

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique

Université De M^{ed} Cherif Messaadia

Faculté des sciences et technologies



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة محمد الشريف مساعديّة

كلية العلوم و التكنولوجيا

Mémoire de magister

Spécialité : Chimie physique et analytique

Option : Chimie de l'environnement et traitement des eaux

Thème

Etude de la destruction ou la perturbation des espèces végétales par la pollution

Présenté par : Mme SLATNI Ibtissem

Soutenu devant le jury :

Directeur du mémoire Mr GHEID Abdelhak Pr.

Université de Souk-Ahras

Président : Mme Y.BERDJEM

M.C. Université de Souk-Ahras

Examineurs : Mme N.GRARA

M.C. Université de Guelma

Mr K. GUERFI Pr. Université de Annaba

2013-2014

Résumé

Il est aujourd'hui important d'étudier l'impacte de la pollution par les éléments métalliques sur la végétation. Dans ce contexte, nous proposons d'étudier l'accumulation des éléments trace métalliques sur deux espèces végétales (tomate et courgette). Trois sites ont été sélectionnés qui diffèrent par l'eau utilisée pour l'irrigation et l'espèce végétale étudiée.

Ainsi, une série d'analyses, par spectroscopie d'absorption atomique, a concerné Les cultures maraîchères; fruits (courgette) et racines, feuillet, et fruits (tomate).

Les concentrations métalliques (Cr, Cu, Ni, Fe et Zn) mesurées dans les plantes irriguées à l'eau du Oued Seybouse sont significativement supérieures aux normes de l'OMS excepté la concentration du Fe pour la tomate et le cuivre pour la courgette.

On trouve aussi des concentrations largement élevées en les comparants avec la même espèce irrigué à l'eau propre.

Ces analyses ont permis de conclure que l'accumulation des éléments traces métalliques (EMT) dépend de l'espèce étudiée de la qualité de l'eau d'irrigation et du sol cultivé.

Motsclés: Pollution, métaux lourds, sols, bioaccumulation, irrigation, eau polluée

Abstract

Nowadays, it is important to study the impact of pollution from metal parts on the vegetation. In this context, we will try to study the accumulation of trace metal elements in two plant species (tomato and zucchini.) Three sites were selected that differ in the water used for irrigation and the plant species studied. Thus, a series of analyzes by atomic absorption spectroscopy, has been done to the concerned vegetable crops, fruits (zucchini), roots, leaves, and fruit (tomato). Metal concentrations (Cr, Cu, Ni, Fe and Zn) measured in the plants irrigated by water of OuedSeybouse, are significantly higher than who standards except for the concentration of Fe in tomatoes and copper in zucchini. There are also far higher concentrations appearing in plant species irrigated with clean water. These analyzes have concluded that the accumulation of trace metal elements (TME) depends on the species studied, the quality of irrigation water and cultivated soil.

Keywords: Pollution, heavy metals, soil, bioaccumulation, irrigation, polluted water

ملخص

بات من الضروري اليوم دراسة تأثير التلوث بالعناصر المعدنية النزررة على النبات في هذا السياق نقترح دراسة تراكم العناصر المعدنية النزررة داخل نوعين من النبات الطماطم و القرع.

ثلاث ارضيات تم اختيارها تختلف فيما بينها بنوعية ماء السقي ونوع النبات المدروس;مجموعة من التحاليل عن طريق طيف الامتصاص الذري اجريت على جذور، أوراق وفاكهة الطماطم و على حبات القرع.

تركيز كل من العناصر المعدنية (Cr, Cu, Ni, Fe Zn) في النباتات المسقية بماء واد سيبوس يتعدى معيار المنظمة العالمية للصحة ماعدا تركيز Fe في الطماطم و Cu في القرع.

وجدنا ايضا تركيز جد مرتفعة اذا ما قارناها مع نفس النبات المسقي بالماء نظيف.

هذه التحاليل مكنتنا من استنتاج ان تراكم العناصر المعدنية النزررة يرتبط بنوع النبات المدروس و صفات ماء السقي والتربة.

الكلمات المفتاح: التلوث، المعادن الثقيلة، التربة، التراكم، السقي

Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces années d'étude.

A terme de ce modeste travail, je voudrais remercier en premier lieu monsieur Gheid.A, professeur à l'université de Souk-Ahras, d'avoir accepté de diriger ce travail. Ses conseils ainsi que sa gentillesse m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je remercie également Madame Berrjem.Y, Maître de Conférences à l'Université de Souk-Ahras d'avoir accepté d'honorer cette soutenance comme président de jury. Qu'il me soit permis de lui exprimer ma plus haute considération.

Madame Grara.N, Maître de Conférences à l'Université de Guelma, et monsieur Guerfi.K, professeur à l'Université d'Annaba, qui ont bien voulu examiner ce travail et d'être membre de jury.

Je tiens également à remercier tout le personnel de la faculté ainsi que les responsables des laboratoires de l'université d'Annaba, qui m'ont aidé à la réalisation de ce mémoire de magistère.

A tous, Merci.

Liste des figures

N°figure	Titre	Page
I -1	Le marché mondial 2005, en chiffres d'affaire, des pesticides par région et par catégorie de produits	6
I-2	Cartes des sols de l'Algérie (UNESCO).	9
I- 3	Origine des métaux lourds dans le sol	14
II-1	Coupe longitudinale de racine ; principaux tissus	27
II.2	Coupe d'une racine	28
II-3	Influence du pH sur le prélèvement d'un métal dans le sol	31
III.1	carte de la région d'étude	45
III.2	carte d'échantillonnage parcelle N°1	47
III.3	carte d'échantillonnage parcelle N°2	48
III.4	carte d'échantillonnage parcelle N°3 (courgette)	49
III-5	comparaison de la teneur en cuivre entre les deux échantillons de tomates	55
III-6	comparaison de la teneur en zinc entre les deux échantillons de tomates	56
III-8	comparaison de la teneur en Nickel entre les deux échantillons de tomates	57
III-9	comparaison de la teneur en Fer entre les deux échantillons de tomates	59
III-10	concentration des ETM dans la courgette	60
III-11	concentration des ETM dans la courgette	61
III-12	comparaissent des concentrations des ETM dans les deux espèces végétales (tomate, courgette)	62

Liste des symboles et abréviations

ADE	Algérienne des eaux
OMS	Organisation mondiale de la santé
NH_4^+	Ammoniac
L	Litre
g	Gramme
Kg	Kilogramme
μg	Microgramme
O_2	Oxygène
PO_4^-	Phosphate
NO_3^-	Nitrate
OH:-	Hydroxide
CO_3^{--}	carbonate
ATP	Adénosine triphosphate
Eh	Potentiel d'oxydo-réduction
pH	Potentiel hydrogène
Al	Aluminium
As	Arsenic
Cd	Cadmium
Se	Selenium
Be	Beryllium
Cu	Cuivre
Fe	Fer
Zn	Zinc

Tl	Thallium
Mo	Molybdène
Co	Cobalt
Cr	Chrome
Hg	Mercure
Sb	Antimoine
Ti	Titan
P	parcelle
ETM	Eléments traces métalliques
FPGN	Fond pédogéochimique naturel
CEC	Capacité d'échange cationique
PCB	Polychlorobiphényle
HAP	Hydrocarbures aromatique polycyclique
COV	Composés organiques volatiles
MS	Matière sèche
SAA	Spectroscopie d'absorption atomique
ν	Fréquence
h	constante de Planck
E	Énergie
A	Atome
I	Intensité après absorption par les atomes
I_0	Intensité initiale de la source lumineuse
CT	Coefficient de transfert
T	Teneur

Liste des tableaux

N° Tableau	Titre	Page
II-1	Principaux effets associés aux éléments listés	25
II-2	Aptitude à accumulation de quelques plantes	30
II-3	Principaux facteurs liés au sol contrôlant le transfert des éléments-traces du sol vers le végétal	32
II.4	Teneur normale en métaux dans les plantes	36
III-1	pH du sol	53
III-2	Concentration des éléments métalliques (en $\mu\text{g/g}$) des cultures Prélévés	53
III-4	Concentration des ETM (en $\mu\text{g/g}$) dans la courgette	54
III-5	Coefficient de transfert dans la tomate	63

Sommaire

Liste des figures	i
Liste des symboles et abréviations.....	ii
Liste des tableaux.....	iv
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur la pollution

I.1. Introduction.....	3
I. 2. Les différents types de pollution.....	3
I. 2.1. La pollution domestique et urbaine.....	3
I. 2.2. La pollution d'origine agricole.....	3
I.2.2.1. Les fertilisants.....	4
I.2.2.1.1. Problématique de la pollution azotée.....	4
I.2.2.1.2. Problématique de la Pollution phosphatée.....	4
I. 2.2.1.3. Les pesticides.....	5
I. 2.3. La pollution naturelle.....	6
I 2.4. La pollution industrielle.....	7
I. 2.4.1. Les métaux lourds.....	7
I. 3. pollution des sols	8
I. 3.1. Définition et fonctions principales d'un sol.....	8
I. 3.2. Formation d'un sol.....	8
I. 3.3. La Pollution des sols	9
I. 3.4. Formes de pollution.....	10
I.3.4.1. Micropolluants des sols.....	10
I.3.4.1.1. Micropolluants organiques.....	10
I. 3.4.1.1.1. Polychlorobiphényles (PCB).....	11
I.3.4.1.1.2. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).....	11
I. 3.4.1.1.3. Les composés organiques volatils (COV).....	11
I 3.4.1.1.4. Phénols et dérivés.....	11
I 3.4.1.1.5. Pesticides.....	12
I. 3.4.2. Micropolluants inorganiques.....	12
I. 3.4.2.1. Eléments Traces Métalliques (ETM).....	13
I.3.4.2.2 Sources naturelles des (ETM).....	13
I. 3.4.2.3. Apport d'origine anthropique des ETM.....	14

ChapitreII : Transfert sol-plante des ETM

II -1.Introduction.....	16
II.2.Effet de la pollution par des ETM sur les végétaux.....	16
II.3. Notions de dose et de temps d'exposition.....	16

II.4.origines et enjeux des éléments traces métallique.....	17
II.4.1. Influence des éléments traces sur les êtres vivants.....	17
II.4.2 Le cuivre.....	17
II.4.2.1. Formes chimiques du Cu dans le sol.....	18
II.4.2.2. Effet du cuivre sur les plantes.....	18
II.4.2.3.Toxicité chez l'homme.....	19
II.4.2.3.1.Toxicité aiguë.....	19
II.4.2.3.2.Toxicité chronique.....	19
II.4.3.Le zinc.....	19
II.4.3.1.Formes chimiques du Zn dans le sol.....	19
II.4.3.2.Prélèvement et distribution du Zn dans les organes des plantes.....	20
II.4.3.3.Problèmes particuliers.....	20
II.4.3.4.Toxicité chez l'homme	20
II.4.3.4.1.Toxicité chronique.....	20
II.4.4.Le Plomb.....	20
II.4.4.1. Formes chimiques du Pb dans le sol.....	21
II.4.4.2. Absorption du plomb par les plantes.....	21
II.4.4.3.Effet du plomb sur les plantes	21
II.4.4.4.Intoxication chronique chez l'homme	22
II.4.5.Le nickel.....	22
II.4.5.1. Effet du Nickel sur les plantes.....	23
II.4.5.2.Toxicité chez l'homme.....	23
II.4.5.2.1Toxicité chronique.....	23
II.4.6.Le chrome.....	24
II.4.6.1.Formes chimiques du Cr dans le sol.....	24
II.4.6.2.Prélèvement et distribution du Cr dans les organes des plantes.....	24
II.4.6.3.Toxicité chez l'homme.....	24
II.4.7.Rappel sur la toxicité des éléments traces.....	25
II.5.Notion de phytodisponibilité.....	26
II.6. Mécanisme d'absorption des ETM.....	27
II.6.1.Voie symplasmique (intérieur de la cellule).....	28
II.6.2.Voie apoplasmique (extérieur de la cellule).....	29
II.7.Facteurs contrôlant le prélèvement des éléments-traces.....	29
II.7.1.pH.....	30
II.7.2.Eh (potentiel d'oxydo-réduction).....	31
II.7.3.Capacité d'échange cationique (CEC).....	32
II.7.4.Facteurs liés à la plante et aux micro-organismes du sol.....	33
II.7.4.1.Espèce végétale.....	33

II .7.4.2. Influence de la plante sur le sol.....	33
II .7.4.3. Variétés végétales et individus	33
II .7.4.4. Stade et âge de la plante	34
II .7.4.5. Influence des micro-organismes.....	34
II .7.5. Facteurs climatiques	34
II.7.5.1. Lumière.....	34
II.7.5.2. Température.....	34
II.7.5.3. Humidité.....	35
II.7.6. Facteurs liés aux caractéristiques des éléments et aux interactions entre éléments.....	35
II .8. Concentration normale des ETM dans les végétaux	35
Bibliographie	37

Chapitre III : Partie expérimentale

III-1. Zone d'étude.....	44
III.1.1 Climatologie.....	44
III.1.2. Ressources hydriques.....	44
III.1.2.1 Périmètre d'irrigation de la plaine de Guelma-Boucheouf.....	45
III.1.3. Agriculture.....	45
III.1.4. Industrie.....	46
III.2. Choix de l'espèce végétale.....	46
III.3. Choix du terrain.....	46
III.4 .La récolte.....	49
III.5. Préparation des échantillons.....	49
III.6. Mesure du pH	50
III.6.1. pH de l'eau	50
III.6.2. pH du sol.....	50
III.6.3. Mode opératoire.....	50
III.7. La technique d'analyse par spectroscopie atomique.....	50
III.7.1. Introduction.....	50
III.7.2. Principe.....	51
III.8. Appareillages.....	52
III.8.1. Matériels courants de laboratoire.....	52
III.8.2. Absorption atomique.....	52
III.9.1. Résultats et interprétations.....	53
III.9.2. pH du sol.....	53
III.9.3. Résultats de la bioaccumulation des éléments métalliques chez la tomate.....	53

III.9.3.1. Teneur en cuivre.....	55
III.9.3.2. Teneur en zinc.....	56
III-9.3.3.Teneur en chrome.....	57
III.9.3.4. Teneur en Nickel.....	58
III.9.3.5. Teneur en Fer.....	59
III.9.4. Résultats de la bioaccumulation des éléments métallique dans la courgette.....	60
III.9.5. Transfert et accumulation des métaux dans les tissus des plantes...	62
III.9.2.Discussion.....	63
III.10.Conclusion.....	67
Bibliographie.....	68

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis plus de cinquante ans, la pollution est l'un des plus graves problèmes auxquels est confronté notre monde moderne. On entend par pollution, la présence dans l'environnement des grandes quantités de produits chimiques dangereux, généralement créés par l'homme, dont les effets nuisibles peuvent se faire durant de longues périodes sur toute la planète. Cette pollution peut affecter l'eau, l'air et la terre. Elle peut être évidente (nappes d'hydrocarbures flottante sur la mer). Comme elle peut être beaucoup moins visible (pesticides répandus sur les champs ou métaux lourds dissous dans les systèmes aquatiques).

Le 20ème siècle voit de plus apparaître des quantités de substances nouvelles totalement étrangères au milieu naturel dont la dégradation et l'assimilation par la faune et la flore sont inefficace. C'est ainsi que, les pollutions apparaissent actuellement d'origine et de nature de forme et d'actions multiples et se révèlent comme un problème majeur de notre temps. Les différentes dégradations résultant de la pollution de l'écosphère compromettent l'équilibre des écosystèmes concernés, le renouvellement des ressources naturelles ainsi que le bien être et la santé de la population humaine.

Les déversements dans les cours d'eau atteignent, de nos jours, des proportions catastrophiques. Par mesure d'économie, usines et villes rejettent directement leurs eaux résiduaires, sans les avoir traitées au préalable. Il y a aussi des produits toxiques qui aboutissent dans les rivières, tuant de nombreuses formes de vie. Parmi ces polluants, citons le chrome, en provenance des tanneries, des margines et des huileries; le mercure, en provenance des usines de pâte à papier. La flore et la faune utilisant cette eau peuvent dans ce cas s'appauvrir de façon considérable, non seulement quantitativement mais aussi qualitativement.

La région de Guelma ; essentiellement à vocation agricole ; a vu ces dernières années une explosion démographique et une multiplication de l'activité agricole et industrielle ce développement très rapide de l'activité humaine et industrielle ont entraînés une dégradation de la qualité des eaux et du sol.

Cette région trouve sa fertilité grâce notamment a oued Seybouse ; La caractéristique hydrographique de la région et l'absence de grandes rivières ; les cours d'eau formés de rivière et petits Oueds ; ce caractérise pas un faible débit, situation qui ne favorise pas la dilution de la pollution.

Introduction Générale

Notre travail c'est orienté sur les divers polluants particulièrement les métaux lourds affectant l'eau le sol et la végétation et leurs accumulations dans les tissus végétaux.

La pollution par les métaux lourds tels que le plomb, le cadmium, le cuivre, le zinc, et le fer ne peuvent pas être biodégradés et donc persistent dans l'environnement pendant de longues périodes. De plus ils sont continuellement rajoutés dans les sols et les eaux superficielle par diverses activités : en agriculture par l'application de pesticide ou dans l'industrie métallurgique ou par vois naturelle par ruissellement. Leurs concentrations ne cessent d'augmenter ; se qui a incité l'OMS (organisation mondiale de la santé) a tiré la sonnette d'alarme concernant les rejets de telles espèces dans les effluents industriels.

L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement peut se répercuter sur la végétation et la santé des êtres humains et des animaux. Notre travail se développe dans ce sens. Nous avons développé notre mémoire autour du secteur agricole et l'impacte de la pollution sur la végétation.

Ce mémoire fait l'objet d'une présentation en trois chapitres. Le premier présente un aperçu bibliographique des différents polluants de l'eau et du sol et l'impacte de quelques métaux lourd sur la végétation ; alors que le second indique les effets néfastes de l'accumulation des métaux lourds sur la végétation et l'être humain et les mécanismes de transfert de ces dernier du sol vers la plante Le troisième chapitre et la partie expérimentale qui illustre les différentes méthodes et les protocoles d'analyses ainsi que les résultats obtenus et leur interprétation.

Chapitre **I** :
Généralités sur la
Pollution

Chapitre I : Généralités sur la Pollution

1.1. Introduction

La pollution représente un sérieux problème pour l'environnement à cause des rejets de nombreux produits chimiques dont des éléments métalliques rejetés par les industries, l'agriculture et les communautés urbaines.

La pollution des eaux par les métaux lourds est l'un des problèmes actuels dont la gravité augmente avec le développement industriel.

Contrairement aux polluants organiques susceptibles de se dégrader, les éléments traces métalliques peuvent être nocifs pour tous les écosystèmes à cause de leurs stabilités et de leurs persistances dans la nature.

1.2. Les différents types de pollution des eaux

1.2.1. La pollution domestique et urbaine

Chaque algérien utilise en moyenne 25 litres d'eau par jour (rapport annuel ADE 2006), dont la quasi-totalité est ensuite rejetée. Les eaux ménagères, qui représentent les deux tiers du total des eaux usées domestiques, contiennent, notamment, des graisses, des savons et détergents, des matières en suspension et des matières dissoutes organiques ou minérales.

A cela il faut ajouter les eaux usées rejetées (effluents) par les installations collectives, telles que les hôpitaux, les écoles, les commerces, les hôtels et restaurants, etc.

Parmi ces intrant nocifs nous constatant les nitrates, les nitrites, les détergents, les huiles-graisses, les métaux lourds.

1.2.2. La pollution d'origine agricole

L'agriculture constitue la première cause des pollutions diffuses des ressources en eau. Les activités agricoles sont, en particulier, largement impliquées dans les apports d'azote et, surtout, de ses dérivés, nitrates et nitrites. Ces derniers présents dans l'eau peuvent causer des effets néfastes sur l'homme et son environnement [1] L'agriculture moderne représente une importante source de pollution de l'espace rural mais aussi des milieux intégrés par l'homme. L'usage massif des engrais chimiques, le recours systématique aux pesticides ont permis une augmentation considérable des rendements agricoles. Ils se sont malheureusement accompagnés d'une pollution accrue des eaux continentales, des terres cultivées, ainsi que des productions végétales et animales par divers contaminants minéraux ou organiques.

Chapitre I : Généralités sur la Pollution

1.2.2.1. Les fertilisants

La pollution des eaux par les fertilisants agricoles (nitrate et phosphate) a été l'objet des premiers travaux de recherche sur la dégradation de la qualité des eaux de surface et souterraines dans les années 70.

1.2.2.1.1. Problématique de la pollution azotée

Dans la nature l'azote représente le principal composant de la biosphère (environ 78%), ce dernier constitue paradoxalement à l'heure actuelle d'une part un élément principal de la productivité agricole et de l'autre part une des substances principales de nuisance à l'environnement, malgré son appartenance à un cycle naturel très complexe. Il figure parmi les composés d'intérêt prioritaire des lois de protection de l'environnement de la plupart des pays.

