dissoute à la dilution (Nasseh et Texier, 2000).

On note d'après le tableau IV.2 que pour la valeur maximale des MES (221 mg/l), on enregistre les  $K_d$  les plus bas : de 4.08 pour le Fe ; 3.79 pour Zn et 2.84 pour le Ni. Cette tendance peut s'expliquer par une contribution plus importante de la phase colloïdale dont l'apparition est favorisée par les teneurs élevées en MES et qui tend à augmenter la concentration métallique totale dissoute (= dissoute vraie + dissoute colloïdale) (Dange, 2002).

Nasseh et Texier (2000) ont trouvé dans leur étude du comportement des métaux traces dans le bassin versant de l'Orne (France), les coefficients de distribution moyenne suivants : Cr = 4.8 ; Zn = 5.0 et Ni = 5.1, dans le même ordre de grandeur que les résultats de la présente étude, ce qui montre que les concentrations sont essentiellement liées à la matière particulaire.

A partir de la relation (1) (calculant le  $K_d$ ), la proportion de la concentration totale ( $C_{tot}$ ) d'un élément trace transporté sous forme dissoute, peut être exprimée en fonction du  $K_d$ . La concentration totale  $C_{tot}$  s'écrit :

$$C_{tot} = C_d + MES * C_p = C_d (1 + MES * K_d)$$

$$\frac{C_d}{C_{tot}} = \frac{1}{1 + MES * K_d}$$

et on déduit :

Ce rapport s'exprime en pourcentage (%).

En utilisant cette équation, on peut déterminer le pourcentage moyen de chaque métal transporté sous forme dissoute (voir tableau *annexe III* pour les valeurs détaillées), qui sont les suivant : 20,45 % du fer ; 46.65 % du zinc ; 66.72 % du nickel et 36.87 % du chrome, pour une teneur moyenne en MES de 52,18 mg/l ; ce qui sous entend que la proportion la plus élevée des métaux traces est transportée sous forme particulaire en se liant aux MO qui entrent fort probablement dans la composition des MES. Ce qui n'est pas le cas pour le nickel où 66.72 % sont transportés sous forme dissoute, cela est du probablement, au fait que cet élément est peu lié à la MO.

En conclusion, les concentrations en métaux sont beaucoup plus élevées dans la phase particulaire que dissoute, d'ailleurs, de nombreux auteurs (Garnier-Laplace *et al.*, 1996 ; Estebe, 1996 ; Chiffolleau *et al.*, 1999 ; Nasseh et Texier, 2000 ; Azetsu-Scott *et al.*, 2006 ; Rollin et Quiot , 2006), ont travaillé sur la répartition des métaux entre les deux phases, ils sont tous parvenus au même résultat: les métaux existent en milieu naturel essentiellement sous forme particulaire, par conséquent les MES ont été reconnues comme étant le principal vecteur de transport des polluants et peuvent être considérées comme « traceur » de la pollution urbaine. Toutefois, la capacité des particules à adsorber les éléments métalliques dépend principalement des conditions physico-chimiques (pH, force ionique, concentration de MOD, Potentiel Redox) dans lesquelles elles se trouvent et des concentrations des sédiments en suspension.

**Remarque :**

Les données de concentrations en métaux particulaires, de débits et de concentrations en MES nous permettent de calculer des flux journaliers de métaux se jetant dans le port. Ce calcul de flux se fait suivant la relation :

$$F_{Me} = [Me] * [MES] * Q * 24 * 3600 / 10^9$$

Où :  $F_{Me}$  représente le flux de métaux (kg/j) ;

[Me]: les concentrations en métaux particulaires (mg/kg de matière sèche) ;

[MES]: la concentration en MES (g/m<sup>3</sup>) ;

Q: le débit moyen journalier de chaque point de rejet dans le port (m<sup>3</sup>/s).

Les facteurs 24 et 3600 permettent le passage d'un débit en m<sup>3</sup>/s à un débit en m<sup>3</sup>/j. Le facteur 10<sup>9</sup> permet le passage à un flux en kg/j.

**IV.6. Application statistique**

L'étude des bassins portuaires du port de Béjaïa, telle que nous l'avons envisagée à travers des prélèvements en différentes stations, mesures physico-chimiques et dosage des métaux dissous et particulaires, conduit à l'obtention d'un ensemble complexe de données bidimensionnelles : variables (éléments chimiques), espace (points d'échantillonnage). Pour décomposer de telles données, deux stratégies ont été utilisées, se basant sur : (i) des représentations graphiques des données, (2) l'application de différents tests statistiques paramétriques (coefficient de corrélation et ANOVA). Ces différentes stratégies, loin d'être exclusives, sont au contraire souvent mises en œuvre de façon complémentaire.

Les données récoltées sont analysées à l'aide du logiciel *Excel 2007 (Microsoft Office de Windows)* et du logiciel *STATISTICA (Kernel version 5.5 A)*.

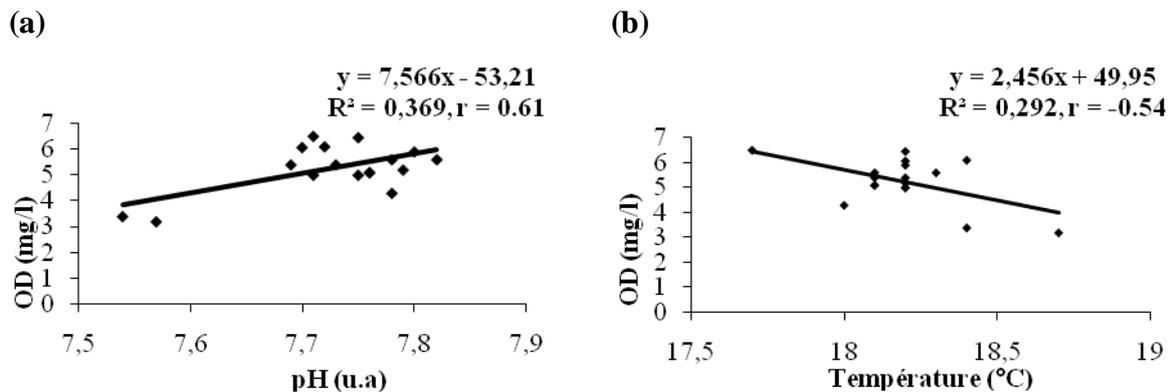
**IV.6.1. Corrélation inter-élémentaire**

Dans le but de pouvoir expliquer les relations que les paramètres physico-chimiques peuvent avoir les uns par rapport aux autres dans les échantillons d'eau de mer prélevés, des corrélations binaires sont réalisées.

Ces corrélations sont en effet, réalisées par le calcul du *Coefficient de corrélation* ou *coefficient de Pearson*, qui mesure la relation linéaire ("proportionnalité") entre les valeurs de deux variables. Proportionnel signifie lié linéairement ; ainsi la corrélation sera forte si les points s'alignent bien sur une droite, appelée droite de régression (de pente positive ou négative).

Pour les paramètres physico-chimiques mesurés, le couple **température - oxygène dissous** présente un coefficient de corrélation négatif ( $r = -0.54$  à  $p < 0.05$ ), ceci traduit le fait qu'ils évoluent de manière inverse; cela est dû d'après Villeneuve *et al.* (2006) et Rodier et Champsaur (2005), au fait que quand la température s'élève, la teneur en OD diminue en raison de sa plus faible solubilité. Villeneuve *et al.* (2006) trouvent dans leur étude un coefficient de corrélation de  $r = -0.95$  (à  $p < 0.001$ ). Anne (2004) trouve, quant à lui, un coefficient de corrélation proche de celui trouvé dans le présent travail ( $r = -0.59$ ) dans les eaux de Gêfosse, baie des Veys (Basse Normandie, France).

Le couple **OD – pH** présente un coefficient de corrélation de 0.61, ce qui signifie que ces deux paramètres évoluent dans le même sens. D'après Miserez (1974), qui a trouvé une corrélation entre OD et pH de 0.64 (à  $p < 0.05$ ), cette liaison s'explique par le fait qu'aux pH les plus basiques correspondent les plus faibles pressions en  $\text{CO}_2$  et les plus fortes en OD.



**Figure IV.14** : Co-variation (a) OD/pH et (b) Température/OD dans l'eau de mer

#### IV.6.2. Corrélation inter-métaux

L'analyse effectuée sur les données brutes des métaux vise l'existence de relations entre eux dans la fraction supérieure à  $0.45 \mu\text{m}$  et dans la fraction inférieure à  $0.45 \mu\text{m}$ . Les tableaux suivants, représentent les matrices de corrélation (réalisées à l'aide du logiciel *STATISTICA 5.5*) des éléments métalliques dans la phase particulaire et dissoute, respectivement.

**Tableau IV.3** : Matrice de corrélation des métaux particulaires ( $p < 0.05$ )

	Fe <sub>MES</sub>	Ni <sub>MES</sub>	Pb <sub>MES</sub>	Zn <sub>MES</sub>	Cr <sub>MES</sub>
Fe <sub>MES</sub>	1,00				
Ni <sub>MES</sub>	<b>0,78</b>	1,00			
Pb <sub>MES</sub>	-0,40	-0,35	1,00		
Zn <sub>MES</sub>	<b>0,62</b>	0,39	-0,18	1,00	
Cr <sub>MES</sub>	-0,25	-0,36	0,39	-0,28	1,00

Comme il est montré dans le tableau IV.3, les couples *Fe – Ni* et *Fe – Zn*, se distribuent relativement bien. Ceci mentionne simplement le fait que ces métaux ont, probablement une source de contamination commune, comme la corrosion des surfaces métalliques de toitures ou gouttières par les eaux de pluie ; ou que ces métaux pourraient être transportés sur les mêmes particules ou par des particules ayant la même origine ; ou bien qu'ils résultent des mêmes activités portuaires et des mêmes rejets domestiques et surtout industrielles qui peuvent rejeter cet ensemble des métaux. En effet, le couple *Fe – Ni* représente le coefficient de corrélation ( $r = 0.78$ ) le plus élevé par rapport au couple *Fe – Zn* (0.62), cela signifie que ces deux éléments sont gouvernés par des facteurs (chimiques, géochimiques, anthropiques et / ou physiques) qui agissent d'une manière sélective en favorisant l'évolution de l'un par rapport à l'autre.

