

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique  
Université Mohammed Seddik Benyahia- Jijel  
جامعة محمد الصديق بن يحي - جيجل

Faculté des sciences de la nature et de la vie  
Département des sciences de l'environnement  
et des sciences agronomiques



كلية علوم الطبيعة و الحياة  
قسم علوم المحيط و العلوم الفلاحية

## Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme : **Master académique**

- ♣ Domaine : SNV
- ♣ Filière : Hydrobiologie marine et continentale
- ♣ Option : Ecosystèmes aquatiques

### *THEME*

*La phytoremédiation des eaux de surface par les  
macrophytes aquatiques : cas des métaux lourds*

#### Membres de Jury :

Présidente : Mme Bencharif Naila

Examineur : M<sup>r</sup> Mayache Boualem

Encadreur : Mme Benfridja Leila

#### Présenté par:

M<sup>lle</sup> Djebrouni Chahrazed

M<sup>lle</sup> Bouafia Wissame

Session : 2020

Numéro d'ordre (bibliothèque) : .....



## *Remerciements*

*En premier, nous remercions le bon dieu, tout puissant, de nous avoir donné la santé, le courage et de la patience pour être ce que nous sommes aujourd'hui et pour mener à terme ce modeste travail.*

*À notre encadreur Mme Benfridja Leïla.*

*Nous vous remercions pour nous avoir donné l'opportunité de travailler sur ce mémoire, pour votre grand soutien scientifique et moral, pour les conseils, les suggestions et encouragements, l'aide et le temps que vous avez bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.*

*Veillez trouver dans ce travail le témoignage de notre très grand respect et de notre profonde reconnaissance.*

*Nous remercions aussi très sincèrement les membres de jury: La présidente Mme Bencharif Naila ainsi que l'examinateur Mr Mayache Boualem d'avoir accepté d'examiner ce travail et de nous avoir honoré par leur présence le jour de la soutenance.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à :*

*tous ceux que j'aime, Surtout:*

*Mes parents avant tout et pour tout ma très chère mère « Djamila » &*

*mon chère père « Saleh ».*

*Mon grand père « Mohammed » & ma grande mère « Thawess ».*

*Mes sœurs « Chaïmaa » & « Marwa ».*

*Mes frères « Ahmed », « Hocine » & « Abdou ».*

*Mon binôme « Chahrazed ».*

*Mes belles amies.*

*A ma famille « Bouafia » & « Chetouane ».*

*À mes meilleurs amis surtout Manel, Assma...*

*Avec qui j'ai passé mes meilleures années d'études.*

*'Et pour tous ceux qui ont du respect pour la nature et la vie sur terre.'*

*A toutes personnes utilisant ce document Pour un bon usage.*

*'Wissame'*

## *Dédicace*

*Avant tout je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la foi et de m'avoir permis d'en arrivé jusque là.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A Mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de celong chemin, que dieu les garde et les protège.*

*À mes sœurs Saly, Amel, Nacera.*

*Pour leur sympathie, douceur, et gentillesse. Je vous souhaite un avenir plein d'amour, de plaisir et de réussite.*

*À mes frères Ali, Djemaal.*

*Pour votre complicité et vos encouragements, je vous souhaite beaucoup de courage et de bonheur.*

*A mon binôme wissame.*

*À mes meilleurs amis surtout Manel, Assma, Nihad ...*

*Avec qui j'ai passé mes meilleures années d'études.*

*chahrazed*

## TABLE DES MATIERES

Liste des abréviations .....	i
Liste des figures .....	iii
Liste des tableaux .....	iv
Introduction .....	1

### **Chapitre 01: Les eaux de surface**

1.1 L'écosystème aquatique .....	2
1.2 Définition des eaux .....	2
1.3 Le cycle de l'eau .....	2
1.4 Les composants du cycle de l'eau .....	3
1.5 Eaux de surface.....	3
1.5.1 Les eaux stagnantes.....	4
1.5.2 Les eaux courantes .....	4
1.6 La pollution des eaux de surface .....	5
1.7 Origine de la pollution .....	5

### **Chapitre 02: Les métaux lourds**

2.1 Définition des métaux lourds.....	7
2.2 Classification périodique des éléments.....	7
2.3 Classification des métaux lourds.....	7
2.4 Les différents types des métaux.....	8
2.5 Les sources des métaux lourds .....	9
2.6 Facteurs modifiant la mobilité des métaux lourds .....	9
2.7 Les métaux lourds dans l'écosystème aquatique.....	11
2.8 Les métaux lourds dans la plante.....	12
2.9 La toxicité des métaux lourds .....	13
2.10 Propriétés de quelques métaux lourds étudiées .....	14

### **Chapitre 03: Les macrophytes aquatiques**

3.1 Définition des macrophytes .....	16
3.2 Les types des macrophytes .....	16
3.2.1 Les hydrophytes .....	16
3.2.1.1 Lentille d'eau.....	16
3.2.1.1.1 Systématique.....	16
3.2.1.1.2 Description.....	17

3.2.1.1.3 Habitat .....	17
3.2.1.2 Nénuphar blanc .....	17
3.2.1.2.1 Systématique.....	17
3.2.1.2.2 Description.....	18
3.2.1.2.3 Habitat .....	18
3.2.1.3 Nénuphar jaune .....	18
3.2.1.3.1 Systématique.....	18
3.2.1.3.2 Description.....	18
3.2.1.3.3 Habitat .....	19
3.2.1.4 Le potamot à feuilles nageantes .....	19
3.2.1.4.1 Systématique.....	19
3.2.1.4.2 Description.....	19
3.2.1.4.3 Habitat .....	19
3.2.2 Les hélophytes .....	20
3.2.2.1 Jonc fleuri ou butome en ombelle .....	20
3.2.2.1.1 Systématique.....	20
3.2.2.1.2 Description.....	20
3.2.2.1.3 Habitat .....	20
3.2.2.2 Iris des marais.....	21
3.2.2.2.1 Systématique.....	21
3.2.2.2.2 Description.....	21
3.2.2.2.3 Habitat .....	21
3.2.2.3 Jonc épars .....	21
3.2.2.3.1 Systématique.....	21
3.2.2.3.2 Description.....	22
3.2.2.3.3 Habitat .....	22
3.2.2.4 Les roseaux communs .....	22
3.2.2.4.1 Systématique.....	22
3.2.2.4.2 Description.....	22
3.2.2.4.3 Habitat .....	22
3.2.2.5 Les massettes ou massette à feuille larges .....	23
3.2.2.5.1 Systématique.....	23
3.2.2.5.2 Description.....	23

3.2.2.5.3 Habitat .....	23
3.3 Rôles majeurs des macrophytes.....	24
<b>Chapitre 04: La phytoremédiation</b>	
4.1 Définition de la phytoremédiation .....	25
4.2 Les stratégies de la phytoremédiation .....	25
4.2.1 Par dégradation .....	25
4.2.1.1 La phytodégradation.....	25
4.2.1.2 La Rhizostimulation .....	26
4.2.2 Par accumulation.....	26
4.2.2.1 La phytoextraction.....	26
4.2.2.2 La rhizofiltration .....	27
4.2.3. Par dissipation .....	28
4.2.3.1 La phytovolatilisation.....	28
4.2.4 Par Immobilisation.....	28
4.2.4.1 Phytostabilisation .....	28
4.3 Types des plantes utilisées dans la phytoremediation .....	30
4.3.1 Les métallophytes .....	30
4.3.2 Les hyperaccumulatrices.....	30
4.4 Exemples des plantes utilisées dans la phytoremediation .....	30
4.5 Avantages et inconvénients de la phytoremédiation .....	31
4.6 Résultats de quelques travaux sur la phytoremédiation.....	32
Conclusion .....	37
Références bibliographiques.....	38

## Liste des abréviations

Al: Aluminium

As: Arsenic

C° : Degré Celsius

Ca: Calcium

CaCO<sub>3</sub> : Carbonate de calcium

Cd : Cadmium

CE : Conductivité électrique

cm : Centimètre

Co: Cobalt

CO<sub>2</sub>: Dioxyde de Carbone

Cr: Chrome

Cu : Cuivre

Eh : potentiel redox

ETM : Eléments traces métalliques

Fe: Fer

G: Gramme

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

Hg : Mercure

HNO<sub>3</sub> : acide nitrique

Kg : Kilogramme

M : Mètre



Mm : Millimètre

Mn : Manganèse

MO : Matière organique

MS : Matière sèche

Ni : Nickel

O<sub>2</sub> : Oxygène

Pb : Plomb

pH : potentiel d'hydrogène

Se : Sélénium

SPC : Sous-produits de chloration

T : Température

THM : Trihalométhanes

Zn : Zinc

µg : Microgramme

## Liste des figures

<b>Figure 01</b> : Cycle de l'eau .....	<b>3</b>
<b>Figure 02</b> : Origine et distribution des éléments traces .....	<b>9</b>
<b>Figure 03</b> : <i>Lemna minor</i> .....	<b>16</b>
<b>Figure 04</b> : <i>Nymphaea alba</i> .....	<b>17</b>
<b>Figure 04</b> : <i>Nymphaea lutea</i> .....	<b>18</b>
<b>Figure 06</b> : <i>Potamogeton natans</i> .....	<b>19</b>
<b>Figure 07</b> : <i>Butomus umbellatus</i> .....	<b>20</b>
<b>Figure 08</b> : <i>Iris pseudacorus</i> .....	<b>21</b>
<b>Figure 09</b> : <i>Juncus effusus</i> .....	<b>21</b>
<b>Figure 10</b> : <i>Phragmites australis</i> .....	<b>22</b>
<b>Figure 11</b> : <i>Typha latifolia</i> .....	<b>23</b>
<b>Figure 12</b> : Fonctionnement de la phytodégradation.....	<b>25</b>
<b>Figure 13</b> : Fonctionnement de la rhizodégradation.....	<b>26</b>
<b>Figure 14</b> : fonctionnement de la phytoextraction.....	<b>27</b>
<b>Figure 15</b> : La rhizofiltration .....	<b>27</b>
<b>Figure 16</b> : Le processus de la phytovolatilization.....	<b>28</b>
<b>Figure17</b> : Fonctionnement de la phytostabilisation .....	<b>29</b>
<b>Figure 18</b> : Les principales techniques de phytoremédiation .....	<b>29</b>

### **Liste des tableaux**

<b>Tableau 01</b> : Classification périodique des éléments .....	7
<b>Tableau 02</b> : Principaux éléments métalliques essentiels et non-essentiels.....	8
<b>Tableau 03</b> : Les rôles des différentes parties des macrophytes .....	24
<b>Tableau 04</b> :Les avantages et les inconvénients de la phytoremédiation .....	31



**Introduction**

L'eau est un élément biologique important en tant que support de vie et facteur du développement des pays, elle est considérée comme un vecteur privilégié de l'activité humaine (**Gueroui, 2014**).

La qualité des eaux dans le monde a connu ces dernières années une grande détérioration, à cause des rejets industriels non contrôlés et l'utilisation intensive des métaux lourds. Ces derniers produisent une modification chimique de l'eau et la rendent impropre aux usages souhaités (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

Les pollutions urbaine, industrielle et agricole sont les causes de la pollution aquatique, par le rejet de nombreux polluants organiques et inorganiques. Cette pollution peut avoir des conséquences sur la santé de l'homme soit par l'ingestion directe des végétaux et animaux contaminés soit par consommation de l'eau.

Tous les éléments traces métalliques sont potentiellement toxiques pour les végétaux en fonction de leur concentration dans un milieu et de leur caractère essentiel ou non pour la plante (**Lotmani et Mesnoua, 2011**).

Il existe plusieurs technologies de décontamination des eaux de surfaces contaminées par les métaux lourds, des techniques physico-chimiques et biologiques. Parmi ces dernières, l'utilisation de macrophytes aquatiques, fixés sur support ou en flottation libre aquatiques pour extraire ou transformer les polluants.

Cette technologie appelée la phytoremédiation présente plusieurs avantages (coût limité, mise en œuvre facile, intégration excellente dans le paysage naturel, absence de nuisances olfactives, etc...).

En outre les macrophytes ont un rôle comme un bioindicateur et bioaccumulateur, en plus de leurs capacités dans la phytoremediation dans les écosystèmes aquatiques.

Notre étude consiste à étudier l'effet accumulateur des métaux lourds par les macrophytes aquatiques, aussi à étudier le pouvoir phytoremédiateur de ces plantes dans les eaux de surface.

Pour aboutir à notre objectif, nous avons présenté ce travail en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente des généralités sur les eaux de surface, les différents types de pollutions de l'eau de surface et les facteurs de pollution.
- Le deuxième chapitre porte essentiellement sur les métaux lourds.
- Le troisième chapitre présente des généralités sur les macrophytes aquatiques.
- Le quatrième chapitre montre les différentes stratégies de la phytoremédiation.

Enfin, nous terminerons par une conclusion.



**Chapitre 01 : Les eaux de surface**

## 1.1 L'écosystème aquatique

L'écosystème aquatique est le résultat d'un équilibre entre un milieu naturel et les espèces animales et végétales qui y vivent.