La prise de conscience de l'impacte de rejets azotés sur la dégradation des milieux récepteurs notamment les eaux superficielles s'est relativement généralisée ces dernières années. Elle a conduit les pouvoirs publics à renforcer les exigences réglementaires concernant la norme des rejets azotés en sortie des STEP et à étendre la contrainte de son élimination à un nombre de plus en plus important d'installations. La nécessité de ces abattements viendrait des effets néfastes sur les eaux de surface et des nappes. On note généralement que :

- Son oxydation biologique (NH_4^+) par réaction de nitrification dans les eaux naturelles s'accompagne d'une consommation accrue d'oxygène [2] théoriquement estimée à 4.3 mg d' O_2 /mg d'azote oxydé
- Une charge supérieure à 25 mg/l NO_3^- entraîne un développement indésirable d'algues conduisant à l'eutrophisation du milieu
- La présence de NH_4^+ engendre une surconsommation de chlore dans le traitement de l'eau potable.

1.2.2.1.2. Problématique de la Pollution phosphatée

Le phosphore est l'un des trois éléments indispensables à la croissance des plantes (les deux autres étant l'azote et le potassium). Le phosphore est aussi un élément important pour les animaux. En effet, c'est un constituant fondamental de la matière vivante (acides nucléiques) et il participe à l'élaboration des molécules dites énergétiques (ATP).

Le phosphore sous forme minérale est peu soluble. Pour satisfaire la demande de l'agriculture productiviste, des engrais phosphatés dans lesquels les

Chapitre I : Généralités sur la Pollution

phosphates ont été rendus plus facilement solubles furent mises sur le marché.

Déversés en excès, les phosphates ne peuvent pas avoir de relation avec les sols et dès lors, solubles ou non, ils seront entraînés dans les eaux de surface et dans les eaux marines à la faveur des pluies et de l'érosion ce qui provoque un problème majeur l'eutrophisation des eaux.

L'eutrophisation (du grec eu-trophein [bien nourrir]) des rivières a pour origine leur surconcentration en nitrates et en phosphates, deux fertilisants qui aident à la prolifération et à la croissance des végétaux aquatiques et en particulier des algues qui envahissent tout l'espace aquatique. A la fin de leur cycle, ces végétaux meurent produisant de la matière organique dont la décomposition nécessite beaucoup d'oxygène. S'il n'y a plus assez d'oxygène dissous, (cela peut arriver si la température de l'eau s'élève et en ce cas sa capacité à contenir de l'oxygène dissous chute), poissons et invertébrés meurent par asphyxie. Une trop grande abondance de matières organiques entraîne une fermentation en anaérobiose qui dégage de l'hydrogène sulfuré (bulle) à l'odeur nauséabonde.

Les principales phases de l'eutrophisation des eaux peuvent être schématisées comme suit[3] :

- Pollution croissante,
- Prolifération des algues,
- Décomposition anaérobie,
- Dégradation extrême du milieu avec une simplification des espèces présentes.

1.2.2.2. Les pesticides

Parmi les pesticides, on distingue : les insecticides et acaricides, les herbicides, les fongicides et tout un ensemble de molécules destinées à des usages particuliers.

Vu les perspectives offertes en terme de gain de productivité, la consommation agricole des pesticides a véritablement explosé dans les années 60.

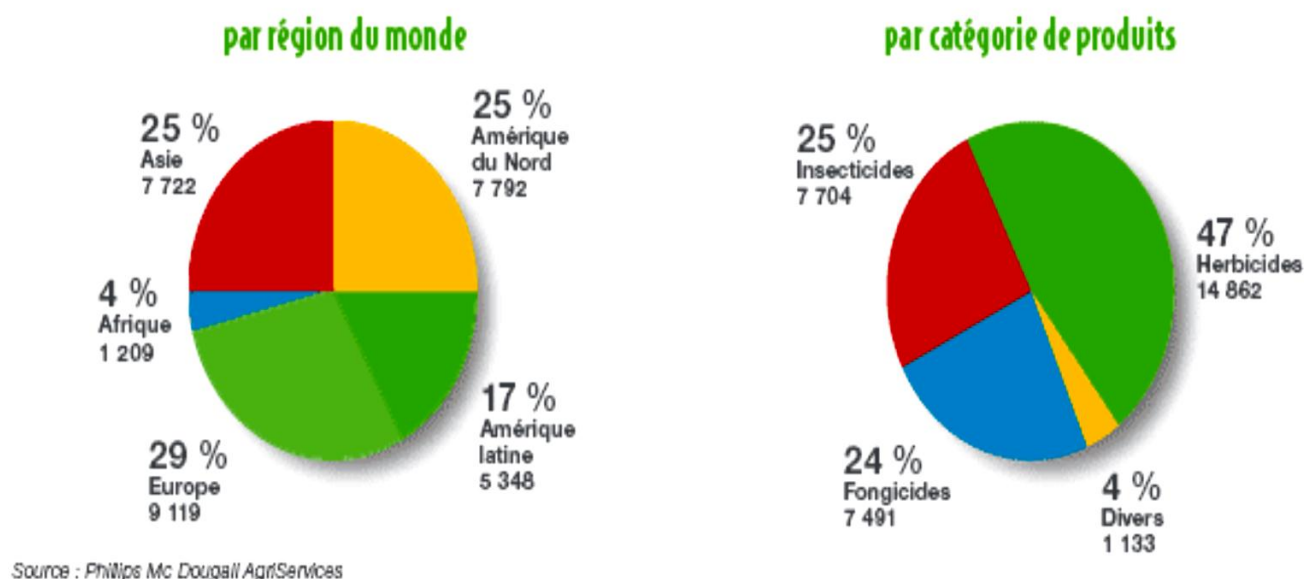


Figure 1-1 : Le marché mondial 2005, en chiffres d'affaire, des pesticides par région et par catégorie de produits [78]

La dispersion des pesticides dans les eaux peut engendrer des nuisances aussi bien au niveau de leur potabilisation que de leur richesse écologique. Cette pollution diffuse est liée à l'entraînement de ces produits par transfert en surface ou en profondeur des eaux d'irrigation et des pluies vers les fleuves, les lacs, les nappes phréatiques ou encore les mers et les océans.

Quel que soit leur mode d'utilisation, la plupart des pesticides employés atteignent les eaux de surfaces et souterraines. Ces molécules peuvent ensuite être soumises à des réactions d'hydrolyse ou d'oxydo-réduction [4] qui sont fonction de leur persistance. Les produits très peu solubles dans l'eau ou qui se trouvent en suspension, résistent beaucoup plus aux phénomènes de dégradation en milieu aqueux [5]

1.2.3. La pollution naturelle

La teneur de l'eau en substances indésirables n'est pas toujours le fait de l'activité humaine. Certains phénomènes naturels peuvent également y contribuer. Par exemple, le contact de l'eau avec les gisements minéraux peut, par érosion ou dissolution, engendrer des concentrations inhabituelles en métaux lourds. Des irrptions volcaniques, des épanchements sous-marins d'hydrocarbures peuvent aussi être à l'origine de pollutions.

Chapitre I : Généralités sur la Pollution

La diminution du niveau de l'eau dans les nappes à proximité des côtes maritimes peut augmenter le taux de salinité. [6]

1.2.4. La pollution industrielle

Si la pollution domestique des ressources est relativement constante, les rejets industriels sont, au contraire, caractérisés par leur très grande diversité, suivant l'utilisation qui est faite de l'eau au cours des procédés industriels.

Parmi les industries considérées habituellement comme rejetant des matières particulièrement polluantes pour l'eau, on citera, notamment, les industries agro-alimentaires, papèteries, la chimie, les traitements de surface et surtout la sidérurgie, où cette dernière régénère une pollution liquide solide et atmosphérique.

Plusieurs travaux se sont orientés [7] dans ce sens. Ils ont démontrés dans leurs études que la pollution régénérée par le complexe sidérurgique d'El-Hadjar présente un risque majeur sur la santé de l'homme et son environnement proche.

Parmi les nombreux rejets de l'industrie on site :

1.2.4.1. Les métaux lourds

Ce sont des métaux formant des précipités non solubles avec les sulfures ; d'autres définitions existent, métaux dont la masse volumique dépasse 6g/ml^{-1} (parfois les définitions donnent des limites de 4,5 à 5g/ml^{-1}) ; métal dont le numéro atomique est supérieur à 20[8].

Les métaux lourds sont réputés d'être toxiques alors que certains sont des oligo-éléments (Cu, Zn, Fe) c'est pourquoi le terme de métal lourd est souvent appliqué à tort à des éléments en raison de leur toxicité. De plus certains éléments sont déclarés métaux lourds alors qu'ils sont des métalloïdes (Se, As) ou qu'ils ne sont pas lourds (Al, Be). De fait ; il est préférable de ne pas utiliser ce vocabulaire devenu ambigu.

Ces métaux rejetés dans la nature (air, sol, eau) peuvent déclencher un bouleversement qui peut nuire à l'homme et son environnement. A cet effet, plusieurs chercheurs à travers le monde se sont intéressés directement par des études approfondies sur les propriétés et les effets de ces éléments [9, 10, 11].

Chapitre I : Généralités sur la Pollution

1.3. Pollution des sols

Le sol est une ressource essentielle pour les sociétés humaines et les écosystèmes.

Etant soumis à des pressions de plus en plus importantes (productions agricoles et forestières, développements urbains et industriels, réseaux de transport, activités de loisirs...) et n'étant pas une ressource renouvelable à l'échelle de temps humaine, il est nécessaire d'en assurer la protection afin de permettre un développement durable des sociétés.

Le sol représente généralement un lieu d'accumulation des apports anthropiques passés et présents en éléments non biodégradables comme les Éléments Traces Métalliques (ETM).

La pollution du sol par certains ETM et métalloïdes, tels que l'As, le Pb, le Cd, l'Hg et le Zn, est devenue un problème majeur.

1.3.1. Définition et fonctions principales d'un sol

Le sol est généralement défini comme la couche supérieure de la croûte terrestre. Il est constitué de particules minérales, de matières organiques, d'eau, d'air et d'organismes vivants.[8]

C'est un compartiment complexe, un carrefour multifonctionnel à l'interface entre lithosphère, hydrosphère, atmosphère qui abrite la majeure partie de la biosphère.

Source de denrées alimentaires, de biomasse et de matières premières, le sol sert de plate-forme pour les activités humaines, constitue un élément du paysage et du patrimoine culturel et joue un rôle central en tant qu'habitat. Il assure des fonctions de stockage, de filtration et de transformation de nombreuses substances, y compris l'eau, les nutriments et le carbone. C'est l'un des puits de carbone le plus important au monde (1 600 gigatonnes). Ces fonctions doivent donc être protégées en raison de leur importance socio-économique et environnementale.

1.3.2. Formation d'un sol

Le sol est une entité vivante, dynamique et nécessaire au fonctionnement des écosystèmes terrestres. La formation d'un sol est le résultat de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre influencée à la fois par le climat, le relief, les organismes vivants, l'activité humaine et les échanges d'énergie qui s'y manifestent [12]. C'est un processus lent, la vitesse de constitution d'un sol est habituellement comprise

Chapitre I : Généralités sur la Pollution

entre 100 et 400 an.cm⁻¹ [13]. Le sol est donc considéré comme une ressource non renouvelable à l'échelle humaine.

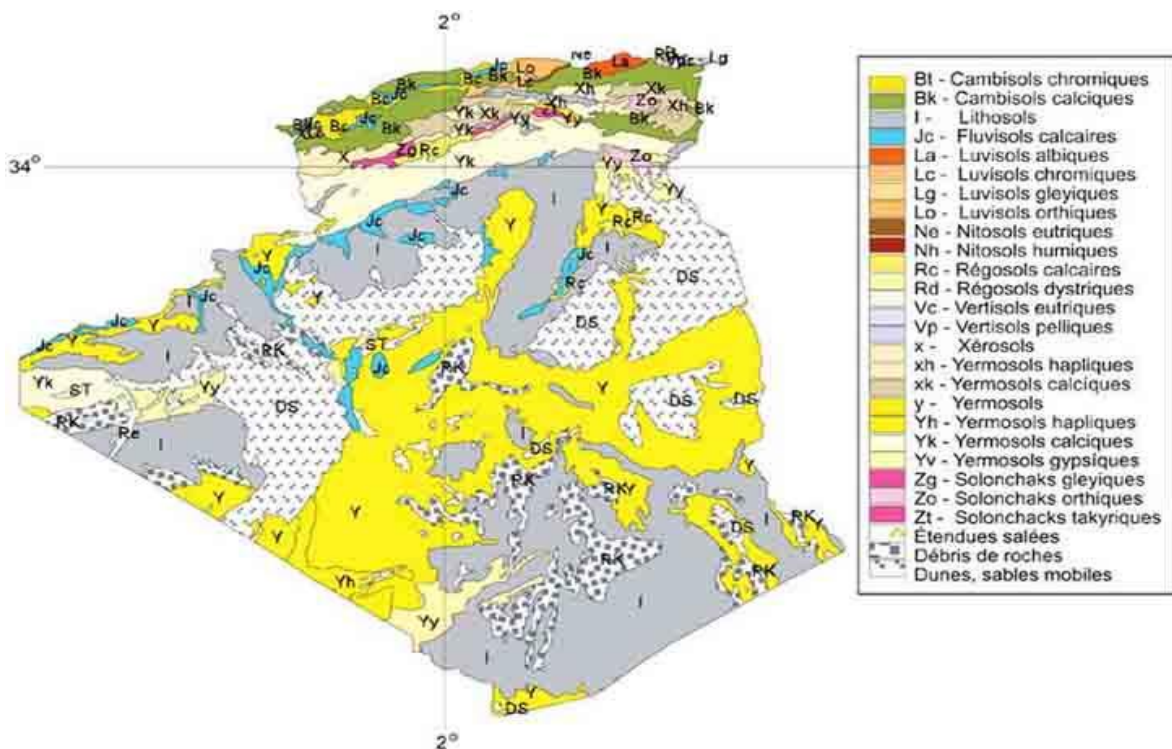


Figure I-2 : Cartes des sols de l'Algérie (UNESCO)

C'est un milieu extrêmement complexe et variable. En fonction de la nature du matériau d'origine, du climat, du relief, et de la nature et de l'activité des organismes qui le colonisent, différents types de sols peuvent être formés. En Algérie, 15 à 20 grands types de sols ont été distingués (Figure I-2). Chacun d'entre eux présente des variations considérables en matière de propriétés physiques, chimiques et biologiques.

I. 3.3. La Pollution des sols

La dégradation de la qualité des sols peut être définie comme la diminution ou la disparition de sa capacité à remplir une ou plusieurs de ses fonctions [12].

Toute dégradation de sa structure détériore également les autres milieux naturels et écosystèmes. Différents processus de dégradation ou de menaces peuvent être cités : l'érosion, la diminution de la teneur en matières organiques, la contamination locale et diffuse, l'acidification, l'imperméabilisation, le tassement, la diminution de la biodiversité des sols, la salinisation, les inondations et les glissements de terrain [14]. L'érosion des sols est

Chapitre I : Généralités sur la Pollution

principalement provoquée par l'eau et, dans une moindre mesure, par le vent. Ce processus est, avec la diminution des teneurs en matière organique, responsable d'une baisse de la productivité des sols et dans un cadre plus général entraîne une diminution des fonctions du sol. La protection de la biodiversité vise à préserver les organismes du sol qui remplissent des fonctions écologiques essentielles notamment dans la formation du sol (amélioration de la structure, dégradation de la matière organique complexe notamment des débris végétaux), et dans le maintien de la fertilité des sols. Le tassement, l'imperméabilisation et les mouvements de terrains concernent la dynamique physique du sol. Ils ont des conséquences importantes sur la perméabilité du milieu ce qui implique des perturbations fortes de ses écosystèmes.

Enfin, la pollution représente une problématique importante, elle présente des risques pour les écosystèmes, les chaînes alimentaires, et donc pour la santé humaine et animale. Il a été distingué les contaminations diffuses peu intenses mais chroniques et généralisées, des contaminations ponctuelles lorsque la source de pollution est clairement localisée [14].

1.3.4. Formes de pollution

On distingue deux types de pollution des sols [15].

- La pollution localisée : Elle se distingue par la présence ponctuelle dans les sols de substances dangereuses: déversements, fuites ou dépôt de déchets.
- La pollution diffuse : Elle implique des polluants à faible concentration sur de grandes surfaces, ils proviennent généralement d'épandages de produits: engrais ou pesticides, retombées atmosphériques.

Pour chacun de ces types, on distingue deux origines de pollution:

- La pollution accidentelle: Déversement ponctuel et momentané de substances polluantes.
- La pollution chronique: survenant sur de longues durées, telles que les fuites sur des conduites enterrées, les lixiviats issus de dépôts de déchets.

1.3.4.1. Micropolluants des sols

1.3.4.1.1. Micropolluants organiques

Ce sont en grande majorité des produits de synthèse issus de l'activité anthropique [16]. Ils proviennent principalement de trois ensembles d'activités industrielles (production d'énergie, métallurgie, industries chimiques...), urbains

Chapitre I : Généralités sur la Pollution

(transport, traitement des déchets,...) et agricoles (utilisation de produits phytosanitaires). Parmi ces nombreux polluants on site :

1.3.4.1.1.1. Polychlorobiphényles (PCB)

Ce sont des substances chlorées très stables, largement utilisées dans la production des condensateurs, transformateurs, fluides hydrauliques, lubrifiants, pesticides [17], encres d'imprimeries et dans les peintures [18]. Ils peuvent être dégradés à haute température (1200°C), leur combustion peut générer des dioxines et des furanes, substances cancérigènes et mutagènes. Les PCB sont insolubles dans l'eau [17] et ont une forte affinité pour les matières en suspension et les lipides. Ils s'accumulent donc dans le milieu naturel et se bioaccumulent fortement dans la chaîne alimentaire, par exemple dans les graisses des poissons et d'autres organismes vivants [16].

1.3.4.1.1.2. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP résultent de la combustion incomplète de la matière organique. Ils sont peu solubles dans l'eau et s'adsorbent fortement sur les particules organiques du sol, ce qui diminue considérablement leur biodisponibilité. Ils se bioaccumulent aussi dans les graisses, notamment chez les poissons et les mollusques [16].

1.3.4.1.1.3. Les composés organiques volatils (COV)

Le terme de composés organiques volatils (COV) englobe un grand nombre de composés appartenant à différentes familles chimiques: alcanes, alcanes substitués, alcènes, alcools, composés aromatiques (benzène), esters, cétones. Les COV font l'objet de nombreuses utilisations en tant que solvants, dégraissants, dissolvants, conservateurs, agents de nettoyage. Ils entrent donc, seuls ou en mélange, dans un grand nombre de procédés d'industries manufacturières utilisant des solvants, d'application et de fabrication de peinture, de préparation de caoutchouc, les imprimeries, les papeteries, la pharmacie, la parfumerie, les industries agro-alimentaires [19].

1.3.4.1.1.4. Phénols et dérivés

Les phénols sont des composés aromatiques hydroxylés comprenant le phénol et ses dérivés tels que les chlorophénols (mono-, di-, tri-, tétra-, penta), les nitrophénols, les crésols, les diméthylphénols. Ils peuvent être naturellement présents dans l'eau et le sol, en tant que produit de la décomposition des végétaux ainsi que des déchets végétaux et animaux [20]. Les phénols sont utilisés dans l'industrie des matières plastiques, dans l'industrie pharmaceutique ainsi que dans la fabrication de nombreux produits: adhésifs, explosifs, coke, engrais, gaz d'éclairage, peintures, caoutchouc,

Chapitre I : Généralités sur la Pollution

articles renfermant de l'amiante, agents de préservation du bois et des textiles, médicaments, préparations pharmaceutiques, parfums. Ils servent aussi à la fabrication de détergents, de colorants, de pesticides (notamment les chlorophénols) [16].

Les phénols proviennent également de la dégradation des insecticides organophosphorés et des herbicides chlorophénoxyacides [15].

Les chlorophénols sont des phénols chlorés renfermant un nombre variable de chlore dans leur molécule, depuis le monochlorophénol jusqu'au pentachlorophénol (PCP) [3].

Dans l'environnement, les chlorophénols proviennent de sources naturelles et anthropiques.

Les chlorophénols d'origine naturelle résultent de la chloration de la matière organique naturelle, de la dégradation des acides flaviques chlorés naturels et de l'activité biologique dans certains types de sol par les champignons, les lichens et les insectes [21]. Les sources anthropiques sont principalement d'origine industrielle, agricole et domestique. Les chlorophénols sont extensivement utilisés comme préservateurs des bois, insecticides, fongicides, herbicides [22].

1.3.4.1.1.5. Pesticides

Les herbicides sont davantage persistants dans les sols que les insecticides et les fongicides et génèrent des produits de dégradation stables qui peuvent également présenter une activité biocide [15]. Une fois dans l'environnement, les pesticides peuvent être transformés en un grand nombre de produits de dégradation, communément définis comme métabolites. Plusieurs études ont rapporté la présence de ces derniers dans les eaux souterraines. Le 2,4-D est l'un des herbicides les plus utilisés pour contrôler les mauvaises herbes. Une fois dans le sol, le 2,4-D est métabolisé en 2,4-dichlorophénol, métabolite récalcitrant, souvent détecté dans les eaux souterraines à un taux supérieur à 3,3 µg/L [23].

