

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Ibn Khaldoun –Tiaret–  
Faculté Sciences de la Nature et de la Vie  
Département de Nutrition et Technologie Agro-Alimentaire

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences agronomique

Spécialité : Sciences du sol

Présenté par :

ABBAS Mohamed Lamine

BENNOURRA Abdessamed

*Thème*

Phytoremédiation des terres agricoles contaminé par les  
métaux lourds (Pb, Zn et Cu) en milieu routier à l'aide de  
l'orge (*Hodreum Vulgare*)

Soutenu publiquement le 29/09/2020

**Jury:**

Président : BERRAYAH Mohamed

Encadrant : OMAR Yamina

Co-encadrant : NACEUR Khadidja

Examineur : DAHMANI Walid

**Grade**

MCA

MCA

DOCTEUR

MCA

Année universitaire 2019-2020

## *Remerciements*

*Nous remercions notre bon dieu Allah tout puissant, qui nous a tracé le chemin de notre vie, et qui nous a permis de réaliser notre travail.*

*Nos sincères remerciements et notre profonde reconnaissance vont à Mme OMAR Yamina M.C.A à l'université de Tiaret, pour nous avoir fait l'honneur de diriger ce mémoire, qu'il nous soit permis de lui exprimer notre sentiments d'estime et de considération pour ses précieux conseils tout au long de notre travail.*

*Je remercie Mme NACEUR Khadidja DOCTEUR à l'université de Tiaret pour son soutien*

*Je remercie Mr BERRAYAH Mohamed M.C.A à université de Tiaret, d'avoir voulu accepter de faire partie de présider le jury de soutenance et pour sa compétence et gentillesse.*

*J'exprime aussi gratitude à Mr DAHMANI Walid M.C.A à université de Tiaret, pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon père que dieu le bénisse et fait dans son paradis  
Ma très chère maman pour son soutien moral, pour l'amour  
Qu'il m'a porté et pour ses sacrifices, Mes très chères sœurs*

*Karima et Rabbab*

*A tous mes amis : Brahim, Mohamed, Mado, Salah, Kadi,*

*Mohcen, Mbarek, Sofiane, Abdou, Ayoub, Abdellah.*

*Et à tous les enseignantes qui ont contribué à ma formation,  
qu'ils Veillent trouve ici, l'expression de ma profonde  
gratitude.*

*Med Lamine*

## *Dédicaces*

*Au nom de l'amour et de respect, Je dédie ce modeste travail à :  
La lumière de mes yeux, mes très chers parents (Benchohra et  
Malika), qui m'ont beaucoup sacrifié et aidé avec ces précieux  
conseils et ses soutien tout au long de mes années d'étude.*

*A mes amies : Rabah, Ilyas, Walid, Nounou, Houari, Farouk, Ali,  
Maamar, Ismail, Badro, Groupe Kada*

*A tous ma famille*

*A Binôme Med Lamine*

*A tous ceux qui m'aiment avec toute mon affection*

*A tous mes camarades de ma promotion science du sol master 2*

*Abdessamed (Khaled)*

## Table des matières

Introduction.....	1
Partie I : Synthèse Bibliographique	
Chapitre N°01 : Pollution des sols	
I.1.Pollution des sols .....	3
I.1.1.1.Définition d'un sol pollué.....	3
I.1.2.Les Principales sources de pollution .....	4
I.1.2.1.Les Apports atmosphérique.....	4
I.1.2.2.Le ruissellement des chaussées.....	5
I.1.3.Les Type de pollution.....	5
I.1.3.1.Pollution Chronique.....	5
I.1.3.2.Pollution Accidentelle .....	6
I.1.3.3.Pollution Saisonnière.....	6
I.1.3.4.Pollution Temporaire.....	7
I.1.4.Modes de transport des polluants vers les sols.....	8
I.1.5.Principaux paramètres influents sur le transfert des polluants.....	8
I.1.5.1.Vitesse d'infiltration : conductivité hydraulique.....	8
I.1.5.2.Teneur en eau.....	10
I.1.5.3.pH .....	11
I.1.5.4.Température .....	13
I.1.5.5.Teneur en matière organique .....	13
I.1.5.6.Teneur en argile .....	14
I.1.5.7.Granulométrie et la porosité .....	15
I.1.5.8.Capacité d'change cationique (CEC) .....	15
Chapitre N°02 : La pollution des sols en milieu routier	
I.2.La pollution des sols en milieu routier .....	17
I.2.1.Généralité .....	17
I.2.2.Les principaux polluants .....	17
I.2.3.La migration des polluants par infiltration des eaux pluviale .....	17
I.2.4.Les substances organiques .....	18
I.2.5.Les substances inorganiques .....	19
I.2.6.Les microorganismes pathogènes .....	20

## Chapitre N°03 : La Phytoremédiation

I.3. La Phytoremédiation .....	22
I.3.1. Définition .....	22
I.3.2. Principe de La Phytoremédiation .....	22
I.3.3.1. La phytostabilisation .....	25
I.3.3.2. La phytoextraction .....	27
I.3.3.3. La rhizofiltration .....	28
I.3.3.4. La rhizodégradation .....	28
I.3.3.5. La phytodégradation .....	29
I.3.3.6. La phytorestauration .....	31
I.3.4. Avantages et inconvénients de la phytoremédiation .....	31
I.3.4.1. Avantages .....	31
I.3.4.2. Inconvénients .....	32

## Chapitre N°04 : Les métaux lourds et l'orge

I.4. Les métaux lourds .....	33
I.4.1. Définition .....	33
I.4.2. Définition, origine et importance des métaux.....	33
I.4.3. Principales propriétés physico-chimiques .....	34
I.4.4. Oligoéléments ou élément toxiques .....	34
I.4.5. Toxicité des plantes aux métaux lourds .....	34
I.4.6. L'orge .....	35
I.4.6.1. Description botanique de la plante .....	35
I.4.6.2. Caractère de l'orge .....	36
I.4.6.3. Méthode de culture de l'orge .....	36
I.4.7. L'orge et métaux lourds .....	37

## Partie II : Partie Expérimentale

II.1. Cadre géographique .....	38
II.2. Cadre topographique .....	39
II.3. Cadre climatique .....	39
II.3.1. Pluviométrie .....	39
II.3.2. Température .....	40
II.4. Facteurs climatiques annexes .....	42
II.4.1. Humidité .....	42
II.4.2. Le vent .....	42

II.5.Synthèse climatique .....	43
II.5.1.Le diagramme Ombrothermique .....	43
II.5.2.Quotient pluviométrique d'EMBERGER .....	43
II.6.Végétation .....	45
II.7.Réseau routier de la wilaya de Tiaret .....	45
II.8.Le parc automobile de la wilaya de Tiaret .....	46
II.9.Présentation de la commune de Tiaret .....	47
II.10.Voies de communication .....	48
II.10.1.consistance de réseau routier interne .....	48
II.10.2.Le réseau routier externe .....	48
II.10.2.1.Les routes nationales .....	48
II.10.2.2.Les chemins de la wilaya .....	49
II.10.2.3.Etat du réseau .....	49
II.10.2.4.Les voies pénétrantes .....	49
II.11.Le parc automobile de la commune de Tiaret .....	50
II.12.Stockage et distribution de carburants .....	50
II.12.1.Capacité de stockage installation intégrée de distribution .....	50
II.13.Zone de culture .....	51
II.13.1.Lieu de culture .....	51
II.13.2.Choix du lieu .....	51
II.13.3.Coordonné géographique .....	51
II.13.4. Choix de l'espèce.....	51
II.13.5.Choix des métaux .....	52
II.13.5.1.Le zinc .....	52
II.13.5.2.Le cuivre .....	52
II.13.5.3.Le plomb .....	53
II.14.Protocole expérimentale .....	53
II.15.Protocoles analytiques et caractérisation physicochimique des échantillons .....	54
II.15.1.Préparation des échantillons de sol pour l'analyse physicochimique .....	54
II.15.2.Réactifs et appareillages .....	55
II.15.3.Caractérisation physicochimique .....	55
II.15.3.1.Détermination du pH .....	56
II.15.3.2.Détermination des bases échangeables et de la C.E.C .....	56
II.16.Préparation des solutions et extraction des éléments métalliques .....	56

II.17.Cas des échantillons des plantes .....	57
--	----

Partie III : Résultats et discussion

III.1.Résultats de la croissance des plantes de l'orge.....	51
---	----

III.2.Etude de la variabilité des concentrations en métaux lourds dans le sol.....	61
--	----

III.3.Teneurs des métaux lourds dans les plantes.....	62
---	----

III.3.1.Teneurs du Plomb (Pb) dans les plantes.....	63
---	----

III.3.2.Teneurs du cuivre (Cu) dans les plantes.....	64
--	----

III.3.3.Teneurs du zinc (Zn) dans les plantes.....	64
--	----

Conclusion .....	66
------------------	----

Référence bibliographiques



## **Liste des abréviations**

**CEC** : Capacité d'échange Cationique

**Cd** : Cadmium.

**ETM** : élément trace métallique.

**Mg** : milligramme

**Pb** : plomb

**Zn** : zinc

**CC**: Chemins communaux

**CW** : Chemins de Wilaya

**URBATIA** : Urbanismes Tiaret

## Liste Des Tableau

<b>Tableau 01</b> : Teneurs en métaux contenus dans les sels de déverglaçage ( $\mu\text{g/g}$ ).....	6
<b>Tableau 02</b> : Perméabilité des sols en fonction de leur composition (Musy et <i>al.</i> 1991).....	10
<b>Tableau 03</b> : Vue d'ensemble des différentes technologies de Phytoremédiation (EPA, 2000).....	24
<b>Tableau 04</b> : Humidité moyenne durant 2003-2014.....	42
<b>Tableau 05</b> : Vitesse moyenne du vent durant 2003-2014.....	42
<b>Tableau 06</b> : Résultats de suivi d'évolution de la hauteur de plante.....	59

## Liste Des Figures

<b>Figure 1</b> : Construction de l'autoroute Est-Ouest.....	7
<b>Figure 2</b> : Taux de métal adsorbé sur de la goetite en fonction du pH (Yaron et <i>al.</i> , 1996).....	12
<b>Figure 3</b> : Différentes techniques de phytoremédiation (Chris, 2010).....	23
<b>Figure 4</b> : Représentation de la phytostabilisation (ITRC, 2001).....	26
<b>Figure 5</b> : Représentation schématique du processus de phytoextraction des métaux lourds.....	27
<b>Figure 6</b> : Mécanisme de rhizodégradation (Vila, 2006).....	29
<b>Figure 7</b> : Phytodégradation des contaminants organiques (ITRC,2001).....	30
<b>Figure 08</b> : Hordeum Vulgare Source : <a href="http://www.wikimedia.org">www.wikimedia.org</a> consulté le 10/05/2020.....	35
<b>Figure 09</b> : Carte de la situation géographique de la wilaya de Tiaret (ANDI, 2014).....	38
<b>Figure 10</b> : Les précipitations interannuelles (mm) de la région de Tiaret entre 1998 et 2014 Source: <a href="http://www.tutiempo.net">www.tutiempo.net</a> . Consulté le 15/01/2015.....	40
<b>Figure11</b> : Les températures moyennes interannuelles (°C) de la région de Tiaret entre 1998 et 2014. Source: <a href="http://www.tutiempo.net">www.tutiempo.net</a> . Consulté le 15/01/2015.....	41
<b>Figure 12</b> : Diagramme Ombrothermique de Gaussen pour la région de Tiaret (Données climatique du 1998 au 2014).....	43
<b>Figure 13</b> : Diagramme d'EMBERGER.....	44
<b>Figure 14</b> : Carte du réseau routier de la wilaya de Tiaret (Direction des travaux publique de Tiaret, 2013).....	46
<b>Figure 15</b> :Répartition du parc automobile de la wilaya de Tiaret selon les classes d'âges (Services des cartes grises de la wilaya de Tiaret, 2015).....	47

<b>Figure 16</b> : carte caractéristique des routes nationales de la wilaya de Tiaret (Urbatia, 2013).....	49
<b>Figure 17</b> : Parc automobile de la commune de Tiaret selon le type de carburant.....	50
<b>Figure 18</b> : lieu de travail (Google Maps modifié, 2020).....	51
<b>Figure 19</b> : Photo de Zone du Culture à Oued Lilli (Photo originale, 2020).....	52
<b>Figure 20</b> : Photo de Zone du Culture à Oued Lilli (Photo originale, 2020).....	54
<b>Figure 21</b> : Photo de Zone du Culture à Oued Lilli (Photo originale, 2020).....	60
<b>Figure 22</b> : Photo de Zone du Culture à Oued Lilli (Photo originale, 2020).....	61

## Résumé :

La pollution routière, associée aux émissions d'échappement des moteurs et à l'usure des véhicules, des trottoirs et des équipements routiers, est une pollution chronique qui affecte directement l'environnement, pour traiter cette pollution, nous avons envisagé d'utiliser les plantes comme phytoaccumulatrices ou phytostabilisatrices des éléments traces métalliques dans les sols, le choix s'est porté sur l'orge (*Hordeum vulgare*) qui est une plante herbacée annuelle, c'est une plante hyper-accumulatrice des métaux lourds.

Le but de ce travail est d'étudier le potentiel de *Hordeum vulgare* à désinfecter les sols agricoles contaminés par le plomb, le cuivre et le zinc près de la route nationale N°90 de la commune de Oued Lili de la Wilaya de Tiaret.

Les résultats obtenus ont montré que la croissance de l'orge passait par deux étapes: dans la première période, croissance lente et après une période de croissance accélérée.

La phytoremédiation semble avoir un grand potentiel de décontamination des sols contaminés par des métaux lourds. Cependant, l'absorption des métaux lourds par les plantes est affectée par leur biodisponibilité dans la solution du sol. Cette biodisponibilité est étroitement liée à la nature de l'extrait utilisé. Les plantes sont une voie importante pour que les minéraux entrent dans la chaîne alimentaire.

**Mots clés :** métaux lourds, orge, Tiaret, oued Lili, Phytoremédiation, hyper-accumulation.

## ملخص :

تلوث الطرق , المرتبطة بانبعاثات عادم المحرك وتآكل السيارة , أروصفة المشاة ومعدات الطرق , هو تلوث مزمن يؤثر بشكل مباشر على البيئة , لمعالجة هذا التلوث , لقد درسنا استخدام النباتات كمركب نباتي أو مثبت نباتي للعناصر النزرة المعدنية في التربة , وقع الاختيار على الشعير وهو نبات عشبي سنوي , وهو مركب نباتي مفرط للمعادن الثقيلة الهدف من هذا العمل هو دراسة إمكانية تطهير التربة الزراعية الملوثة بالرصاص , النحاس والزنك في بيئة الطريق , بواسطة الشعير كنباتات حيث يكون تراكم المعادن الثقيلة فيها شديد التركيز , قضية الطريق الوطني رقم 90 لبلدية واد ليلي بولاية تيارت.

وأظهرت نتائج العمل أن نمو الشعير مر بمرحلتين : في الفترة الأولى , بطيء النمو و بعد فترة نمو متسارع يبدو أن المعالجة النباتية تنطوي على إمكانات كبيرة لإزالة تلوث التربة الملوثة بالمعادن الثقيلة , ومع ذلك , يتأثر امتصاص النباتات للمعادن الثقيلة بتوافرها البيولوجي في محلول التربة يرتبط هذا التوافر البيولوجي ارتباطًا وثيقًا بطبيعة المستخلص المستخدم. النباتات هي طريق مهم للمعادن لدخول السلسلة الغذائية.

**الكلمات المفتاحية :** المعادن الثقيلة , الشعير , تيارت , وادي ليلي , العلاج بالنباتات , التراكم المفرط.

## Summary :

Road pollution, associated with engine exhaust emissions and the wear and tear of vehicles, sidewalks and road equipment, is a chronic pollution that directly affects the environment, to treat this pollution, we have considered using plants as a phytoaccumulator or phytostabilisator of trace metal elements in the soil, the choice fell on barley (*Hordeum vulgare*) which is an annual herbaceous plant, it is a plant hyper-accumulator of heavy metals. (Morel, 1997)

The aim of this work is to study the potential for disinfection of agricultural soils contaminated with lead, copper and zinc in the road environment, by *Hordeum vulgare* as plants where the accumulation of heavy metals is highly concentrated. Case of national road N ° 90 of the town of Oued Lili of the Wilaya of Tiaret.

The results of the work showed that the growth of barley went through two stages: in the first period, slow growth and after a period an acceleration in growth.

Phytoremediation appears to have great potential for decontaminating soils contaminated with heavy metals. However, the absorption of heavy metals by plants is affected by their bioavailability in the soil solution. This bioavailability is closely linked to the nature of the extract used. Plants are an important route for minerals to enter the food chain.

**Keywords :** heavy metals, barley, Tiaret, Oued Lili, Phytoremediation, hyper-accumulation.

# **INTRODUCTION**

### **Introduction :**

La pollution de l'environnement est devenue en quelques décennies un des problèmes majeurs qui conditionne l'avenir de notre civilisation. En effet, les dégradations de plus en plus étendues qui résultent de la pollution de l'écosphère compromettent la stabilité des écosystèmes affectés et par conséquent le renouvellement de ressources naturelles biologiques, voire minérales.(Chevrier 2013)

Le trafic et les infrastructures routières constituent une source importante de métaux lourds rejetés dans l'environnement (Delmas-Gadras, 2000).

La pollution d'origine routière, liée aux émissions du moteur à l'échappement, à l'usure des véhicules, de la chaussée et des équipements de la route, constitue une pollution chronique qui affecte directement l'environnement de proximité via les eaux de ruissellement et les dépôts secs et humides (Koller, 2004).

Les métaux lourds sont définis comme étant des éléments chimiques toxiques ayant une densité supérieure à 5 g/cm<sup>3</sup> (Elmsley, 2001). Ceux-ci sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces. Les plus toxiques d'entre eux sont le cadmium, l'arsenic, le plomb, zinc, cuivre, et le mercure. Ces éléments sont présents naturellement dans la croûte terrestre et dans tout organisme vivant, à des concentrations variables suivant les milieux et les organismes. (Koller, 2004).

Pour le traitement de la pollution métallique sont la phytostabilisation et la phytoextraction. Les techniques de phytostabilisation utilisent le couvert végétal, avec ou sans apport d'amendements fixateurs, afin de réduire la mobilité des métaux, et dans l'idéal, de les immobiliser in situ dans le sol, et de réduire ainsi les risques de dispersion des métaux dans les milieux environnants. Cependant, les métaux demeurent dans le sol, et leur évolution à long terme n'est pas prévisible. La dépollution nécessite l'élimination des métaux du sol. C'est ainsi que la phytoextraction utilise les capacités des plantes à prélever des métaux du sol, et à les transporter et concentrer dans leurs parties aériennes, qui seront ensuite récoltées et traitées. Malgré leur développement récent, les techniques de phytoextraction sont variées et des résultats encourageants ont d'ores et déjà été obtenus pour le traitement de la pollution métallique (Raskin, 1994)

selon ; Janssen et al., 2015 ; La Phytoremédiation est une technologie de dépollution, largement étudiée au cours de ces dernières années, qui semble être efficace pour un large spectre de polluants organiques et inorganiques. Elle peut être utilisée sur des substrats

## Introduction Générale

---

solides, liquides ou gazeux, dans des lieux étendus où l'excavation est impossible au vu des volumes considérés.

L'orge (*Hordeum vulgare*) est une plante herbacée annuelle, c'est une plante hyper-accumulatrice des métaux lourds.(Morel ,1997)

L'objectif de cette étude consiste à phytoremedier des sols contaminés par les métaux lourds (plomb, cuivre et zinc) en milieux routiers urbains à l'aide du l'orge (*Hordeum vulgare*).Cas de route nationale N°90 de la Wilaya de Tiaret.

Le travail que nous apprêtons à faire est divisé en deux parties.La première partie traite une recherche bibliographique se divise en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à la pollution des sols. Dans le deuxième chapitre, nous allons traiter la pollution des sols en milieu routier. Quant au troisième chapitre nous allons parler de La phytoremédiation. Enfin, le quatrième chapitre est consacré aux métaux lourds et l'orge.

La deuxième partie sera consacrée sur une étude expérimentale qui comprend trois chapitres : Zone d'étude, Mise en place du protocole expérimentale et Résultats et discussion respectivement pour le premier, deuxième et troisième chapitre.

A la fin nous terminons par une conclusion qui synthétisera les principaux résultats de notre travail et proposerons quelques perspectives et solutions.



**Partie I :**  
**Synthèse Bibliographique**

**Chapitre1 :**  
**Pollution des sols**

**I.1.Pollution des sols :****I.1.1.Définition d'un sol :**

La lithosphère se compose à 99 % de 10 éléments (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti et P). Le sol constitue une interface entre la lithosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère. Il s'est formé à partir des roches et comprend des constituants secondaires minéraux ou organiques dotés de propriétés spécifiques. Les éléments métalliques présents dans les roches se concentrent au cours de la pédogenèse dans certains horizons et constituent des stocks d'origine naturelle, appelés « fonds géochimiques », qui préexistent dans le profil avant toute intervention humaine.

D'après Baize (2000), le fond géochimique naturel local résulte de phénomènes naturels géologiques et pédologiques. Les teneurs en métaux des fonds géochimiques peuvent être extrêmement variables.

Il est indispensable de bien différencier le stock des éléments métalliques d'origine naturelle (géogène), constituant le fond géochimique local, de celui qui résulte de contamination d'origine humaine (anthropogène). Les métaux provenant d'apports anthropiques sont présents sous des formes chimiques assez réactives, et se fixent sur les constituants secondaires des sols (argiles, oxyhydroxides de Fe, Mn etc., matière organique, etc.) et entraînent de ce fait des risques très supérieurs par rapport aux métaux d'origine naturelle, qui sont le plus souvent immobilisés sous des formes relativement inertes.

**I.1.1.1.Définition d'un sol pollué :**

La pollution des sols résulte de l'accumulation anormale d'éléments toxiques ou d'agents pathogènes liés à l'activité humaine. L'industrie chimique et métallurgique, l'activité pétrolière, la destruction des déchets libèrent des éléments toxiques qui polluent les sols. Cette pollution se fait sous forme de rejets directs à partir des sites producteurs, ou bien par retombées aériennes après la dispersion des éléments toxiques dans l'atmosphère.

L'agriculture contribue également à la pollution des sols par l'épandage d'engrais et d'amendements, l'usage de pesticides et de fertilisants. (Baize, 1997 et Alloway, 1995)

D'après Juste (1988), le terme « contamination » doit être employé pour les sols lorsqu'il y a des apports anthropiques importants mais sans effet apparent pour l'environnement. En revanche, le terme « pollution » est plus approprié lorsque des apports liés à des activités humaines ont des effets négatifs visibles sur l'environnement. (Baize, 1997 et Alloway, 1995)

Pour Ramade (1993), le contaminant est un polluant présent à des quantités décelables dans l'environnement.

Rivière (1998) définit le polluant comme un élément dangereux susceptible de présenter un risque pour les milieux et les organismes vivants.

