

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Etude des éléments traces métalliques persistants dans les boues des stations d'épuration a boues activées.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0020-14

APA Citation (توثيق APA):

Debiche, Yassine (2014). Etude des éléments traces métalliques persistants dans les boues des stations d'épuration a boues activées[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بثمين الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، دوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE URBAINE

MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option: ASSAINISSEMENT

THEME DU PROJET :

**ETUDE DES ELEMENTS TRACES METALLIQUES
PERSISTANTS DANS LES BOUES DES STATIONS
D'EPURATION A BOUES ACTIVEES**

PRESENTE PAR :

M^r : DEBICHE Yassine

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
M ^r : SALAH Boualem	Professeur	Président
M ^{me} : MOKRANE Wahiba	M.A.A	Examinatrice
M ^{me} : TAFAT Leila	M.A.A	Examinatrice
M ^r : HACHEMI Abdelkader	M.A.A	Examineur
M ^{me} : HOULI Samia	M.A.A	Promotrice

Novembre - 2014

Dédicace



JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL D'ABORD :

À MES TRES CHERS PARENTS POUR TOUS LEURS SACRIFICES CORPS ET AMES AFIN DE M'OFFRIR LE REPOS ET LE BONHEUR ; POUR L'EDUCATION QU'ILS M'ONT INCULQUES, POUR LEURS SOUTIEN MORAL ET MATERIEL DONT J'AI BENEFICIE A CHAQUE FOIS QUE J'EN AI BESOIN POUR L'AMOUR ET LA TENDRESSE QU'ILS M'ONT RESERVES ET LA PATIENCE ET LE DEVOUEMENT QU'ILS M'ONT INSUFFLES. TRES CHERS PARENTS, JE NE VOUS REMERCIERAI JAMAIS ASSEZ POUR VOS ACTES.

À MES FRERES AMIROCHE ET SA FEMME ET ABDELHALIM ET SA FEMME .

À MA GRANDS MERE

À MES SCEURS

À MES COPAINS DE CHAMBRE DEPUIS MA PREMIERE ANNEE, SOUFIAN ET FAICEL

À MES AMIS DE B B A: BILEL, MOUNIR, ZIAD, YAKOUB, YOUNES...

À MES AMIS DE ENSH :TAKIDINE, MASSI,ANIS ,ZANODA , ALI, YASSER,SIDALI,AMINE, ZAKI ET SOUFIAN ...

À MES AMIES, SALIHA, HAFSSA, FARAH,AFAF, SOUHIR, KHDIDJA,...

ENFIN, À TOUTES PERSONNES QUE JE PORTE DANS LE CŒUR ET QUI SE RECONNAITRONS CAR ELLES EN FONT AUTANT.

.....



Remerciement

Je remercie MES PARENTS en premier lieu qui m'ont permis et facilité les choses pour accomplir mes études.

je remercie aussi tous les autres membres de ma famille qui m'ont aidés et encouragés quel que soit les conditions, en particulier ma sœur BAYA

je remercie Madame HOULI à laquelle je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour la confiance qu' elle m'a accordée afin de réaliser ce travail , ainsi que pour ses multiples et précieux conseils scientifiques, professionnels ou tout simplement humains , qu'elle a su me prodiguer aux moments opportuns.

A tout le personnage de la SEAAL de la wilaya d'Alger, je leurs adresse à travers cet humble travail mes remerciements, mes salutations ainsi que ma vive reconnaissance, d'avoir me facilité l'accès à chaque fois que j'avais besoin de consulter la SEAAL et leurs sympathie avec moi.

Je tiens à remercier aussi les enseignants qui m'ont accordé un peu de leur temps pour consulter le travail avec eux en toute aisance.

Je tiens à remercier aussi :

Les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail ;

Tous les professeurs qui ont contribués à ma formation ;

Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration et l'aboutissement de ce mémoire.

Sans oublier tout personnage de l'ENSH et de la Cité 03, à qui j'ai une affection particulière.



:

معالجة المياه المستعملة يؤدي إلى إنتاج كميات كبيرة من هذه الأخيرة تحتوي على مواد غذائية عضوية ومواد سامة ذلك كميات غير ضئيلة من المعادن الثقيلة التي بإمكانها أن تنفذ داخل التربة عن طريق التسربات بواسطة الأمطار أو بعد القيام بعملية السقي، مما ينتج عنه عدة مخاطر صحية و بيئية.

الهدف من هذه الدراسة هو فحص الحمأة الناتجة عن خمس محطات لمعالجة مياه الصدحجوط، قليعة، شنوة، رغبة، بني مسوس، بحيث تحصلنا على نتائج تحاليل المعادن الثقيلة والتي لاحظنا أنها تفوق القيم المحددة المعمول بها. **كلمات مفتاحية:** الحمأة، المواد العضوية، المعادن الثقيلة والمواد السامة ، محطات معالجة مياه الصرف الصحي وهي:

Résumé

Le traitement de l'eau usée mène à produire des grandes quantités de boues, cette dernière contient les produits alimentaires biologiques et les substances toxiques, y compris des quantités non négligeables des métaux lourds qui peuvent être mises en œuvre dans le sol lors de l'infiltration des eaux pluviales ou après l'irrigation, ce qui risque de nuire à la santé et à l'environnement.

L'objectif de cette étude consiste à examiner les boues de cinq stations d'épurations en Algérie qui sont :

La station de Hadjout, Koléa, Chenoua, Reghaïa et Beni Messous, de sorte que nous avons acquises sur les résultats des analyses de métaux lourds qui dépassent les valeurs limites en vigueur.

Mots-clés: boues, matières organiques, les métaux lourds et les substances toxiques, les stations d'épuration

Abstract

The treatment of wastewater leads to produce large amounts of sludge that contains organic alimentary products and toxic substances, including significant quantities of heavy metals which may be absorbed by the ground through the rain infiltration or after irrigation, which may harm both health and environment. The objective of this study is to examine the resulted sludge in 5 sewage treatment plants in Algeria which are: Hadjout, Kolea, Chenoua, Reghaïa and Beni Messous; From which we have obtained the results of heavy metals analysis that as we noted exceed the current limit values.

Keywords: sludge, organic matter, heavy metals and toxic substances, sewage treatment plants

SOMMAIRE

Introduction générale

CHAPITRE I : les boues de station d'épuration

Introduction	1
I.1.Etapes de production d'une boue de station d'épuration.....	1
I.2.Types et origine des boues.....	3
I.3.Procédés de traitement des boues	3
I.3.1.Epaississement	4
a- Epaississement gravitaire	4
b- Epaississement dynamique	5
b.1.Flottation.....	5
b.2.Centrifugation	5
b.3.Drainage.....	6
I.3.2Stabilisation et hygiénisation	6
I.3.2.1.Stabilisation biologique	6
A- Stabilisation aérobie.....	6
B- Stabilisation anaérobie.....	7
I.3.2.2.Stabilisation chimique	7
I.3.3. Déshydratation des boues	7
I.3.3.1. Déshydratations naturelle.....	7
A-Le lit de séchage	8
I.3.3.2.Déshydratations mécaniques	9
A-Filtration sous vide.....	9
B-Filtres sous pression.....	9
C-Filtres à bande.....	9
D-Centrifugation des boues.....	10
I.4.Composition d'une boue.....	10
I.4.1. Siccité.....	10
I.4.2. Matière organique et éléments fertilisants	11
a- Matière organique	11
b- Eléments fertilisants	11
1. Formes azotées.....	12
2. Phosphore	12
3. Autres éléments fertilisants	12
I.4.3.Micropolluants minéraux, organiques et biologiques	12
I.4.3.1. Eléments traces métalliques.....	12
a- Cadmium	13
b- Chrome	13
c- Cuivre	13
d- Mercure	13
e- Nickel	14
f- Plomb	14
g- Zinc	14
I.4.3.1.1.Devenir des éléments traces métalliques dans une STEP.....	14
I.4.3.1.2.Normes des métaux dans les boues.....	15
I.4.3.2.Micropolluants organiques.....	16
I.4.3.3.Micro-organismes non pathogènes.....	16

I.4.3.4. Micro-organismes pathogènes	16
I.5. Devenir d'une boue	17
I.5.1 Filières principales	17
I.5.1.1. Valorisation organique	17
a. Epandage des boues	17
b. Valorisation sous forme de compost	19
I.5.1.2. Valorisation énergétique	19
I.5.2. La mise en décharge contrôlée	20
I.5.3. Filières facultatives	20
I.5.3.1. Co-combustion en cimenterie	20
I.5.3.2. La gazéification	20
Conclusion	21

CHAPITRE II : Eléments minéraux persistants dans les boues de station d'épuration

Introduction	23
II.1. Définition des métaux lourds	23
II.2. Eléments traces métalliques persistants dans les boues de station d'épuration	23
II.3. Origine des métaux lourds dans les boues des stations d'épuration	24
II.3.1. Sources anthropiques	24
a- Activités domestiques	24
b- Activités urbaines	25
c- Activités commerciales	25
d- Activités industrielles	25
II.3.2. Sources naturelles	25
a- Fonds géochimique	25
b- Apports atmosphériques	26
II.4. Normes et réglementation	26
II.5. Mécanismes de toxicité des métaux lourds	27
II.5.1. Conséquences de la présence des métaux dans les boues des STEP	28
II.5.1.1. Conséquences sur l'exploitation	28
II.5.1.2. Conséquences sur l'environnement	28
II.6. Devenir, rémanence et transfert aux plantes puis aux animaux	30
II.6.1 Toxicité chez les animaux et chez l'homme	30
II.6.1.1. Toxicité chez les animaux	31
II.6.1.2. Toxicité chez l'homme	32
II.7. Voies de contamination pour l'homme et leurs conséquences dans le temps	35
Conclusion	38

CHAPITRE III : Procédés d'élimination des métaux lourds dans les eaux et dans les boues

Introduction	39
III.1. Procédés d'élimination des métaux lourds	39
III.1.1. Procédés de transfert liquide-solide	39
III.1.1.1. Précipitation chimique	39
a. Précipitation sous forme d'hydroxydes	39
b. Précipitation sous forme de sulfure	40
III.1.1.2. Chélation-complexation	40
a- Définition	40
b- Sphère de coordination et de complexation	41

c- Types de ligands et complexes	42
III.1.1.3. Echange d'ions	42
III.1.1.4. Electrolyse	42
III.1.1.5. Adsorption	43
a-Adsorption chimique (ou chimisorption).....	43
b- Adsorption physique (ou physisorption)	43
III.1.2.Procédés de transfert membranaire	44
a-Osmose inverse	44
b-Electrodialyse	45
III.1.3.Procédés biologiques.....	46
III.2.Avantages et les inconvénients des Procédés d'élimination des métaux.....	47
Conclusion.....	47

CHAPITRE IV:Etude comparative de présence des métaux lourds dans les boues de STEP à boues activées

Introduction.....	48
IV.1. Matériels et méthodes	48
IV.1.1.Description des systèmes d'épuration.....	48
a.Station d'épuration de Hadjout.....	48
b.Station d'épuration de Koléa.....	48
c.Station d'épuration de Chenoua.....	48
d.Station d'épuration de Reghaïa.....	48
e.Station d'épuration de Beni- Messous.....	49
IV.1.2.Métaux lourds analysés	49
IV.1.3.Résultats et discussion.....	49
IV.2. Interprétation	51
IV.3.Etude comparative des concentrations en métaux lourds dans les STEP	52
Conclusion.....	58

Conclusion générale

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Différents types de boues de STEP.....	3
Tableau I.2 : Comparaison des techniques de l'épaississement sur quelques paramètres	6
Tableau I.3 : Siccité moyenne des boues épaissies.....	11
Tableau I.4 : les valeurs limites en ETM des boues en Algérie (mg/kgMS).....	14
Tableau I.5 : Comparaison des valeurs limites en teneurs en métaux lourds dans les boues	15

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Taux observés en ETM dans les boues	24
Tableau II.2 : Apports domestiques en métaux lourds (g/hab/an).....	25
Tableau II.3 : Teneur moyenne en métaux lourds de différentes roches (en mg/kg).....	26
Tableau II.4 : Normes de rejet d'effluent en Algérie.....	27
Tableau II.5 : Teneurs limites des éléments métalliques des rejets dans l'industrie du traitement de surfaces dans les principaux pays industrialisés	27
Tableau II.6 : Autres ETM pouvant présenter une toxicité chez les animaux.....	32
Tableau II.7 : Effets de quelques éléments Traces Métalliques sur l'homme	34
Tableau II.8 : Sources de l'apport alimentaire hebdomadaire moyen en plomb	35
Tableau II.9 : Apport alimentaire hebdomadaire moyen en mercure en µg par semaine	35
Tableau II.10 : Aliments d'origine animale, sources d'ETM pour l'homme	36
Tableau II.11 : Estimation des apports au sol en ETM par sources majeures de contamination en France.....	37
Tableau II.12 : Origines et flux des ETM en g/ha/an en France.....	37

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Critères de distinction entre l'adsorption physique et chimique.....	44
Tableau III.2 : Les avantages et les inconvénients des Procédés d'élimination des métaux lourds.....	47

CHAPITRE IV

Tableau IV.1 : quantités d'éléments traces métalliques contenues dans la boue de la station d'épuration de Hadjout et les valeurs limites réglementaires (mg/kg de MS).....	49
Tableau IV.2 : quantités d'éléments traces métalliques contenues dans la boue de la station d'épuration de Kolea et les valeurs limites réglementaires (mg/kg de MS).....	50
Tableau IV.3 : quantités d'éléments traces métalliques contenues dans la boue de la station d'épuration de Chenoua en mg/kg de MS	50
Tableau IV.4 : quantités d'éléments traces métalliques contenues dans la boue de la station d'épuration de Reghaia en mg/kg de MS.....	50
Tableau VI. 5 : quantités d'éléments traces métalliques contenues dans la boue de la station d'épuration de Beni-Messous en mg/kg de MS.....	51
Tableau VI.6 : Classement des ETM présents dans les boues par ordre décroissant dans les STEP étudiées.....	51

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Station d'épuration à boues activées.....	2
Figure I.2: Schéma des différentes étapes du traitement des boues	4
Figure I.3: Épaississement statique gravitaire	5
Figure I.4: Schéma du principe de fonctionnement d'un épaisseur par flottation	5
Figure I.5: Schéma d'une centrifugeuse de boues.....	6
Figure I.6: Lits de séchage de L'ancienne SETP de la ville de BordjBouArreridj.....	8
Figure I.7 : Schéma de la composition principale du lit de sable	9
Figure I.8 : l'occurrence des éléments traces métalliques dans une station d'épuration.....	15
Figure I.9 : Différentes étapes de traitement des boues avant épandage	17
Figure I.10 : Epandage agricole.....	18
Figure I.11 : Techniques et valorisation/élimination des boues de station d'épuration	21

CHAPITRE II

Figure II.1 : Flux et stock des ETM vers le sol.....	24
Figure II.2 : Localisation des micropolluants métalliques dans le sol	29

CHAPITRE III

Figure III.1: Les métaux possèdent deux types de valence	41
Figure III.2: Sphère de coordination et de complexation	41
Figure III.3: la géométrie d'un complexe.....	42
Figure III.4: Schéma du principe de l'osmose inverse	45
Figure III.5: Principe de l'électrodialyse	46

CHAPITRE IV :

Figure IV.1: Variation des concentrations en Cadmium au niveau des cinq stations	52
Figure IV.2 : Variation des concentrations en Chrome au niveau des cinq stations	53
Figure IV.3 : Variation des concentrations en Cuivre au niveau des cinq stations	53
Figure IV.4: Variation des concentrations en Nickel au niveau des cinq stations.....	54
Figure IV.5: Variation des concentrations en Plomb au niveau des cinq stations	55
Figure IV.6: Variation des concentrations en Zinc au niveau des cinq stations	56
Figure IV.7: Variation des concentrations en Mercure au niveau des cinq stations	56

Liste des abréviations

STEP : Station d'épuration

DBO₅ : demande biologique en oxygène durant 5 jours

DCO : demande chimique en oxygène

SEAAL : Société des Eaux et d'Assainissement d'Alger

EH : Equivalent Habitant

ONA : Office National d'Assainissement

MS : Matière sèche

ETM:Eléments traces métalliques

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

CTO: Composés traces organiques

FAO: Food and Agriculture Organisation

IARC : Internationale pour la Recherche contre le Cancer

OMS : l'Organisation Mondiale de la Santé

DHTP : Dose Hebdomadaire Tolérable Provisoire

Introduction générale

L'ensemble des opérations de traitement des eaux usées effectuées dans les stations d'épuration s'accompagne d'une production très importante de boues résiduelles. Le traitement de ces boues demeure encore une partie délicate des processus d'épuration. En Algérie, les quantités de boues produites étant considérables et en constante progression : 2000 tonnes de boues par mois d'après l'Office National d'Assainissement d'Algérie (ONA).

L'élimination finale de ces boues pour l'année 2012 s'effectue généralement par mise en décharge (60%), aire de stockage (15%) et la valorisation agricole concernant environ 25 % des boues produites. Les boues renferment en effet des matières organiques, des éléments minéraux (azote, phosphore) et des oligo-éléments susceptibles de constituer un apport intéressant pour la fertilisation des sols. Ainsi, l'utilisation agricole des boues résiduelles peut constituer un moyen de valoriser ce type particulier de déchet. Cependant, elles peuvent également contenir des composés toxiques, en particulier des métaux lourds (mercure, plomb, cadmium, cuivre, zinc, nickel chrome), dont la présence en forte quantité est un obstacle à leur utilisation en agriculture.

Il conviendrait de préciser que les métaux lourds malgré leurs faibles concentrations, sont des éléments toxiques qui sont à l'origine de graves maladies telles que les troubles respiratoires et digestifs. Ils présentent aussi un risque d'écotoxicité pour les plantes, le sol et les espèces aquatiques.

Cependant, afin d'éliminer ces métaux lourds présents dans les effluents, il existe plusieurs procédés tertiaires tels que la précipitation chimique, l'adsorption, les procédés membranaires, et l'échange d'ions. Ces procédés sont coûteux, complexes et sont eux même source de pollution secondaire ce qui oriente les recherches vers les procédés biotechnologiques.

Dans le cadre d'apporter notre contribution à la connaissance de la qualité des boues produites par certaines stations d'épuration des eaux usées en vue de leur valorisation agricole, notre travail consiste en une caractérisation qualitative et quantitative des éléments traces métalliques contenus dans les boues des STEP à boues activées de la région centre d'Algérie.

Par ailleurs, cette étude est composée des chapitres suivants :

Le premier chapitre comprend des généralités sur les boues des stations d'épuration,

Le second chapitre est consacré à l'étude des éléments traces métalliques persistants dans les boues des stations d'épuration,

Dans le chapitre III, nous avons étudié les procédés d'élimination des métaux lourds,

La partie expérimentale est composée d'un seul chapitre ; le quatrième chapitre destiné à l'étude comparative de la présence des métaux lourds contenus dans les boues des cinq STEP à boues activées à savoir : Hadjout ; Koléa , Chenoua, Reghaïa et Beni Messous.

Chapitre *I*

Les boues de station d'épuration

Introduction

La gestion des excréments, des eaux résiduaires et autres déchets générés par les activités humaines a nécessité l'élaboration de systèmes d'assainissement.

L'utilisation des eaux usées et des boues résiduaires s'est logiquement mise en place. L'Inde et la Chine avaient depuis longtemps compris l'avantage de cette réutilisation pour la fertilisation. Il faudra attendre le 16^e siècle pour que les premières expériences soient développées en Europe : d'abord en Allemagne (1531), puis en Ecosse (1650). De nombreux projets sont alors mis en place, essentiellement aux alentours de grandes agglomérations. Mais les problèmes d'odeurs et de transmissions de parasites seront à l'origine de leur déclin.

C'est seulement à partir de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle que la valorisation agronomique des déchets sera remise à l'ordre du jour. Les communes et les groupements de communes ont ainsi mis en place des stations d'épuration pour le traitement des eaux usées dans le cadre de la politique publique de préservation de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques. Ces stations génèrent un sous-produit inévitable : les boues d'épuration.

On appelle « boues d'épuration » les sédiments résiduaires issus du traitement des eaux usées et composés d'eau et de matières sèches contenant des substances minérales et organiques. Ainsi, les boues d'épuration urbaines résultent du traitement des eaux usées domestiques qui proviennent de l'activité des particuliers et éventuellement des rejets industriels dans les réseaux des collectivités après avoir suivi un prétraitement obligatoire.

Dans ce chapitre, Nous développerons les étapes de production des boues de station d'épuration, leur composition et leurs voies d'utilisation possibles.

I.1. Etapes de production d'une boue de station d'épuration

L'épuration des eaux usées, qu'elles soient d'origine domestique, pluviale, industrielle ou qu'elles correspondent à des matières de vidange, aboutit à la production de boues. Ces dernières sont ensuite traitées en fonction de leur destination finale.

Il convient de distinguer les eaux usées urbaines qui sont formées par les rejets des eaux domestiques auxquelles peuvent s'ajouter les eaux usées d'ensembles collectifs (hôpitaux, aéroports, écoles, campings, parkings) et celles d'activités artisanales et commerciales (cabinets médicaux, cabinets dentaires, ateliers photo etc.)

Les eaux usées industrielles ont des compositions très variables selon le type d'industrie (agro-alimentaire, chimique, métallurgique, etc.), selon le degré de recyclage des produits et de l'eau, et selon le cycle de fabrication.

L'épuration des eaux usées passe par différentes étapes. La figure qui suit donne le schéma de fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées. (Figure I.1)



Figure I.1: Station d'épuration à boues activées (AMORCE, 2012)

❖ Phase de prétraitement

Elle permet d'éliminer les éléments solides les plus grossiers par des procédés physiques tels que la sédimentation, la flottaison, le tamisage.

On élimine ainsi les feuilles, les morceaux de papier et de plastique, les graisses, le sable

Les sous-produits de ces opérations de prétraitement seront traités comme des déchets banals.

Au terme de cette phase, il reste des polluants dissous et des matières en suspension. Une deuxième phase d'épuration va ensuite permettre de les éliminer ou de les réduire :

❖ Les traitements primaires

Ils vont permettre la décantation des matières en suspension, par des processus de décantation simple, des traitements physicochimiques ajoutant des agents coagulants ou flocculants etc.

Les boues ainsi obtenues sont des boues fraîches, non stabilisées : elles sont fermentescibles et sont donc instables.