Ces corrélations n'ont pas été observées dans la phase dissoute, ceci peut s'interpréter par le fait que même si ces éléments (Fe, Ni, Zn) ont une origine commune, probablement leur évolutions diffère une fois arrivés en mer.

Les figures ci-après illustrent les Co-variations des métaux dans les MES.

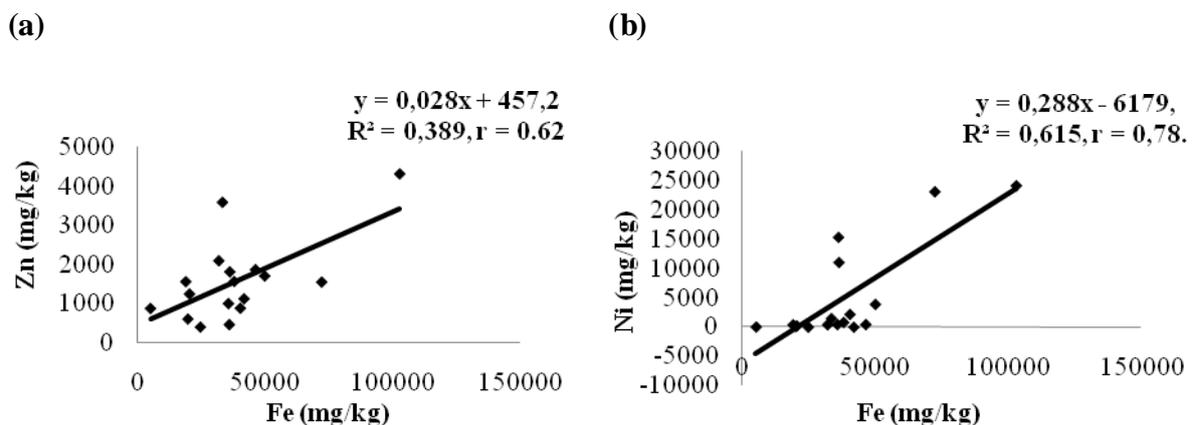


Figure IV.15: Co-variation (a) : fer/zinc, (b) : fer/nickel dans les MES

Les corrélations non significatives constatées entre tous les autres couples de métaux laisseraient apparaître que ces éléments évoluent indépendamment les uns par rapport aux autres et ayant probablement des apports et des sources non régulières.

Farias *et al.*(2007), trouvent dans leur travaux (dans les sédiments de la baie de Guanabara, Rio de Janeiro, Brésil) , un coefficient de corrélation de 0.66 pour le couple *Fe – Ni*, également, Monteiro et Roychoudhury (2005), trouvent une telle corrélation *Fe – Ni* et *Fe – Zn* de 0.87 et 0.85 respectivement (dans les sédiment de la baie de Saint Helena, Afrique du sud) ; Nicolau (2005), trouve dans son études des eaux de pluies un coefficient de

corrélation de 0.80 pour le couple *Fe – Ni*, par contre Gavriil et Angelidis (2005) trouve dans leur étude, un coefficient de corrélation pour le couple *Fe- Ni* de 0.49 (à  $p < 0.01$ ) inférieur à celui trouvé dans notre cas.

Quant aux métaux dissous nous avons alors la matrice de corrélation suivante :

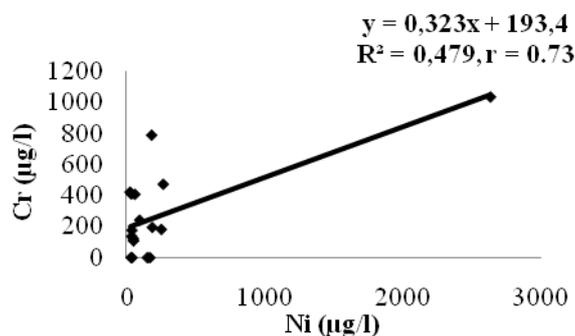
**Tableau IV.4:** Matrice de corrélation des métaux dissous ( $p < 0.05$ )

	Fe <sub>diss</sub>	Ni <sub>diss</sub>	Zn <sub>diss</sub>	Cr <sub>diss</sub>
Fe <sub>diss</sub>	1.00			
Ni <sub>diss</sub>	0.30	1.00		
Zn <sub>diss</sub>	-0.32	-0.24	1.00	
Cr <sub>diss</sub>	0.26	<b>0.73</b>	0.19	1.00

L'étude statistique concernant les métaux dissous ne permet pas de mettre en évidence de relations systématiques entre les teneurs observées pour chaque métal, à l'exception du couple *Ni – Cr* qui montre un coefficient de corrélation relativement élevé ( $r = 0.73$ ), ceci pour de multiples raisons : origine naturelle commune, voies de transport identiques et surtout origines anthropiques partagées, d'ailleurs d'après Rodier et Champsaur (2005), dans les pollutions d'origine industrielle, on retrouve le nickel généralement associé au mercure, aux cyanures, à l'arsenic et également au chrome.

On n'observe pas une telle corrélation dans la phase particulaire du fait que, probablement sous forme particulaire, le nickel et le chrome ont une évolution différente.

La figure ci-après illustre la Co-variations du chrome – nickel dans la fraction dissoute.



**Figure IV.16:** Co-variation du Chrome dissous / nickel dissous dans les eaux portuaires de Béjaïa.

Une telle corrélation a été trouvée par Defossez *et al.* (1967) dans le fleuve de Bandama (côte d'Ivoire) avec un coefficient de corrélation  $r = 0.86$ .

# *Conclusion générale*

## CONCLUSION GENERALE

L'étude des eaux portuaires d'un port tel que celui de Béjaïa est très importante étant donné que le port de Béjaïa est certifié aux normes *ISO 9001* et *ISO 14001*, qui visent par des exigences à respecter la maîtrise des processus et l'efficacité et intègrent l'amélioration des performances environnementales.

La quasi-totalité des apports chimiques dans la ville de Béjaïa, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique, finit par se retrouver dans les eaux de mer. Du fait de sa position de réceptacle d'eaux drainant des surfaces fortement urbanisées et industrialisées et d'eaux usées, le port de Béjaïa est le siège d'une contamination importante par certains éléments métalliques, dont le plomb et le nickel faisant partie des métaux les plus toxiques.

L'objectif de ce travail est de contribuer à l'évaluation du degré de la pollution inorganique des trois bassins du port de Béjaïa par dosage de huit éléments métalliques (Fe, Zn, Pb, Cu, Ni, Cr, Co et Cd) réputés dangereux pour les organismes vivants y compris l'homme si leur concentration dépasse un certain seuil. En parallèle, des paramètres d'accompagnement ont été mesurés afin de caractériser les eaux (température, pH, oxygène dissous, conductivité et turbidité), ces paramètres peuvent indiquer, eux aussi un certain degré de pollution.

Pour déterminer les concentrations en éléments métalliques étudiés, les échantillons prélevés ont été traités et analysés par spectrophotométrie d'absorption atomique en mode flamme (SAA) avec correction du bruit de fond par la lampe à deutérium.

Des résultats obtenus, se dégagent les éléments suivants :

- Les mesures préliminaires de température, pH, oxygène dissous, conductivité et turbidité montrent que le port de Béjaïa est un milieu qui évolue suivant les rejets qui s'y jettent, en d'autres termes il est sous l'influence des activités anthropiques ; les conditions météorologiques ont également leur propre rôle dans l'état des eaux portuaires.
- Une contamination des eaux portuaires par des teneurs assez élevées en éléments métalliques, particulièrement les métaux toxiques (le plomb et le nickel) ; ces

concentrations varient dans une large gamme ; ces hétérogénéités mettent en jeu différentes sources de contamination ;

- Dans les échantillons d'eau de mer analysés, les éléments métalliques se trouvent essentiellement sous forme particulaire, par conséquent les MES (fraction supérieure à 0.45  $\mu\text{m}$ ) sont le principal vecteur de pollution ;
- Les MES qui rejoignent après décantation les sédiments, constituent un danger, non seulement pour les organismes benthiques vivant directement en contact du sédiment, mais également pour les espèces pélagiques à cause du relargage potentiel de contaminants dans la colonne d'eau, autrement dit, les sédiments du port de Béjaïa joueraient le rôle de piège pour les métaux ; mais ce piège est temporaire et risque de se transformer en source de métaux polluants si les conditions physico-chimiques du milieu changent. C'est le principe de " *Chemical Time Bomb*" préconisé par Stigliani *et al.* (1995) In Elmouden *et al.* (2005).
- Les eaux portuaires ne présentent pas de pollution considérable en terme du cadmium (métal très toxique), cuivre et cobalt ; ainsi qu'en zinc et en plomb dissous ;
- Les stations se trouvant à l'extérieur des bassins portuaires présentent une contamination assez élevée tout comme les stations à l'intérieur du port, ce qui suggère que les courants marins peuvent être à l'origine du transfert de la pollution et que l'Oued Soummam constitue une source potentielle de la pollution des eaux du port ; par conséquent, d'autres points de prélèvement, peuvent être rajouté au niveau de l'embouchure (communication avec la mer) et au sein de l'Oued Soummam ;
- Les conditions climatiques et météorologiques semblent expliquer, en partie, ces concentrations élevées en métaux lourds dans les phases dissoute et particulaire ;
- En outre, l'analyse des éléments métalliques dans l'eau de mer du port de Béjaïa, nous a permis d'établir une classification probable des métaux suivant la pollution :
  - Métaux sans contaminations notables : Cd, Cu et Co ;
  - Métaux sensibles aux activités humaines : Ni, Cr ;
  - Métaux apportés principalement par les eaux pluviales par ruissellement: Fe, Zn et Pb.
- Les coefficients de corrélation inter-métaux montrent que la majorité des éléments traces étudiés ne présentent pas de relation d'interdépendance, ce qui signifie que leurs apports sont perturbés et leurs origines sont différentes.