### **I.1.2. Les principales sources de pollution :**

#### **I.1.2.1. Les apports atmosphérique :**

L'atmosphère constitue un vecteur de transfert de la pollution routière. Les particules émises, mélange complexe portant notamment des éléments traces métalliques et des hydrocarbures, vont se déposer à plus ou moins grande distance de l'infrastructure sous forme de dépôts sec (sédimentation, interception par des surfaces hétérogènes) ou humide (solubilisation des polluants et/ou entraînement mécanique des particules). (CETE, 2004)

Les particules issues de l'échappement et de l'usure des véhicules sont composées à plus de 90 % de particules ultrafines (diamètre inférieur à 0,1  $\mu\text{m}$ ). Les polluants atmosphériques rejetés par la circulation automobile (dioxyde de soufre, oxydes d'azote, ozone, oxyde de carbone, plomb, composés organiques volatils, etc.), les particules en suspension, libérées notamment par les véhicules diesels, peuvent représenter une part importante de la pollution des sols (CETE, 2004).

La pollution des retombées atmosphériques sèches dépend essentiellement, en milieu routier, du type d'occupation des sols.

Celle des retombées humides correspond au lessivage de l'atmosphère par les eaux météoriques et concerne des teneurs en polluants variables ; les différences observées d'un site à l'autre sont souvent dues aux sources locales de pollution, à la topographie du site, aux conditions météorologiques et aux techniques d'échantillonnage et d'analyse (Durand, 2003 ; Pagotto, 1999).

Le retour au sol des éléments émis ne se limite pas aux milieux routiers. Les vents propagent et diluent ce type de pollution sur des zones vastes et parfois très éloignées. Seules les particules les plus lourdes séjournant peu de temps dans l'air et se déposent sur le sol au voisinage de leur lieu d'émission. C'est le cas de certaines particules des gaz d'échappement (moteurs diesel notamment) (Durand, 2003).

### **I.1.2.2. Le ruissellement des chaussées :**

Les enrobés sont des mélanges de granulats (gravillons, sables) et de bitume. Les granulats représentent environ 95 % du mélange et le bitume 5 %. Les propriétés de l'enrobé peuvent être améliorées par des additifs tels que des adhésifs, des polymères et divers matériaux de remplissage.

La complexité du bitume rend sa caractérisation chimique difficile. C'est un matériau hydrocarboné contenant des composés de diverses formes chimiques dont de nombreux hydrocarbures. Des traces de métaux tels que le vanadium, le nickel, le fer, le magnésium, le calcium... sont parfois présentes. La composition précise du bitume varie selon la source de pétrole brut et selon les modifications qui lui sont imposées. Les métaux apportés par le matériau granulaire sont fréquemment négligés (Durand, 2003).

Par temps de pluie, les particules solides et autres polluants accumulés sur les voiries urbaines et les chaussées routières sont acheminés pour partie vers les bas-côtés.

L'action des précipitations sur les revêtements débute par une période de mouillage au cours de laquelle il y a dissolution partielle des polluants solubles issus des dépôts de temps sec. Puis le ruissellement commence, entraînant une fraction des dépôts. Les polluants sont ainsi véhiculés par les eaux de ruissellement de chaussées (Durand, 2003).

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux de ruissellement de chaussées varient d'un site à l'autre en fonction de l'intensité du trafic routier, des caractéristiques de la chaussée (état d'usure, entretien), de son mode d'utilisation, de l'environnement et des caractéristiques de la pluie. Le zinc et le plomb sont les deux métaux dominants (Durand, 2003).

### **I.1.3. Les types de pollution :**

Différents types de pollution peuvent être à l'origine des nuisances en milieu routier dont la pollution temporaire, chronique, saisonnière ou bien accidentelle

#### **I.1.3.1. Pollution chronique :**

La pollution chronique représente l'ensemble des pollutions liées à la circulation des véhicules et aux équipements de la route :

- usure de la chaussée ;
- abrasion et corrosion des métaux constitutifs des véhicules (freins, carrosserie) ;
- usure des pneumatiques et des pots catalytiques ;
- émissions dues aux gaz d'échappement ;

- corrosion des barrières de sécurité et des panneaux de signalisation.

A proximité des axes routiers, les éléments métalliques proviennent principalement de la pollution chronique en particulier :

- le plomb, utilisé comme antidétonant dans les carburants, dont l'usage est interdit depuis janvier 2000 suite à l'arrivée sur le marché des pots catalytiques et avec eux des rejets dans l'environnement de « nouveaux » éléments comme le platine et le palladium ;

- le cadmium, provenant d'impuretés contenues dans les additifs à base de zinc et entrant dans la composition des huiles et des pneus ;

- le zinc, issu de la corrosion des glissières de sécurité par les composés acides et de l'oxydation des petits ouvrages de traversée en acier galvanisé ;

Les autres polluants métalliques tels que le cuivre, le nickel et le chrome sont également présents dans ces émissions chroniques, mais en plus faibles quantités.(Pagotto, 1999).

De ce fait, la nature chronique des polluants est très variable et les eaux de ruissellement peuvent être contaminées aussi bien par des éléments métalliques (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr) que par des hydrocarbures, des huiles, des caoutchoucs, des phénols, etc. (Pagotto, 1999).

La pollution chronique est fortement influencée, d'une part par les évolutions du parc automobile, des carburants, des infrastructures routières et de la circulation d'autre part par d'autres facteurs tel que le climat et la topographie.Pagotto, 1999).

#### **I.1.3.2. Pollution accidentelle :**

La pollution accidentelle est consécutive à un accident de la circulation au cours duquel des matières dangereuses sont déversées avec des conséquences plus ou moins graves, selon la quantité et la nature du produit mis en jeu et la sensibilité du milieu récepteur. (CETE, 2004)

Du fait du caractère aléatoire et peu probable de ce type de pollution, il est apparu difficile de prendre en compte ce type de pollution.(CETE, 2004).

#### **I.1.3.3. Pollution saisonnière :**

La pollution saisonnière est due principalement à la maintenance hivernale. Les fondants chimiques utilisés en cas d'enneigement ou de verglas, le plus souvent du sel (chlorure de sodium) sous forme pure ou en mélange avec du sable, contiennent des composés chimiques destinés à limiter la prise en masse du sel (antimottants).

Ce déverglaçage, bien que nécessaire au maintien de bonnes conditions de la circulation, présente des risques pour l'environnement car les « sels » épandus peuvent ainsi apporter de petites quantités de métaux (Tableau 1), augmenter la corrosion des surfaces métalliques (véhicules et glissières) et favoriser la mobilité des éléments traces métalliques dans les sols.

Par ailleurs, d'autres effets néfastes leur sont attribués : ils peuvent détruire la végétation aux abords de la chaussée, nuire à la nutrition des plantes, déstructurer le sol et charger les eaux souterraines en chlorure. (Pagotto, 1999)

**Tableau 1** : Teneurs en métaux contenus dans les sels de déverglaçage ( $\mu\text{g/g}$ ).

	(Hedley et Lockley, 1975)	(Stotz et Krauth, 1994)	(Pagotto, 1999)
Plomb	8,7	4,0	1,6
Zinc	8,7	< 10	< 0,3
Cuivre	-	2	0,6
Cadmium	-	0,2	0,1

#### I.1.3.4. Pollution temporaire :

La pollution temporaire est liée aux travaux de construction de la route : poussières, rejets d'huiles, fuites d'hydrocarbures, gaz d'échappement des d'engins, etc. Lors de la construction (Figure 1) et du terrassement d'importants volumes de matériaux sont mobilisés et de grandes surfaces sont défrichées laissant momentanément la terre à nue. (CETE, 2004).

Ces surfaces subissent, par la pluie, des ravinements et des érosions surtout dans les secteurs à forte pente. Les eaux de ruissellement qui en résultent sont essentiellement chargées en matières en suspension d'origine minérale. (CETE, 2004).



**Figure 1** : Construction de l'autoroute Est-Ouest [www.algerie-eco.com](http://www.algerie-eco.com) consulté le Mai 2020

#### **I.1.4. Modes de transport des polluants vers les sols :**

Les sols sont le principal réservoir de polluants organiques persistants tels que les biphényles polychlorés (Alloway, 1995a ; Pagotto, 1999).les HAP ou les PCDD / F Nous les trouvons dans divers milieux sous forme liquide, gazeuse ou particulaire. Une fois les polluants organiques persistants émis dans l'atmosphère, les vents transportent les POP et se déposent dans le sol (ou dans l'eau) par lessivage ou dépôt sec (matières gazeuses et particulaires). La matière organique du sol, associée aux polluants organiques persistants dans le sol, est un autre facteur d'augmentation des échanges sol-air.(Alloway, 1995)

Les éléments traces métalliques sont transportés vers les sols selon deux processus : soit par des retombées sèches ou humides. (Alloway, 1995)

En effet, depuis le début de l'ère industrielle et le développement des transports, les apports atmosphériques se sont notablement amplifiés.

D'une part, le vent et l'atmosphère transportent des apports diffus aériens d'origine lointaine ou encore massifs localisés d'origine proche. Ces apports sont déposés de façon régulière et peuvent être absorbés directement par les plantes, mais la majorité pénètre dans les sols à partir de la surface.

D'autre part, les eaux de pluie lessivent l'atmosphère et solubilisent des éléments traces métalliques avant de tomber sur les sols. Une part de la pollution accumulée sur la chaussée est mise en solution dans les eaux de ruissellement ou entraînée par arrachement. (Pagotto, 1999)

#### **I.1.5.Principaux paramètres influents sur le transfert des polluants :**

Le transfert des polluants dans le sol est influencé par plusieurs paramètres à savoir :

##### **I.1.5.1.Vitesse d'infiltration : conductivité hydraulique**

La conductivité hydraulique dépend du type de sol, c'est à dire de ses caractéristiques structurales et texturales qui sont prises en compte par l'intermédiaire de la perméabilité intrinsèque. La Porosité du sol est liée à la distribution et à la taille des pores. La conductivité hydraulique repose sur l'hypothèse de l'homogénéité du sol, de sa texture, de sa surface spécifique, de la forme de ses grains, de sa densité compactée, de la viscosité, de la chimie et de la température du fluide qui le traverse (Baumgartl, 1998).



Généralement deux cas distincts sont considérés, le sol saturé et le sol non saturé. Lorsque le sol est saturé, la teneur en eau et la conductivité hydraulique à saturation ( $K_s$ ) sont maximales. Bien que ne présentant pas de variations temporelles, la conductivité hydraulique à saturation peut présenter de très fortes variations spatiales liées à l'hétérogénéité du sol. Dans le cas de fortes hétérogénéités, l'utilisation de la notion même de conductivité hydraulique peut être remise en cause.

Dans un milieu non saturé, la conductivité hydraulique du sol croît avec la teneur en eau. La teneur en eau d'un sol ( $\theta$ ) peut présenter des variations spatiales et temporelles très marquées. Dans ce cas, l'appréhension de la conductivité hydraulique devient délicate, et pourtant le rôle important qu'elle joue vis à vis des transferts de polluants et d'eau dans le sol rend primordial la détermination de la relation  $K(\theta)$ . Plus que la teneur en eau, c'est le potentiel de pression hydraulique  $h(\theta)$  qui permet de mieux appréhender la cinétique d'infiltration. En effet, ce n'est pas la quantité d'eau présente dans le sol qui détermine sa capacité à circuler, mais la force avec laquelle cette eau est retenue. Une part des variations spatiales de la conductivité hydraulique incombe à l'hétérogénéité du sol, tandis que l'autre part peut être attribuée aux variations spatiales de la teneur en eau.(Baumgartl, 1998).

A saturation, la conductivité hydraulique du sable est supérieure à celle de l'argile, par contre elle décroît plus rapidement lorsque la teneur en eau décroît. Il existe donc des teneurs en eau pour lesquelles le sable est moins perméable que l'argile. En effet, à de très faibles teneurs en eau, une couche de sable peut paradoxalement constituer une barrière imperméable entre deux couches d'argile. Cependant, même lorsque l'aspect quantitatif de l'infiltration peut être représenté de manière satisfaisante par la conductivité hydraulique ou la capacité d'infiltration selon l'échelle considérée, il n'en est pas de même pour l'aspect qualitatif.(Baumgartl, 1998).

Le tableau suivant fournit les ordres de grandeur de la perméabilité à saturation de sols homogènes.

**Tableau 2 :** Perméabilité des sols en fonction de leur composition (Musy et *al.* 1991)

Ks (m/s)	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>
ordre de grandeur	km/jour		m/jour			m/semaine		m/mois		m/an
Perméabilité	Perméable			Semi-perméable			Imperméable			
Type de sol	Gravier	Sable grossier à fin pouvant comporter des graviers				Sable très fin à limon grossier			Argile	

La cinétique d'infiltration des eaux de ruissellement pluvial est directement corrélée à la conductivité hydraulique du sol. Il semble toutefois indispensable d'associer aux transferts de polluants dans le sol un paramètre représentant la vitesse d'infiltration. Ce paramètre, important par lui même puisqu'il détermine le temps de séjour de l'eau dans le sol, influence un bon nombre de processus qui n'ont pas forcément le temps d'avoir lieu, ou n'ont lieu que partiellement lorsque l'écoulement est trop rapide.

#### 1.1.5.2. Teneur en eau :

La teneur en eau du sol influence la quasi-totalité des processus impliqués dans le transfert des polluants dans le sol. La teneur en eau et le potentiel de pression du sol détermine en partie la vitesse de percolation et également la conductivité hydraulique, au cours d'un événement infiltrant.

Ce potentiel de pression hydraulique dépend du type de sol et de sa teneur en eau. La variation du potentiel hydraulique en fonction de la teneur en eau est non univoque. Elle est différente lors d'un assèchement ou d'une humidification. La détermination de la relation  $h(\theta)$  n'est pas facile. Elle se fait sur un échantillon de sol, et correspond donc à l'échelle macroscopique. (Gobat et *al.*, 1998)

L'eau contenue dans le sol est plus ou moins fortement retenue ce qui influe sur la possibilité de migration. En effet, il est usuel de distinguer l'eau gravitaire qui est la plus mobile. Elle s'écoule à travers le sol jusqu'à ce que les forces de gravité s'équilibrent avec les forces de rétention du sol. L'équilibre est généralement atteint au bout de deux à trois jours. On atteint alors une teneur en eau que l'on appelle la capacité au champ du sol. L'eau alors contenue dans le sol est utilisable par la flore. Elle remplit les pores d'une taille comprise entre 0,2 et 50  $\mu\text{m}$ . Lorsque les plantes ne parviennent plus à puiser cette eau utilisable, on atteint le point de flétrissement

permanent au-delà duquel l'eau est dite inutilisable et peut être considérée comme un élément structurel du sol. (Musy et *al.*, 1991).

Le potentiel hydrique peut présenter des variations spatiales et temporelles très fortes, fonction des précipitations, de l'évapotranspiration ou des remontées capillaires. Il dépend de la texture et dans une moindre mesure de la teneur en matière organique du sol. (Duchaufour, 1995)

### **I.1.5.3. pH :**

Bien que les eaux météoriques puissent être très acides, elles sont très rapidement tamponnées lorsqu'elles ruissellent sur les surfaces urbaines et leur pénétration dans le sol ne génère pas une diminution sensible du pH. Ceci est d'autant plus vrai que le sol est carbonaté. Le pH du sol, ou plus exactement de la solution dans le sol, peut être considéré comme un paramètre stable dans le temps. (Gobat et *al.*, 1998).

Les métaux lourds peuvent être remobilisés en cas de modification des conditions environnementales. Il existe un pH en dessous duquel les métaux sont brusquement relargués. Ce pH est différent selon le métal considéré : pH 4 pour le plomb, pH 5 pour le cuivre, pH 5,5 pour le zinc et pH 6 pour le cadmium (Hornburg et Brunner, 1989 *in* par Duchaufour, 1995).

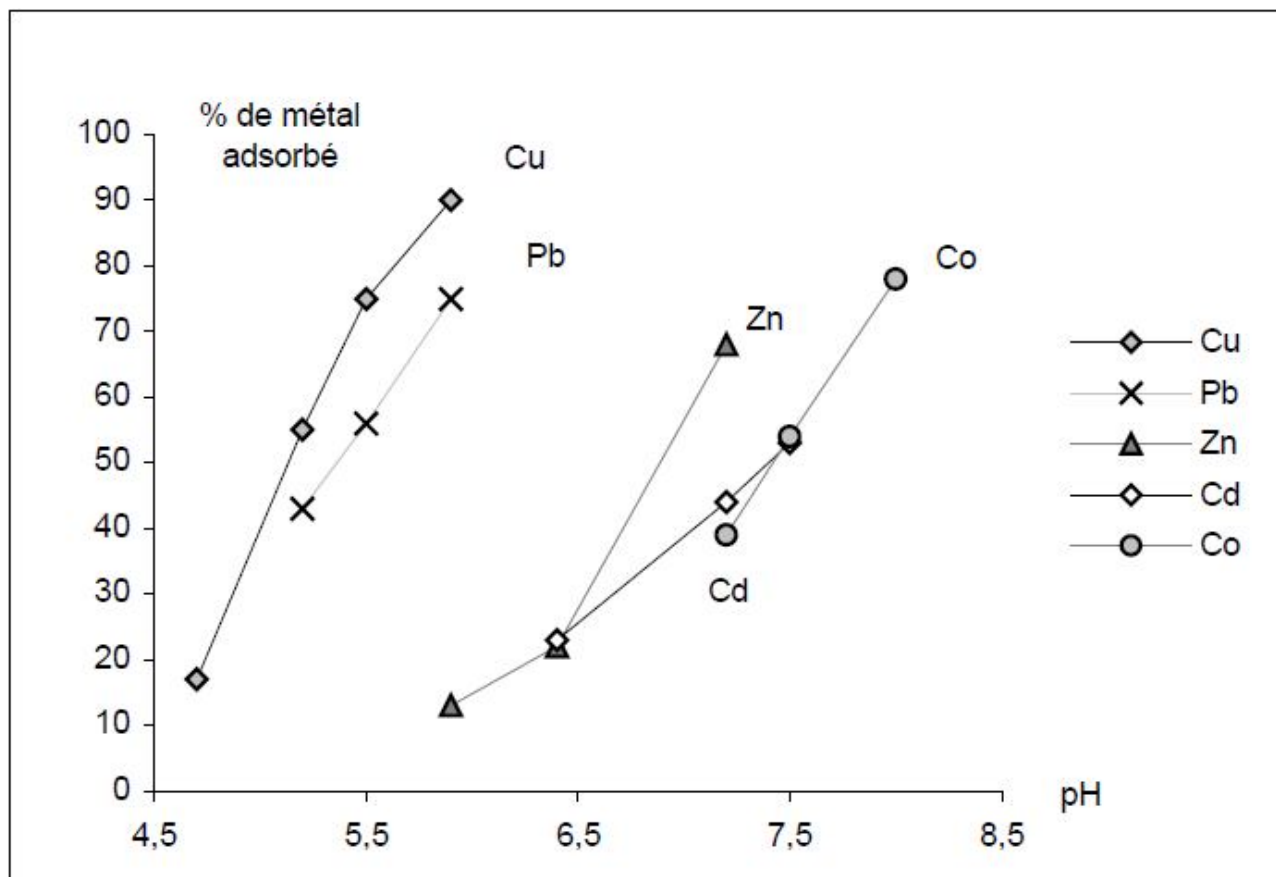
De même, l'absorption préférentielle de l'ammonium par les plantes tend à diminuer le pH tandis que l'adsorption des nitrates tend à l'élever (Gobat et *al.*, 1998).

La mesure du pH des eaux de ruissellement pluvial peut permettre de déterminer la forme physico-chimique de certains métaux, et donc leur répartition entre les fractions dissoute et particulaire.

Le pH du sol et donc de sa solution a une très forte influence sur la capacité d'un sol à retenir les polluants mais également à les relarguer. (Gobat et *al.*, 1998)

Un pH acide favorise la rétention des germes pathogènes tels que les virus, par contre, il diminue voire inhibe complètement la rétention des autres polluants et plus particulièrement des métaux lourds.(Gobat et *al.*, 1998)

La figure 2 illustre la capacité de rétention d'un sol en fonction du pH et pour plusieurs métaux lourds.



**Figure 2 :** Taux de métal adsorbé sur de la goéteite en fonction du pH (Yaron *et al.*, 1996)

Les variations de pH sont les principaux responsables de la remobilisation des polluants. Le sol est un milieu dont le pouvoir tampon est très fort, son pH est stable dans le temps, mais peut présenter des variations locales, le plus souvent dans la zone biologiquement active du sol, notamment la rhizosphère. En effet, certaines plantes ont tendance à adsorber plus de cations que d'anions, leur rhizosphère est alors plus acide que le sol avoisinant. Le comportement inverse est moins fréquent. La forme de l'azote absorbé par les plantes joue aussi un rôle important vis à vis des variations locales de pH, ainsi l'absorption directe d'ammonium tend à abaisser le pH tandis que l'absorption de nitrates tend à l'augmenter (Gobat *et al.*, 1998).

En milieu urbain, bien que l'activité biologique des micro-organismes et des plantes soit moins importante qu'en milieu naturel, il est possible que ce type de comportement puisse avoir une influence notable, particulièrement dans tous les parcs et jardins où l'activité biologique est plus importante. La prise en compte de ces comportements peut avoir une importance non négligeable si l'on s'intéresse par exemple à l'infiltration comme moyen de dépollution des eaux pluviales. (Duchaufour *et al.*, 1995).

Les plantes ne générant pas un pH acide dans leur rhizosphère, mais plutôt un pH basique pourraient être utilisées afin d'améliorer le rendement d'épuratoire du sol vis à vis des métaux lourds et surtout accroître la stabilité de la rétention.

Notons que des variations de pH peuvent avoir lieu ponctuellement et dans des conditions très particulières mais qui ne sont, a priori, pas représentatives du comportement d'un sol même à long terme. (Duchaufour et *al*, 1995).

#### **I.1.5.4. Température :**

La température du sol a une influence le plus souvent indirecte, sur la quasi-totalité des processus physiques, chimiques, ou biologiques. La viscosité de l'eau dépend de la température, et donc par son intermédiaire, la conductivité hydraulique et la vitesse d'infiltration aussi.

L'ensemble des réactions chimiques ou physico-chimiques sont sous l'influence de la température. Elle est en effet associée à l'agitation moléculaire qui détermine le nombre de contacts entre la solution de sol et les surfaces actives. Ainsi, les coefficients de partage utilisés pour décrire l'adsorption des métaux lourds sont déterminés à température constante (isotherme de Langmuir ou de Freundlich).

La température détermine l'activité biologique d'un sol. Celle-ci est optimale dans une certaine plage de température, ralentie et parfois même complètement inhibée à l'extérieur de cette plage.

La température du sol et de l'eau du sol varie à la fois de manière journalière et annuelle. L'amplitude de ces variations diminue avec la profondeur.

Les variations journalières de la température du sol ne se font pas ressentir au-delà d'un mètre pour un sol saturé et de 50 cm pour un sol sec.