❖ Les traitements secondaires

Il s'agit de traitement biologique qui consiste à extraire les matières organiques dissoutes dans les eaux usées en utilisant des micro-organismes qui vont se nourrir de ces substances dissoutes. Différents procédés existent : le lagunage naturel, les procédés biologiques à culture libre et les boues activées, les procédés biologiques à culture fixées ou bio filtre et à lits bactériens.

Les boues ainsi obtenues vont ensuite être traitées en vue de leur utilisation :

- ✓ par un traitement tertiaire comprenant des étapes de filtration, désinfection etc.

- ✓ par des traitements complémentaires modifiant les caractéristiques des boues, permettant une désodorisation etc.

I. 2.Types et origine des boues

Le tableau suivant montre les différents types de boues, leurs origines ainsi que leurs compositions.

Tableau I.1: Différents types de boues de STEP. (AMORCE, 2012)

Type de boue	Boues primaires	Boues biologiques (boues activées)	Boues mixtes	Boues physico-chimiques
Origine	Traitement primaire par décantation	Traitement biologique secondaire	Traitement primaire et secondaire	Décantation après traitement avec un réactif
Composition et siccité	Matière inorganique	Composés organiques avec un petit pourcentage de composés organiques	Mélange de boues primaires et de boues biologiques	
	Couleur grise siccité 5%	Boues granulaire, de couleur brun-jaunâtre, pulvérulente et de décantation difficile siccité 1-2%	Siccité 5%	Siccité 4-5%

I.3.Procédés de traitement des boues

A la sortie des filières de traitement des eaux, les boues contiennent environ 95-99% d'eau. Cette dernière se présente normalement sous deux formes :

- ❖ Eau libre : faiblement absorbée, peut être éliminée par déshydratation mécanique ;
- ❖ Eau liée : attachée avec des bactéries ou d'autres particules, peut être éliminée par séchage thermique ($> 105^{\circ}$).

Le traitement des boues consiste donc tout d'abord à diminuer leur teneur en eau et à réduire de manière efficace leur charge polluante et fermentescible. Il s'agit de les préparer à une étape ultime de valorisation ou d'élimination. On parle alors de:

- ❖ L'épaississement ;
- ❖ La stabilisation ;
- ❖ Le conditionnement ;
- ❖ La déshydratation.

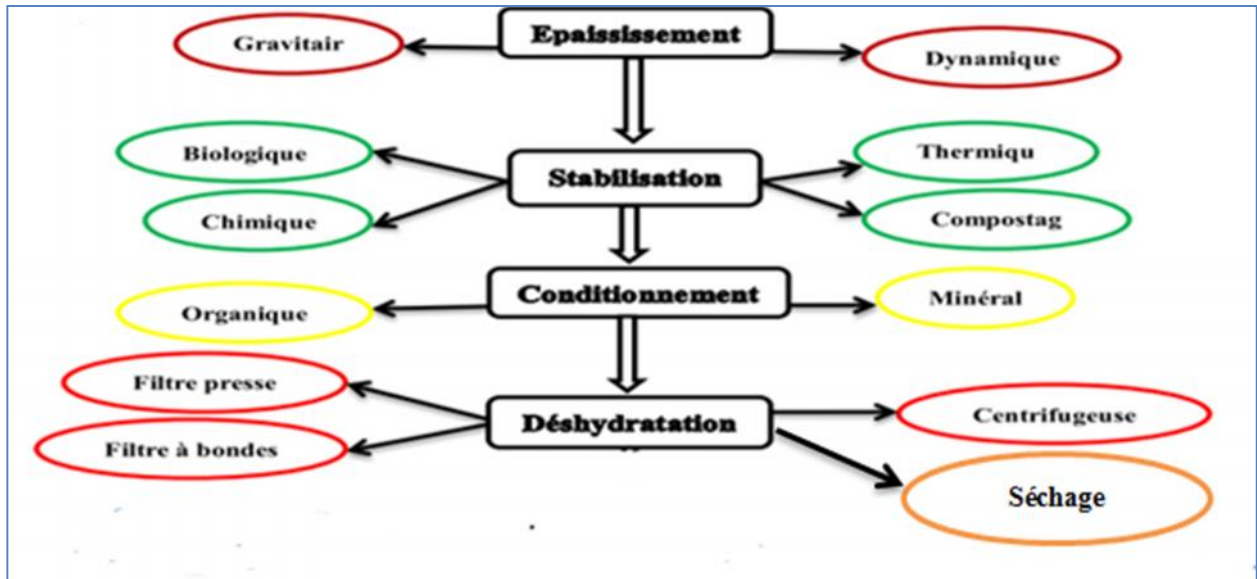


Figure I.2: Schéma des différentes étapes du traitement des boues. (AMORCE, 2012)

I.3.1. Épaississement

L'épaississement est généralement la première étape du traitement des boues. C'est un procédé simple, consommant peu d'énergie. Il sert principalement à réduire le volume des boues brutes et constitue une étape préalable aux traitements suivants. Le taux de siccité obtenu peut atteindre jusqu'à 10% de matière sèche. Quelle que soit la technique utilisée, l'eau doit être recyclée en tête de STEP.

Diverses méthodes sont utilisées pour épaissir les boues :

- ❖ Épaississement gravitaire ;
- ❖ Épaississement dynamique.

a.Épaississement gravitaire : la décantation (ou sédimentation)

Cette technique est très répandue dans les grandes stations (10 000-100 000). Une hauteur de 3,5 à 4 m est préconisée pour le bassin de décantation, en tenant compte du volume de stockage, afin de faciliter le tassement de la boue. La siccité des boues à la sortie de ce procédé varie de 2 à 10% selon la nature des boues traitées.

Ce procédé est peu coûteux (consommation énergétique de l'ordre de 1 à 7 kWh/tMS) et d'exploitation simple mais de faible performance sur les boues biologiques (boues très fermentescibles) avec une siccité de 1,5-2,5%. De plus, la mise en place de l'ouvrage nécessite une surface et un volume très importants. Le temps de séjour des boues dans l'épaississeur est environ 48h. La performance est variable selon la nature des boues :

- ❖ Boues primaire, 40-80 kg de MS/m²/jour
- ❖ Boues biologiques, 25kg de MS/m²/jour.(AMORCE, 2012)

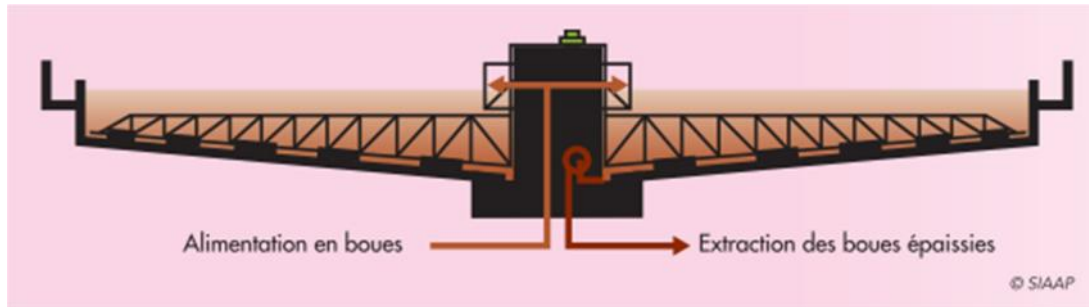


Figure I.3: Epaississement statique gravitaire.

b. Epaississement dynamique

b.1. Flottation

Bien adaptée aux boues biologiques, la flottation à l'avantage d'être un procédé rapide par rapport à la décantation et réalisé dans des installations compactes surtout avec les matières en suspension (MES) de faible décantabilité (siccité de 3,5-5%). Le procédé est basé sur une séparation de phases provoquée par une remontée à la surface des boues sous l'effet de la pression de fines bulles d'air. Les principaux inconvénients de cette technique sont les coûts d'exploitation élevés à cause d'une forte consommation énergétique (entre 60 à 100kWh/tMS) et son fonctionnement délicat. Ce procédé est donc réservé principalement aux grandes stations (10 000 à 100 000 EH).(AKROUR, 2005)

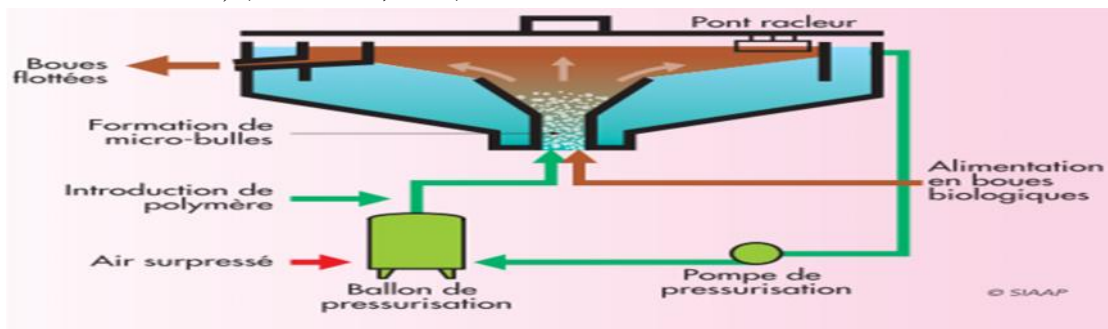


Figure I.4: Schéma du principe de fonctionnement d'un épaisseur par flottation.

b.2. Centrifugation

Cette technique consiste en une séparation, sous l'effet de la force centrifuge, des phases liquide et solide en ajoutant aux boues un polymère en faible dose, permettant d'obtenir un bon compactage (siccité de 4-6%). Il s'agit d'un procédé rapide (il traite 100 m³ de boues par heure) et compact, mais très consommateur d'énergie (150 à 300 kWh/tMS) et très sensible à la qualité des boues.

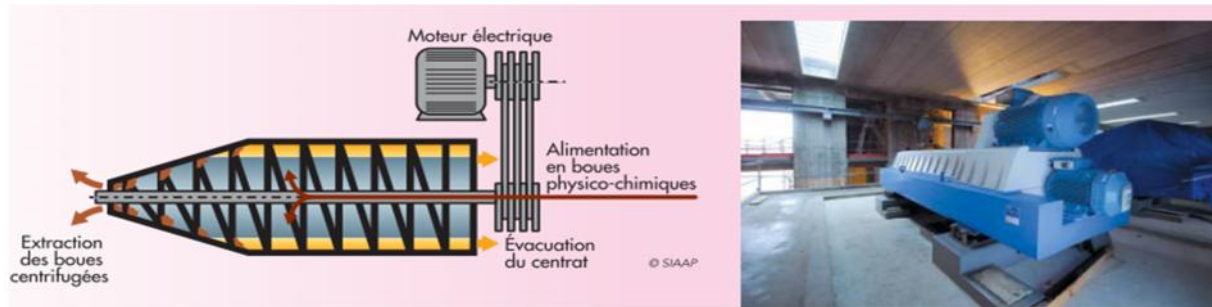


Figure I.5: Schéma d'une centrifugeuse de boues. (AMORCE, 2012)

b.3. Drainage

La boue, préalablement floculée par traitement physico-chimique, est épandue sur un support filtrant qui est raclé en permanence par des lames en caoutchouc. Il existe des technologies variées. Les tables, grilles et tambours d'égouttage sont des techniques simples, efficaces et financièrement abordables alors que les bennes filtrantes, bien adaptées aux petites stations et de fonctionnement très simple, ont des couts plus élevés et nécessitent une assistance technique importante.

Le tableau suivant présente une comparaison des techniques de l'épaississement sur quelques paramètres.

Tableau I.2: Comparaison des techniques de l'épaississement sur quelques paramètres. (AMORCE, 2012)

Type d'épaississement	Energie (kWh/tMS)	Conditionnement	Siccité (%)
Décantation	10 à 20	-	1.50 à 2.5
Flottation	60 à 100	-	3.5 à 5
Centrifugation	150 à 300	Polymère (5kg/tMS)	4 à 6
Drainage	30 à 60	Polymère (1.5kg/tMS)	4.5 à 6

I.3.2. Stabilisation et hygiénisation

La stabilité des boues est obtenue, lorsque les matières organiques contenues dans les boues n'évoluent plus en dégageant par exemple, des odeurs émanant du processus de fermentation.

Il suffit de contrôler cette phase par une diminution des matières organiques fermentescibles présentes dans les boues.

La stabilisation des boues a pour but de réduire leurs pouvoirs fermentescibles.

Les traitements de stabilisation utilisés sont de type biologique, chimique ou thermique.

I.3.2.1. Stabilisation biologique

Elle se fait soit par voie aérobie dans les bassins d'aération, soit par voie anaérobie dans des digesteurs avec production d'un biogaz riche en méthane.

A-Stabilisation aérobie

La stabilisation aérobie des boues consiste en une minéralisation aboutissant à une oxydation très poussée des boues.

Elle est réalisée dans des ouvrages appelés digesteurs qui sont alimentés :

- soit en continu
- soit par cuvée, c'est à dire par alimentation intermittente.

Le temps de séjour dans ces ouvrages est de l'ordre d'une semaine et les systèmes d'aérations utilisées, sont soient des aérateurs de surface ou des diffuseurs d'air.

Les aérateurs de surface permettent une meilleure diffusion d'oxygène mais ils peuvent provoquer une certaine destruction mécanique du floc bactérien rendant ainsi plus difficile leur épaissement.

L'avantage de ce procédé réside dans la simplicité de son fonctionnement, de sa conception et de son suivi. Le surnageant récupéré après la stabilisation des boues, est renvoyé en tête de station. Sa DBO ne représente plus qu'une faible pollution et ne perturbe pas l'épuration.

L'inconvénient majeur d'un tel système est qu'il consomme de l'énergie ajoutée aux dépenses énergétiques globales de la station. (ROGER, 1990)

B-Stabilisation anaérobie

Dans ce procédé, la dégradation des matières organiques est réalisée par des bactéries anaérobies. La digestion anaérobie est donc une fermentation en absence d'oxygène qui permet de stabiliser les matières organiques en les transformant, le plus souvent, en gaz méthane et en gaz carbonique. On admet que la digestion anaérobie comprend deux phases:

- une première phase au cours de laquelle, des acides volatils sont formés par des bactéries acidifiantes.
- une deuxième phase qui est une phase de gazéification réalisée par des bactéries méthanogènes.

I.3.2.2. Stabilisation chimique

Le pouvoir fermentescible d'une boue peut être réduit par adjonction de réactifs chimiques. Cet apport de réactifs ne modifie pas la quantité de matières organiques biodégradables mais agit essentiellement par son action bactéricide. La chaux, du fait de son coût réduit et de son alcalinité, est le réactif le plus utilisé.

I.3.3. Déshydratation des boues

La déshydratation constitue la seconde étape de réduction du volume des boues sur les boues épaissies, stabilisées ou non, afin d'obtenir une siccité des boues plus poussée (en moyenne comprise entre 20 et 30 % selon la nature des boues). La déshydratation représente plusieurs avantages : elle facilite le stockage et réduit donc le coût du transport, elle améliore la stabilisation (temps de séjour augmenté) et facilite une utilisation en agriculture.

La déshydratation des boues est réalisée de deux manières :

- ✓ par des procédés naturels
- ✓ par des procédés mécaniques.

I.3.3.1. Déshydratation naturelle

Le séchage des boues sur des lits de sable s'effectue en deux temps :

- Dans un premier temps, se fait une filtration de l'eau à travers le support, par des forces à très faible pression qui sont essentiellement des forces gravitaires. L'eau est recueillie par un système de drains disposés à la base du lit. Le temps de cette première phase est relativement rapide puisqu'il est de 1 jour pour les boues primaires et de 4 -5 jours pour un mélange de boues primaires et de boues secondaire.
- Dans un deuxième temps, a lieu l'évaporation de l'eau liée, en faisant appel à des forces extérieures comme les conditions météorologiques. L'apparition de fissures augmente la surface de contact avec l'atmosphère qui se traduit par une évaporation plus intense. Cette deuxième phase dépend de divers facteurs tels que la température, l'humidité relative de l'air au contact de la boue et de l'épaisseur de la boue. (HOULI, 1990)

A- Le lit de séchage

Le lit de séchage est composé d'une couche supérieure de sable de 10 cm (calibre 0,5 à 1,5 mm), et d'une couche intermédiaire de gravier fin (calibre 5 à 15 mm), et d'une couche inférieure de gros gravier (calibre 10 à 40 mm) reposant sur le bol imperméabilisé et soigneusement nivelé. Des drains (en ciment ou en plastique) sont disposés, avec une légère pente, dans la couche de base. Les boues épandues liquides sur une épaisseur de 15 à 30 cm perdent d'abord une partie de leur eau (jusqu'à 80%) par drainage à travers le sable. Un séchage atmosphérique par évaporation se produit ensuite et termine la déshydratation des boues. (HOULI, 1990)

Certaines conditions doivent être respectées :

- Il ne faut jamais admettre de boues liquides sur un lit contenant des boues déjà sèches car l'égouttage ne peut pas avoir lieu.
- L'enlèvement des boues déshydratées, se réalise le plus souvent manuellement et nécessite de ce fait, un personnel permanent.
- Un mauvais fonctionnement des lits de séchage se répercute sur l'ensemble de la station ; si les lits ne sèchent pas convenablement, il apparaît aussitôt un excès de boues au niveau du digesteur, du bassin d'aération ou du décanteur.



Figure I.6: Lits de séchage de L'ancienne SETP de la ville de BordjBouArreridj

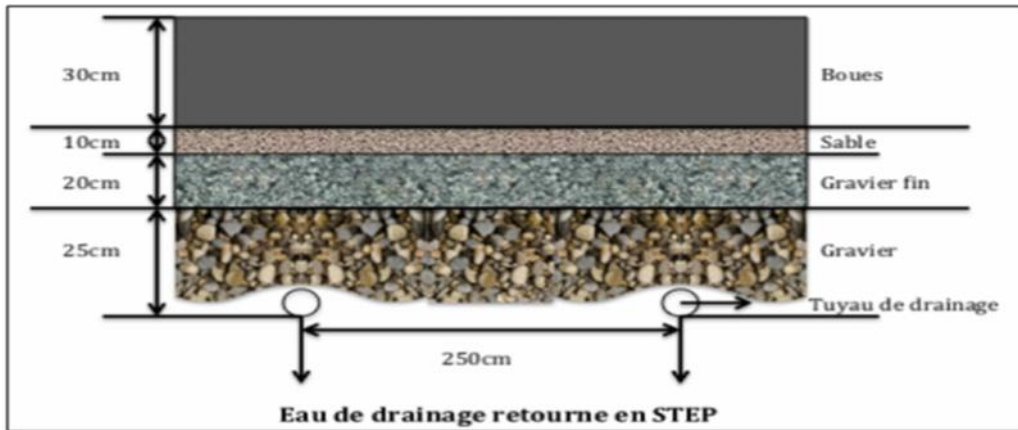


Figure I.7 : Schéma de la composition principale du lit de sable. (AMORCE, 2012)

I.3.3.2. Déshydratations mécanique

Les mécanismes principaux de la déshydratation mécanique sont:

- ✓ la filtration sous vide.
- ✓ la filtration sous pression.
- ✓ les filtres à bande.

A- Filtration sous vide

La boue préalablement conditionnée alimente en continu une auge dans laquelle est en partie immergé un tambour recouvert d'une toile filtrante. Ce tambour est constitué de compartiments étanches qui seront alternativement soumis à une pression atmosphérique.

La dépression, effective sur les 2/3 de la surface filtrante, permet de constituer un film épais de boue sur la toile lors de l'immersion du tambour, puis l'essorage du gâteau après son émergence. Le retour à la pression atmosphérique correspond aux phases successives de décharge de la boue déshydratée et de rinçage de la toile par une eau sous pression. (HADJRABAH, 2004)

B- Filtres sous pression

Cette technique permet d'extraire l'eau libre et l'eau interstitielle contenue dans les boues. Les filtres sous-pression sont moins encombrants que les filtres sous vide. Le grand avantage du filtre-press est qu'il est le seul dispositif permettant d'assurer une filtration sous forte pression et d'atteindre des siccités élevées. Les inconvénients sont la discontinuité de l'alimentation qui implique de prévoir un stockage de la matière première, la nécessité d'une main d'œuvre importante pour le nettoyage des plaques et le remplacement des toiles. (HOULI, 1990)

C- Filtres à bande

Cette technique consiste à déshydrater les boues entre une bande presse et une bande filtrante. La boue subit trois traitements successifs : floculation, égouttage, et compression. Il s'agit de fabriquer une boue floculée permettant un drainage rapide et une cohésion suffisante pour résister à la compression.

D- Centrifugation des boues

La centrifugation est une technique de séparation des phases liquides - solides dont le principe relève de la loi de la pesanteur et elle est basée sur l'action de la force centrifuge.

❖ Le Principe de fonctionnement des centrifugeuses

Les boues liquides sont admises dans le bol conique, cylindrique ou cylindro-conique, par l'arbre creux de l'appareil et à l'aide des tuyères d'alimentation. Lorsque la centrifugeuse est mise en marche, les boues, sous l'action de la force centrifuge, sont projetées sur les parois du bol, permettant une séparation solide – liquide.

Le surnageant est évacué par un déversoir alors que les solides sont repris par le transporteur, dirigés vers l'autre extrémité du bol et déchargés par un orifice.

La centrifugation est une technique offrant divers avantages :

- ◆ rendement d'extraction élevé (50 %) variable selon la nature de la boue et son conditionnement.
- ◆ siccité maximales obtenues.
- ◆ coût d'investissement faible.
- ◆ facilité d'exploitation.
- ◆ économie de surface au sol.
- ◆ absence de nuisances particulières ou propres à cette technique.

I.4. Composition d'une boue

De par sa nature et son origine, la boue pourra avoir des variations dans sa composition. Aussi, pour caractériser une boue, on tiendra compte des éléments suivants :

- ✓ la concentration en matière sèche (MS) aussi appelée siccité,
- ✓ la teneur en matière organique et en éléments fertilisants,
- ✓ la teneur en micropolluants organiques, métalliques et biologiques.