Ces différentes constatations permettent de souligner, non seulement l'urgence de devoir trouver des solutions diminuant les rejets polluants en port, mais aussi la nécessité d'une approche globale de l'assainissement prenant en compte toutes les composantes écologiques du milieu récepteur.

Le passage en revue de ces différentes conclusions montre qu'il reste beaucoup à faire. La préservation du patrimoine portuaire et de son système écologique reste tributaire des mesures d'urgence à entreprendre par les pouvoirs publics. Ce patrimoine côtier mérite une mobilisation des efforts, afin de le sauvegarder et de le préserver de toute détérioration.

A partir de ces conclusions de nouvelles perspectives de recherche sont apparues :

- Ce travail pilote du monitoring de l'état de pollution du port de Béjaïa a pour suite logique son extension à l'ensemble du littoral de la wilaya et à d'autres contaminants chimiques en utilisant des techniques telles que ICP-MS, SAA à four graphite,...etc. Ceci permet à terme de réaliser une base de données obtenue suivant des méthodes normalisées, telles celles requises par les conventions européennes (OSPAR, Barcelone,...etc.) et qui pourront servir de références aux surveillances futures ;
- Une étude plus exhaustive sur les niveaux de contamination en métaux traces dans d'autres compartiments incluant les organismes marins et les sédiments devrait permettre de mieux comprendre leur cycle géochimique et l'évolution du sédiment dans le temps et dans l'espace. Ainsi, nous pourrions mieux nous renseigner sur les apports, leur importance et leurs conditions ;
- L'analyse des teneurs en métaux traces dans l'atmosphère et dans les eaux pluviales paraît nécessaire vu l'importance des apports atmosphériques et des rejets urbains en temps de pluie par rapport aux autres sources.
- Enfin, le dernier point qu'il nous semblerait important d'aborder concerne le devenir des sédiments du port lorsque des dragages sont entrepris afin de limiter l'envasement des bassins portuaires. Nous avons vu que les sédiments contaminés sont susceptibles d'être une source potentielle de micropolluants. Mais que deviennent-ils lorsque ces dragages sont réalisés et les boues mis en carrières ou en dépôts ?

Tout ceci doit, finalement, permettre de répondre aux différentes exigences réglementaires relatives à la qualité des milieux aquatiques de manière à contribuer à l'élaboration de politiques rationnelles de gestion durable des ressources aquatiques du milieu marin.

*Références  
bibliographiques*

## Références bibliographiques

- **Adam C., Garnier G et Roussel - Debet S. 2005.** Fiche radionucléide : cobalt 60 et environnement. Direction de l'environnement et de l'intervention-service d'étude du comportement des radionucléides dans les écosystèmes, IRSN.
- **Adamo P., Arienzo m., Imp erato M., Naimo D.,Nardi G et Stanzione D. 2005.** Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port. *Chemosphere* (61): 800–809
- **AEAP, 2003.** Guide Technique - *Quand les toxiques se jettent à l'eau...*, 112p.
- **AEAP. 2000.** Agence de l'eau. Artois Picardie. Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués, 126 p. Disponible sur : <http://eau-artois-picardie.fr/IMG/pdf/gestionsédiments.pdf>. Consulté le 25/12/06.
- **Alvarez C et Bouye F. 2006.** Détermination de concentrations prédites sans effet pour les organismes aquatiques (PNEC aqua) pour les substances de la liste II de la directive 76/464/CEE-substances traitées en 2005. Partie II : substances inorganiques (23substances). Rapport d'étude N°06CR014.doc. réf. : INERIS-DRC-66026-06CR014, 129 p.
- **Alzieu C., Michel P., Chiffolleau J.F., Boutier B et Abarnou A. 1999.** Contamination chimique des sédiments. In « Dragages et environnement marin : états de connaissances » Éd. *Ifremer*, pp 69-107.
- **Aminot et kérouel. 2004.** Mesure de la concentration en oxygène dissous. In « Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et mesures », p 92-118.
- **Anne D. 2004.** Réseau Hydrologique Littoral Normand : Cycles annuels 2001-2003 et proposition d'indicateurs d'eutrophisation. *Rapport Ifremer RST.DEL/04.09/PB*, 108 p.
- **Anonyme. 1997.** Technical Evaluation: Water Quality and Biological Effects. Revised final report. EVS Environment Consultants. EVS Project N°. **3/729-02**. Assessment (BERA). *Appendix A2: Baseline Problem Formulation. Volume II – Appendices*, 284 p.
- **Armstrong R., Cobb D., Eamer J., Gilbert S., Gregor D., Halliwell D., Hughson P., Knight T McDonald I., Pacholek P., Racher K., Seale L., Tate D., Truelson B., Whitfield P et Whitley G. 2005.** Evaluation de la qualité de l'eau. In « Eaux du Nord : Un guide pour concevoir et mener des observations sur la qualité de l'eau dans le nord du Canada ». Éd. *Réseau d'évaluation et de surveillance écologiques du Nord (RÉSÉ-Nord)*, 3-1/3-22p.

- **Audren C et Nguyen D. 2005.** Analyse de quelques polluants de l'eau de la Seine De Poses à l'Estuaire. Institut National des Sciences appliqués, Rouen, 29p.
- **Autugelle C. 1996.** Les eaux : le plomb dans les eaux pluviales. In « Aspect analytique du plomb dans l'environnement » Ed. Tec & Doc, 151- 169 p.
- **Azetsu-Scott K., Yeats P., Wohlgeschaffen G., Dalziel J., Niven S et Lee K. 2006.** Precipitation of heavy metals in produced water: Influence on contaminant transport and toxicity. *Marine Environmental Research* (2006), doi:10.1016/j.marenvres.2006.08.001 (article In press).
- **Baan P. J. A et Groeneveld G. J. J. 2002.** Testing of indicators for the marine and coastal environment in Europe. Part 2: Hazardous substances. Ed. *European Environment Agency*.
- **Beiras R., Bellas J., Fernandez N., Lorenzo J.I et Cobelo-Garcia. A. 2003.** Assessment of coastal marine pollution in Galicia (NW Iberian Peninsula); metal concentrations in seawater, sediments and mussels (*Mytilus galloprovincialis*) versus embryo-larval bioassays using *Paracentrotus lividus* and *Ciona intestinalis*. *Marine Environmental Research* (56) : 531-553.
- **Bellan G et Pérès J.M. 1979.** La pollution des mers, « Que sais-je », 2<sup>ème</sup> Ed. Presses universitaires de France, 127 p.
- **Bergquist B. A et Boyle E. A. 2006.** Dissolved iron in the tropical and subtropical Atlantic Ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, 20, GB1015, doi:10.1029/2005GB002505.
- **Bétier G., Royer L., Laffitte R et Deleau P. 1960.** Feuille publiée en 1960 par le service de la carte géologique de l'Algérie.
- **Biney C., Amuzu A.T., Calamari D., Kaba N., Mbome LL., Naeve H., Ochumba O., Osibanjo O., Radeconde V et Saad M.A.H. 1994.** Etude des métaux lourds. In « Revue de la pollution dans l'environnement aquatique africain. Document Technique du CPCA. No. 25. Rome, FAO. 1994. 136 p.
- **Bisson M., Diderich R., Houeix N., Hulot C., Lacroix G., Lefevre J.P., Leveque S., Magaud H., Morin A., Pepin G et Pichard A. 2005b.** Cadmium et ses dérivés. *INERIS –DRC-01-25590-00DF249.doc Version N°2-3-février 05*. INERIS - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, 60 p.
- **Bisson M., Diderich R., Houeix N., Hulot C., Lacroix G., Lefevre J.P., Leveque S., Magaud H., Pichard A., Morin A., Rose M et Pepin G. 2005c.** Chrome et ses dérivés. *INERIS –DRC-01-05590-00DF253.doc, Version N°2-4-février 05*. I N E R I S - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, 80 p.