#### **I.1.5.5. Teneur en matière organique :**

La matière organique joue un rôle très important dans la rétention des métaux lourds et des polluants organiques, car elle représente un nombre important de sites d'adsorption physicochimique.

A pH constant, c'est elle qui va contrôler leur adsorption. Dans ces conditions, c'est la répartition des métaux lourds entre la matière organique et la solution de sol qui détermine la fraction dissoute de métaux, et par conséquent la fraction la plus mobile. (Gobat et *al.*, 1998)

Dans la solution de sol, beaucoup de métaux sont présents sous forme de chélates (complexes formés avec la matière organique). (Gobat et *al.*, 1998)

Les complexes ainsi formés peuvent être stables chimiquement, mais cela ne signifie pas qu'ils soient immobiles dans la matrice solide. Ainsi, bien que la fraction organique soit un site privilégié pour l'adsorption spécifique (notamment du cuivre), la complexation organique peut engendrer une augmentation de la mobilité des éléments traces (cuivre, zinc). Leur circulation est limitée d'une part, par la taille des complexes ainsi formés, et d'autre part, par la possibilité qu'ils ont d'être eux aussi, adsorbés à la matrice solide. (Robert, 1996).

De manière générale, on peut dire que lorsque les métaux forment des chélates avec la matière organique, ils ne présentent plus un risque fort de contamination des eaux souterraines (tout au moins à court terme). Une forte variation des conditions environnementales peut tout de même provoquer leur remobilisation. La matière organique est un complexant très fort des éléments traces. (Robert, 1996).

La matière organique est aussi un élément indispensable à une activité biologique. Elle est présente en quantité maximale dans les dix premiers centimètres de sol. Elle est constituée d'acides humiques et fulviques, ainsi que d'humine. Les acides fulviques sont à l'état soluble, et de par leur fort potentiel adsorbant, ils peuvent former des complexes solubles ; de forte mobilité. C'est le cas, par exemple, des complexes organo-métalliques formés avec les métaux lourds ou des organochlorés formés à partir du chlore. Les différents constituants de la matière organique ont des structures chimiques très proches.

Cette constatation nous permet donc de supposer qu'un apport de matières organiques sous forme dissoute (« naturelle » ou polluante comme les phénols et à une concentration élevée, peut constituer un risque potentiel de contamination des couches profondes du sol ou de la nappe dans la mesure où elle peut jouer le rôle d'un complexant très fort et remobiliser des polluants préalablement retenus.

De plus, il peut aussi y avoir un transfert de substances organiques sous forme de colloïdes ou de particules, mais il semblerait que le phénomène soit de faible importance. (Duchaufour, 1995)

#### **I.1.5.6. Teneur en argile :**

La très grande surface spécifique et la charge le plus souvent négative des argiles leur confèrent une très forte capacité d'adsorption. Une teneur en argile élevée accroît donc la rétention des polluants, d'une part parce que le nombre de site augmente, et d'autre part parce qu'une forte teneur en argile est très souvent corrélée à une faible vitesse d'infiltration qui laisse aux réactions physico-chimiques le temps d'avoir lieu. L'argile forme très facilement des complexes avec les

substances organiques. Selon leur taille, ces complexes sont mobiles sous la forme colloïdale ou retenus (filtration mécanique s'ils sont d'une taille importante, précipitation, etc.).

La présence de complexes argilo-humiques donne au sol des propriétés favorables à sa fertilité. Les complexes argilo-humiques ralentissent la minéralisation de la matière organique, favorisent le stockage de l'eau et des éléments nutritifs.

#### **I.1.5.7. Granulométrie et la porosité :**

La granulométrie joue un rôle prépondérant dans la rétention des polluants. En effet, les particules les plus fines présentent une forte surface spécifique et sont très actives vis à vis de la rétention. De plus, son évolution au cours du temps peut permettre la mise en évidence d'un colmatage significatif du sol. (Duchaufour, 1995)

La porosité du sol est un paramètre important car elle influe sur la vitesse d'infiltration mais aussi sur la capacité du sol à filtrer mécaniquement les particules. De même, son évolution peut être associée à celle du fonctionnement du sol et être considérée comme un indicateur de colmatage.

#### **I.1.5.8. Capacité d'échange cationique (CEC) :**

L'importance des composés humiques et de l'argile vis-à-vis de l'adsorption des polluants peut être représentée par la capacité d'échange de cations qui correspond à la quantité de cations maximale que le sol peut retenir par adsorption physico-chimique. Elle est exprimée en équivalent par gramme de sol sec. (Duchaufour, 1995)

D'après Appelo et *al.*, (1993), il est possible de construire empiriquement une relation linéaire entre la CEC, la teneur en argile et la teneur en carbone :

$$\text{CEC (meq/100g)} = 0.7 * (\% \text{ argile}) + 3.5 * (\% \text{ carbone})$$

A titre d'exemple, la CEC des argiles varie entre 0,05 et 1,5 m.e.q./g selon le type d'argile et de 2 à 5 pour les composés humiques.

Plus la valence d'un cation est élevée, plus le cation est adsorbé facilement,  $\text{Al}^{3+}$  s'adsorbe plus spontanément que  $\text{Ca}^{2+}$ , et lui-même plus que  $\text{K}^+$ .

A valence équivalente, les cations les moins hydratés sont adsorbés préférentiellement. L'ion  $\text{Ca}^{2+}$  présente une affinité toute particulière avec la matière organique qui fait que son adsorption est favorisée.

Même si les rapports de concentration des différents ions en solution restent les mêmes, la dilution provoque un échange entre les cations monovalents adsorbés et les cations divalents en solution. Les cations monovalents sont alors remis en solution et la forte teneur en eau engendrera

leur migration. En période plus sèche, c'est le phénomène inverse qui se produit, les cations monovalents en solution remplacent une partie des cations divalents et trivalents adsorbés.

La faible teneur en eau fait qu'une fois en solution ces derniers migrent moins facilement. L'alternance des périodes de dessiccation et d'humidification favorise la remobilisation et donc la migration des cations monovalents ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ , etc.).

L'échange de cations ne peut avoir lieu que lorsque le temps de contact entre les phases liquide et solide est suffisant. La corrélation entre la CEC et la vitesse d'infiltration laisse entrevoir que l'échange de cations n'est parfois que partiel. La conductivité hydraulique, la teneur en eau et la capacité d'échange de cations sont interdépendantes, et déterminent une grande part des quantités de polluants retenus. (Gobat *et al.*, 1998), (Robert, 1996), (Hartmann, 1998).



**Chapitre2 :**  
**La pollution des sols en**  
**milieu routier**

### **1.2. La pollution des sols en milieu routier :**

#### **1.2.1. Généralité :**

La pollution d'origine routière, liée aux émissions du moteur à l'échappement, à l'usure des véhicules, de la chaussée et des équipements de la route, constitue une pollution chronique qui affecte directement l'environnement de proximité via les eaux de ruissellement et les dépôts atmosphériques secs et humides. Les milieux impactés sont les hydro systèmes superficiels et/ou souterrains, l'atmosphère, les sols et les végétaux qu'ils supportent. Les recherches menées depuis les années 80 ont permis d'établir un bilan environnemental de cette pollution de proximité (sources, vecteur de transfert, impact).

#### **1.2.2. les principaux polluants :**

Les principales familles de polluants visés sont représentées par :

- les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques,
- les phénols,
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques
- les substances organohalogenées,
- les pesticides,
- les nitrosamines,
- les esters de phtalates,
- les composés organométalliques,
- les cyanures,
- les métaux lourds.

#### **1.2.3. La migration du polluant par infiltration des eaux pluviales :**

- **L'infiltration dans le sol :**

L'infiltration, en hydrologie et en mécanique des fluides, qualifie un mouvement graduel d'un fluide, tel que l'eau, à travers une roche poreuse ou un sol ou tout revêtement peu perméable.

L'infiltration désigne le processus de pénétration des précipitations dans le sol; c'est un sous-processus important du cycle de l'eau. Les processus de connexion peuvent être la recharge de l'eau souterraine et la formation du ruissellement. La quantité d'infiltration est mesurée en unités de millimètres par seconde ou plus par minute.

L'introduction d'eau de surface dans le sol par le biais de systèmes de gestion de l'eau s'appelle l'infiltration ou, dans le cas de lixiviats pollués, se produit également. (Alloway, 1995).

L'infiltration est significativement influencée par deux forces, la gravité et la capillarité ou le potentiel de la matrice. D'autres facteurs sont déterminants comme la température dans le sol, la

saturation en eau du sol (pré-humidité), le degré de couverture (végétation) et l'intensité des précipitations.

Ainsi, les sols sableux (63  $\mu\text{m}$  - 2 mm de taille de grain) avec des pores relativement grands et bien connectés et un grand volume de pores (30-45%) ont les taux d'infiltration les plus élevés.

Comme la couverture végétale atténue l'impact des gouttes de pluie, elle prévient efficacement les boues superficielles des pores et crée des pores grossiers supplémentaires et bien aquifères à travers le réseau racinaire. Ainsi, il a une influence clairement positive sur les propriétés d'infiltration d'un sol (les taux d'infiltration les plus élevés peuvent être enregistrés dans les sols forestiers). (Alloway, 1995).

- **Les polluants liés à l'infiltration des eaux pluviales :**

La pollution des eaux de ruissellement pluvial en milieu urbain avait déjà été observée à la fin du 19<sup>ième</sup> siècle, notamment par Durand-Claye (Chocat et *al.*, 1997). Les spécialistes s'accordent depuis sur la présence, dans ces eaux, de métaux lourds, produits azotés, phosphates, hydrocarbures et autres produits chimiques.

Les eaux de ruissellement pluvial peuvent donc avoir un effet dommageable, aussi bien sur l'homme (par la contamination des nappes souterraines qui servent à l'alimentation en eau potable, ou de la chaîne alimentaire), que sur son environnement (c'est à dire sur la faune et la flore qui subissent la pollution des sols, des nappes, des cours d'eau).

#### **1.2.4. Les substances organiques :**

La plupart des composés organiques trouvés en chimie sont produits par des organismes vivants, en effet, ils sont issus de la matière organique du sol, qui est souvent appelée humus. Ce dernier est un mélange hétérogène de substances organiques et minérales sans formulation fine ou fine spécifique.

Ces substances organiques ont également une bonne capacité à retenir l'eau et peuvent augmenter la capacité des sols grossiers à retenir l'eau. Ils améliorent également le pouvoir nourrissant de certains micro-éléments par des végétaux. Ils entrent dans la formation de composés et complexes chimiques stables, améliore la capacité Échange cationique (CEC) dans le sol.

Les substances organiques se divisent en trois grands groupes : Les glucides, les lipides et les protides.

Les composés organiques du sol ont en général une grande affinité pour les métaux du fait de la présence des groupements carboxyliques, phénoliques, alcooliques ou de ligands (Alloway, 1995).

### 1.2.5. Les substances inorganiques :

Les substances inorganique formes à partir de l'ensemble des éléments chimiques ne forment, malgré leur diversité, qu'un nombre beaucoup plus restreint de composés et dont les masses moléculaires restent limitées. Ces composés peuvent se classer en deux catégories en fonction de leur polarité négative (les anions par exemple : les chlorures, les phosphates, les nitrates, les nitrites, les cyanures, et les Sulfates.) Et de polarité positif (les cations par exemple : plomb, le mercure, le cadmium, le chrome ou le nickel). (Jullien ,1997).

#### ✓ Les éléments traces :

Les éléments traces ont un comportement différent selon leur forme chimique. La spéciation est la distinction entre les liaisons chimiques, elle permet ainsi la différenciation entre les espèces. La forme chimique d'une substance, et notamment d'un métal détermine son comportement dans un milieu aqueux ainsi que sa toxicité pour les organismes vivants. A l'état ionisé, ils peuvent être absorbés par les plantes ou être retenus par le sol par échange d'ions. Sous forme d'oxydes, et selon un pH et un taux d'oxygène favorables, ils peuvent être adsorbés par les particules d'argile, la matière organique, les hydroxydes de fer ou les oxydes de manganèse. Les métaux peuvent aussi former des complexes avec des ligands organiques, et être alors solubles. Ils sont alors à la fois plus mobiles et plus biodisponibles. Le zinc et le cadmium restent relativement mobiles dans le sol, alors que le plomb et le cuivre sont plus fortement retenus. A pH et Eh constants (ou subissant de très faibles variations), une forte oxygénation permet d'éviter ou de limiter le relargage des métaux lourds. La présence d'oxygène permet d'obtenir des conditions d'oxydoréduction favorables à la rétention des métaux. En effet, les métaux sous forme d'oxydes sont plus facilement adsorbés (Le Roch, 1991). La teneur critique des sols en métaux lourds pour la croissance des végétaux, des animaux et la consommation humaine. (Pagotto, 1999).

#### ✓ Les nutriments (azote, phosphore) et les sels :

L'azote est un élément indispensable à la croissance des végétaux. D'un point de vue écologique, la présence de nitrates dans les systèmes aquatiques stimule la poussée planctonique, ce qui peut provoquer en présence d'une quantité suffisante de phosphates une eutrophisation accélérée (ou hypereutrophisation, ou dystrophisation) des milieux aquatiques. Les nitrates sont peu réactifs et leur transfert dans le sol se fait essentiellement sous forme dissoute (Baize et al. 1995).

Phosphore est un élément essentiel à la croissance des êtres vivants (végétaux et animaux). Les phosphates sont les formes minérales du phosphore, formés à partir des ions  $PO_4^{3-}$  (ils sont généralement peu solubles dans l'eau). Les formes hydrogénées ( $H_2PO_4^-$  et  $HPO_4^{2-}$ ) sont

beaucoup plus solubles. La forme sous laquelle se trouve le phosphore ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{PO}_5$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) dépend du pH. Dans les eaux naturelles (pH compris entre 5 et 8), on trouve essentiellement :  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Les phosphates, à des teneurs supérieures à 0.2 mg/l, favorisent la prolifération des algues qui conduit à une eutrophisation des milieux aquatiques, parfois même à leur hypereutrophisation. (Chocat et al., 1997).

Les sels ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ .) sont des composés très solubles ce qui leur permet de migrer facilement dans le sol. Bien que les quantités présentes dans les eaux de ruissellement pluvial ne soient pas très importantes (tout au moins sur une moyenne annuelle), leur solubilité et donc leur facilité à être transporté peut provoquer une contamination des eaux souterraines

Une augmentation ou une diminution de la quantité de sels présents dans une eau n'est pas forcément représentative d'une pollution, mais peut parfois être simplement interprétée comme un changement de conditions environnementales. (Chevalier, 1995).

### 1.2.6. Les microorganismes pathogènes :

Les micro-organismes peuvent être classés en trois catégories : les virus dont il est difficile de dire s'ils font partie ou non du monde vivant, les procaryotes qui incluent l'ensemble des bactéries et cyanobactéries (autrefois appelées algues bleues) et les protistes (eucaryotes unicellulaires) qui comprennent les algues, les champignons et les protozoaires. En ce qui concerne les polluants dits « biologiques » nous nous intéresserons ici aux virus et aux bactéries. (Chocat et al., 1997).

- **virus**

Les virus sont des agents pathogènes ayant pour victime l'homme, les animaux, les plantes, les bactéries. Les particules virales sont des macromolécules formées de protéines et d'acides nucléiques.

La vitesse d'infiltration a une importance primordiale sur la rétention des germes pathogènes dans le sol. En effet, une vitesse lente de l'ordre de 0,6 m/jour (conductivité hydraulique de l'ordre de  $6 \cdot 10^{-6}$  m/s) permettra la rétention de la grande majorité des germes sur une profondeur inférieure à 1,6 m, tandis que le sol sera pollué à 2,5 m pour une vitesse d'infiltration supérieure à 2 m/jour (conductivité hydraulique de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-5}$  m/s). D'autres ordres de grandeurs peuvent être cités, provenant des travaux de (Detay, 1997) :

- avec une vitesse d'infiltration de 0,5 m/jour ( $K \approx 5 \cdot 10^{-5}$  m/s), moins de 1% des virus parcourent 80 cm en 50 jours.
- avec une vitesse de 5m/jour ( $K \approx 5 \cdot 10^{-6}$  m/s), 1% des virus auront parcouru 12m en 50 jours.

Mais le paramètre le plus important de la rétention des virus dans le sol est le pH,

ainsi l'adsorption des virus sera presque complète à un pH inférieur à 5. On peut constater le même phénomène pour certaines bactéries (Detay, 1997).

- **bactérie**

Les décomposeurs - bactéries et champignons - sont les seuls organismes capables de dégrader les composés azotés en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), mais seules les bactéries sont capables d'oxyder l'ammoniac en nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) et en nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ). Le processus complet est appelé nitrification (nitritation + nitratation). L'ultime phase, la dénitrification, est la réduction de ces composés par d'autres bactéries en  $\text{N}_2$  puis sa libération dans l'atmosphère.

. Les bactéries phototrophes ou cyanobactéries (autrefois appelées algues bleues) sont présentes dans les eaux douces et salées, à la surface du sol, que les températures soient élevées ou non. (Larousse, 1995).

Par contre, un certain nombre d'entre elles sont pathogènes. C'est le cas des bactéries chimio-organotrophes suivantes : - Rickettsies et chlamydies : germes pathogènes de très petite taille, dangereux pour l'homme et l'animal - Rickettsiaprowazeki : agent du typhus - Chlamydia trachomatis peut rendre aveugle - Mycoplasmes ou molliartes peuvent provoquer des infections pulmonaires - Corynébactérium et actinomycètes et notamment corynébactériumdyphtéria.

Mais les bactéries les plus courantes sont des chimio-organotrophes, Gram+ ou Gram-, aérobies ou anaérobies. Parmi les bactéries Gram-, une partie est aérobie stricte, c'est à dire qu'elles ont besoin d'oxygène pour se développer. On y rencontre les Pseudomonas, présentes aussi bien dans l'eau, l'air ou le sol. Certaines Pseudomonas sont pathogènes, telle que Pseudomonas Aeruginosa responsable d'otites, Pseudomonas Pseudomallei, agent de mélioïdose en zone tropicale,(Yavuz et al., 1984).

**Chapitre 3 :**  
**La Phytoremédiation**

### **I.3. La Phytoremédiation :**

#### **I.3.1. Définition :**

La Phytoremédiation est une technologie de dépollution, largement étudiée au cours de ces dernières années, qui semble être efficace pour un large spectre de polluants organiques et inorganiques. Elle peut être utilisée sur des substrats solides, liquides ou gazeux, dans des lieux étendus où l'excavation est impossible au vu des volumes considérés (Pilon-Smits, 2005 ; Janssen *et al.*, 2015).

C'est une technique à faible coût comparée aux techniques conventionnelles. Elle permet en plus de conserver le potentiel écologique du site, et possède une très bonne image auprès du public (Macci *et al.*, 2016). Son principal défaut est sa lenteur de remédiation qui s'estime à plusieurs dizaines d'années (Evlard, 2013).

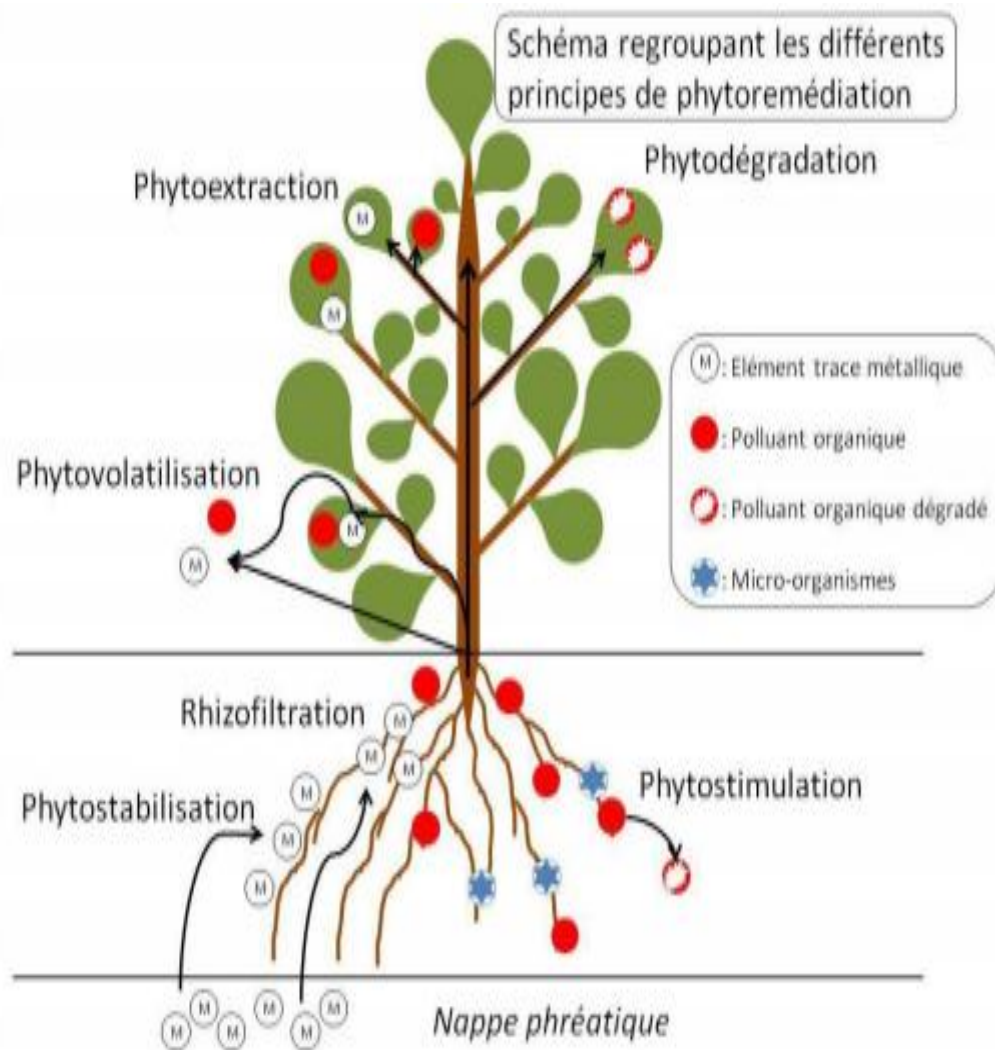
#### **I.3.2. Principe de La Phytoremédiation :**

La Phytoremédiation est subdivisée suivant le mécanisme de l'absorption ou extraction par voie racinaire pour un polluant du sol ou de l'eau ou par voie aérienne pour un polluant atmosphérique. Après, plusieurs mécanismes peuvent être développés par les plantes (Fig3): certains polluants sont stockés et compartimentés dans la plante, ce qui correspond à une majorité des éléments traces métalliques (*phytoaccumulation*).

D'autres polluants sont transformés par la plante en composés secondaires moins toxiques (*phytodégradation*) qui peuvent rester dans la plante ou être éliminés par voie racinaire ou aérienne (*phytovolatilisation*). Il s'agit généralement de polluants organiques mais quelques éléments traces métalliques comme le mercure et le sélénium peuvent être éliminés par voie aérienne.

A l'opposé, certaines plantes sont capables de sécréter des composés par voie racinaire afin de complexer les polluants dans le sol au lieu de les absorber (*phytostabilisation*) (Zerrouki, 2013).