I.4.1. Siccité

Selon sa fraîcheur et le traitement qu'elle aura subi (décantée, épaissie, déshydratée), la boue aura une siccité croissante marquant les étapes de concentration en matière organique, obtenues lors du passage en station d'épuration. (Tableau I.4)

Ainsi les boues activées lorsqu'elles sont fraîches ont une concentration en matière sèche de 3 à 10g/l. Elles passent ensuite à une concentration en matière sèche de 20 à 30 g/l lorsqu'elle est épaissies ou digérées par voie anaérobie. (ADEME, 1994)

La différence est plus flagrante dans le cas des boues primaires urbaines : elles passent d'une concentration en matière sèche de 25 à 50g/l lorsqu'elles sont simplement épaissies à une concentration en matière sèche de 100 à 130g/l lorsqu'elles sont digérées par voie anaérobie.

Tableau I.3: Siccité moyenne des boues épaissies

Type de boues	Concentration en MS(en g/l)
Boues primaires urbaines Epaissies	25à50
Boues secondaires (boues activées) Fraîches	3 à10
Epaissies	20à30
Digérées aérobies	20à30
Mélange de boues primaires et de boues secondaires (boues activées) Fraîches	40à60
Epaissies	50à100
Digérées anaérobies à faible charge	60à80
Digérées anaérobies à haute charge	30à60

Source : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie 1994 ,1995

Remarque

Quatre états physiques sont généralement définis en tenant compte de la siccité :

- boue liquide pour une siccité de 0 à 10 %
- boue pâteuse pour une siccité de 12 à 25 %
- boue solide pour une siccité supérieure à 25 %
- boue sèche pour une siccité supérieure à 85 %

I.4.2. Matière organique et éléments fertilisants**a. Matière organique**

La matière organique des boues est constituée de particules éliminées dans les boues primaires et de la biomasse bactérienne issue des traitements biologiques. On y trouvera principalement des protides, des lipides et des glucides. Cette matière organique représente :

- 50 % de la Matière Sèche (MS), en boue primaire.
- 50 à 80 % de la MS, en boue secondaire.
- 35 à 60 % de la MS, en boue tertiaire.

Cette matière organique intervient dans la fertilité des sols : elle assure la cohésion entre les éléments constitutifs du sol et donc sa stabilité, augmente sa réserve en eau, couvre les besoins de ses organismes hétérotrophes, participe aux échanges en minéraux et permet de résister aux agressions. (PETIT, 2007)

b.Eléments fertilisants

Les éléments couvrant les besoins nutritionnels des plantes seront : l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium et les oligo-éléments.

L'épandage de boues de station d'épuration va apporter ces éléments qui seront consommés par les plantes. (PETIT, 2007)

1. Formes azotées

L'azote présent dans les boues se présentera sous forme d'azote ammoniacal (soluble), ou sous forme d'azote organique. Dans ce dernier cas, il sera transformé à 80% par les micro-organismes en azote minéral et donc utilisable par les plantes.

La concentration en azote des boues est au voisinage de 5%.

Sa disponibilité pour les végétaux varie en fonction de la composition de la boue et du sol qui la recevra. Une analyse agronomique permettra de connaître les éléments présents et montrera l'intérêt fertilisant de ces boues. (PETIT, 2007)

2. Phosphore

On considère que 40 à 80% du phosphore des boues sont disponibles comme fertilisant organique.

Sa concentration est de l'ordre de 1 % de la matière sèche dans les boues primaires, et de 2 % de la matière sèche dans les boues secondaires.

Les boues d'épuration représentent une importante source de phosphore pour les cultures. Mais la biodisponibilité du phosphore et son intérêt fertilisant dépendront de leur traitement en station d'épuration. (PETIT, 2007)

3. Autres éléments fertilisants

On retrouve dans les boues du potassium (en faible concentration), du calcium (teneur particulièrement élevée lorsqu'il y a eu chaulage), du magnésium (0,4% des matières sèches en moyenne). Ces minéraux seront facilement disponibles pour les cultures. (PETIT, 2007)

I.4.3. Micropolluants minéraux, organiques et biologiques

Les concentrations parfois importantes en micropolluants organiques ou minéraux sont accentuées par le traitement imposé aux eaux usées : on estime classiquement que 90 % des éléments présents à l'entrée de la station d'épuration se retrouvent dans les boues, après une réduction du volume qui dépasse généralement un facteur de 30 par rapport au volume de départ.

I.4.3.1. Eléments traces métalliques

Sous ce terme sont regroupés les métaux vrais et les métalloïdes. Les métalloïdes se caractérisent, lorsqu'ils sont à l'état d'ions, par une grande affinité pour l'élément H^+ de l'eau avec lequel ils donnent naissance à un acide (ex : HCL).

Les métaux vrais se caractérisent, lorsqu'ils sont à l'état d'ions, par une grande affinité pour le groupement OH^- de l'eau avec lequel ils donnent naissance à une base (ex : NaOH).

On parle de micropolluants métalliques (ou éléments traces métalliques) car la plupart des éléments minéraux retrouvés dans les boues de stations d'épuration urbaine proviennent du groupe des métaux.

Les Eléments Traces Métalliques (ETM) proviennent des rejets domestiques, des eaux de pluie et de ruissellement et des eaux usées industrielles et artisanales.

Les ETM peuvent être classés en 2 catégories :

- ✓ les ETM essentiels à la biologie cellulaire et à l'équilibre physiologique de tout être vivant : ce sont l'arsenic, le chrome, le cuivre, le nickel, le sélénium et le zinc. Un apport nutritionnel est conseillé, mais sans dépasser les doses de limite de sécurité pour le zinc et le sélénium. En effet, ces ETM sont toxiques à doses élevées.
- ✓ les ETM dont la présence est indésirable pour l'organisme des êtres vivants de par leur faible seuil de toxicité et de par leur absence d'intérêt nutritionnel. Il s'agit du plomb, du cadmium et du mercure. Ces ETM que l'on appellera « contaminants » vont s'accumuler tout au long de la chaîne alimentaire par transfert du sol et de l'eau vers les plantes et les animaux, ainsi que par les retombées atmosphériques.

Ces ETM ont différentes origines. La présentation qui suit donne par Elément Trace Métallique, leurs principales sources de contamination de l'environnement. (ADEME, 2002)

a. Cadmium

Essentiellement d'origine industrielle, il peut provenir également d'activités domestiques (composant de produits cosmétiques tels que shampoings, teintures capillaires). C'est également un composant pharmaceutique phytosanitaire (pesticides de jardin).

L'apport de cadmium dans les eaux usées provient aussi des eaux de ruissellement (retombées atmosphériques de cet élément en zone urbaine, résidus de pneus sur la chaussée et corrosion des conduites d'eau).

La teneur en cadmium des boues correspondrait à 75% du métal entrant.

b. Chrome

Il provient entre 35 et 50% des industries (galvanoplastie, tanneries, oxydations chimiques) ; entre 9 et 50% du ruissellement (retombées atmosphériques, pesticides, engrais phosphatés....) et entre 14 et 28% des eaux domestiques (produits d'entretien, eau de consommation). Le traitement primaire des eaux usées élimine 28 à 50% de cet Elément Trace Métallique.

c. Cuivre

Il provient essentiellement des eaux usées domestiques (eau de consommation, produits domestiques, corrosion des tuyauteries), mais il est aussi d'origine industrielle (traitements de surface, industries chimiques et électroniques) et il provient des eaux de ruissellement (poussières de combustion industrielle et trafic routier).

Il est globalement très bien éliminé : 85% du métal se retrouve dans les boues résiduelles.

d. Mercure

Il provient des rejets de produits pharmaceutiques, d'amalgames dentaires, de thermomètres brisés, de désinfectants des blanchisseries, d'écaillés de certaines peintures, etc. Le mercure présente une très forte affinité pour la matière organique et est de ce fait très fortement retenu par les boues. Une partie de ce mercure sera perdu par volatilisation lors du traitement biologique des boues.

e. Nickel

Il provient essentiellement de rejets domestiques (produits domestiques, pigments divers), et de rejets industriels (traitement de surface des métaux, fabrication de batteries, d'alliages ...). Seulement environ 30% du nickel sera retenu par les boues lors du processus d'épuration.

f.Plomb

Il provient principalement des eaux de ruissellement (70 à 80%), en relation avec la circulation automobile (notamment les fuites d'essence, de lubrifiants ou les particules de pneus). Il provient aussi de l'industrie (15 à 20%), et d'activités domestiques (5%) : altération des réseaux d'alimentation et des réseaux d'eaux usées, teintures capillaires, poussières de peintures etc. Il est très fortement retenu par les boues ou il est majoritairement associé à la matière organique et aux carbonates.

g.Zinc

Il provient essentiellement des eaux usées domestiques (produits consommés et corrosion des tuyaux galvanisés), de rejets industriels (mines, raffineries de zinc, pigments, usures des toitures en zinc ...).

La comparaison des teneurs en zinc des boues entre 1979 et 1994 montre une diminution des flux de zinc entrant dans les stations d'épuration urbaines

Le tableau I.5 présente les valeurs limites en éléments traces métalliques constatées dans les boues en Algérie.

Tableau I.4: les valeurs limites en ETM des boues en Algérie (mg/kgMS)

Eléments traces métalliques	Valeur limite (mg/kgMS)
Cadmium	10
Chrome	1000
Cuivre	1000
Nickel	200
Plomb	800
Zinc	3000
Mercuré	10

Source : SEAAL, 2014

I.4.3.1.1. Devenir des éléments traces métalliques dans une STEP

Le schéma suivant récapitule l'occurrence des éléments traces métalliques dans une station d'épuration.

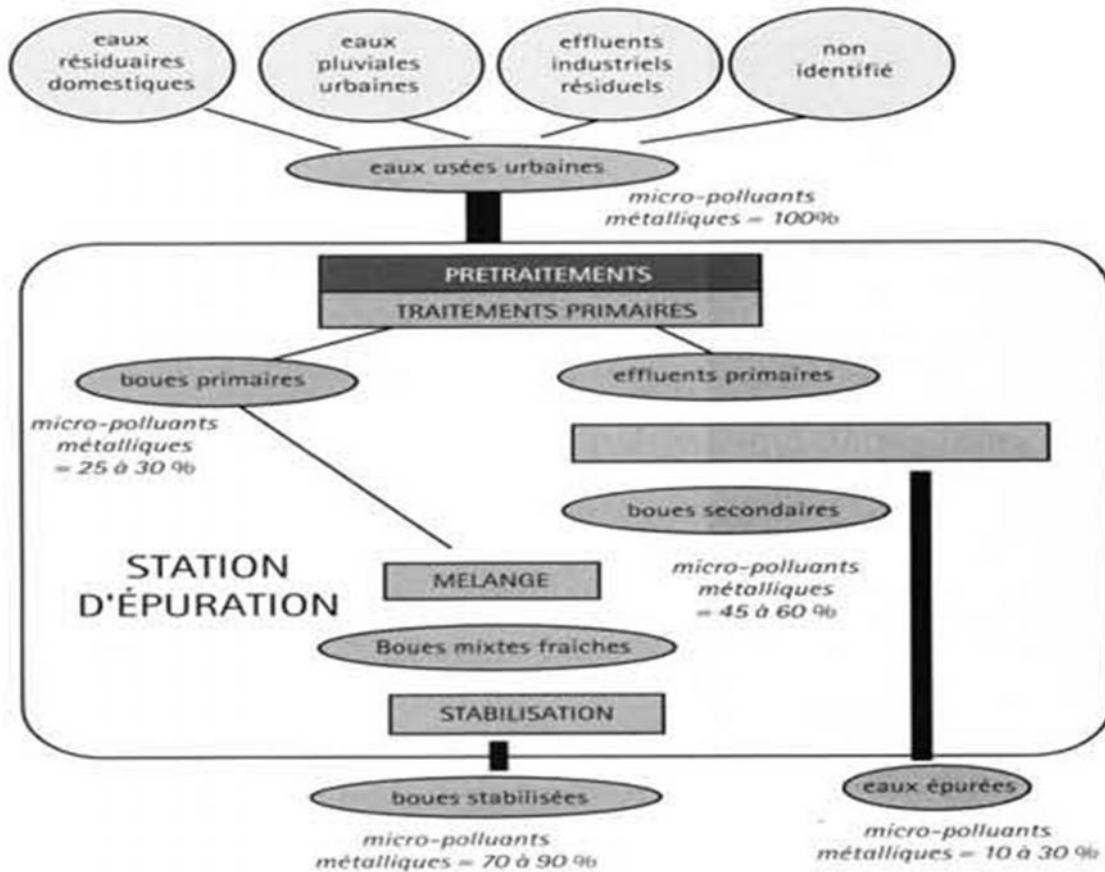


Figure I.8 : l'occurrence des éléments traces métalliques dans une station d'épuration.

I.4.3.1.2. Normes des métaux dans les boues

Le tableau suivant donne les valeurs limites des métaux lourds dans les boues.

Tableau I.6 : Comparaison des valeurs limites en teneurs en métaux lourds dans les boues (mg/Kg M.S)

Paramètres	Valeurs limites Américaines	Valeurs limites Européennes	Valeurs ONA	
			Min	Max
Cadmium	85	20 à 40	1.4	30
Cuivre	4300	1000 à 1750	72	160
Nickel	420	300 à 400	17	87
Plomb	840	750 à 1200	20	180
Zinc	7500	2500 à 4000	156	983
Mercur	57	16 à 25	182	1200
Chrome	3000	-	13	116.96

I.4.3.2.Micropolluants organiques

Ils sont d'origine industrielle, urbaine ou agricole. On recense les molécules et familles de molécules suivantes :

- ✓ Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) : essentiellement émis par les industries de transformation du pétrole, la combustion de carburant et les systèmes de chauffage.
- ✓ Hydrocarbures monocycliques aromatiques : ce sont des solvants volatiles (benzène, xylène, toluène) entrant dans la composition des carburants. Leurs propriétés toxiques aiguës ont amené les industriels à réduire leur utilisation en tant que solvants. On distingue deux catégories : les benzènes et les phénols.
- ✓ Hydrocarbures aliphatiques : principaux composés de produits pétroliers utilisés dans les moteurs, chaudières, centrales électriques ou utilisés comme lubrifiants.
- ✓ Hydrocarbures aliphatiques chlorés : substances toxiques volatiles ou semi volatiles utilisées comme solvants.
- ✓ Chlorobenzènes et chlorophénols : ce sont des organochlorés volatiles ou semi volatiles utilisés dans le traitement du bois, dans le blanchiment du papier ou comme pesticides.
- ✓ Substances chlorées pesticides : très utilisées dans la destruction des végétaux ou des arthropodes nuisibles pour l'homme et les animaux.
- ✓ Autres substances organiques pesticides : organophosphorés, carbamates et herbicides de la famille des triazines utilisés comme insecticides, fongicides, herbicides, rodenticides, bactéricides, acaricides, nématocides et molluscicides.(PETIT, 2007)

I.4.3.3.Micro-organismes non pathogènes

Les boues contiennent, de par leurs diverses origines (fécale, végétale, tellurique etc.), une grande variété de micro-organismes qui n'ont pas d'incidence sur les santé humaine ou animale: germes témoins de contamination fécale et germes saprophytes, coliformes totaux, coliformes fécaux, clostridies sulfite-réducteurs, bactériophages, Pseudomonas aeruginosa. Ils sont généralement présents en quantités élevées, et peuvent participer à la digestion des boues. Leurs quantités varient peu : faible influence de la source, du type de boue ou du système d'épuration. Nous ne les détaillerons pas et nous nous intéresserons plus spécialement aux germes pathogènes.(PETIT, 2007)

I.4.3.4.Micro-organismes pathogènes

Il s'agit des virus, bactéries et parasites protozoaires ou métazoaires. Ils représentent une infime partie des micro-organismes contenus dans les boues, mais par leur impact sur la santé humaine et animale, ils doivent tout particulièrement être pris en compte.

La nature des ces micro-organismes pathogènes dépend de la provenance des eaux usées :

- pathogènes provenant de l'urine et des matières fécales humaines ou animales lorsqu'il s'agit d'eaux usées domestiques,
- pathogènes provenant du sang, des déchets de carcasse, du tube digestif ou des déjections des animaux abattus lorsque les eaux usées proviennent des abattoirs ou des équarrissages.(PETIT, 2007)

La présence ou non de pathogènes, et le risque qui leur est associé dépendent de plusieurs facteurs:

- ❖ Etat de santé global de la population : plus une population est saine, moins il y a d'organismes pathogènes excrétés.
- ❖ Efficacité de la station de traitement des eaux est par ailleurs un critère important.
- ❖ Biologie des organismes sources de maladies ; la plupart d'entre eux ne survit pas au-delà de 2-3 semaines, sauf ceux présentant des formes de résistance comme des œufs ou des kystes de certains parasites (ASCARIS, TENIAS...)

I.5. Devenir d'une boue

On a assisté ces dernières années à l'augmentation progressive de la production des boues parallèlement, les voies d'élimination des boues ont évolué.

Les boues récupérées des STEP sont donc soit valorisées pour des fins agricoles ou énergétiques, ou bien éliminées.

I.5.1. Filières principales

I.5.1.1. Valorisation organique

Il s'agit de la solution la moins onéreuse mais également la plus fragile en raison des difficultés liées à l'acceptation par le monde agricole de ces « déchets » devenus « produits ».

a. Epannage des boues

Malgré les coûts croissants de traitement des boues nécessaires à une valorisation agricole, l'épandage reste la filière la plus économique. Avant d'être épandues, les boues peuvent avoir subi un ou plusieurs traitements.

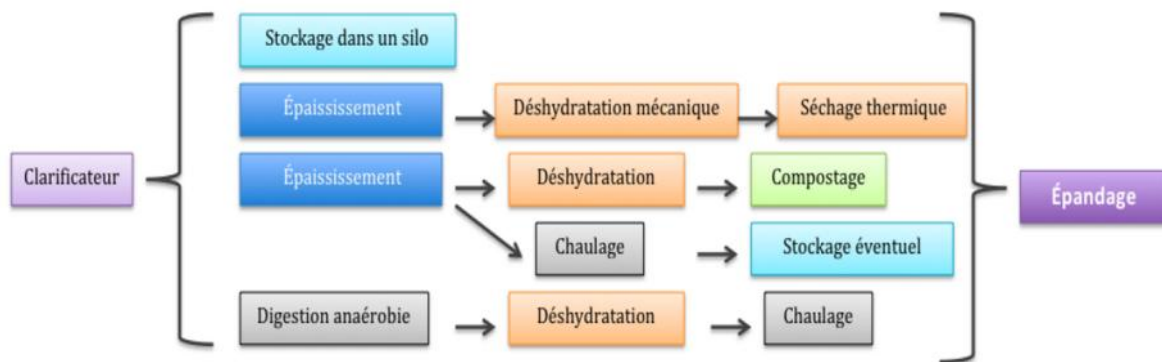


Figure I.9 : Différentes étapes de traitement des boues avant épandage

Les boues traitées en vue d'un épandage peuvent être :

- ❖ Boues liquides : siccité 2 à 5 %, produites par les petites stations (200EH), elles ont subi un épaississement ou un stockage en silo.
- ❖ Boues pâteuses : siccité 15 à 25%, issues de la digestion biologique, correspondent à des STEP de taille moyenne (65 000 à 20 000 EH). Elles ont subi une déshydratation sur filtre à bande ou une centrifugation.
- ❖ Boues chaulées : siccité 25 à 30%, ce type peut être pâteux ou solide, produit par des STEP de taille moyenne à grande (20 000 à 100000 EH). Elles sont issues d'un chaulage après une déshydratation.

- ❖ Boues compostées : siccité 35 à 70%, issues d'un compostage des boues déshydratées.
- ❖ Boues solides : résultent d'un traitement par filtre presse ou d'un séchage thermique. Elles sont produites surtout par des grandes STEP (cout de production assez important).



Figure I.10 : Epannage agricole

L'épandage des boues présentes des avantages agronomiques car les boues de la STEP sont riches en éléments fertilisants (N et P). En effet, dans les boues liquides, la plupart de l'azote se trouve sous forme d'ammonium qui est facilement assimilé par les végétaux. Dans les boues pâteuses et solides, l'azote est sous forme organique et sera disponible à long terme. De plus, l'apport de phosphore par les boues est très important, quasiment égal à celui des engrais chimiques.

Malgré les intérêts qu'elle présente, cette valorisation a des limites. Elle est assez mal acceptée par les exploitants à cause la présence des ETM, des CTO et les germes pathogènes dans les boues. (SYPREA, 1997)

L'épandage de boues ne peut donc être pratiqué que si celles-ci respectent le principe "d'intérêt agronomique" et soient exemptes de grandes teneurs en polluants inorganiques ou organiques.

Ainsi, il faut que l'épandage des boues soit réalisé de façon soignée et surveillé.

- ❖ **En respectant les doses d'apport définies par le suivi agronomique en tenant compte des :**
 - fertilisants apportés par la boue
 - fertilisants déjà dans le sol
 - fertilisants utilisés par la culture.
- ❖ **En tenant compte des conditions climatiques :**
 - des périodes de gel, neige, pluies importantes ou de grands vents.
 - des distances minimales par rapport aux ressources en eaux et au voisinage doivent être respectées. Les boues sont épandues à au moins 35 mètres de captages d'eau et de réservoirs enterrés d'eau potable. La même distance est requise vis-à-vis des berges des cours d'eau et des plans d'eau. Une distance de 100 mètres par rapport aux immeubles habités et aux zones de loisirs doit être respectée.

b. Valorisation sous forme de compost

Le compostage est d'abord un procédé de stabilisation de la matière organique puis un procédé de valorisation organique produisant un compost soumis aux mêmes contraintes réglementaires que l'épandage agricole.

Par ailleurs, le compostage présente plusieurs avantages par rapport à l'épandage. Parmi ces avantages on a :

- ❖ Réduction du volume des boues et de leur teneur en eau ;
- ❖ Réduction des odeurs ;
- ❖ Meilleure maniabilité (meilleure structure que les boues non compostées) ;
- ❖ Stabilisation et hygiénisation naturelles sans additifs chimiques ;
- ❖ Plus grand intérêt économique (une grande quantité d'humus riche en éléments fertilisants).

La valorisation agricole après compostage est garantie en raison de la qualité du produit final, s'il est commercialisé, peut garantir la rentabilité de l'opération.

A cause d'un apport trop faible carbone/azote, et de l'absence d'élément structurant, les boues de STEP ne sont pas compostables seules. Il est donc nécessaire de mélanger les boues avec des déchets verts qui permettent de structurer et d'aérer le substrat, afin d'obtenir un produit final de bonne qualité. Ce procédé nécessite des garanties quant à la qualité et à la quantité des deux flux (déchets verts et boues) afin d'assurer un mélange homogène dans la durée.