Les lacs, les cours d'eau, les zones inondables ou humides (marais et tourbières) et les nappes souterraines constituent les écosystèmes aquatiques (**Saheb, 2014**).

## 1.2 Définition des eaux

L'eau est une matière très importante pour la survie des êtres vivants. C'est un composé incolore, inodore, insipide et liquide à température ordinaire. C'est un corps composé résultant de la combinaison de deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène de formule  $H_2O$ . Elle bout à la température de  $100^{\circ}C$ .  $1\text{ cm}^3$  à  $4^{\circ}C$  pèse sensiblement 1g (**Hillel, 2004**).

Elle est la base de la complexité et de la richesse de notre planète et elle est véritablement le berceau de la vie sur terre (**Lazarine etLazarine, 2011**).

L'eau est une ressource indispensable aux activités humaines mais elle constitue également un lieu de vie privilégié.

L'eau recouvre 72 % de la surface de la terre. Pourtant, seule 0,65% de cette eau communément appelée eau douce, est disponible dans les nappes souterraines (0,63%), les lacs et les rivières (0,02%). L'essentiel de l'eau présente sur terre se trouve dans les océans (97,2%), l'eau glacée ne représente, pour sa part, que 2,15% de l'eau totale (**Hillel, 2004**).

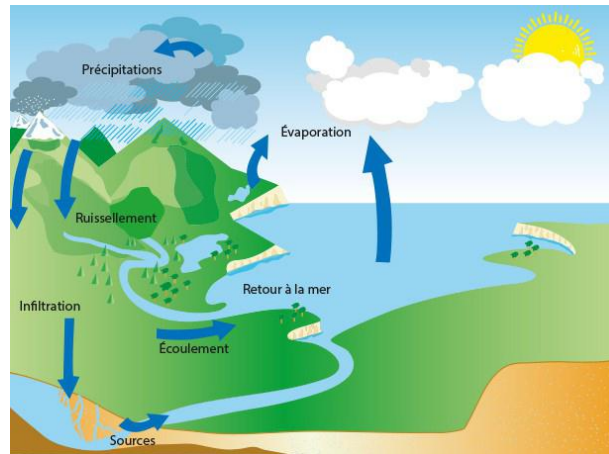
L'existence de l'être humain et de son environnement dépend de la présence de l'eau. La géosphère, l'atmosphère et la biosphère sont en étroite relation avec l'eau. L'eau interagit avec l'énergie solaire pour déterminer le climat et transforme et transporte les substances physiques et chimiques nécessaires à toute vie sur terre (**Bhatia et Falkenmark, 1992**).

## 1.3 Le cycle de l'eau

Sous l'action du soleil, l'eau des océans, rivières, lacs s'évapore et gagne l'atmosphère. Au contact des couches d'air froid, la vapeur d'eau se condense en gouttelettes et forme des nuages.

L'eau retombe ensuite lors de précipitations (sous forme de pluie, neige ou grêle) directement dans les océans ou sur les continents. Sur terre, l'eau ruisselle alors jusqu'aux rivières ou s'infiltre dans les sols pour alimenter les nappes souterraines.

Au cours de son cycle, l'eau peut donc se charger en éléments indésirables (polluants chimiques, organismes...) qu'il est nécessaire d'éliminer afin de préserver la qualité d'une ressource, abondante à l'échelle de la planète, mais non renouvelable (**Chouteau, 2004**). La figure 01 présente le cycle de l'eau.



**Figure 01:** Cycle de l'eau (Aouadi, 2017).

## 1.4 Les composants du cycle de l'eau

### 1.4.1 Les précipitations

Les précipitations constituent presque toutes nos réserves en eau douce elles sont transférées d'une région à l'autre suivant le climat et le relief (Makhloufi et Abdelouahid, 2011).

### 1.4.2 Le ruissellement

Parvenue sur le sol, une partie des précipitations s'écoule à sa surface vers le réseau hydrographique et les étendues d'eau libre (Makhloufi et Abdelouahid, 2011).

### 1.4.3 L'infiltration

Une partie des précipitations pénètre dans le sol et dans le sous-sol, alimente les réseaux souterrains constituant le stock d'eau du sol et les réserves des nappes aquifères (Makhloufi et Abdelouahid, 2011).

### 1.4.4 L'évapotranspiration

C'est la somme des pertes par transformation de l'eau en vapeur. On distingue deux composantes :

- L'une constituée par l'évaporation.
- L'autre constituée par la transpiration des plantes (Makhloufi et Abdelouahid, 2011).

## 1.5 Eaux de surface

Ce type des eaux englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants.



Ces eaux sont le siège, dans la plupart des cas, d'un développement d'une vie microbienne à cause des déchets rejetés dedans et de l'importante surface de contact avec le milieu extérieur. C'est à cause de ça que ces eaux sont rarement potables sans aucun traitement (**Boeglin, 2001**).

Classiquement, pour les eaux de surface que nous étudierons, nous distinguerons deux grandes catégories des milieux aquatiques (**Genin et al., 2003**) :

- Les eaux stagnantes(ou milieux lenticques), caractérisées par un courant de vitesse nulle, ou quasi nulle.
- Les eaux courantes(ou milieux lotiques).

### 1.5.1 Les eaux stagnantes

Correspondent essentiellement aux lacs, étangs, marais. Elles conservent une certaine autonomie fonctionnelle et forment une unité. Elles se différencient par la superficie, mais surtout par la permanence de l'eau, de la profondeur, l'ensoleillement et le réchauffement du fond (**Genin et al., 2003**).

La distinction entre les trois types de milieux stagnants est établie de la façon suivante :

- **Lac** : milieu stagnant qui possède, en plus de sa zone littorale, une zone profonde privée de lumière où les espèces végétales ne peuvent se développer (**Genin et al., 2003**).
- **Étang** : est une pièce d'eau dont la profondeur est sous nos latitudes, inférieur à 10 m, mais où l'énergie cinétique de vent est en tout saison, susceptible de provoquer un brassage total de la colonne d'eau. Ceci implique une remontée permanente des éléments minéraux en provenance des zones profondes vers la zone trophogène(**Faurie et al., 2003**).
- **Marais** : écosystème dans lequel la profondeur d'eaux est faible, ils comportent plusieurs types d'habitats, associés à des peuplements de végétaux palustres qui leur sont inféodés, représentent autant d'habitats distincts (Profonde maximale un mètre environ) (**Ramade, 1998**).
- **Flaque** : est une petite étendue d'eau temporaire constituée par l'accumulation d'eau, généralement de pluie, dans un creux suffisamment imperméable du sol une flaque mesure généralement de quelques dizaines de centimètres à quelque mètres de diamètre ou de longueur (**wikipedia, 2020 (a)**).

### 1.5.2 Les eaux courantes

Regroupent toutes les eaux « en mouvement » : sources, torrent, ruisseaux, rivières, fleuves, constituant un vaste réseau hydrographique qui mène à la mer.

Ce sont des milieux ouverts présentant des échanges constants avec les systèmes qu'ils traversent (**Genin et al., 2003**).

- **Rivières** : section d'un cours d'eau correspondant à la zone du rithron. De ce fait, elle possède une pente moyenne et encore suffisante pour permettre une bonne oxygénation des eaux. Ce terme est aussi utilisé pour désigner des cours d'eaux de faible longueur et de débit moyen modeste (**Ramade, 1998**).

### 1.6 La pollution des eaux de surface

La pollution des eaux est définie comme une modification des caractéristiques naturelles de celles-ci et elles nécessitent un traitement pour qu'on puisse l'utiliser. Ces éléments indésirables proviennent des excréments chimiques, des rejets provenant d'industries divers et du lessivage des terrains traversés. Le problème de la pollution des eaux représente la cause majeure de la diminution des ressources d'eau potable dans le monde (**Galaf et Ghannam, 2003**).

### 1.7 Origine de la pollution

#### 1.7.1 L'industrie

Les activités industrielles rejettent un bon nombre de substances qui vont polluer nos rivières et nos nappes, parfois d'une manière intensive que l'on n'en connaît pas les effets à long terme. Les rejets industriels renferment des produits divers sous forme insoluble ou soluble d'origine minérale et/ou organique, à caractère plus ou moins biodégradable et parfois toxique même à très faible concentration (**Boeglin, 2001**).

#### 1.7.2 L'agriculture

Elle utilise des engrais chimiques azotés et phosphorés, des produits phytosanitaires destinés à protéger les cultures, ces produits parfois toxiques lorsqu'ils sont utilisés en excès vont contaminer en période de pluie les eaux de surface et les eaux souterraines par infiltration (**Djemmal, 2008**).

#### 1.7.3 Pollution domestique

Nos eaux usées urbaines sont constituées de matières organiques biodégradables certes mais de grandes consommatrices d'oxygène, de germes pathogènes et de produits chimiques **(Degremont et al., 1989)**.

#### **1.7.4 Pollution par les eaux pluviales**

Il ne faut pas oublier par ailleurs la pollution générée par les eaux pluviales. L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l'air **(Djemmal, 2008)**.

#### **1.7.5 Pollution d'origine naturelle**

Certaines substances naturellement présentes dans l'environnement entraînent parfois des problèmes de contamination de l'eau potable. Des composés inorganiques comme le baryum, l'arsenic, les fluorures, le sodium, les chlorures, le mercure, le cadmium et les cyanures peuvent contaminer l'eau potable. L'eau souterraine est particulièrement vulnérable lorsqu'il y a présence de métaux dans les formations géologiques environnantes **(Djemmal, 2008)**.

#### **1.7.6 Pollution par les substances associées au traitement de l'eau**

La chloration de l'eau dans le but de la rendre potable est un procédé très répandu et reconnu efficace. La chloration est même considérée par les experts comme étant l'une des plus importantes initiatives de santé publique du XXe siècle. Cependant, bien qu'il soit efficace pour contrôler principalement les virus et les bactéries, le chlore, en présence de matières organiques, entraîne la formation de plusieurs sous-produits de chloration (SPC) potentiellement cancérigènes comme par exemple les trihalométhanes (THM).

Le sulfate d'aluminium est un produit utilisé pour coaguler les substances contenues dans l'eau. L'eau ainsi traitée présente des concentrations d'aluminium plus élevées que dans l'eau non traitée. La toxicité de l'aluminium a été étudiée en relation avec la maladie d'Alzheimer qui influe sur la mémoire et le comportement des personnes atteintes **(Bouchemele et Hamoudi, 2016)**.



## **Chapitre 02 : Les métaux lourds**

## 2.1 Définition des métaux lourds

Les problèmes liés à la présence de métaux lourds dans l'environnement constituent l'un des enjeux majeurs de santé publique au XXI<sup>e</sup> siècle. Les métaux lourds sont des éléments métalliques caractérisés par une masse volumique importante. Par définition un métal lourd est un métal dont la masse volumique dépasse 5g/cm<sup>3</sup>. Il existe de nombreux métaux dont les plus toxiques, et les plus connus le plomb, le mercure, le cadmium etc (**Lazarin et Lazarin, 2011**).

Un métal est une matière, issue le plus souvent d'un minerai ou d'un autre métal, dotée d'un éclat particulier, bon conducteur de chaleur et d'électricité, ayant des caractéristiques de dureté et de malléabilité, se combinant ainsi aisément avec d'autres éléments pour former des alliages utilisables dans l'industrie (**Gérard, 2001**).

D'un point de vue chimique, les éléments de la classification périodique formant des cations en solution sont des métaux (**Adriano, 2001**).

## 2.2 Classification périodique des éléments

**Tableau 01** : Classification périodique des éléments (**Dayah, 1997**).

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

## 2.3 Classification des métaux lourds

Les métaux lourds peuvent être classés en se basant **sur leur densité** :

- Les métaux lourds sont dits **lourds** si leur densité dépasse 5 g/cm<sup>3</sup>.
- Les métaux lourds sont dits **légers** si leur densité est inférieure à 5 g/cm<sup>3</sup>.

Ces métaux lourds sont dangereux pour la santé humaine à très faible concentration selon « the states environmental protection agency » (**EPA, 2001**).

Cependant, le cadmium, le plomb, le chrome, le zinc et d'autres sont considérés (à moins forte dose pour certains) comme étant dangereux pour la santé humaine et dont la présence dans l'environnement doit être surveillée (**Diffus, 1980**).

## 2.4 Les différents types des métaux

D'un point de vue biologique, on distingue deux types en fonction de leurs effets physiologique et toxique : métaux toxiques et métaux essentiels (**Huynh, 2009**).

### 2.4.1 Les métaux toxiques

Tout élément est toxique quand il est absorbé en excès par rapport à la capacité d'assimilation de l'organisme (**Baath, 1992**).

### 2.4.2 les métaux essentiels ou oligoéléments

Sont des éléments indispensables à l'état de traces pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (**Loué, 1993**).