**Figure 3** : Différentes techniques de phytoremédiation (Chris, 2010).

Les différents types de Phytoremédiation ne sont pas exclusifs, c'est à dire qu'ils peuvent s'opérer simultanément. Le tableau 3 fait état des différents mécanismes qui peuvent s'opérer lors de la décontamination par Phytoremédiation.

**Tableau 3** : Vue d'ensemble des différentes technologies de Phytoremédiation (EPA, 2000).

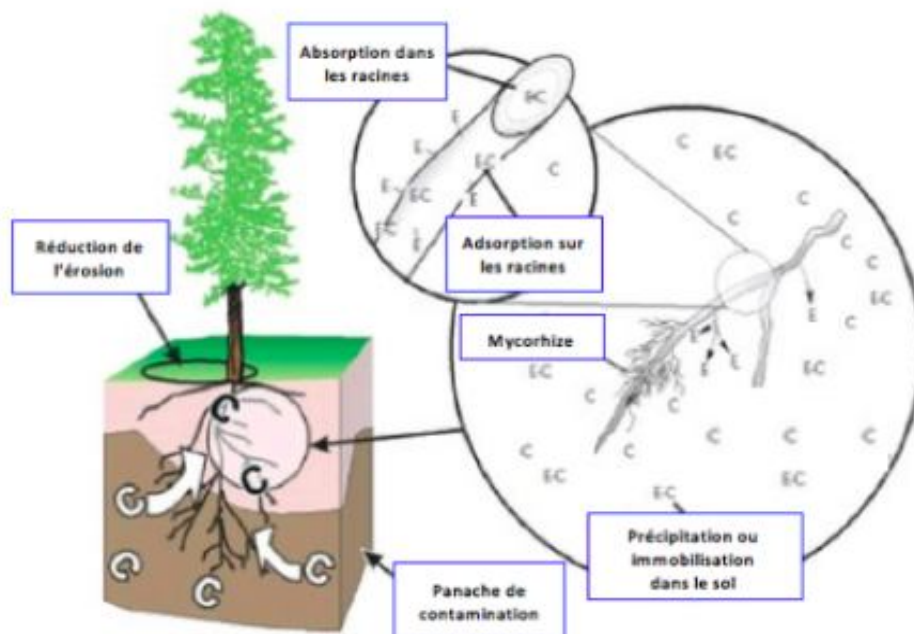
<b>Mécanisme</b>	<b>But du processus</b>	<b>Milieu</b>	<b>Contaminants</b>	<b>Plantes</b>
Rhizofiltration	Extraction et capture du contaminant	Eau souterraine et de surface	Métaux et radionucléides Tournesol	Tournesol, jacinthe d'eau
Phytostabilisation	Contenir le contaminant	Sol, sédiments et boues	Arsenic, cadmium, chrome, cuivre, plomb et zinc	Moutarde indienne, peupliers hybrides graminées
Phytoextraction	Extraction et capture du contaminant	Sol, sédiments et boues	Métaux: argent, cadmium, cobalt, chrome, cuivre, manganèse, mercure, molybdène, nickel, plomb et zinc Radionucléide Strontium, Césium, Plutonium, Uranium	Moutarde indienne, Thlaspi, Alyssus, tournesol, peupliers hybrides
Phytodégradation	Détruire le contaminant	Sol, sédiments boues, eau souterraine et de surface	Composés organiques, solvants chlorés, phénols, herbicides et munitions	Peupliers et herbes
Rhizodégradation	Détruire le contaminant	Sol, sédiments, boues et eau souterraine	Composés organiques (HAP, pesticides, sol	peupliers hybrides, peuplier deltoïde, saules

			vents chlorés et BPC)	
Phytovolatilisation	Extraction du contaminant et relâchement dans l'atmosphère	Eau de surface, sol, sédiments et boues	Solvants chlorés et quelques composés inorganiques (arsenic, mercure et sélénium)	Peupliers

### I.3.3.1. La phytostabilisation :

La fixation botanique est une technique de décontamination qui consiste à utiliser des plantes pour contenir ou inhiber des polluants (ADEME, 2013<sub>b</sub>). En conséquence, le mouvement des polluants est réduit, ce qui empêche la migration de la colonne de pollution vers les eaux souterraines ou dans l'atmosphère (EPA, 1999). La figure ci-dessous illustre le principe de la stabilité des plantes.

Cette technologie est principalement utilisée pour traiter les sols, les sédiments et les boues (EPA, 2000). Sans oublier qu'elle est très efficace dans les situations où l'on veut agir rapidement dans un arrangement pour paralyser les polluants du maïs à partir de la préservation du niveau des eaux souterraines (ITRC, 1997).



**Figure 4 :** Représentation de la phytostabilisation (ITRC, 2001)

Les mécanismes biologiques utilisés lors de la fixation des plantes sont l'absorption et l'accumulation de polluants par les racines, l'adsorption sur les racines ou les précipitations. Dans les racines.

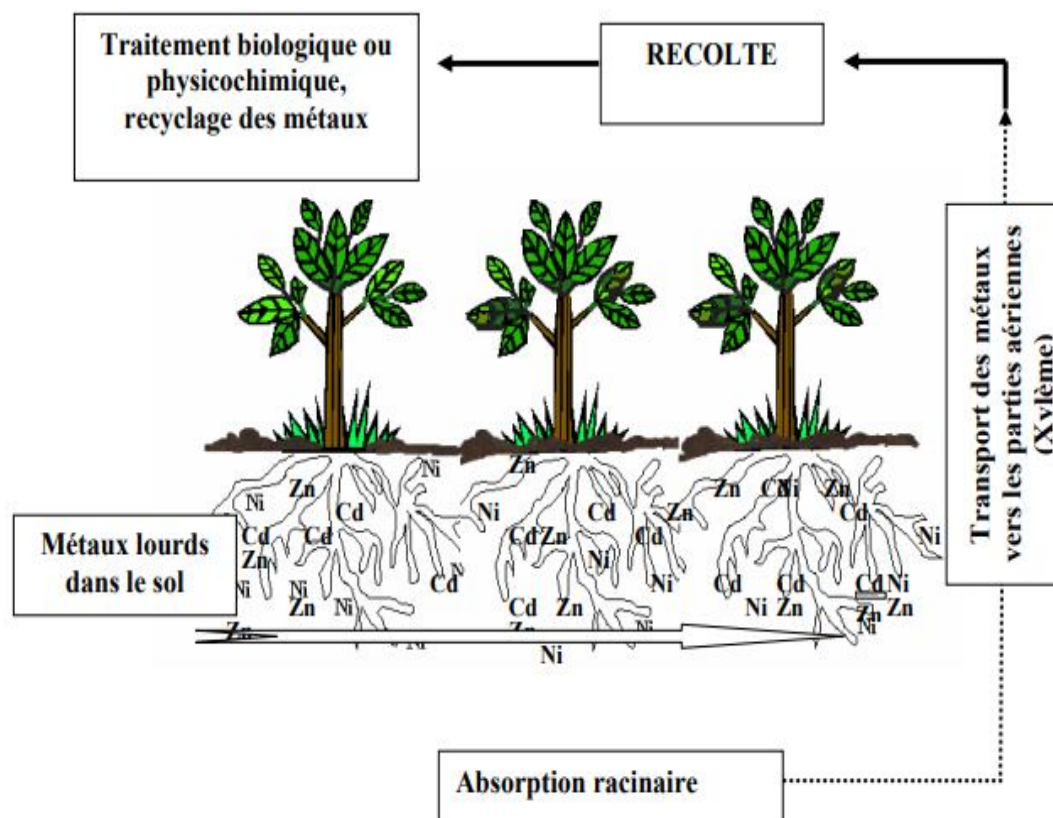
La quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol peut provoquer la formation de lixiviat pollué. Ainsi, la présence de plantes réduit la quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol et en même temps empêche l'érosion et le transfert de métaux toxiques vers d'autres compartiments tels que les eaux souterraines et l'atmosphère (Ghosh et Sing, 2005).

De plus, pour les minéraux, qui ne peuvent évidemment pas être dégradés, la stabilisation de la phytostabilisation est une voie intéressante, car elle empêche leur distribution dans les eaux de surfaces ou souterraines (Ghosh et Sing, 2005).

En fait, si nous trouvons des concentrations nocives de polluants, cela peut avoir un impact significatif sur les organismes vivants et l'environnement. Le choix des végétaux est une étape à ne pas négliger lorsque l'on choisit la technique de fixation végétale. Ainsi, les plantes les mieux adaptées à la fixation phytosanitaire sont les plantes qui devraient présenter de faibles niveaux d'accumulation minérale dans leurs parties aériennes (Evans, 1997). *En outre, une base fixe et à long terme doit être mise en œuvre pour empêcher le rejet de polluants dans l'environnement (EPA 1999).*

### I.3.3.2. La phytoextraction :

L'extraction végétale utilise des plantes capables d'éliminer les oligo-éléments toxiques et de les accumuler dans les parties aériennes qui seront récoltées puis brûlées (Figure 5).



**Figure 5 :** Représentation schématique du processus de phytoextraction des métaux lourds (Srivastava, 2008)

L'hydrolyse est couramment utilisée pour décomposer les polluants organiques, tels que les solvants chlorés, les herbicides, les pesticides et les hydrocarbures (Vishnoy et Srivastava, 2008). C'est une technique de phytothérapie, également appelée photochimique.

Ces mécanismes de dégradation s'opèrent soit directement par la libération d'enzymes produites par la plante dans la rhizosphère, soit suite à une activité métabolique.

Deux stratégies d'extraction végétale sont en cours de développement. Il y a une extraction végétale à l'aide de chélateurs minéraux. Cette méthode est également appelée extraction végétale induite et il y a une autre extraction qui est l'extraction végétale continue. De ces deux procédés, l'extraction de plantes auxiliaires est la plus avancée.

Néanmoins, l'extraction végétale continue a commencé à être appliquée pour décontaminer les métaux lourds (zinc, cadmium et nickel) et les métalloïdes (sélénium et arsenic). Les deux stratégies sont testées sur le terrain et les résultats, bien qu'encourageants, nécessitent davantage d'efforts pour améliorer le processus (ADIT, 2006).

#### **I.3.3.3. La rhizofiltration :**

La rhizofiltration, technique qui consiste à utiliser des racines immergées de plantes qui captent les polluants. Ces racines sont récoltées une fois saturées en polluants(EPA,2000).

Nous pouvons traiter des eaux usées municipales ou industrielles, le ruissellement de surface ou l'eau qui s'infiltre dans le sol en zone agricole, le lixiviat des mines et des sites d'enfouissement, ou encore la contamination de l'eau souterraine.

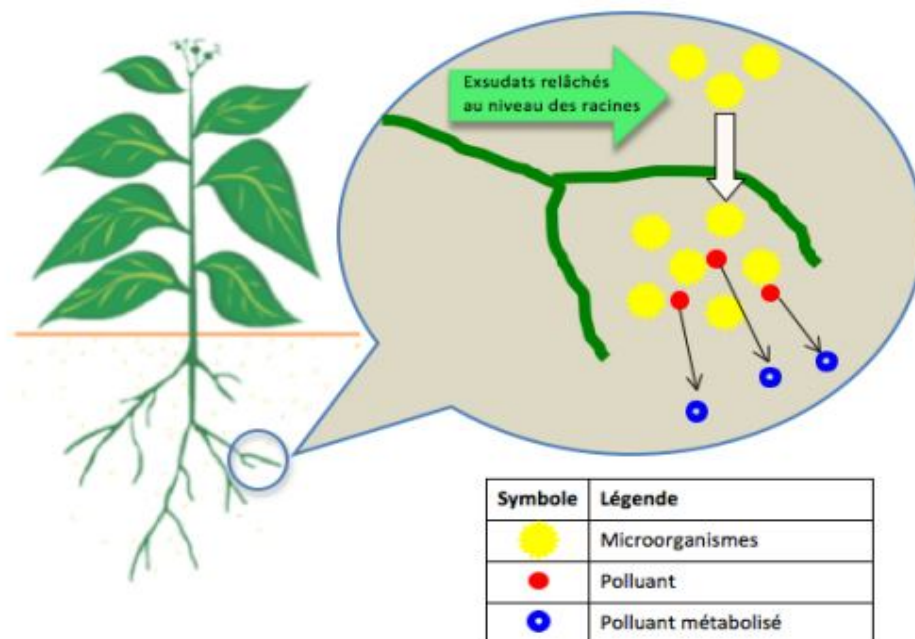
Les contaminants visés incluent les élémentstraces métalliques, les radionucléides, le sélénium, les nutriments, certains composés organiques comme les pesticides, ou encore le drainage minier acide. La rhizofiltration peut utiliser des plantes aquatiques ou des plantes terrestres, et parfois une combinaison d'espèces ayant des propriétés complémentaires.

Les systèmes intérieurs sont souvent plus coûteux alors leur utilisation est restreinte à des applications ayant de faibles volumes à traiter ou encore à des applications bien ciblées, comme l'enlèvement des éléments radioactifs (EPA,1999).

La rhizofiltration peut aussi limiter la diffusion horizontale des contaminants dans l'eau souterraine si l'on positionne les plantes pour faire une barrière hydraulique, afin que les plantes stationnent l'eau du sol et limitent le mouvement des polluants dans l'eau. La rhizofiltration peut être exploitée par exemple dans des systèmes de bandes riveraines.

#### **I.3.3.4. La Rhizodégradation :**

La Rhizodégradation (Figure 6)désigne la dégradation des contaminants, pour la plupart organiques, sous l'action des racines et des micro-organismes associés. Elle se déroule dans le volume de sol sous l'influence des racines, appelé « rhizosphère ».



**Figure 6 :** Mécanisme de Rhizodégradation (Vila, 2006)

Les plantes peuvent modifier les propriétés physiques, chimiques et biologiques en sécrétant des excréments autour racines et en pénétrant des racines dans le sol. Ces composés (sucres, acides aminés, acides gras, nucléotides, enzymes, etc.) diffèrent selon les espèces (Shimp et *al.*, 1993).

Dans la rhizosphère, on peut trouver des associations plantes microorganismes. Ces connexions seront autosuffisantes, ces plantes fourniront les éléments nutritifs nécessaires aux micro-organismes tandis que celles-ci garantiront que les plantes pourront pousser dans un sol approprié (ITRC, 2009).

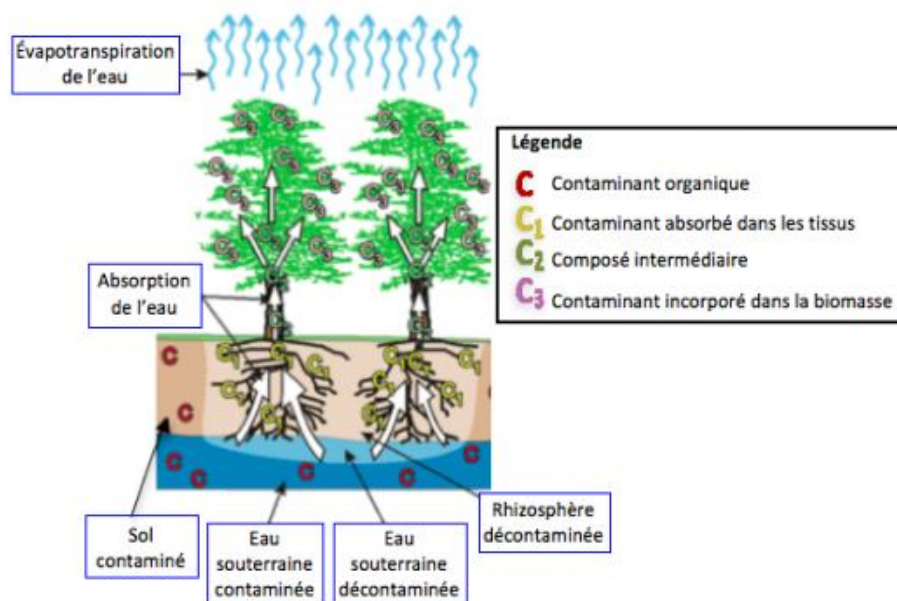
Plus récemment, des recherches ont montré que lorsque *Populus* vivait en symbiose avec la bactérie *méthylbacteriumpopulum*, il y avait minéralisation de certains explosifs.

La technique de phytothérapie est mieux utilisée sur les sites présentant une contamination de surface ou de surface due à la dégradation des contaminants survenant dans les racines s'étendant à seulement à 1 millimètre (mm) (EPA, 2000).

#### **I.3.3.5. La Phytodégradation :**

Phytodégradation également appelée phytochimique La phytolyse est couramment utilisée pour décomposer les polluants organiques, tels que les solvants chlorés, les herbicides, les pesticides et les hydrocarbures. Procédé qui cherche à favoriser la biotransformation (Fig7) des polluants organiques à l'intérieur des tissus végétaux, souterrains ou aériens (Vishnoy et Srivastava, 2008).





**Figure 7 :** Phytodégradation des contaminants organiques (ITRC, 2001)

Ces mécanismes de dégradation qui opèrent sont soit directement par la libération d'enzymes produites par la plante dans la rhizosphère, soit sont le résultat d'une activité métabolique.

Une fois dégradés, les polluants seront absorbés par la plante, incorporés dans les tissus et utilisés comme nutriments pour contribuer à la croissance des plantes (EPA, 1999). La décomposition des plantes peut être utilisée comme désinfection du sol uniquement de l'eau. Cependant, ce n'est pas une technique qui peut être utilisée pour désinfecter le sol avec des métaux lourds car ceux-ci ne se dégradent pas.

Ne pas confondre la phytodégradation avec la rhizodégradation, car ce sont deux techniques similaires, mais toutes sont également distinctes. En d'autres termes, tout ce qui inclut une activité bactérienne dans la racine ou la dégradation de contaminants.

Les peupliers (*Populus* spp.) sont les plantes les plus utilisées en phytoremédiation et plus particulièrement en phytolyse. Ces arbres sont efficaces pour la décontamination car ils présentent entre autres un taux d'érosion élevé, tolèrent des concentrations élevées de polluants organiques et s'établissent rapidement sur un site (Chang et al., 2005).

Bien que l'utilisation de plantes qui possèdent le potentiel de dégrader les composants organiques soit considérée comme une manière plus écologique par rapport aux techniques conventionnelles, néanmoins la dégradation des polluants peut produire des intermédiaires toxiques qui, dans certains cas, présenteront des risques pour l'environnement (EPA, 2000).



### **I.3.3.6. La Phytorestauration :**

La phytorestauration, nommée aussi phytoremédiation, est un processus qui consiste à utiliser des plantes qui sont capable de stabiliser, extraire, transférer, volatiliser et/ou détruire les produits chimiques toxiques et les polluants du sol, des sédiments ou de l'eau.

Cette technologie est utilisée, *in situ* ou *ex situ*, pour éliminer les métaux, pesticides, solvants, explosifs, hydrocarbures, radionucléides, etc. (Garbisu et Alkorta, 2001 ; Pivetz, 2001; Salt et *al.*, 1995).

La phytorestauration regroupe différentes méthodes qui se veulent toutes des techniques d'amélioration des sols et de l'eau contaminés par l'établissement d'un couvert végétal.

La phytostabilisation, la phytodégradation, la rhizodégradation, la phytovolatilisation, la rhizofiltration et la phytoextraction seront appliquées en fonction du type de contamination et des objectifs de remédiation à atteindre (Pivetz,2001).L'applicabilité de la phytoremédiation des sédiments dragués par usage de *Salix Viminalis* a été décrites par Vervaeke et *al.*,(2001) .

### **I.3.4. Avantages et Inconvénients de la phytoremédiation :**

#### **I.3.4.1 Avantages :**

La phytoremédiation est de plus en plus utilisée de nos jours car elle permet de préserver la structure du sol, ne nécessite aucun creusage (EPA, 2012). De plus, il est reconnu comme une option économique avec de faibles coûts de traitement (10 à 100 fois moins que les techniques traditionnelles).

On dit qu'en utilisant les technologies conventionnelles, le volume de matériaux enfouis ou brûlés est plus élevé: par exemple, pour les fosses, c'est l'essence qui fait beaucoup bouger la machine et fait un bruit turbulent. De plus, les combustibles fossiles ne sont pas utilisés pour la décontamination, à moins que seuls des médicaments à base de plantes ne soient utilisés (réduction de plus de 95%) La phytothérapie est désormais une option à envisager. De plus, l'utilisation de ces techniques botaniques s'applique à une variété de sites contaminés. Qu'il s'agisse de pollution organique ou inorganique, ou de pollution au niveau du sol ou dans les eaux souterraines. Sans oublier que la présence de végétation sur le site permet de réduire ou de prévenir l'érosion et d'obtenir un bénéfice visuel pour le paysage (Vishnoiet Srivastava, 2008). Bon pour l'environnement car les technologies traditionnelles le font au lieu de choisir l'énergie sale.

**I.3.4.2. Inconvénients :**

- ✚ Relargage possible par les feuilles.
- ✚ Biomasse faible
- ✚ Profondeur faible <0m50 Temps de dépollution long.
- ✚ Risque d'intégration à la chaîne alimentaire
- ✚ Risque de lessivage des métaux
- ✚ Pollution des nappes
- ✚ Risque de pollution génétique

**Chapitre 4 :**  
**Les métaux lourds et l'orge**

#### **I.4. Les métaux lourds :**

##### **I.4.1. Définition :**

Le terme de métaux lourds est arbitraire et imprécis. Il est utilisé pour des raisons de simplicité et il recouvre des éléments ayant des propriétés métalliques (ductilité, conductivité, densité, stabilité des cations, spécificité de ligand...) et un numéro atomique  $>20$  (Raskin et *al.*, 1994).

Les métaux lourds sont définis comme étant des éléments chimiques toxiques ayant une densité supérieure à  $5 \text{ g/cm}^3$  (Elmsley, 2001). Sous cette appellation figurent des éléments qui, pour certains, sont effectivement des métaux tels que Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Al... mais aussi des métalloïdes tels que As et Se. Ceux-ci sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces. Les plus toxiques d'entre eux sont le cadmium, l'arsenic, le plomb et le mercure. Ces éléments sont présents naturellement dans la croûte terrestre et dans tout organisme vivant, à des concentrations variables suivant les milieux et les organismes. Selon les textes législatifs, la pollution par les métaux toxiques (METOX) regroupe sept métaux et un métalloïde (chrome, zinc, cuivre, nickel, plomb, arsenic, cadmium et mercure) (Koller, 2004).

##### **I.4.2. Définitions, origine et importance des métaux :**

Les éléments traces métalliques (ETM), sont des éléments dont la concentration dans la croûte terrestre est inférieure à  $1 \text{ g/Kg}$ . Cette définition est aujourd'hui utilisée à la place du terme « métaux lourds » (métaux qui possèdent des masses volumiques supérieures ou égales à  $5 \text{ g/cm}^3$ ), celle-ci étant une appellation courante qui n'a ni fondement scientifique, ni application juridique (Miquel, 2001).