1.3.4.2. Micropolluants inorganiques :

Il s'agit d'un ensemble d'éléments ou de composés dont l'accumulation est responsable d'une pollution du sol [14]. Généralement ils sont non biodégradables, accumulatifs et toxiques quand ils sont présents en grande quantité [16]. Les micropolluants minéraux métalliques et non métalliques les plus rencontrés sont le cadmium, le chrome, le cuivre, le mercure, le nickel, le plomb, le sélénium, le zinc, l'arsenic, le molybdène, le cobalt, le bore et le thallium.

Chapitre I : Généralités sur la Pollution

Les micropolluants minéraux sont présents naturellement à des concentrations généralement basses dans les sols. Ils proviennent en grande partie de l'altération de la roche mère du sous-sol [15]. Les activités anthropiques peuvent conduire à une augmentation de ces concentrations naturelles. L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement est liée à leur utilisation comme matières premières pour de nombreux produits industriels ou comme catalyseurs chimiques. On les trouve également dans des produits tels que les pesticides ou les engrais qui sont distribués sur une large surface. Ils sont aussi apportés sous forme de déchets urbains ou industriels, solides, liquides ou gazeux [25]

I.3.4.2.1 Eléments Traces Métalliques (ETM)

La notion « 'Eléments Traces Métalliques » (ETM) est mal définie, néanmoins, celle-ci se substitue peu à peu à celle de « métaux lourds » [26]. Les éléments traces regroupent 80 éléments chimiques constituant la croûte terrestre, dont les ETM, ils représentent 0,6 % du total, alors que les 12 éléments majeurs (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, H, P et Mn) interviennent pour 99,4 % [27]. Ce terme générique « Eléments Traces Métalliques » désigne des métaux réputés toxiques et dont la teneur moyenne dans les sols est inférieure à 1 g.kg⁻¹. De même, les métalloïdes tels que l'As ou l'Sb sont présents en traces dans la croûte terrestre et considérés comme toxiques. Leurs propriétés physiques et chimiques sont intermédiaires entre celles d'un métal et d'un non métal, ils sont définis comme des semi-métalliques.

I.3.4.2.1.1. Sources naturelles des ETM

Tous les sols contiennent naturellement des ETM. Ainsi, leur seule présence n'est pas indicatrice d'une pollution. La concentration des ETM dans des sols non contaminés par l'activité humaine est essentiellement liée à la géologie du matériau parent à partir duquel le sol s'est formé. Selon la géologie locale, la concentration en ETM dans un sol peut dépasser les domaines de variation couramment admis.

Le fond pédogéochimique naturel (FPGN) est la concentration d'un élément chimique dans un sol (que ce soit un élément majeur ou un ETM) résultant des évolutions naturelles, géologiques et pédologiques, en dehors de tout apport d'origine humaine [27]. Cette teneur dépend aussi bien de la roche originelle constituant le sol (matériau parental ou roche mère) que des processus pédogéochimiques, altérations, lixiviations, migrations, redistributions, intervenus lors des périodes géologiques de formation du sol, qui ont pu lessiver ou concentrer l'élément en question.

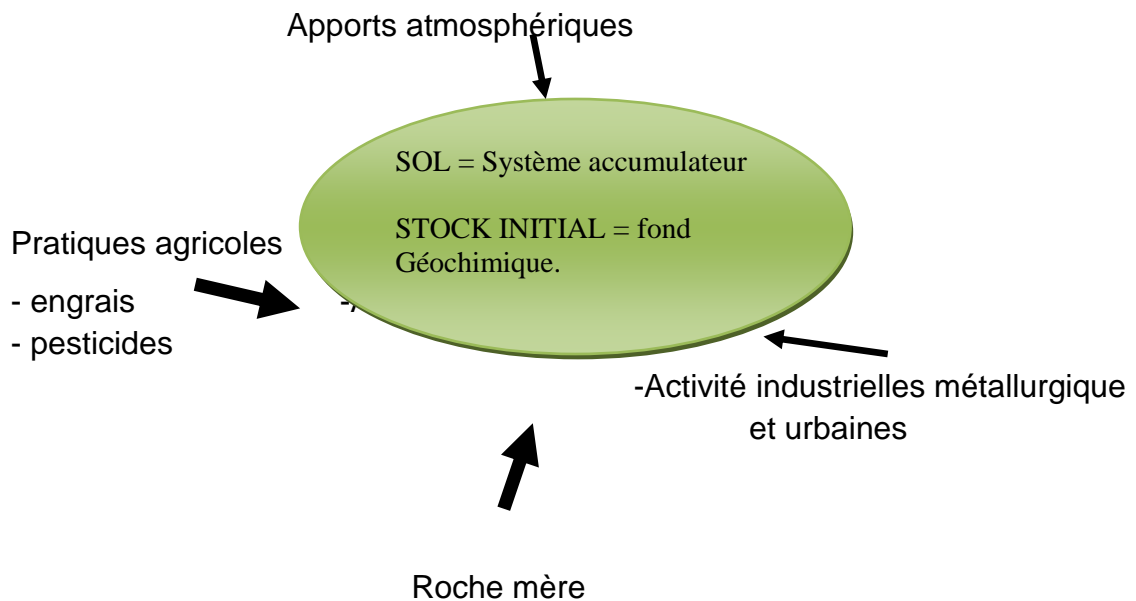


Figure I- 3: Origine des métaux lourds dans le sol [28]

1.3.4.2.1.2. Apport d'origine anthropique des ETM

L'origine anthropique de la pollution des sols peut être de différentes natures. La contamination diffuse des sols est généralement liée aux dépôts atmosphériques (émissions dues à l'activité industrielle, automobiles, chauffage). Les contaminations ponctuelles du sol se distinguent par la présence localisée de substances dangereuses provenant généralement de déversements, de fuites ou de dépôt de déchets. Ces substances, non confinées et en fortes concentrations, donnent naissance à des sites localement contaminés, les sites miniers et industriels rentrent dans ce cadre. Les pratiques agricoles peuvent générer des pollutions par des apports d'origine minérale ou organique à l'échelle de la parcelle (amendements et traitements phytosanitaires). Il est indispensable de réaliser l'inventaire des différentes origines des pollutions sur un site. Elles peuvent être de différentes natures :

Pollutions locales (sites industriels et stockage de déchets minéraux) : il s'agit principalement d'anciens sites industriels qui sont susceptibles d'être réutilisés

Pollutions de proximité : il s'agit par exemple des contaminations en provenance de stations d'épuration, des eaux d'inondation ou encore du dragage des sédiments des canaux et ports.

Sites miniers : les zones minières constituent un cas particulier, les concentrations en éléments traces métalliques étant localement très élevées.

Chapitre I : Généralités sur la Pollution

Bien qu'à l'origine ces éléments soient en général inclus dans des structures cristallines, donc peu mobiles, les risques de migration résultent de l'oxydation des sulfures (au sein des galeries ou des stériles présents en surface). L'acidification des eaux qui en résulte permet le transport à l'état dissous des éléments.

Chapitre **II** :
Transfert sol-plante des
ETM

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

II-1.Introduction

Pour pouvoir se prononcer sur une éventuelle atteinte qualitative de la végétation, les concepts de pollution et de contamination se réfèrent à deux indicateurs principaux :

- Le dépassement des concentrations des éléments étudiés.
- le risque pollutif actuel ou potentiel d'atteinte qualitative, à la végétation et à l'eau. A ces atteintes qualitatives doit être associé le risque toxique pour les plantes et les espèces animales [46].

C'est dans ce même contexte qu'on a élaboré ce deuxième chapitre.

II.2.Effet de la pollution par des ETM sur les végétaux

De fortes teneurs en éléments-traces dans les végétaux ont deux conséquences :

- la première est une toxicité potentielle directe pour la plante (phytotoxicité), c'est-à-dire un dysfonctionnement pouvant aller jusqu'à une diminution du rendement et de la qualité industrielle des récoltes ;
- la seconde est une toxicité potentielle pour les animaux ou les hommes qui ingèrent les végétaux.

Les concentrations entraînant un effet de toxicité sur la chaîne alimentaire sont la plupart du temps inférieures à celles produisant une phytotoxicité. Dans la majorité des cas, les plantes peuvent contenir trop d'éléments-traces pour être consommées, tout en ne présentant aucun symptôme (ni changement de couleur des feuilles, ni chute de rendement).

II.3. Notions de dose et de temps d'exposition

Les notions de dose et de temps d'exposition sont fondamentales pour l'étude des éléments-traces. L'exposition aigue des organismes vivants à une dose élevée d'élément-trace (qu'il soit oligo-élément ou contaminant strict) ou bien l'accumulation dans les tissus suite a une exposition chronique, entraînent des effets de toxicité. Le passage de la fonction d'oligo-élément à celle d'élément toxique dépend de la nature, de la teneur et de la disponibilité de l'élément et du milieu considéré. L'alchimiste Paracelse, dès le XVIe siècle, avait pressenti ce phénomène en affirmant : tout est poison, rien n'est poison,c'est la dose qui fait le poison

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

II.4.origines et enjeux des éléments traces métalliques

II 4.1.Influence des éléments traces sur les êtres vivants

Pour satisfaire leurs croissances et permettre leur survie les plantes exigent

un nombre relativement faible d'éléments, cependant les sols naturels contiennent de nombreux éléments, qui du fait de la sélectivité des membranes des cellules des racines, ne sont détectés qu'à l'état de trace dans les tissu végétaux .Parmi ces éléments, beaucoup, en particulier des métaux lourds comme les cadmiums, le plomb et l'arsenic peuvent être extrêmement toxique,de plus les macroéléments comme le cuivre, le nickel et le zinc peuvent également être toxiquelorsqu'il sont en excès. [30]

Comme pour les autres stresse la sensibilité des plantes aux métaux lourds varie beaucoup selon les espèces.

II.4.2Le cuivre

Le cuivre est une substance très connue qui est naturellement présente dans l'environnement et se diffuse dans l'environnement par des phénomènes naturels.

Le cuivre est un élément essentiel à tout être vivant. Il est souvent présent dans les aliments. Cependant, un excès de cuivre peut avoir des effets toxiques sur les plantes, les champignons et sur certains animaux comme les vers de terre.Les facteurs qui influencent la disponibilité du cuivre dans les sols sont le pH, la capacité d'échange de cations(CEC), la teneur en matières organiques, la présence d'oxydes de fer, de manganèse et d'aluminium et le potentiel d'oxydoréduction [31].

Des 1930, le cuivre est reconnu comme élément trace essentiel pour les végétaux [32]. Il joue un rôle important dans divers processus métaboliques, en participant à la constitution de différentes protéines [33]la plastocyanine pour la photosynthèse ;

- les superoxydesdismutases pour la lutte contre le stress oxydant ;
- les peroxydases pour la lignification ;
- les oxydases pour l'oxydation de composes tels que les acrobates, les diamines, lesphénols
- les cytochromes oxydases pour la respiration cellulaire.

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

II.4.2.1. Formes chimiques du Cu dans le sol

Le Cu est sous forme (II) (Cu^{2+} , CuCO_3). Le facteur sol important pour le Cu est le taux de matière organique et sa composition (son état de dégradation par exemple). En effet, le Cu a une très forte affinité pour les matières organiques et a tendance à former avec elles des complexes solubles (avec les acides fulviques par exemple) ou insolubles (avec les acides humiques par exemple). Bien que la matière organique contribue généralement à l'immobilité du Cu en formant de fortes liaisons, elle peut aussi augmenter la solubilité du Cu par la formation de composés solubles [34]. Le Cu a un minimum de solubilité entre pH 6 et 8. Aux pH inférieurs à 6, il est majoritairement sous forme Cu^{2+} , et au-dessus de 8 sous forme complexée avec la matière organique soluble [24]. La concentration en solution de Cu augmente fortement pour des pH < 4-5 [35].

L'adsorption sur les oxydes de Fe et d'Al est aussi importante [34].

II.4.2.2. Effet du cuivre sur les plantes

Le cuivre joue un rôle déterminant dans la formation des protéines. Il régule différents processus enzymatiques des tissus végétaux, principalement l'oxydase, qui influence à son tour le métabolisme de l'azote. On peut donc dire que le cuivre a un rôle très important dans le métabolisme de la plante.

Le cuivre est assimilé par les plantes sous forme de Cu^{++} et vraisemblablement aussi sous forme de complexes organiques contenant peu de molécules, et en partie à partir de complexes anorganiques.

La concentration la plus faible de cuivre dans le sol pour laquelle des effets phytotoxiques ont été observés est de 50 mg $\text{Cu}\cdot\text{kg}^{-1}$ de sol sec; Les symptômes typiques de la toxicité du cuivre chez les plantes incluent l'apparition de feuillage vert foncé suivie par l'induction d'une chlorose ferrique, des racines épaisses, courtes ou barbelées et un enracinement réduit [36].

Des teneurs très élevée de cuivre dans le sol inhibe la croissance des racines et diminue le rendement des récoltes. Le feuillage présente une chlorose proche de celle observée lors d'une carence en fer. Le cuivre en excès endommage le plasmalemme.

Dans le sol le cuivre réagit avec le fer, ce qui provoque une carence en fer pour la plante (chlorose).

Il réduit l'activité microbienne dans le sol et donc la vitesse de décomposition de la matière organique dans celui-ci [37].

II .4.2.3.Toxicité chez l'homme

II.4.2.3.1.Toxicité aiguë

L'intoxication au Cu est rarement décrite et elle est souvent en relation avec l'eau de boisson (plaintes intestinales et vomissements)[39].La toxicité par ingestion du Cu est considérée comme essentiellement aiguë, avec une symptomatologie assez bruyante caractérisée par des vomissements violents qui éliminent rapidement le sel de Cu ingéré. C'est pourquoi l'empoisonnement aigu n'a été que très rarement suivi de mort.

II.4.2.3.2.Toxicité chronique

Le Cu est un stimulant du système nerveux. En excès, il provoquerait un syndrome schizophrénique. L'insomnie des adultes et le sommeil léger des personnes âgées sont probablement induits par une hypercupremie[39].

Bien que la plus grande partie du Cu soit éliminée par voie biliaire, une surcharge en Cu entraîne une fuite rénale augmentée du Cu ultra-filtrable. Il s'en suit une nécrose des cellules rénales [39].

Les maladies du foie sont également corrélées à une surcharge hépatique en Cu [39].

Le Cu peut présenter une toxicité chronique, comme l'illustre le syndrome ICC (Indian Childhood Cirrhosis) décrit sur les jeunes enfants en Inde. Il s'agit d'une dégénérescence hépatolenticulaire du foie. Le Cu ne serait pas le seul responsable de l'ICC et la plupart des auteurs s'accordent à envisager le rôle d'une déficience génétique.

II .4.3.Le zinc

II.4.3.1.Formes chimiques du Zn dans le sol

Dans le sol, le Zn est sous forme (II) : Zn^{2+} , $ZnSO_4$, $ZnHCO_3^+$, $ZnCO_3$, $ZnFe_2O_4$, Zn_2SiO_4 , $Zn_3(PO_4)_2$ [40], et dans la solution du sol sous forme de Zn^{2+} ou plus souvent de complexe soluble avec les matières organiques [24]. La proportion de Zn complexe dans la solution de sol augmente avec le pH (5

à 90 %). Le Zn échangeable diminue lorsque le pH augmente. Le Zn réalise aussi des complexes insolubles avec les matières organiques [41]. La concentration minimale de Zn en solution est entre pH 7 et 8. La concentration en solution de Zn augmente fortement pour des pH < 6 [42].

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

II.4.3.2. Prélèvement et distribution du Zn dans les organes des plantes

Le facteur le plus important pour le transfert du zinc est le pH [43].

Le Zn est fortement phytodisponible, et se trouve en quantités plus élevées dans les racines que dans les parties aériennes.

Le chaulage, un apport de terre fortement argileuse, un apport de fer ou de phosphore diminuent le transfert du Zn vers les plantes.

Dans le sol, en présence de fortes concentrations de SO_4^{2-} , il y a formation de ZnSO_4 soluble [44].

Le P forme avec le Zn du $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ solides dans le sol, et diminue donc la phytodisponibilité du Zn [44]. De plus, le P perturbe l'assimilabilité physiologique de Zn dans les tissus végétaux [44].

II .4.3.3. Problèmes particuliers

Le Zn est peu phytotoxique [44], sauf sur les sols fortement pollués.

Des carences en Zn se manifestent sur des sols [45] :

- sableux, très lessives (sols pauvres en Zn total),
- à pH élevé ou fortement chaulés,
- à fortes teneurs en P,
- froids ou en conditions d'intensité lumineuse forte.

II .4.3.4. Toxicité chez l'homme

Le Zn est peu toxique pour l'homme et ses dangers résultent plutôt d'une déficience. De même, la carence en Zn est plus fréquente chez les ruminants que ses manifestations toxiques [41].

II.4.3.4.1. Toxicité chronique

L'intoxication par des expositions subaiguës à chroniques au Zn est assez rare, grâce à un mécanisme de dérégulation homéostatique. Elle se caractérise par des douleurs gastro-intestinales et une aggravation des carences en Cu (lorsqu'elles existent). Elles peuvent également altérer les réponses immunitaires. Les patients subissant certaines techniques de dialyse du rein (Sérum à niveaux élevés en Zn) peuvent présenter des nausées, vomissements, anémie, léthargie et incoordination musculaire.

II .4.4. Le Plomb

Le plomb est un élément réputé peu mobile par rapport à d'autres métaux en traces tel que le cadmium [41]. Son cycle biogéochimique dépend des caractéristiques physico-chimiques du sol. Le plomb tend à former des

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

complexes particulièrement stables. En conséquence, il va être stocké en grande partie dans le sol.

Toutefois, une fraction mobile peut être absorbée par les organismes vivants (micro- et mésoorganismes du sol, végétaux...) et rentrer ainsi dans la chaîne alimentaire.

II.4.4.1. Formes chimiques du Pb dans le sol

Dans le sol, le Pb se trouve sous forme (II) : Pb^{2+} , $PbHCO_3^+$, $PbOH^+$, PbS ,

$PbSO_4$, $Pb(OH)_2$, $PbCO_3$, PbO , $Pb(PO_4)_2$, $PbO(PO_4)_2$, $PbCl^+$, et dans la solution de sol sous forme de Pb^{2+} , et de chélatés d'acides fulviques [40].

II.4.4.2. Absorption du plomb par les plantes

L'absorption du plomb par les racines et son transfert vers les parties aériennes s'effectue au cours des premières vingt-quatre heures d'exposition [47]. Une grande partie de l'absorption (35 %) s'effectue lors de la première heure d'exposition.

La rapide limitation de l'entrée de plomb dans la racine pourrait être un mécanisme général de défense des plantes contre les métaux lourds. Les végétaux pourraient limiter directement l'absorption active des éléments Traces Métalliques (ETM) en régulant l'activité de canaux et transporteurs spécifiques.

II.4.4.3. Effet du plomb sur les plantes

Les effets néfastes du plomb sur les plantes ont fait l'objet de plusieurs études [48,49]. Les études ont montré que ces effets varient en fonction de la durée d'exposition, de l'intensité du stress, du stade de développement de la plante, des organes considérés et évidemment des espèces étudiées voire même du cultivar.

A l'échelle macroscopique, le plomb entraîne des effets néfastes sur les plantes. En premier lieu, la germination est fortement inhibée par les ions Pb^{2+} et ce, à de très faibles concentrations [50]. Des plus fortes doses conduisent à une inhibition totale de la germination chez les espèces végétales, comme le haricot. Une exposition à une faible concentration de plomb conduit au développement de racines plus courtes mais plus compactes. Le plomb peut se fixer, en grandes quantités, sur les composants des parois ou des membranes. Cette fixation conduit notamment à une minéralisation de la paroi [51]. La minéralisation pariétale entraîne un changement dans les propriétés physiques et chimiques de la paroi, et en particulier dans sa plasticité. Cette

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

diminution de plasticité affecte de nombreux mécanismes cellulaires comme la division ou l'élongation.

Le plomb ne perturbe pas seulement les enveloppes externes en se liant à elles, il va également désorganiser les réseaux de microtubules, même à de faibles doses [51]. Cette désorganisation a un impact très important, puisque les microtubules jouent un rôle majeur dans de nombreux processus tels que le trafic intracellulaire, la mitose et la morphogenèse, déterminant la polarité de croissance et la forme des cellules. La conséquence de cette interaction entre le plomb et les microtubules est l'apparition de formes cellulaires anormales et d'inégalités dans les épaisseurs de la paroi [51].

Le plomb a une influence sur les protéines des plantes parmi ces effets on site :

- Modification de l'expression génique [52] et augmentation de l'activité ribonucléasique [53]
- Diminution de la teneur en acides aminés libres [54] corrélée à une forte perturbation du métabolisme de l'azote

II .4.4.4.Intoxication chronique chez l'homme

Les manifestations cliniques de saturnisme professionnel sont habituellement précédées d'une période plus ou moins longue d'imprégnation saturnine latente et essentiellement biologique. Ce stade habituellement réversible peut être décelé par divers examens. A ce stade, le seul signe clinique est le lisère gingival de Burton ligne ardoise qui sertit le collet des dents. Mais ce signe est inconstant, tardif, plus souvent observé à la période d'intoxication confirmée.