- **Bisson M., Diderich R., Hulot C., Houeix N., Lacroix G., Lefevre J.P., Leveque S., Magaud H et Morin A. 2006a.** Zinc et ses dérivés. *INERIS –DRC-01-25590-00DF259.doc Version N°2-2mars 2005*. INERIS - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, 69 p.
- **Bisson M., Gay G., Houeix N., Lacroix G., Lefevre J.P., Magaud H., Migne V., Morin A et Tissot S. 2006b.** Cobalt et ses dérivés. *INERIS –DRC-02-25590-02DF55.doc, Version N°2-1avril 2006*. INERIS - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, 55 p.
- **Bisson M., Houeix N., Gay G., Lacroix G., Lefevre J.P., Magaud H., Migne V., Morin A et Tissot S. 2005a.** Cuivre et dérivés. *INERIS –DRC-02-25590-02DF54.doc Version N°1-5-février 05i*. INERIS - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, 66 p.
- **Bisson M., Hulot C., Lacroix G., Lefèvre J.P., Magaud H., Oberson D., Geneste., Morin A et Pépin G. 2003.** Plomb et ses dérivés. *ERIS-DRC-01-25590-ETSC-APi/SD –N°00df257. Version N°2-1/2003.* . INERIS - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, 90 p.
- **Boutonnet F. 2000.** Étude des métaux lourds dans l'air ambiant en région centre. Réseau de surveillance de la qualité de l'air de la région du Centre, pp 5.
- **Bréchnac F et Deville-Cavelin G. 2002.** Fiche radionucléide : Fer 59 et environnement. Direction de l'environnement et de l'intervention-service d'étude du comportement des radionucléides dans les écosystèmes, IRSN, 14 p.
- **Brugneaux S., Pierret L et Mazataud V. 2004.** Les agressions d'origine anthropiques sur le milieu marin côtier et leurs effets sur les écosystèmes coralliens et associés de la Martinique. L'observation du milieu marin Martinique, 97 p.
- **Cabane F. 2006.** Lexique d'écologie, d'environnement et d'aménagement du littoral. Ifremer R.INT.Doc/EL 06-03, version 8, 265 p.
- **Calamari D et Naeve H. 1994.** Revue de la pollution dans l'environnement aquatique africain. Document Technique du CPCA. No. 25. Rome, FAO. 1994. 129 p.
- **CEAEQ. 2006a.** Détermination du pH : méthode électrométrique. MA 100-pH1.1, Rév. 1, Ministère du développement durable, de l'environnement et du parc de Québec, 12 p.
- **CEAEQ. 2006b.** Détermination de la conductivité dans les effluents ; méthode néphélométrique. MA115-Cond. 1.0, Rév. 3, Ministère de l'Environnement du Québec, 9 p.
- **Charlotte B. Braungardt C.B., Achterberg E.P., Elbaz-Poulichet F et Morley N.H. 2003.** Metal geochemistry in a mine-polluted estuarine system in Spain. *Applied Geochemistry* (18): 1757–1771.

- **Chiffoleau J.F., 1994.** Le chrome en milieu marin. Reperes Océan N° 8 – 1994. Ed. Ifremer, 49 p.
- **Chiffoleau J.F., Claisse D, Cossa D, Ficht A, Gonzalez J.L, Guyot T, Michel P, Miramand P, Oger C et Petit F. 2001.** La contamination métallique. La contamination métallique, Programme scientifique Seine-Aval: 39 p.
- **Chiffoleau J.F., Auger D et Emanuelle C. 2002.** Dosage de certains métaux traces (Cd, Co, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) dissous dans l'eau de mer par absorption atomique après extraction liquide – liquide. Ed. Ifremer, 39 p.
- **Chiffoleau J.F., Gonzalez J.L., Miramand P et Thouvenin B. 1999.** Le cadmium : comportement d'un contaminant métallique en estuaire. Ed. Ifremer, 32 p.
- **Choueiri J. 2000.** Synthèse bibliographique : procédures et techniques de dépollution du cadmium dans l'industrie. Ecole Nationale de Génie Rurale, des Eaux et des Forêts, ENGREF, 9 p.
- **Chouteau C. 2004.** Développement d'un biomarqueur conductimétrique bi-enzymatique à cellule algale. *Thèse de doctorat* Univ. Claud Bernard, Lyon1. 180 p.
- **Cossa D., Elbaz-Poulichet F., Gnassia-Barelli M et Romeo, M. 1993.** Le plomb en milieu marin : biogéochimie et écotoxicologie. Ed. Ifremer, Brest, France (3), 77 p.
- **Dange C. 2002.** Etude du comportement des éléments traces en milieu estuarien : approche expérimentale et modélisation : Application à l'étude de la spéciation de Cd, Co et Cs dans les estuaires majeurs français (Seine, Loire, Gironde, Rhône). *Thèse de doctorat*, Univ. Reims Champagne- Ardenne, 502 p.
- **Dassenakis M., Andrianos H., Depiazi G., Konstantas A., Karabela M., Sakellari A et Scoullou M. 2003.** The use of various methods for the study of metal pollution in marine sediments, the case of Euvoikos Gulf, Greece. *Applied Geochemistry* (18) : 781–794.
- **Debieche T.H. 2002.** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. *Thèse de doctorat*, Univ. Franche-Comte, 235 p.
- **Dechelette M et Palvadeau S. 2004.** Mise en place d'une campagne de prélèvement: Projet ECODYN. Univ de Toulon & du Var. Faculté des sciences et techniques. Maîtrise de chimie : Laboratoire PROTEE, 32 p.
- **Defosse M., Mangin J., Pinta M et Van Den Driessche R. 1967.** Répartition de quelques éléments traces dans les eaux de surface en zone intertropicale (côte d'Ivoire). *null. Seru. Carte géol. Als. Lorr.*, 20, 4, p. 257-276, Strasbourg.

- **Derradji F., Kherici N., Caruba R et Romeo M. 2003.** Evaluation de la pollution chimique par le zinc et le fer de la nappe profonde des graviers d'Annaba. *Cahiers d'Association Scientifique Européenne pour l'Eau et la Santé*. Paris, France. (8) : 35-42.
- **Derradji F., Kherici N., Djorfi S., Romeo M et Caruba R. 2005.** Etude de l'influence de la pollution de l'oued Seybouse sur l'aquifère d'Annaba (Algérie Nord-orientale) par le chrome et le cuivre. Nappes souterraines, *La Houille Blanche/N° 1-2005I*, 8 p.
- **Desbordes A. 2000.** Pollutions des eaux souterraines en Picardie. *Mémoire Maîtrise BG, Fac. Sciences, Amiens*, 50 p. + annexes.
- **DHW. 2006.** Etude d'exécution d'un collecteur principal d'assainissement et d'une station de relevage à Béjaïa : Note de calcul.
- **Di Benedetto M. 1997.** Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation : Dossier SAM 1997 : Les métaux lourds. Axe " Génie des Procédés", centre SPIN, Ecole des Mines de Saint-Etienne, 49 p.
- **Direction de la planification et de l'Aménagement du Territoire. 2006.** Annuaire statistique 2006 de la Wilaya de Béjaïa. Ed.2005.
- **El-Hatimi I., Achab M et El-Moumni B.2002.** Impact des émissaires et canalisation sur l'environnement de la baie de Tanger (Maroc) : approche géochimique. *Bulletin de l'Institut scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre, n° 24, 49-58.
- **Elmouden A., Bouchaou L., Snoussi M et Wildi W. 2005.** Comportement des métaux et fonctionnement d'un estuaire en zone subaride : cas de l'estuaire du Souss (cote atlantique marocaine). *Estudios Geol.*, (61):25-31.
- **Emblanch C., Marc V., Daniel M et Simler R. 2004.** TP chimie. DESS Hydrogéologie et Environnement, 19 p.
- **Encarta ® 2008.** © 1993-2007 Microsoft Corporation.
- **Entreprise Portuaire de Béjaïa, 2006.** Les infrastructures du port de Béjaïa, 9 p.
- **Estebe, A. 1996.** Impact de l'agglomération parésienne et de ses rejets de temps de pluie sur les concentrations en métaux des matières en suspensions et des sédiments en Sein en période estivale. *Thèse de doctorat*. Univ. Paris XII-Val de Marne, 240 p.
- **Fang T.H et Lin C.L. 2002.** Dissolved and Particulate Trace Metals and Their Partitioning in a Hypoxic Estuary: The Tanshui Estuary in Northern Taiwan. *Estuaries.*, (25): 598-607.

- **Farias C.A., Hamacher C., R. Wagener A.L.R., De Campos R.C et Godoy J.M. 2007.** Trace Metal Contamination in Mangrove Sediments, Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. *J. Braz. Chem. Soc.*, (18): 1194-1206.
- **Fatoki O et Mathabatha S. 2001.** An assessment of heavy metal pollution in the East London and Port Elizabeth harbours. ISSN 0378-4738. *Water SA* (27) : 233 – 240.
- **Fernandes S. 2007.** Communication personnelle.
- **Fillon A. 2006.** Résultats de la Surveillance de la Qualité du Milieu Marin Littoral. Ifremer/RST. Ifremer, Laboratoire Environnement Ressources des Pertuis Charentais, 74 p.
- **FOGEM.2005.** du site : [http : //www. Languedoc.roussillon.ecologie.gouv.fr](http://www.Languedoc.roussillon.ecologie.gouv.fr). Consulté le : 02/02/2008.
- **Fowler S.W., Huynh-Ngoc L et Fukai R. 1983.** Dissolved and particulate trace metals in coastal waters of the Gulf and Western Arabian SEA. *International Laboratory of Marine Radioactivity*, IAEA.
- **Garnier C. 2004.** Modélisation et évaluation des équilibres de Complexation entre la matière organique naturelle, les métaux traces et le proton. Applications aux eaux naturelles. *Thèse de doctorat*. Univ. Sud Toulon var, 206 p.
- **Garnier-Laplace J., Fournier-Bidoz V et Baudin J.P. 1996.** État des connaissances sur les échanges entre l'eau, les matières en suspension et les sédiments des principaux radionucléides rejetés en eau douce par les centrales nucléaires. *Radioprotection 1997*. Vol. 32, no 1, pages 49 à 71.
- **Gaudaire J.M. 1999.** Etude de la spéciation du <sup>60</sup>Co dans les effluents de l'usine de retraitement de combustibles irradiés de la Hague ; devenir après rejet dans les eaux de la Manche. *Thèse de doctorat*. Univ. Paris XI Orsay, 151 p.
- **Gavriil A.M et Angelidis M.O. 2005.** Metal and organic carbon distribution in water column of a shallow enclosed Bay at the Aegean Sea Archipelago: Kalloni Bay, island of Lesbos, Greece. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (64) : 200-210.
- **Geffard O. 2001.** Toxicité potentielle des sédiments marins et estuariens contaminés : évaluation chimique et biologique, biodisponibilité des contaminants sédimentaires. *Thèse De doctorat*, Univ. Bordeaux. 376 p.
- **Gendronneau M., Haure j., Jeanneret H. Le Merrer Y., Lequette C., Lomakine C., Martin J.L., Papin M., Ponthoreau C et Robin M. 2006.** Étude des secteurs du Croisic et de Pen-Bé : estimation des apports continentaux et évaluation des stocks conchylicoles. Programme de Surveillance et évaluation de l'état des eaux littorales. Ed. Ifremer, 267 p.