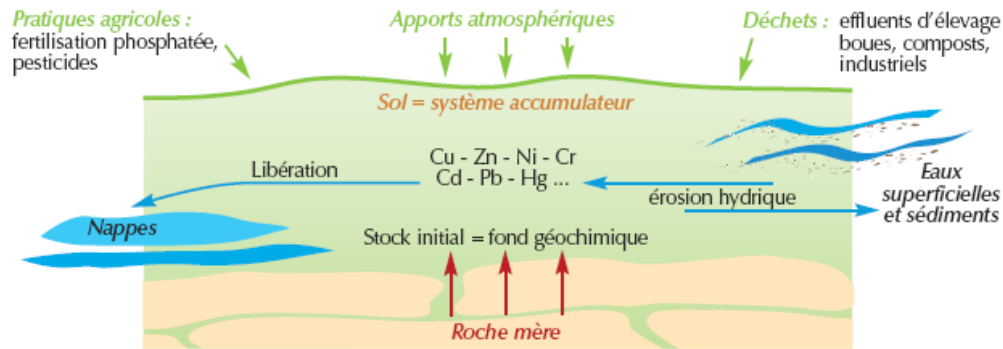
Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre, nickel, zinc, et du Fer (**Kabata et Pendias, 2001**). Letableau02 suivant présente les principaux éléments métalliques essentiels et non essentiels.

**Tableau 02:** Principaux éléments métalliques essentiels et non-essentiels (**Hopkin, 1989**).

Eléments essentiels majeurs	Oligo-éléments essentiels	Eléments "essentiels" en ultra trace	Eléments non essentiels
Calcium, Phosphore, Potassium, Soufre, Magnésium, Chlore, Sodium	Fer, Iode, Cuivre, Manganèse, zinc, Cobalt, Molybdène, Sélénium, Chrome, Nickel, Vanadium, Silicone, Arsenic	Lithium, Fluor, Aluminium, Étain, Plomb, (Cadmium)* *essentiel si deficit de Zinc	Cadmium, Mercure

## 2.5 Les sources des métaux lourds

Le problème principal avec les métaux lourds comme le cuivre, le zinc, le plomb et le cadmium, est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans l'environnement. Leurs présences dans la nature peuvent être naturelles ou anthropiques. La figure 02 présente les origines des métaux dans la nature.



**Figure 02** : Origine et distribution des éléments traces (Robert et Juste, 1997).

### 2.5.1 Sources naturelles

Les réserves les plus importantes en métaux lourds se trouvent dans les roches et/ou les sédiments océaniques, ils sont introduits dans la biosphère via, les volcans, l'activité des sources thermales, l'érosion et l'infiltration (Miquel, 2001).

### 2.5.2 Sources anthropiques

Les principaux types de pollutions anthropiques responsables de l'augmentation des flux de métaux, sont la pollution atmosphérique (rejets urbains et industriels), la pollution liée aux activités agricoles et la pollution industrielle. La pollution atmosphérique résulte des activités industrielles (rejets d'usine) et urbaines (gaz d'échappement, etc...). Il faut distinguer les apports diffus aériens d'origine lointaine des apports massifs localisés d'origine proche. Dans les apports diffus sont classés les poussières et aérosols provenant des chauffages ainsi que des moteurs d'automobiles. Les apports massifs localisés résultent d'apports anthropiques accidentels liés aux activités industrielles sans protection efficace contre la dispersion dans l'environnement (Baize, 1997).

## 2.6 Facteurs modifiant la mobilité des métaux lourds

Les métaux lourds peuvent exister sous forme d'ion libre ou sous forme liée à des particules du sol. Cependant, un métal n'est toxique pour les organismes vivants que s'il est sous forme libre, il est alors bio disponible. Comme tout élément chargé positivement, les cations métalliques peuvent interagir avec toute particule organique ou minérale chargée négativement. L'équilibre

entre les formes libres et fixées de l'ion va dépendre de sa biodisponibilité directement liée à sa toxicité. Enfin, la biodisponibilité des métaux lourds varie en fonction de plusieurs facteurs. Parmi lesquels citant, la capacité d'échange de cations (CEC), le pH, le potentiel redox (Eh), la teneur en phosphate disponible, la teneur en matière organique et les activités biologiques **(Babich et Stotzky, 1980)**.

### 2.6.1 Le pH

Le pH constitue un facteur dont le rôle est crucial pour la mobilité des ions métalliques, car il influence le nombre de charges négatives pouvant être mises en solution **(Mclaughlin et al., 2000)**.

Les protons proviennent majoritairement de la respiration végétale et microbienne, ainsi que de l'oxydation des sulfures. A l'inverse, ils sont consommés par l'hydrolyse des minéraux altérables. D'une façon générale, lorsque le pH augmente, les cations sont moins solubles et les anions sont plus solubles **(Blanchard, 2000)**.

De plus, l'augmentation de pH induit souvent la formation d'espèces précipitées qui peuvent limiter la solubilité et la biodisponibilité de toutes les espèces ioniques **(Deneux-Mustinet et al., 2003)**.

Cependant, elle entraîne également la dissolution de matières organiques et la formation consécutive de complexes organométalliques plus solubles **(Chaignon, 2001)**. Les variations de pH ont donc des conséquences complexes et parfois contraires sur la mobilité des métaux lourds, en particulier en présence de ligands organiques et inorganiques.

### 2.6.2 Le potentiel redox (Eh)

En conditions réduites, la mobilité des métaux lourds est plus faible. Le potentiel redox est fortement lié au pH puisqu'il augmente quand celui-ci diminue **(Alloway, 1995)**.

### 2.6.3 La matière organique

La matière organique dissoute joue un rôle important dans la détermination de la spéciation et de la biodisponibilité des métaux. Les métaux peuvent être complexés par les substances composant la MO et plus particulièrement par les sites carboxyliques (groupements contribuant à la majorité des sites de complexation), azotés et sulfurés qui s'y trouvent **(Le Goff et Bonnomet, 2004)**.



### 2.6.3 L'activité biologique

La compréhension globale des phénomènes biologiques jouant sur la solubilité des métaux lourds dans les sols est rendue difficile par la multiplicité des actions et interactions à tous les niveaux. Les végétaux supérieurs étant au centre de notre étude, et les microorganismes ayant une influence sur l'ensemble du milieu aux échelles de temps et d'espace considérées, nous nous attacherons à développer principalement l'action des microorganismes et des plantes. Les principaux phénomènes d'action sur la mobilité des polluants métalliques sont la solubilisation, l'insolubilisation et la volatilisation (**Remon, 2006**).

### 2.6.4 La température

La température a un impact direct sur la mobilité des éléments métalliques en déplaçant les équilibres des réactions de dissolution - précipitation et co-précipitation, et un impact indirect, en modifiant la teneur en eau du sol, le pH ou l'Eh (**Remon, 2006**).

### 2.6.5 Les carbonates (CaCO<sub>3</sub>)

La forme prédominante des carbonates ( $R^{2+} CO_3^{2-}$  ; R= Ca, Mg, Fe mais aussi beaucoup de métaux divalents présents dans les sols pollués tels que Pb, Zn, Cu, etc.) dans la plupart des sols est la calcite (CaCO<sub>3</sub>). Assez soluble, cette espèce a une influence majeure sur le pH des sols et par conséquent sur les phénomènes d'absorption des métaux. En outre, les réactions de dissolution / précipitation des carbonates favorisent le piégeage des ions métalliques au sein des cristaux formés (**Blanchard, 2000**).

## 2.7 Les métaux lourds dans l'écosystème aquatique

Dans les milieux aquatiques, les métaux peuvent être répartis en cinq compartiments: Eau de mer, sédiment, eau interstitielle, matière en suspension, et le biotope.

L'accumulation des métaux dans les biotopes dépend essentiellement de facteurs physicochimiques ainsi que de facteurs biologiques.

La biodisponibilité des métaux vis-à-vis des organismes, est influencée par la spéciation du métal, et par la chimie de l'eau.

Les forces de liaisons des métaux aux particules et par conséquent leur capacité à être dissociés des sédiments, peuvent aussi affecter la biodisponibilité des métaux vis-à-vis des organismes. En ce qui concerne les facteurs biologiques, l'appartenance à une espèce ou à un groupe zoologique donné, et par conséquent le mode de vie, joue un rôle dominant dans l'accumulation métallique (**Duquesne, 1992**).

## 2.8 Les métaux lourds dans la plante

Pour de nombreuses plantes, des concentrations excessives en métaux entraînent des désordres métaboliques comme le remplacement des ions essentiels par des ions non essentiels, la concurrence pour les emplacements entre les ions métalliques et les métabolites essentiels, des modifications de la perméabilité des cellules membranaires, etc.

Les effets visibles de la toxicité varient selon les espèces, mais les symptômes les plus communs sont les points chlorotiques ou bruns sur les feuilles, les racines brunes et abimées, la nécrose et la diminution significative des rendements de récolte. D'autres effets moins visibles, comme par exemple l'inhibition racinaire, la réduction de la photosynthèse, etc. (**Kabata-Pendias et Pendias, 2001**).

### 2.8.1 Absorption racinaire

La voie principale d'absorption des métaux se fait par simple diffusion au travers de l'apoplaste du cortex racinaire et de l'endoderme (voie apoplastique). Le transport des éléments métalliques à travers la paroi cellulaire se fait passivement par les pores du réseau de la cellulose, de l'hémicellulose et des glycoprotéines (**Briat et Lebrun, 1999**).

### 2.8.2 Translocation

Après l'absorption par les racines, la translocation correspond au transfert des éléments traces métalliques vers les parties aériennes. Elle peut varier considérablement en fonction du métal, mais également de l'espèce végétale (**Briat et Lebrun, 1999**). Le phénomène de translocation vers les parties aériennes des plantes est faible (**Kabata-Pendias et Pendias, 1992**).

### 2.8.3 Accumulation dans les différents organes des plantes

Généralement, les racines ont tendance à accumuler les ETM, les parties reproductrices (fleurs, fruits, graines) à l'exclure et les parties végétatives (tiges et feuilles) sont considérées comme étant intermédiaires ; les teneurs en ETM dans les plantes sont réparties selon le gradient d'accumulation : racines > tiges > feuilles > graines et fruits.

Lors de leur prélèvement par la plante, les métaux se fixent largement sur les parois cellulaires, ce qui explique pourquoi une grande partie des métaux prélevés peuvent se retrouver dans les racines comme cela a été décrit pour le plomb, le cadmium ou le zinc (**Morel, 1997 ; Lasat et al., 2000**).

## 2.9 La toxicité des métaux lourds

Une des principales conséquences de la présence des métaux dans l'eau est leur passage dans la biomasse. Ce transfert peut enchaîner des toxicités directes qui se manifestent rapidement par une atteinte de la biomasse, ou indirectes qui sont liées à l'accumulation progressive de ces métaux par les organismes (**Ramade, 2000**).

Les composés métalliques ont une toxicité variable selon leur nature et leur voie de pénétration (ingestion, respiration, contact avec la peau) (**Chiffolleau et al., 2001**).

On distingue 3 formes différentes de toxicité: aigüe provoquant la mort ou de graves troubles physiologiques, subaigüe et à long terme.

De plus, la toxicité d'un métal est déterminée par la nature chimique de l'environnement aqueux et par la spéciation des ETM (forme chimique sous laquelle le métal est considéré: minérale, organique, complexe ou chélatée)(**Ben Salem, 2014**).

## 2.10 La bioaccumulation des métaux lourds

La bioaccumulation est un phénomène par lequel une substance présente dans un biotope pénètre dans un organisme. Dans ce processus il y a simple transfert d'une fraction de la substance contenue dans le biotope dans l'organisme, de sorte que la concentration dans ce dernier, est généralement supérieure ou égale, à celle du polluant dans l'eau ou le sol (**Miquel, 2001**).

### 2.10.1 Bioconcentration

La bioconcentration est un cas particulier de la bioaccumulation. Elle est définie comme le processus par lequel une substance (ou un élément) se trouve présente dans un organisme vivant à une concentration supérieure à celle de son milieu environnant. C'est donc l'accroissement direct de la concentration d'un contaminant lorsqu'il passe de l'eau à un organisme aquatique (**Van Der Oost et al., 2003**).

Le facteur de bioconcentration (BCF) d'un produit chimique est le ratio de ses concentrations dans l'organisme et dans l'eau pendant l'état stable ou l'équilibre (**Vander Oost et al., 2003**).

### 2.10.2 Biodisponibilité

La biodisponibilité a été définie comme la fraction de la quantité de l'élément chimique présent dans le sol/sédiment et l'eau (interstitielle) qui peut potentiellement être prise pendant la durée de vie de l'organisme dans ses tissus (excluant le tube digestif) (**Van Der Oost et al., 2003**).

