

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de l'Environnement

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIÈRE : Génie des Procédés

Spécialité : Génie des Procédés de l'Environnement

Par

➤ **Madoui Khouloud**

Intitulé

Contribution à la stabilisation et la valorisation des boues de stations d'épuration par co-compostage (boues-déchets verts)

Soutenu le : 25/09/2023

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Dilmi Abdelkader</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ_BBA</i>
<i>Berki Sarra</i>	<i>MCB</i>	<i>Examinatrice</i>	<i>Univ_BBA</i>
<i>Ayeche Riad</i>	<i>Pr</i>	<i>Encadrant</i>	<i>Univ_BBA</i>
<i>Seghiri Abdelmadjid</i>	<i>Chef service</i>	<i>Invite</i>	<i>DSA</i>

Année Universitaire 2022/2023



Remerciements

Je tenais à remercier avant tout puissant qui nous a donné la volonté, la force et la patience pour élaborer mon travail.

Je remercie particulièrement mon encadrant Mr. Riad Ayeche pour leur aide précieuse, leur constructifs orientation d'efforts pour la réalisation de ce travail.

Les travaux reportent dans ce mémoire ont été effectués au laboratoire de CETIM et laboratoire de SARL GIPAR, alors je remercie le groupe GICA et groupe MECHERI pour son accueil.

Je remercie le PDG de station de traitement des eaux de Bougaa

Je remercie aussi tous les enseignants du département de génie de l'environnement.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail : ma grand et ma petite famille, mes amis ainsi que des personnes que j'ai eu l'honneur de connaître tout au long de ce parcours et qui m'ont conseillée, orientée et aidée.

Du fond du cœur je vous dis : MERCI.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :



*A ceux que j'aime beaucoup, qui ont sacrifiés leurs vies pour que je
réussie*

*Ceux qu'ils sont toujours de mes cotes, ce que j'ai de plus cher dans
ma vie, a vous mes parents et mon mari que dieu les garde pour moi.*

A ma belle-fille Farah

A mes chère sœur Soumiya et Ikram



*A mes chers frères Mohamed, Sedik, Saleh, Ibrahim, Ayoub, Youcef, et
Yacine*

*A ma deuxième famille mon bon père Messaoud et ma belle-mère
Houria*

*A ma grande famille et à toutes les personnes qui m'ont encouragé et
se sont donné la peine de me soutenir durant cette formation*

A mes chères amies Bisma et Youssra,



Table des matières

Introduction générale.....	1
chapitre I: pollution et traitement des eaux	
I.1. Introduction.....	3
I.1 Les eaux usées.....	3
I.2 Caractéristique de l'effluent entrant en station d'épuration.....	4
a) Les effluents domestiques :.....	4
b) Les effluents d'établissement industriels, communaux ou artisanaux :.....	4
c) Les effluents d'agriculture :.....	4
d) Les effluents d'origine naturelle :.....	4
I.2. Définition et origine des boues d'épuration.....	5
I.3 Classification des principaux polluants	5
I.4. Principe du traitement biologique.....	6
I.5. Fonctionnement d'une STEP à boues activées	7
I.5.1. Filière de traitement des eaux usées :.....	7
I.5.1.1. Prétraitement.....	8
1) Dégrillage	9
2) Dessablage.....	9
3) Déshuilage ou dégraissage.....	10
I.5.1.2. Traitement primaire	10
I.5.1.3. Traitement secondaire.....	10
I.5.1.4. Clarification	11
Chapitre II : Composition et traitement des boues résiduares	
II-1. Généralité :	13
II-2. Définition :	13
II.3. Nature et origine	13
II.3.1. Boues primaire.....	13
II.3.2. Boues physico-chimique.....	13