L'intoxication chronique évolue généralement en deux phases : le pré-saturnisme et le saturnisme confirmé.

II .5.5.Le nickel

Le nickel existe dans le sol principalement sous la forme Ni(II). Il peut se présenter sous les formes suivantes : Ni^{2+} , NiOH^+ , $\text{Ni(OH)}_2(\text{aq})$, Ni(OH)^{3-} , Ni(OH) , $\text{Ni(OH)}_2(\text{s})$, $\text{NiCO}_3(\text{aq})$, NiHCO_3^+ . Il peut être adsorbé par la matière organique et minérale (oxydes d'Al, Mn, Fe et composés argileux). Cette adsorption dépend du pH

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

II.4.5.1.Effet du Nickel sur les plantes

La teneur en Ni dans les plantes dépend de sa biodisponibilité dans le sol, du type de plante, des parties de la plante analysées. La teneur en Ni, dans une plante se développant sur un sol non contaminé, est de l'ordre de 0,05 à 5 mg.(kg MS)⁻¹ (matière sèche)[55]. Certaines plantes sont capables de se développer sur des sols contaminés. Elles peuvent alors accumuler plus de 1000 mg.(kg MS)⁻¹, notamment dans leurs feuilles [56].

A faible concentration (0,01 à 5 mg.kg⁻¹de MS), Ni est considéré comme un élément essentiel. En effet, il intervient notamment dans la structure de l'uréase, responsable de l'hydrolyse de l'urée au niveau des feuilles [57].

Des études ont mis en évidence [58] le rôle essentiel du nickel chez les

plantes supérieures ; il préserve des nécroses dues à l'accumulation d'uréase. A forte concentration, il devient toxique : soit plus de 10 mg.kg⁻¹ pour les plantes sensibles et plus de 50 mg.kg⁻¹ pour les plantes tolérantes [59]. Cette phytotoxicité est à l'origine d'une chlorose, d'une diminution de la croissance et d'un désordre dans le métabolisme. [60] ont aussi montré que l'ajout de Ni sur des sols, inhibe la croissance des racines de l'orge et des feuilles de la tomate.

Une autre étude [61] a montré que le nickel inhibe de façon importante la croissance des plants de maïs au delà de 20ppm.

II .4.5.2.Toxicité chez l'homme

Le Ni peut être considéré comme un métal essentiel ; sa carence altère le métabolisme du glucose et détruit la tolérance a cette ose. C'est, de plus, un facteur de croissance. Il peut également être toxique à hautes doses.

II .4.5.2.1Toxicité chronique

Le Ni est connu depuis longtemps comme l'allergène le plus courant pour la peau. La prévalence de la sensibilisation au Ni dans la population générale est élevée, environ 10 % chez la femme et 1 a 3 % chez l'homme. Environ la moitié des personnes sensibilisées au Ni développent, par contact répété avec le métal et ses composes, des dermatoses eczéma récidivantes. Il semble que le Ni provenant de l'alimentation ou de l'eau pourrait constituer un facteur aggravant pour les dermites, les doses ingérées doivent cependant être très largement plus élevées que les doses ingérées normalement.

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

II .4.6.Le chrome

Le Cr peut être considéré comme un oligo-élément essentiel au métabolisme des hydrates de carbone.

C'est un composant du facteur de tolérance au glucose et un co-facteur de l'action de l'insuline. Le Cr est également toxique. L'absorption de Cr(III) est très faible chez l'homme, alors que le Cr(VI), capable de franchir les membranes cellulaires, est plus facilement absorbé.

II .4.6.1.Formes chimiques du Cr dans le sol

Le Cr se trouve sous forme Cr(VI) et Cr(III).

Le Cr(III) est largement majoritaire dans les sols, principalement sous forme de précipités insolubles d'oxydes de Cr [34]. La forme (VI) (HCrO_4^- , CrO_4^{2-}) provient essentiellement des pollutions anthropiques [34]. Dans les sols, le Cr(III) précipite avec de nombreux hydroxydes métalliques et le Cr(VI) peut coprecipiter avec l'hydroxyde d'Al sur une zone de pH comprise entre 7 et 9,4 [62]. La matière organique a un effet réducteur vis-à-vis du Cr(VI) (passage au Cr(III)) et la stabilité du Cr(VI) est plus grande dans des sols à faible teneur en carbone organique et à pH élevé [62]. Enfin, il peut y avoir formation dans les sols de composés organiques à base de Cr [62].

II.4.6.2.Prélèvement et distribution du Cr dans les organes des plantes

La phytodisponibilité du Cr est faible comparée aux autres éléments [63]. Elle est accrue lors d'une déficience en Fe de la plante. Le Cr(III) a tendance à rester dans les racines, alors que le Cr(VI) est transporté vers les parties aériennes [63]. Sous une forme adsorbée sur des hydroxydes métalliques, le Cr est peu phytodisponible [62]. Le Cr dans un sol neutre ou basique sera plus phytodisponible que dans un sol acide [62].

II .4.6.3.Toxicité chez l'homme

Le Cr est peu toxique pour l'homme et les végétaux, du moins dans sa forme la plus répandue (Cr(III)).

La forme toxique est l'état d'oxydation +VI (Cr(VI)). La toxicité par voie orale est mineure car le Cr(VI) est réduit en Cr(III) au niveau stomacal. On signale cependant la possibilité d'effets gastro-intestinaux et notamment d'hémorragies [41].

Le Cr est un élément essentiel pour l'homme et, en cas de carence, il peut se produire des troubles neurologiques périphériques, un état diabétique et une perte de poids [41].

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

II.4.7. Rappel sur la toxicité des éléments traces

Le tableau suivant (Tableau II-1) présente une synthèse des effets majeurs sur la santé mis en évidence pour les éléments considérés.

Elément	Effets
As	Toxique, possible cancérigène
Cd	Hypertension, dommages sur le foie
Cr	Cancérigène sous forme de Cr(VI)
Cu	Peu toxique envers les animaux, toxique envers les plantes et les algues à des niveaux modérés
Hg	Toxicité chronique et aiguë
Ni	Allergies de peau, maladies respiratoires, possible cancérigène
Pb	Toxique
Se	Essentiel à faibles doses, Toxique à doses élevées
Zn	Toxique pour les végétaux à de fortes teneurs

Tableau II-1 : Principaux effets associés aux éléments listés [77]

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

II .5. Notion de phytodisponibilité

La phytodisponibilité d'un élément-trace peut être définie comme la quantité d'élément qui peut être transférée (prélevée) dans la plante durant son développement [41].

Elle est la résultante d'un ensemble de processus successifs qui contribuent au transfert de l'élément de la phase solide du sol à la solution du sol puis aux tissus de la plante : l'offre du sol, le transport vers les racines, et le prélèvement par les racines en lui-même.

Les éléments-traces se trouvent sous deux formes dans le sol : soluble ou solide. Les formes solides sont très majoritaires en quantité. Sur la phase solide, un élément peut être réparti en deux compartiments : celui des ions pouvant passer en solution et celui des éléments non mobilisables. Les formes solubles, bien que minoritaires, ont un rôle prépondérant, puisque les racines des plantes prélèvent les éléments-traces uniquement dans la solution du sol (c'est-à-dire l'eau du sol : composée d'eau, d'éléments et de molécules dissous) [41].

Plus la concentration d'un élément (sous une forme chimique absorbable par la plante) est importante dans la solution du sol, plus la plante peut prélever cet élément. La répartition des éléments-traces entre la phase solide et la phase liquide du sol change constamment. Il s'agit d'une suite d'équilibres chimiques, modifiés par les conditions physiques et chimiques du sol, entre autres par l'intervention des organismes vivants. L'homme notamment peut exercer une influence sur ces équilibres, en chaulant, en épandant des matières organiques, en apportant des éléments sous forme soluble (engrais avec Cu), en acidifiant les sols par les retombées atmosphériques des activités industrielles, etc.

L'origine de l'élément est importante, car elle influe sur sa forme chimique [63]. Quand il s'agit d'un élément naturel, il se trouve en grande majorité sous forme solide non assimilable par les plantes car très fortement fixée au sol. Au contraire, quand il s'agit d'un sel, que l'on a généralement apporté lors d'une expérimentation pour étudier le transfert, ou lors de la fertilisation, ou bien par l'activité industrielle, une partie importante est très assimilable par les plantes.

Les éléments-traces de la solution du sol sont transportés vers la rhizosphère, qui est la zone de sol proche de la racine, en interaction avec elle.

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

II.6.Mécanisme d'absorption des ETM

Avant d'être absorbés par le végétal, les éléments traces métalliques doivent être transférés à proximité de la racine, dans la rhizosphère. Ce mouvement peut être réalisé par simple diffusion selon un gradient de concentration dans la solution du sol, ou par flux de masse du fait de l'absorption de quantités d'eau importantes par les racines pour compenser les quantités perdues par évapotranspiration au niveau des parties aériennes.

Une racine présente, en partant de son extrémité (Figure II-1), une zone meristématique (embryonnaire), appelée également point végétatif ou apex, qui constitue le pôle de croissance ou à lieu la division cellulaire, protégée par une coiffe conique composée de cellules subérisées se renouvelant constamment. Cette coiffe, par la sécrétion de polysides (mucilages), a un rôle lubrifiant afin de permettre une meilleure pénétration de la racine dans le sol. Vient ensuite une zone d'élongation, limitée à quelques millimètres, où les cellules formées au niveau du point végétatif s'allongent et où les tissus racinaires se différencient. Puis la racine comprend une zone pilifère ou rhizoderme, étendue sur quelques centimètres et dont la durée de vie est limitée. Dans cette dernière zone, chaque poil absorbant est constitué d'une seule cellule très allongée à grande vacuole, dont les parois nues permettent l'absorption de l'eau et des sels minéraux par osmose. Enfin, après dégradation du rhizoderme, un nouveau tissu cortical de cellules subérisées se forme : l'exoderme ; épiderme ; endoderme ; écorce.

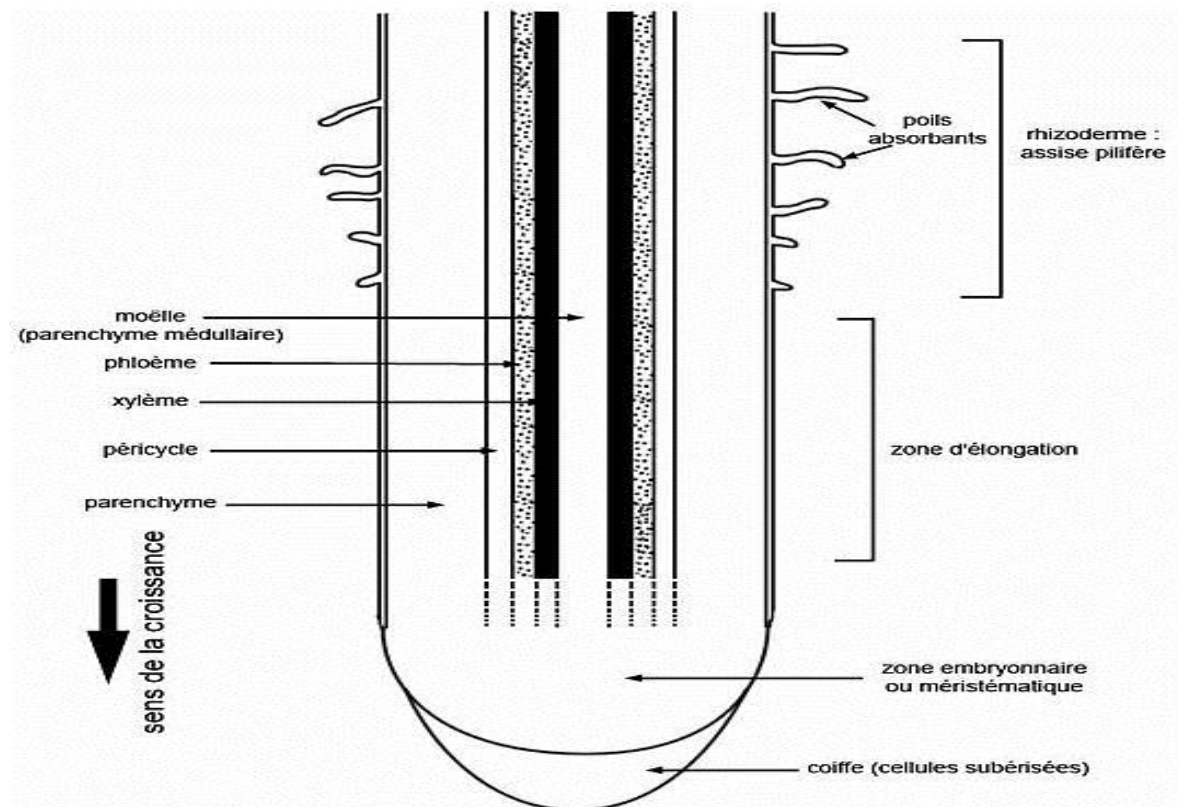


Figure II-1 : Coupe longitudinale de racine ; principaux tissus [64]

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

Pour entrer dans le végétal, les éléments traces métalliques doivent donc traverser la membrane plasmique des cellules au niveau des poils absorbants c'est la voie symplastique qui permet l'absorption des éléments traces. Les éléments peuvent également demeurer à l'extérieur des cellules, dans l'espace les séparant ou a leur surface : c'est la voie apoplastique[64]

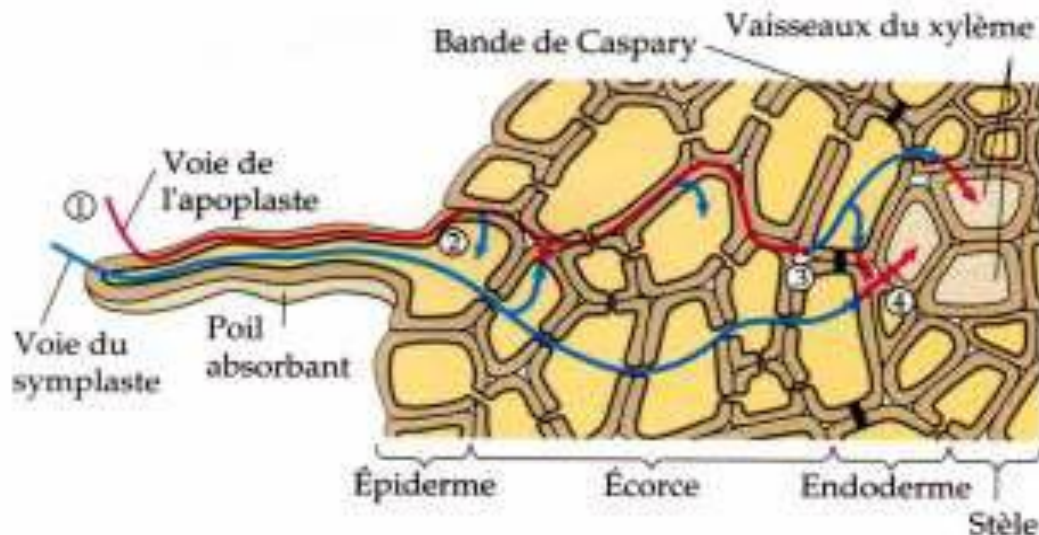


Figure II.2: Coupe d'une racine [65]

II .6.1.Voie symplasmique (intérieur de la cellule)

Le symplasma est défini comme ce qui se trouve à l'intérieur de la membrane plasmique. Les métalliques traversent la paroi, puis la membrane plasmique, et se déplacent de cellule en cellule par les plasmodesmes. Il s'agit dans ce cas d'une réelle absorption de l'élément par la cellule végétale, puisqu'il se trouve dans le milieu intérieur de la cellule. L'absorption se fait de trois manières [41].

- La première est une *absorption passive*, le long d'un gradient électrochimique des ions (spontanément d'un endroit où la solution est chargée plus positivement vers un endroit où elle est chargée moins positivement), et ne requérant pas d'énergie. Ce type de transport existe quand la solution de sol est très chargée en cet élément, ce qui est rare.
- La deuxième est une absorption passive demandant une dépense d'énergie de la part de la cellule, par exemple le fonctionnement d'une pompe à protons, excréant des ions H^+ vers l'extérieur de la cellule quand des cations sont absorbés, et maintenant ainsi le gradient électrochimique (Intérieur de la cellule négatif par rapport à la solution de sol extérieure).

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

– La dernière est *une absorption active*(contre un gradient électrochimique) avec dépense d'énergie

II .6.2.Voie apoplasmique (extérieur de la cellule)

L'apoplasme est constituée de la paroi perméable et des espaces entre les cellules. Il représente 10-15 % du volume de la racine. Il ne s'agit pas d'une véritable absorption de l'élément, puisqu'il n'est pas, en réalité, dans la cellule végétale. On dit que l'élément est prélevé par la plante, mais non absorbé.

Ce type de transport est arrêté après 5 à 10 cellules par une rangée de cellules dont la paroi est subérisée, c'est-à-dire recouverte d'une substance lipidique imperméable [66]. La suite du transport vers les vaisseaux conducteurs de sève brute, le xylème, se fait donc par l'intérieur des cellules et nécessite donc une absorption réelle. Une fois dans le xylème, les éléments peuvent être transportés vers les parties aériennes de la plante.

La voie apoplasmique n'est pas à négliger. Elle peut être prépondérante pour certains éléments traces chargés positivement qui entrent difficilement dans la cellule ou qui se lient fortement à des composés de la paroi, globalement chargés négativement. On peut définir la notion de capacité d'échange cationique (CEC) de la paroi des cellules végétales. Ceci pourrait expliquer pourquoi certains cations ont tendance à s'accumuler dans les racines : parce qu'ils restent fixes dans les parois des cellules des racines, comme le Pb, le Cu, le Cd, et le Zn [66]. D'une façon générale, les monocotylédones, comme le maïs, ont moins de charges négatives à la surface de leur paroi (CEC plus faible) que la majorité des dicotylédones, comme le concombre, et donc accumulent moins les métaux à cet endroit [67].

II .7.Facteurs contrôlant le prélèvement des éléments-traces

Le prélèvement des éléments-traces par les racines est sous l'influence de facteurs liés au sol, à la plante, au climat, et aux interactions entre les éléments eux-mêmes.

Parmi les facteurs liés au sol, le pH, le potentiel d'oxydo-réduction et la capacité d'échange cationique sont les plus importants. Leurs effets sur le prélèvement sont résumés dans le (tableau II.3). Pour une même offre du sol, différentes plantes ne prélèvent pas les mêmes quantités d'éléments-traces.

Il existe un effet espèce végétale, avec des espèces qui accumulent certains éléments traces et d'autres qui ne les prélèvent que peu. Généralement, les légumes-feuilles (tels que épinards et laitues) accumulent plus que les grains de graminées et les légumes-racines, qui eux-mêmes accumulent plus que les fruits et les légumes-fruits.

De la même façon, il existe un effet variété (Tableau II.2).

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

Dans les sites contaminés par les éléments-traces, il est conseillé de cultiver des plantes qui accumulent peu dans les parties consommées les éléments toxiques présents dans le sol.

L'aptitude à l'accumulation dépend des espèces et de la variété. En général, les plantes à croissance rapide accumulent les métaux, notamment le cadmium, le zinc et le cuivre. Les plantes accumulent très peu du plomb par les sols et les traces de plomb que l'on retrouve sur les plantes émanent en général d'une source atmosphérique. [68]

Enfin, l'âge de la plante et son stade de développement ont une importance. La concentration de la plante en éléments-traces diminue au cours de sa croissance

Plantes	Cadmium	Zinc	Cuivre	Nickel	Plomb
Fortement accumulatrices	Carotte, laitue, épinard		Carotte	Chou	-
Moyennement accumulatrices	Chou, céleri	Maïs, betterave	Laitue, betterave	Betterave	-
Faiblement accumulatrices	Betterave, poireau	Céréales, poireaux	Pommes de terre, chou, épinard	Céréales, maïs, pommes de terre	
Très faiblement accumulatrices	Céréales, maïs	Pommes de terre	Pommes de terre		toutes espèces

Tableau II-2: Aptitude à accumulation de quelques plantes[69]

II .7.1.pH

La solubilité d'un élément-trace dépend tout d'abord du pH. Un pH bas augmente généralement la phytodisponibilité de éléments-traces, car l'ion H^+ a une plus grande affinité pour les charges négatives sur les colloïdes, et rentre alors en compétition avec les ions métalliques vis-à-vis de ces sites, ce qui induit un relachage de éléments-traces dans l'eau des pores du sol.