## 2.11 propriétés de quelques métaux lourds étudiées

Les éléments traces sélectionnés pour ce travail sont parmi les polluants métalliques les plus fréquemment rencontrés dans les sols contaminés et étudiés :

### 2.11.1 Le cadmium

Le cadmium est un métal relativement rare dans la croûte terrestre (0,2 mg/kg), 67<sup>ème</sup> élément par ordre d'abondance dans la lithosphère. C'est un élément naturel présent dans certains minerais sous forme d'impuretés. Il ne se trouve pas à l'état élémentaire dans la nature ; il est généralement présent dans des minerais de zinc ou de plomb. Il peut se constituer suite à une altération et une érosion des roches cadmifères et constituer également un produit de raffinage d'autres métaux tel que Cu, Pb et le Zn. La concentration normale en Cadmium dans l'air et dans l'eau est de 0,001 µg/m<sup>3</sup> et 1 µg/l respectivement (**Haguenoer et Furon, 1981**). Dans les sols, la concentration en Cadmium est de 0,1 à 11 ppm selon qu'il dérive des roches éruptives, métamorphiques ou sédimentaires (**Weissenhorn, 1994**).

Le cadmium (Cd) est un métal de transition purement toxique pour la cellule, de solubilité élevée ce qui fait de lui l'un des métaux lourds les plus dangereux après le mercure (**Nies, 1999**). Il est naturellement présent à l'état de traces dans les roches superficielles de l'écorce terrestre (**Bendjama, 2007**).

### 2.11.2 Le cuivre

Ce métal ductile et malléable de couleur rouge-brun est reconnu pour sa résistance à la corrosion. Il est considéré comme un élément essentiel à la biologie des plantes, des animaux et de l'homme. Le Cu est indispensable au métabolisme de plantes et des êtres vivants (**Babiche et al., 1989**).

La toxicité des organismes vivants vis à vis du cuivre dépend de sa forme, de son état d'oxydation et de sa concentration (**Bendjama, 2007**).

### 2.11.3 Le plomb

L'élément Pb est lourd, mou, présent dans la nature sous forme de minerai. Une fois extrait, transformé par procédé industriel puis introduit dans l'environnement, il représente un danger potentiel permanent. Dans l'environnement, presque tout le plomb provient de l'activité humaine. Il n'existe cependant aucune technologie qui peut le détruire ou le rendre inoffensif.

Les sources naturelles de plomb atmosphérique incluent: l'érosion éolienne des sols, les

poussières volcaniques, les incendies de forêts, les sels marins et le délabrement du radon **(Coleman, 1999)**.

Chez les plantes, le plomb diminue la croissance des racines spécialement les racines principales même en présence de faibles concentrations. Elles deviennent épaisses, courtes et très ramifiées. Aussi, des précipitations de plomb ont été observées dans les zones apicales chez les plantes traitées par le plomb **(Kopittke et al., 2007)**.

#### **2.11.4 Le Zinc**

Dans les sols, il est exclusivement présent sous l'état d'oxydation ( $ZnS$ ,  $ZnSO_4$ ,  $ZnAl_2O_4$ ,  $ZnCO_3$ ,  $Zn_3(PO_4)_2$  et  $Zn_2SiO_4$ ) **(DalCorso., 2012)** et dans la solution du sol sous la forme  $Zn^{2+}$  ou plus souvent sous la forme de complexes solubles ou insolubles avec les matières organiques **(Barber, 1995)**. La proportion de Zn complexé dans la solution de sol augmente avec le pH; ainsi, la concentration en solution de zinc (Zn échangeable) augmente fortement pour des  $pH < 6$  **(Tremel-Schaub et Feix, 2005)**. Le  $Zn^{2+}$  est considéré comme très mobile **(Goulding et Blake., 1998)**.



## **Chapitre 03 : Les macrophytes aquatiques**

### 3.1 Définition des macrophytes

En 1977, **Holmes et Whitton** se penchent sur l'étude de végétaux aquatiques macroscopiques, observables à l'œil nu et facilement identifiables à l'observation. C'est ainsi qu'ils définissent les macrophytes aquatiques. Cette définition est essentiellement portée sur la taille de l'organisme sans aucune distinction d'ordre taxonomique. Plus tard, (**Wiegleb, 1988**) apporte une nuance liée à la caractéristique aquatique du milieu et précise les taxa concernés : « les macrophytes aquatiques désignent des végétaux macroscopiques se développant entièrement ou partiellement dans un milieu aquatique ».

La plupart des plantes aquatiques macrophytes sont composées de racines, de tiges et de feuilles. Toutefois, il arrive que certaines plantes aquatiques macrophytes ne possèdent pas de racines et dérivent au gré des courants, comme la lentille d'eau (*Lemna minor*) (**Fischesser et Dupuis-Tate, 2007**).

En fonction de l'inféodation à l'eau, on distinguera les macrophytes réellement aquatiques ou hydrophytes, les végétaux qui poussent “ les pieds dans l'eau ” ou héliophytes (**Holmes et Whitton, 1977**).

(**Haury, 1992**) propose une classification synthétique de ces types éco-morphologiques en prenant en compte les relations entre la morphologie des végétaux, les conditions de submersion et leur relation au substrat.

### 3.2 Les types des macrophytes

#### 3.2.1 Les hydrophytes

Plantes aquatiques dont l'appareil végétatif se développe entièrement dans l'eau ou à sa surface (**Lazarine etLazarine, 2011**). Comprenant les espèces totalement submergées (se reproduisant dans l'eau) ou ayant des feuilles flottantes (développant leur appareil végétatif dans la colonne d'eau ou à sa surface). Ces dernières peuvent être ancrées au fond ou flotter librement (captant directement les nutriments dans l'eau) (**Haury, 1992**).

##### 3.2.1.1 Lentille d'eau

###### 3.2.1.1.1 Systématique

Règne : *Plantae*

Classe : *angiosperme*

Classe : *monocotylédones*

Ordre : *Alismatales*



Figure 03 : *Lemnaminor* (**wikipedia, 2020(b)**).

Famille : *Araceae*

Sous-famille : *Lemnoideae*

Genre : *Lemna*

Espèce : *Lemna minor* (**wikipedia, 2020(b)**)

### 3.2.1.1.2 Description

La lentille d'eau forme de grands tapis à la surface des eaux stagnantes. Ses frondes sont très fines et parfois teintées de rouges. Elle est très utile pour couvrir la surface des points d'eau en été qu'elle protège ainsi de l'ensoleillement et donc du réchauffement (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

### 3.2.1.1.3 Habitat

La lentille d'eau se multiplie très facilement, en prélevant et en disséminant de petites colonies dans des eaux stagnantes.

Elle apprécie particulièrement les eaux calcaires, et les taux élevés de nitrate ne pourront que la faire prospérer. Résistante à des températures basses (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

### 3.2.1.2 Nénuphar blanc

#### 3.2.1.2.1 Systématique

Règne : *Plantae*

Sous règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Magnoliopsida*

Sous-classe : *Magnoliidae*

Ordre : *Nymphaeales*

Famille : *Nymphaeaceae*

Genre : *Nymphaea*

Espèce : *Nymphaea alba* (**wikipedia, 2020(c)**)



Figure 04: *Nymphaea alba* (**wikipedia, 2020 (c)**).



### 3.2.1.2.1 Description

Feuilles larges, suborbiculaires en cœur, fleurs blanches, rarement roses, grandes, flottantes, à odeur suave (**Tela Botanica, 2020**).

### 3.2.1.2.2 Habitat

La Nénuphar blanc s'enracine dans la vase peu profonde (moins d'un mètre) des secteurs abrités des lacs, étangs et tourbières où ils créent un magnifique tapis flottant. Leurs colonies, parfois très étendues, sont parfois envahissantes (**Fleurbec, 1987**).

### 3.2.1.3 Nénuphar jaune

#### 3.2.1.3.1 Systématique

Règne : *Plantae*

Sous règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Magnoliopsida*

Sous classe : *Magnoliidae*

Ordre : *Nymphaeales*

Famille : *Nymphaeaceae*

Genre : *Nymphaea*

Espèce : *Nymphaealutea* (**wikipedia, 2020(d)**)



Figure 04 : *Nymphaealutea* (**Fleurbec, 1987**).

#### 3.2.1.3.2 Description

Les nénuphars sont des plantes aquatiques flottantes fréquentes dans les eaux tranquilles (**Fleurbec, 1987**). Il s'agit d'une espèce vigoureuse, dont le feuillage orbiculaire flotte à la surface des eaux peu courantes. En été, des fleurs solitaires jaune à orange émergent de l'eau (**Lazarine etLazarine, 2011**).

Le grand nénuphar jaune possède des feuilles et des fleurs plus grandes que son frère, moins abondant, le petit nénuphar jaune (**Fleurbec, 1987**).

### 3.2.1.3.3 Habitat

On les retrouve habituellement à une profondeur de 0,5 à 1,5 mètre. Ils apprécient plus particulièrement les fonds vaseux des eaux oligotrophes, sans pour autant renier les eaux eutrophes (**Fleurbec, 1987**).

La multiplication de ce nénuphar se fait par division printanière. Il préfère la zone ombragée, le substrat riche et tolère des zones de faibles courants. Résistante à des températures très basses (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

### 3.2.1.4 Le potamot à feuilles nageantes

#### 3.2.1.4.1 Systématique

Règne : *Plantae*

Sous règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous classe : *Alismatidae*

Ordre : *Najadales*

Famille : *Potamogetonaceae*

Genre : *Potamogeton*

Espèce : *Potamogeton natans* (**wikipedia, 2020** (e))



Figure 06 : *Potamogeton natans* (**Lapointe et al., 2014**).

#### 3.2.1.4.2 Description

Cette plante possède deux types de feuilles. Les premières sont submergées, alors que les deuxièmes flottent à la surface de l'eau. Les feuilles submergées restent rigides et assez pointues, alors que les flottantes sont plus arrondies. Les tiges cylindriques sont souvent tachetées de rouille et partent d'un rhizome qui se trouve assez profondément dans le substrat. Cette plante produit des épis cylindriques qui sortent de l'eau (**Lapointe et al., 2014**).

#### 3.2.1.4.3 Habitat

Eaux peu profondes des marais, étang et lac. Préfère les substrats vaseux avec beaucoup de matière organique (**Lapointe et al., 2014**).

Les potamots supportent les eaux légèrement courantes, ils préfèrent les expositions ensoleillées. L'hiver certains peuvent supporter des températures inférieures à  $-15^{\circ}\text{C}$  (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

### 3.2.2 Les hélophytes

Composés par les plantes dont les racines et la base de la tige se trouvent presque constamment immergées mais dont les feuilles et les inflorescences s'élèvent au-dessus de l'eau (**Haury, 1992**).

#### 3.2.2.1 Jonc fleuri ou butome en ombelle

##### 3.2.2.1.1 Systématique

Règne : *Plantae*

Sous règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous classe : *Alismatidae*

Ordre : *Alismatales*.

Famille : *Butomaceae*

Genre : *Butomus*

Espèce : *Butomus umbellatus* (**wikipedia, 2020** (f))



Figure 07 : *Butomus umbellatus* (**wikipedia, 2020**).

##### 3.2.2.1.2 Description

Plante vivace de 40-80 cm, verte, à rhizomes traçants, tiges nues, lisses sur le frais, finement striées sur le sec, faciles à rompre, à moelle continue, rarement creuses (**Tela Botanica, 2020**).

##### 3.2.2.1.3 Habitat

Le jonc fleuri exige d'avoir les pieds dans l'eau pour prospérer. Il apprécie l'exposition ensoleillée. Il craint les gelées au-delà de  $-10^{\circ}\text{C}$ . Il peut être multiplié par semis, mais la division des touffes s'avère plus efficace. (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

### 3.2.2.2 Iris des marais

#### 3.2.2.2.1 Systématique

Règne : *Plantae*

Sous-règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous-classe : *Liliidae*

Ordre : *Liliales*

Famille : *Iridaceae*

Genre : *Iris*

Espèce : *Iris pseudacorus*

Nom commun : Iris des marais, Iris jaune, Iris faux acore (**wikipedia, 2020(g)**).



Figure 08: *Iris pseudacorus* (**wikipedia, 2020(g)**).

#### 3.2.2.2.2 Description

Plante vivace de 40 cm à 1 mètre, glabre, inodore, à rhizome épais feuilles en glaiive, égalant presque la tige rameuse au sommet et arrondie-comprimée (**Tela Botanica, 2020**).

#### 3.2.2.2.3 Habitat

Une fois installé, l'iris peut s'étaler et devenir envahissant. Il est conseillé de le planter en automne, dans un contenant. Il prospère au soleil, et dans une terre riche et fertile (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

### 3.2.2.3 Jonc épars

#### 3.2.2.3.1 Systématique

Règne : *Plantae*

Sous-règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous-classe : *Commelinidae*

Ordre : *Juncales*

Famille : *Juncaceae*

Genre : *Juncus*

Espèce : *Juncus effusus* (**wikipedia, 2020 (h)**)



Figure 09 : *Juncus effusus* (**Lapointe et al., 2014**).

### 3.2.2.3.2 Description

Cette plante produit de gros rhizomes ramifiés et pousse en touffes très denses. Les tiges sont flexibles et peuvent atteindre un mètre trente. On retrouve les feuilles à la base de la plante sous forme de gaines rougeâtres.