À ces éléments métalliques sont associés souvent les métalloïdes comme l'arsenic ou le sélénium. La caractérisation des risques liés aux métaux traces nécessite une prise en compte de certains paramètres qui leur sont spécifiques. Une classification chimique de l'ensemble des métaux a été proposée (Tessier et Turner, 1995).

Les métaux sont répartis en trois classes : la classe A, la classe B et la classe intermédiaire ou éléments de transition. Les exploitations des métaux sont très diversifiées, depuis les additifs de plomb dans les carburants jusqu'aux sels d'argent de l'industrie photographique, au nickel ou au cadmium des batteries d'accumulateurs, au zinc des gouttières ou au chrome des aciers inoxydables, au cuivre de l'industrie électrique ou à l'arsenic des produits phytosanitaires. (Stumm et Morgan, 1996).

**I.4.3. Principales propriétés physico-chimiques :**

Les métaux lourds possèdent les propriétés physiques générales des métaux (bonne conductivité thermique et électrique). Ils sont fortement électropositifs et donnent par perte d'électrons des cations métalliques de charge variable. Ces cations métalliques, qui présentent à la fois des densités de charge élevées et un caractère électrophile, peuvent former avec des ligands des liaisons ioniques, covalentes ou intermédiaires, et donnent naissance à des complexes plus ou moins stables (Diard, 1996).

**I.4.4. Oligoéléments ou élément toxiques :**

Les métaux sont souvent indispensables au déroulement des processus biologiques nombre d'entre eux peuvent s'avérer contaminants pour diverses formes de vie, lorsque leur concentration dépasse un seuil, lui-même fonction de l'état physico-chimique. C'est le cas du fer (Fe), du cuivre (Cu), du zinc (Zn), du nickel (Ni), du cobalt (Co)

Vanadium (V), du sélénium (Se), du molybdène (Mo), du manganèse (Mn), du chrome (Cr), de l'arsenic (As) et du titane (Ti) (Miquel, 2001). Certains de ces métaux sont aussi impliqués dans les processus moléculaires tels que le contrôle de l'expression des gènes, la biosynthèse des protéines, des acides nucléiques, des substances de croissance, de la chlorophylle et des métabolites secondaires, le métabolisme lipidique ou la tolérance au stress. D'autres ne sont pas nécessaires à la vie et peuvent être même préjudiciables comme le mercure (Hg), le plomb (Pb), le cadmium (Cd) et l'antimoine (Sb) (Chiffolleau et *al.*, 2001 ; Kabata-Pendias et Pendias, 2001). Tous les métaux lourds peuvent, à partir d'une concentration seuil, induire une toxicité chez les plantes. L'exposition excessive aux métaux lourds peut conduire à des effets très néfastes sur la santé humaine.

**I.4.5. Toxicité des plantes aux métaux lourds :**

Les minéraux et de nombreux polluants organiques persistent dans l'écosystème: les minéraux ne se décomposent pas et de nombreux polluants organiques sont difficiles à décomposer.

La toxicité des métaux lourds est due essentiellement à :

- Leur non-dégradabilité.
- Leur toxicité à faible concentration.
- Leur tendance à s'accumuler dans les organismes vivants et à se concentrer le long des chaînes trophiques

Son importance réside dans la fonction de transport des minéraux à l'interface entre le sol et la plante et au sein de la plante, où son mouvement détermine la concentration interne des minéraux. L'effet le plus courant et le moins spécifique des métaux lourds est la croissance réduite des différentes parties de la plante. Les symptômes de la toxicité des métaux lourds diffèrent légèrement de ceux causés par différents types de stress. Ils peuvent être classés en deux catégories: symptômes visibles et symptômes mesurables. Selon la quantité de stress, les feuilles peuvent présenter de la chlorophylle en raison de la perte de chlorophylle, de l'augmentation relative des caroténoïdes et d'une carence en fer (Romanowska, 2002). Les minéraux provoquent également une diminution de la photosynthèse qui résulte soit d'un effet direct sur le transport d'électrons et d'enzymes, soit d'un effet indirect (Stobart *et al.*, 1985).

#### **I.4.6. L'orge :**

##### **Taxonomie :**

**Règne :** Plantae Haeckel, 1866

**Classe :** Equisetopsida C.Agardh, 1825

**Clade :** Commelinids

**Ordre :** Poales Small, 1903

**Famille :** Poaceae Barnhart, 1895

**Tribu :** Triticeae Dumort, 1824

**Genre :** *Hordeum* L., 1753

**Espèce :** *Hordeum Vulgare* L, 1753



**Figure 8 :** *Hordeum Vulgare*

Source : [www.wikimedia.org](http://www.wikimedia.org) consulté le 10/05/2020

##### **I.4.6.1. Description botanique de la plante :**

###### ✓ **L'appareil végétatif :**

L'orge (*Hordeum vulgare*) est une plante herbacée annuelle qui peut atteindre 60-120 cm de hauteur à maturité, selon la variété.

###### ✓ **Le système racinaire :**

Le système racinaire est groupé et se compose de racines séminales (racines primaires) qui se développent avec la germination des graines et de racines adventives résultant du labour de la tige formé à partir de la base de la tige dans ladite région de la couronne.

✓ **Le système aérien :**

**a. La tige**

Les tiges sont des câbles cylindriques, divisés en 5-8 points internes, séparés par des sections transversales au niveau des nœuds. Les bases sont généralement plus courtes. (Camille, 1980)

**b. Les feuilles**

Les feuilles, disposés en alternance sur le chaume, ils proviennent des nœuds, et sont constitués par la gaine (enveloppant le chaume), une feuille, ligule peu visible et oreillettes microthermal plus longtemps que les autres céréales. L'angle d'insertion de la feuille sur le chaume est typique pour chaque variété. (Belaid, 1996)

**c. La fleur**

L'inflorescence est un composé caractérisé par une courte ouverture en zigzag, à partir de laquelle des nœuds (numérotés de 10 à 30) sont insérés trois épillets à une seule fleur.

La fleur, hermaphrodite, comprend trois étamines et deux stigmas poilu; il y a aussi deux lodicule. La pollinisation est anémophile.

**d. Le fruit**

Le fruit est une peau végétale qui adhère à la graine. Et rainure ventrale qui peut être plus ou moins différenciée selon le cultivar. La couleur est généralement jaunâtre bien que certaines variétés de caryopse aient une couleur blanche, rougeâtre ou noire.

✓ **L'appareil reproducteur :**

L'orge est autogame. Son inflorescence est un épi composé d'unités morphologiques de base : les épillets « groupes de fleurs » enveloppées de leurs glumelles et incluses dans deux bractées ; les glumes (Belaid, 1996).

**I.4.6.2. Caractère de l'orge :**

L'orge peut végéter dans des sol calcaire alluvial, limoneux, ayant un pH de 8,1, une teneur de 0,38 de carbone organique, et où N, P et K sont disponibles (185,0 kg ha<sup>-1</sup>, 15,25 kg ha<sup>-1</sup> et 265,0 kg ha<sup>-1</sup> respectivement) (Sriman et al., 2018).

**I.4.6.3. Méthode de culture de l'orge :**

Considérant l'origine de l'orge et ses caractéristiques de croissance, les conditions écologiques propices à sa culture devraient être relativement similaires à celles décrites pour le blé. Cependant, cette espèce possède un potentiel d'adaptation supérieur à celui du blé,

La culture de l'orge n'est pas favorisée sous des conditions de climats tropicaux chauds et humides. La production d'orge est optimisée sur des sols alcalins à légèrement acides à

texture moyenne et bien drainés mais produit peu sur des sols sablonneux, pauvres et fortement acidifiés ( $\text{pH} < 4.7$ ).

Les méthodes de culture sont semblables à celles utilisées pour le blé et l'évolution des techniques de préparation des sols, semences, irrigation, moisson, etc., (Leonard, W. H. et J. H. Martin, 1963).

#### **I.4.7. L'orge et métaux lourds :**

Les métaux lourds sont naturellement présents dans le sol, l'eau, l'air, les plantes, Nombreuses espèces végétales peuvent être atteintes par la pollution métallique, notamment les espèces céréalières. Aniol et Gustafon (1984) ont montré que les différentes céréales ne réagissent pas de la même façon aux ETM. Ces deux auteurs ont classé, en 1984, le seigle comme la céréale la plus tolérante, le blé présentant une tolérance intermédiaire et l'orge comme la plus sensible.



**Partie II :**  
**Partie Expérimentale**

## II.1. Cadre géographique :

Située au Nord Ouest du pays, la wilaya de Tiaret s'étend sur une superficie de 20.086,64 km<sup>2</sup>. Elle se caractérise par un territoire constitué de zones montagneuses au Nord, de hautes plaines au centre et l'espace steppique au Sud, ce qui lui permet d'être une zone de contact entre le Nord et le Sud(ANDI, 2014).

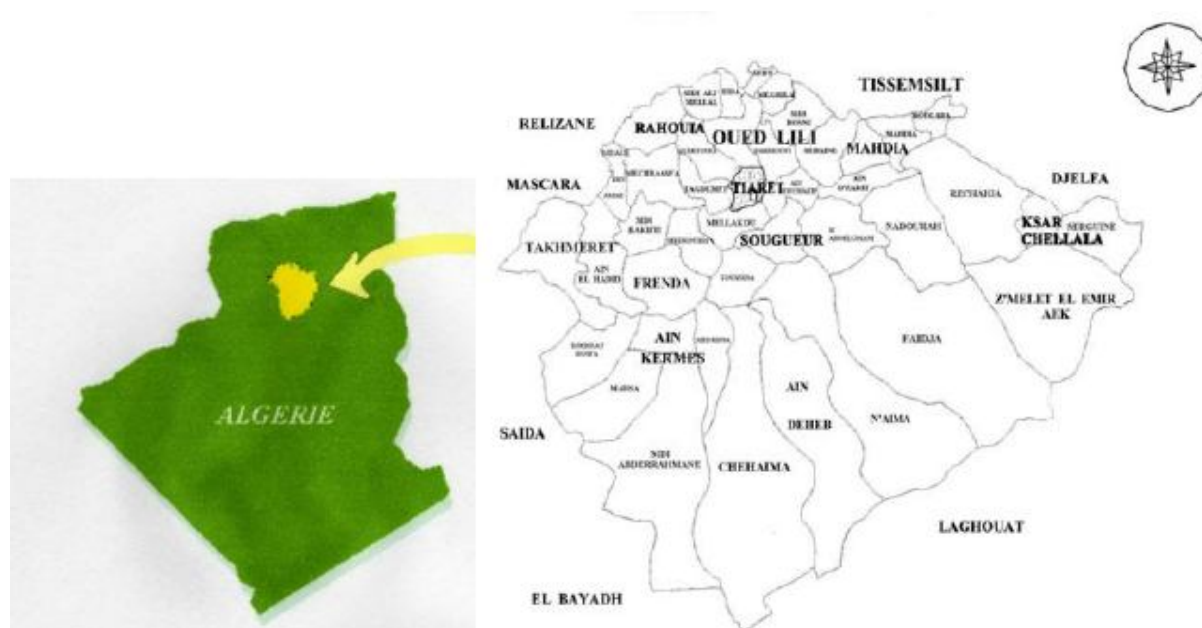
Délimitée par les coordonnées: Latitude: 35.35; Longitude: 1.43; elle s'étend sur une partie de l'Atlas tellien au Nord et sur les hauts plateaux au centre et au Sud, bornée par plusieurs wilayas (Fig. 08) à savoir:

La wilaya de Tissemsilt et Relizane au Nord;

La wilaya de Laghouat et El Bayadh au Sud;

La wilaya de Mascara et Saida à l'Ouest;

La wilaya de Djelfa à l'Est et Sud Est.



**Figure 09:** Carte de la situation géographique de la wilaya de Tiaret (ANDI, 2014)

**II.2. Cadre topographique :**

Sur le plan topographique, la wilaya de Tiaret se caractérise par deux grands ensembles morphologiques : l'Atlas Tellien et les hautes plaines, du Nord au Sud ; on distingue :

Une chaîne de piémont qui constitue le versant méridional de l'Ouarsenis ; le domaine tabulaire qui s'étend au pied de l'Ouarsenis appelé le plateau de Sersou.

Les monts de Frenda et les hauts plateaux qui représentent une vaste plaine regroupant la cuvette du chott Chergui à l'Ouest et le chaînon du Nord (ANDI, 2014).

**II.3. Cadre climatique :**

La wilaya de Tiaret traverse, sur le plan climatologique, au cours de l'année deux périodes principales qui expriment le contraste important qui sévissent durant l'année, à savoir:

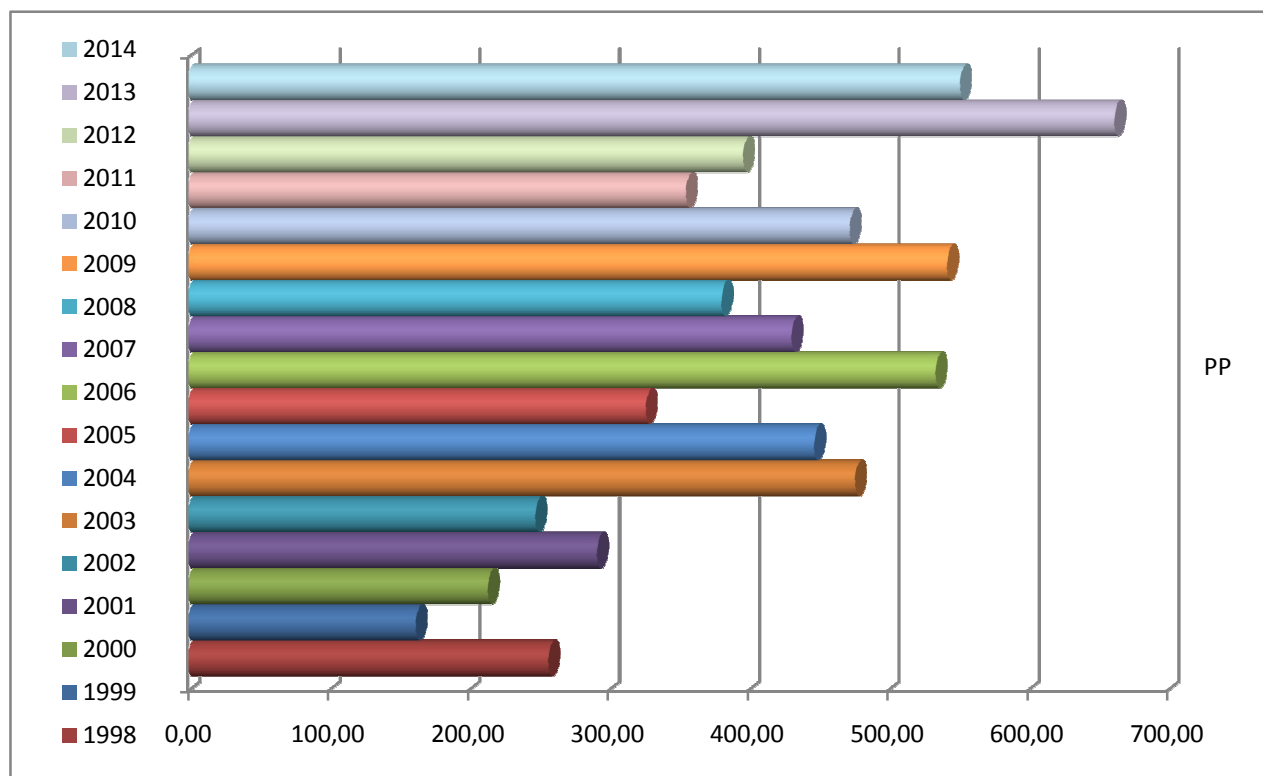
\* Un hiver rigoureux avec de fréquentes chutes de neige

\* Un été chaud et très sec

**II.3.1. Pluviométrie :**

La wilaya de Tiaret se situe entre les isohyètes 350mm au Sud et 470mm au Nord.

L'irrégularité saisonnière et la distribution annuelle des précipitations sont illustrées dans la figure 10.



**Figure 10 :** Les précipitations interannuelles (mm) de la région de Tiaret entre 1998 et 2014

Source: [www.tutiempo.net](http://www.tutiempo.net). Consulté le 15/01/2015.

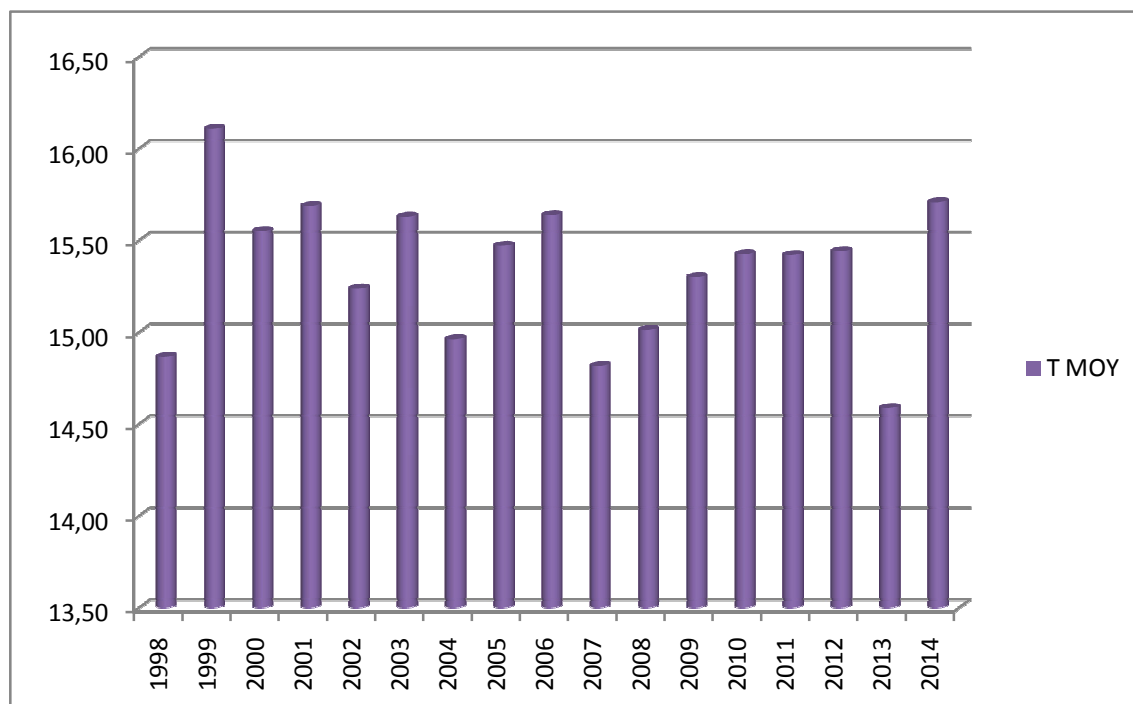
Les précipitations oscillent, sur une période de 16 ans (1998-2014), entre un minimum de 162,57 mm et un maximum de 662,19mm.

Les années les plus arrosées sont 2013, 2014, 2009 et 2006 avec respectivement: 662,19 mm ; 551,9 mm ; 542,54 mm et 534,41 mm.

### II.3.2. Température :

Intervenant directement dans les processus biologiques et chimiques de la biosphère ainsi que dans l'activité humaine, la température représente l'un des facteurs essentiels du climat.

En effet une élévation importante de la température engendre une évaporation des oueds, des rivières, des mers, limitant ainsi la biodégradation, c'est un facteur caractérisant le type de climat et déterminant du régime d'humidité. La moyenne des températures est résumée dans la figure 11.



**Figure11** :Les températures moyennes interannuelles (°C) de la région de Tiaret entre 1998 et 2014. Source: [www.tutiempo.net](http://www.tutiempo.net). Consulté le 15/01/2015.

La figure 11 relative aux températures moyennes interannuelles fait ressortir les observations suivantes:

Le maximum des températures est enregistré durant indique que le mois de Septembre de l'année 1999 est le plus chaud avec 38,3°C, le mois de Juillet durant les années 2009, 2010, 2003, 2012 et 2005 avec respectivement : 37,2°C, 36,9 °C; 36,8°C, 36,4 °C; 36,4°C ; ainsi que le mois d'Août de l'année 1999 avec 36,3°C.

Nous constatons pareillement que le mois de Janvier et Février de l'année 2005 sont les plus froids avec -3,2°C, -2,4°C, ainsi que le mois de Février qui à une température minimale de -3,2°C, suivit par le mois de Janvier de l'année 2000 et 2012 avec respectivement une température de -1,9°C ; 1,5°C, également l'année 2006 est froide durant les mois de Janvier et Février avec -0,8°C et -0,3°C.

#### II.4. Facteurs climatiques annexes :

A côté de ces deux principaux facteurs climatiques, d'autres facteurs peuvent exercer une certaine influence sur les plantes, parmi les plus importants nous citons l'humidité relative, le vent et gelée.

##### II.4.1. Humidité :

D'après le tableau 04, nous constatons que l'humidité relative moyenne annuelle est de 61,57%. Elle atteint son minimum durant le mois de Juillet, Août (inférieur à 40%).

Le maximum est enregistré dans le mois de Décembre, Janvier et Février avec une moyenne supérieur à 70%.

**Tableau 04 :** Humidité moyenne durant 2003-2014

Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Moy	79,07	75,73	72,42	66,88	60,68	46,74	37,80	37,84	50,16	57,02	74,57	79,96

Source : [www.tutiempo.net](http://www.tutiempo.net) Consulté le 15/01/2015

##### II.4.2. Le Vent :

Le vent possède un régime de déplacement variable en fonction de l'altitude, la pression atmosphérique et les saisons. C'est un facteur climatique qui entraîne des variations de températures et d'humidité et exercent une action mécanique et physiologique sur les arbres des forêts.

**Tableau 05 :** Vitesse moyenne du vent durant 2003-2014

Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Moy	18,56	17,96	17,64	14,82	11,98	11,86	11,48	10,64	11,17	10,73	16,78	14,82

Source : [www.tutiempo.net](http://www.tutiempo.net) Consulté le 15/01/2015

Les vents dominants sont ceux d'une direction Nord-Ouest, et les vents du Nord sont généralement frais, leur vitesse moyenne annuelle est de 14,04Km/h.

Les vents de direction Sud-est et Est sont les moins fréquents.