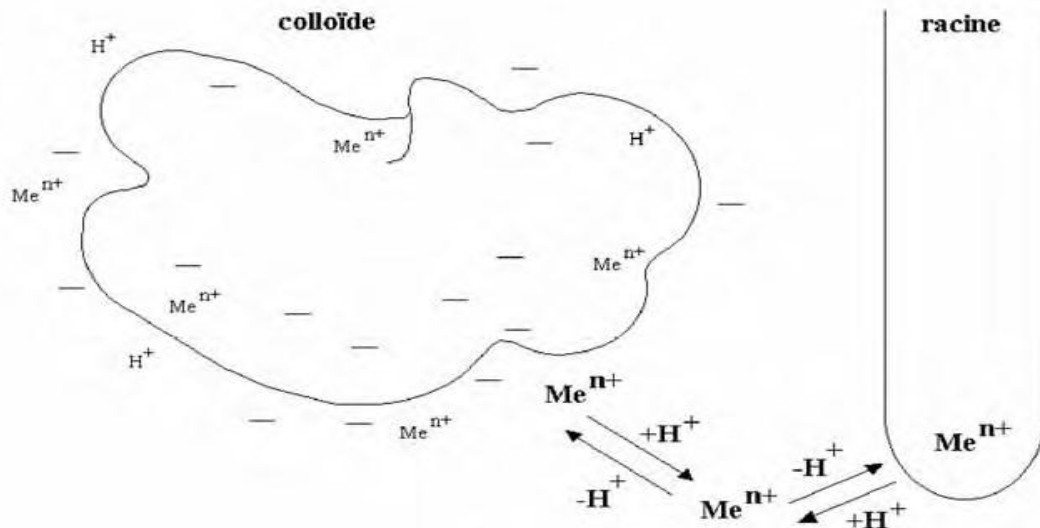


Figure II-3: Influence du pH sur le prélèvement d'un métal dans le sol.[69]

Plus le sol est acide, plus le transfert de Cd, Cu, Pb, Cr, Co, Zn, Hg, Ni, Tl, As vers la plante est important, car ces éléments sont plus solubles (Tableau II.2). En effet, les réactions de précipitations et d'adsorption augmentent avec le pH. Les fertilisations acidifiantes, comme un apport d'azote sous forme d'ammonium, provoquent un accroissement du transfert vers la plante [70]. De même l'apport de soufre en tant que fongicide conduit à l'acidification du sol, et à un transfert accru des éléments-traces vers les végétaux [71].

Le transfert du Cd et du Zn est principalement contrôlé par le pH [67]. Le prélèvement de ces éléments-traces n'augmente pas de manière significative quand le pH diminue de 6,5 à 6, mais par contre augmente fortement en dessous de 6

La solubilité du Cu est moins affectée par le pH que celle des autres éléments, car deux tendances inverses se contrecarrent. D'un côté le Cu est un métal qui a tendance à être plus soluble en milieu acide, et de l'autre il est complexe par les matières organiques solubles pour des pH supérieurs à 6,5. [41]

II .7.2.Eh (potentiel d'oxydo-réduction)

Les conditions, lorsqu'elles sont soit réductrices (Eh faible : par exemple un sol hydromorphe, gorge d'eau), soit oxydantes (Eh élevée : par exemple en sol bien aéré), ont un effet sur la solubilité des éléments et donc sur leur disponibilité pour les végétaux. Cependant, il est difficile de dégager de grandes tendances, car de nombreux facteurs interagissent. Il en résulte que la disponibilité des éléments-traces augmente ou diminue selon les cas avec le potentiel d'oxydo-réduction.

II .7.3.Capacité d'échange cationique (CEC)

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

La capacité d'échange cationique est un paramètre global, qui représente la quantité maximale de cations de toutes sortes qu'un poids déterminé de sol est capable de retenir ou, autrement dit, le total des charges négatives du sol disponibles pour la fixation de cations métalliques ou d'ions H⁺. Pour les pays tempérés, les cations dissous dans la solution du sol sont attirés par des composants chargés négativement (principalement, les argiles, les oxydes de métaux et la matière organique qui sont les contributeurs les plus importants à la CEC du sol) [41]. Une CEC élevée veut dire que la possibilité de fixation sur les charges négatives augmente. Plus la CEC est élevée, plus les cations métalliques (Cd, Pb, Cr, Co, Zn, Hg, Cu, Tl) sont adsorbés ou complexés par les matières organiques, les argiles et les oxydes, donc moins assimilables par les plantes (Tableau II.2). C'est pourquoi la quantité et la nature des matières organiques, des argiles et des oxydes dans le sol conditionnent la métalliques des éléments-traces.

Les sols sableux permettent donc un transfert des éléments-traces vers les plantes plus élevé que les sols plus lourds (plus argileux). Le transfert du Cu et du Ni vers les racines est principalement contrôlé par la CEC.[67]

		Transfert très faible	Transfert faible	Transfert moyen	Transfert élevé	Transfert Très élevé
pH	neutre- alcalin	Cr, Hg, Cu, Ni, Co	Pb, Zn, Cd, Tl, As			Se, Mo
	acide	Se, Mo		Cu, Pb, Cr, As	Zn, Cd, Hg, Co, Ni, Tl	
Eh	oxidant	Cr	Cu, Co, Hg, Ni, Zn, Cd, As	Pb	Mo, Se	
	réducteur	Cr, Hg, Cu, Se, Mo, Cd, Pb, As		Zn, Co, Ni		

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

CEC	élevée	Cu, Ni, Pb	As, Co, Cr, Hg, Ni, Tl, Cd, Mo, Se, Zn			
	Faible				As, Co, Cr, Hg, Ni, Tl, Cd, Mo, Se, Zn	Cu, Ni, Pb

Tableau II-3 : Principaux facteurs liés au sol contrôlant le transfert des éléments-traces du sol vers le végétal. [72]

II .7.4.Facteurs liés à la plante et aux micro-organismes du sol

II .7.4.1.Espèce végétale

Des végétaux d'espèces différentes, cultivés dans les mêmes conditions, n'absorbent pas les mêmes quantités d'éléments-traces, et ne les stockent pas dans les mêmes organes. Il semble qu'en général, les légumes contiennent plus d'éléments-traces que les plantes monocotylédones [41].

II.7.4.2.Influence de la plante sur le sol

La plante modifie la composition physico-chimique et microbienne du sol proche de la racine, en absorbant des nutriments et en excréant des produits. La racine peut ainsi libérer des sécrétions, des métalliques, des mucilages, des cellules mortes, de l'O₂ et du CO₂ dans leur environnement, ce qui a pour effet de changer le potentiel redox et de faire baisser le pH [41]. C'est pour cette raison que cette zone sous influence racinaire porte un nom spécifique : la rhizosphère. L'équilibre entre le prélèvement de cations et d'anions influence le pH de la solution de sol. Quand la quantité d'ions positifs absorbés est supérieure à celle des ions négatifs, la quantité d'H⁺ excrétés est plus importante que celle d'OH⁻, et le pH du sol diminue jusqu'à quelques millimètres de la racine [41]. Le pH peut être ainsi diminué d'une unité à 2 mm environ de la zone racinaire [69]. Les ions H⁺ excrétés peuvent, par échange, relâcher les métaux des colloïdes du sol et accroître alors leur biodisponibilité et donc leur prélèvement par la plante.

II .7.4.3.Variétés végétales et individus

Les différences de prélèvement et de répartition observées entre les espèces

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

existent de la même façon entre les variétés d'une même espèce. Par exemple la concentration en Cd des tubercules de pommes de terre cultivées dans les mêmes conditions peut varier du simple au double selon la variété [73].

II .7.4.4.Stade et âge de la plante

La quantité d'éléments prélevée diminue avec le développement de la plante [41]. La concentration dans les tissus diminue aussi, c'est ce qu'on appelle l'effet de dilution. Chez le maïs, il apparaît que le transfert de Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb et Zn vers la plante est interrompu en fin de cycle végétatif [74].

II .7.4.5.Influence des micro-organismes

La présence de carbone dans les exsudats racinaires multiplie le nombre de micro-organismes dans la rhizosphère. Ces micro-organismes influencent les flux et le cycle des éléments-traces, car ces éléments peuvent être mobilisés, complexes et/ou accumulés par les processus bactériens [46]. Les micro-organismes modifient le statut des éléments-traces autour de la racine, en minéralisant la matière organique, en complexant les éléments, en changeant le pH du sol, etc. Ils peuvent modifier la solubilité des éléments-traces et augmenter ou diminuer leur absorption par les racines.

II .7.5.Facteurs climatiques

Les facteurs externes, telles que température et lumière, influencent non seulement la croissance des plantes, mais aussi leur prélèvement d'éléments-traces. Les facteurs climatiques changent l'offre du sol en jouant sur la forme chimique des éléments et modifient la physiologie de la plante et l'activité des micro-organismes.

II.7.5.1.Lumière

Le prélèvement d'éléments-traces par les plantes tend à augmenter quand la lumière augmente [69].

II.7.5.2.Température

Le prélèvement augmente avec la température du sol, jusqu'à une température optimale dépendante de l'espèce végétale [74,41].

La température a, par ailleurs, un effet sur le sol. Elle joue sur les constantes d'équilibre des réactions qui dirigent la spéciation des éléments-traces dans le sol [75].

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

Elle a aussi un effet sur la physiologie des plantes. Par exemple, une augmentation de la température sur les feuilles de la plante provoque un surcroît de transpiration, donc une augmentation du flux de masse et, dans certains cas, le prélèvement. Elle provoque aussi la croissance de nouvelles racines. Il est bien connu que la carence en Zn sur le maïs se manifeste surtout les années à printemps froid.

L'élévation de la température racinaire de 15 °C à 20 °C entraîne un accroissement de la concentration de Cd et Ni de plantules de maïs en solution nutritive. Pour le Cd, le phénomène est particulièrement important, puisque l'augmentation de la teneur est de 40 à 65 % [74].

II .7.5.3.Humidité

Elle intervient indirectement :

- en favorisant l'activité biologique, et donc la production de substances susceptibles de mobiliser les éléments.
- ou en modifiant le potentiel d'oxydoréduction du sol (en général un excès d'humidité favorise des conditions réductrices),
- ou bien en influant sur la profondeur d'enracinement.

En années sèches, les racines descendent plus profondément dans le profil du sol, et prélèvent moins d'éléments-traces qu'en années humides si les éléments sont d'origine anthropique. A l'inverse, le prélèvement est plus important si les éléments ont une origine naturelle.

II.7.6.Facteurs liés aux caractéristiques des éléments et aux interactions entre éléments

Les macro-éléments et les éléments-traces qui possèdent des charges ioniques faibles et des rayons ioniques grands (K, Ca, Mg, Na, Rb, Fe, Sr, Ba, Pb, Cu, Zn, Mn, Co et Ni) sont plus solubles (donc plus phytodisponibles), tandis que les autres tendent à former des hydrolysats ou des complexes ioniques[41].

Les interactions entre éléments-traces sont assez complexes, et la croissance et la reproduction optimum des plantes ne nécessitent pas seulement une absorption adéquate d'éléments-traces mais ces éléments doivent également être dans les bonnes proportions [41].

II .8.Concentration normale des ETM dans les végétaux

Comme on vient de le constater, les différentes plantes ont des capacités de prélèvement des éléments-traces différentes et il est donc difficile de savoir si ce prélèvement est bas, normal ou élevé. Markert[76] a tenté de donner les

Chapitre II : Transfert sol-plante des ETM

valeurs de concentrations en métal d'une plante normale, avec les quelles on peut comparer les prélèvements d'une espèce donnée (Tableau II.4)

Elements trace	µg/g
Al	80
Cd	0,05
Cr	1,5
Co	0,2
Cu	10
Au	0,001
Fe	150
Pb	1,0
Mn	200
Hg	0,1
Mo	0,5
Ni	1,5
Ag	0,2
Zn	50

Tableau II.4 : Teneur normale en métaux dans les plantes.

Bibliographie

- [1] Hafedh, Hamza.M, A.Added, A.Frances, R.odriguez; 2007comptesRendus Geosciences, Vol. 339 (7), 493-505.
- [2] Débri A, 1991, the role of nitrification in the oxygen depletion of the river Danube. Verh .internat.verien.Limnol .P24)
- [3] Ramade F, 1981, Eléments d'écologie: écologie appliquée. 4ème edition, Paris, Ed. McGraw Hill, p 578
- [4] Leewolfer.N, Mingelgrin.U, Miller. G.C.1990. Abiotic transformations in water, sediments, and soil.ed Cheng.
- [5]Marfak.A 2003, Radiolyse gamma des Flavonoïdes .Etude de leurs radicaux issus des alcools. Thèse doctorat université limoge
- [6]TRABELSI.R, ZAÏRI.M, SMIDA.H, BEN DHIA.H 2005; Salinisation des nappes côtières, cas de la nappe nord du Sahel de Sfax, Tunisie, Comptes Rendus Géosciences, Vol.337, (5), 515-524.
- [7] MARZOUKI.L, MEDJELDI.S, AOUANI.E, AMRI.M 2005, Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement, Vol. 66 (3), 219-225.
- [8] Tremel-Schaub,A et Feixe,I; 2005 Contamination des sols Transfert des sols vers les plantes , Revue science France.
- [9] MIRAMAND.P, D.FICHET, D.BENTLEY, J.C.GUARY, FCAURANT1998 .Concentrations en métaux lourds (Cd, Cu, Pb, Zn) observées le long du gradient de salinité dans le réseau trophique pélagique de l'estuaire de la Seine ; Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science, Vol. 327 (4), 259-264
- [10] MOUSTAID.K, NASSER.B, BAUDRIMONT.I, ANANE.R, EL IDRISSEI.M, BOUZIDI.AB, CREPPYE.E.2005, Évaluation comparée de la toxicité des moules (*Mytilusgalloprovincialis*) de deux sites du littoral atlantique marocain sur des souris, Comptes Rendus Biologies, Vol. 328 (3), 281-289,

Bibliographie

- [11]HARPET.C.2003De l'anthropologie des décharges à l'évaluation interdisciplinaire des risques sanitaires, nature Sciences Sociétés, Vol.11(4), 361-370.
- [12]Citeau, L., 2008. Transfert eaux-sols-plantes de micropolluants : état des connaissances et application aux eaux de ruissellement urbaines. Rapport pour l'Agence de l'Eau Seine Normandie, INRA Ed., 103 p.
- [13]Bur, T., 2008. Impact anthropique sur les éléments traces métalliques dans les sols agricoles de Midi-Pyrénées. Implications en termes de limites de charges critiques. Thèse doctorat de l'Université de Toulouse, 373 p.
- [14]Chassin P., Baize D., Cambier Ph. &Sterckeman T., 1996. Les éléments traces métalliques et la qualité des sols : impact à moyen et à long terme. Forum « le sol un patrimoine menacé Paris (France), 297-303.
- [15]Jeannot, R., Lemièrre B., Chiron S. Augustin F. &Darmendrail D., 2000. Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. France.
- [16]Boucheseiche C., Cremille E., Pelte T. &Pojer K., 2002. Pollution toxique et écotoxicologique : notions de base. Guide technique N°7. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, Montpellier (France).
- [17]De S., Pramanik S. K., Williams A. L. &Dutta S. K., 2004. Toxicity of polychlorobiphenyls.
- [18]Barriuso E., Calvet R., Schiavon M &Soulas G., 1996.Les pesticides et les polluants organiques des sols. Transformation et dissipation. Forum le sol, un patrimoine menacé Paris (France), 279-292
- [19]Lalanne F. 2006. Etude des potentialités du lavage biologique pour le traitement d'un mélange complexe de composés volatils. Thèse de Doctorat. L'université de Pau et des Pays de l'Adour (France).

Bibliographie

- [20] Dobbins, D.C., Thornton-Manning J., Jones D.D. & Federle T.W., 1987. Mineralization potential for phenol in subsurface soils. *Journal of Environmental Quality*, 16: 54–58
- [21] Matafonova G., Shirapova G., Zimmer C., Giffhorn F., Batoev V. & Kohring G. W., 2006. Degradation of 2,4-dichlorophenol by *Bacillus* sp. isolated from an aeration pond in the Baikalsk pulp and paper mill (Russia). *International Biodeterioration and Biodegradation*, 58: 209-212
- [22] Atuanya E. I. & Chkrabarti T., 2003. Kinetics of biotransformation of 2,4-dichlorophenol using UASB-reactor. *Environmental Monitoring and Assessment*, 96: 129–141
- [23] Fava L., Orrù M. A., Crobe A., Barra Caracciolo A., Bottoni P. & Funari E., 2005. Pesticides metabolites as contaminants of ground water resources: assessment of the leaching potential treatment of endosulfan sulphate, 2,6-dichlorobenzoic acid, 3,4-dichloroaniline, 2,4-dichlorophenol and 4-chloro-2-methyl phenol. *Microchemical journal*, 79: 207-211
- [24] Barber S.A., Silberbush M., 1984. Chapter 4 :Plante morphology and nutrient uptake. *In* : Roots, nutrient, water influx and plant growth. Madison, Etats-Unis, 65-87.
- [25] Eshighi Malayri B., 1995. Décontamination des sols contenant des métaux lourds à l'aide de plantes et de microorganismes. Thèse de Doctorat. Université de Nancy1 (France).
- [26] Miquel, G., 2001. Rapport d'information n° 261. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques. Tech., 344 p.
- [27] Baize, D., 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). INRA Éditions, Paris, 410 p.
- [28] Robert, M., Juste, C. (1999). Dynamique des éléments traces de l'écosystème sol. In Club CRIN Environnement et Ministère de l'environnement. Spéciation des métaux dans le sol. Paris: CRIN

Bibliographie

- [29] Coullery P., 1997. Comportement de métaux lourds en agrosystèmes tempérés à faible taux de pollution métallique. Thèse de Doctorat Ecole Polytechnique de Lausanne, Département de Génie Rural, Suisse
- [30] William G. Hopkins 2003, Physiologie végétale, ed De Boek ,p 30-31
- [31] Adriano, D.C. 1986. Trace elements in the terrestrial environment. Springer Verlag, New York.
- [32] Alloway B.J., 1995. Heavy metals in soils. Ed Blackie Academic & Professional, London, 2 Editions, 368 p
- [33] Marschner H., 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Presse, London, 2nd Edition, 889 p.
- [34] CCME (Conseil canadien des ministres de l'environnement), 1997. Recommandations canadiennes pour la qualité des sols, mars 1997, Winnipeg, Canada.
- [35] OFEFP, 1996. Sols pollués-métaux lourds et plantes bioindicatrices. Documents environnement n° 58, Sol, Berne, Suisse
- [36] Kabata-Pendias et Pendias, 1991. Trace elements in soils and plants. 2e éd. CRC Press, Boca Raton, FL
- [37] LETEINTURIER, B 2002, Evaluation du potentiel phytocénotique des gisements cuprifères d'Afrique centro-australe en vue de la phytoremédiation des sites pollués par l'activité minière, thèse de doctorat, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- [39] Houot O., Tarallo P., 1991. Le cuivre. Les oligo-éléments en médecine et biologie. SFERETE, Lavoisier, Tec & Doc, Paris.
- [40] Ross S.M., 1995. Toxic Metals in Soil-Plant Systems. Wiley, Chichester, Royaume-Uni.
- [41] Bourrelier P et J Berthelin 1998. "Contamination des sols par les éléments traces : les risques et leur gestion." Rapport de l'Académie des sciences Ed. Lavoisier, Paris.

Bibliographie

- [42] OFEFP, 1996. Sols pollues-métaux lourds et plantes bioindicatrices. Documents Environnement n° 58, Sol, Berne, Suisse
- [43] Siberlin N., 1996. Biodisponibilité des éléments-traces dans un sol cultivé : étude du transfert dans une culture de maïs en champ et conséquences sur le rendement. Mémoire de fin d'études, IUT Louis Pasteur, Schiltigheim
- [44] Loue A., 1986. Les oligo-éléments en agriculture. SCPA, Agri-Nathan International, Paris.
- [45] Schneider A., 1989. Comportement des oligo-éléments dans le sol, mobilité et carences. *Perspectives Agricoles*, 134, 32-47
- [46] Baize D. 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols de France. Ed. INRA. Paris, 406.
- [47] Pourrut Bertrand 2008. « Implication du stress oxydatif dans la toxicité du plomb sur une plante modèle » thèse doctorat université de Toulouse
- [48] Singh RP, RD Tripathi, SK Sinha, R Maheshwari and HS Srivastava 1997. "Response of higher plants to lead contaminated environment." *Chemosphere* 34(11): 2467-2493
- [49] Seregin IV and VB Ivanov 2001. "Physiological Aspects of Cadmium and Lead Toxic Effects on Higher Plants." *Russian Journal of Plant Physiology* 48(4): 523-544.
- [50] Tomulescu I, E Radovicu, V Merca and ATuduce 2004. "Effect of Copper, Zinc and Lead and Their Combinations on the Germination Capacity of Two Cereals." *Journal of agricultural sciences* 15: 39-42
- [51] Wierzbicka, M 1998. "Lead in the apoplast of *Allium cepa* L. root tips--ultrastructural studies." *Plant Science* 133(1): 105-119
- [52] Kovalchuk I, VTitov, B Hohn and O Kovalchuk 2005. "Transcriptome profiling reveals similarities and differences in plant responses to cadmium and lead."
- [53] Gopal R et AH Rizvi 2008. "Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish." *Chemosphere* 70(9): 1539-1544.