Au deux tiers de la tige on retrouve les inflorescences retombantes formées par une bractée cylindrique brune. Cette plante est une source de nourriture pour la sauvagine ainsi que pour les originaux (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

### 3.2.2.3.3 Habitat

Marais, marécage, prairie humide, rivage et fossé. (**Lapointe et al., 2014**).Préfère une température supérieur à -15C° (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

### 3.2.2.4 Les roseaux communs

#### 3.2.2.4.1 Systématique

Règne : *Plantae*

Sous-règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous-classe : *Commelinidae*

Ordre : *Cyperales*

Famille : *Poaceae*

Genre : *Phragmites*

Espèce : *Phragmites australis* (**wikipedia, 2020(i)**)



Figure 10 : *Phragmites australis*  
(**Wikipedia, 2020(i)**).

#### 3.2.2.4.2 Description

Le roseau commun est haut de 3m. Son inflorescence est violette en été, puis jaune doré à l'automne. Elle peut mesurer jusqu'à 40cm. Son inflorescence est une panicule plumeuse de couleur rouge à brun. La tige non ramifiée porte des feuilles longues et planes (**Gagnon, 2012**).

#### 3.2.2.4.3 Habitat

C'est une plante qui résiste aux milieux les plus argileux est rocailleux, facile à implanter en milieux marécageux (**Fauteux, 2002**).

Le roseau commun, pour sa part est presque complètement cosmopolite (**Gagnon, 2012**).

### 3.2.2.5 Les massettes ou massette à feuille larges

#### 3.2.2.5.1 Systématique

Règne : *Plantae*

Sous-règne : *Tracheobionta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Sous-classe : *Commelinidae*

Ordre : *Typhales*

Famille : *Typhaceae*

Genre : *Typha*

Espèce : *Typha latifolia* (**wikipedia, 2020 (j)**)



Figure 11 : *Typha latifolia*

(**Marie et al., 2002**).

#### 3.2.2.5.2 Description

Cette espèce atteint régulièrement 3m de haut. Elle forme de grandes touffes de feuilles mesurant jusqu'à 2 cm de large (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

La hauteur de la tige varie entre 100 à 270 cm et la taille de la feuille entre 6 à 25 mm. Sans aucun parfum ni nectar, elles se décrivent comme étant linéaire, avec des épis staminés et une floraison estivale. Ces plantes produisent beaucoup de biomasse et leurs longues tiges assurent l'oxygénation du substrat (**Gagnon, 2012**).

#### 3.2.2.5.3 Habitat

Elles proviennent des régions tempérés et chaudes des deux hémisphères et on les retrouve particulièrement en Europe, en Asie et en Amérique. Elles colonisent les marais et les rivages saturés en eau douce (**Gagnon, 2012**).

### 3.3 Rôles majeurs des macrophytes

**Tableau 03** : Les rôles des différentes parties des macrophytes (**Sciences Eaux et Territoires, 2014**).

Partie des plantes	Rôle
<b>Partie aérienne</b>	Atténuation de la lumière, réduction de la photosynthèse dans les eaux.
	Influence du microclimat, isolation (hiver ou été).
	Réduction de la vitesse du vent et du risque de remise en suspension des sédiments.
	Évapotranspiration estivale.
	Aspect esthétique positif du système.
<b>Racine et rhizomes dans les sédiments ou les dépôts de surface</b>	Stabilisation de la surface des sédiments, réduction de l'érosion.
	Prévention du colmatage dans les systèmes à écoulements verticaux, effet de filtre des gros déchets.
	Augmentation de surface de contact pour les développements bactériens
	Libération d'oxygène augmentant la nitrification et la dégradation bactérienne.
	Production d'antibiotiques, de phyto-métallophores et de phytochélatines.
	Absorption des éléments nutritifs.



## **Chapitre 04 : La phytoremédiation**



## 4.1 Définition de la phytoremédiation

La phytoremédiation est une technologie émergente qui utilise les plantes ou les microorganismes de la rhizosphère pour extraire, transformer ou stocker les polluants contenus dans les sols, les sédiments, les eaux souterraines ou de surface et même l'atmosphère (Susarlaet al., 2002).

Les plantes peuvent transporter le contaminant, le dégrader ou encore améliorer les conditions de vie d'autres dégradeurs. Cette technologie est surtout utilisée pour traiter les contaminations de la grande surface (Gao et Zhu, 2005).

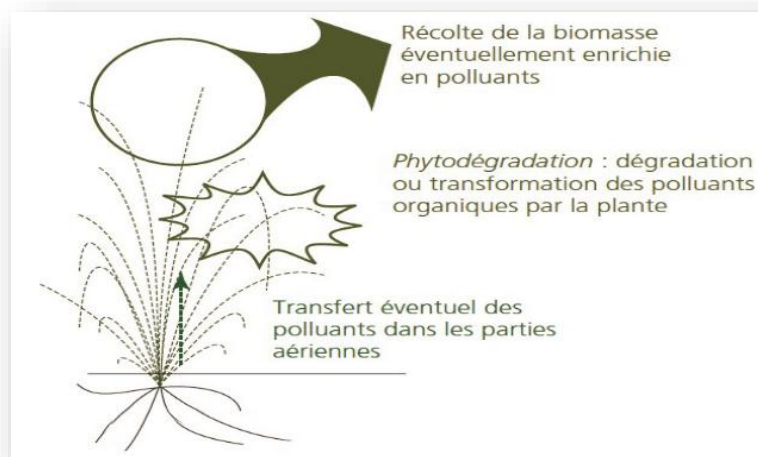
## 4.2 Les stratégies de la phytoremédiation

Plusieurs mécanismes permettant aux plantes l'élimination des polluants. Les principales stratégies sont détaillées ci-dessous :

### 4.2.1 Par dégradation

#### 4.2.1.1 La phytodégradation

Dans la phytodégradation, aussi appelée phytotransformation, les plantes absorbent et dégradent les polluants organiques dans leurs tissus ou sécrètent des enzymes liées à la dégradation dans la rhizosphère (Pilon-Smits, 2005).



**Figure 12** : Fonctionnement de la phytodégradation. (Bert et al., 2012)

#### 4.2.1.2 La Rhizostimulation (proche de la rhizodégradation)

La phyto / rhizodégradation est une technique utilisant des végétaux et des microorganismes pour dégrader des polluants organiques en constituants élémentaires (minéralisation). Ce principe de dépollution repose donc entièrement sur l'activité biologique qui se développe dans la rhizosphère. Comme dans le milieu aquatique, cette activité est favorisée -en partie- par l'aérenchyme, qui permet de canaliser l'oxygène atmosphérique jusqu'aux racines mais aussi par les exsudats. Cette oxygénation de la rhizosphère permet un développement important de nombreux organismes, dont certains sont capables de dégrader les polluants les plus toxiques (Bruce et Pivetz, 2001).

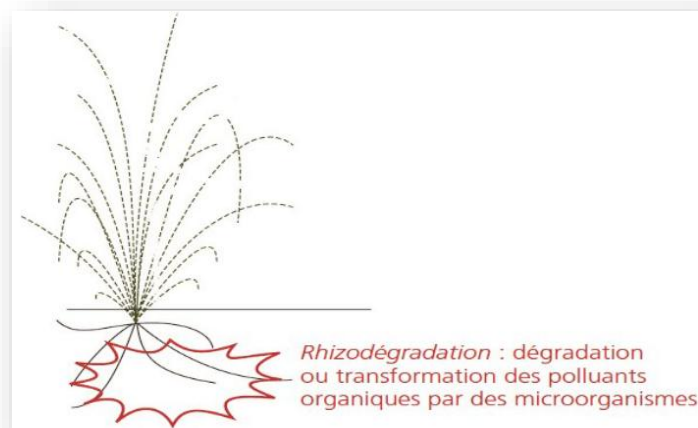


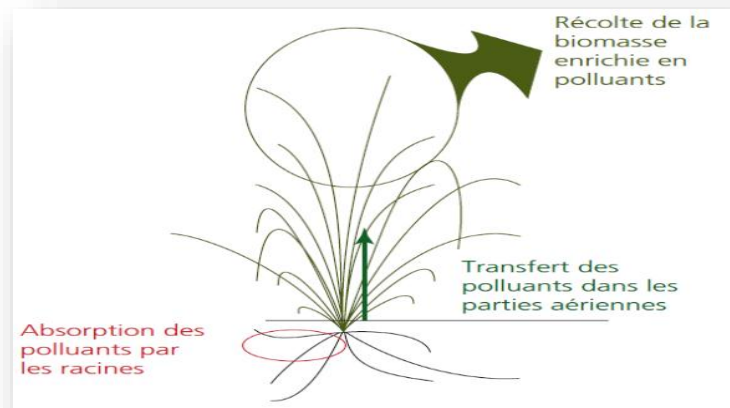
Figure 13 : Fonctionnement de la rhizodégradation (Bert et al., 2012)

#### 4.2.2 Par accumulation

##### 4.2.2.1 La phytoextraction

La phytoextraction utilise des plantes capables de prélever les éléments traces toxiques et de les accumuler dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltées puis incinérées (Jemal et Ghorbal, 2002).

Dans ce processus, les plantes absorbent les polluants du sol et de l'eau, les translocalisent et les stockent dans la biomasse des plantes. La phytoextraction vise à supprimer les polluants sur les sites contaminés. Ce processus est habituellement observé dans les plantes hyperaccumulantes résistantes aux polluants (Vamerali et al., 2010).



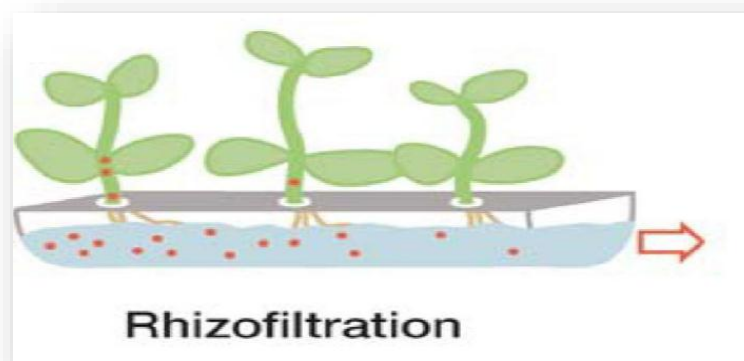
**Figure 14** : fonctionnement de la phytoextraction. (Bert et al., 2012)

La phytoextraction est l'utilisation d'espèces végétales qui, en accumulant les éléments traces dans leurs parties aériennes récoltables, permettent de réduire les concentrations de polluants dans les sols, et ainsi contribuent à leur dépollution. Celle-ci n'est cependant que partielle car elle ne concerne que la fraction phytodisponible de polluants, c'est-à-dire la fraction de polluants susceptible d'être assimilée par les espèces végétales mises en œuvre (Bert et al., 2012).

#### 4.2.2.2 La rhizofiltration

La rhizofiltration repose sur le phénomène selon lequel certaines plantes sont capables de fixer les polluants dans leurs racines. Cette fixation permet de rallonger significativement le temps de séjour des polluants dans le milieu et d'améliorer ainsi les possibilités de leur dégradation par les micro-organismes (Bruce et Pivetz, 2001).

Elle repose souvent sur des systèmes en réacteur qui maximisent le contact entre l'eau et les racines, et minimisent ainsi la durée du traitement. La rhizofiltration peut prendre la forme d'un étang artificiel ou d'un système hydroponique (Pilon-Smits, 2005).



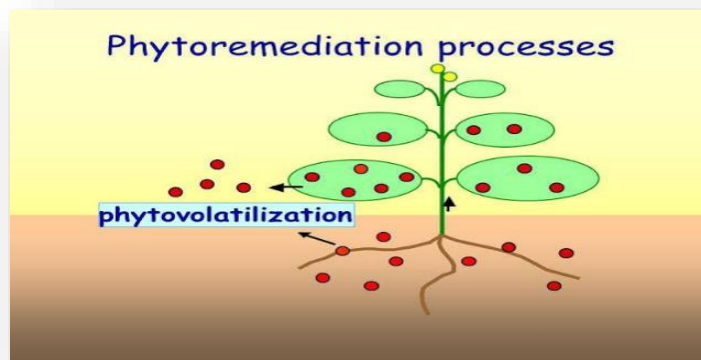
**Figure 15** : La rhizofiltration (Pilon-Smits, 2005).

### 4.2.3. Par dissipation

#### 4.2.3.1 La phytovolatilisation

La phytovolatilisation est l'utilisation des plantes pour mettre en phase gazeuse certains polluants présents dans l'eau. Ce procédé est également efficace pour dépolluer les sols, les boues ou les sédiments contaminés. Des métaux lourds mais aussi des molécules chimiques comme le trichloréthylène peuvent ainsi être volatilisés (**Bruce et Pivetz, 2001**).

Utilisation de plantes qui absorbent des contaminants Organiques et autres produits toxiques, transformant ceux-ci en éléments Volatiles peu ou pas toxiques et les relâchant dans l'atmosphère via leurs feuilles (**Baker et al., 2000**).