L'utilisation du compost fournit aux végétaux un support aéré, un réservoir d'eau et de nutriments. Ceci permet un enracinement important des végétaux, favorise leur productivité et diminue les risques d'érosion. (Houot, 2012)

I.5.1.2. Valorisation énergétique

Après une première déshydratation, les boues sont incinérées dans un four spécifique ou peuvent être mélangées avec d'autres déchets tels que des déchets ménagers et traités dans des installations de traitement thermique de déchets non dangereux.

Un des procédés les plus connus est le four à lit de sable fluidisé. Les températures de combustion sont généralement comprises entre 850 et 900 °C. En sortie de réacteur, du sable chaud est mélangé aux boues, afin de créer une turbulence facilitant la combustion, puis il est réintroduit en bas du réacteur de fluidisation. Le principal intérêt de cette technique réside dans le fait que la combustion est auto-entretenu si les boues ont une siccité supérieure ou égale à 26%.

La chaleur produite dans l'installation peut être valorisée dans un réseau de chaleur, permettant de réduire le coût de fonctionnement de l'usine.

Enfin, l'intérêt principal du traitement thermique des boues de STEP est tout d'abord de transformer les boues en cendres, avec une réduction de volume d'environ 90%. Ce produit représente un déchet ultime qui sera stocké. De plus, la combustion des boues offre une possibilité de valorisation énergétique des boues, surtout dans les fours de capacité importante.

I.5.1.3. La mise en décharge contrôlée

Elle consiste à enfouir les boues souvent mélangées avec les ordures ménagères selon les principales conditions (site étanche, compactage des résidus, récupération et traitement des jus de décharges,...). Afin d'éviter toute nuisance au niveau de stockage, les boues doivent être débarrassées des matières organiques fermentescibles.

De plus, pour réduire la production de lixiviats, et éviter une rapide saturation de la décharge, ne sont acceptées que les boues peu humides (humidité maximale de 70 %).

Remarque

La mise en décharge contrôlée de la boue nécessite des opérations préliminaires de stabilisation et de déshydratation poussée.

En effet, cette solution a perdu progressivement de son intérêt pour les raisons suivantes:

- odeurs nauséabondes,
- pullulation de moustiques,
- entraînement d'éléments fertilisants (nitrates, phosphates) et de produits toxiques par les eaux superficielles
- contamination des nappes d'eaux souterraines

I.5.2. Filières facultatives

Ce sont de nouvelles techniques de valorisation des boues, parmi ces techniques, on trouve :

I.5.2.1. Co-combustion en cimenterie

Encore au stade expérimental en France, cette technique offre une possibilité d'élimination des boues d'épuration déshydratées ou séchées. En effet, les boues de siccité supérieure à 90% ont un pouvoir calorifique important (de 10 à 12 MJ/kg). Elles peuvent donc être utilisées comme combustible et remplacer une partie de la consommation en énergie fossile. De plus, la chaleur produite par le processus peut être utilisée pour le séchage des boues. (AMORCE, 2012)

Cependant, pour pouvoir profiter de cette chaleur, la station d'épuration doit être à proximité de la cimenterie. En outre, la teneur en phosphore des boues peut être un élément limitant de cette technique. En effet, une teneur supérieure à 0,5% de phosphore peut entraîner une diminution de la résistance mécanique.

I.5.2.2. La gazéification

La gazéification consiste à convertir à forte température (900-1100°C) une énergie contenue dans un matériau solide en un résidu inerte et un gaz calorifique valorisable ou d'électricité, avec des rendements énergétiques et un bilan environnemental favorables. Cependant, cette technique nécessite des boues préalablement séchées à 90%, ce qui grève pour le moment le coût de cette solution alternative.

Remarque :

Le schéma suivant résume les différentes techniques de traitement des boues ainsi que leurs destinations. (AMORCE, 2012)

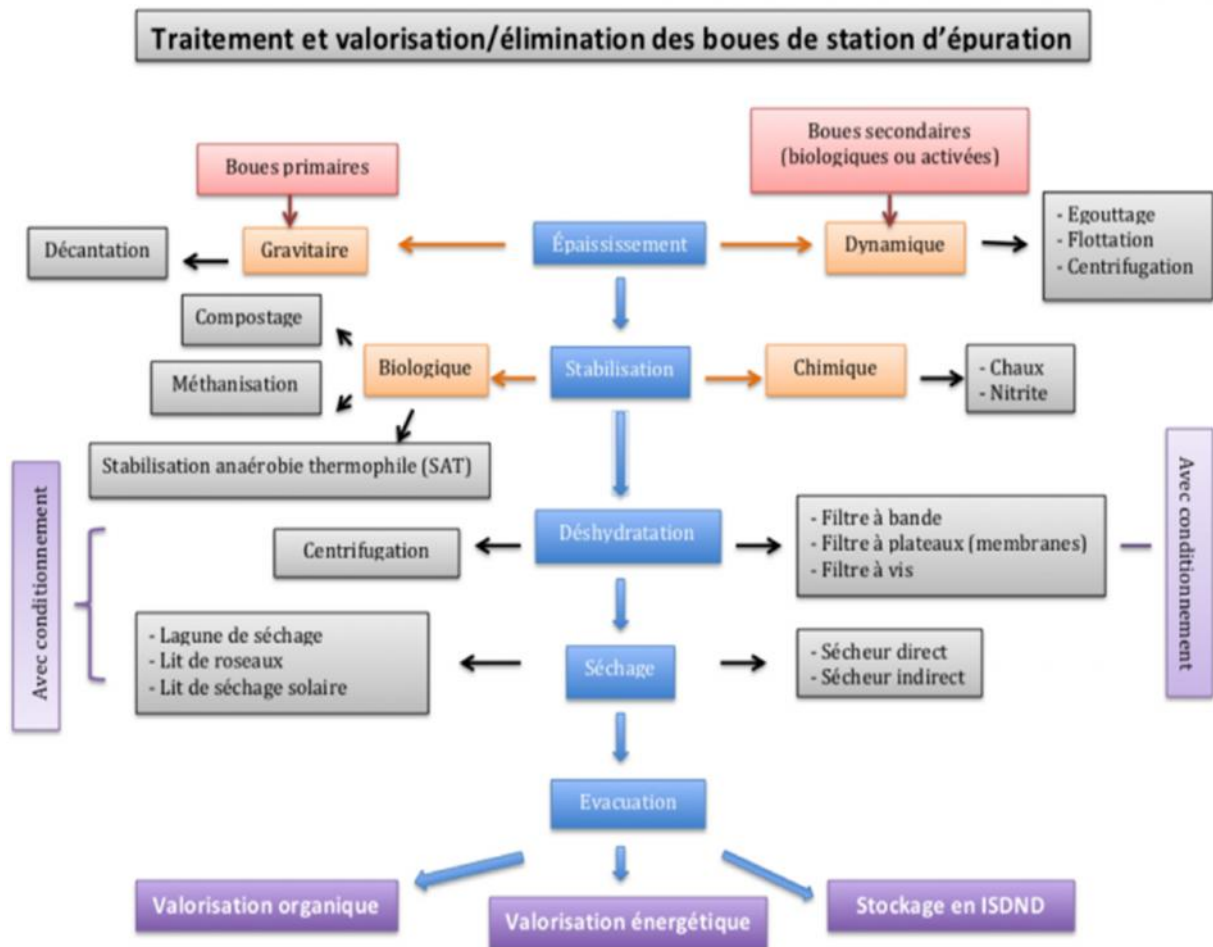


Figure I.11: Techniques et valorisation/élimination des boues de station d'épuration.

Conclusion

Le traitement des eaux usées conduit à la production de boues, qui contiennent des composés inertes et organiques, des polluants et des pathogènes. Un traitement adapté et performant de ces boues est donc indispensable pour maîtriser de façon globale l'assainissement des eaux usées.

Dans tous les cas, le choix de filières de valorisation ou d'élimination des boues produites doit prendre en compte l'existence et la pérennité des débouchés potentiels, notamment pour l'épandage, et essayer de mutualiser les équipements de traitement des déchets existant sur le territoire (plateforme de compostage, unité de valorisation énergétique à proximité,...).

Cependant, il faut également tenir compte des évolutions réglementaires, qui peuvent créer de nouvelles contraintes, ayant des impacts sur le coût de l'assainissement.

Le développement d'une démarche de prévention efficace dans les réseaux d'assainissement permettrait par ailleurs de produire des boues moins polluées, donc plus faciles à traiter et à valoriser en agriculture. En effet, il est préférable de réduire à la source les éléments indésirables des eaux notamment les éléments traces métalliques, donc des boues, plutôt que d'adopter des traitements de plus en plus lourds.

La maîtrise de l'assainissement des eaux usées et de la valorisation des boues n'est en fait possible que si tous les acteurs du secteur, usagés, collectivités, industriels, organismes nationaux, entretiennent une logique partenariale de concertation et de responsabilités partagées.

Chapitre **II**

Eléments minéraux
persistants dans les
boues de station
d'épuration

Introduction

Les activités industrielles ont contribué au développement des pays mais elles ont aussi générées plusieurs types de pollutions. Un grand nombre d'industries utilisent et rejettent des quantités importantes de métaux lourds, ce qui les rend une véritable menace pour l'environnement. Ces polluants ont un fort impact toxicologique sur nos sources hydriques. Parmi ces métaux toxiques, on peut citer : le plomb, le mercure, le chrome, le cadmium et l'arsenic. Les métaux lourds se caractérisent par leur persistance, leur toxicité et leur pouvoir d'accumulation dans le milieu naturel, et par conséquent la présence de ces derniers dans l'environnement peut être nuisible à plusieurs variétés d'espèces vivantes. Pour cela des recherches scientifiques ont été développées afin de minimiser leurs concentrations.

II.1. Définition des métaux lourds

Les définitions des métaux lourds sont multiples et dépendent du contexte dans lequel on se situe ainsi que de l'objectif de l'étude à réaliser.

D'un point de vue purement scientifique et technique, les métaux lourds peuvent être également définis comme :

- ✓ tout métal ayant une densité supérieure à 5g/cm^3 ,
- ✓ tout métal ayant un numéro atomique élevé, en général supérieur à celui du Sodium ($Z=11$),
- ✓ tout métal pouvant être toxique pour les systèmes biologiques.

II.2. Eléments traces métalliques persistants dans les boues de station d'épuration

Il s'agit principalement des éléments suivants : arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, sélénium et zinc. Ils proviennent des rejets domestiques, des eaux pluviales et de ruissellement, des rejets industriels et artisanaux ainsi que des retombées atmosphériques. Ils sont nécessaires au bon développement des plantes. Mais s'ils sont présents en quantités trop importantes, ils présenteront un risque potentiel à estimer.

Rappelons que l'analyse des Eléments Traces Métalliques (ETM) d'un sol reflète la nature de la roche mère et les contaminations d'activités humaines: dépôts atmosphériques (plomb, zinc) ; fertilisation phosphatée (source principale d'apport de cadmium), apports de lisiers et de boues (accompagnés d'apports conséquents en zinc et cuivre). La figure 1 présente les flux et stock en éléments traces métalliques vers le sol.

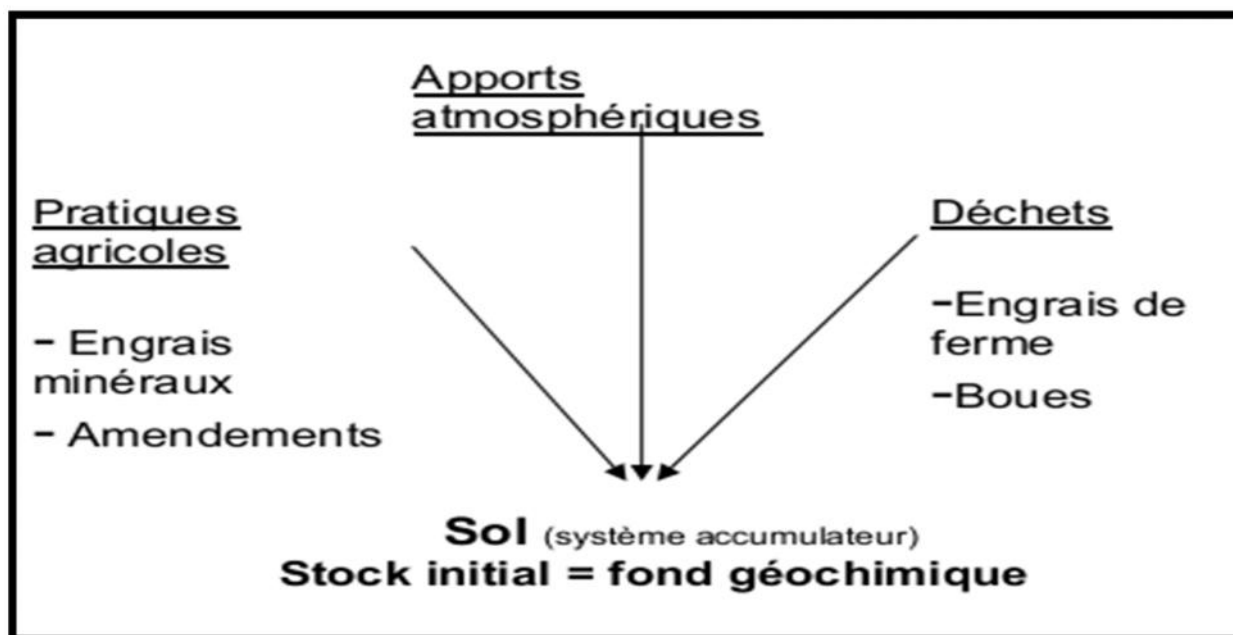


Figure II.1 : Flux et stock des ETM vers le sol

En tenant compte des différents paramètres intervenant dans la teneur en ETM d'un sol, la réglementation a fixé des valeurs limites en ETM dans les boues de station d'épuration. Le tableau II.1 indique les valeurs moyennes en ETM constatées dans les boues comparativement aux valeurs imposées par la réglementation.

Ces valeurs ne dépassent pas le tiers des valeurs limites fixées par la réglementation. Il semblerait donc que nous ayons une bonne marge de sécurité concernant les concentrations des ETM dans les boues des stations d'épuration. (PETIT, 2007)

Tableau II.1 : Taux observés en ETM dans les boues

Eléments traces métalliques	Teneur moyenne en mg/kg MS	Valeur limite en mg/kg MS	% de la valeur limite
Cadmium	2,5	20	25
Chrome	50	1000	5
Cuivre	330	1000	33
Mercure	2,3	10	23
Nickel	40	200	20
Plomb	90	800	11
Zinc	800	3000	27

Source : (Rapport ADEME, 2002a)

II.3. Origine des métaux lourds dans les boues des stations d'épuration

II.3.1. Sources anthropiques

a. Activités domestiques

Les métaux lourds proviennent des différents usages domestiques de l'eau, elles se répartissent en eaux ménagères (eau de salle de bain et cuisine) qui sont généralement chargées de détergents, de solvants, de graisses et de débris organiques. Il s'agit aussi des rejets des toilettes ; auxquels peuvent s'ajouter selon l'importance et le type d'agglomération, les eaux

usées d'ensembles collectifs (Hôpitaux, Ecoles et parkings) et celles des activités artisanales et commerciales (cabinets médicaux, pharmacie, ateliers photo et ateliers de tôlerie)

b. Activités urbaines

qui sont à l'origine de la corrosion des conduites, dans les réseaux intérieurs des immeubles et au niveau des branchements entre le réseau public et le compteur de l'abonné, qui est la source d'une fraction importante de la charge en cuivre et plomb des eaux usées, le ruissellement des eaux pluviales sur les toitures, les chaussées et d'une manière générale sur l'ensemble des surfaces imperméables de la cité qui conduit à l'enrichissement en plomb, zinc et nickel de l'effluent.

Le tableau II.2 indique la fourchette d'estimation des apports domestiques en métaux lourds.

Tableau II.2 : Apports domestiques en métaux lourds (g/hab/an). (Juste et al, 1995)

Métal	Zn	Cr	Hg	Cd
Fourchette d'estimation	10 - 21	0,6 – 1,2	0,03 – 0,06	0,10 - 0,20

c. Activités commerciales

Elles ont pour origine le déversement de produits liquides provenant des centres commerciaux, de garages, de blanchisseries et teintureries, des restaurants, de laboratoires médicaux, d'ateliers de développement de photos, ...etc.

d. Activités industrielles

Il s'agit également d'effluents liquides partiellement, voire non traités par des entreprises industrielles et qui sont rejetés dans le réseau collectif. Dans les centres urbains importants et pour certains éléments, ce type d'activité joue un rôle essentiel dans la contamination des eaux usées.

"On notera cependant que dans le cas de petites agglomérations, une seule activité à caractère industriel peut contribuer à accroître brutalement la concentration en métaux des effluents de la cité si le volume de ces derniers est modeste" (Juste et al, 1995)

En conclusion, diverses sources interviennent dans l'émission des métaux dans les eaux usées. Ces sources sont principalement liées aux activités industrielles et domestiques.

II.3.2. Sources naturelles

a. Fonds géochimique

Les métaux lourds sont naturellement présents dans la croûte terrestre, ils sont concentrés dans le magma granitique, ils remontent en surface sous l'effet des processus dynamiques des plaques tectoniques, les éruptions volcaniques et les activités des sources thermales. Les roches sont altérées et désagrégées par l'action mécanique de l'érosion et par l'attaque des acides formés dans l'atmosphère (acide carbonique), puis l'eau transporte en aval les débris rocheux et les divers particules mises en solution, et ces dernières s'accumulent dans le lit du cours d'eau lorsque la vitesse de l'eau devient insuffisante pour transporter les particules rocheuses.

Le tableau II.3 donne une indication des teneurs moyennes en métaux lourds de certaines roches.

Tableau II.3 : Teneur moyenne en métaux lourds de différentes roches (en mg/kg)

Elément	Roches cristallines		Roches sédimentaires	
	Roches neutres	Granites	Argiles-schistes	Grés
Cr	50	25	100	35
Ni	55	8	95	2
Cu	35	20	57	-
Zn	72	60	80	16
As	2.4	1.5	6.6	1
Se	0.5	0.5	0.6	0.5
Mo	0.9	1	2	0.2
Cd	-	0.1	0.3	<0.01
Sn	-	3	10	<0.1
Hg	-	0.08	0.4	0.03
Pb	15	20	20	7

Source : F.A.O

b. Apports atmosphériques

Les retombées atmosphériques jouent un rôle important dans la contamination des eaux usées. En effet, leurs retombées sur les voiries, les toitures et les sols contribuent ultérieurement à la contamination du ruissellement pluvial. A cela s'ajoute le caractère acide de l'eau de pluie qui peut jouer un rôle au niveau de la mobilisation des éléments contenus sur les toitures et les voiries. D'autre part, la contamination du réseau d'assainissement est aggravée par les apports particuliers qui résultent de l'érosion éolienne des sols, les fumées et aérosols.

Les quantités de métaux véhiculées par l'atmosphère ont diminué depuis 30 ans, surtout pour le plomb suite au passage à l'essence sans plomb. Les quantités apportées par l'atmosphère varient, de nos jours, suivant l'ordre : Zn>Cu>Pb (alors qu'avant l'interdiction de l'essence au plomb, l'ordre était Zn>Pb>Cu).

Il a été montré que le mode préférentiel de dépôt des métaux traces était le dépôt sec : par exemple Azimi (2004) a évalué la contribution par temps sec à 81 % pour le cuivre, 79 % pour le plomb et 76 % pour le zinc.

En conclusion, la contamination du système d'assainissement par des polluants métalliques est pour beaucoup liée aux activités industrielles (cadmium, mercure et chrome) et urbaines (le plomb et le zinc provenant principalement du lessivage des chaussées). Les sources naturelles interviennent faiblement dans la dégradation de la qualité des eaux usées. (BOUALLEGUE, 2010)

II.4. Normes et réglementation

L'industrialisation des pays développés et en voie de développement a multiplié les unités de production, qui rejettent des déchets sous forme solides, liquides ou gazeux souvent nocifs à l'environnement. Cette fin de siècle a été marquée sur le plan politique par l'apparition de mouvements écologiques dans tous les pays industrialisés ; l'influence grandissante de ces

mouvements a forcé les gouvernements à se préoccuper de l'environnement. Des lois et des décrets ont été votés concernant la protection de l'environnement, ainsi que l'établissement de normes concernant en particulier les concentrations en métaux lourds dans les effluents industriels.

Pour l'Algérie, le décret du 11 juin 2009 qui est publié au Journal officiel de République algérienne démocratique et populaire N° 36a fixé les valeurs limites maximales des paramètres de rejets des installations de déversement industrielles chargés en métaux commesuit

Tableau II.4 : Normes de rejet d'effluent en Algérie

Eléments	Valeurs limites maximales (mg/l)
Aluminium	5
Cadmium	0.1
Chrome trivalent	2
Chrome hexavalent	0.1
Cuivre	1
Cobalt	2
Fer	1
Mercure	0.01
Magnésium	1
Nickel	2
Plomb	0.5
Zinc	2

Source : Journal officiel de République algérienne, 2009

Remarque

Les valeurs maximales sont fixées pour une température de 30° C et un pH qui doit être compris entre 5.5 et 8.5

Le tableau ci-après présente les concentrations des éléments métalliques des rejets des industries du traitement de surface

Tableau II.5 : Teneurs limites des éléments métalliques des rejets dans l'industrie du traitement de surfaces dans les principaux pays industrialisés. (Crine M, 1993)

métal	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb	Al	Cr	Sn	Hg	Normes
Conc(mg/l)	5	0.5	0.5	0.2	0.5	5	0.5	2	0.05	France
Conc(mg/l)	2	2	3	1	1	2	2	-	0.1	Belgique
Conc(mg/l)	3	0.5	0.5	0.2	0.5	3	0.5	1	-	Allemagne
Conc(mg/l)	1	1	2	1	1	10	2	-	0.1	Suisse

D'après le tableau ci-dessous, on constate que l'Allemagne est le pays le plus exigeant en matière de protection de l'environnement concernant les concentrations en éléments traces métalliques.

II.5. Mécanismes de toxicité des métaux lourds

La toxicité des métaux lourds est due essentiellement à :

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

La toxicité d'un élément métallique dans l'environnement dépend de la forme chimique sous laquelle il existe. On peut citer comme exemple, le cas du Mn^{VII} et de l' As^{III} qui sont plus toxiques que le Mn^{II} et l' As^V . L'une des caractéristiques de la toxicité des métaux est leur pouvoir de former des ligands. La disponibilité et la toxicité dépendent de la concentration des ions libres de l'élément, ainsi que de la concentration totale du métal ou de celle du complexe du métal.