Bibliographie

- [54] Xiong Z, F Zhao and M Li 2006. "Lead toxicity in *Brassica pekinensis* Rupr.: Effect on nitrate assimilation and growth." *Environmental Toxicology* 21(2): 147-153
- [55] Brown P.H., Welch R.M., Cary E.E., 1987. Nickel: a micronutrient essential for higher plants, *Plant Physiology* 85, 801-803
- [56] Reeves R.D., 2003. Tropical hyperaccumulators of metals and their potential for phytoextraction, *Plant and Soil* 249, 57-65.
- [57] Seregin I.V., Kozhevnikova A.D., 2006. Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants, *Russian Journal of Plant Physiology* 53, 257-277
- [58] Eskew D.L., Welch R.M., Cary E.E., 1983. Nickel: an essential micronutrient for legumes and possibly all higher plants, *Science* 222, 621-62
- [59] Gerendás J., Polacco J.C., Freyermuth S.K., Sattelmacher B. 1999. Significance of nickel for plant growth and metabolism, *Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences* 162, 241-256
- [60] Rooney C.P., Zhao F.-J., McGrath S.P., 2007. Phytotoxicity of nickel in a range of European soils: influence of soil properties, Ni solubility and speciation, *Environmental Pollution* 145, 596-605
- [61] Coïc et Coppenet, 1989. Les oligo-éléments en agriculture et élevages. Incidence sur la nutrition humaine. INRA. Paris. 109p.
- [62] Bonnard R., 1997. Définition des valeurs de constat d'impact pour le Cr. Document de travail du groupe du MATE «Sites et sols pollués / Santé publique».
- [63] Merian E., 1991. *Metals and their Compounds in the Environment, Occurrence, Analysis, and Biological Relevance*. VCH, Weinheim, Allemagne.
- [64] Claire-Emmanuelle MARCATO 2007, origine, devenir et impact du cuivre et du zinc des lisiers porcins. Rôle de la digestion anaérobie; thèse doctorat, Institut polytechnique Toulouse .
- [65] Bourbonnais G., (2007). http://ici.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/gbourbonnais/pascal/nya/botanique/powerpoint/botanique_4.ppt#15

Bibliographie

[66] Morel J.L., Leyval C., Berthelin J., 1994. Influence de l'activité rhizosphérique sur la mobilité et le prélèvement des métaux lourds. Ministère de l'Environnement, Convention de Recherche n° 91147France.

[67]Gérard MIQUEL.M (2000-2001) Rapport d'information n° 261 l'Office parlementaire d'évaluation des choix scient. tech., France .

[68]Haan de F.A.M., Visser-Reyneveld M.I., 1996. Soil Pollution and Soil Protection. International Training Centre (PHLO), Wageningen Agricultural University, Wageningen, Pays-Bas.

[69]ADEME.1990 : Connaissance et maîtrise des aspects sanitaires de l'épandage des boues

[70] Wu Q.T., 1989. Biodisponibilité du cadmium dans des systèmes sol-plante. Thèse de Doctorat, INPL

[71] Loue A., 1986. Les oligo-éléments en agriculture. SCPA, Agri-Nathan International, Paris.

[72]Leschber R., Davis R.D., L'Hermite P., 1984.Chemical methods for assessing bio-available metals in sludges and soils. CEC, Elsevier Applied Science Publishers.

[73] Prasad M.N.V., Hagemeyer J, 1999. Heavy metal stress in plants.From molecules to ecosystems.Springer. 401 p

[74]GOMEZ A., SOLDA P., LAMBROT C., WILBERT J., JUSTE C. 1992. Bilan des éléments-traces métalliques transférés dans un sol sableux après 16 années d'apports continus et connus de boues de station d'épuration et de fumier de ferme en monoculture irriguée de maïs, Conv. Min. Env. / INRA n° 89-256, 57p.

[75] Paulin V., 1995. Caractérisation d'éléments-traces dans le sol : étude du transfert dans une culture de maïs en champs. Mémoire de fin d'études, ENESAD, Dijon.

[76]Cheng.s.2003.Heavy metal in plants and phytoremediation. Environmental Science pollution research 335-340

[77] Sparks, D.L. (1998).Environmentalsoilchemistry. Academic Press, 267 p

[78] UIPP <http://www.uipp.org/>

Chapitre **III** :

Partie expérimentale

Chapitre III : Partie expérimentale

La présente étude c'est déroulée au niveau du laboratoire de chimie à l'institut de science et vie de l'université de Souk-Ahras pour la préparation des échantillons.

L'analyse et la caractérisation des échantillons c'est effectuée au niveau de laboratoire de pollution à l'université Badji Mokhtar d'Annaba.

III-1. Zone d'étude

le secteur étudié ,fait partie de la région de la ville de Guelma, est situé au cœur d'une grande région agricole à 290 m d'altitude, entourée de montagnes (Maouna, Dbeqh, Houara), cette région bénéficie d'une grande fertilité grâce notamment à la Seybouse principal oued de la région . Ce dernier traverse le bassin de Guelma d'Ouest en Est. Par ailleurs, cet Oued draine les eaux des nombreuses sources thermales de la vallée de hammam Oulad Ali au Nord de Guelma ; et d'un grand barrage qui assure un vaste périmètre d'irrigation

III.1.1 Climatologie

La région d'étude se caractérise par un climat sub-humide au centre et au Nord et semi-aride vers le Sud. Ce climat est doux et pluvieux en hiver et chaud en été. Avec une pluviométrie de 654 mm / an ;Près de 57 % de cette pluviométrie est enregistrée pendant la saison humide (Octobre –Mai).

III.1.2.Ressources hydriques

La Wilaya de Guelma dispose d'un réseau hydrographique très développé dont les principaux points d'eau sont [1].

-1. Oued Seybouse qui traverse la plaine de Guelma ; Bouchegouf sur plus de 45 Km du sud au Nord-est avec un apport total estimé à 408 Hm³ /an à la station Boudaroua. Ses principaux affluents sont: Oued Maiz ; Oued Zimba, Oued Boussoua et Oued Helia.

-2.Oued Bouhamdene qui prend naissance au niveau la commune de Bouhamdane à l'Ouest de la wilaya avec un apport de 96 Hm³ /an (Station Medjez Amar II).

-3.Oued Charef prend sa source au sud de la wilaya son apport est estimé a 107 Hm³ /an (Station Medjez Amar I).

La rencontre de ces deux oueds au niveau de Medjez Amar constitue le point de départ de l'oued Seybouse.

Chapitre III : Partie expérimentale

III.1.2.1 Périmètre d'irrigation de la plaine de Guelma-Boucheougouf

Il s'entend sur une superficie de 9250 ha subdivisées en 05 secteurs opérationnels indépendants l'un de l'autre du point de vue desserte en eau.

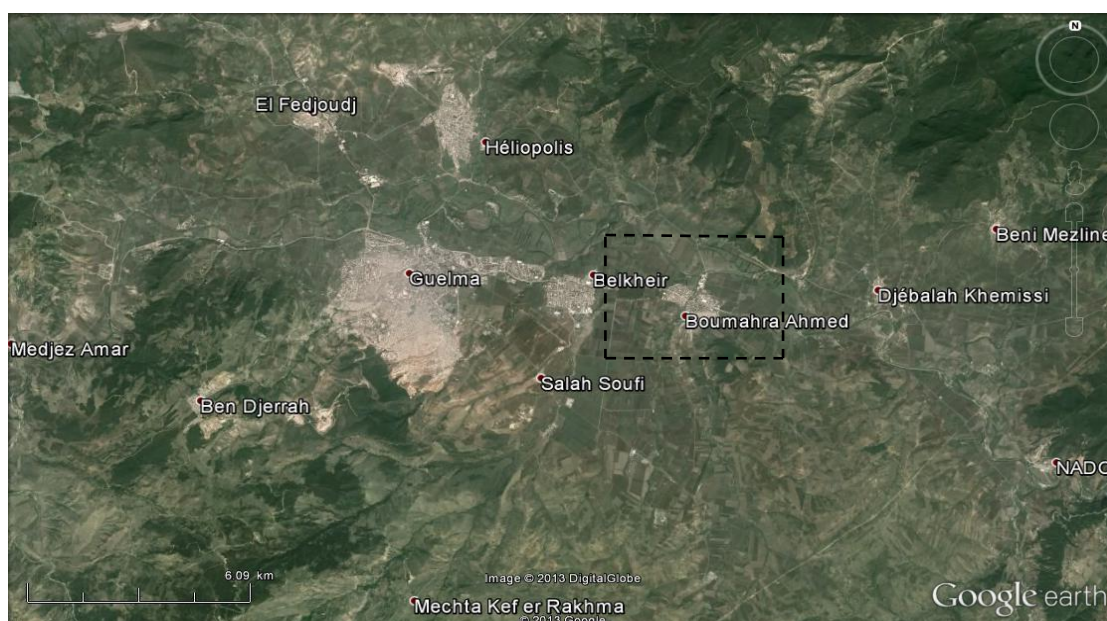
- Secteur Guelma centre 3500 ha
- Secteur Boumahra Ahmed2600 ha
- Secteur El Fedjoudj.....2355 ha
- Secteur Cherf605 ha
- Secteur Boucheougouf.....880 ha

Le périmètre est alimenté à partir du Barrage de Bouhamdene par des lâchers sur l'Oued Seybouse

Utilisation des ressources en eau non conventionnelle à partir de la STEP de Guelma; La station d'épuration existante couvre actuellement 32000M³/J d'eau épurée soit 12Hm³ /an du chef lieu de la commune. L'utilisation de cette eau recyclée rejetée au niveau d'oued Seybouse est une opportunité afin d'augmenter la superficie irrigable

III.1.3. Agriculture

La région de Guelma totalise une superficie agricole de 370.013 HA dont 187.400 HA de superficie agricole utile (SAU) ou les céréales occupent annuellement 45 % suivi par les cultures maraichères et industrielles (30%) le reste étant reparti entre les différentes espèces arboricoles.



⌋ : zone d'étude

Figure III.1: Carte de la région d'étude.

Chapitre III : Partie expérimentale

III.1.4. Industrie

Notre région d'étude a subie durant des années la pollution minérale de plusieurs unités industrielles parmi les quelles on site :

- CYCMA : Complexe de fabrication cycles et cyclomoteurs. (rejet d'eau chargée en métaux lourds)
- Unité de céramique et vaisselle (ETER)
- plusieurs unités de fabrication de carreaux (carrelage) (rejet d'eau minéralisée)
- plusieurs d'autres unités d'agro-alimentaire

III.2. Choix de l'espèce végétale

Le choix des espèces végétales c'est porté sur des cultures les plus consommées dans la région. Il s'agit de la tomate et courgette.

Une tomate, de variété Rio grande a été choisie comme indicatrice de la pollution et des risques de toxicité par les métaux lourds par accumulation dans les feuilles les racines ou les fruits destinés à la consommation humaine. Le choix de l'espèce c'est porté sur la tomate industriel vu la grande consommation de celle-ci en été et son utilisation dans l'industrie de fabrication de tomate conserve.

Le fruit de la courgette (Cucurbitapepo) est la deuxième espèce végétale choisie pour notre étude.

III.3. Choix du terrain

L'espèce de tomate qui fait l'objet de notre étude provient de deux parcelles de terrains qui s'inscrivent dans la plaine alluviale de la wilaya de Guelma, (La plaine alluviale de Guelma est un domaine où se développe une agriculture intensive à base de cultures maraîchères.)

Située à la localité de Boumahra Ahmed et Djebalahkhimissi, à 10 et à 20Km de la wilaya de Guelma.

La première parcelle et au bord de la route qui relie la commune de Boumahraahmed à Djebalahkhimissi sur la rive de oued Seybouse par lequel elle est irriguée.

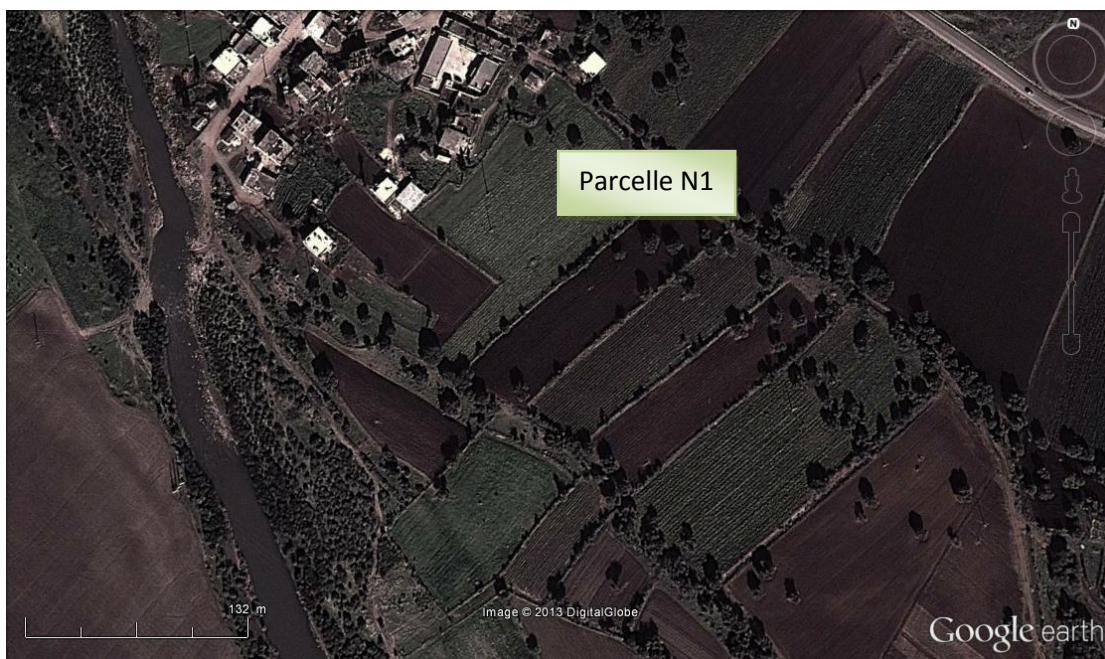


Figure III.2 : Carte d'échantillonnage parcelle N°1

La deuxième parcelle est située à DjébalahKhemissi, irriguée à l'eau du robinet, le champ de tomate est entouré d'habitations.



Figure III.3 : Carte d'échantillonnage parcelle N°2

Les fruits de courgette proviennent d'un champ à proximité de la route nationale N°20 à 3 Km de la commune de Boumahra-Ahmed. Un champ situé entre une parcelle de tomate et une parcelle de blé (Figure III.3), initialement destiné à une culture de tomate. Pour des raisons propres à l'exploitant la culture de tomate a été remplacée par une culture de courgette.



Figure III.4 : Carte d'échantillonnage parcelle N°3 (courgette)

III.4 .La récolte

La tomate est récoltée après trois mois de culture et la courgette après deux mois, soit à la maturité des fruits.

500 g des échantillons de culture (fruits, racines et feuilles) prélevés de chaque parcelle puis mis dans des sachets et conservés à 4°C.

III.5. Préparation des échantillons

Les échantillons ont été séchés à 60 °C pendant une journée puis broyés et tamisés sur un tamis en nylon.

Pour la minéralisation et le dosage on a utilisé la méthode de Tauzin et Juste [2] qui consiste à mettre 1 à 2 g d'échantillon (feuilles, fruits ou racines) broyé dans une capsule en porcelaine et calciné à 450°C dans un four à moufle de type Nabertherm pendant quatre heures. Les cendres obtenues sont minéralisées par l'eau régale (25 % HNO₃ et 75 % HCl), dans un bécher puis ramenées à sec jusqu'à décoloration du minéralisât sur un bain de sable. Le résidu est redissout dans 10 ml d'HCl 5 %, puis filtré sur papier filtre, complété à 20 ml avec HCl 5 %.

Les éléments métalliques ont été ensuite dosés par spectrométrie d'absorption atomique à flamme au Laboratoire de l'Université BADJI Mokhtar – Annaba

Chapitre III : Partie expérimentale

III.6. Mesure du pH

La mesure du pH est essentielle pour l'étude du transfert des éléments métalliques du sol vers la plante pour cela on a effectué deux mesures de pH (eau et sol)

III.6.1. pH de l'eau

Le pH de l'eau est mesuré in-situ par un pH-mètre portable.

III.6.2. pH du sol

Le pH indique la concentration en ions H^+ présents dans le sol, il est d'une grande importance pour la fertilité particulièrement pour sa capacité à mettre des substances nutritives à la disposition des plantes nourricières.

III. 6.3. Mode opératoire

La mesure du pH a été faite conformément à la norme ISO 10390:2005[17]

Les échantillons sont séchés à l'air ou dans une étuve ventilée à une température inférieure à $40^{\circ}C$. Ils sont alors émiettés et tamisés au travers d'un tamis de 2 mm d'ouverture de mailles.

- On prélève une quantité d'échantillon équivalente à 5 ml et représentative de l'échantillon ;
- On transfère ce volume dans une bouteille d'échantillonnage et ajoute 5 fois son volume de la solution de KCl 1M ;
- On agite avec un agitateur mécanique pendant 10 minutes à 16 tours/mn.
- On laisse reposer au moins 2 heures à température ambiante.
- On étalonne le pH mètre et on mesure le pH

III.7. La technique d'analyse par spectroscopie atomique :

III.7.1. Introduction

La spectrométrie d'absorption atomique AAS constitue des outils privilégiés d'analyse d'échantillons liquides, soit prélevés tels quels. (milieu aqueux). soit obtenus après extraction spécifique des matériaux solides (analyse des roches, sédiments, sol végétaux).

Chapitre III : Partie expérimentale

L'appareil utilisé dans notre cas est un spectrophotomètre d'absorption atomique type DR5000 et de marque PERKINELMER. ACK.

III.7.2. Principe

La spectrométrie AAS consiste à vaporiser l'échantillon liquide et à l'aide d'une flamme. En mode flamme, l'équipement peut être utilisé en spectrométrie d'absorption et d'émission. La flamme est dirigée vers une lumière émise par une lampe appropriée émettant les longueurs d'onde caractéristiques de l'élément recherché. En traversant la flamme, les ondes lumineuses, dont les longueurs d'onde correspondent à l'élément dosé sont absorbées par les ions existants présents dans la flamme. L'absorption est mesurée à l'aide d'un prisme dispersif et d'une cellule photoélectrique : elle est directement proportionnelle à la concentration de l'élément.

Lorsque les atomes d'un élément ont été détectés, leur retour à l'état fondamental s'accompagne de l'émission de lumière d'une fréquence F bien définie et propre à cet élément dispersé dans une flamme possédant la propriété d'absorber tout rayonnement de même fréquence F . Il en résulte une absorption du rayonnement incident liée à la concentration de l'élément considéré.

L'absorption d'un photon de fréquence ν par un atome A n'est possible que si la différence d'énergie entre le niveau initial E_0 et le niveau E_i après absorption correspond à une transition entre deux niveaux énergétiques de l'atome A (norme AFNOR) équation (II.1).

Soit :

$$\nu = (E_i - E_0) / h \quad (\text{II.1}).$$

h : la constante de Planck

Par suite un atome, ne peut absorber que des radiations de fréquence bien déterminée, qu'il est en outre capable d'émettre. L'absorption se fait à partir du niveau inférieur de la transition correspondante à l'énergie $h \nu$. On choisira fréquemment une transition dont le niveau inférieur est le niveau fondamental ; celui-ci correspond en général au plus peuplé. C'est cette faculté d'adsorption, pour les atomes, de l'énergie apportée par des photons de fréquence bien déterminée qui constitue le principe de base de la méthode de spectrométrie d'absorption atomique.

L'intensité de l'absorption dépend directement du nombre de particules absorbant la lumière selon la loi de Beer Lambert équation (II.2), selon

Chapitre III : Partie expérimentale

laquelle l'absorbance est proportionnelle au coefficient d'absorption spécifique A, au trajet optique B et à la concentration C.

$$\log I_0 / I = A \times B \times C \quad (II.2)$$

Avec :

I : intensité après absorption par les atomes

I₀ : intensité initiale de la source lumineuse

La gamme de dosage est le domaine dans lequel la droite d'étalonnage est pratiquement une droite. Il est limité pour les faibles concentrations par la limite de détection et pour les fortes concentrations par l'erreur sur la fidélité : à une très forte variation de la concentration correspond une faible variation de l'absorbance (Perkin Elmer).

La gamme de dosage est généralement donnée par le constructeur. Elle dépend de la raie de dosage utilisée. La source de mesures pour l'absorption atomique la plus courante est la lampe à cathode creuse. Elle consiste en une anode de tungstène et une cathode cylindrique sise dans un tube en verre contenant un gaz inerte, comme l'argon. La cathode est composée de l'élément à analyser

III.8. Appareillages

III.8.1. Matériels courant de laboratoire

Toute la verrerie est très soigneusement lavée à l'acide nitrique environ 6 N et rincé à l'eau distillée.

III.8.2. Absorption atomique :

L'absorption atomique utilisée est de provenance Perkin Elmer, elle est équipé des lampes à cathodes creuses correspondant aux éléments à doser, d'une lampe permettant la correction de l'absorption non spécifique et d'un ensemble «nébuliseur - brûleur » acétylène air.

Chapitre III : Partie expérimentale

III.9. Résultats et discussion

III.9.1. pH de l'eau

Le pH de l'eau d'irrigation a été estimée in-situ ; on enregistre une eau neutre avec un pH de 7.5 pour l'eau du robinet et une eau d'Oued légèrement basique de pH 8,73.