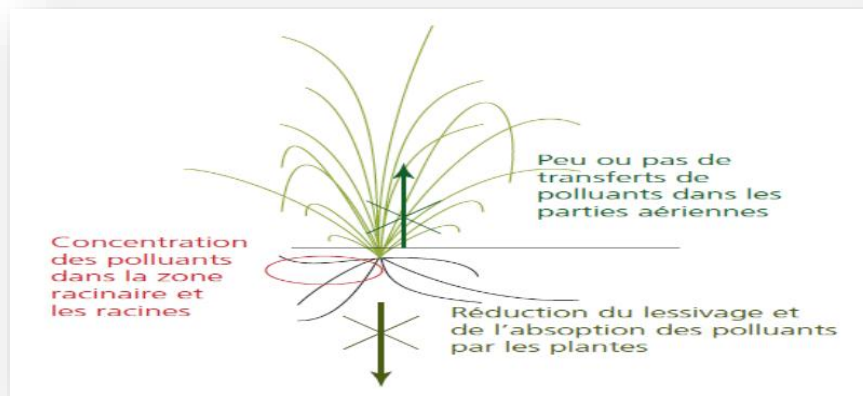
**Figure 16** : Le processus de la Phytovolatilization (**Pilon-Smits, 2005**)

### 4.2.4 Par Immobilisation

Pour le confinement des matières organiques et/ou inorganiques contaminantes.

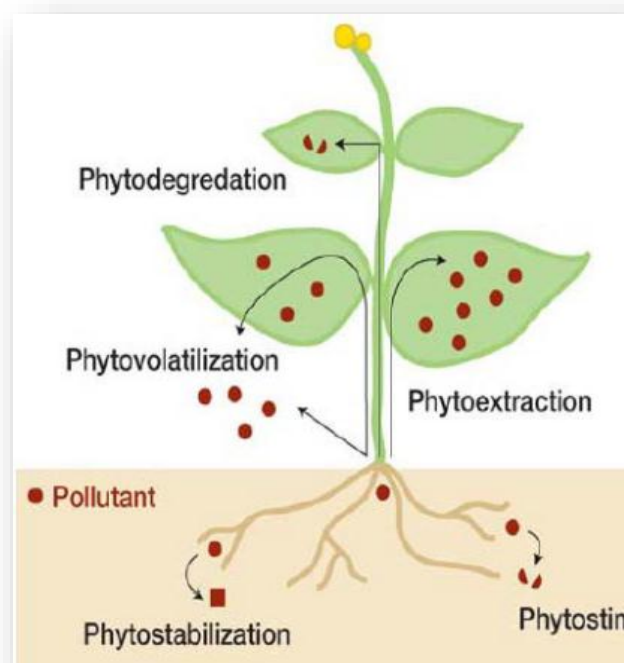
#### 4.2.4.1 Phytostabilisation

Les plantes réduisent la mobilité et la phytodisponibilité des contaminants dans l'environnement. Ce processus n'élimine pas les polluants des sites contaminés, mais réduit leur mobilité et exclut les métaux de l'absorption des plantes (**Vamerali et al., 2010**).



**Figure17** : Fonctionnement de la phytostabilisation (Bert et al., 2012).

La phytostabilisation est une technique de stabilisation basée sur l'utilisation des végétaux. Ce n'est pas une technique de dépollution mais un mode de gestion destiné à stabiliser les éléments traces du sol c'est-à-dire les métaux (ex : zinc, cadmium) et les métalloïdes (ex : arsenic). Les espèces végétales, éventuellement en combinaison avec des amendements (phytostabilisation aidée), réduisent la mobilité des polluants et donc les transferts horizontaux et verticaux de polluants (Bert et al., 2012).



**Figure 18**: Les principales techniques de phytoremédiation (Pilon-Smits, 2005).

Au cours de l'évolution, les plantes ont développé des mécanismes complexes pour absorber les substances organiques ou minérales du sol, de l'eau et de l'air à travers leurs racines et leurs feuilles, lesquelles sont ensuite transportées dans d'autres parties de la plante pour être utilisées, transformées, dégradées ou stockées (**Cunningham et al., 1996**).

#### 4.3 Types des plantes utilisées dans la phytoremediation

Tous les végétaux absorbent des éléments minéraux. Cependant, certains présentent la particularité de prélever en grande quantité un élément donné (**Baker et al., 2000**).

Il existe deux catégories de plantes susceptibles d'intervenir dans les processus de phytoremediation.

##### 4.3.1 Les métallophytes

D'une part, il y a les plantes dites «**tolérantes aux métaux**» appelées plantes **métallicoles**. Ces plantes sont potentiellement utiles pour la phytostabilisation et la phytovolatilisation ainsi que pour l'étude des mécanismes de tolérance mais leur capacité d'accumulation des métaux dans les parties aériennes est faible (0.005 à 0.05% de la matière sèche). Elles présentent donc peu d'intérêt pour la phytoextraction (**Baker et al., 1997**).

##### 4.3.2 Les hyperaccumulatrices

En revanche, il existe des plantes dites «**hyperaccumulatrices** » (**Brooks, 1998**) qui sont capables de stocker dans les tiges et les feuilles de 10 à 500 fois plus d'éléments métalliques que les autres espèces végétales.

- 10 µg de Hg/g de MS (matière sèche).
- 100 µg de Cd/g de MS.
- 1000 µg de As, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Se/g de MS.
- 10 000 µg de Mn, Zn/g de MS.

#### 4.4 Exemples des plantes utilisées dans la phytoremediation

##### 4.4.1 *Typha latifolia*

S'est avéré un efficace bioaccumulateur du zinc, des concentrations de 1400mg.kg<sup>-1</sup> dans les racines de plantes croissant sur des sédiments ayant une teneur de 10mg.kg<sup>-1</sup> ont été relevées (**Ramade, 1997**).

##### 4.4.2 *Eichhorniacrassipes*

Une hydrophyte flottante, est une plante très prometteuse pouvant accumuler de nombreux métaux lourds suite à l'absorption d'eau (**Liao et Chang, 2004**).

#### 4.4.3 *Populus* sp :

Constitue l'une des espèces les plus efficaces en termes de dépollution des eaux par volatilisation (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

#### 4.4.4 *Le Phragmites australis*

Sont capables de retenir 99% de chrome issu des tanneries locales. Cette espèce accumule également le zinc, plomb et le cadmium (**Lazarine et Lazarine, 2011**).

### 4.5 Avantages et inconvénients de la phytoremédiation

**Tableau 04** : les avantages et les inconvénients de la phytoremédiation : (**Cunningham et al., 1995 ; Henry, 2000**).

Avantages	Inconvénients
Utilisé pour une grande diversité de polluants organiques/inorganiques.	Limité aux sites à faible contaminant.
Application in situ/ex situ.	Traitement des déchets potentiellement dangereux.
Diminution de la dispersion dans l'eau (lixiviation) et l'air.	Dépend des conditions climatiques.
Méthode peu coûteuse en moyen humain et matériel.	La consommation de tissus végétaux contaminés est également préoccupante.
Ecologiquement adaptée et esthétique.	Durée de remédiation longue.
Facile à mettre en œuvre.	
Réduit la quantité de déchets à stocker jusqu'à 95%.	

## 4.6 Résultats de quelques travaux sur la phytoremédiation

### 1)

Les résultats de l'étude réalisée sur l'évaluation de transfert des métaux lourds dans le système sol-plante par *Phragmites australis* dans le bassin versant de l'oued Nil (Jijel), montrent une variation très importante de l'accumulation de Pb et Cd dans les feuilles et les racines en fonction des stations.

Les concentrations en Pb dans les racines sont supérieures aux normes ainsi que pour les feuilles avec des différences d'une station à l'autre. Donc on conclue que le *Phragmites australis* présente des capacités de concentration élevées pour le Pb.

Les concentrations en Cd dans les racines et dans les feuilles sont presque égales et sont supérieures aux normes. Donc on conclue que *Phragmites australis* a également des capacités de concentration élevées pour Cd.

*Phragmites austaralis* peut absorber le Pb et le Cd à partir des racines et les transférer vers la partie aérienne de la plante (**Hammadache et al., 2016**)

### 2)

Les résultats de l'étude réalisée sur la contribution à l'évaluation des éléments traces métalliques (Cd, Cu, Zn) par les feuilles de la végétation spontanée de l'oued Amsal (*Inula viscosa L*, *Mentha spicata L*, *Silybum marianum L*, *Pteredium aquilinum L*) a montré que les teneurs en Cd dans la partie aérienne de différentes espèces sont variables, minimale au niveau de la station amont (*Mentha spicata L*) et maximale au niveau de la station avale (*Inula viscosa*).

Les teneurs en Cu de la partie aérienne de différentes espèces sont variables au niveau de différentes stations. Elles sont minimales pour (*Inula viscosa*) et maximale pour (*Pterediumaquilinum L*) au niveau de la même station avale.

Les teneurs en Zn dans la partie aérienne de différentes espèces sont variables, minimale pour l'espèce (*Pteredium aquilinum L*) et maximale pour l'espèce (*Inula viscosa*) au niveau de la même station avale.

Les parties aériennes des différentes espèces végétales étudiées présentent une capacité d'absorption et d'accumulation des éléments traces métalliques variable : faible, moyenne ou forte (**Bouzid ., 2018**).



## 3)

Une autre étude sur la contamination par les métaux lourds de certaines espèces macrophytes aquatiques d'oued Nil (Wilaya de Jijel) a été réalisée.

Les résultats obtenus par cette étude sur l'évaluation de la tolérance et la bioaccumulation des éléments traces métalliques par trois espèces végétales, (*Phragmites australis*, *Carex riparia*, *Scirpus Lacustris*) ont montré que ces espèces possèdent une capacité importante d'absorption et d'accumulation des métaux (Cd, Pb, Zn, Cu) dans les parties aériennes et souterraines.

Les teneurs les plus élevées en Cadmium sont enregistrées dans les racines et les feuilles des deux espèces *Carex riparia* et *Scirpus Lacustris*.

Par contre, les teneurs en Pb dans les feuilles de l'espèce *Scirpus Lacustris* sont plus importantes que dans les racines des autres espèces.

En outre, il semble que la capacité d'accumulation de Zinc est très importante et presque égale dans les parties aériennes et souterraines des trois espèces.

Aussi, la teneur en Cuivre est très élevée dans les racines de l'espèce *Scirpus Lacustris* par rapport aux autres espèces.

Le Zinc est donc le métal le plus absorbé par les racines pour les espèces étudiées.

Ainsi, les résultats de cette expérience ont montré que les trois espèces macrophytes étudiées ont une bonne capacité de s'installer et de se développer sur les milieux contaminés par les métaux lourds grâce à leurs propriétés de phytoremediation (**MazhoudetSiari., 2011**).

## 4)

Le travail de recherche portant sur la dynamique de la pollution par les métaux lourds de l'eco-complexe de zones humides de la Wilaya de Jijel : Cas du marais de Redjla Taher, a montré que les teneurs en Cd des sept espèces de macrophytes aquatiques étudiées présentent une différence négligeable entre les racines et les feuilles et entre les espèces.

Chez le *Phragmites australis*, *Alisma plantago-aquatica L*, le *Scirpus palustris L*, le *Cyperus longus L* et le *Juncus acutus*, les valeurs de FBC de Cd les plus élevées sont enregistrées aux niveaux des parties aériennes

Au contraire, les valeurs de FBC des racines chez l'*Iris pseudacorus* sont supérieures par rapport aux parties aériennes

Alors que chez le *Sparganium erectum* L la même valeur a été enregistrée dans les deux compartiments (les racines et tige + feuilles).

Le Cr, Cu, Mn et Zn sont accumulés dans les racines à des taux supérieurs à ceux enregistrés au niveau des parties aériennes et ceci pour toutes les espèces étudiées.

Les teneurs de Pb dans les racines sont plus élevées que dans les parties aériennes chez *Phragmites australis*, *Alisma plantago-aquatica* L *Scirpus palustris* L, *Cyperus longus* L et *Juncus acutus*, au contraire chez le *Sparganium erectum* et l'*Iris pseudacorus* où les FBC pour les parties aériennes sont supérieures à ceux calculées pour les racines (**Bencharif, 2012**)

## 5)

Selon l'étude de la tolérance et l'accumulation de cuivre et de chrome chez deux espèces de lentilles d'eau : *Lemna minor* et *Lemna gibba* dans les marais de Smir (Région de Tétouan, Maroc).

Les résultats montrent que l'accumulation du Cr est plus importante que celle du Cu, les deux espèces accumulent les deux métaux à des taux différents. Pour une même concentration de Cu et de Cr (3 et 5 mg/L), le Cr est accumulé beaucoup plus que le Cu. Par exemple, à 5 mg/L, *Lemna minor* et *Lemna gibba*, accumulent des teneurs de l'ordre de 1 340.

Les teneurs les plus élevées en Cu sont de l'ordre de 800 µg g<sup>-1</sup> chez *L. minor* et 745 µg g<sup>-1</sup> chez *Lemna gibba*. Ces valeurs sont inférieures à celles obtenues pour l'accumulation du Cu chez *Lemna minor* dans des travaux antérieurs.