II.3.3. Boues biologique	14
II.4. Principales étapes de traitements des boues	14
II.5. Procédés de réduction de la teneur en eau des boues	14
II.5.1. Lit de séchage	14
II.5.2. L'épaississement	15
II.5.3. La déshydratation.....	15
II.5.4. Stabilisation des boues.....	15
II.6. Composition des boues résiduaires.....	16
II.6.1. Carbone	16
II.6.2. Matière organique	16
II.6.3. Éléments fertilisants.....	16
II.6.4. Azote	16
II.6.5. Phosphore.....	17
II.6.6.Teneur en bases.....	17
II.6.6.1. Potassium	17
II.6.6.2. Calcium	17
II.6.6.3. Magnésium	18
II.6.6.4. Sodium	18
II.8. Utilisation agricole des boues résiduaires	18
II.8.1. Valeur agronomique.....	18
II.8.1.1.Valeur amendante	18
II.8.1.2.Valeur fertilisante	19
II.8.2. Législation de l'épandage des boues.....	19
II.9. Impact de l'épandage des boues sur l'environnement	19
II.9.1. Effets défavorables.....	19
II.9.1.1. Parasites.....	19
II.9.1.2. Phytotoxicité.....	19

II.9.1.3. Dégradation de la structure.....	19
II.9.2. Effet des boues sur la culture	20
II.9.3. Effet des boues sur le sol	20
II.9.3.1. Effet sur les propriétés chimiques, physiques et biologiques.....	20
<i>Chapitre III :</i>	16
Chapitre III :	22
III.1. Définition du compostage	22
III.2. Les mécanismes impliqués.....	22
III.4. Objectifs du compostage	24
III.5. Quels déchets composter ?	24
<i>III.5.1. Les boues de station d'épuration.....</i>	24
<i>III.5.2. Les déchets verts.....</i>	24
<i>III.5.3. Les déchets ménagers</i>	25
III.6. Les Types de compostage.....	25
III 6.1. Aérobie	25
III.6.2. Anaérobie.....	25
III.6 .3. Qualité du compost.....	26
III.6.3.1. Définition de la qualité d'un compost.....	26
III.6.4 Importance de la qualité du compost.....	27
III .6.4. 1. Maturité et stabilité	27
III.6 .4.2. Caractéristiques physico-chimiques classiques	27
III.6.4.3. Valeurs agronomiques	27
<i>Chapitre IV :</i>	24
<i>Matériels et plans d'expériences</i>	24
Chapitre IV : Matériels et plans d'expériences	29
IV. 1. Echantillonnage.....	29
IV.1.1.Echantillonnage des boues	29

IV .1.2. Echantillonnage des déchets verts	29
IV.2. Préparation des échantillons aux analyses	29
IV.3. Préparation le co_compostage :	30
IV.3.1 Traitement et analyse de boue :	30
IV.3.2. préparation l'amendement (déchet végétale)	30
IV.4 . Caractérisations physiques et chimiques.....	31
IV.4.1 . Mesure du pH	39
IV.4 .2. Matière sèche	39
IV.5 . Analyse des métaux lourds	41
RESULTATS ET DESCUTION :.....	41
IV.6. Qualité des boues	35
IV .7 Résultats des analyses de sole étudiées	41
<i>Conclusion générale</i>	42
<i>Références bibliographiques</i>	42

Liste des figures :

Figure I. 1 : Les différentes sources de pollution de l'eau

Figure I. 2 : Le schéma global d'une filière de traitement des eaux usées par boues activées est illustré sur la Figure I.1.

Figure I. 3 : Dégrillage

Figure I.4 : Dessaleur-déshuileur

Figure I.5 : Bassin biologique

Figure I.6 : Aération dans un bassin biologique

Figure I.7 : Clarificateur

Figure I.8 : Récupération des eaux épurées du clarificateur par surverse

Figure. IV .9 compostages DV

Figure. IV .10 compostages boues

Figure. IV .11 Protocole d'échantillon

Figure IV.12 : les étapes de culture

Figure IV.13 : mélangeur

Figure IV.14 Mesure du Ph

Figure IV.15 étuves

Figure IV.16 Four à moufle

Figure IV.17 longueurs de plant selon le pourcentage de boue et de DV

Figure IV.18 Echantillon 0 témoin

Figure IV.19 Echantillon N 12

Liste des tableaux

Tableau IV .1 : protocole de culture

Tableau IV .2 : Caractéristiques De sole

Tableau IV. 3 Caractéristiques des composants initiaux et du compost final

Tableau IV. 4 : Analyse la teneur en éléments traces (Cd, Cr, Cu, Ni, Zn) de la boue STEP Boussaâda Laboratoire central ONA (STEP,2019).