- **Gouzy A., Soleille S et Brignon J.M. 2006.** Nickel et principaux composés. INERIS - Données technico-économiques sur les substances chimiques en France, 65 p.
- **Hatje V., Payne T.E., Hill D.M., McOrist G., Birch G.F et Szymczak R. 2003.** Kinetics of trace element uptake and release by particles in estuarine waters: effects of pH, salinity, and particle loading. *Environment International* (29): 619– 629.
- **Hébrard-Labit C et Meffray L. 2004.** Comparaison des méthodes d'analyses des éléments traces métalliques (ETM) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sur les sols et les végétaux. CERTU, 120 p.
- **Hiemstra T et van Riemsdijk W.H.2006.** Biogeochemical speciation of Fe in ocean water. *Marine Chemistry* (102): 181–197.
- **Hirose, 2006.** Chemical speciation of traces metals in Seawater: a Review. *Analytical Sciences* (22): 1055-1063.
- **Hornberger M.T., Samuel N. Luoma S.N., Geen A.V., Fuller C., Anima R.1999.** Historical trends of metals in the sediments of San Francisco Bay, California. *Marine Chemistry* (64) : 39–55.
- <http://www.portdebejaia.com.dz/epb.htm>, consulté le 15/03/2007.
- **Jeannot R., Lemiè re B et Chiron S. 2001.** Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués. Document de BRGM 298. Ed BRGM, 85p.
- **JOM. 2004.** Amendements à la convention pour la protection de la mer méditerranée contre la pollution; faits à Barcelone (Espagne) le 10 juin 1995 Annexe à l'Ordonnance Souveraine n° 16.440 du 20 septembre 2004. Annexe au "JOURNAL DE MONACO" N° 7.671 du 1<sup>er</sup> Octobre 2004.
- **Jones B.R et Laslett R.E .1994.** Methods for analysis for trace metals in marine and other samples. Aquatic Environment Protection: Analytical Methods. *MAFF Direct. Fish. Res., Lowestoft*, (11), 29 p.
- **Kafi-Benyahia M. 2006.** Variabilité spatiale des caractéristiques et des origines des polluants de temps de pluie dans le réseau d'assainissement unitaire parisien. *Thèse de Doctorat, l'école nationale des ponts et chaussées*, 323 p + Annexes.
- **Kantin R et Marchand M. 1997.** Les métaux traces en milieu aquatique. In « les contaminants chimiques en milieu aquatique ». *Océanis*. Vol 23, n°4, p 595-629.
- **Kantin R et Pergent G. 2004.** Rapport d'étape. Groupement de Recherche : Gestion des écosystèmes littoraux méditerranéens. Ed. *Ifremer-Université de Corse*.

- **Kantin R et Pergent-Martini C. 2007.** Monitoring de la qualité des eaux et de l'environnement marin -Rapport final – Région Corse. Programme INTERREG IIIA Sardaigne / Corse/ Toscane, MONIQUA N°MCD IIIA-03/08, Convention Ifremer PAC - Equipe Ecosystèmes Littoraux & Collectivité Territoriale de Corse MCD IIIA-03/08, *Ifremer publ.*, La Seyne : 1-222.
- **Kim H. J., Gibb H.J et Howe P.D. 2006.** Cobalt and inorganic cobalt compounds. Concise International Chemical Assessment Document 69. *Document de l'OMS*, 93 p.
- **Kucuksezgin F., Kontas A., Altay O., Uluturhan E et DarNlmaz E. 2006.** Assessment of marine pollution in Izmir Bay: Nutrient, heavy metal and total hydrocarbon concentrations. *Environment International* (32) : 41 – 51.
- **Lagarde F. 2002.** Qualité des eaux littorales terrestres et marines de la baie de Saint-Brieuc : bilan et propositions de suivis complémentaires. DESS Environnement : sols, eaux continentales et marines. Univ. Caen, 94 p+annexes.
- **Le Goff F et Bonnomet V.2004.** Devenir et comportement des métaux dans l'eau : biodisponibilité et modèles BLM «*Biotic Ligand Models* ». Rapport technique, *INERIS DRC-03-46822-FLg/JL-03.0693*, 87 p.
- **Leblond S. 2004.** Etude pluridisciplinaire du transfert des métaux de l'atmosphère vers les mousses (*Scleropodium purum* (Hedw.) Limpr.) : Suivi sur un site rural (Vouzon, France). *Thèse de doctorat*. Univ. Paris 7 - Denis Diderot, 169 p + Annexes.
- **Lee S., Lee E., Ra J., Lee B., Kim S., Choi S.H., Kim S.D et Cho J. 2008.** Characterization of marine organic matters and heavy metals with respect to desalination with RO and NF membranes. *Desalination* (221) : 244–252.
- **Lémière B., Seguin J.J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger Ph., Dermendrail D et Conil P. 2001.** Guide pour le comportement des polluants dans le sol et les nappes. Ed. *BRGM*, 122 p.
- **Lestel L. 2006.** Sources et flux de zinc dans le bassin de la Seine (1950-2000). Centre d'Histoire des Techniques et de l'Environnement CNAM, Paris.
- **Liu X et Millero F.J. 2002.** The solubility of iron in seawater. *Marine Chemistry* (77) : 43– 54.
- **MacDonald D.D., Moore D.R.J., Pawlisz A., Smorong D.E., Breton R.L., MacDonald D.B., Thompson R., Lindskoog R.A., Hanacek M.A., et Goldberg M.S. 2002.** Calcasieu Estuary Remedial Investigation/Feasibility Study (RI/FS): Baseline Ecological Risk.
- **Marchand M et Tissier C. 2006.** Évaluation du risque chimique dans l'environnement marin : exemple d'application aux installations industrielles du Nord-Cotentin. *Hydroécol. Appl.* Tome 15, pp. 43–85.

- **Marchand M., Tissier C., Tixier C et Tronczynski J. 2004.** Les contaminants chimiques dans la Directive Cadre sur l'Eau. *R.INT.DIR/DEL-PC/2004.11*, Ed. Ifremer, 32 p.
- **Martin-Garin A et Simon O. 2004.** Fiche radionucléide : Cadmium 109 et environnement. Direction de l'environnement et de l'intervention-service d'étude du comportement des radionucléides dans les écosystèmes, IRSN, 14 p.
- **Massabuau J.C., Campbell P., Monnin C et Roux B. 2006.** Etude de l'impact potentiel du rejet de l'effluent Goro Nickel dans le lagon sud de Nouvelle – Calédonie, 98 p.
- **Masson M., Blanc G et Schäfer J. 2006.** Geochemical signals and source contributions to heavy metal (Cd, Zn, Pb, Cu) fluxes into the Gironde Estuary via its major tributaries. *Science of the Total Environment* (370): 133–146.
- **Matmed A. 2004.** Contribution à l'étude des métaux lourds et du carbone dans le sédiment marin profond aux larges d'Alger et de Jijel. *Mémoire de magister*. Univ. Badji-Mokhtar, Annaba, 125 p.
- **Mazouz S et Hamana S. 1994.** Le dragage du port de Béjaïa : conséquences et étude du site de dépôt. *Mémoire de fin de cycles*. Institut des Sciences de la mer et de l'Aménagement du littoral ISMAL, 63 p + Annexes.
- **McKay R.M.L., Bullerjahn J.S., Porta D., Brown E.T., Sherrell R.M., Smutka T.M., Sterner R.W., Twiss M.R et Wilhelm S.W. 2004.** Consideration of the bioavailability of iron in the North American Great Lakes. Development of novel approaches toward understanding iron biogeochemistry. *Aquatic Ecosystem Health and Management* (7): 475-490.
- **METAP. 1993.** Rapport partiel n°2. Etude de protection contre la pollution des Ports et du littoral algériens : Détermination de l'origine de la pollution des ports et rades portuaires et au voisinage des principales plages algériennes.
- **Miquel G.M. 2001** Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Rapport Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Dir.). Rapport Sénat n°261 et Assemblée Nationale n° 2979 ,365 p.
- **Miserez J.J. 1974.** Géochimie des eaux du karstjurassien, contribution physico-chimique à l'étude des altérations. *Thèse de doctorat*. Univ. de Neuchâtel. 319 p.
- **Moilleron R., Bousserhine N., Varrault G., Fakih M., Abbad-Andalousi S., Hervé D et Thévenot D.R. 2004.** Evolution des matériaux de dragage après mise en dépôt en gravières : impact des microorganismes sur la solubilisation des éléments traces métalliques. *PIREN* Rapport action415-final.doc, 30 p.