Les teneurs en Cu et en Cr dans les tissus augmentent avec la concentration du métal. Les teneurs les plus élevées sont observées dans les traitements avec les plus fortes concentrations utilisées : 5 mg Cu/L et 10 mg Cr/L. Par contre, le FBC diminue avec la concentration du traitement ; les valeurs les plus élevées sont observées pour les plus faibles traitements (1 mg Cu/L et 3 mg Cr/L). Ceci signifie que pour des applications éventuelles en phytoremédiation, l'utilisation potentielle de ces deux espèces serait plus efficace pour de faibles niveaux de contamination (**Ater et al., 2006**).

## 6)

Selon l'étude sur les caractéristiques physico-chimiques des cours d'eau de la zone de l'Oued Athmenia, la bioconcentration des ETM dans l'espèce *Chlorella sp* présente un taux élevé en Ca au niveau de cette espèce dans les cinq stations de prélèvement au dépend des autres ETM pris en considération et particulièrement au niveau des individus de la station (S1). Mais le

cheminement de l'amont vers l'aval révèle que, les individus de la station (S2) accumulent des teneurs plus ou moins importantes en K, Mg et Ni et des teneurs moyennes à faibles pour les autres éléments. Par contre, les individus de la station (S3) ont tendance à accumuler un taux élevé en Al, Fe, Cu et Zn et surtout en Mn, un taux moyens en Mg et faible pour les autres éléments.

Alors que, pour les individus de la station (S4), la dominance de l'absorption du Zn au dépend des autres éléments est observée.

D'autre part, c'est au niveau des individus de la station (S5) que les fortes concentrations en ces éléments chimiques sont observées, surtout, en K, Mg, Fe, Al, Cu, Ni, Co, Cr et Pb.

- ***Lemna minor***

La bioconcentration des ETM dans cette espèce est caractérisée par : des teneurs élevées du K et du Mg au niveau des individus de la station S1 et faible pour les autres éléments. Par contre, un taux d'accumulation important du Ni, Co et Cr au niveau des individus de la station S2 du fer, manganèse, zinc, cuivre et plomb au niveau des individus de la station S3 et du calcium, Mg, Al et Pb dans les individus de la station S5.

Par contre, l'accumulation de ces éléments semble être de moyenne à faible dans les individus de la station S4.

Ces résultats corroborent avec ceux de **(Remon et al.,2006)**, qui démontrent que, les concentrations en Fe et Mn, ainsi que, celle du Cu, Zn et Pb dans les mousses suivent le même profil, mais à des concentrations différentes.

- ***Phragmites communis***

Il existe des différences dans le comportement entre les variables au niveau des parties aériennes et souterraine des individus de *Phragmites communis* dans les cinq stations de prélèvement comme la bioconcentration du potassium qui est supérieure au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie souterraine.

D'autre part, il est important de signaler que l'accumulation du calcium est majoritaire au niveau des individus de cette espèce à l'exception de la partie aérienne des individus des deux stations S1 et S3, où elle est inférieure à celle du potassium.

En plus, la bioconcentration de Mg, Cu et Ni dans les individus de cette espèce est autant importante dans les deux parties.

- ***Typha latifolia***

La réponse des individus au niveau des cinq stations aux différentes concentrations métalliques révèle une bioconcentration importante en Zn et surtout en Mg dans les parties aériennes et souterraines des individus de la station S1.

Alors que, les individus de la station (S2) ont tendance à accumuler des teneurs élevées en Ni dans la partie aérienne, et en Ca, Cu dans les deux compartiments de la plante, et semblent séquestrer dans leurs parties souterraines un taux important en Mg et K. Tandis que, chez les individus de la station (S3) en plus, de leur accumulation dans les parties souterraines du Fe, Ni et Al. Et contrairement aux autres individus, des teneurs importantes en K sont enregistrées au niveau de la partie aérienne.

Tandis que, l'éventail de l'absorption des éléments métalliques par quatre espèces végétales à aspect structurel différent (*Chlorella sp.*, *Lemna minor*, *Phragmites communis*, *Typha latifolia*), permet de refléter la qualité de ces cours d'eau et les différentes concentrations accumulées dans leurs organismes seraient l'indice de pollution (**Zaimeche, 2015**).



**Conclusion**

**Conclusion :**

Comme les autres ressources terrestres aujourd'hui, l'eau devient de plus en plus rare, de plus en plus polluée par les matières organiques et inorganiques (ETM) et donc de plus en plus chère. La dépollution de l'eau par les plantes est donc à double enjeu. Le premier est bien sur de préserver la ressource, la qualité des milieux naturels et la santé de la faune, de la flore mais aussi de l'homme. Le second enjeu consiste à trouver des moyens simples, efficaces et écologiques de traitement des eaux.

Parmi les contaminants les plus répandus du l'eau de surface, on retrouve les métaux lourds dont la toxicité varie en fonction de leur nature.

En effet, la connaissance des teneurs totales en métaux lourds dans les différentes parties souterraines et aériennes de la plante est nécessaire mais elle n'est cependant pas suffisante pour évaluer leur mobilité et les risques environnementaux qui en découlent. La prévision de ces risques est étroitement liée aux formes physico-chimiques sous les quelles les métaux sont présents, c'est à dire à leur spéciation.

Enfin, les macrophytes aquatiques méritent d'être exploitées en vue de l'utiliser pour la dépollution des eaux de surface par les approches de la phytoremédiation., ils lui permettent de filtrer les eaux de surface grâce au grand pouvoir absorbant de leur système racinaire. Ce dernier possède une grande faculté d'absorber les ETM et un taux d'accumulation élevé.

La phytoremédiation est une technique biologique permettant d'assainir l'environnement, elle possède plusieurs avantages : c'est une méthode peu coûteuse, Facile à mettre en œuvre...etc

La phytoremédiation est aussi une solution verte compatible avec les grands principes du développement durable.



**Références bibliographiques**

**A**

- Adriano D.C., 2001.** Trace elements in terrestrial environments: *Biochemistry, bioavailability and risks of metals*. Springer-Verlag, New York.
- Alloway B.J., 1995.** Heavy Metals in Soils. Blackie Academic and Professional, *Chapman and Hall, London*, p 368.
- Aouadi I., 2017.** Elimination de la matière organique dans les eaux de surface : Cas de l'eau de barrage de Tilesdit (Région de Bouira). Mémoire de master. Université de Bouira.
- Ater M., Ait Ali N., Kasmi H., 2006.** Tolerance and accumulation of copper and chromium in twoduck weed species: *Lemna minor L. and Lemna gibba L.* *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 19, n° 1, p. 57-67.

**B**

- Baath E., 1992.** Measurement of heavymetaltolerance of soilbacteriausingthymidine incorporation intobacteriaextracted after homogenization-centrifugation. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(11), 1167- 1172.
- Babich H., Stotzky G., 1980.** Environmental factors that influence the toxicity of heavy metals and gaseous pollutants to microorganisms. *Crit. Rev. Microbial*, 8:99-145p
- Babiche., Schiffen Baur., Stotzky., 1989.** Le cadmium en miliux marin .Biogiochimie et écotoxicologue .*Edition Ifremer*, Plouzané, France : 45-97
- Baize D., 1997.** Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols (France), *INRA Editions, Paris*,- ISSN : 1250-5218 – ISBN : 2-7380-0747-3, pages 408.
- Baker A.J.M., McGrath S.P., Reeves R.D., Smith J.A.C., 2000.** Métal hyper- accumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal polluted soils. *Phytoremediation of contaminated soil and water*.
- Baker A.J.M., Morel J.L., Schwartz C., 1997.** Des plantes pour dépolluer les friches industrielles. *Biofutur*. 169, 30-33.
- Barber S.A., 1995.** Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. *2nd Ed. John*
- Ben Salem Z., 2014.** Étude de la bioaccumulation des éléments traces métalliques chez les macrophytes et les poissons dans la décharge d'Étuefont (Belfort, France) : Intérêts de



l'utilisation de l'approche moléculaire pour la détection de génotoxicité, Thèse de doctorat, Biodiversité et Écosystèmes Aquatiques, l'université de Sfax, page 24.

**-Bencharif N., 2012.** Dynamique de la pollution par les métaux lourds l'eco-complexe des zones humides de la Wilaya de Jijel. Cas de marais de Redjela Taher. (Wilaya de Jijel), mémoire de magister, Université de Jijel.

**-Bendjama A., 2007.** Niveaux de contamination par les métaux lourds du complexe lacustre «Tonga, Oubeira, El-Mellah » du parc national d'El-Kala. Mémoire de magister. Option : Biologie marine. Université Badji Mokhtar. Annaba. p: 100. Disponible sur : [www.jsac.arn.dz/Vol21%20N1/E261010G2%20bendjama%20Art5.pdf](http://www.jsac.arn.dz/Vol21%20N1/E261010G2%20bendjama%20Art5.pdf).

**-Bert V., Fontaine J., Hadj-Sahraoui A., Leyval C., 2012.** Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués ; Etat de l'art et guide de mise en œuvre. EDP Science éd.s.l. Ademe .p.7.

**-Bhatia R., Falkenmark M., 1992.** Water resource policies and the urban poor: innovative approaches and policy imperatives. Document d'information, ICWE, Dublin, Irlande.

**-Blanchard C., 2000.**Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués. Thèse Chimie, spécialité Sciences et Techniques du Déchet. L .France : INSA de Lyon, p301.

**-Boeglin J. C., 2001.** Propriétés des eaux naturelles. Ed. Techniques Ingénieur.

**-Bouchemele M., Hamoudi A., 2016.** Analyse de la qualité des eaux de la station de traitement de Hammam Debegh, mémoire de master, Université d'Oum El Bouaghi.

**-Bouزيد M., 2018.** Contribution à l'évaluation de la capacité d'accumulation des éléments métalliques traces (ETM) par lavégétation d'Oued Amsal. Mémoire de master. Université de jijel.

**-Briat, J.F., Lebrun M., 1999.**Plant responses to metal toxicity.*Plant Biology and Pathology* 322, 43-54.

**-Brooks R.R., 1998.**Biogeochemistry and hyperaccumulators. In: Brooks, R.R. (Ed.). Plants that hyper accumulate heavy metals. CABI Publishing, Wallingford, pp. 95-118.

**-Bruce E., Pivetz., 2001.** Phytoremediation of contaminated soil and ground water at hazardous waste sites.US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Solid Waste and Emergency Response.P 3,16.

## C

- Chaignon V., 2001.** Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées. Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse : Ecole doctorale, Sciences de l'Environnement : Système Terre, Université d'Aix-Marseille.
- Chifolleau J.F., Claisse D., Cossa D., Ficht A., Gonzalez G.L., 2001.** La contamination métallique. Edt. Ifremer. 39p.
- Chouteau C., 2004.** Développement d'un biocapteur conductimétrique bienzymatique à cellules algales. Chimie, Procédés, Environnement. N° d'ordre : 04- ISAL-0066, 179 p.
- Coleman M.S., 1999.** Air quality division lead. Oklahoma Department of Environmental quality, 2p.
- Cunningham S.D., Anderson T.A., Schwab P., Hsu F.C., 1996.** Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Adv Agron* 56, 55-114.
- Cunningham SD., Berti W.R., Huang JW., 1995.** Phytoremediation of contaminated soils, *Trends in Biotechnology*. 13(9), 393-398.

#### D

- DalCorso G., 2012.** Heavy metal toxicity in plants, in: *Furini, A. Ed., Plants and Heavy Metals*, Springer Briefs in Molecular Science. Springer Netherlands, 1-25.
- Dayah M., 1997.** Ptable: The Interactive Periodic Table
- Degremont., Berne F., Richard Y., 1989.** Mémento technique de l'eau, Technique et documentation. Paris p.5, 24,25.
- Deneux-Mustin, S., Roussel-Debet, S., Mustin, C., Henner, P., Munier- Lamy, C., Colle, C., Berthelin, J., Garnier-Laplace, J., Leyval, C., 2003.** Mobilité et transfert racinaire des éléments en traces : influence des micro-organismes du sol. TEC & DOC, Paris.
- Diffus J.H., 1980.** Environnement toxicology. Arnold. Pp68-76.
- Djemmal S., 2008.** Les Ressources en Eau et L'environnement, l'effet de la sebkha sur la qualité des eaux Souterraines dans la partie sud-est de Sétif Cas du Guidjal, Université de Constantine, Algérie.
- Duquesne S., 1992.** Bioaccumulation métallique et métallothioneines chez trios espèces de poissons du littoral —Nord- Pas de Callais. Thèse Doctorat en Biologie et santé. Université des sciences et technologie de Lille. France : 264p.

#### E

**-EPA, U. 2001.** United States Environmental Protection Agency. Quality Assurance Guidance Document-Model Quality Assurance Project Plan for the PM Ambient Air, 2.

**F**

**-Faurie C., Ferra C., Médort P., Dévaux J., Hemptinne J., 2003.** Ecologie approche scientifique et pratique. 5<sup>e</sup> édition, *lavoisier*, Paris, 407p.