II.5.1. Conséquences de la présence des métaux dans les boues des STEP

II.5.1.1. Conséquences sur l'exploitation

❖ Traitements des eaux et des boues

La présence d'une concentration excessive de certains micropolluants dans les eaux usées parvenant à la station d'épuration induit une perturbation au niveau des processus biologiques qui assurent l'épuration des eaux et l'obtention des boues.

En effet, on considère qu'il peut y avoir une diminution de l'oxydation des matières organiques dissoutes et de la nitrification dès que la concentration d'un micropolluant excède 1 mg/l d'eau usée ; des concentrations plus importantes de manganèse et zinc sont tolérées (de 10 mg/l), alors que l'argent déprime l'activité épuratrice dès 0.03 mg/l. La digestion anaérobie des boues est beaucoup plus sensible que le traitement aérobie à l'excès de toxiques minéraux, le zinc et le nickel se singularisent par leur action négative marquée sur les processus anaérobies. (Juste et al, 1995)

❖ Voies d'élimination des boues

La présence de métaux dans les boues d'épuration pose de gros problèmes financiers à la plupart des petites stations d'épuration dont la taille est inférieure à 10 000 éq. hab. En effet, les gestionnaires de ces stations et particulièrement ceux des communes rurales sont obligés à gérer ce problème par des investissements et traitement de la filière boue plus élevés et coûteux. En effet, l'élimination des boues par épandage agricole est interdite. Cela se traduit par une obligation de passer d'une filière boues liquides à une filière boues déshydratées, ce qui suppose des investissements et des charges de fonctionnement importants. A cela s'ajoute le coût de transport et d'élimination dans une unité d'incinération ou dans un centre de stockage.

En outre, L'incinération produit des fumées qu'il faudra traiter, ainsi que des cendres qui doivent être valorisées ou évacuées vers des centres de stockage, et éventuellement y subir un traitement d'inertage. Ainsi, la présence de métaux lourds dans les boues entrave leur valorisation agricole et s'accompagne de coûts d'exploitation et d'investissement onéreux. (BOUALLEGUE, 2010)

II.5.1.2. Conséquences sur l'environnement

Dans l'objectif d'une valorisation agricole des boues, plusieurs recherches ont fait l'objet d'étudier le transfert des éléments métalliques dans le sol et la plante.

❖ Transfert entre constituants du sol : concept de mobilité

Selon les conditions du milieu (pH, température, l'activité biologique, l'humidité, type de sol), les métaux sont amenés soit à se trouver sous forme d'ion libre, soit à se déplacer en solution, soit à s'adsorber sur les argiles et la matière organique du sol. L'alimentation de la solution du sol implique le transfert des éléments-traces des autres phases vers la phase liquide.

Plusieurs études ont montré que les flux d'éléments métalliques apportés par les boues urbaines sont très faibles à l'échelle d'une année et que leur accumulation ne représente pas un risque

pour le milieu naturel si les conditions réglementaires sont respectées. Ceci s'explique par l'importance du pouvoir tampon du sol. En effet, l'apport de 30 tonnes de matières sèche par hectare représente 1% en masse de la quantité de sol sur laquelle les boues sont épandues. En outre, "en admettant qu'il n'y ait aucun lessivage du sol, et que l'accumulation des métaux dans un type d'horizon représente réellement la somme de chaque apport de boue par an, il faudrait 625 à 810 années pour que le sol soit saturé en oligo-éléments cuivre et zinc et de 1720 à 3600 ans pour les autres métaux".

Cependant, d'autres études ont montré que l'abaissement des pH favorise la mobilisation des métaux par échange protonique. De ce fait, la réglementation a interdit l'apport de boues dans les sols à pH acides. (BOUALLEGUE, 2010)

Le schéma suivant définit les différents compartiments du sol et la distribution des micropolluants métalliques entre ces compartiments

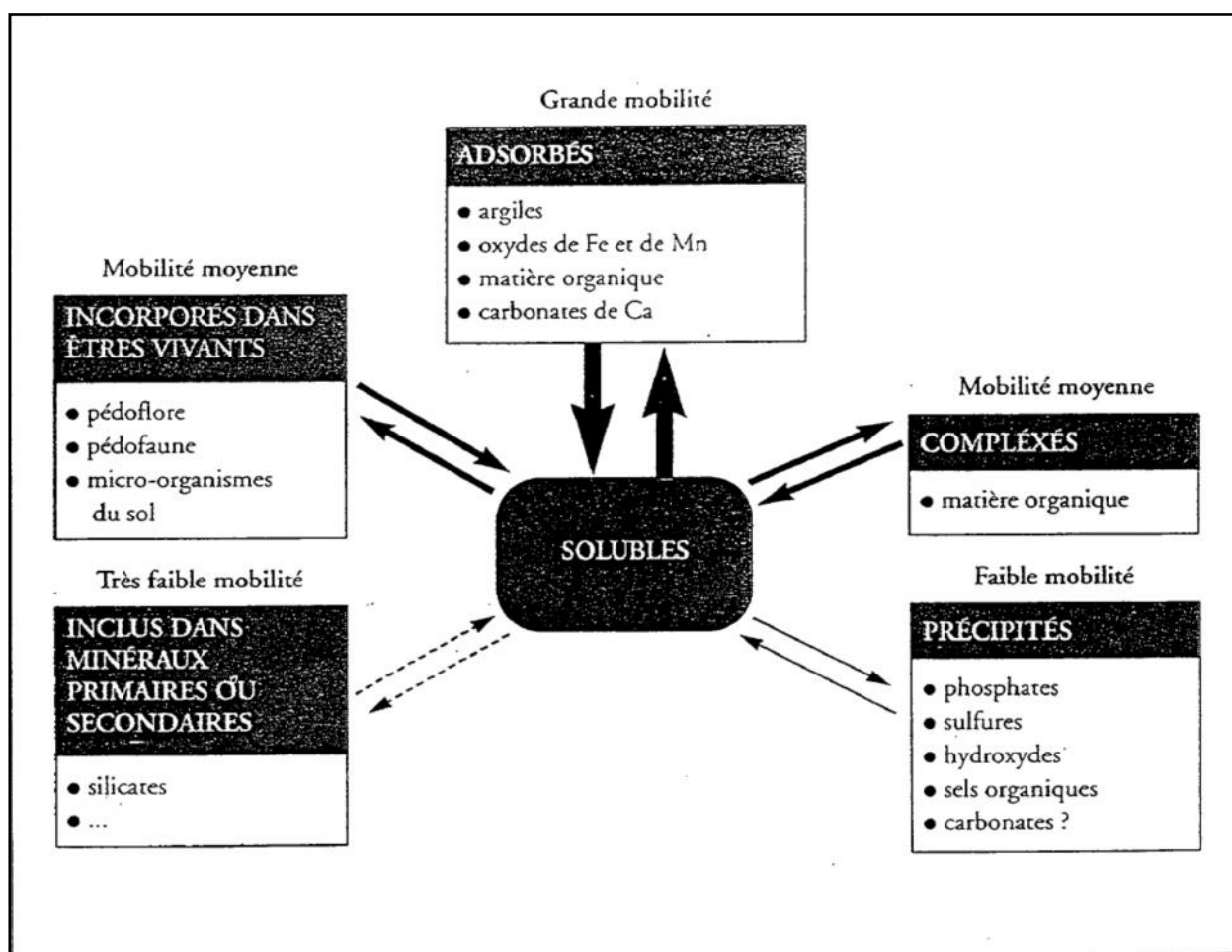


Figure II.2 : Localisation des micropolluants métalliques dans le sol (JUSTE, 1995)

❖ Transfert entre le sol et la plante : concept de biodisponibilité

La phase liquide des boues est constituée de composés solubles des éléments métalliques. Ainsi, un apport massif de boues s'accompagne, à court terme, d'un pic d'adsorption de certains éléments métalliques, facilement assimilables par la plante. Outre les facteurs physico-chimiques (pH, température, humidité, aération du sol,...), la biodisponibilité des éléments

métalliques dépend fortement de la physiologie et du type de la plante. En effet, les céréales et les graminées sont moins accumulatrices de traces métalliques que les cultures maraîchères. C'est la raison pour laquelle l'utilisation des boues résiduelles urbaines dans les sols à cultures maraîchères est interdite

Les éléments-traces métalliques sont absorbés passivement par les racines et sont ensuite transposés dans les différents organes de la plante. Certains éléments (Cd, Ni, Cu, Fe, Mn,) ont tendance à s'accumuler dans les racines, les quantités transportées dans les parties aériennes sont relativement faibles. (BOUALLEGUE, 2010)

II.6. Devenir, rémanence et transfert aux plantes puis aux animaux

Un certain nombre de paramètres influent sur le caractère soluble des ETM, leur permettant une dissémination plus ou moins importante :

- ✓ le composé et sa forme chimique,
- ✓ la structure du sol et son pH (une baisse de pH rend les ETM plus solubles),
- ✓ l'aération du sol et son potentiel redox (l'anoxie favorise la mobilité du fer ou du manganèse),
- ✓ la température et l'humidité,
- ✓ le type de boue apportée,
- ✓ le type de végétaux et d'animaux.

Il est très difficile d'estimer et d'extrapoler la migration possible des ETM dans le sol. Il est également très difficile d'anticiper les teneurs en ETM qui se retrouveront dans les parties comestibles des plantes.

Certains ETM comme le cadmium sont plus solubles s'ils sont liés aux boues. Par ailleurs, certaines cultures céréalières ou potagères sont particulièrement aptes à les concentrer : notamment les blés, maïs, épinards, salades et pommes de terre.

II.6.1. Toxicité chez les animaux et chez l'homme

Face aux différentes voies de valorisation des boues, il convient d'étudier précisément les éléments minéraux persistants dans les boues de station d'épuration et le risque potentiel qu'elles représentent pour les populations animales et humaines.

Il faut à ce titre rappeler les définitions suivantes :

-Le danger « d'un agent physique, chimique ou biologique correspond à l'effet sanitaire néfaste qu'il peut engendrer sur un individu lorsqu'il est mis en contact avec celui-ci. » (PETIT, 2007)

-Le risque est « la probabilité de survenue d'un effet néfaste, indépendamment de sa gravité. »

Les Etats-Unis ont développé une démarche structurée de l'évaluation des risques dans les années 80. Elle est définie comme « une démarche méthodique de synthèse des connaissances scientifiques disponibles en vue d'évaluer les effets sur la santé résultant d'une exposition d'une population ou d'individus à une substance, un agent ou une situation dangereuse » (PETIT, 2007) Cette approche est utilisée pour évaluer les risques sanitaires chimiques, biologiques et radiologiques dans l'environnement.

Dans le cas d'une exposition forte et à court terme des animaux ou de l'homme à un ETM, les manifestations d'intoxication finissent par apparaître. Mais dans le cas d'exposition basse et donc d'intoxication chronique, les signes d'intoxication sont variés et peu spécifiques (effets sur la reproduction ou sur la cancérogenèse).

II.6.1.1. Toxicité chez les animaux

Chez les animaux, on peut détailler pour les ETM les conséquences suivantes :

Cuivre

- ✓ Dose létale de 200mg/kg pour les bovins.
- ✓ Intoxication aiguë : symptômes de violentes coliques avec vomissements, salivation et diarrhée.
- ✓ Intoxication chronique d'origine alimentaire : ictère hémolytique avec muqueuses jaunes et hémoglobinurie. L'ictère peut être précédé d'anorexie, d'amaigrissement, d'anémie et d'œdèmes de la tête et du cou.

Plomb

- ✓ Dose létale de 600-800mg/kg pour les bovins adultes et de 400-600 mg/kg pour les veaux.
- ✓ Intoxication aiguë : symptômes d'anorexie, diarrhée, hypersalivation, et parfois torpeur, coma.
- ✓ Intoxication chronique : les symptômes sont peu spécifiques (anorexie, alternance de diarrhée/constipation).

Cadmium

- ✓ Dose létale évaluée chez le rat et variant selon la forme chimique utilisée ($DL_{50} = 30\text{mg/kg}$ lorsqu'il s'agit de sels solubles et $DL_{50} = 5000\text{ mg/kg}$ dans le cas de sulfure de cadmium)
- ✓ Exposition chronique : néphropathie pouvant évoluer vers une insuffisance rénale, ostéoporose et effets cancérigènes sur les poumons, les testicules, la prostate et effets difficiles à évaluer comme l'augmentation de la pression artérielle.

Mercure

Un dérivé du mercure, le méthylmercure a une forte toxicité. Ce composé est liposoluble est capable de s'accumuler dans le système nerveux. Il est également capable de passer facilement les barrières intestinales et placentaires et d'exercer une action tératogène sur le fœtus.

Toxicité s'accompagnant de troubles nerveux, effets néphrotoxiques, troubles de la reproduction et effets embryotoxiques et mutagènes.

N.B

Ce ne sont pas les seuls éléments traces métalliques à avoir des effets toxiques. Le tableau II.6 présente d'autres ETM, comme l'arsenic, le chrome, le fer, le manganèse, le molybdène, le sélénium et le zinc qui peuvent avoir des effets toxiques, parfois à des doses très faibles. Ainsi, il suffit de 10mg/kg du poids vif d'un animal pour que le molybdène entraîne l'apparition de diarrhée, anorexie, dépigmentation des poils et troubles neurologiques.

Tableau II.6: Autres ETM pouvant présenter une toxicité chez les animaux

Elément Trace Métallique	Effet toxique	Dose Toxique	Espèce
Arsenic	Vomissement, diarrhée hémorragique, chute de tension.	40mg/kg (dose létale)	Bovins, Chevaux
Chrome	Dermatose, irritations des voies respiratoires, cancer des poumons.	700mg/kg (dose létale)	Bovins
Fer	Retard de croissance, anorexie, diarrhée.	> 1000mg/kg/j	Bovins
Manganèse	Retard de croissance, anémie, lésions intestinales, parfois troubles nerveux.	2000mg/kg de matière brute de la ration	Porcs
Molybdène	Diarrhée, anorexie, dépigmentation des poils et troubles neurologiques.	10mg/kg	Bovins
Sélénium	Atteintes musculaires avec pertes d'équilibre, atteinte de la peau et des sabots.	-	Bovins
Zinc	Faible croissance, anémie, défaut de minéralisation des os, atteinte pancréatique et intestinale.	-	Bovins

Les effets résultant d'une exposition à ces ETM sur une longue période sont peu connus et il sera difficile de les relier à un éventuel épandage.

Remarque

La dose létale précise la quantité d'une substance pouvant entraîner la mort d'un pourcentage déterminé d'organismes vivants.

Par exemple, la dose létale 50 signifie que 50 % des organismes meurent.

II.6.1.2. Toxicité chez l'homme

Chez l'homme, les effets à long terme d'ingestion de faibles doses ne sont pas très bien connus. On suspecte par exemple certaines formes d'arsenic, de cadmium, de chrome ou de nickel de présenter des effets génotoxiques possibles.

L'Agence Internationale pour la Recherche contre le Cancer (IARC) a classé le cadmium dans la catégorie 2A, c'est-à-dire avec les substances probablement carcinogènes pour l'homme.

(**Rapport IARC, 1987**). La réalisation d'enquêtes épidémiologiques sur des ouvriers a démontré que le cadmium est impliqué dans l'induction de tumeurs des poumons, de la prostate et des testicules. Des études réalisées sur des rats soulignent son rôle dans le cancer de la prostate et ont montré une relation dose dépendante entre l'inhalation du cadmium et le cancer des poumons. Il s'agit dans ces études de surexpositions particulières, sans mesure avec une exposition alimentaire. Il faut cependant rester vigilant par rapport à cet élément génotoxique.

De même, les études scientifiques chez l'homme attestent d'une augmentation progressive de la charge en cadmium de l'organisme sur les 50 dernières années : d'après **Burgat-Sacaze (1996)** ; les teneurs en cadmium du rein auraient été multipliées par un facteur 47 sur cette période. Cette évolution viendrait de la pollution atmosphérique, du transfert de l'élément dans les chaînes alimentaires, de la pollution due au tabac et des propriétés de bioaccumulation de l'élément (demi-vie du cadmium dans le cortex rénal humain supérieure à 20 ans).

Le comité mixte de la Food and Agriculture Organisation et de l'Organisation Mondiale de la Santé (FAO/OMS) d'experts des additifs alimentaires s'est intéressé plus particulièrement à 3 contaminants de l'alimentation : le mercure, le plomb et le cadmium. En effet, ils ont un pouvoir cumulatif dans l'organisme et sont responsables à long terme d'une toxicité chronique qui s'installe de manière insidieuse. Le comité d'experts a fixé pour les métaux dits « lourds » une Dose Hebdomadaire Tolérable Provisoire ou DHTP. Elles sont calculées pour un adulte de 60kg. Cette dose est « tolérable » car ces contaminants sont présents dans notre environnement et chaque individu en subit la présence. (**PETIT,2007**)

Plomb

La toxicité du plomb est la plus anciennement connue et paraissait être principalement orientée vers le système hématopoïétique. Mais la toxicologie de ce métal a été réactualisée avec l'essor de l'automobile et avec la réduction draconienne de sa concentration dans l'eau potable. Sa toxicité a été envisagée dans les troubles comportementaux et en particulier chez le jeune enfant.

Mercure

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la forme méthylmercure du mercure a une forte toxicité.

Toxicité s'accompagnant de troubles nerveux, effets néphrotoxiques, troubles de la reproduction et effets embryotoxiques et mutagènes.

La DHTP du mercure est de 300 µg dont un minimum de 200 µg de méthylmercure (fixé en 1988).

Tableau II.7 : Effets de quelques éléments Traces Métalliques sur l'homme

Eléments Traces Métalliques	Effets toxiques
Plomb	Inhibition de la biosynthèse de l'hème et accélération de la destruction des érythrocytes. Atteinte rénale (néphropathie et altération progressive de la fonction rénale). Encéphalopathie et troubles neurologiques.
Cadmium	Lors d'intoxication chronique : atteinte irréversible tubulaire, éventuellement glomérulaire ; déminéralisation de l'os et perturbation du métabolisme du calcium des tissus osseux.
Mercure	Lors d'intoxication chronique : atteintes neurotoxiques (paresthésie, dysarthrie).
Cuivre	Intoxications chroniques rares
Arsenic	Intoxication aiguë : vomissements, diarrhée hémorragique, chute de tension. Intoxication chronique : encéphalopathie, défaillance cardiaque, atteintes rénales et hépatiques, dépilations. Cancérogène (Liste I du IARC)
Molybdène	Augmentation de la quantité d'acide urique dans le sang et les urines ; symptômes de gouttes.

Source: Rapport IARC (International Agency on Research on Cancer, 1987)

Actuellement, certains métalloïdes font l'objet de réévaluations écotoxicologiques comme suit :

- **le bore** : ni mutagène, ni cancérogène, ni cumulatif, il était considéré comme pratiquement dénué de toxicité. Une expérimentation de l'organisation Mondiale de la Santé montra une atteinte testiculaire chez un chien et amena l'organisation à fixer la concentration maximale tolérable à 300 µg /litre dans le projet de la future directive sur l'eau.
- **les bromures** : leur présence dans l'eau peut entraîner un risque de toxicité indirecte car ils manifestent une très grande affinité pour les bases puriques et pyrimidiques de l'ADN, potentiellement dangereuse.
- **Autres métalloïdes** : signalons le cas d'éléments traces qui n'avaient jusqu'à maintenant aucune raison de venir polluer les eaux usées et qui devraient être de plus en plus utilisés dans nos sociétés : le platine (en provenance de pots catalytique) et quelques terres rares associées à un emploi industriel (l'indium, le tellure).

II.7. Voies de contamination pour l'homme et leurs conséquences dans le temps

Pour évaluer correctement les risques des ETM pour l'homme, il convient de tenir compte de leurs apports par l'intermédiaire des boues. Mais si l'accumulation en ETM du sol se fait sur quelques dizaines d'années, le temps nécessaire pour l'épuration de ce même sol va s'étaler sur plusieurs milliers d'années.

Les apports réalisés aujourd'hui préparent les éventuels risques pour demain.

La contamination éventuelle de l'homme aura lieu principalement par ingestion d'eau ou d'aliments contaminés (fruits, céréales, viandes d'animaux ayant été préalablement contaminés). L'estimation de l'exposition à un contaminant va tenir compte du niveau de contamination des aliments et de leur niveau de consommation par la population étudiée. Le tableau II.10 présente les données concernant le plomb. Ainsi, pour cet élément, la source principale de contamination se fera par les boissons (33%), mais aussi avec les fruits, les légumes et les céréales. Les viandes et abats n'interviennent que faiblement.

Tableau II.8: Sources de l'apport alimentaire hebdomadaire moyen en plomb

Aliments	Pourcentage de l'apport alimentaire en plomb
Boissons	33,2 %
Légumes et fruits	21,7 %
Lait et produits laitiers	14 %
Céréales	13,8 %
Viandes	4,6 %
Abats	0,3 %

Dans le cas du mercure, (tableau II.11), le niveau de contamination des aliments est faible, à l'exception des poissons et produits de la pêche (près du tiers des apports). Viennent ensuite les fruits et légumes comme sources importantes de contamination alimentaire pour les humains.

(Decloitre, 1998)

Tableau II.9 : Apport alimentaire hebdomadaire moyen en mercure en µg par semaine

Aliments	Pourcentage de l'apport alimentaire en mercure
Produits de la mer	34,4 %
Légumes et fruits	29,9 %
Lait et produits laitiers	14,5 %
Céréales	11,2%
Produits carnés	8,0 %
Boissons	5,7 %

Source : Decloitre, 1998

Le niveau de contamination d'un individu sera bien sûr fonction de ses propres habitudes alimentaires et de son mode de vie. Mais on pu déterminer quels étaient les aliments d'origine animale sources d'ETM pour l'homme, elles sont présentées dans le tableau II.12.

Tableau II.10: Aliments d'origine animale, sources d'ETM pour l'homme

Eléments Traces Métalliques	Type de produit
Arsenic Chrome	Viande
Cadmium Mercure	Abats : foie et reins
Plomb Arsenic	Lait Graisses

Par ailleurs, les experts estiment que le risque est plus élevé chez le jeune enfant. En effet, dans les premières années de sa vie, l'enfant porte très facilement objets et doigts à la bouche. « On estime qu'un jeune enfant peut absorber jusqu'à 5 grammes de terre par jour ». C'est d'autant plus préoccupant qu'entre 5 et 6 ans, l'enfant a un coefficient de pénétration intestinale (50%) très supérieur à celui de l'adulte (5 à 10%) dans le cas des métaux lourds (cadmium, plomb, mercure).