- **Monteiro P.M.S et Roychoudhury A.N. 2005.** Spatial characteristics of sediment trace metals in an eastern boundary upwelling retention area (St. Helena Bay, South Africa): A hydrodynamic- biological pump hypothesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (65): 123 - 134.
- **Morel F.M et Price N. M. 2003.** The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans. *Science* (300): 944-947.
- **Morillo J., Usero J et Gracia I. 2002.** Partitioning of metals in sediments from the Odiel River (Spain), *Environment International* (28): 263– 271.
- **Morillo J., Usero J et Gracia I. 2004.** Heavy metal distribution in marine sediments from the southwest coast of Spain. *Chemosphere* (55) : 431–442.
- **Motelay-Massei A., Ollivon D., Tiphagne K et Gabran B. 2005.** Atmospheric bulk deposition of trace metals to the Seine River Basin, France: concentration, sources and evolution from 1988 to 2001 in Paris. *Water, Air and Soil Pollution* (164): 119-135.
- **Moubet Y. 1999.** Les dragages et leurs impacts sur l'environnement marin. In « Dragage et environnement marin : états de connaissances » Éd Ifremer., pp 111-123.
- **Muniz P., Danulat E., Yannicelli B., Garcí'a-Alonso J., Medina G et Bicego M.C. 2004b.** Assessment of contamination by heavy metals and petroleum hydrocarbons in sediments of Montevideo Harbour (Uruguay). *Environment International* (29): 1019–1028.
- **Muniz P., Venturini N et Gómez-Erache M. 2004a.** Spatial distribution of chromium and lead in the benthic environment of coastal areas of the Río de la Plata estuary (Montevideo, Uruguay). *Braz. J. Biol.*, (1): 103-116.
- **Munksgaard C.N et Parry D.L. 2001.** Trace metals, arsenic and lead isotopes in dissolved and particulate phases of North Australian coastal and estuarine seawater. *Marine chemistry* (75): 165-184.
- **Nakhlé K.F. 2003.** Le mercure, le cadmium et le plomb dans les eaux littorales libanaises : apports et suivi au moyen de bioindicateurs quantitatifs (Eponges, Bivalves et Gastéropodes). *Thèse de doctorat*, Univ. Paris 7. 255 p.
- **Nasseh A et Texier H. 2000.** Comportement des métaux traces dans le bassin versant de l'Orne. Variabilité saisonnière et bilan des transferts (1994-1995), *Hydroécol. Appl.* Tome 12. (1-2) 159-182.
- **Nicolau R. 2005.** Caractérisation et quantification des transferts dus aux petites rivières côtières méditerranéennes. *Thèse de doctorat*, Univ. du Sud Toulon Var, 198 p.

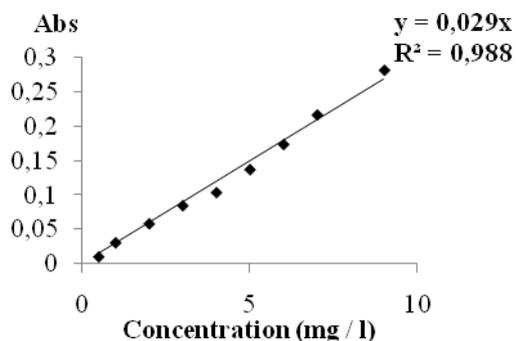
- **Nordberg G. 2006.** Les Métaux: propriétés chimiques et toxicité de l'encyclopédie de sécurité et de santé au travail. Du site <http://www.ilo.org>, consulté le 22/01/07.
- **PNUE. 1996.** Etat du milieu marin et littoral de la région méditerranéenne. *MAP Technical Reports Series No. 101*, Athens, 162 p.
- **PNUE/OMS. 1996.** Evaluation de l'enquête sur les polluants d'origine tellurique en Méditerranée (MED X BIS). *MAP Technical Reports Series N° 109* UNEP, Athens, 94 p.
- **Prego A et Cobelo-García A. 2003.** Twentieth century overview of heavy metals in the Galician Rias (NW Iberian Peninsula). *Environment Pollution* (121): 425-452.
- **Rajkum W et Persad D. 1994.** Heavy metals and petroleum Hydrocarbons in nearshore Areas of Tabago, West Indies. *Marine pollution Bulletin*, (28): 701 – 703.
- **Rivaro P., Grotti M., Ianni C et Magi E.1998.** Heavy metals distribution in the Eolian Basin (South Tyrrhenian Sea). *Marine Pollution Bulletin*, (36): 880 – 886.
- **RNO.1995.** Surveillance du Milieu Marin. Travaux du RNO. Ed. *Ifremer et Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement*, 36 p.
- **Rodier J et Champsaur H. 2005.** Interprétation des résultats analytiques. In « L'analyse de l'eau ». 8<sup>ème</sup> Ed. *Dunod*. 915 – 1186 p.
- **Rollin C et Quiot F, 2006.** Éléments traces métalliques- Guides méthodologiques- Recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines. *INERIS-DRC-06-66246/DESP-R01a*, 138 p.
- **Rossi L. 2004.** Modélisation des matières en suspension (MES) : Dans les rejets urbains en temps de pluie. 6<sup>ème</sup> article d'une série dédiée au projet «STORM», projet commun de l'EAWAG et du BUWAL, 9 p.
- **Saade L. 2005.** Actes de la conférence-débats agir ensemble pour une gestion plus efficace de l'eau potable et l'assainissement en Haïti. Commission Économique pour l'Amérique Latine et les Caraïbes CEPALC et CCI-Table Sectorielle Eau Potable et Assainissement, 55 p.
- **Saraçoğlu S. et Elçi L. 2002.** Column solid-phase extraction with Chromosorb-102 resin and determination of trace elements in water and sediment samples by flame atomic absorption spectrometry. *Analytica Chimica Acta* (452) : 77–83.
- **Scoullou M et Constantianos V. 1996.** Evaluation de l'état de la pollution de la mer Méditerranée par le zinc, le cuivre et leurs composés. *MAP Technical Reports Series N° 105. PNUE/FAO/OMS Athens*, 153 p.

- **Sirven J.B. 2006.** Détection de métaux lourds dans les sols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser (LIBS). *Thèse de Doctorat*. Univ. Bordeaux 1, 252 p.
- **Spooner C. 2007.** Surface Water In "the water encyclopedia: hydrologic data and internet resources". 3<sup>ème</sup> Ed. Taylor & Francis Group, LLC, 158 p.
- **Station Météo. 2007.**
- **Steimle F.W., Zdanowicz V.S., Cunneff S.L et Terranova R. 1994.** Trace metal concentration in common benthic macrofaunal Prey from New Bight Apex. *Marine Pollution Bulletin* (28): 760-765.
- **Sunderman W.F. 2006.** Les Métaux: propriétés chimiques et toxicité de l'encyclopédie de sécurité et de santé au travail. Du site <http://www.ilo.org>, consulté le 22/01/07.
- **Taylor B.R., Sanderson J et Lafontaine C. 1998.** Programme de surveillance de la qualité de l'environnement de la rivière liard : Rapport sommaire, 71 p.
- **Thévenot D et Aumont B. 2006.** Module Physico- chimie. Chap. 2.5. Équilibres de sorption, 37 p.
- **Thévenot R.D., Meybeck M et Lestel L. 2002.** Métaux lourds : des bilans en mutation. In Rapport de Synthèse. Programme PIREN-Seine 1998-2001, Centre National de la Recherche Scientifique, 78 p.
- **Thierrin J., Steffen P., Cornaz S., Vuataz F.D., Balderer W et Looser M. 2003.** Guide Pratique : Echantillonnage des eaux souterraines. Publié par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP Berne, 84 p.
- **Türkmen A et Türkmen M. 2004.** The Seasonal Variation of Heavy Metals in the Suspended Particulate Material in the Iskenderun Bay (North-eastern Mediterranean Sea, Turkey), *E.U. Journal of Fisheries & Aquatic Sciences 2004 Cilt/Volume 21, Sayı/Issue* (3-4): 307– 311.
- **UNEP/WHO, 1991.** Biogeochemical cycles of specific pollutants. MAP technical reports series, UNEP, n° 55, 95 p.
- **Verlecar X.N., Desai S.R., Sarkar A et Dalal S.G. 2006.** Biological indicators in relation to coastal pollution along Karnataka coast, India. *Water research* (40): 3304 – 3312.
- **Villeneuve V., Légaré S., Painchaud J et Vincent W. 2006.** Dynamique et modélisation de l'oxygène dissous en rivière. *Revue des Sciences de l'Eau* 19(4) : 259-274.

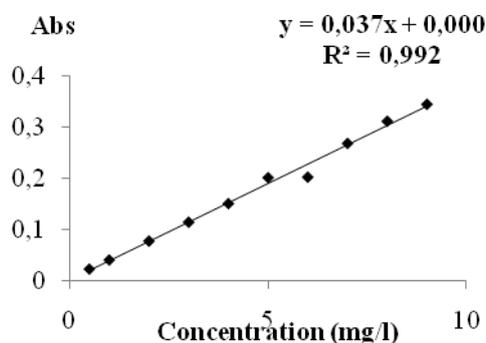
- **Waldichuk M. 1978.** Pollution marine mondiale : Aperçu général. UNESCO, 104 p.
- **Wu J et Boyle E. 2002.** Iron in the Sargasso Sea: Implications for the processes controlling dissolved Fe distribution in the ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, 16(4) : 33-1, 33-8.