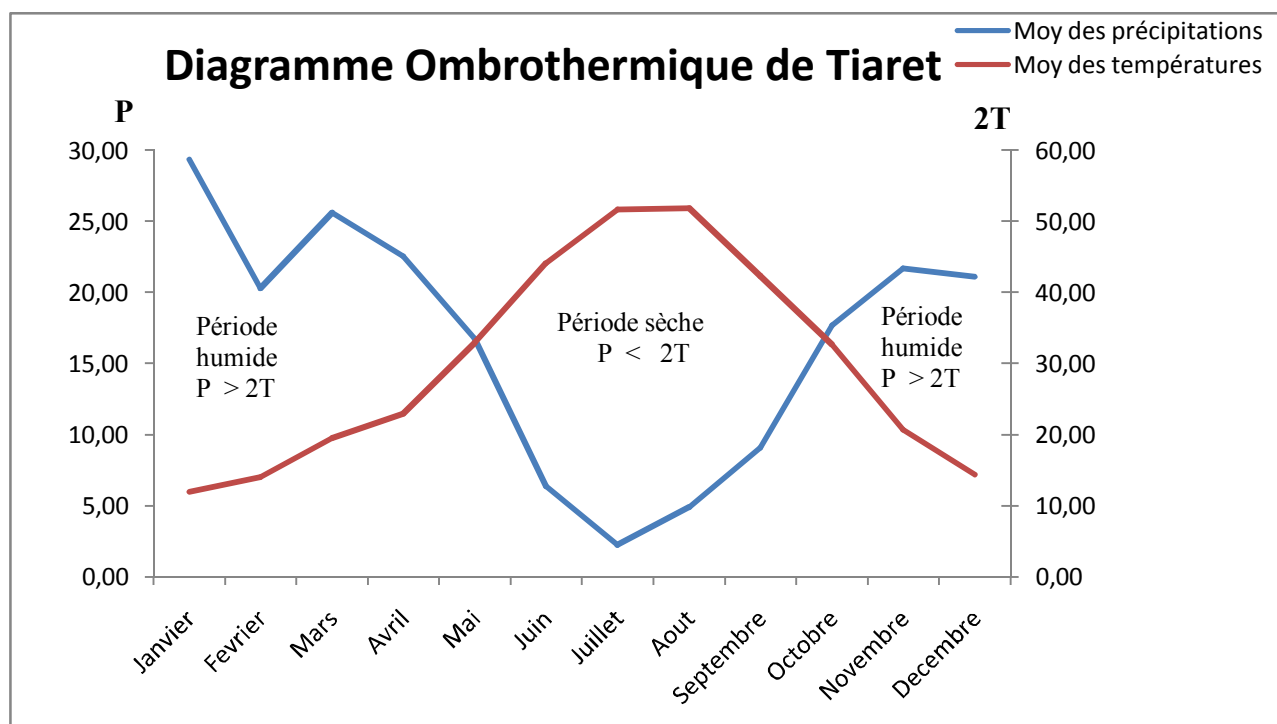
La période estivale est caractérisée par le Siroco, qui vient de Sud ou Sud-ouest C'est un facteur de propagation des incendies.

## II.5. Synthèse climatique :

### II.5.1. Le diagramme Ombrothermique :

Le diagramme ombrothermique de Gausсен, nous permet de distinguer les différentes périodes climatiques au cours d'une année. L'échelle utilisée dans le diagramme consiste à doubler la valeur de la température par rapport à la pluviométrie ( $p=2T$ ) (Ozenda, 1982).

Gausсен et Bagnouls considèrent que la saison sèche représente pour de nombreux pays la période critique de végétation, et par conséquent le facteur écologique principal d'après la loi des facteurs limitant (Ozenda, 1982).



**Figure 12 :** Diagramme Ombrothermique de Gausсен pour la région de Tiaret (Données climatique du 1998 au 2014)

La détermination de la période sèche de la zone d'étude est déduite directement de la courbe Ombrothermique (Fig. 12) ; elle est de l'ordre de cinq mois, qui va de mi-Mai jusqu'à mi-octobre, le reste des mois de l'année, constitue la période humide.

### II.5.2. Quotient pluviométrique d'EMBERGER :

Les températures et les précipitations sont interférences. Elles caractérisent le type de climat régnant dans une région donnée. La mesure de cette interférence conduit à l'établissement des

indices pluviométriques qui permettent la classification des différents climats (Dajoz, 1978 ; Ozenda, 1982 ; Ramade, 2003).

Le quotient pluviométrique d'EMBERGER est un indice pluviométrique propre à la région méditerranéenne (Ozenda, 1982 ; Ramade, 2003). Calculé par la formule suivante:

$$Q_2 = \frac{2000 \times P}{M^2 - m^2}$$

Où :

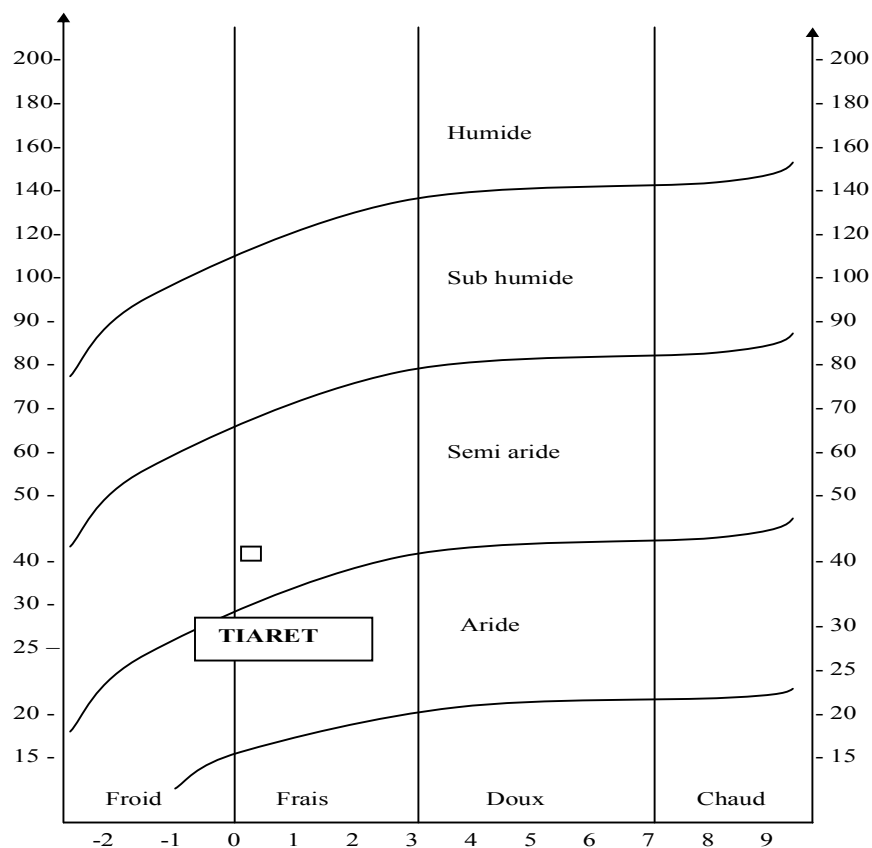
**Q<sub>2</sub>** : quotient pluviométrique;

**P** : précipitation annuelle en (mm);

**M** : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud;

**m** : moyenne des températures minimales du mois le plus froid;

D'après ces données climatiques et d'après le calcul du quotient pluviométrique d'EMBERGER qui est égale à 39,72. On arrive à dire que la wilaya de Tiaret se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver frais (Figure 13).



**Figure 13** : Diagramme d'EMBERGER



## II.6. Végétation :

La conservation des forêts de la wilaya de Tiaret gère un patrimoine forestier de 141.000 ha ainsi qu'une superficie de 332.938 ha de nappes alfatières sur une superficie steppique de 965.140 ha (Services des forêts de la wilaya de Tiaret, 2009).

Les principales forêts de la wilaya de Tiaret sont :

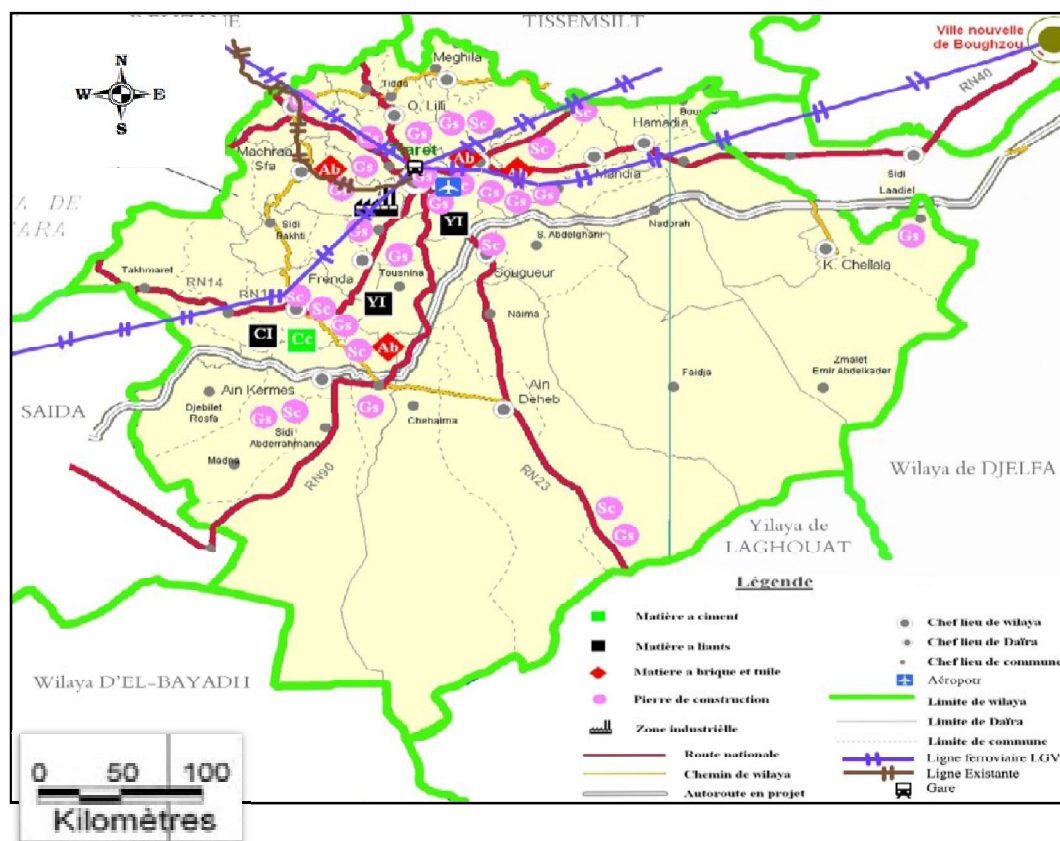
Forêt domaniale des zdamas chergui	44000 ha
Forêt domaniale des zdamasgharbi	37443 ha
Forêt domaniale de Tagdemt	4989 ha
Forêt domaniale de Béni affène	4018 ha
Forêt domaniale de Tiaret	508 ha
Forêt communale de Tiaret	279 ha
Forêt communale de Guertoufa	53 ha
Forêt sectionnale d'Azzouania	127 ha

Actuellement le patrimoine forestier de Tiaret est considéré comme moyennement boisé. L'espèce forestière la plus répandue est le chêne vert (*Quercus ilex*), qui constitue 60% du couvert végétal avec d'autres espèces comme le chêne liège qui occupe 20% dans un état très dégradé on a aussi pin d'Alep (*Pinusalepensis*), et le genévrier de Phénicie (*Juniperusphoenicea*).

## II.7. Réseau routier de la wilaya de Tiaret :

Le réseau routier algérien demeure l'un des plus denses du continent africain, sa longueur est de 112.039 km dont 29573 km de routes nationales. La wilaya de Tiaret quand à elle, se caractérise par un réseau routier important (Fig. 14), avec (Direction des travaux publique de Tiaret, 2013) :

- ◆ Routes nationales (RN) : 569 km
- ◆ Chemins de Wilaya (CW) : 708 km
- ◆ Chemins communaux (CC) : 1135 km



**Figure 14 :** Carte du réseau routier de la wilaya de Tiaret(Direction des travaux publique de Tiaret, 2013).

## II.8. Le parc automobile de la wilaya de Tiaret :

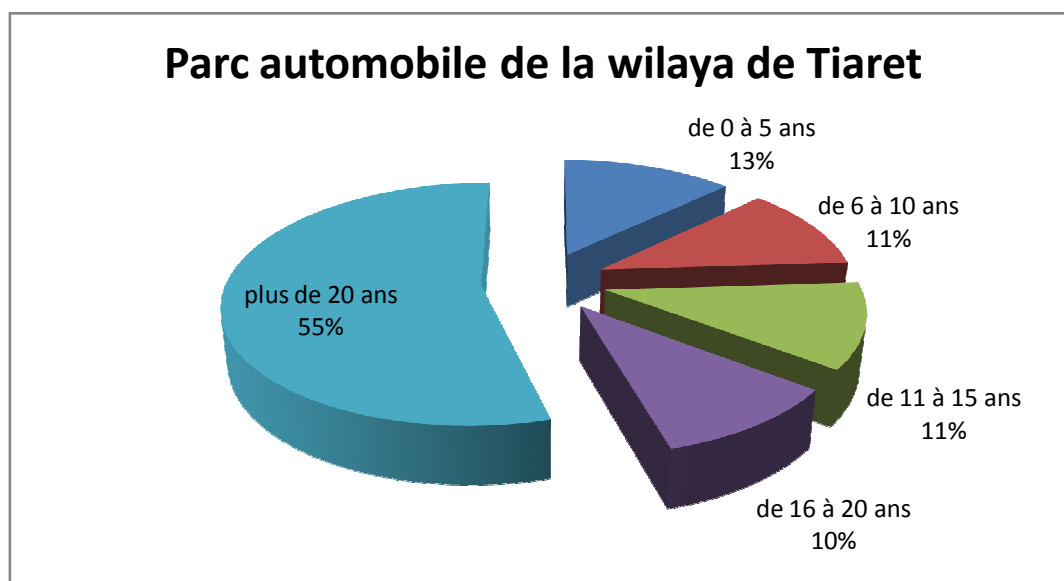
Le transport représente un des piliers fondamentaux du développement durable et de la prospérité de tout pays. Des systèmes de transport efficaces et des réseaux modernes sont donc une nécessité pour le développement économique, le bien-être social, la production à grande échelle, et la préservation de l'environnement.

En Algérie, le secteur du transport connaît une véritable mutation. Un grand nombre de projets ont été réalisés où sont en phase de réalisation, afin de rendre ce secteur plus performant et plus efficace dans sa contribution dans le développement économique du pays.

Le réseau routier algérien demeure l'un des plus denses du continent africain, sa longueur est de 112.039 km dont 29573 km de routes nationales, en effet ce réseau compte 5 123 705 véhicules en 2013(ONS, 2015).

Le parc automobile de la wilaya est constitué de 64 325 véhicules, tous types confondus, en 2013(ONS, 2015). En effet le parc de la wilaya de Tiaret est fortement hétérogène du fait de la variété des véhicules qui le constituent (véhicules particuliers ou utilitaire, essence ou

diesel, récents ou âgés ...), sur ce total les véhicules de tourisme constitue 34 434 véhicules et les véhicules âgés de plus de 20 ans représentent 55% (Fig. 15) (Services des cartes grises de la wilaya de Tiaret, 2015 ; ONS, 2015).



**Figure 15 :** Répartition du parc automobile de la wilaya de Tiaret selon les classes d'âges (Services des cartes grises de la wilaya de Tiaret, 2015).

## II.9. Présentation de la commune de Tiaret :

La commune de Tiaret est le chef-lieu de la Wilaya, située au Sud-ouest d'Alger à 340km. C'est une commune à caractère urbain car elle se compose d'une grosse agglomération chef-lieu et d'une zone éparsée, elle dispose de deux agglomérations secondaires: l'agglomération de Karman, située à l'est de la ville sur l'embranchement de la RN 14 qui mène vers Alger. L'agglomération d'Ain Mesbah, située au Sud sur la RN 23.

Statistiquement, l'agglomération chef-lieu de Tiaret se confond avec la commune puisque la zone éparsée représente 4% de la population globale de la commune. Elle a vu sa population quadruplée de 1966 à 1998 pour passer de 37990 à 167000 habitants répartis sur une superficie de 1227Km<sup>2</sup>. Ce qui nous donne une densité de 136,10 hab /Km<sup>2</sup> et avec un taux d'accroissement de 3,66% (Période décennale 1977-1987) ce dernier a diminué, il a atteint 4,11% en 1998 (ONS, 1998).

### \* Limites de la commune de Tiaret sont :

Au Nord les communes Oued Lili, Dahmouni et Guertoufa.

A l'Est les communes d'Ain Bouchekif

A l'Ouest la commune de Tagdempt

Au Sud celle de Mellako

## **II.10. Voies de communications :**

### **II.10.1. Consistance du réseau routier interne :**

La ville de Tiaret compte un réseau routier urbain très important, plus de 200 Km, son état est mauvais et cela est due principalement à la défectuosité de certains réseaux, à la nature des sols et au relief accidenté qui constituent un facteur de dégradation de ce réseau.

Les actions engagées par la collectivité sur ses propres ressources pour faire les réparations nécessaires, se sont avérées inadéquates et très onéreuse eu égard à l'importance de ces dégradations et aux faibles moyens de la commune.

La ville de Tiaret est constituée par trois types de zones d'habitat, ces derniers qui définissent le type de voirie existant car le réseau urbain de Tiaret ne s'organise pas selon une hiérarchie spatiale et fonctionnelle (Boulevard principal, boulevard secondaire, voirie primaire, secondaire ...).

- **Zone d'habitat centre-ville:** ayant déjà eu des aménagements urbains de la voirie, assainissement, inscrits dans différents programmes de développement.
- **Zone d'habitat viabilisé:** mais dans l'achèvement des travaux ont rencontré des difficultés dues aux surcoûts.
- **Zone d'habitat précaire:** groupant un nombre d'habitation dans l'implantation ne permet pas à la collectivité d'aménager ces sites.

### **II.10.2. Le réseau routier externe :**

D'après la direction des travaux publics de Tiaret (2013), le chef-lieu de la commune de Tiaret et le carrefour de plusieurs voies de communications d'une importance nationale; mais dans l'état reste au demeurant moyen.

#### **II.10.2.1. Les routes nationales :**

La ville de Tiaret est liée généralement par trois principaux axes de route (Fig.16) qui sont :

- **La R.N -14:** cet axe relie Tiaret aux Wilayates de Saida et Mascara ainsi que Alger par Tissemsilt.
- **La R.N -23:** c'est un axe très important entre Tiaret et Relizane d'une part, d'autre part entre Tiaret et Aflou.

- **La R.N -90:** Un troisième axe très important reliant la commune au Nord par Oued Rhiou et au Sud à travers Ain Guessma.



**Figure 16 :** carte caractéristique des routes nationales de la wilaya de Tiaret (Urbatia, 2013)

#### II.10.2.2. Les chemins de la wilaya :

Le réseau secondaire est généralement dans un état moyen. Il draine un volume de Trafic peu important par rapport au réseau primaire. On note trois Chemins de Wilaya (Urbatia, 2013):

- **CW -07:** D'une distance de 15 Kms, c'est le chemin de wilaya le plus important, car il relie Tiaret à Bouchekif.
- **CW-11:** Relie la Tiaret à sidi Hosni à l'Est, et à Mechraa Sfa à l'Ouest du PK 38 au PK 66. Ce chemin se caractérise par une longueur de 28 Kms.
- **CW-3 :** De longueur de 5.5 Kms ce qui donne une longueur totale de 41.5 Kms.

#### II.10.2.3. Etat du réseau :

L'état des réseaux routiers de la wilaya de Tiaret peut être classé en 03 catégories (AFT, 2001)

Mauvais état: 120 kms.

Etat moyen: 60 kms.

Bon état: 20 kms.

#### II.10.2.4. Les voies pénétrantes :

Dans le cadre de l'aération du tissu urbain et solutionner le problème du trafic urbain

Un ensemble de voies pénétrantes a été réalisé récemment parmi lesquelles on cite :

P1 à double voie : Route D'Alger- Véral. (Voie d'évitement)

P4 .....de longueur 1500m

P5.....de longueur 1100m

P6.....de longueur 1300m

P7.....de longueur 800m

P8.....de longueur 400m

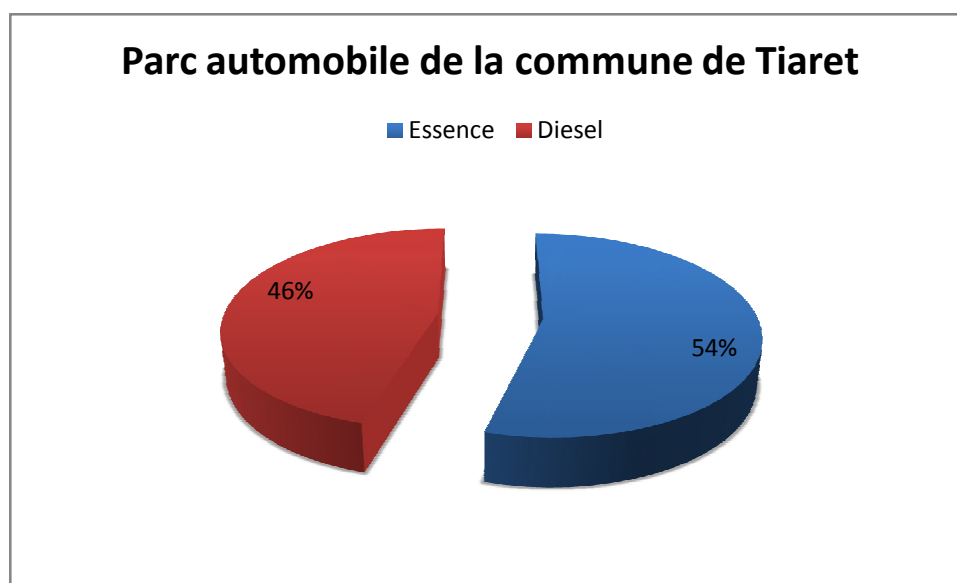
P9.....de longueur 500m

P10 à double voie : Sonatiba –Antenne A.P.C.

Voie Teffah ..... De longueur 700m et d'une largeur moyenne de 11 m (Urbatia ,2013).

### II.11. Le parc automobile de la commune de Tiaret :

Selon la direction de la planification et de l'Aménagement du territoire de Tiaret (2018), le parc automobile de la commune de Tiaret est constituée de 72938 véhicules (n'apparaissent pas les remorques et semi-remorques « véhicules tractés ») dont (Fig. 17) 54 % sont à essence et 46 % véhicules sont Gasoil.