D'autres voies possibles de **contamination** méritent d'être prises en compte :

➤ **contamination par voie respiratoire**

Ce mode d'exposition concerne les égoutiers et les personnels de station d'épuration, les manipulateurs lors des opérations d'épandage ou les agriculteurs. Il s'agit d'une exposition « professionnelle » lors d'inhalation de particules.

Quand aux personnes résidant à proximité des lieux d'épandage, le risque d'exposition par inhalation de poussières est peu probable.

➤ **contamination par contact avec la peau**

La pénétration cutanée du toxique dépendra de 4 paramètres principaux: taux de pollution du sol, quantité de polluant déposé sur la peau, temps de contact avec l'épiderme, liposolubilité du polluant.

Dans le cas des ETM, qui se trouvent rarement sous forme organique plus liposoluble, le passage par cette voie reste négligeable.

Il faut également inclure le risque de sensibilisation cutanée, qui se fera par contact répété avec des sols souillés ou/et des boues contaminées (exemple du chrome et du nickel). Ainsi, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France 1997, cite une étude qui établit une corrélation entre ce risque de sensibilisation et la teneur en chrome du sol : «une concentration dans le sol de 350 à 550 ppm de chrome hexavalent ne devrait pas provoquer de dermatite allergique de contact pour plus de 99% d'une population déjà sensibilisée. ».

Pour l'heure, les ETM sont retrouvés dans la plupart des aliments consommés. Cette source de contamination représente 95% de l'apport total en métaux toxiques.

En conséquence, l'OMS et la FAO ont fixé des doses hebdomadaires admissibles provisoires.

Mais que représente réellement la part de l'épandage des boues dans la contamination de tel ou tel aliment ?

Pour y répondre, il faut reprendre les principales sources de contaminations du sol par les ETM. Le tableau II.13 présente une estimation de leur contribution respective pour les éléments cuivre, zinc, cadmium et plomb. Le tableau II.14 présente quand à lui les origines et flux en ETM sur les sols.

Tableau II.11 : Estimation des apports au sol en ETM par sources majeures de contamination en France

Eléments Traces Métalliques	Cuivre	Zinc	Cadmium	Plomb
Quantité totale	5300 t/an	3700 t/an	68 t/an	8300 t/an
Déchets urbains	5 %	25%	7 %	3 %
Déchets agricoles	19 %	% 61	-	-
Engrais et phytosanitaires	76 %	% 12	% 89	
Retombées Atmosphériques	-	2 %	4 %	97%

Source : Hamel (OTV, 1997)

Tableau II.12 : Origines et flux des ETM en g/ha/an en France

FLUX	Cadmium	Chrome	Zinc	Cuivre	Plomb
Apport par les boues Urbaines	10	150	1700	630	250
Autres flux potentiels	Retombées atmosphériques 3-27	Scories 800-1000	Retombées atmosphériques 100-800	Déjections animales 500-800	Retombées atmosphériques 200-900
	Engrais phosphatés 2-7	Engrais phosphatés 30-60	Déjections animales 1300-1500	-	-

Source : Hamel (OTV, 1997)

L'épandage de boues de station d'épuration participe à la contamination en ETM des sols. Négligeable lorsqu'on observe les flux en cadmium et en Chrome, elle peut atteindre la moitié des apports dans le cas du Zinc, du Cuivre et du Plomb. Mais ces apports viennent augmenter le stock naturel du sol. Ils participent donc à une contamination du sol sur le long terme.

Pour cette raison, des seuils d'épandage ont été fixés réglementairement en Europe pour chaque ETM, de manière à utiliser les boues de station d'épuration en toute sécurité, et à préserver notre environnement sur le long terme.

Selon le rapport parlementaire (France, 2001), «le risque sanitaire lié à l'épandage des boues est apparemment très faible et maîtrisable» :

- « la nécessité de l'épandage est globalement bien admise,
- la qualité des boues s'est fortement améliorée depuis dix ans
- bien maîtrisé, l'épandage des boues n'induit aucun impact connu sur les sols et les produits agricoles ».

De nombreuses études ont été menées sur l'incidence de l'épandage des boues de station d'épuration. Dans leur globalité, elles ne montrent pas de différence significative entre les parcelles ayant reçu les boues et celles exemptes de boues.

Une étude de Wilkinson (2001), alerte cependant sur la dangerosité du cadmium, même en respectant les valeurs limites réglementaires.

Cette fiabilité globale de la filière repose sur :

- ✓ la volonté politique d'encourager et d'accompagner ce recyclage des boues,
- ✓ l'aspect économique et financier d'une telle utilisation,
- ✓ la fiabilité de la filière (respect des réglementations),
- ✓ la fiabilité et le suivi des contrôles,
- ✓ la résolution des questions scientifiques au fur et à mesure de l'émergence de nouvelles problématiques ou de nouveaux risques potentiels.

Si l'Europe s'est engagée dans cette politique de développement durable, ce n'est pas encore une priorité dans les pays du Tiers Monde. Des épandages de boues et d'eaux usées ont régulièrement lieu avec des teneurs toxiques en éléments traces métalliques, portant ainsi gravement atteinte à la santé humaine de ces populations. (PETIT,2007)

En Algérie, seulement 25% de la production de boues en 2012 est utilisée en agriculture.

Conclusion

Les métaux lourds sont des polluants engendrés par l'activité humaine et ont un fort impact toxicologique sur les végétaux, les produits de consommation courante et sur l'homme.

IL a été nécessaire de réglementer les teneurs en métaux lourds des eaux destinées à la consommation, mais aussi des rejets industriels. La problématique des métaux lourds repose sur le fait qu'ils sont très utiles, voire indispensables à l'homme. En effet, de par leurs propriétés, ils entrent dans la composition d'une grande variété de produits. Il semble donc assez difficile de s'en passer et de les substituer.

Aussi, la valorisation agricole reste la voie privilégiée de recyclage des boues. En effet, celles-ci agissent comme un catalyseur de la biologie du sol et non pas seulement comme un engrais au sens strict du terme. C'est surtout en raison de leur richesse en carbone organique, en azote et en phosphore, que les boues sont potentiellement intéressantes pour améliorer les propriétés des sols.

Cependant, il est important de retenir que des analyses des éléments indésirables tels que les métaux lourds dans les compartiments eau-boue-sol doivent être réalisées avant l'utilisation des boues en agriculture.

Chapitre **III**

Procédés
d'élimination des
métaux lourds dans
les eaux et dans les
boues

Introduction

Cette section présente les procédés conventionnels, généralement employés pour le traitement des effluents contenant des ions métalliques. Compte tenu que le choix d'une technique de dépollution nécessite une bonne connaissance de son efficacité et de son contexte d'utilisation, la présentation de ces méthodes de traitement des eaux et des boues visera à faire ressortir leurs avantages et leurs inconvénients.

Nous pouvons distinguer trois grands types de procédés de traitement : les procédés de transfert liquide-solide, les procédés de transfert membranaire et les procédés biologiques.

III.1. Procédés d'élimination des métaux lourds

Le problème de l'élimination des métaux lourds est rendu délicat par le fait de leur activité à des doses souvent très basses. Plusieurs méthodes ont été proposées pour l'élimination de ces métaux, les plus utilisées sont :

III.1.1. Procédés de transfert liquide-solide

III.1.1.1. Précipitation chimique

Cette méthode consiste à précipiter des métaux lourds (Zn, Cd, Cu, Ni.....) dissous rencontrés principalement dans les effluents urbains au moyen des réactifs spécifiques. Elle conduit, suite à une réaction chimique, à la formation de complexes insolubles qui peuvent être ensuite éliminés par une technique de séparation appropriée telle que la filtration ou la décantation.

Lorsqu'il s'agit de traiter des eaux contenant des métaux lourds, il est souvent nécessaire de les prétraiter en vue d'éliminer les composés qui interfèrent avec la précipitation. Il en est ainsi de l'ammoniac et des cyanures qui forment des complexes solubles avec les métaux lourds. Ils peuvent être détruits par chloration en milieu alcalin.

Plusieurs procédés peuvent être envisagés comme la précipitation sous forme d'hydroxydes ou de sulfures. (L. LEVESQUE, 1979)

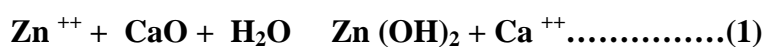
a. Précipitation sous forme d'hydroxydes

C'est une méthode qui consiste à neutraliser les effluents acides, permettant ainsi de précipiter les métaux lourds. Chaque métal dissous a un pH distinct auquel la précipitation optimale d'hydroxydes peut se produire.

En se dissociant, les ions OH^- se lient aux métaux pour donner des hydroxydes métalliques insolubles.

Parmi les différentes bases employées pour la neutralisation, la chaux hydratée et la soude sont les plus utilisées. La soude caustique est plus facile à manipuler et à doser, cependant son emploi est plus coûteux et les boues formées sont plus légères, ce qui entrave leur élimination par décantation. Par contre la précipitation à la chaux est relativement peu onéreuse et les boues formées sont plus compactes et peuvent être éliminées facilement. (L. LEVESQUE, 1979)

A titre d'exemple, Les réactions de bases du zinc et cadmium avec de la chaux vive sont présentées comme suit :



b. Précipitation sous forme de sulfure

Les métaux lourds peuvent être également précipités sous forme de sulfures par réaction avec le sulfure de sodium (Na_2S), dans une étroite zone de pH (6-10), donnant des sulfures colloïdaux qui exigent la coprésence d'hydroxyde de fer pour être floculés. Par exemple la précipitation du sulfure de cadmium est réalisée à un pH compris entre 7,5-8,5. Cette méthode semble donner de meilleurs résultats que la précipitation d'hydroxydes de cadmium par addition de chaux.

Les réactions de base se traduisent par les équations suivantes :



III.1.1.2. Chélation-complexation

Cette méthode consiste à former des complexes organométalliques stables par l'intermédiaire de ligands organiques (complexants) de faible poids moléculaire, généralement les acides humiques et fulviques. La forte affinité des métaux lourds pour ces composés est liée à l'existence des groupes fonctionnels (carbonyle, carboxyle, hydroxyle...). Cette stabilité croit dans l'ordre suivant : $\text{Cu}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$. (Benayad, 2013)

a- Définition

Un complexe (ion ou molécule de coordination) est une molécule constituée d'un ou de plusieurs atome(s) central (aux) (ion métallique) lié(s) à un certain nombre de ligands ou coordinats.

L'atome central est un acide de Lewis, il possède plusieurs lacunes électroniques (orbitales atomiques vides). Les ligands sont des bases de Lewis, ils possèdent un ou plusieurs doublets d'électrons libres pour pouvoir se lier au cation central. Ils peuvent être des atomes (O, Cl, ...etc.) ou molécules, neutres ou chargés (NH_3 , PR_3 , $\text{R}_2\text{C}=\text{CR}_2$, H_2O , ...etc.).

Exmple

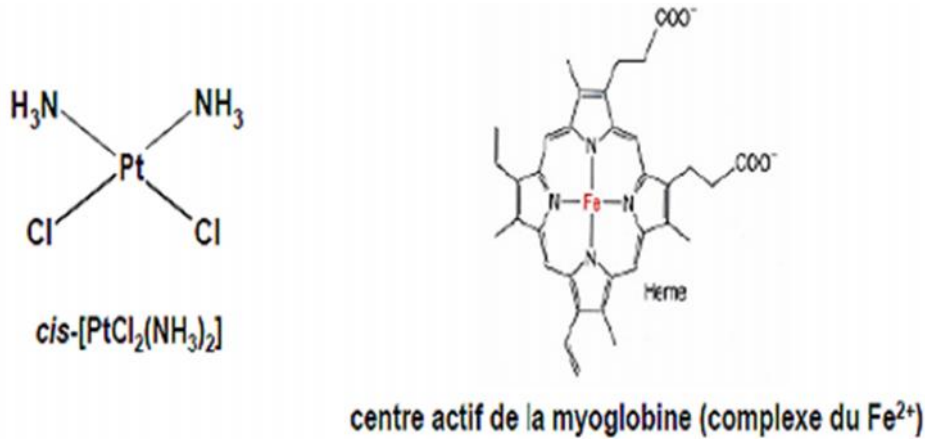


Figure III.1 : Les métaux possèdent deux types de valence

Les métaux possèdent deux types de valence, la valence primaire qui correspond à la formation de l'ion et une valence secondaire, qui correspond au nombre de groupements fixés sur l'ion métallique.

- La valence primaire correspond au nombre d'oxydation
- La valeur secondaire correspond au nombre de coordination.

b -Sphère de coordination et de complexation

La sphère de coordination est constituée par les ligands tandis que la sphère de complexation contient les ions complémentaires du complexe attirés par la force électrostatique. Autour de la sphère de coordination, le solvant forme la sphère de solvatation qui stabilise et isole le complexe.

Exemple : $[Co(NH_3)_6]^{3+}, 3Cl^-$ dans H₂O

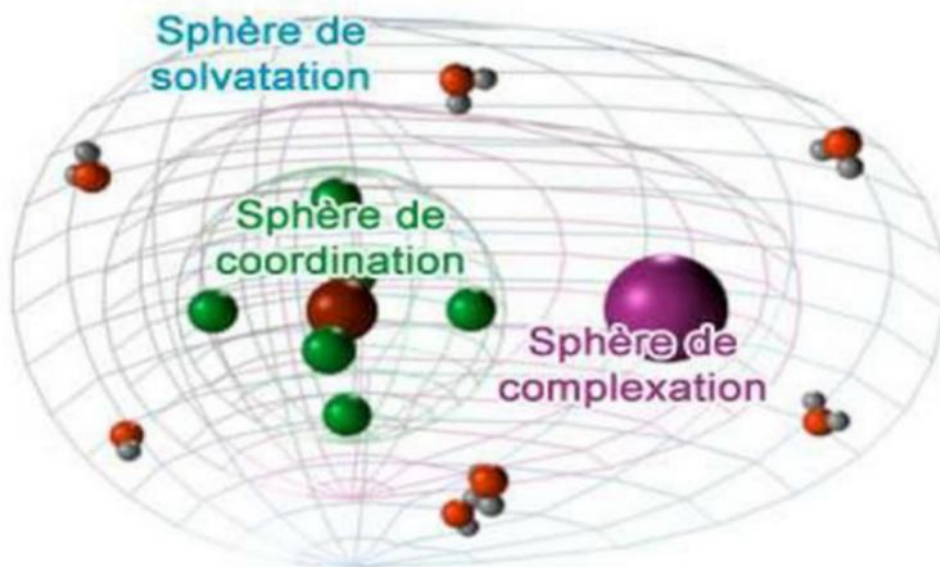


Figure III.2 : Sphère de coordination et de complexation

Un complexe est caractérisé par sa géométrie qui dépend de son nombre de coordination. Les géométries les plus répandues sont l'octaèdre (pour six ligands) et le plan carré (pour quatre ligands).

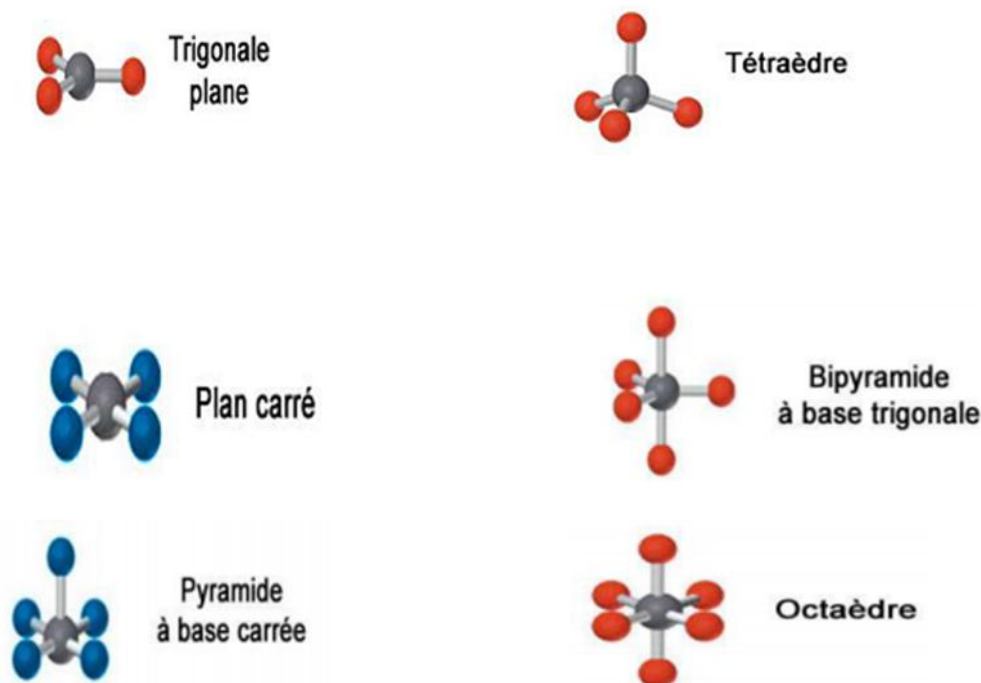


Figure III.3 : la géométrie d'un complexe

c -Types de ligands et complexes

La classification des complexes se base sur le nombre d'ions (ou d'atomes) centraux qu'ils comportent. Ils sont appelés complexes monométalliques ou mononucléaires dans le cas de l'existence d'un seul ion métallique. Si l'entité complexe comporte deux ou plusieurs ions métalliques on la désigne par les termes bimétalliques (binucléaire), trimétallique (trinucléaire), et polymétallique (polynucléaire).

Les ligands sont classés selon leur structure et le nombre d'atomes donneurs.

III.1.1.3.Echange d'ions

L'échange ionique consiste à remplacer les cations complexés d'une solution (cations métalliques) par la même quantité d'équivalents grammes d'autres ions libérés par le complexant. L'argile bentonite, la glauconite et des gels de silice conditionnés, entre autres, ont été évalués pour leurs propriétés d'échangeurs ioniques minéraux naturels et les zéolites puis les résines, pour ceux synthétiques. Cependant, ce traitement est limité par la présence des impuretés dissoutes et les matières organiques ainsi que les alcalino-terreux qui entrent en compétition avec les métaux lourds. (Diard, 1996)

Les réactions d'échange d'ions sont réversibles et sélectives. Elles sont représentées comme suit :



Où R : radical anionique faisant partie de la résine échangeuse d'ions

A⁺ : ions fixés sur la résine neuve

B⁺ : ions en solution

III.1.1.4. Electrolyse

L'élimination des métaux est effectuée par dépôt du métal sur une cathode de réaction. L'inconvénient de ce procédé est la présence des réactions parasites d'oxydoréduction qui peuvent se produire et créer des surtensions au niveau des électrodes. (Benayad, 2013)

III.1.1.5. Adsorption

L'adsorption à l'interface soluté/solide est un phénomène de nature physique ou Chimique par lequel des molécules présentes dans effluent liquide ou gazeux, se fixent à la surface d'un solide.

Le procédé de séparation par adsorption constitue aujourd'hui une des technologies les plus importantes, elle est largement utilisée pour la dépollution et la purification dans des domaines très variés, par exemple les industries pétrolières, pétrochimiques et chimiques, aux applications environnementales et pharmaceutiques, L'adsorption est divisée en deux types :

a -Adsorption chimique (ou chimisorption)

Elle met en jeu une ou plusieurs liaisons chimiques covalentes ou ioniques entre l'adsorbant et l'adsorbant.

- Elle est généralement irréversible, produisant une modification des molécules adsorbées.
- Seules, les molécules directement liées au solide, sont concernées par ce type d'adsorption.
- La plupart des phénomènes chimiques correspondent à des réactions acido- basiques (transfert de proton), d'oxydo-réduction (transfert d'électron), ou de complexation. (Benayad, 2013)

b -Adsorption physique (ou physisorption)

- l'adsorption physique se produit à des températures basses.
- Les molécules s'adsorbent sur une ou plusieurs couches (multicouches) avec des chaleurs d'adsorption souvent inférieure à 20 kcal/mol.
- Les interactions entre les molécules du soluté (adsorbât) et à la surface du solide (adsorbant) sont assurées par des forces électrostatiques.
- La physisorption est rapide, réversible et n'entraîne pas de modification des molécules adsorbées. (Benayad, 2013)

Comparaison entre les deux types d'adsorption

Le tableau montre les différences entre les deux types d'adsorption

Tableau III.1: Critères de distinction entre l'adsorption physique et chimique

Propriétés	Physisorption	Chimisorption
Liaison	Force de van der waals	Chimique
Température du processus	Relativement basse	Elevée
Chaleur d'adsorption	1-10 $kcalmol^{-1}$	10-25 $kcalmol^{-1}$
Processus de désorption	facile	difficile
Cinétique	Très rapide	Lente
Formation de couches	Formation de multicouches	Formation d'une monocouche
Réversibilité	Réversible	Irréversible

Remarque

Le procédé de séparation par adsorption chimique est le plus utilisé car elle est plus efficace, économique et très rapide que l'adsorption physique

III.1.2. Procédés de transfert membranaire**a- Osmose inverse**

Cette technique est utilisée pour le dessalement des eaux de mer, des eaux saumâtres et pour la production d'eau ultra pure. Elle consiste en un transfert de solvant d'une solution concentrée vers une solution diluée par application d'une pression supérieure à la pression osmotique à travers une membrane semi-perméable en acétate de cellulose, en polyamide ou en polypropylène.

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes, l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte le flux d'eau va même s'annuler : cette pression est nommée la pression osmotique II. Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique : c'est le phénomène de l'osmose inverse.