III.9.2. pH du sol

Les trois prélèvements du sol ont indiqués un sol légèrement basique

(tableau III- 2).

	pH
P1	8.2
P2	7.9
P3	8.5

(P : parcelle) Tableau III- 1 : pH du sol

III.9.3. Résultats de la bioaccumulation des éléments métallique dans la tomate

Elément Métallique	Concentration des cultures en (µg/g)						Seuil de Toxicité [3] (Teneurs OMS (µg/g))
	Tomate P1			Tomate P2			
	Racine	Feuillet	Fruit	Racine	Feuillet	Fruit	
Cu	29,9	9.2	15.7	13	4.6	12	15

Chapitre III : Partie expérimentale

Zn	20	8.5	35	8	3.3	10	17
Ni	6,9	1,4	8.2	5.8	0.2	6.3	8
Cr	281	8.9	2,5	0.5	0.2	nd	(0.1)
Fe	200	100	108	300	90	550	500

nd : non détecté

Tableau III-2: Concentration des éléments métalliques (en $\mu\text{g/g}$) des cultures Prélevés

Les résultats révèlent des teneurs parfois élevées selon la partie du végétal et l'élément considéré. En effet, certains éléments métalliques sont présents à des concentrations supérieures à la limite admissible, c'est le cas du zinc du nickel du chrome et du cuivre.

Pour la tomate cultivée dans la parcelle P2 et irriguée avec l'eau du robinet on constate qu'à l'exception du fer et du cuivre pour les racines toutes les teneurs en élément métallique sont dans les normes et largement inférieur à celles de la parcelle P1.

III.9.3.1. Teneur en cuivre

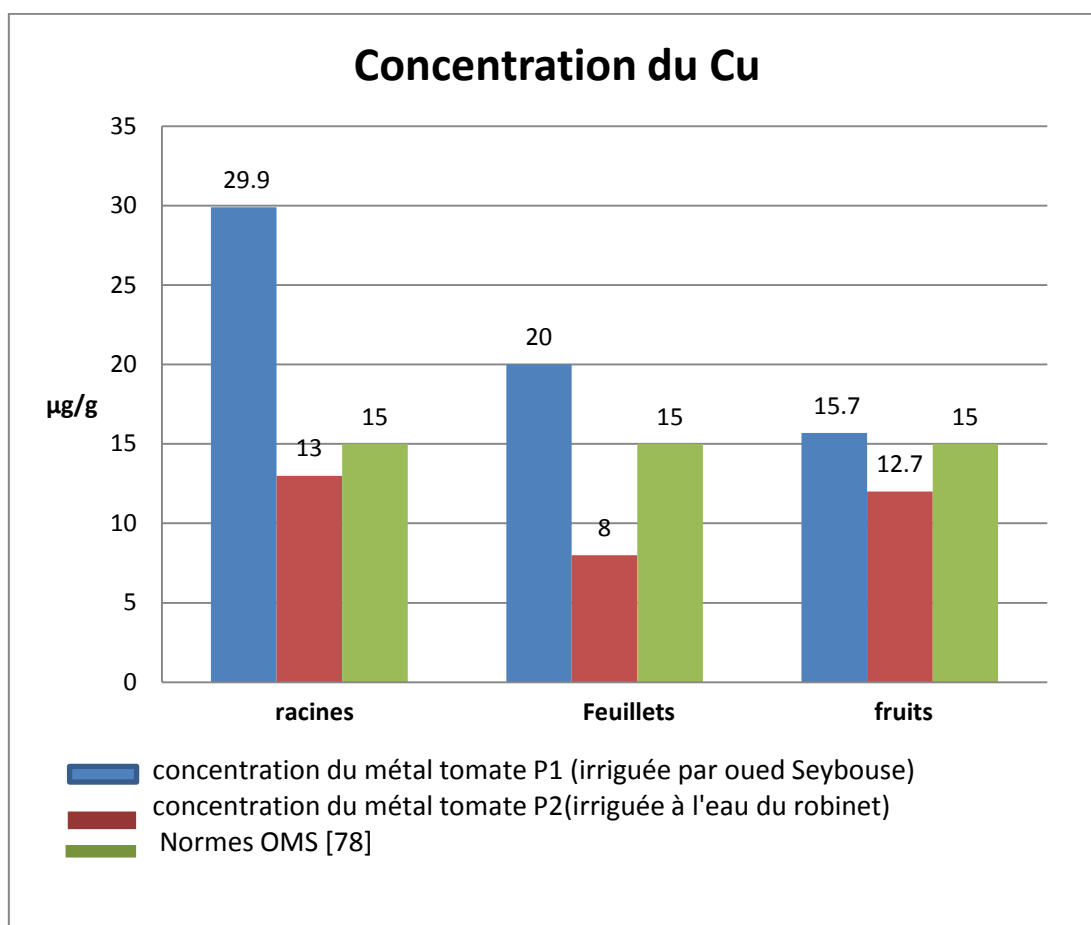


Figure III-5 : Comparaison de la teneur en cuivre entre les deux échantillons de tomates

III.9.3.2. Teneur en zinc

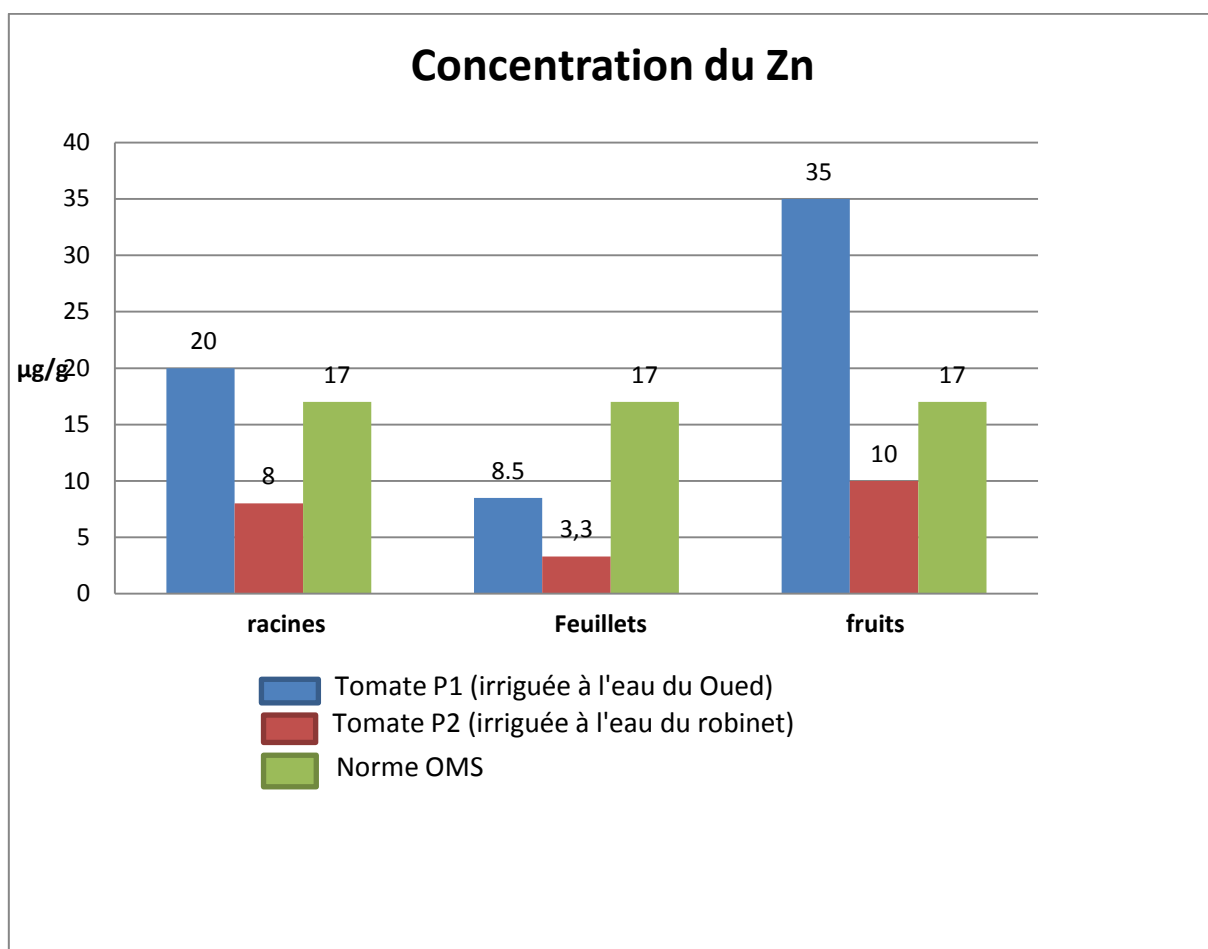


Figure III-6 : Comparaison de la teneur en zinc entre les deux échantillons de tomates

III-9.3.3. Teneur en chrome

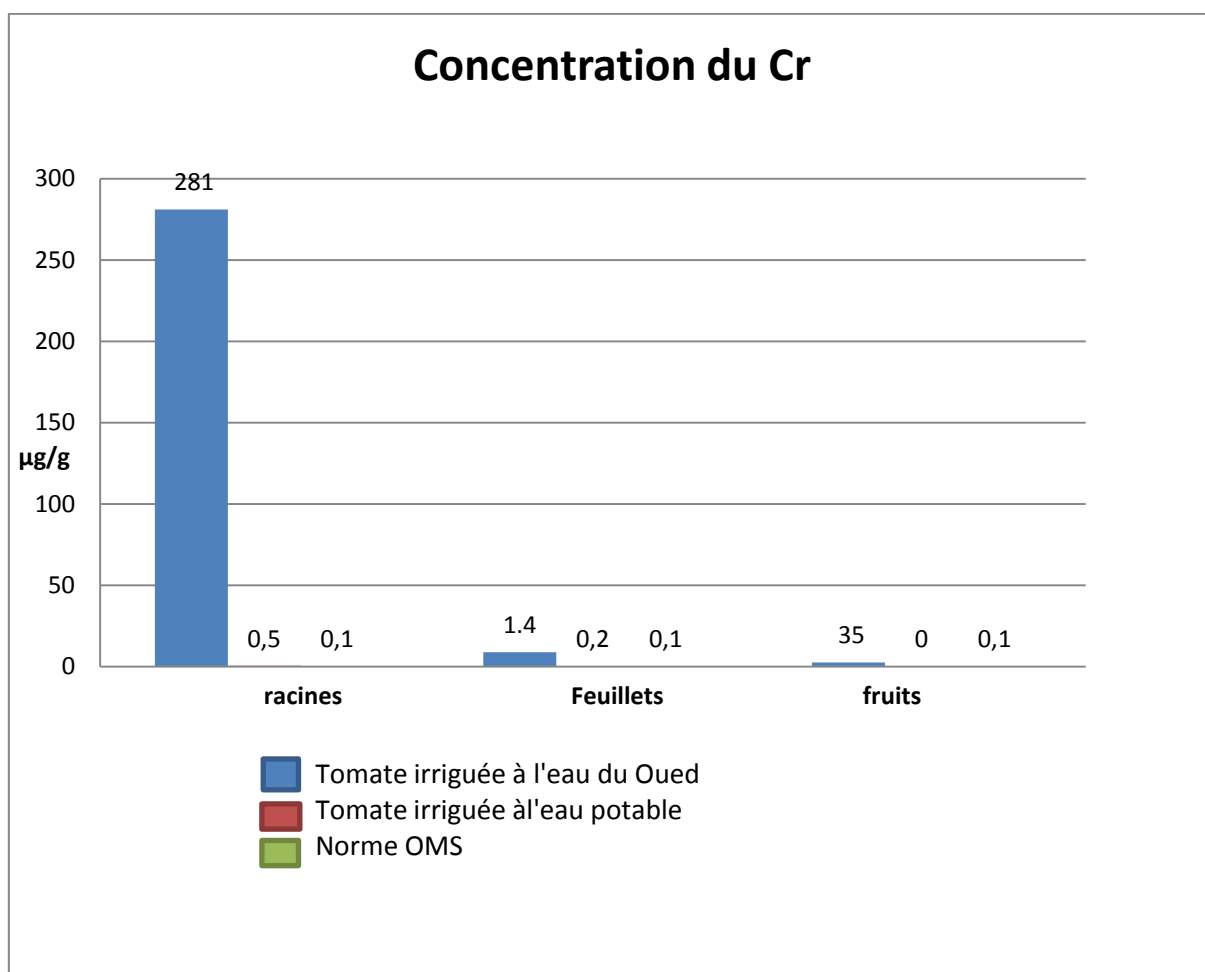


Figure III-7 : Comparaison de la teneur en chrome entre les deux échantillons de tomates

III.9.3.4. Teneur en Nickel

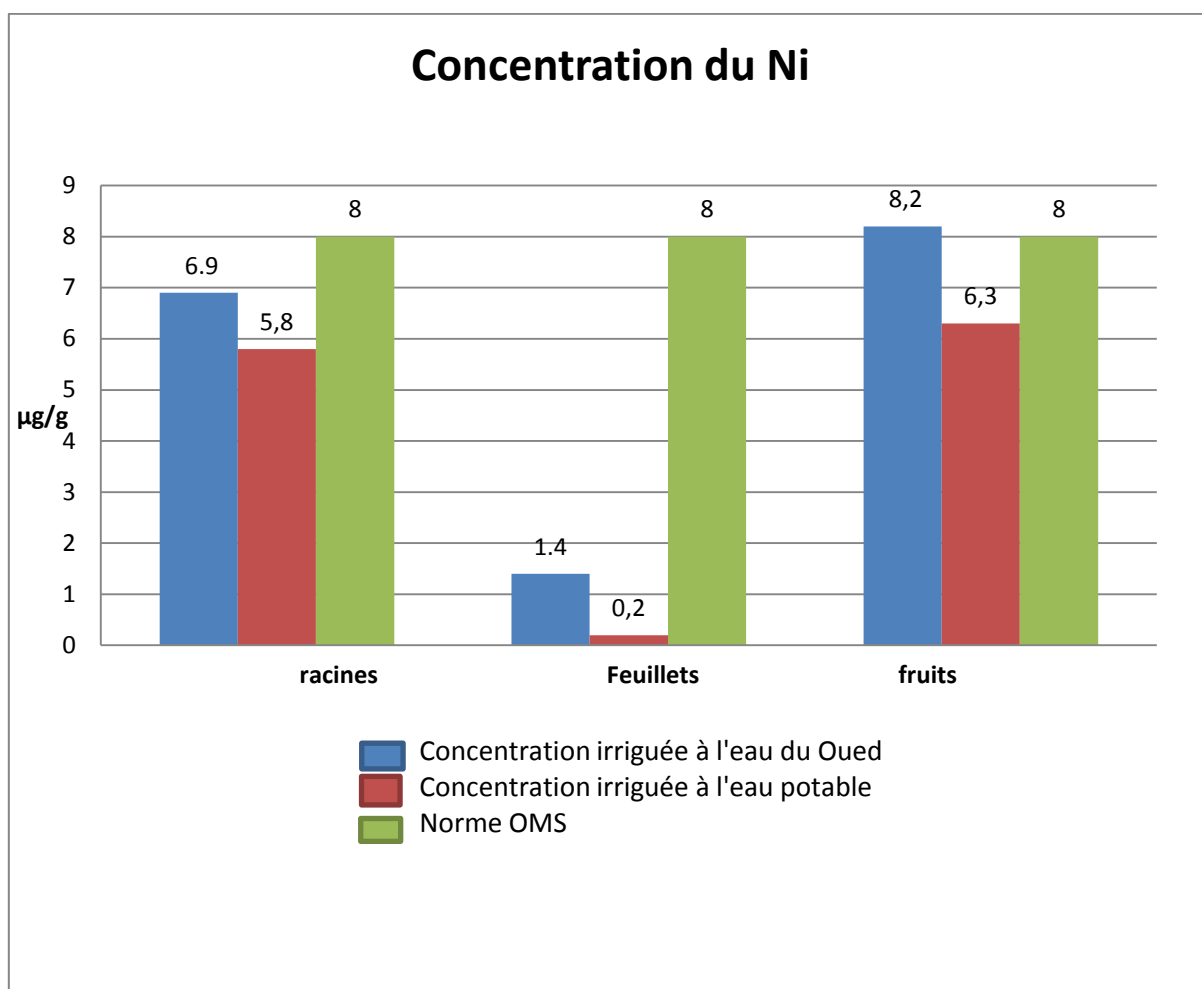


Figure III-8: Comparaison de la teneur en Nickel entre les deux échantillons de tomates

III.9.3.5. Teneur en Fer

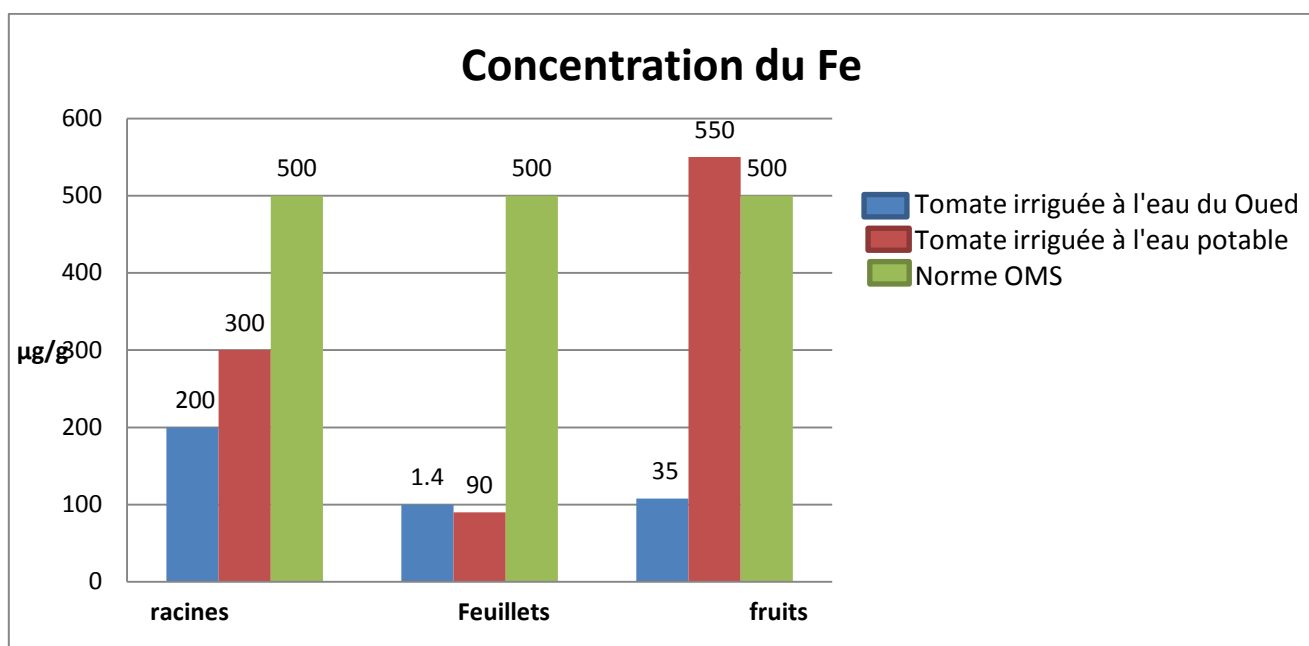


Figure III-9 : Comparaison de la teneur en Fer entre les deux échantillons de tomates

Chapitre III : Partie expérimentale

III.9.4. Résultats de la bioaccumulation des éléments métallique dans la courgette

Elément métallique	Cu	Zn	Ni	Cr	Fe
Teneur ($\mu\text{g/g}$)	12	52	18	105	590
Seuil de toxicité OMS	15	17	8	0.1	500

Tableau III-4: Concentration des ETM (en $\mu\text{g/g}$) dans la courgette.

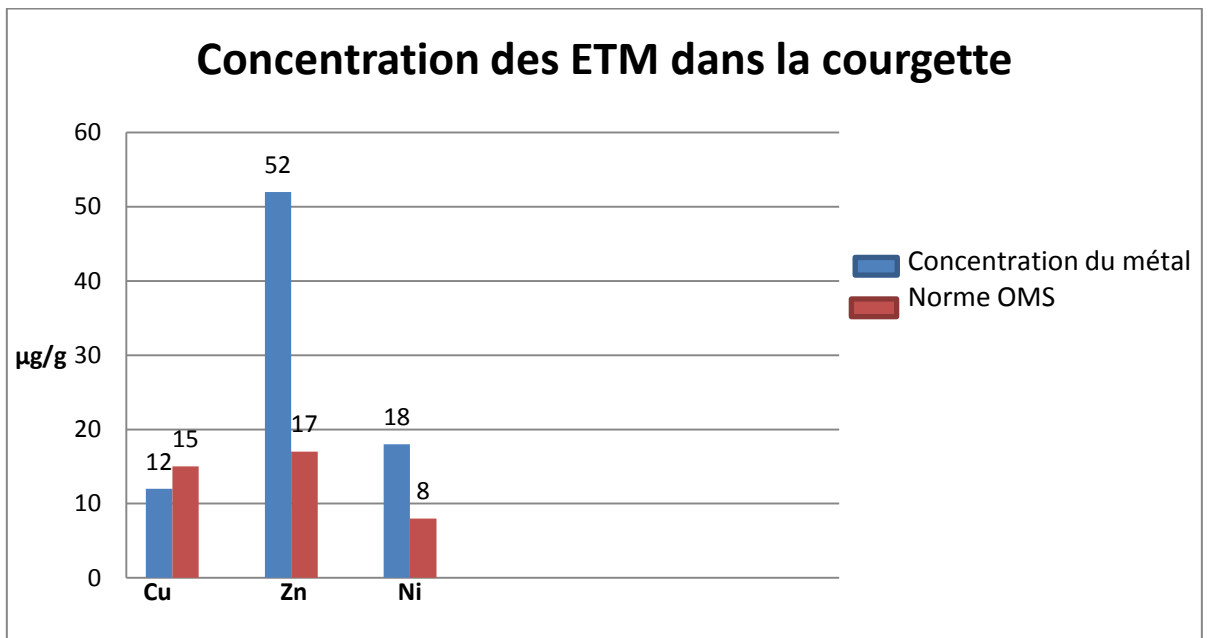


Figure III.10 : Concentration des ETM dans la courgette.