# *Annexes*

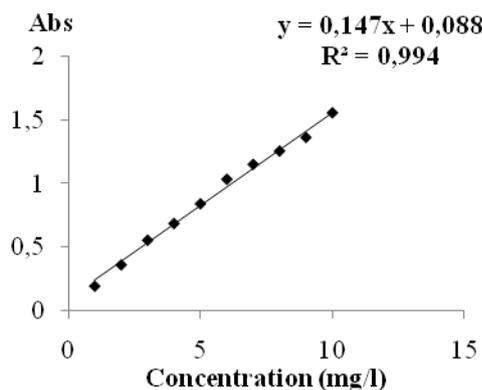
## Annexe I



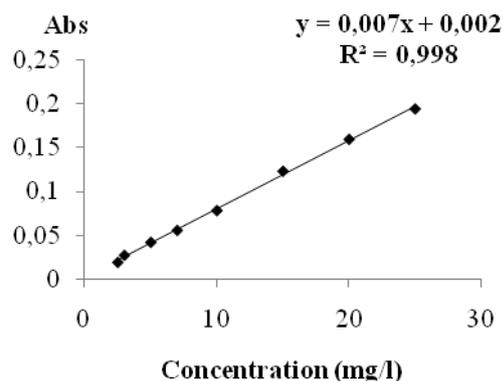
**Courbe N° 1** : Courbe d'étalonnage du fer



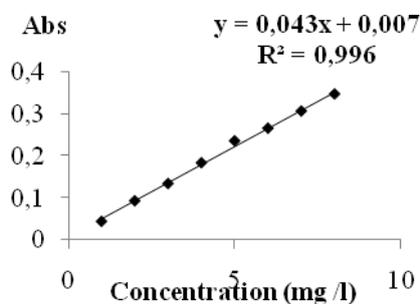
**Courbe N° 2** : Courbe d'étalonnage du nickel



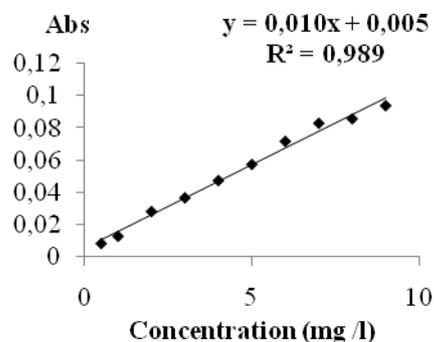
**Courbe N° 3** : Courbe d'étalonnage du cadmium



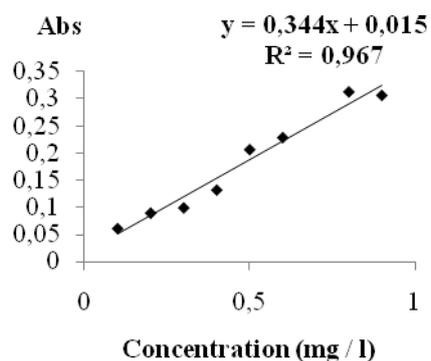
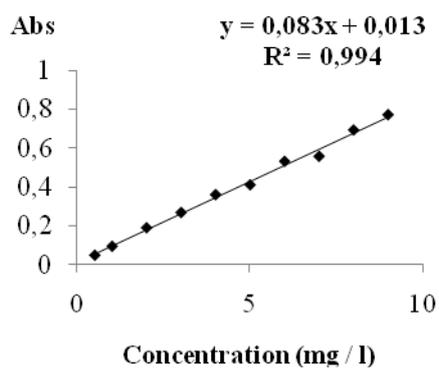
**Courbe N° 4** : Courbe d'étalonnage du plomb



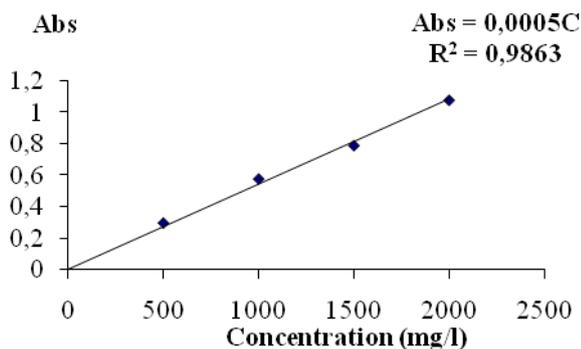
**Courbe N° 5** : Courbe d'étalonnage du cobalt



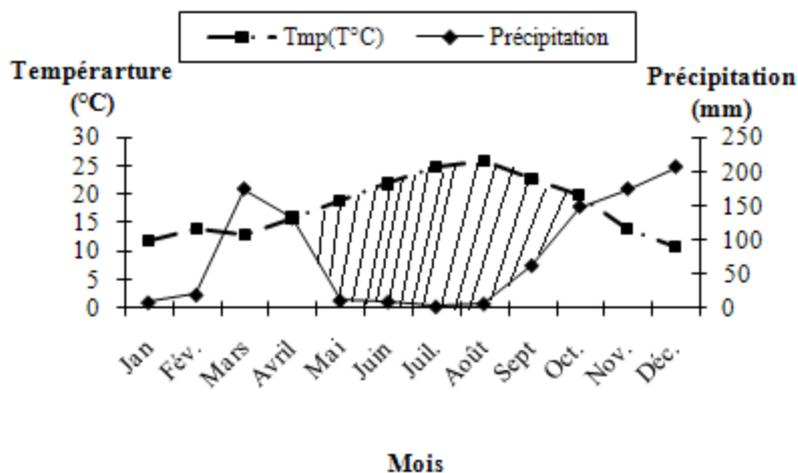
**Courbe N° 6** : Courbe d'étalonnage du chrome



**Courbe N° 7** : Courbe d'étalonnage du cuivre    **Courbe N° 8** : Courbe d'étalonnage du zinc



**Courbe N° 9** : Courbe d'étalonnage de la turbidité



**Figure 1** : Diagramme Ombrothermique (Température/ Précipitation)

## Annexe II

**Tableau I : Description de l'état des stations au cours des prélèvements**

Description Station	Couleur	Odeur	Etat de mer
S1	Verdâtre	Pas d'odeur	Calme
S2	Turbide	Pas d'odeur	Calme
S3	Noirâtre	Pas d'odeur	Calme
S4	Turbide	Pas d'odeur	Calme
S5	Turbide	Pas d'odeur	Calme
S6	Verdâtre	Pas d'odeur	Calme
S7	Verdâtre	Pas d'odeur	Calme
S8	Verdâtre	Pas d'odeur	Calme
S9	Verdâtre	Pas d'odeur	Calme
S10	Verdâtre	Pas d'odeur	Calme
S11	Noirâtre (aspect vaseux)	Nauséabonde	Calme
S12	Noirâtre (aspect vaseux)	Nauséabonde	Calme
S13	Noirâtre (aspect vaseux)	Nauséabonde	Calme
S14	Turbide	Pas d'odeur	Calme
S15	Verdâtre	Pas d'odeur	Plus au moins agitée (Petite houle)
S16	Verdâtre	Pas d'odeur	Plus au moins agitée (petite houle)
S17	Verdâtre	Pas d'odeur	Agitée

**Bulletin météorologique pour le 20/11/2007 (journée de prélèvement) :**

- Direction du vent : Sud – Est ;
- Vitesse du vent : 15 Nœuds ;
- Houle : 50 cm ;
- Courant : Nord - Ouest ;
- Marée haute ;
- Met : belle ;
- Température de la journée : 19 °C.

Quand au tableau suivant, il représente les précipitations journalières qui ont eu lieu quelques jours avant d'effectuer les prélèvements :

**Tableau II** : Précipitations journalières enregistrées avant la campagne de prélèvement  
(Station Météo, 2007).

Mois	Octobre							Novembre						
Journée	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	15	16	17	<i>20</i> <i>(journée du</i> <i>prélèvement)</i>
Hauteur de pluie (mm)	1	2	25	1	11	35	11	19	13	5	56	13	1	<i>0</i>

Tableau III : Composition naturelle de l'eau de mer (Spooner, 2007).

Constituent	Concentration (ppm)
Chlorure sodium	18.980
Sulfate	10.560
Magnésium	2.560
Calcium	1.272
Potassium	400
bicarbonate	380
Brome	142
Strontium	65
Boron	13
Fluoride	4.6
Rubidium	1.4
Aluminium	0.2
Lithium	0.16 – 1.9
Baryum	0.1
Iodide	0.05
Silicate	0.05
Nitrogène	0.04 – 8.6
Zinc	0.03 – 0.9
Plomb	0.005 – 0.014
Sélénium	0.004 – 0.005
Arsenic	0.004
Cuivre	0.003 - 0.024
Tin	0.001 – 0.09
Fer	0.003
Césium	0.002 – 0.02
Manganèse	≈ 0.002
Phosphore	0.001 – 0.01
Thorium	0.001 – 0.10
Mercure	≤ 0.0005
Uranium	0.0003
Cobalt	0.00015 – 0.0016
Nickel	0.0001
Radium	0.0001 – 0.0005
Béryllium	$8 * 10^{-11}$
Cadmium	–
Chrome	–
Titane	Trace

Source: From U.S. Geological survey.

## Annexe III

**Tableau I:** Pourcentage des métaux totaux transportés sous forme dissoute

Station	MES (mg/l)	Fe (%)	Zn (%)	Ni (%)	Cr (%)
S1	46,5	19,2	58,07	26,37	45,31
S2	42	11,55	71,49	67,14	14,11
S3	39	11,74	75,54	63,74	85,99
S4	24	19,03	7,6	81,98	91,86
S5	36	15,1	54,33	23,44	51,51
S6	37,5	31,75	37,55	91,35	/
S7	35,5	2,46	75,75	67,81	/
S8	54,5	1,17	7,29	85,62	/
S9	45,5	13,24	54,87	5,86	/
S10	29	22,11	35,69	69,24	15,75
S11	59,5	2,12	44,26	24	38,84
S12	221	27,18	42,56	86,71	25,1
S13	50	48,05	37,34	77,8	20,08
S14	30,5	27,68	76,73	82,33	32,68
S15	37	22,91	68,34	97,55	13,71
S16	39,5	38,97	28,74	95,86	32,57
S17	60	33,4	16,96	87,39	11,86
<b>Moyenne</b>	<b>52,18</b>	<b>20,45</b>	<b>46,65</b>	<b>66,72</b>	<b>36,87</b>

## ***Annexe IV***

### **Transports et modes de déposition des métaux atmosphériques**

- Sources et temps de résidence des particules atmosphériques

Les principales sources d'éléments métalliques, sous forme dissoute ou particulaire, dans l'atmosphère sont multiples. De manière générale, il est possible de distinguer :

#### ***Les sources naturelles***

La majorité des aérosols présents dans l'atmosphère sont produits par les océans (sels marins) et les zones arides (poussières crustales, désertiques) aux quels peuvent être ajoutés les activités volcaniques et les feux de biomasse.