**-Fauteux A., 2002.** Des roseaux contre les eaux usées. revue de la science de Québec nouvelle édition. 340p

**-Fischesser B., Dupuis-Tate M.F., 2007.** Le guide illustré de l'écologie. Paris, Éditions De La Martinière, 349p.

**-Fleurbec., 1987.** Plantes sauvages des lacs, rivières et tourbières. *Fleurbec éditeur*, Saint-Augustin (Port-neuf), 399 p.

**G**

**-Gagnon V., 2012.** Effet de l'espèce de plante en marais filtrants artificiels selon la saison, le type de marais filtrant et la nature des polluants. Rapport de thèse de doctorat spécialité Génie des procédés. Université de Montréal, Canada.

**-Galaf F., Ghannam S., 2003.** Contribution à l'élaboration d'un manuel et d'un site web sur la pollution du milieu marin, Maroc.

**-Gao Y. Z., Zhu L.Z., 2005.** Pyhtoremediation foe phenanthrene and pyrene contaminated soils, *journal of environmental sciences*, vol.17, No 1: 14-18.

**-Genin B., Chauvin C., Ménard F., 2003.** Cours d'eau et indices biologiques : pollution, méthodes, IBGN. *Educagri éditions*.

**-Gérard, M. 2001.** Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Sénateur France.

**-Goulding K.W.T., Blake L., 1998.** Land use, liming and the mobilization of potentially toxic metals, *Agriculture, Ecosystems & Environment*. **67**, 135-144.

**-Gueroui Y., 2014.** Caractérisation Hydrochimique et Bactériologique des Eaux Souterraines de l'aquifère Superficiel de la Plaine de Tamlouka (Nord-Est Algérien). Thèse de doctorat. Option : Santé, Eau et Environnement. Université de Guelma. Algérie. P : 200.

## H

- Haguenoer J.M., Furon D., 1981.** Toxicologie et hygiène industrielle, Tome 1 : Les dérivés minéraux, Techniques et documentation – *Lavoisier, Paris*.
- Hammadache Z., Guerreche S., Saib S., 2016.** L'évaluation de Transfer des métaux lourd dans le system sol-plant (*Phragmit australis*) dans le bassin versant d'oued Nil (Jijel). Mémoire de Master université Boumerdes.
- Haury J., 1992.** Les types éco-morphologiques des macrophytes. Intérêt pour la description et la compréhension de la végétation des cours d'eau. 15ème conference
- Henry JR., 2000.** An over view of the phyto remediation of lead and mercury. National Network of environmental management studies (NMES).
- Hillel D., 2004.** Introduction to Environmental Soils physics. Elsevier Science, 392.
- Holmes N.T.H., Whitton B.A., 1977.** The macrophytic vegetation of the River Tees in 1975: observed and predicted changes. *Freshwater Biology*, 7(1), p.43-60.
- Hopkin S.P., 1989.** Ecophysiology of metals in terrestrial invertebrates. Elsevier, *Applied Science Publishers*.
- Huynh., 2009.** Impact des metaux lourds sur l'interaction plantes/ verre de terre/ icroflore tellurique thèse de Doctorat .Univ-Paris Est p169.

## J

- Jemal F., Ghorbal M. H., 2002.** Phytoremediation. *Revue H. T. E.* N° 122.

## K

- Kabata- Pendias A., Pendias H., 2001.** Trace éléments in soils and plants, *Third Edition CRC press, Boca Raton, USA.* science, NY, USA, 366 p.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., 1992.** Trace elements in soils and plants. *C.R.C Press .Boca Raton, F.L.*
- Kopittke P.M., Dart P.J., Menzies N.W., 2007.** Toxic effects of low concentrations of Cu on nodulation of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Environ. Pollut.* 145: 309-315.

## L

- Lapointe M., Lavoie A., Leboeuf M., 2014.** Plantes de milieux humides et de bord de mer du Québec et des Maritimes. Chine : *Éditions Michel Quintin*

- Lasat M.M., Pence N.S., Garvin D.F., Ebbs S.D., Kochian LV., 2000. Molecular physiology of zinc transport in the Zn hyperaccumulator. *Thlaspi caerulescens*. *Journal Experimental Botany*. 51, 71-79.
- Lazarin A., Lazarin G., 2011. Plantes aquatiques, eau pure. Éditions sang de la terre. 126p.
- Le Goff F., Bonnomet V., 2004. Devenir et comportement des métaux dans l'eau : biodisponibilité et model BLM. Rapport technique, ministère de l'écologie et du développement durable direction de l'eau, paris.
- Liao S.W., Chang W.L., 2004. Heavy metal phytoremediation by water hyacinth at constructed wetlands in Taiwan. *Journal of Aquatic Plant Management* 42: 60-68.
- Lotmani B., Mesnoua M., 2011. Effects of copper stress on antioxidative enzymes, chlorophyll and protein content in *Atriplex halimus*. *African Journal of Biotechnology*. 10 (50), 10143-10148.
- Loué A., 1993. Oligo-éléments en agriculture. *Ed. Nathan*, p45-177.

## M

- Makhloufi A., Abdelouahid D.J., 2011. Etude de la qualité physicochimique et microbiologie de l'eau potable dans la ville de Bechar. Sud ouest Algérie, 1er séminaire international sur la ressource en eau au Sahara : Evaluation, Economie et Protection, Ouargla
- Marie.V., Brouillet. L., Rouleau. E., Goulet. I., Hay S.G., 2002. Flore laurentienne 3e édition. Montréal : Gaëtan Morin éditeur
- Mazhoud F., Siari W., 2011. L'évaluation de la tolérance de la bioaccumulation des éléments traces métalliques par certaines espèces végétales du bassin versant d'oued Nil (wilaya de Jijel), mémoire de master, Université de Jijel.
- Mclaughlin M.J., Zarcinas B.A., Stevens D.P., Cook N., 2000. Soil testing for heavy metals. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31 (11-14), 1661-1700.
- Miquel G., 2001. Rapport sur les effets des métaux lourds sur l'Environnement et la santé. Assemblée Nationale Française, N°2979, Paris, 366 p.
- Miquel., 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 : 360.

-**Morel J.L., 1997.** Bioavailability of trace elements to terrestrial plants. - Chapter 6, In : pp 141-176, J. Tarradellas, G. Bitton and D. Rossel (eds), soil ecotoxicology, *Lewis publishers, CRC Press, Boca Raton, Fl.*

**N**

-**Nies D.H., 1999.** Microbiologie heavy métal résistance. *Appl microbial* 51 :730-750.

**P**

-**Pilon-Smits E., 2005.** Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology* 56, 15-39.

**R**

-**Ramade F., 1997.** Ecotoxicologie. Masson. Paris. 205 p

-**Ramade F., 1998.** Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau. *En discience international, Paris*, pp 432-438

-**Ramade F., 2000.** Dictionnaire encyclopédique des polluants : les polluants de l'environnement à l'homme. Ed. International, Paris. 690p.

-**Remon E., 2006.** Tolerance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution *Végétal Biology*. Université Jean Monnet - Saint-Etienne. French

-**Robert M., Juste C., 1997.** Stocks et flux d'éléments traces dans les sols du territoire in "Aspects sanitaires et environnementaux de l'épandage agricole des boues d'épuration urbaines, *ADEME éd.*, 320p.

**S**

-**Saheb M., 2014.** Contribution à l'étude de l'identification de quelques espèces algales des cours d'eaux dans la région d'oued Athmania-. Mémoire de master. Université de Constantine : Pollution des écosystèmes et ecotoxicologie, 41p.

-**Sciences Eaux et Territoires., 2014.** Note – Des macrophytes pour épurer les eaux N°15

-**Susarla S., Victor F., Medina V. F., McCutcheon S.C., 2002.** Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering* 18 : 647-658.

**T**

-**Tela Botanica., 2020.** Base de Données Nomenclaturale de la Flore de France par Benoît Bock, BDNFF v4.02. (telabotanica.org).

-**Tremel-Schaub A., Feix I., 2005.**Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes, EDP Sciences p 413.

**V**

-**Vamerali T., Bandiera M., Mosca G., 2010.**Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. Environ. Chem. Lett. 8, 1–17.

-**Van Der Oost R., Beyer J., Vermeulen N.P.F., 2003.** Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment.Environmental Toxicology and Pharmacology 13.Elsiver LTD.pp 57-149.

**W**

-**Weissenhorn I., 1994.**Les Mycorhizes à arbuscules dans les sols pollués par les métaux lourds : Tolérance aux métaux et rôle dans leur transfert aux plantes. Thèse de Doctorat, Université Nancy I, France

-**Wiegleb G., 1988.** Analysis of flora and vegetation in rivers: concepts and applications. *In: Vegetation of inland waters. Symoens J.J. Ed. Dordrecht, Kluwer.* p.311-340.

**Z**

-**Zaimeche S., 2015.** Contribution à l'étude de l'action d'agents polluants sur des végétaux bioindicateurs. These de doctorat, Universite de constantine.

**Sites internet**

-**Wikipedia, 2020(a).** [http://fr.wikipedia.org/wiki/flaque\\_d%27eau](http://fr.wikipedia.org/wiki/flaque_d%27eau). Consulté le 16-11-2020.

-**Wikipedia, 2020(b).** [https://fr.wikipedia.org/wiki/Lemna\\_minor](https://fr.wikipedia.org/wiki/Lemna_minor). Consulté le 15-06-2020.

-**Wikipedia, 2020(c).** [https://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9nuphar\\_blanc](https://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9nuphar_blanc). Consulté le 18-06-2020.

-**Wikipedia, 2020(d).** [https://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9nuphar\\_jaune](https://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9nuphar_jaune). Consulté le 22-06-2020.

-**Wikipedia, 2020(e).** [https://fr.wikipedia.org/wiki/Potamot\\_nageant](https://fr.wikipedia.org/wiki/Potamot_nageant). Consulté le 22-06-2020.

-**Wikipedia, 2020(f).** [https://fr.wikipedia.org/wiki/Butomus\\_umbellatus](https://fr.wikipedia.org/wiki/Butomus_umbellatus). Consulté le 05-07-2020.

-**Wikipedia, 2020(g).** [https://fr.wikipedia.org/wiki/Iris\\_pseudacorus](https://fr.wikipedia.org/wiki/Iris_pseudacorus). Consulté le 05-07-2020.

-**Wikipedia, 2020(h)**. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Juncus\\_effusus](https://fr.wikipedia.org/wiki/Juncus_effusus). Consulté le 10-07-2020.

-**Wikipedia, 2020(i)**. [https://en.wikipedia.org/wiki/Phragmites\\_australis](https://en.wikipedia.org/wiki/Phragmites_australis). Consulté le 11-07-2020.

-**Wikipedia, 2020 (j)**. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Massette\\_%C3%A0\\_larges\\_feuilles](https://fr.wikipedia.org/wiki/Massette_%C3%A0_larges_feuilles). Consulté le 15-07-2020.



**Thème : La phytoremédiation des eaux de surface par les macrophytes aquatiques : cas des métaux lourds**

Présenté par :  
Djebrouni Chahrazed et Bouafia Wissame

Date de soutenance : Octobre 2020

**Résumé :**

À l'heure actuelle, la pollution des eaux de surface par les éléments traces métalliques est l'un des problèmes environnementaux le plus dangereux, et souvent la phytoremédiation lui est associée comme procédé de décontamination.

Les macrophytes aquatiques sont bien adaptés à des conditions environnementales extrêmes et présentent des propriétés d'absorption et d'accumulation de la concentration en ETMs dans les racines, les tiges et les feuilles dans les eaux de surface.

La phytoremédiation consiste à utiliser des plantes tolérantes au stress métallique et possédant une capacité d'accumulation et de translocation des métaux lourds.

**Mots-clés :** les eaux de surfaces, métaux lourds, macrophytes aquatiques, phytoremédiation.

**Summary:**

Pollution of surface water with trace metal elements is one of the most dangerous environmental problems today, and often phytoremediation is associated with it as a decontamination process.

Aquatic macrophytes are well adapted to extreme environmental conditions and exhibit properties of absorption and accumulation of the concentration of ETMs in roots, stems and leaves in surface water. Phytoremediation consists of using plants which are tolerant to metal stress and possess the capacity to accumulate and translocate heavy metals.

**Keywords:** surface water, heavy metals, aquatic macrophytes, phytoremediation.

**ملخص:**

يعد تلوث المياه السطحية بالمعادن الثقيلة النادرة من أخطر المشكلات البيئية اليوم، وغالبًا ما ترتبط المعالجة النباتية بها كعملية لإزالة التلوث.

تتكيف النباتات المائية الكبيرة بشكل جيد مع الظروف البيئية القاسية وتظهر خصائص امتصاص وتراكم تركيز المعادن الثقيلة في الجذور و السيقان والأوراق في المياه السطحية. تتكون المعالجة النباتية من استخدام نباتات تتحمل الإجهاد المعدني ولديها القدرة على تراكم المعادن الثقيلة ونقلها.

**الكلمات المفتاحية:** المياه السطحية، المعادن الثقيلة، النباتات المائية الكبيرة، المعالجة بالنباتات.