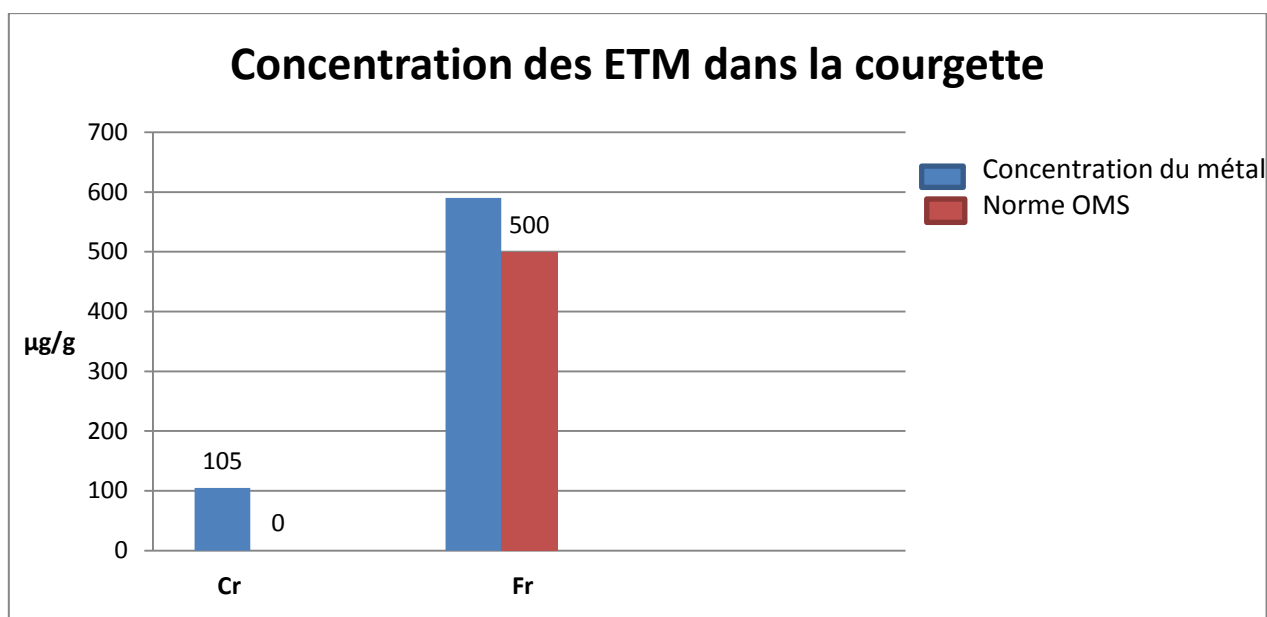


Figure III.11 : Concentration des ETM dans la courgette.

L'échantillon de courgette prélevé et analysé démontre une forte concentration en éléments dosés ; concentration qui dépasse les normes OMS excepté pour le cuivre.

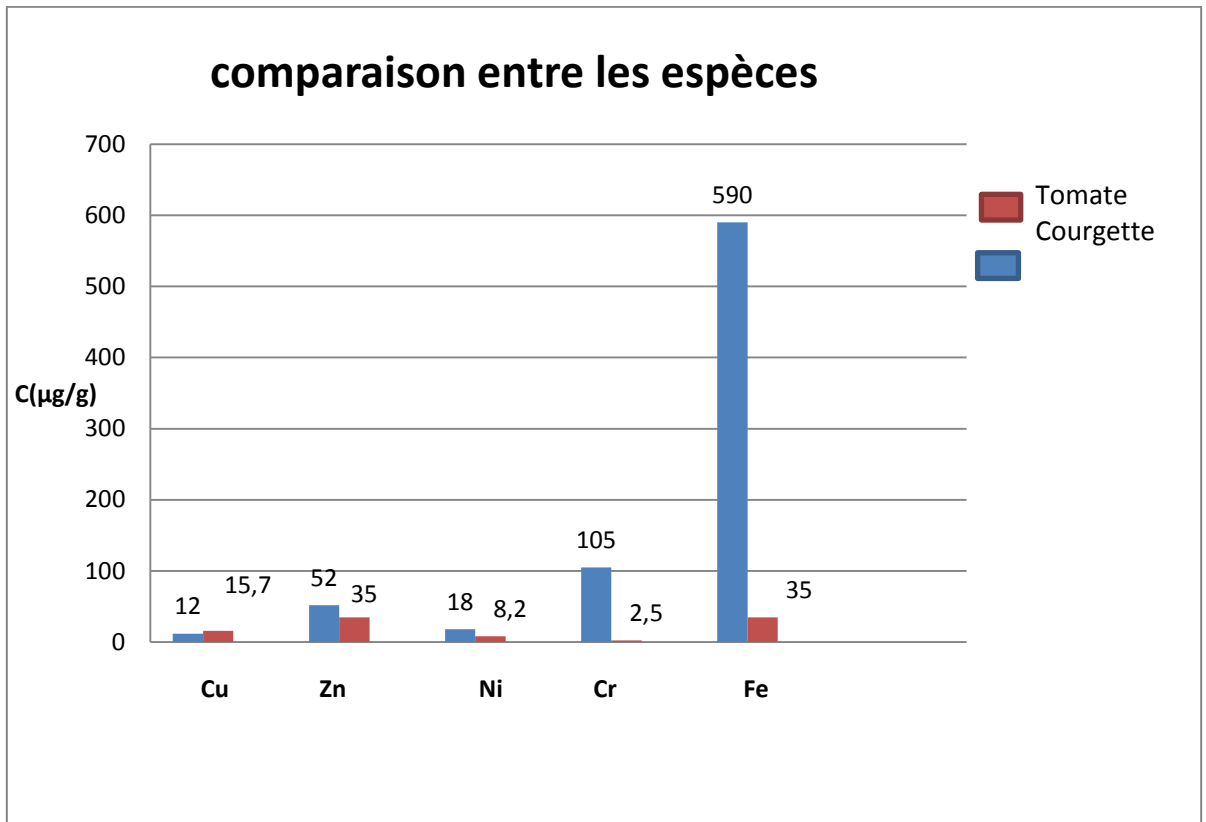


Figure III-12 Comparaison des concentrations des ETM dans les deux espèces végétales (tomate, courgette)

III.9.5. Transfert et accumulation des métaux dans les tissus des plantes

Le *coefficient de transport* ou de translocation (*CT*). Il s'agit du rapport entre les teneurs de métaux dans la partie aérienne et celle dans les racines. Ce coefficient montre le mécanisme de mobilité des métaux au sein de la plante [4]. Si le $CT > 1$, l'accumulation des métaux se fait essentiellement dans la partie aérienne.

$$CT = T_{\text{partie aérienne}} / T_{\text{racine}} \quad (\text{III-2})$$

Chapitre III : Partie expérimentale

	Cu	Zn	Ni	Cr	Fe
Tomate P1	0.30	1.75	1.18	0.0089	0.54
Tomate P2	0.92	1.25	1.08	0	1.66

Tableau III-5 : Coefficient de transfert dans la tomate

III.9.2. Discussion

La solubilité d'un élément-trace dépend tout d'abord du pH. Un pH bas augmente généralement la phytodisponibilité des éléments-traces.

Le pH neutre à faiblement basique de l'eau d'irrigation et faiblement à moyennement basique du sol limite la mobilité des métaux et favorise leur rétention par les particules du sol [5].

Les eaux d'irrigation de la présente étude sont neutres cette eau d'irrigation n'influe pas sur le pH neutre du sol ce qui est en faveur de la rétention des métaux étudiés par les sols agricoles et ça au niveau des trois sites.

Cas du cuivre

La solubilité du Cu est moins affectée par le pH que celle des autres éléments ; D'un cote le Cu est un métal qui a tendance à être plus soluble en milieu acide, et de l'autre il est complexé par les matières organiques solubles pour des pH supérieurs à 6,5 [6].

D'après l'histogramme de la Figure III-5 on remarque nettement que la concentration en cuivre dans la tomate irriguée à l'eau d'oued Seybouse est plus élevée à celle de la tomate de la parcelle P2 (irriguée à l'eau du robinet) dans les trois parties de la plante et qu'elle dépasse le seuil de toxicité indiqué par l'OMS; concentration qui ne représente pas un danger pour la santé humaine et animale car Le Cu semble poser plus de problèmes de carence chez les végétaux, le bétail et l'homme, que de toxicité. Les manifestations pathologiques chez l'homme sont plutôt liées a une carence en Cu qui entraine anémie résistante au traitement par le Fe, etc. [7].

La concentration en cuivre dans les trois parties de la plante est sous le seuil de toxicité pour la tomate de la parcelle P2.

Chapitre III : Partie expérimentale

On remarque aussi que le cuivre s'accumule dans les racines. Ce qui confirme que Les racines ont en effet une forte capacité à immobiliser le cuivre, au niveau des parois cellulaires.

Des études faites par [8] ont montré que le cuivre était dans un premier temps accumulé au niveau des racines, puis, après 14 semaines de culture, l'élément était mobilisé vers les parties aériennes.

Cette augmentation de concentration selon [9] est due à l'abondance du cuivre dans les boues des STEP et la forte utilisation de pesticide (sulfate de cuivre).

Cas du Zinc

Selon [10] Le transfert du Zn est principalement contrôlé par le pH. Le transfert du zinc du sol vers la plante est faible pour un pH neutre à alcalin [16].

Selon l'histogramme de la figure III-6 La concentration en zinc est plus élevée dans la tomate P1 que celle de la tomate P2 et ça dans les différentes parties de la plante et elle est 2 fois supérieure dans le fruit ($35\mu\text{g/g}$) au seuil de toxicité établie par l'OMS. On constate que la plante de tomate accumule le zinc dans les fruits.

L'accumulation du zinc est faible dans la tomate irriguée par l'eau du robinet et très élevée dépassant la norme OMS ($17\mu\text{g/g}$) dans les deux espèces (tomate, courgette) irriguées par les eaux de Oued Seybouse, cette concentration est expliquée par la présence du zinc dans l'argile et particulièrement la Kaolinite [10]. dont la région possède un grand gisement et il est aussi utilisé dans les revêtements au niveau de la manufacture des cycles et motocycles de la région ce qui démontre aussi la pollution des eaux de Oued Seybouse par ce dernier.

Cas du chrome

Le pH de notre sol est neutre à basique et Les études ont montrées que le Cr dans un sol neutre ou basique sera plus phytodisponible que dans un sol acide [11]

D'après l'histogramme figure (III-7 et III-8) l'accumulation du chrome dans les deux espèces tomate (P1) $281\mu\text{g/g}$ et $2.5\mu\text{g/g}$ racines et fruits respectivement ; et courgette $105\mu\text{g/g}$ et son absence dans les fruits de la tomate (P2), (des valeurs qui dépassent les teneurs naturelles trouvées chez les végétaux 0.1 ppm). Ces teneur démontre l'abondance du chrome dans le

Chapitre III : Partie expérimentale

sol des deux parcelles irriguées à l'eau du Oued , Cette abondance au sol et une accumulation qui s'est faite au fil des années et une suite évidente de la pollution du sol et des eaux d'irrigation par ce dernier qui trouve son origine selon [12] dans les pratiques culturales basées sur l'utilisation du fumier qui augmente l'apport en chrome dans le sol. Et dans les rejets de l'unité de chromage du complexe de fabrication cycle et cyclomoteur.

Cas du nickel

Pour le nickel, on note une concentration non négligeable dans les fruits des trois espèces tomate P1, P2 et courgette $8.2\mu\text{g/g}$, $6.3\mu\text{g/g}$ et $18\mu\text{g/g}$ respectivement car selon [13] les légumineuses ont tendance à plus accumuler le Ni que les autres familles végétales comestibles. Les teneurs en nickel rencontrées dans les différents organes de la tomate restent inférieures aux valeurs extrêmes 8ppm ; et selon l'histogramme de comparaison (figure III-12) on constate que la courgette accumule plus le nickel que la tomate. Dans notre zone d'étude le nickel trouve son origine dans les rejets des industries de céramique et de revêtement de la région. Des études ont montrées que Les effets toxiques du Ni sur le maïs se traduisent par un ralentissement de la croissance des racines et par une diminution du nombre de grains par épi, ce qui implique une diminution significative de la production du maïs [18].

Cas du fer

D'après l'histogramme III-9 on remarque que la teneur en fer pour la tomate P1 est dans les normes pour les trois parties de la plante.

La teneur en fer dans les fruits de la tomate P2 ($550\mu\text{g/g}$) dépasse de loin celle de la tomate P1 ($35\mu\text{g/g}$) et elle est légèrement supérieure aux normes OMS. Cette concentration élevée peut être expliquée par l'irrigation de cette parcelle par l'eau du robinet après stockage dans des bassins métalliques rouillés ce qui influe sur la qualité de l'eau d'irrigation est sur la plante en elle-même. On constate aussi que la courgette et un végétaux bioaccumulateur par rapport à la tomate pour cet élément.

L'accumulation du Fer dans les trois échantillons trouve son origine dans la nature du substrat lui-même. En effet, le fer constitue 5% de la croûte terrestre, il est libéré à partir des roches et se trouve plus ou moins soluble et facilement mobilisable [12] .et concernant notre zone d'étude les oxydes de fer sont fréquents dans les dépôts évaporitiques du bassin de Guelma [14].

Les éléments analysés montrant les variations des teneurs les plus importantes sont le Zinc ; nickel et le fer dont les teneurs varient du simple au double et plus encore. D'une manière générale, tous les échantillons de

Chapitre III : Partie expérimentale

tomate irrigués par oued Seybouse montrent des teneurs en métaux plus élevées que les échantillons de tomate de la parcelle P2.

L'accumulation des éléments métalliques dépendants particulièrement de la physiologie de la plante et de l'organe considéré : fruit, racine ou feuille [5]. Le point le plus marquant de ces analyses est les teneurs mesurées dans la courgette. Les concentrations moyennes dans cette culture montrent que ce matériel est un grand accumulateur de plusieurs métaux lourds.

Son pouvoir accumulateur en chrome (105 µg/g) et en fer (590 µg/g) dépasse de loin celle de la tomate et le seuil de toxicité indiqué par OMS [3].

Selon les teneurs, on peut ainsi classer les métaux dans l'ordre décroissant d'absorption suivant :

Partie aérienne (fruits tomate P1) Fe >> Zn > Cu > Ni > Cr

Racine (tomate P1) Fe >Cr > Cu > Zn > Ni

Courgette Fe > Cr >Zn > Ni > Cu

En comparant les teneurs enregistrées pour la même plante entre les deux parcelles, on constate que les teneurs sont très différentes. On peut ainsi 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. [15]

La détermination des coefficients de transfert des métaux permet de constater le niveau d'accumulation des métaux dans les deux compartiments de la plante [15]. Dans notre étude, On constate que Zn, Ni et le Fe sont les éléments s'accumulant le plus dans le tissu des parties aériennes de la tomate. Le reste des éléments montre des CT < à 1 témoignant d'une faible migration vers la partie aérienne malgré leur forte accumulation dans les racines.

Pour la tomate P1 on remarque que le Fe reste accumulé dans les racines et ne migre pas vers la partie aérienne on déduit que y'a d'autre facteurs qui entre en jeux comme le ph et la composition du sol.

Chapitre III : Partie expérimentale

III.10. Conclusion

Depuis des décennies ; les terres agricoles de la région de Guelma sont irriguées par l'eau d'Oued Seybouse une eau potentiellement polluée par des métaux lourds selon des études faites ultérieurement [10]. Cette étude avait donc pour objet d'évaluer l'impact de cette pollution sur les plantes cultivées en l'occurrence le transfert des éléments métalliques du sol vers la plante. Trois sites ont été sélectionnés qui diffèrent par l'eau utilisée pour l'irrigation et l'espèce végétale étudiée.

L'étude de la contamination métallique des espèces végétales nous a permis d'évaluer le degré de contamination métallique de cet écosystème. Les résultats obtenus confirment que la zone d'Oued Seybouse de la région de Guelma présentant une pollution métallique. Les espèces végétales étudiées montrent des dépassements pour certains éléments métalliques, particulièrement le nickel, le chrome et le fer.

Toutefois, les cultures végétales présentent des affinités différentes vis-à-vis d'un élément métallique donné, affinité pour laquelle il convient de considérer aussi bien les effets singuliers que les interactions entre les différents facteurs influençant la biodisponibilité des éléments métalliques dont la physiologie de la culture elle-même.

Au vu de ces résultats, il paraît donc que la protection de la végétation et de la santé humaine et animale contre la pollution par les éléments métalliques de cette région à caractère agricole nécessite un plan de protection des eaux d'Oued Seybouse contre les rejets anarchiques des effluents industriels de la région. Et planifier un projet de développement prenant en considération les pratiques culturelles.

Il ressort de cette étude que les rejets industriels et domestiques en plus des pratiques agricoles inappropriées peuvent être les principales causes de cette pollution métallique de notre zone étude.

Bibliographie

- [1] LADLANI. I. 2007 Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba» mémoire magister université de BATNA
- [2] Tauzin C., Juste C. 1986- Effet de l'application à long terme de diverses matières fertilisantes sur l'enrichissement en métaux lourds des parcelles. Rapport du contrat 4084/93. Ministère de l'environnement, France, 1986
- [3] Heller R., Esnault R. et Lance C. (1998). Physiologie végétale, 1. Nutrition - 6ème édition de l'Abrégé. DUNOD, Paris, 323 p.
- [4] Ortiz O., Alcaniz J.M. (2006), Bioaccumulation of heavy metals in *Dactylis glomerata* L. growing in a calcareous soil amended with sewage sludge. *Bioresource Technology* 97, 545–552 P
- [5] Coïc et Coppenet, (1989). Les oligo-éléments en agricultures et élevages. Incidence sur la nutrition humaine. INRA. Paris. 109p.
- [6] Barber S.A., Silberbush M., 1984. Plante morphology and nutrient uptake. *In* : Roots, nutrient, water influx and plant growth. Madison, Etats-Unis, 65-87.
- [7] Baize D. 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols de France. Ed. INRA. Paris, 406.
- [8] Chaignon V., 2001. Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées. Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse de doctorat, 167 p.
- [9] Kassaoui H., Lebki M., Lebki A., Rifi A., Badoc A., Douira A. (2007) Bioaccumulation de métaux lourds chez la tomate et la laitue fertilisées par les boues d'une station d'épuration. Manuscrit université Ibn Tofail Maroc.
- [10] [Djabri L.](#), [Souag M.](#) pollution de l'Oued SEYBOUSE par les métaux lourds : cas de zinc.
- [11] Bonnard R., 1997. Définition des valeurs de constat d'impact pour le Cr. Document de travail du groupe du MATE « Sites et sols pollués / Santé publique ».
- [12] Gomez A., Solda P., Lambrot C., Wilbert J., Juste C. 1992. Bilan des éléments-traces métalliques transférés dans un sol sableux après 16 années d'apports continus et connus de boues de station d'épuration et de fumier de ferme en monoculture de maïs. Ministère de l'Environnement, Convention de Recherche n° 89-256

Bibliographie

- [13] Tremel A., Mench M., 1997. Le thallium dans les sols et les végétaux supérieurs, II. Le thallium dans les végétaux supérieurs. *Agronomie*, 17, 261-269.
- [14] Bokrouh. F. Etude géologique des dépôts évaporitiques du bassin de Guelma
Mémoire pour l'obtention du diplôme de magistère en géologie Université Mentouri de Constantine
- [15] Belaid. N., 2010. Thèse doctorat Evaluation des impacts de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les plantes et les sols du périmètre irrigué d'El Hajeb-Sfax: salinisation, accumulation et phytoabsorption des éléments métalliques.
- [16] Leschber R., Davis R.D., L'Hermite P., 1984. Chemical methods for assessing bio-available metals in sludges and soils. CEC, Elsevier Applied Science Publishers.
- [17] International organization of standardization, soil quality, Determination of PH. Geneva Suisse.
- [18] Siberlin. N. 1996. Biodisponibilité des éléments traces dans un sol cultivé .cas