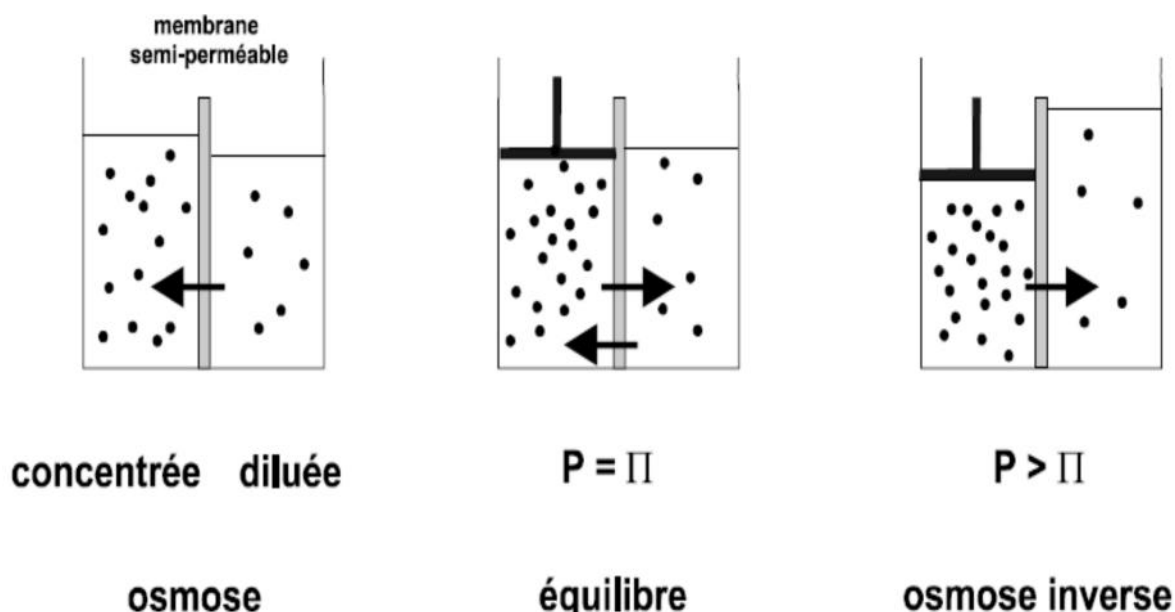


Figure III.4 : Schéma du principe de l'osmose inverse.

En osmose inverse les transferts de solvant et de soluté se font par solubilisation - diffusion: toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent à travers la membrane et diffusent à l'intérieur de celle-ci comme dans un liquide sous l'action d'un gradient de concentration et de pression. Le transfert ne dépend donc plus de la dimension des particules mais de leur solubilité dans le milieu membranaire. Les séparations sont donc d'origine chimique et sont liées au pouvoir solvant de la membrane. (AQUANOSTALGIE, 2007)

b- Electrodialyse

Ce procédé est utilisé pour récupérer de l'Argent, le Nickel et le Cuivre dans des bains de traitement de surface.

L'électrodialyse est une technique qui assure une extraction des ions suffisamment ionisés d'une solution. L'appareil qui l'effectue, un électrodialyseur, est composé de nombreux compartiments et de membranes alternativement anioniques et cationiques. Lors de l'action du champ électrique, la membrane anionique autorise le passage des anions et la membrane cationique laisse franchir les cations. (Benayad, 2013)

Les cations sortent du premier compartiment en franchissant la membrane cationique et sont bloqués dans le deuxième compartiment par la membrane anionique. Les anions migrent dans le sens inverse du courant électrique, ils sortent aussi du premier compartiment en migrant la membrane anionique et sont bloqués par la membrane cationique.

Ce qui explique que le premier compartiment a sa concentration en sel dissous qui diminue. C'est donc un compartiment de dilution. Le deuxième compartiment se voit augmenter en sels dissous. C'est alors un compartiment de concentration. Un compartiment est en dilution, l'autre en

concentration, l'autre en dilution, l'autre en concentration et ainsi de suite. Une électrode à chaque extrémité de l'appareil assure le passage du courant. Les membranes alternativement anioniques et cationiques séparent les compartiments. Les substances non ionisées qui sont dissoutes dans la solution à sa teneur qui reste la même, car le courant électrique n'a aucune influence.

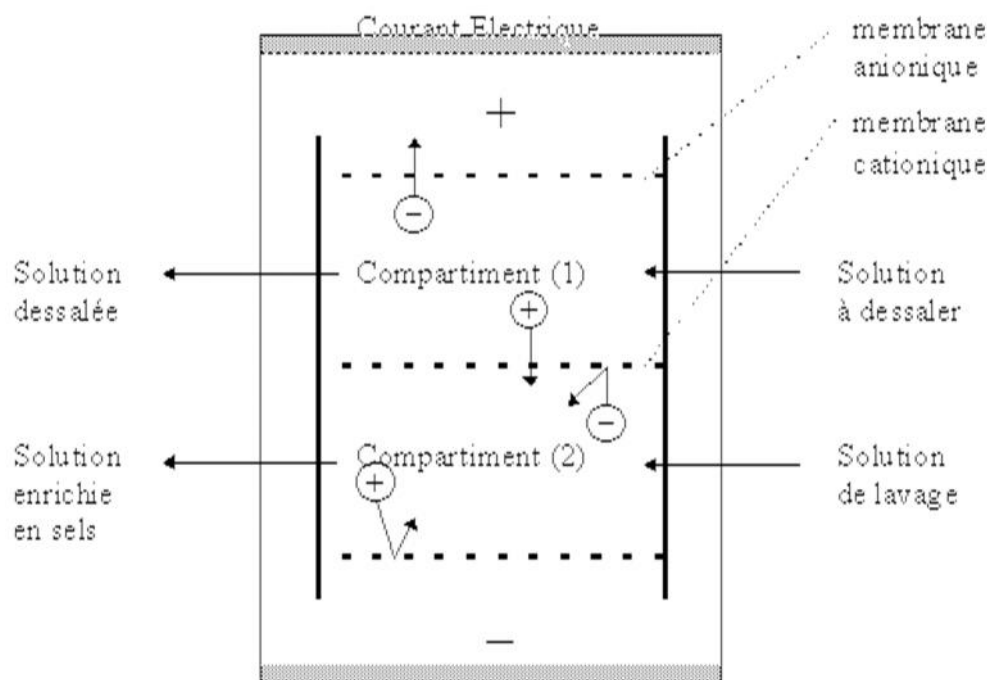


Figure III.5 : Principe de l'électrodialyse

III.1.3. Procédés biologiques

Ces procédés exploitent certains mécanismes de résistance développés par les micro-organismes (bactéries, algues, champignons et levures), qui sont capables de fixer et accumuler les métaux. Ces micro-organismes appelés aussi biomasse, qui sont d'origine forestière, agricole, aquatique, déchets urbains et industriels, sont les plus sérieux pour le développement de bioprocédés d'épuration, dans de nombreux pays (Diard, 1996).

Parmi ceci, le processus de la biosorption, correspond à l'utilisation de matériaux biologiques pour la fixation des polluants par adsorption.

III.2. Avantages et les inconvénients des Procédés d'élimination des métaux lourds**Tableau III.2 :** Les avantages et les inconvénients des Procédés d'élimination des métaux lourds

Procédés	Avantages	Inconvénients
Précipitation chimique	-Mise en œuvre relativement faible -Efficacité pour la plupart des métaux des effluents industriels -Economique	-Production de boue importante -Coût énergétique élevé -Efficacité moindre dans le cas des mélanges de métaux
Echange d'ions	-Ne génère pas de boues - Sélectivité et efficacité pour les métaux	-Prétraitements des effluents nécessaires - Coût élevé
Adsorption	-Bonne efficacité à faibles concentrations -Economique	-Coût relativement élevé, nécessité de régénérer l'adsorbant -Forte influence du pH
Procédés de transfert membranaire	Bonne capacité d'élimination des colorants et des cations métalliques	Risque de colmatage et coût élevé ; production de boue concentrée

Conclusion

Il existe plusieurs procédés physico-chimiques qui traitent les effluents chargés en éléments traces métalliques, tels que la précipitation chimique, l'échange d'ion, l'électrolyse, l'adsorption, l'osmose inverse... Ces systèmes de traitements sont très efficaces mais en raison de leur coût élevés et la complexité de leur mise en œuvre, leur emploi est réduit.

Actuellement, les recherches se sont orientées vers des procédés biotechnologiques, utilisant des microorganismes tels que les bactéries, les algues, les levures et les champignons pour l'élimination des métaux lourds présents dans les effluents, en considération qu'ils sont prometteurs, économiques, préservent l'environnement et simples en gestion.

Chapitre **IV**

Etude comparative
de présence des
métaux lourds dans
les boues de STEP à
boues

Introduction

La présence des métaux dans les boues résiduelles provient de la phase de séparation liquide-solide par décantation due à une rétention par adsorption sur la matière organique, à la formation de complexe insoluble entre cette dernière et la fraction minérale et à la précipitation d'hydroxydes métalliques à partir d'un certain pH (Guibaud et al., 2003, Karvelas et al., 2003). Les teneurs des métaux dans les boues montrent toujours un niveau plus élevé que celui des eaux usées entrant dans l'unité d'épuration (Fars, 1994 ; Karvelas et al., 2003). Ainsi, pour préserver les teneurs naturelles du sol en ETM lors de l'utilisation de boues en agriculture, des réglementations ont été mises en place car, incorporés au sol, les ETM contenus dans les boues peuvent être absorbés par les plantes et s'incorporer ainsi dans la chaîne alimentaire ou bien migrer vers les nappes d'eau souterraines (Moreno et al., 1996 ; Gove et al., 2001).

L'objet de ce chapitre est donc d'examiner les boues d'épuration produites par cinq stations d'épuration en vue de leur utilisation en agriculture. Les résultats présentés dans cette étude sont issus de l'auto-surveillance des STEP.

IV.1 Matériels et méthodes

IV.1.1. Description des systèmes d'épuration

Les cinq stations d'études sont situées au nord de l'Algérie à Hadjout, Koléa, Chenoua, Reghaïa et Beni Messous. Ces stations fonctionnent à boues activées.

a) Station d'épuration de Hadjout

La station d'épuration des eaux usées de Hadjout (Tipasa) est opérationnelle en janvier 2006. Située à proximité de la zone industrielle, cette station dispose d'un débit de 12000 m³/j et traite les rejets des communes de Hadjout et de Meurad

Type de traitement : Boue activée à faible charge.

b) Station d'épuration de Koléa

La station d'épuration des eaux usées résiduelles est implantée au bas de la ville de KOLEA, (coté sud-est) à proximité de Oued MAZAFRAN. Elle occupe une superficie de 27000 m² (180 m x 150m). Elle a été remise en fonction en 2005. Son débit est plus élevé par rapport aux STEP de Tipaza et de Hadjout nouvellement construites. La STEP de Koléa produit annuellement 1400 tonnes de boue correspondant à une capacité de 50000 équivalent-habitants.

Type de traitement : Boue activée à faible charge.

c) Station d'épuration de Chenoua

La station d'épuration (STEP) des eaux usées de Chenoua, mise en service en 2008, prend en charge les eaux usées de Tipasa, Nador et Sidi Moussa et dispose d'une capacité de traitement de 11.200 m³/j pour 70.000 équivalent- habitants.

Type de traitement : Boue activée à faible charge

d) Station d'épuration de Reghaïa

La réalisation de la station a été faite en deux étapes :

Le prétraitement et le traitement primaire ont été mis en service en 1997.

Le traitement biologique a été mis en service en 2008.

Elle traite un débit de 80 000m³ /j correspondant à une capacité de 400.000 Eq/hab.

Communes desservies : Reghaïa, Rouiba, Ain Taya, Heuraoua, El Marsa, Bordj El Bahri, zones industrielles de Rouiba et Reghaïa et Bordj El Kiffan en partie.

Le débit des eaux usées industrielles est de 20 000 m³/j

Le type de traitement adopté à la STEP est les boues activées à faible charge .

Cependant,actuellement, elle fonctionne à moyenne charge à cause de l'augmentation de la charge hydraulique .

e) Station d'épuration de Beni- Messous

La station d'épuration des eaux usées de la commune de Beni Messous occupe une superficie de 13 hectares. Elle a été mise en service en juin 2007 pour traiter un débit de 50.400m³ /j équivalent à une capacité de 250.000 éq/hab. Le site de la STEP offre une possibilité d'extension à 100800 m³ /j correspondant à une capacité de 500000 éq/hab.

Communes desservies : Ain Benian, Chéraga,Beni Messous, Ouled Fayet, Dely- Ibrahim, et Bouzaréah en partie.

Type de traitement : Boue activée à moyenne charge

IV.1.2.Métaux lourds analysés

Les métaux lourds analysés dans ces STEP sont le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le zinc (Zn) et le mercure (Hg).

Il conviendrait de préciser que certains métaux lourds sont indispensables pour les végétaux, mais dont l'utilisation en agriculture peut poser des problèmes. Il s'agit du cuivre et du zinc.

Aussi, les analyses sont effectuées une fois par mois au niveau du laboratoire central sis à Kouba (w Alger) pendant une période de quatre mois allant de janvier à avril de l'année 2014.

IV.1.3.Résultats et discussion

Les résultats obtenus durant la période d'étude sont donnés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.1 : quantités d'éléments traces métalliques contenues dans la boue de la station d'épuration de **Hadjout** et les valeurs limites réglementaires (mg/kg de MS)

Hadjout (mg/kg)						
	Valeur limite (mg/kgMS)	janvier	février	mars	avril	Moyenne
Cadmium(Cd)	10	6	8	6	4	6
Chrome(Cr)	1000	102.8	102.4	104.8	1404	103.33
Cuivre(Cu)	1000	104.4	156.4	146.8	76	120.9
Nickel(Ni)	200	29.6	29.2	28.4	4	22.8
Plomb(Pb)	800	148.8	170	130	140	147.2
Zinc(Zn)	3000	364.4	442.4	581.2	468	464
Mercure(Hg)	10	1.25	1.3	1.25	1.45	1.31

Source : SEAAL, 2014

Tableau IV. 2 : quantités d'éléments traces métalliques contenues dans la boue de la station d'épuration de **Koléa** et les valeurs limites réglementaires (mg/kg de MS)

Kolea (mg/kg)						
	Valeur limite (mg/kgMS)	janv-14	févr-14	mars-14	avr-14	Moyenne
Cadmium(Cd)	10	7.2	6.4	/	4	5.87
Chrome(Cr)	1000	83.6	78	/	140	100.53
Cuivre(Cu)	1000	117.6	151.6	/	88	119.06
Nickel(Ni)	200	23.6	21.6	/	4	16.4
Plomb(Pb)	800	126.8	154.4	/	160	147.06
Zinc(Zn)	3000	496	671.2	/	544	570.4
Mercure(Hg)	10	1.9	1.8	/	2.3	2

Source : SEAAL, 2014

Tableau IV. 3 : quantités d'éléments traces métalliques contenues dans la boue de la station d'épuration de **Chenoua** en mg/kg de MS.

Chenoua (mg/kg)						
	Valeur limite (mg/kgMS)	janv-14	févr-14	mars-14	avr-14	Moyenne
Cadmium(Cd)	10	8	6.4	4	4	5.6
Chrome(Cr)	1000	116.4	99.2	89.6	1876	101.73
Cuivre(Cu)	1000	140.8	150.4	140.4	96	131.9
Nickel(Ni)	200	37.2	25.6	24.8	4	22.9
Plomb(Pb)	800	222	68.4	130	88	127.1
Zinc(Zn)	3000	392	358.8	581.2	500	458
Mercure(Hg)	10	1	1.1	1.4	2.98	1.62

Source : SEAAL, 2014

Tableau IV. 4 : quantités d'éléments traces métalliques contenues dans la boue de la station d'épuration de **Reghaia** en mg/kg de MS.

Reghaia (mg/kg)						
	Valeur limite (mg/kgMS)	janv-14	févr-14	mars-14	avr-14	Moyenne
Cadmium(Cd)	10	7.6	7.6	5.6	/	6.93
Chrome(Cr)	1000	2490.4	2996.4	3098.8	/	2861.87
Cuivre(Cu)	1000	137.2	161.6	192.4	/	163.73
Nickel(Ni)	200	37.6	30.8	28	/	32.13
Plomb(Pb)	800	129.6	116.8	677.2	/	307.87
Zinc(Zn)	3000	5760	4516	7176	/	5817.33
Mercure(Hg)	10	2.2	2.3	1.9	/	2.13

Source : SEAAL, 2014

Tableau VI. 5 : quantités d'éléments traces métalliques contenues dans la boue de la station d'épuration de **Beni-Messous** en mg/kg de MS

Beni messous (mg/kg)						
	Valeur limite (mg/kgMS)	janv-14	févr-14	mars-14	avr-14	Moyenne
Cadmium(Cd)	10	2.4	6.4	4	/	4.26
Chrome(Cr)	1000	109.6	97.2	92	/	99.6
Cuivre(Cu)	1000	149.6	193.2	200	/	180.93
Nickel(Ni)	200	32	31.2	21.6	/	28.26
Plomb(Pb)	800	230.4	121.2	18.4	/	256.26
Zinc(Zn)	3000	355.2	473.2	417.2	/	415.2
Mercure(Hg)	10	1	1.45	1.5	/	1.32

Source : SEAAL, 2014

IV.2. Interprétation

Les concentrations en Cd, Cu, Ni, Hg et Pb dans les boues d'épuration des stations étudiées sont bien en dessous des valeurs qui constituent un risque potentiel pour les sols et l'environnement lorsque les boues sont épandues sur les terres agricoles.

Par ailleurs, les résultats obtenus en Zinc et en chrome au niveau de la station de Reghaia, présentent le principal risque de phytotoxicité et pouvant ainsi affecter les processus microbiens du sol. En effet, L'importance des métaux lourds dans les boues dépend de l'importance des métaux lourds dans les eaux entrant en station. Cependant, il est à rappeler que la STEP de Reghaia reçoit 20000m³/j d'eau industrielle.

Il conviendrait de préciser que la pollution admise à la STEP de Reghaia prend sa source au niveau de la zone industrielle de Rouiba-Réghaia, notamment le chrome hexavalent, émanant de l'unité industrielle SNVI, dont l'une des activités est le traitement de surface des pièces mécaniques. L'application de la réglementation dans ce domaine avec le principe "Pollueur-Payeur" devra contribuer à limiter cette pollution.

Le classement décroissant de la présence des ETM dans les différentes STEP étudiées est le suivant :

Tableau VI.6: Classement des ETM présents dans les boues par ordre décroissant dans les STEP étudiées

La station	Classement des ETM présents dans les boues
hadjout	Zn<Pb<Cu<Cr<Ni<Cd<Hg
koléa	Zn<Pb<Cu<Cr<Ni<Cd<Hg
Chenoua	Zn<Cu<Pb<Cr<Ni<Cd<Hg
Reghaia	Zn<Cr<Pb<Cu<Ni<Cd<Hg
Beni messous	Zn<Pb<Cu<Cr<Ni<Cd<Hg

IV.3. Etude comparative des concentrations en métaux lourds dans les STEP

Les histogrammes suivants récapitulent les teneurs en ETM obtenues dans les cinq stations.

Cadmium

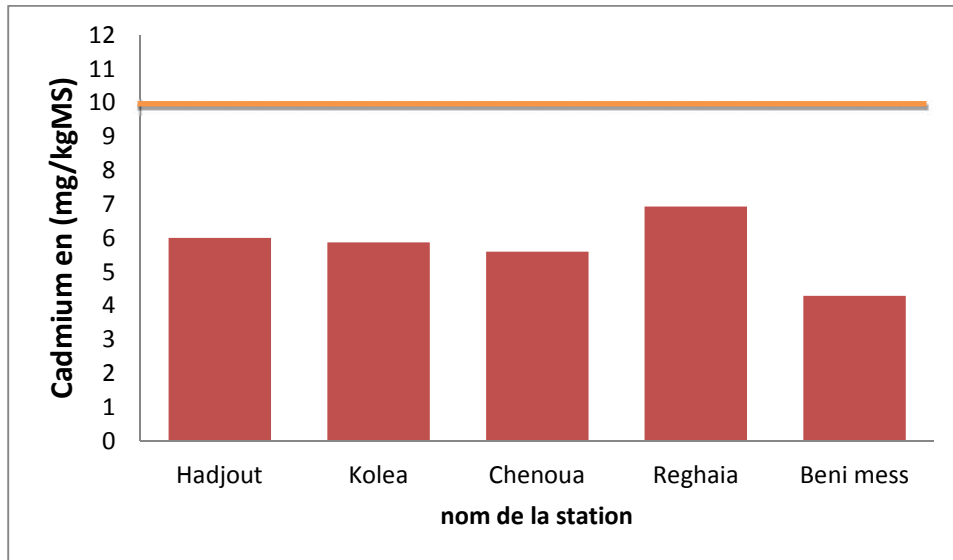
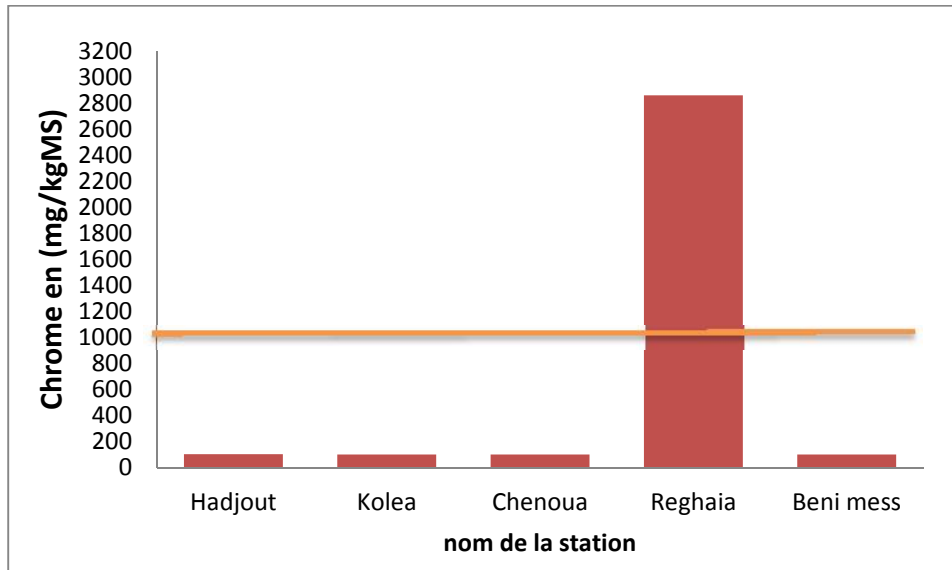


Figure IV.1: Variation des concentrations en Cadmium au niveau des cinq stations

Les concentrations en **Cadmium** des boues obtenues durant la période d'étude dans les cinq stations sont inférieures aux valeurs limites, et elles ne présentent donc aucun danger pour la valorisation de ces boues en agriculture. La valeur maximale est enregistrée au niveau de la station de Reghaia et la teneur moyenne minimale est observée au niveau de la STEP de Beni-Messous. L'ordre décroissant de présence de ce métal dans les différentes STEP étudiées est le suivant : Beni-Messous < Chenoua < Koléa < Hadjout < Reghaia.