#### ***Les sources anthropiques***

Au niveau anthropique, sont distinguées les émissions directes (abrasion des pneumatiques, cimenteries) et les aérosols formés par conversion gaz-particule qui intervient lors de tous les processus de combustion à haute température (moteurs automobiles, usines d'incinération, centrales thermiques).

Le temps de résidence des aérosols dans l'atmosphère varie de quelques minutes à plusieurs jours. Il est fonction des conditions météorologiques (vent, température, humidité) mais surtout de la granulométrie des particules (dans l'atmosphère, elles ont des tailles comprises entre  $10^{-3}$  et  $100 \mu\text{m}$  de diamètre). Les temps de séjour les plus courts sont relevés pour les particules les plus grosses ( $> 10 \mu\text{m}$ ) car éliminés par le dépôt sec et pour l'aérosol ultra fin ( $10^{-3} \mu\text{m}$ ) car les particules se coagulent rapidement entre elles. Les temps de résidence longs, permettent le transport des éléments métalliques sur de longues distances, de 100 à plus de 1000 km, suivant la dynamique des masses d'air.

- Modes de dépôt : Deux processus permettent d'éliminer ces particules de l'atmosphère: le dépôt sec et le dépôt humide (Figure ci-dessous).

***Le dépôt sec*** (Davidson et Wu, 1989 *In* Leblond, 2004).

Ce processus est fortement influencé par la taille des particules, les conditions météorologiques et la structure de la surface de dépôt. Il fait intervenir deux modes :

(1) : la sédimentation gravitationnelle des particules

(2) : la capture par obstacles (souvent désignée sous le terme générique d'impaction) ; les particules, véhiculées par les masses d'air, peuvent venir s'impacter sur différents obstacles tels la surface du sol, la végétation ou les océans.

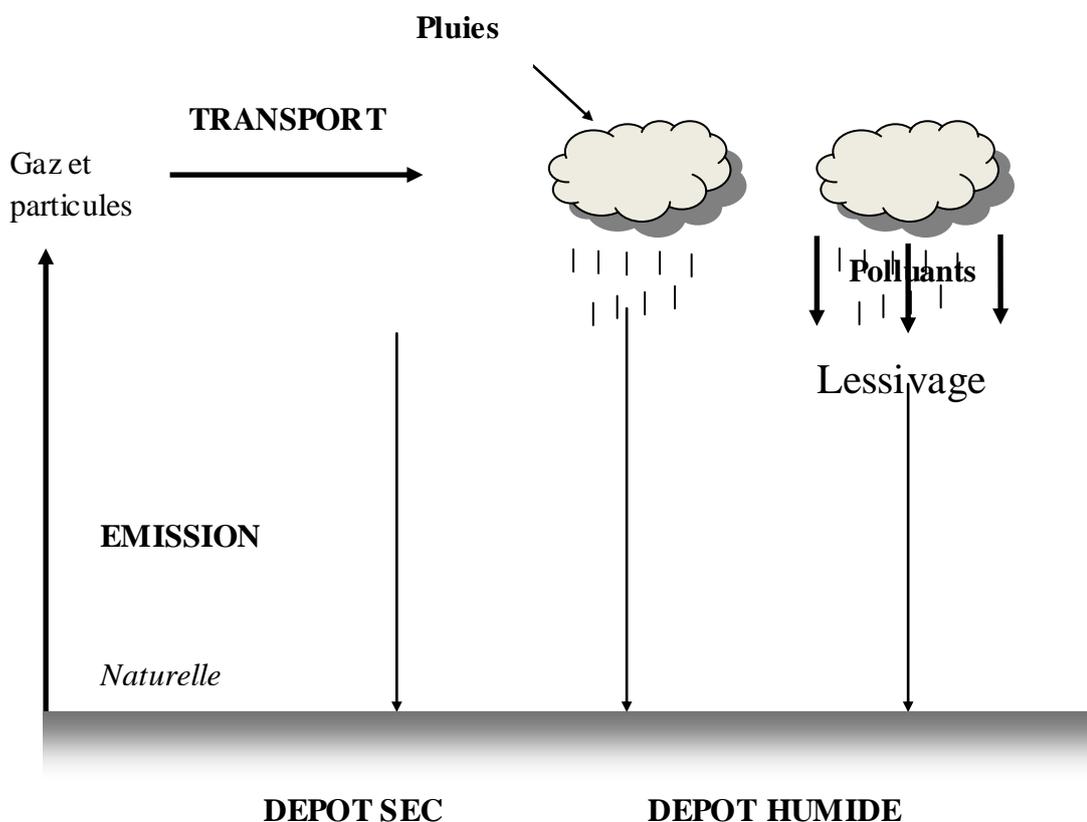
**Le dépôt humide** (Barrie et Schemenauer, 1989 In Leblond, 2004).

Ce mode de dépôt fait également intervenir deux processus distincts :

(1) : Le "rainout" (encore appelé "In cloud scavenging") résulte de la capture des particules par les gouttelettes d'eau nuageuses en cours de formation.

(2) : Le "washout" (encore appelé "Below cloud scavenging") est le piégeage des particules lors d'évènements pluvieux, entre le nuage et le sol, soit par capture à la suite de chocs, soit par entraînement de l'air déplacé lors de la chute des gouttes. L'importance de ce phénomène est fortement liée à l'intensité des précipitations.

Le dépôt atmosphérique total est la somme des retombées humides et sèches, décrites précédemment.



**Figure 1 :** Processus de dépôt de contaminants (Leblond, 2004).

**Résumé :** Le but de ce travail est l'évaluation du degré de la pollution inorganique des trois bassins du port de Béjaïa, au cours duquel nous nous sommes attachés à mettre en évidence l'impact des rejets sur la qualité des eaux portuaires. En effet, nous avons effectué la mesure de certains paramètres physico-chimiques (*température, pH, oxygène dissous, turbidité et conductivité*) et le dosage de quelques métaux lourds dissous et particuliers (*Cu, Zn, Fe, Co, Cd, Pb, Cr et Ni*) par la SAA de flamme, en outre, la répartition des polluants métalliques entre les phases, dissoute et particulaire a été abordée. Les résultats montrent que les paramètres physico-chimiques présentent une variation spatiale, perturbée lors des rejets urbains. Ce travail a indiqué, par ailleurs, l'existence d'une forte pollution par les métaux lourds, notamment les plus toxiques (plomb et le nickel), due aux rejets d'eaux usées et au lessivage de l'atmosphère et du territoire de la ville de Béjaïa; les activités portuaires sont aussi responsables, en partie de cette pollution. Cette étude a révélé également que la phase particulaire est 1000 fois plus polluée que la phase dissoute.

**Mots clés :** métaux traces, Fe, Zn, Cr, Ni, Pb, Co, Cu, Cd, dissous, particuliers, pollution, eaux marines, port de Béjaïa, eaux usées, eaux pluviales.

**Abstract:** The purpose of this work is the assessment of the degree of inorganic pollution of three basins of Béjaïa's port, during which we are committed to highlight the impact of discharges on quality of seawater. Indeed, we made some measures of physical and chemical parameters (*temperature, pH, dissolved oxygen, turbidity and conductivity*) and determination of some dissolved and particulate heavy metals (*Cu, Zn, Fe, Co, Cd, Pb, Cr and Ni*) by the flame SAA, furthermore, the distribution of metal pollutants between dissolved and particulate phases was discussed. The results show that physical and chemical parameters have a spatial variation, disturbed during the urban waste. This work has indicated, moreover, the existence of highly heavy metals pollution, including the most toxic (lead and nickel), due to discharges of wastewater and the leaching of the atmosphere and the Bejaïa's town territory; harbours' activities are also responsible, in part, of this pollution. The study also revealed that the particulate phase is 1000 times more polluted than the dissolved phase.

**Keywords:** trace metals, Fe, Zn, Cr, Ni, Pb, Co, Cu, Cd, dissolved, particulate, pollution, marine waters, Bejaïa's port, wastewater, stormwater.

**الخلاصة:** الغرض من هذا العمل هو تقييم درجة التلوث اللاعضوي للأحواض الثلاثة لميناء بجاية. خلال هذا العمل سلطنا الضوء على مدى تأثير المياه القذرة على نوعية مياه الميناء. في الواقع أننا قمنا بقياس بعض العوامل الفيزيوكيماوية (درجة الحرارة، الأكسجين الذائب، درجة التعكر و الناقلية) وتركيز بعض المعادن الثقيلة المنحلة و غير المنحلة (النحاس، الزنك، الحديد، الكوبالت، الكاديوم، الرصاص، الكروم و النيكل) بواسطة الجهاز الطيفي للامتصاص الذري بطريقة اللهب و علاوة على ذلك فان توزيع الملوثات المعدنية ما بين حالة انحلال و عدم انحلال قد نوقش أيضا. نتائج هذا العمل تشير إلى أن العوامل الفيزيوكيماوية تظهر تباين مكاني المتعلق بكمية النفايات الحضرية المنسبة في الميناء وقد أشار هذا العمل أيضا إلى وجود درجة عالية من التلوث بالمعادن الثقيلة بما في ذلك الأشد السامة (النيكل و الرصاص) نظرا لتصريف المياه المستعملة و ترشيح الجو و أراضي مدينة بجاية. تعتبر أنشطة الميناء مسؤولة أيضا عن جزء من هذا التلوث. و كشفت هذه الدراسة أيضا ان الجزء غير المنحل الذي يحوي على المعادن غير المنحلة 1000 مرة أكثر تلوث من الجزء الذي يحوي المعادن المنحلة

**مفتاح الكلمات:** المعادن الثقيلة،النحاس، الزنك، الحديد، الكوبالت، الكاديوم، الرصاص، الكروم و النيكل ، منحلة، غير منحلة، تلوث، مياه البحر، ميناء بجاية، المياه المستعملة، مياه الأمطار.