**Figure 17 :** Parc automobile de la commune de Tiaret selon le type de carburant. (ONS 2018)

### II.12. Stockage et distribution de carburants :

#### II.12.1. Capacité de stockage installation intégrée de distribution :

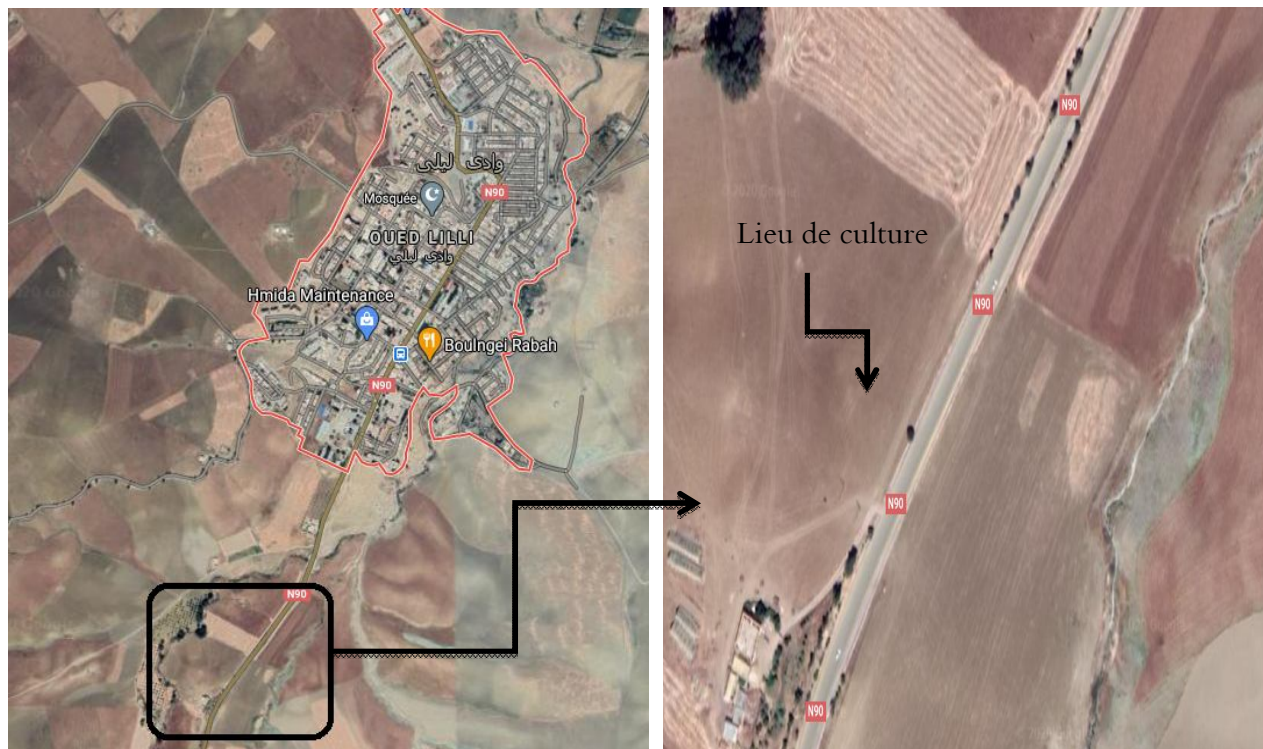
- ✓ Essence super .....4900 m<sup>3</sup>.
- ✓ Essence normal..... 9000 m<sup>3</sup>.
- ✓ Gasoil..... 21670 m<sup>3</sup> (Naftal, 2013).



## II.13. Zone De Culture :

### II.13.1. Lieu de culture :

La zone d'étude est localisée dans la wilaya de Tiaret, une zone sur laquelle porte notre travail c'est une terre agricole dans la daïra d'Oued Lilli a cote de R.N-90. (Figure 18)



**Figure 18** : lieu de travail à Oued Lilli (Google Maps modifié, 2020)

### II.13.2. Choix du lieu :

La zone d'étude est localisée dans la wilaya de Tiaret, au niveau d'une zone agricole dans la daïra d'Oued Lilli a côté de la R.N 90 (Figure 18).

### II.13.3. Coordonné Géographique :

Latitude: 35.4997, Longitude: 1.26343

Nord : 35° 29' 58.92" N , Est : 1° 15' 48.348" E

### II.13.4. Choix de l'espèce :

L'espèce que nous avoir choisi pour notre étude c'est l'Orge (*Hordeum vulgare*) les graines de cette espèce ont été obtenu d'un agriculteur local.

Cette espèce à été choisi parce que notre zone est une zone connue par la céréaliculture en plus la culture de l'orge est plus fréquente dans cette région.



**Figure 19** : Photo de Zone du Culture à Oued Lilli (Photo originale, 2020)

### **II.13.5. Choix Des Métaux :**

#### **II.13.5.1. Le zinc:**

Le zinc est le plus abondant après le fer. Il est largement répandu dans la croûte terrestre. Le minéral le plus répandu est la sphalérite ou la blende (sulfure de zinc). Ce minéral contient également du fer, du cadmium, ...qui sont à l'origine de la toxicité au cours de l'extraction du zinc (Logan et Traina, 1993) Le déchet majeur de cette industrie est la jarosite. Ce solide est dangereux pour l'environnement à cause de la présence de Cd, Pb, Zn, etc.

Les sources d'exposition sont présentes dans toutes les applications du zinc (Industrielles, agricoles, médicales, vétérinaires, ...). Les mines de zinc et de plomb, le raffinage du zinc, la galvanoplastie, les engrais phosphatés, les insecticides, les pigments constituent des sources de pollution par le zinc.(Kabata-Pendias, 1992).

#### **II.13.5.2. Le cuivre:**

Le cuivre est utilisé depuis l'âge de bronze car il existait à l'état natif. Il se trouve sous forme de sulfures cuivreux Cu et cuivrique  $Cu_2S$ , d'oxyde  $Cu_2O$  ou de carbonates basiques. Le cuivre trouve ses applications dans de nombreux cas tels que les fils électriques, la chaudronnerie, les conduites pour fluides, etc. Les sels cuivreux et des sels cuivriques sont utilisés par l'industrie comme catalyseurs, pigments, sel de photographie, préservation du bois, stabilisants chimiques, ...



Il est utilisé par l'agriculture comme insecticides, antifongiques, anti-cryptogamiques, agents de conservation des graines, ... De fait de sa forte affinité pour les composés organiques complexants, le cuivre est souvent présent sous forme de complexes organo - métalliques (Baize, 2000) retrouvés dans la solution d'un sol amendé en boues d'épuration urbaines, 80 % de cuivre sous forme de fulvates.

#### **II.13.5.3. Le Plomb :**

Le Plomb est probablement le polluant le plus connu de l'opinion publique, d'une part, parce que son utilisation a été généralisée pendant très longtemps et d'autre part, parce qu'il représente un réel danger pour la santé publique (saturnisme, troubles psychique.) De plus, on sait maintenant que son origine dans l'atmosphère ou dans les eaux superficielles est essentiellement anthropique. D'après Ramade (1992), les apports anthropiques de plomb sont dix fois supérieurs aux apports naturels (volcanisme, érosion, feux de végétation, embruns marins...). Pour d'autres auteurs, 99.7% des émissions atmosphériques de plomb sont d'origine anthropique, et une grande part de ces émissions incombe à la circulation automobile, et notamment à la combustion de l'essence (le plomb est utilisé dans les hydrocarbures sous forme d'*alkylplomb* pour ses propriétés antidétonantes [Chassard-Bouchaud, 1995]), à l'usure des freins, des pneus, des carrosseries [Colandini, 1997], [Pagotto, 1999]. Une diminution des quantités de plomb émises dans l'atmosphère a été constatée, notamment depuis l'utilisation de carburant sans plomb. Sa concentration dans les eaux de ruissellement semble en diminution.

#### **II.14. Protocole Expérimental :**

Nous avons choisi une zone proche d'une source de pollution due au transport routier. Après avoir inspecté le lieu, nous avons préparé le sol pour les plantations en utilisant une laserfouette et le râteau. Nous délimitons notre zone en 3m de chaque côté, puis la divisons en cinq lignes (Figure (19)). Avant de planter, nous avons pris un échantillon de sol pour faire les analyses.

Après récupération des graines de l'orge d'un agriculteur de la région d'oued Lili. Le 13 décembre 2019 nous avons planté cette pièce.

Nous déterminons la période d'arrosage (une fois par semaine) après 13 jours de plantation, la plantule est apparue. Nous l'inspectons tous les cinq jours; Afin de mesurer le développement de la hauteur de plante (tableau 6).

A la fin de notre expérimentation, nous avons extrait toutes les parties de la plante (les racines, la tige et les feuilles), et les mettre chaque organe à part dans des sachets en papier, en plus de prélever un échantillon de sol pour analyse.



**Figure 20** : Photo de Zone du Culture à Oued Lilli (Photo originale, 2020)

## **II.15. Protocoles analytiques et caractérisation physicochimique des échantillons :**

### **II.15.1. Préparation des échantillons de sol pour l'analyse physicochimique :**

L'échantillon destiné au laboratoire est soumis aux différents traitements suivants :

- Identification
- Séchage à l'air, puis broyage
- Réduction des mottes
- Tamisage (avec pesée du refus si nécessaire)
- Division (le cas échéant)
- Mise en boîte et identification

**- Séchage à l'air :**

La totalité de l'échantillon destiné au laboratoire est étalée sur un plateau et placée sous la rampe de séchage pendant une nuit, ou plus si nécessaire.

**- Tamisage à 2 mm :**

L'échantillon est désagrégé mécaniquement et passé au travers du tamis de 2mm. Lorsque les échantillons contiennent de grosses pierres ou de grosses mottes, ils passent d'abord dans un tamis de 10mm, puis de 5mm avant de terminer sur un tamis de 2mm.

**II.15.2. Réactifs et appareillages :**

Les produits chimiques utilisés sont de qualité analytique reconnue. La verrerie et les équipements en contact avec les échantillons sont nettoyés avec des solutions d'acide nitrique à 10 % puis rincés à l'eau bidistillée.

**II.15.3. Caractérisation physicochimique :**

Les caractéristiques physico-chimiques du sol ; la structure, la texture et la composition lui confèrent des caractéristiques particulières qui influencent les phénomènes d'infiltration et de rétention des éléments traces métalliques.

Après les prélèvements, les échantillons sont d'abord séchés à l'air libre puis à 40°C avant d'être tamisés à 2 mm, selon la norme NF ISO 11 464 de prétraitement des sols pour analyses physicochimiques (AFNOR, 1999).

La détermination de la distribution de la taille des particules, ou composition granulométrique du sol, est appelée analyse granulométrique. La séparation des particules par groupes de taille est réalisée par tamisage, au travers de tamis.

La détermination des différentes classes de particules minérales identifiées s'effectue selon leur taille. L'échelle utilisée est celle d'Atterberg qui donne 5 classes de particules :

- Argiles : 0 à 2  $\mu\text{m}$ ,
- Limons fins : 2 à 20  $\mu\text{m}$
- Limons grossiers : 20 à 50  $\mu\text{m}$ ,
- Sables fins : 50 à 200  $\mu\text{m}$ ,
- Sables grossiers : 200  $\mu\text{m}$  à 2mm.

L'analyse consiste en une mise en suspension dans l'eau des particules après destruction de la matière organique et des agrégats et dispersion des particules d'argile. Les particules sont, par hypothèse, supposées avoir toutes la même densité et une forme

sphérique. Cette suspension étant stabilisée dans des conditions bien définies, la séparation des différentes classes s'effectue par sédimentation gravitaire pour les fractions fines (<50 $\mu$ m) et par tamisage pour les fractions supérieures.

La proportion de particules fines est une information importante, car elle gouverne certaines propriétés physiques du sol comme la perméabilité ou la sensibilité à des entraînements mécaniques (Conil et Clozel, 1999).

Les caractéristiques physico-chimiques, ont été déterminées selon les normes françaises en vigueur pour l'analyse des sols (AFNOR, 1999). En reportant les pourcentages de sables, limons et argiles dans le triangle de texture proposé par le Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis (USDA) (Bonneau et Souchier, 1979), on peut déterminer la texture du sol.

#### **II.15.3.1. Détermination du pH :**

Cette méthode instrumentale de mesure en routine du pH est appliquée à tous les types de sols séchés à l'air. La mesure s'effectue à l'aide d'une électrode de verre combinée trempant dans une suspension de sol dans un rapport (M/V) de 1/2.5 :

#### **II.15.3.2. Détermination des bases échangeables et de la C.E.C :**

L'échange est réalisé par une solution d'acétate d'ammonium 1N tamponnée à pH=7.00, en excès :

Si les cations échangeables sont uniquement demandés, alors l'extraction est réalisée par agitation (Norme NF X31-108). Si la mesure de la C.E.C doit être réalisée, alors l'échange est réalisé par percolation (Norme NF X 31-130). L'excès d'ammonium est éliminé par lavage à l'alcool éthylique. La C.E.C est déterminée par déplacement de l'ion ammonium fixé par une solution de NaCl 1.0M. Les ions NH<sub>4</sub> déplacés du complexe d'échange correspondent à la capacité d'échange cationique. Ils sont dosés par colorimétrie automatique (l= 630nm) .

#### **II.16. Préparation des solutions et extraction des éléments métalliques :**

##### **Protocole sol :**

Au laboratoire, les échantillons de sol ont fait l'objet des opérations suivantes (Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques « CERTU », 2004) :

- Les échantillons sont mis dans des creusets en porcelaine étiqueté. Ils seront ensuite mis dans l'étuve pendant 72h à une température de  $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  afin de les déshydratés.
- On procède à la pesé de 1g de chaque échantillon à l'aide de la balance électronique. L'échantillon est calciné dans un four dont la température est augmenté progressivement jusqu'à  $500^{\circ}\text{C}$  pendant 2h. La calcination a pour but de détruire la matière organique bien avant la minéralisation.
- La minéralisation permet le retour des éléments sous forme inorganique. Pour cette étape on utilise 3 acides à savoir : l'acide fluorhydrique « HF », l'acide perchlorique «  $\text{ClHO}_4$  » et l'acide nitrique «  $\text{HNO}_3$  ». Après on procède à la filtration de nos échantillons. Les tubes sont complétés par 50 ml d'eau distillée.

Le dosage des métaux est réalisé par spectrométrie d'absorption atomique à flamme.

Il est important de souligner que nous avons utilisé des échantillons de sol témoins qui ont été prélevés au début de l'expérimentation, pour comparer ces résultats. En effet Cuny et Van Haluwyn (2003), ont indiqués que dans ce genre d'études, les échantillons témoins sont plus fiables et plus représentatifs que les valeurs normes.

### **II.17. Cas des échantillons des plantes :**

La méthode utilisée pour le dosage des métaux, est celle du dosage dans les feuilles de l'orge prélevées sur les sites de prospection. Au laboratoire, les feuilles récoltées, sans lavage préalable, ont fait l'objet des opérations suivantes (Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques « CERTU », 2004) :

- Les résidus de plantes et de particules de sol sont retirés manuellement. On aura besoin que des résidus de feuilles pour la suite du travail.
- Les parties récupérées sont ensuite mis dans des creusets en porcelaine toujours étiqueté. Ils seront ensuite mis dans l'étuve pendant 72h à une température de  $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  afin de les déshydratés.
- Ensuite vient l'étape du broyage est une opération qui consiste à diviser un solide, pour augmenter sa surface spécifique et donc sa réactivité lors de l'attaque par les acides. C'est une étape importante de préparation, elle est nécessaire pour l'obtention d'un échantillon homogène et pour avoir de bons rendements d'extraction. Nous avons

utilisé le mortier en agate constitué de titane d'acier garantie sans métaux lourds pour éviter toutes contaminations.

- On procède à la pesée de 1g de chaque échantillon à l'aide de la balance électronique. La poudre obtenue est calcinée dans un four dont la température est augmentée progressivement jusqu'à 500°C pendant 2h. La calcination a pour but de détruire la matière organique bien avant la minéralisation.
- La minéralisation permet le retour des éléments sous forme inorganique. Pour cette étape on utilise 3 acides à savoir : l'acide fluorhydrique « HF », l'acide perchlorique «  $\text{ClHO}_4$  » et l'acide nitrique «  $\text{HNO}_3$  ». Après on procède à la filtration de nos échantillons. Les tubes sont complétés par 100 ml d'eau distillée.

Le dosage des métaux est réalisé par spectrométrie d'absorption atomique à flamme.

**Partie III :**  
**Résultats et Discussion**

## Résultats et Discussion

Différemment de la plupart des polluants organiques qui sont biodégradables. Les éléments traces métalliques sont des polluants persistants. La contamination de l'environnement par ces éléments est liée à un certain nombre d'activités humaines.

De nombreuses recherches, dans le domaine de la toxicité des éléments traces métalliques, s'accordent sur le fait que le risque résulte non pas des concentrations totales relevées dans les sols pollués, mais de leur fraction biodisponible (Janssen et *al.*, 2000).

La mobilité des espèces chimiques métalliques peut être définie par leur aptitude à être transférées vers des compartiments du sol où elles sont moins énergiquement retenues, le compartiment ultime étant la phase liquide représentée par la solution du sol (McLaughlin et *al.*, 1998b ; Kabata-Pendias et Pendias, 2001).

### III.1. Résultats de la croissance des plants de l'orge :

Les résultats de la croissance de l'orge, que nous avons obtenus dans cette étude, sont représentés dans le tableau (06).

**Tableau 06** : Résultats de suivi d'évolution de la hauteur de plante

La Date (Jour)	La Hauteur (cm)
02/01/2020	3 - 4
07/01/2020	4
12/01/2020	6 - 7
17/01/2020	7 - 9
22/01/2020	8 - 9
27/01/2020	8 - 9
01/02/2020	8 - 9
06/02/2020	8 - 10
11/02/2020	8 - 10
16/02/2020	9 - 10
21/02/2020	9 - 10
26/02/2020	9 - 10
01/03/2020	9 - 10
06/03/2020	9 - 10
11/03/2020	12 - 16
16/03/2020	12 - 16
21/03/2020	12 - 19
26/03/2020	12 - 19
31/03/2020	14 - 22
05/04/2020	14 - 24
10/04/2020	14 - 32
15/04/2020	14 - 43
20/04/2020	14 - 43
25/04/2020	14 - 45
30/04/2020	14 - 50



## Résultats et Discussion

---

Les résultats d'analyse montrent qu'il y a des changements de hauteur dans la plante (l'orge) : D'après l'examen du tableau (6), nous constatons que la hauteur de la plante a changé avec le passage des jours, le 13/12/2019 la plante a été plantée, après 13 jours la plante est apparue, le 02/01/2020 on voit que la hauteur de la plante varie de 3 à 4 cm , en voir que d'après le 22/01/2020 jusqu'à le 06/03/2020 la plante reste sure la même hauteur, Le jour du 11/03/2020, on constate une légère augmentation de la hauteur de la plante jusqu'au 26 mars, puis à partir du jour du 31/03/2020 on remarque une forte augmentation jusqu'au 30/04/2020.

Rq : Le 10 Avril 2020, nous voyons l'apparition des grains de quelques plants.

Après l'apparition des graines (10 Mai), nous avons récoltés nos plants (Figure 21).



**Figure 21** : Photo de Zone du Culture à Oued Lilli (Photo originale, 2020)

Durant le mois d'avril, nous avons constaté un jaunissement des feuilles (Figure22) et un arrêt de croissance en hauteur.

Ces résultats corroborent avec ceux de Aniol et Gustafon (1984) où ils montrent que l'orge est une plante sensible aux éléments traces métalliques.



**Figure 22** : Photo de Zone du Culture à Oued Lilli (Photo originale, 2020)

Prasad (2003) a trouvé des teneurs en métaux lourds dans la plante (Blé Dur) de 1.0 mg/Kg de Matière sèche pour le plomb, et de 50 mg/Kg de Matière sèche pour Zinc, les teneurs du Cuivre sont de 10 mg/Kg de Matière sèche.

Selon les Travaux de Fageria et al (2002), ont trouvé des teneurs critiques en métaux lourds dans le Blé Dur varié, en cas de Déficience le Zinc est entre 15 et 20 mg/Kg de Matière sèche et le Cuivre de 3 à 5 mg/Kg de Matière sèche.

Dans le cas de Toxicité les teneurs en Plomb dans les plantes atteignent des valeurs comprises entre 12 et 300 mg/Kg de Matière sèche, le Zinc de 100 à 400 et le Cuivre de 20 à 100 mg/Kg de Matière sèche.

### **III.2. Etude de la variabilité des concentrations en métaux lourds dans le sol :**

L'atmosphère est le premier récepteur de ces émissions qui vont retomber sous les deux formes humides et sèches sur les sols avoisinants de la route. Les chaussées de la route jouent un rôle dans la rétention des polluants (Colandini, 1997), et le sol joue celui de l'accumulation (Juste, 1988).

Les teneurs du sol en métaux lourds (Pb, Cu et Zn) varient considérablement d'un point de prélèvement à un autre.

Zerrouki (2013), à constater une forte contamination du sol, de la route national N° 14 de la commune de Tiaret, par le plomb, le zinc et le cuivre. En effet, ces teneurs étaient de  $1714,39 \pm 512,62 \mu\text{g/g}$  et  $666,50 \pm 154,07 \mu\text{g/g}$  respectivement pour le plomb et le zinc, avec une variabilité remarquable entre les différents points de prélèvements ; Alors que qu'on constate de faible teneur du cuivre avec  $3,18 \pm 2,54 \mu\text{g/g}$ .

Ces fortes teneurs peuvent s'expliquer principalement par l'intensité du trafic routier qui est de l'ordre de 800 véhicule/jour sur la route nationale N° 23 contre 600 véhicule/jour sur la route nationale N°14 (Zerrouki, 2013).

Le sol, ressource naturelle essentielle, est le support de nombreuses activités industrielles, agricoles et urbaines. Le développement de ces activités entraîne une forte augmentation des teneurs en éléments trace métalliques (ETM) et peut alors en devenir la source prédominante par rapport à ceux d'origine géogène (métaux issus de l'altération du matériau parental à la base du sol qui constituent le fond géochimique).

La contamination métallique des sols, suite aux retombées atmosphériques locales (industrielles et urbaines) et à des apports divers (boues de stations d'épuration, composts, engrais...) anciens ou actuels, explique les teneurs actuelles en ETM, notamment dans les horizons de surface, tels que Cd, Cu, Zn et Pb (Christelle, 2006).

Sur le plan environnemental le sol est un filtre remarquable possédant un pouvoir épurateur non négligeable. L'ensemble des dirigeants et décideurs sont aujourd'hui d'accord sur la fragilité de l'équilibre Sol-Activité humaine (Christelle, 2006).

### **III.3.Teneurs des métaux lourds dans les plantes :**

La contamination métallique liée à la circulation automobile est un sujet qui a été largement étudié ces dernières années dans le monde entier. La grande diversité des études, effectuées dans les sols en bordure de chaussée, rend difficile la comparaison des résultats obtenus, d'une étude à l'autre. Zerrouki (2013) a enregistré 35,69, Garcia et *al.* (1996) a trouvé une valeur de  $1453 \text{ mg.g}^{-1}$  en Espagne ;  $479 \text{ mg.g}^{-1}$  pour Remy (1998) en France et  $1564 \text{ mg.g}^{-1}$  pour Ward et *al* (1977) en Nouvelle Zélande.

D'autre part, la voie principale d'absorption des métaux, par la plante, se fait par simple diffusion au travers de l'apoplaste du cortex racinaire et de l'endoderme (voie apoplastique). A cet effet, Remon (2006) souligne que le transport des éléments métalliques à travers la paroi cellulaire se fait passivement (non métabolique et donc dans le sens du gradient de

concentration) par les pores du réseau de la cellulose, de l'hémicellulose et des glycoprotéines.

On peut suggérer que l'accumulation des métaux dans le tissu des plantes dépend de la qualité de l'eau d'irrigation ; mais aussi des paramètres physiologiques des plantes et pédologiques des sols (Belaïd, 2010).

### III.3.1. Teneurs du Plomb (Pb) dans les plantes :

Nous avons constaté que l'orge est sensible aux éléments traces métalliques, en effet, nous avons remarqué un jaunissement des feuilles et une faible croissance en hauteur.