Chrome

Dans les milieux aquatiques, la toxicité des dérivés solubles du chrome varie en fonction de la température, du pH, de la dureté de l'eau ainsi que des espèces d'organismes aquatiques concernés.



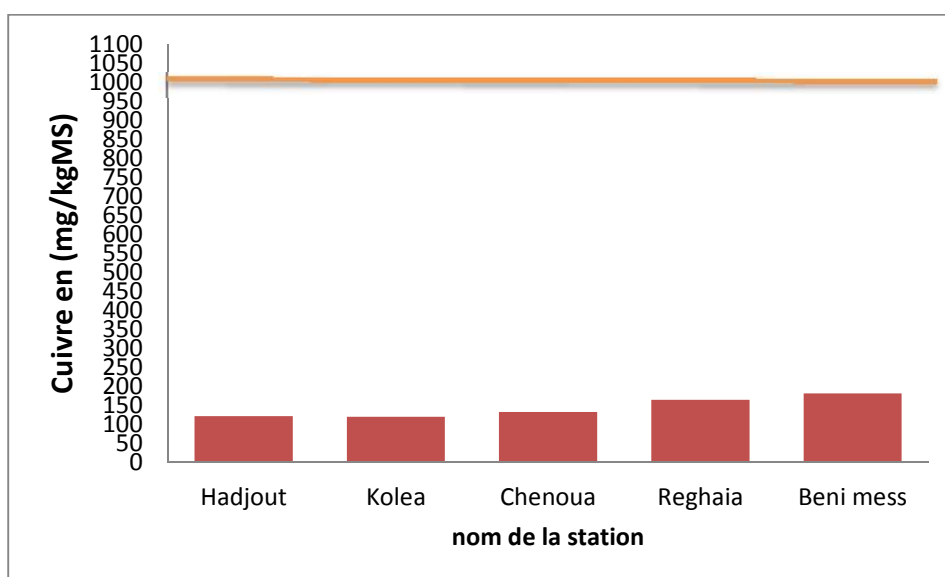
FigureIV.2: Variation des concentrations en Chrome au niveau des cinq stations

Les concentrations en **Chrome** des boues obtenues durant l'année 2014 sont inférieures aux valeurs limites dans toutes les stations à l'exception de la station de Reghaia où on a enregistré une valeur trop importante.

Cette concentration excessive en Chrome est due à un rejet industriel non traité au niveau de l'usine. Une fois le processus du traitement dans cette usine reprendra, les concentrations en Chrome vont diminuer.

Cuivre

La figure ci-dessous représente la variation des teneurs moyennes en cuivre dans les différentes STEP étudiées



FigureIV.3: Variation des concentrations en Cuivre au niveau des cinq stations

Le Cuivre est un élément indispensable, à faible concentration, aux processus vitaux animaux et végétaux. Cet oligoélément peut être prescrit sur des sols carencés, ce qui tend à relativiser son impact sanitaire. On remarque que les concentrations en cuivre sont largement inférieures aux valeurs limites dans toutes les stations ; il ne présente donc aucun danger pour la valorisation de ces boues en agriculture.

La concentration la plus élevée a été enregistrée au niveau de la STEP de Beni-Messous. Par ailleurs, l'émission de cuivre résulte principalement des activités domestiques. En effet, la corrosion des conduites dans les réseaux intérieurs des immeubles intervient considérablement dans le relargage de ce métal.

Nickel

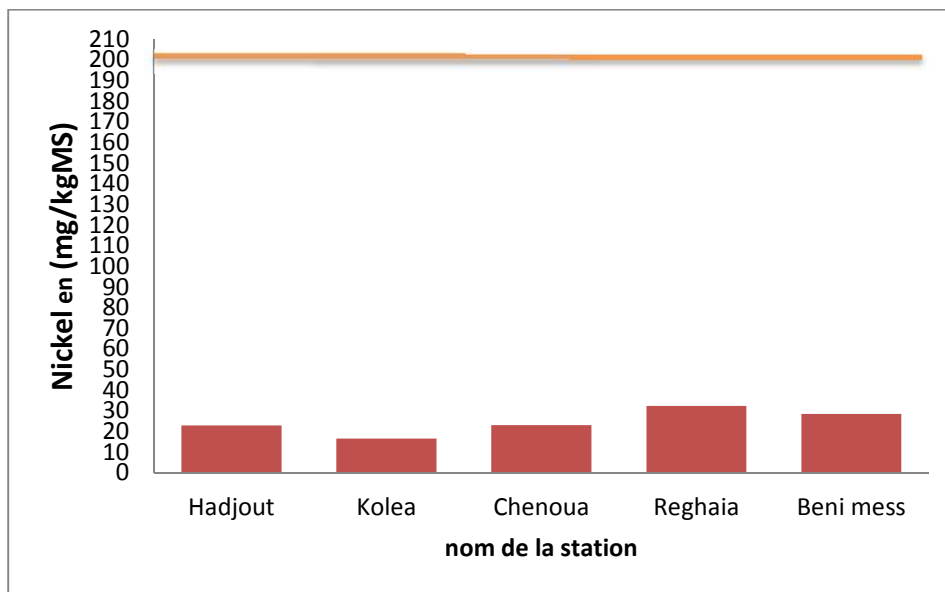


Figure IV.4: Variation des concentrations en Nickel au niveau des cinq stations

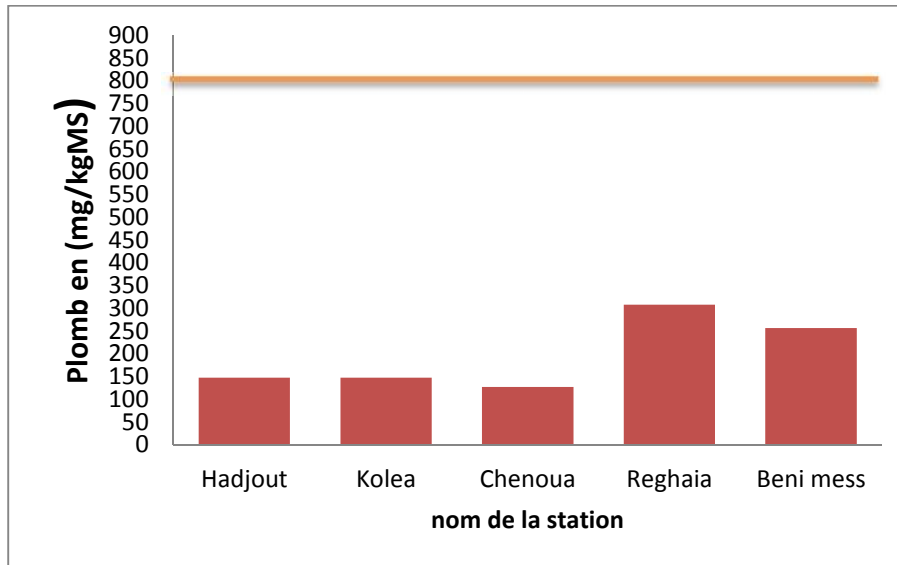
Le Nickel présent dans les fumées industrielles et dans les eaux usées de galvanoplastie, se retrouve dans le sol par les eaux de pluie ou par l'épandage des eaux usées ou de boues.

D'après la figure IV.4, on remarque que toutes les concentrations en **Nickel** sont inférieures aux valeurs limites. Les teneurs moyennes en nickel dans les différentes stations sont comparables, avec une légère augmentation de la valeur moyenne au niveau de la station de Reghaia. Ces teneurs sont voisines pour les stations Hadjout et Chenoua.

Plomb

L'industrie métallurgique et minière est la principale source d'émission humaine, le plomb étant présent dans les déchets d'exploitation. On peut citer également la présence de plomb dans les batteries automobiles

La figure ci-dessous représente la fluctuation de la concentration de plomb dans les boues des cinq stations :



FigureIV.5: Variation des concentrations moyennes en Plomb au niveau des cinq stations

La concentration de Plomb dans les boues des cinq stations oscillant entre 127 et 307 mg/kgMS et toutes les valeurs sont inférieures à la valeur limite évaluée à 800 mg/kgMS pour une éventuelle valorisation agricole des boues. Aussi, la plus faible teneur en Plomb est observée au niveau de la STEP de Chenoua qui reçoit principalement des eaux d'origine domestique et la valeur la plus élevée est enregistrée au niveau de la STEP de Reghaia qui traite en plus des eaux domestiques, les eaux industrielles.

Zinc

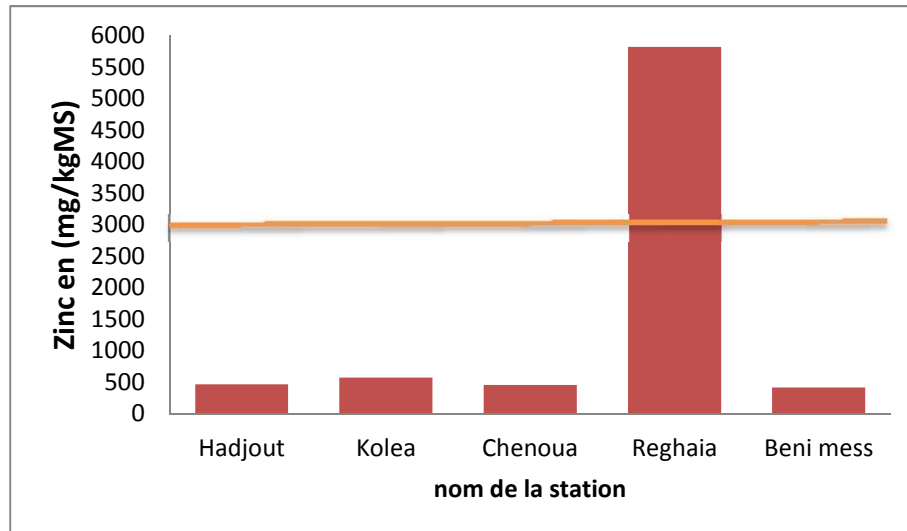
Le zinc fait partie de la nature, la plupart des roches et de nombreux minéraux en contiennent dans des proportions diverses. Le zinc est également présent de façon naturelle dans l'air, l'eau et le sol.

Aujourd'hui le zinc, utilisé dans les procédés de revêtement de l'acier, assure la protection contre la corrosion. Le zinc est également utilisé dans :

- le laiton et autres alliages ;
- les équipements automobiles, appareils électroménagers, installations, outils, jouets, etc ;
- le bâtiment et la construction ;
- les produits pharmaceutiques, les équipements médicaux et les produits cosmétiques ;
- les pneumatiques et tous les produits à base de caoutchouc ;
- les engrais et la nourriture pour animaux.

Le zinc est, enfin, un élément essentiel et indispensable pour la santé de l'être humain et pour l'ensemble des organismes vivants, d'où l'interaction relativement complexe entre cet élément et l'environnement.

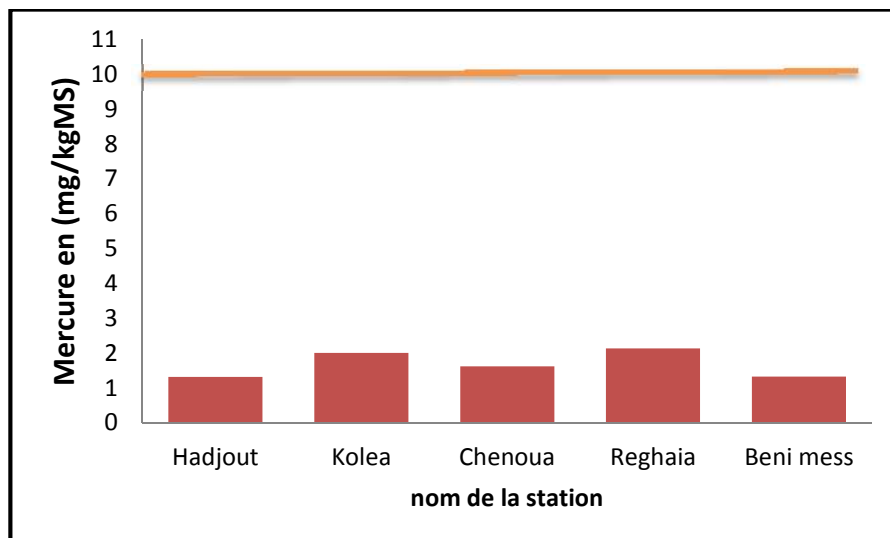
L'histogramme suivant représente l'évolution de la concentration de zinc dans les boues des différentes stations d'épuration étudiées.



FigureIV.6: Variation des concentrations en en Zinc au niveau des cinq stations

D'après l'histogramme, on remarque que la concentration de Zinc pour la station de Reghaia, dépasse celles de toutes les autres stations étudiées avec une valeur de 5817.33mg/kg MS. Par ailleurs, le zinc est un oligo-élément nécessaire à la nutrition des plantes en quantité faible. Cependant c'est un élément toxique à des concentrations importantes. Ainsi la valorisation en agriculture des boues issues de cette STEP n'est pas recommandée.

Mercure



FigureIV.7: Variation des concentrations en Mercure au niveau des cinq stations

On constate que les concentrations de Mercure (Hg) dans les boues des cinq stations d'épurations restent très faibles par rapport au seuil et varient entre 1.31 et 2.13 mg/kg MS. En effet, la source d'émission de mercure dans les eaux usées est principalement liée à l'activité industrielle.

Conclusion générale

Le sol est le milieu récepteur d'une grande variété de déchets produits par l'activité humaine; c'est le cas des boues des stations d'épuration des eaux usées urbaines. Ces boues, produites par procédés physique, physico-chimique ou biologique, représentent un volume considérable et leur élimination requiert un traitement préalable, adapté à leur destination finale (mise en centre de stockage des déchets, incinération ou valorisation en agriculture).

Par ailleurs, ces boues renferment parfois des quantités importantes de métaux lourds qui rendent non seulement leur utilisation en agriculture impossible mais ils présentent aussi un grand risque vis-à-vis de l'environnement et de la santé humaine vu qu'ils peuvent être source d'un bon nombre de maladies graves tels que les troubles digestifs ainsi que différents cancers.

L'objectif de notre travail est d'examiner les boues d'épuration des cinq usines de traitement des eaux usées (STEP) situées au Nord d'Algérie en vue de leur réutilisation agricole.

L'étude comparative de la présence des métaux lourds (Cd, Cu, Zn, Pb, Hg, Cr et Ni) dans les boues des cinq STEP à boues activées à savoir Hadjout, Koléa, Chenoua, Reghaïa et Beni Messous a mis en exergue les résultats suivants :

- ❖ Les teneurs obtenues en ETM dans les boues des STEP de Hadjout, Koléa, Chenoua et Beni Messous sont inférieures aux valeurs limites ; ce que ne présente donc aucun danger pour la valorisation de ces boues en agriculture,
- ❖ Les teneurs en ETM contenues dans les boues d'épuration de la station de Réghaïa en termes de zinc (5817.33 mg/kg de MS) et du chrome (2861.87 mg/kg de MS) sont très élevées et dépassent les normes. De ce fait, la valorisation agricole de ces boues n'est donc pas autorisée.
- ❖ Le classement décroissant des concentrations en ETM dans les STEP Hadjout, Koléa et Beni-Messous est : Zn<Pb<Cu<Cr<Ni<Cd<Hg. Tandis que pour la STEP Chenoua, il est Zn<Cu<Pb<Cr<Ni<Cd<Hg et pour la STEP Reghaïa, nous avons Zn<Cr<Pb<Cu<Ni<Cd<Hg.
- ❖ Le classement décroissant des concentrations en Zinc dans les STEP étudiées est Reghaïa>Koléa>Hadjout>Chanoua>Beni-Messous.
- ❖ Les teneurs obtenues en chrome dans les STEP étudiées excepté la STEP de Reghaïa sont très voisines et varient entre 99,6 et 103,33 mg/kg de MS.

Il conviendrait de préciser que la politique nationale actuelle privilégie la valorisation agricole de ce sous produit. L'utilisation agricole des boues est donc généralisée sous réserve du respect des normes fixant les teneurs en métaux lourds ainsi que les conditions agronomiques et sanitaires d'épandage des boues

En effet, pour éviter tout enrichissement en éléments traces métalliques des sols soumis aux épandages de boues de STEP, l'Algérie doit se doter d'un dispositif réglementaire, qui indique que les boues des STEP doivent être considérées comme des déchets, mais également comme

une matière fertilisante. Ces textes fixeront les précautions d'usage vis-à-vis de la qualité des boues et des propriétés des sols. Aussi, l'évaluation de l'impact des épandages de boues sur les sols, demande le développement de méthodes d'analyses et d'études, en laboratoire et sur le terrain, qui permettent de prévoir les possibilités de mobilisation et d'accumulation des métaux apportés par les boues.

Aussi, le producteur de boues doit assurer une autosurveillance de la qualité de ses boues, de la qualité des sols ayant reçu des boues et des traitements mis en œuvre. Par ailleurs, une manière efficace pour éviter la présence d'éléments indésirables dans les boues est de veiller à ce que les eaux usées n'en apportent pas jusque la station d'épuration. Concrètement, un tel objectif peut être réalisé grâce à l'information des usagers, au contrôle des rejets dans les réseaux (des industriels, artisans, hôpitaux, cliniques...) et éventuellement par la mise en place d'un dispositif de collecte sélective des déchets toxiques.

Références bibliographiques

- ADEME (2002a)**, Bilan entre les micropolluants organiques, éléments traces métalliques, paramètres agronomiques, pH et matières sèche des boues de stations d'épuration d'effluents urbains. Données de janvier 1998 à avril 2000. 93p.
- ADEME**, (Agence pour le Développement durable Et la Maîtrise de l'Energie) (1994)
Les germes pathogènes dans les boues résiduaires urbaines
Dossier documentaire - Collection « Connaître pour agir » Guides et cahiers techniques. 92p
- AMORCE**, Boues de station d'épuration : techniques de traitement, valorisation et élimination, série technique, 2012.
- AKROUR Zehira et AOUDAD Sonia**, étude des performances et des procédés d'un système d'épuration en vue de la réalisation d'une STEP cas de sous bassin versant Mechtras. MFE (ingénieur) U.M.M.T.O promotion 2005/2006.
- AQUANOSTALGIE**, Osmoseur, Qualité de l'eau en aquariophilie, France, Janv 2007.
- BOUALLEGUE Mohamed Mehdi**, AgroParisTech –ENGREF à Montpellier 648, Rue Jean-François Breton, SYNTHÈSE TECHNIQUE : Des métaux dans les boues de stations d'épuration ? Conséquences, origines et prévention, pp.5-8, (2010)
- Crine M**, Le traitement des eaux industrielles chargées en métaux lourds. Turbune de l'eau, N°. 561 (1993) 3-19
- DECLOITREF**, 1998. La part des différents aliments dans l'exposition au plomb, au cadmium et au mercure en France. Cah. Nutr. Diét., 33, 3, 167-175.
- Diard P**, Etude de la biosorption du plomb et du cuivre par des boues de stations d'épuration. Mise en œuvre d'un procédé de Biosorption à contre-courant .Thèse de Doctorat de l'INSA Lyon, France, (1996)
- DUCROT C, MEFFRE C**. Risque sanitaire toxicologique lié à l'épandage agricole des boues de station d'épuration. Revue Méd. Vét., 147, 6, 439- 444, (1997)
- Fars, S.**, 1994. Etude de l'élimination des métaux lourds (Cu, Zn, Pb et Cd) contenus dans les eaux usées de Marrakech par quatre systèmes expérimentaux : Lagunage anaérobie, Lagunage aéro-anaérobie, Sur-irrigation drainage et infiltration-percolation. Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 157 p.
- Gove, L., Cooke, C.M., Nicholson, F.A., Beck, A.J.**, 2001. Movement of water and heavy metals (Zn, Cu, Pb and Ni) through sand and sandy loam amended with biosolids under steady-state hydrological conditions. Bioresource Technol., 78, 2, 171-179.
- Guibaud, G., Tixier, N. Bouju, A. Baudu. M.**, 2003. Relation between extracellular polymers' composition and its ability to complex Cd, Cu and Pb. Chemosphere, 52, 10, 1701-1710
- HAMEL M**, Traiter et valoriser les boues. OTV, 457p. (1997)
- HADJRABAH Mansour**, thèse : Contribution à l'étude de traitabilité de la station d'épuration de Réghaia. Promoteur Mr M.NAKIB 2004/2005 (ENP)

HOULI S, thèse : étude des performances épuratoires de la station d'épuration de Béni Merad W. Blida-octobre 1990

Houot S et al., Qualité des composts issus de déchets ménagers : apport du site Qualiagro, 2012.

Journal officiel de République algérienne démocratique et populaire N° 36, le décret du 11 juin 2009

Juste C., Chassin P., Gomez A., Linères M., Mocquot B., 1995. Les micro-polluants métalliques dans les boues résiduelles des stations d'épurations. Angers, Ademe, 209 p.

J.PIERRE SCHAREF, R. PERRIN, chimie industrielle, 2^{ème} édition, université d'Annaba. 2003.

Karine, Marie, Béatrice PETIT : thèse pour le doctorat vétérinaire (actualisation des connaissances sur les éléments biologiques et minéraux persistants dans les boues des stations d'épuration), école nationale vétérinaire d'ALFORT, promotion 2007

L. LEVESQUE, les micropolluants minéraux dans les eaux superficielles continentales rapport N° 6, le Cuivre, le Chrome et le Nickel, Office International de l'eau, 1979, p198

Maisonnave V, Impact des épandages de boues sur la teneur en éléments traces métalliques dans un sol et un végétal, Techniques Sciences Méthodes, 4, pp. 41-49.

Président : M. Professeur à la Faculté de Médecine de CRETEIL, (2003)

Mr HOUARI Benayad, thèse de magister : Synthèse, Caractérisation et Application dans l'Environnement d'un Nouveau Ligand, dérivé de la Thiosemicarbazone, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN, 09/12/2013pp27,36.

MONTCHARMONT A., (1999). Les risques sanitaires liés à l'épandage de boues de stations d'épuration urbaines. Thèse Méd. Vét., Université Claude Bernard, Lyon ; n° 31, 113p.