Zerrouki (2013), a remarqué que les teneurs du plomb trouvées dans *Hordeum vulgare*, lors d'une étude sur la route nationale N°14, sont de  $38,02 \pm 14,96 \mu\text{g/g}$  dépassant largement les valeurs témoins qui sont de  $2,63 \pm 0,20 \mu\text{g/g}$ .

Les plus grandes valeurs sont observées dans les racines avec  $18,32 \pm 8,38 \mu\text{g/g}$ ; elles commencent, par la suite, à diminuer dans les tiges, vers les feuilles et en fin dans les graines, dont les valeurs enregistrées sont respectivement  $10,83 \pm 5,86 \mu\text{g/g}$ ,  $7,71 \pm 3,74 \mu\text{g/g}$  et  $0,55 \pm 0,40 \mu\text{g/g}$ .

Le plomb est principalement absorbé par les poils absorbants et stocké dans les parois des cellules, ce qui explique son taux élevé dans les racines (Zimdahl, 1975 ; Hughes et al., 1980).

Beaucoup de chercheurs ont mis en évidence la possibilité de déterminer la biodisponibilité d'un métal, qui peut être estimée par l'analyse des teneurs de ce métal, dans une plante ayant poussé sur le sol considéré. Juste (1988) souligne que la plante est le meilleur indicateur de la biodisponibilité réelle d'un élément car elle intègre l'effet de tous les facteurs qui déterminent cette dernière.

En effet, Plusieurs chercheurs ont démontré la possibilité d'utiliser les plantes pour la dépollution des sols contaminés par les éléments traces métalliques ; Huang et al (1997) ont trouvé que les feuilles de *Brassicajuncea* peuvent accumuler 1,5% du plomb du sol contaminé artificiellement par  $600\text{mg.kg}^{-1}$  du plomb mélangé avec l'acide éthylène-diamine tétra-acétique (EDTA) qui a été utilisé pour accroître l'absorption de plomb par la plante.

Huang et al (1997) estime que 0,1% environ du total de plomb dans le sol sont disponibles pour cette extraction.

La faible disponibilité du plomb est causée par complexation avec une variété des sols, y compris les carbonates, phosphates, oxydes et hydroxydes. En conséquence, il a été nécessaire



d'appliquer des agents chélateurs, tels que l'acide éthylène-diamine tétra-acétique (EDTA) afin de mobiliser le plomb et renforcer la phytoextraction

### III.3.2. Teneurs du cuivre (Cu) dans les plantes :

Zerrouki (2013), a trouvé que les teneurs du cuivre trouvées dans *Hordeum vulgare*, lors d'une étude sur la route nationale N°14, sont de  $10,34 \pm 5,74 \mu\text{g/g}$ , dépassant largement les valeurs témoins qui sont de  $4,53 \pm 3,03 \mu\text{g/g}$ .

Les valeurs dans les racines sont de  $5,12 \pm 3,70 \mu\text{g/g}$  ; et diminue par la suite, des tiges vers les feuilles et en fin dans les graines, avec respectivement  $2,53 \pm 1,38 \mu\text{g/g}$ ,  $1,46 \pm 1,06 \mu\text{g/g}$  et  $1,23 \pm 0,40 \mu\text{g/g}$ .

Les oligo-éléments comme le cuivre, sont des éléments indispensables à la vie mais qui se trouvent présents en proportion très faibles dans les tissus biologiques (Loue, 1993). Certains éléments traces cationiques plurivalents comme le cuivre peuvent se présenter sous différents états d'oxydation et jouent ainsi un rôle d'accepteur ou de donneur d'électrons.

Les flux d'absorption du cuivre sont parmi les plus bas de ceux de tous les éléments traces, il est ainsi absorbé par la plante en très petite quantité.

Dans le cas d'une croissance optimale, en fonction des espèces et des cultivars, les concentrations en cuivre dans les plantes atteignent des valeurs comprises entre 5 et 15 voire 20 mg kg<sup>-1</sup> de matières sèches (MS) dans les parties aériennes (Reuter et Robinson, 1997).

Dans le cas de sols contaminés par les éléments traces métalliques, il est admis qu'une assez large proportion de cuivre, par exemple, peut s'accumuler dans les racines sans que les teneurs en cuivre dans les parties aériennes n'augmentent (Marschner, 1995).

### III.3.3. Teneurs du zinc (Zn) dans les plantes :

Selon les travaux de Zerrouki (2013), sur la route nationale N°14, les teneurs en zinc dans *Hordeum vulgare* sont de  $588,18 \pm 375,5 \mu\text{g/g}$  dépassant toujours les valeurs témoins qui sont de  $385,00 \pm 162,00 \mu\text{g/g}$ . Les plus grandes valeurs sont observées dans les racines avec  $327,05 \pm 197,52 \mu\text{g/g}$  ; elles commencent à diminuer dans les tiges, puis dans les feuilles et en fin dans les graines. Les valeurs sont respectivement :  $189,50 \pm 135,58 \mu\text{g/g}$ ,  $70,00 \pm 40,39 \mu\text{g/g}$  et  $1,63 \pm 2,01 \mu\text{g/g}$ .

Les activités urbaines, industrielles et agricoles sont responsables d'une contamination croissante des sols et de l'eau par les ions métalliques. Organisme autotrophe, la plante est totalement tributaire de son environnement minéral. Le sol lui fournit donc la grande majorité

## Résultats et Discussion

---

de ses nutriments, mais elle est également directement exposée à des éléments potentiellement toxiques (Marie.C, 2001).

Le sol est un réservoir de métaux dans lequel la plante puise. Cela revient à considérer que la totalité des métaux présents est également disponible pour le végétal. Les concentrations en Cd, Zn, et Pb dans la paille et les grains de blé dépendent directement de celles du sol (Hagemeyer, 2004).

**CONCLUSION**

### Conclusion

Le but de cette étude consiste à phytoremédier des sols contaminés par les métaux lourds (plomb, cuivre et zinc) en milieux routiers urbains à l'aide de l'orge (*Hordeum vulgare*). Cas de route nationale N°90 de la Wilaya de Tiaret.

Les résultats des travaux ont montré que la croissance de l'orge est passée par deux étapes: dans la première période, croissance lente et après une période d'accélération de sa croissance, néanmoins cette croissance était faible par rapport aux plants des sols qui ne présentent pas des teneurs élevées en éléments traces métalliques. Nous constaté également un jaunissement des feuilles.

La phytoremédiation semble avoir un potentiel considérable pour la décontamination des sols pollués par des métaux lourds. Cependant l'absorption des métaux lourds, par les plantes, est influencée par leurs biodisponibilités dans la solution du sol. Cette biodisponibilité est étroitement liée avec la nature de l'extractant utilisé. Les végétaux constituent une voie d'entrée importante des métaux dans la chaîne alimentaire. Leur concentration en éléments traces, dans des contextes de contamination diffuse, est fortement variable.

Pour un niveau de contamination du milieu donné, cette accumulation dépend de l'élément, de la famille végétale, de l'espèce et de la variété mais aussi de l'organe. Les mécanismes sous-jacents semblent complexes et aucune loi générale n'a pu être dégagée.

Perspective :

- l'amélioration du réglage de la combustion des moteurs et l'utilisation de carburants moins polluants de contrôler ces concentrations chaque année ou 2 ans au moins par des études pareilles
- de réduire les émissions polluantes issues du trafic routier par le renouvellement du parc automobile
- Déterminer les taux de métaux lourds à savoir le Cu, Pb, Zn dans les racines, les feuilles et latige de l'orge.
- place d'une couverture végétale sur un milieu dégradé a pour conséquence :

Accroître l'évaporation, de réduire et maîtriser l'érosion des sols contaminés, de limiter le lessivage d'éléments indésirables vers les eaux souterraines,



**Référence**  
**Bibliographique**

## Référence Bibliographique

---

- ADAME. , (2013).Les Phytechnologies appliquées aux site et sols pollués, état de l'Art et guide de mise en œuvre.p20.
- AFNOR ., (1999). Qualité des sols. Edition AFNOR, 566 p.
- Agenc de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (2013b). Techniques de réhabilitation des sites pollués. In ADEME. Sites pollués etsols.<http://www2.ademe.fr/jsp/theses/operationsOetOtheses.jsp?catid=17381> (Page consultée le 5 juillet 2013).
- Agence foncière de Tiaret(AFT) (2001) Communication personnelle.
- Agence pour la diffusion de l'information technologique (ADIT) (2006).Traitement biologique des sols pollués recherche et innovation. In ADEME. Publications ADEME Sites pollués et sol. <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=43479&p1=02&p2=11&ref=17597> (Page consultée le 4 février203)
- Alloway B.J., (1995). Heavy metals in soils.Londres: Blackie Academic and Professional. 368p.
- Aniol A., Gustafon J.P., (1984). Chromosome location of genes controlling aluminum tolerance in wheat, rye and triticale. Con J GenCyTol 26:701–705.
- Baize D., (1997).Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. Paris : Inra éditions.
- Baize D., (2000). Teneurs en métaux lourds dans les sols français. Résultats généraux du
- Baize D., Jabiol B.,(1995). Guide pour la description des sols. Techniques et pratiques. Paris. INRA. 375 p.
- Bonneau M., Souchier B., (1979). Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol. Edition Masson, 459 p.
- CERTU., (2004) Comparaison de méthodes d'analyse des Éléments Traces Métalliques ETM et des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques HAP sur les sols et les végétaux. centre d'Études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques : 120.
- CETE N., (2004). Comparaison de méthodes d'analyse des Eléments Traces Métalliques ETM et des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques HAP sur les sols et végétaux ., La collection Rapport d'étude., Ed : CERTU., pp 8-10.

## Référence Bibliographique

---

- Chang S W., Lee S.J.and Je C.H., (2005). Phytoremediation of Altrazine by Poplar Trees; Toxicity, Uptake, and Transformation. *Journal of Environmental Science and Health Part B*, vol. 40, p.801081.
- Chassard-Bouchaud C., (1995). *L'écotoxicologie, Que sais-je?*, Presses Universitaires de France, Paris.
- Chevalier P., (1995). *Gestion de l'environnement en milieux urbain et industriel*. collection sciences de l'environnement. Québec. Université du Québec Télé-université. 577 p.
- Chevrier E., (2013.) *La phytoremédiation, une solution d'avenir pour le Quebec*. Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke.
- Chiffolleau J. F., Auger D., Chartier E., Michel P., Truquet I., Ficht A., Gonzalez J.L., Romana L.A., (2001). "Spatiotemporal changes in Cadmium contamination in the Seine estuary (France)." *Estuaries* 24(6B): 1029-1040 .
- Chocat B., (1997). *Eurydice 92 Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Paris : Tec et Doc Lavoisier. 1136 p.
- Chris Fabien ., Moussavou Moudouma., 2010. *Etude des mécanismes d'accumulation du cadmium chez Arabidopsis Thaliana (écotype Wassilewskija) et chez un mélèze hybride (Larix x eurolepis) par des approches moléculaire et développementale*. Thèse N° [14-2010].
- Colandini V., (1997). *Effets des structures réservoirs à revêtement poreux sur les eaux pluviales : qualité des eaux et devenir des métaux lourds*, Thèse doctorat, Université de Pau et des pays de l'Adour., 162 p.
- Conil P et Clozel B., (1999). *Méthodes physiques de séparation des constituants d'un sol contaminé : une première étape pour déterminer la spéciation des métaux*. In *spéciation des métaux dans le sol*, pp. 41-55. Publications Ecrin, Paris, France.
- Dajoz R. (1978). *Précis d'écologie*. Paris : Bordas. 549P.
- Delmas –Gadras C .,( 2000). *Influence des conditions physico-chimiques sur la mobilité du plomb et du zinc dans un sol et sédiment en domaine routier.*, Thèse de doctorat., Université de PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR., 52 p.DeMarsily, 1994.
- Detay M., (1997). *Gestion active des aquifères*. Paris : Masson. 416 p.
- Diard P., (1996). *Etude de la biosorption du plomb et du cuivre par des boues de stations d'épuration. Mise en œuvre d'un procédé de biosorption à contrecourant*, Thèse de doctorat de l'INSA Lyon, France.

## Référence Bibliographique

---

- Duchaufour P., (1995). Pédologie, sol, végétation, environnement ., (4ième édition). Abrégés., Paris ., ed :Masson., 324p.
- Durand C.,( 2003).Caractérisation physico-chimique des produits de l'assainissement pluvial., Origine et devenir des métaux traces des polluants organiques., Thèses de doctorat., Université de Poitiers., 248p.
- Elmsley J., (2001). Nature's Building Blocks.A-Z guide to the elements. Oxford University Press, Oxford UK.
- États Unis. United States Environmental Protection Agency (EPA) (1999).Phytoremediation resource guide.Washington, 56p.
- États Unis.United States Environmental Protection Agency (EPA) (1999). Phytoremediation resource guide. Washington, 56p.
- États Unis.United States Environmental Protection Agency (EPA) (2000). Introduction(to Phytoremediation.(Cincinnati, OH, 104 p EPA/600/RO99/107).
- États Unis. United States Environmental Protection Agency (EPA) (2012).A Citizen'sGuideto Phytoremediation.2p.(EPA542OFO12O016).
- États Unis. United States Environmental Protection Agency(EPA) (2000).Introduction to Phyteremediation. Cincinnati, OH, 104p. (EPA/600/RO99/107).
- Evans M., (1997).Status of insitu phytoremediation technology. In Environmental Protection Agency (EPA), Recent Developments for In Situ Treatment of Metal (Contaminated Soils p.23O32).Washington, D.C., EPA.
- Evlard A. (2013). Le potentiel du saule pour la phytostabilisation des sols pollués par les éléments traces métalliques. Université de Liège.
- GARBISU C., ALKORTA, I.,( 2001). « Phytoextraction: acost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment ». Bioresource Technology, 77: 229-236.
- Garbisu C., Alkorta I.,(2001).Phytoextraction : acost effective plant based technology for the removal of metals from the environment. Bioresource Technology, vol.77,p.229O236.
- Ghosh M., S.P.Singh., (2005).A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of tisby products. Appliedecolog and environmental research, vol.3,n°1,p.1O18.
- Gobat J.P et Arango M., Matthey W., (1998) .Le sol vivant. Collection gérer l'environnement. Lausanne : Presses Polytechniques et universitaires romandes, 519p.

## Référence Bibliographique

---

- Hartmann A., Cräsle W et Horn R., (1998). Cation exchange processes in structured soil at. Various hydraulic properties ., Compte rendu du 16ième congrès mondial de science du sol., Montpellier., 9p. CD-ROM.
- Interstate Technology & Regulatory Cooperation Work Group (ITRC) (2001). Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance Document .Washington, D.C., ITRC and Phytotechnologies Teams, 124 p.PHYTOO2.
- Interstate Technology Regulatory Cooperation Work Group (ITRC) (1997). Emergin technologie for the remediation of metals soils. Washington, D.C., ITRC and Phytotechnologies Teamss
- Interstate Technology Regulatory Cooperation Work Group (ITRC) (2009).Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance and Decision Trees, Revised. Washington, D.C., ITRC and Phytotechnologies Teams ,187p.PHYTOO3.
- Interstate Technology Regulatory Cooperation Work Group (ITRC) (2009).Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance and Decision Trees, Revised .Washington, D.C., ITRC and Phytotechnologies Teams, 187p.PHYTOO3.
- Janssen J., Weyens N., Croes S., Beckers B., Meiresonne L., Van Peteghem P., Vangronsveld J., (2015). Phytoremediation of Metal Contaminated Soil Using Willow: Exploiting Plant-Associated Bacteria to Improve Biomass Production and Metal Uptake. International Journal of Phytoremediation, 17(11), 1123–36.
- Jullien D., (1997). LA RECHERCHE DES POLLUANTS DANS LES SOLS. Séminaire ”Sols Pollués”, Paris, France. pp.3-5.
- Juste C., (1988). Appréciation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments en traces du sol. Science du Sol, 26, 2, 103-112.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., (2001). Trace elements in soils and plants. 3rd CRC Press, Boca Raton, London, New-York, Washington D.C .
- Kabata-Pendias A., Pendias H.,( 1992). Trace elements in soils and plants. 2nd edition CRC press, Boca Raton, FL.
- Koller E., (2004). Traitement des pollutions industrielles, Ed. Dunod, Paris, pp 424
- Larousse., (1995). Encyclopédie des sciences de la nature. Paris. Larousse. 702 p.
- Le Roch F., (1991).Risque de contamination des nappes souterraines par infiltration des eaux pluviales urbaines. Mémoire de fin d’études. Rennes. ENSP-LCPC. 73 p.
- Leonard W. H., J. H. Martin., (1963). Cereal Crops. The MacMillan Company, New York. O Orge e: pp. 478-543; A Av vo oi in ne e, pp. 544-603.

## Référence Bibliographique

---

- Logan T ., Traina S .,( 1993). Trace metals in agricultural soils., In Metals in ground water., ed: Lewis Publishers., pp 309-347.
- Macci C., Peruzzi E., Doni S., Poggio G., & Masciandaro G., (2016). The phytoremediation of an organic and inorganic polluted soil: A real scale experience. *International Journal of Phytoremediation*, 18(4), 378–86.
- Miquel G., (2001). “Les effets des métaux lourds sur l’environnement et la santé”. Rapport parlementaire, N°2979/N°261, Assemblée Nationale/Sénat, Office parlementaire d’évaluation des choix scientifiques et technologiques, Paris.
- Musy A., Soutter M., (1991). *Physique du sol*, Collection Gérer l’environnement. Lausanne., Presses Polytechniques et Universitaires Romandes., 307
- Naftal. (2013). Professeur spécialiste en Pneumologie, chef de Service à l’hôpital Mustapha Damardji Tiaret. communication Communication personnelle Tiaret. le 12-06- 2013.
- Office National des Statistiques ONS (Algérie) (1998) : [www.ons.dz](http://www.ons.dz) (consultation : 1998).
- Office National des Statistiques ONS (Algérie) (2015) : [www.ons.dz](http://www.ons.dz) (consultation : 2015).
- Office National des Statistiques ONS (Algérie) (2018) : [www.ons.dz](http://www.ons.dz) (consultation : 2018).
- Ozenda., (1982). *Les végétaux dans la biosphère*. Ed Doin Paris 431p.
- Pagotto C ., (1999). Etude sur l’émission et le transfert dans les eaux et dans les sols des éléments traces métalliques et des hydrocarbures en domaine routier. Thèse de Doctorat. Poitiers. Université de Poitiers. 252 p.
- Philippe Branchu., Anne-Laure Badin., Béatrice Bechet., Laurent Eisenlohr., Tiphaine Le Priol., Fabienne Marseille et Elise Trielli., ( 2013). *Pollution d’origine routière et environnement de proximité*.
- Pilon-Smits E., 2005. *Phytoremediation*. *Annual Review of Plant Biologie*, Vol. 56: 15-39.
- PIVETZ B.E., 2001. « Phytoremediation of Contaminated Soil and ground water at hazardous waste sites ». *Ground Water Issue*, United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development and Office of Soil Waste and Emergency Response, EPA/540/S-0 1/500, 36 p.

## Référence Bibliographique

---

- Pivetz B.,(2001).Phytoremediation of contaminated soil and ground water at hazardous waste sites. Washington, DC, United States Environmental Protection Agency(EPA),36p. (EPA/540/SO01/500).  
programme ASPITET. Courrier de l'environnement de l'INRA 22, 39-54.
- Ramade F., (1992). Précis d'écotoxicologie. Paris.
- Ramade F., (1993). Dictionnaire Encyclopédique de l'écologie et des Sciences de l'Environnement. ed : Edisciences international. p 822.
- Ramade F., (2003). Eléments d'écologie. Ecologie fondamentale ; cours. Paris : Dunod. 690p.
- Raskin I., (1996). Plant genetic engineering may help with environmental clean-up. Proceedings of the National Academy of Sciences. 93, 3164-3166.
- Raskin I., Kumar P.B.A.N., Dushenkov S., Salt D.E., (1994.) Bioconcentration of heavymetals by plants.Curr.Opin.Biotechnol. 5: 285-90.
- Riviere J., (1998). Evaluation du risque écologique des sols pollués. Ed : Lavoisier., 230 p.
- Robert M., (1996). Le sol: interface pour l'environnement, Ressource pour le développement. Masson, Paris, 244p.
- Romanowska E., (2002). Gas exchange functions in heavy metal stressed plants. In: Strzalka K. eds, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp 257- 285.
- SALT DE., PRICE R.e., PICKERING U., RASKIN I.,( 1995). « Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard ». Plant Physiology , 109: 1427-1433.
- Shimp F., Tracy J.C., Davis L.C., Lee E., Huang W., Erickson L.E.and Schnoor J.L.,(1993). Beneficial effects of plants in the remediation of soil and ground water contaminated with organic materials. Critical Reviews in Environmental Science and Technology,vol.23,p.41O 77
- Sriman N D., Ankit T., Vinay K P., Ghanshyam V S., (2018). Effect of nitrogen levels and its time of application on growth parameters of barley (*Hordeumvulgare* L.). Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry: 7(1).pp 333-338.
- Stobart A.K., Griffiths W.T., Ameen-Bukhari I., Sherwood R.P., (1985). The effect of Cd<sup>2+</sup>on the Biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley. *Physiol. Plant.* 63: 293-298.

## Référence Bibliographique

---

- Stumm W., Morgan J., (1996). "Aquatic Chemistry :Chemical Equilibria and Rates in Natural waters". Third Ed. New York, John Wiley and Sons. 1022p.
- Tessier A., Turner D., (1995). "Metalspeciation and bioavaibility in aquaticsystems". Chisters, John Winely and Sons.696p
- VERVAEKE P., LUYSSAERT S., MERTENS J., DE VOS B., SPELEERS L. et LUST N.,( 2001). « Dredgedsediment as a substrate for biomass production of willow trees established us mg the SALIMAT technique ». Biomass and Bioenergy, 21 : 81-90.
- Vila M.,(2006).Utilisation de plantes agronomiques et lacustres dans la dépollution des sols contaminés par le RDS et le TNT approches en laboratoire. Docteur, Institut national polytechnique de Toulouse, Toulouse.
- Vishnoi S.R., Srivastava P.N., (2008).Phytoremediation: Green for environmental clean. In Proceesings of Taal 2007:The12th World Lake Conference,(p.1016O1021),Jaipur,2008.
- Yaron B., Calvet R., et Prost R., (1996). soil pollution. Processus and dynamics ., New York: Springer., 37p.
- Yavuz., Corapcioglu M., Haridas A., (1984).Transport and fate of microorganismes in porous media : à theoretical investigation. Journal of hydrologie. vol. 72. pp 149-169
- Tison et al,(2014) : 253 [Identification] Tison, J-M. & de Foucault, B. [coord.] 2014. Flora Gallica. Flore de France. Biotope Editions, Mèze. xx+1196p.
- ZERROUKI D., (2013). Phytoremédiation d'un sol agricole contaminé par les métaux lourds (Pb, Zn et Cu) en milieu routier à l'aide de l'orge *Hordeumvulgare*.L et de tournesol *Helianthusannus*.L. UNIVERSITHESE DE DOCTORAT EN SCIENCES TÉ DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES.210p.