Liste des abréviations :

MO: matière organique

MS : matière sèche.

MES : matière en suspension.

O₂ : oxygène.

CO₂ : dioxyde de carbone.

STEP : station d'épuration des eaux usées.

ONA : office national de l'assainissement.

P : phosphore.

DV : déchet vert

NH₃ : ammoniac

ISB : indice de stabilité biologique

°C : degré Celsius

Résumé

Afin d'éliminer et de valoriser les bio déchets, de nombreuses collectivités ont opté pour une plate-forme de compostage. Les exigences de qualité des composts nécessitent actuellement un nombre important de caractérisations physico-chimiques et biologiques. Nos objectifs ont donc été d'étudier les processus du compostage et de mettre au point une méthode simple et efficace de suivi de l'évolution chimique et biologique des sols pauvres.

Notre étude a porté sur un co-compostage de 3 mois en andains constitués d'un mélange de boues de station d'épuration urbaines et de déchets verts broyés. Les composts ont été caractérisés par des paramètres physico-chimiques (analyses élémentaires, matières organiques, substances humiques et métaux lourds) et biologiques qui ont mis en évidence la minéralisation et l'humification de la matière organique.

Mots clefs : Co-compost, boues de station d'épuration, déchets verts, matière organique, plante, matière sèche.

Abstract

To reduce and recycle biowaste volumes, many cities have chosen to build municipal composting plants. Presently, compost quality determination requires many biological and chemical characterizations. Aims of this study were to characterize composting processes and to develop a simple and valuable method to assess biological and chemical evolution of Poor soil.

Compost windrows obtained from municipal solid wastes mixed to green wastes, were matured during six months. Composts were characterized by chemical (elemental analysis, organic matter), biological methods, revealed mineralization, and humification of organic matter.

Key words: co-compost, sewage sludge, green wastes, organic matter, plant, Dry matter.



Introduction générale



Introduction générale

L'eau consommée ou utilisée par l'homme génère inévitablement des déchets. Les eaux usées sont recueillies et dirigées vers les stations d'épuration afin d'être purifiées avant leur réintroduction dans le milieu naturel. Différents traitements permettent de séparer une eau épurée d'un résidu secondaire, les boues résiduaires. Ces boues, riches en matière organique, azote, phosphore et oligo-éléments [1]. En Algérie la production des boues résiduaires est estimée à plus de 400 mille tonnes de matière sèche (MS) par an appelée à croître avec la construction et la mise en marche de nouvelles STEPs. La plupart des boues sont dirigées vers les décharges. Ce qui doit être remis en question pour des raisons sociales et environnementales [2].

Par ailleurs, les déchets verts, constitués de résidus issus de l'entretien des espaces verts, des zones récréatives, des jardins privés, des serres ou des terrains de sports, sont une source importante de déchets organiques collectés par les municipalités [2].

En raison des besoins grandissants de valorisation et d'élimination de ces déchets, trois voies principales sont utilisées : l'épandage, la mise en décharge et l'incinération. Une voie naturelle de valorisation comportant de nombreux avantages est le co-compostage [1]. Ce procédé biologique aérobie de dégradation de la matière organique s'est fortement développé en Algérie depuis quelques années et notamment la filière du Co-compostage de déchets verts et de boues de stations d'épuration [3]. Le compostage présente en effet les avantages de réduire les risques environnementaux liés à la gestion des déchets par la diminution de ces volumes et par la destruction des organismes pathogènes. De plus, le co-compostage permet d'obtenir un amendement constitué d'une matière organique stable et humifiée renfermant des nutriments. Ce procédé de valorisation est l'une des biotechnologies les plus complexes qu'il soit quant à la compréhension des phénomènes impliquées, en raison des changements d'états physiques et biologiques innombrables durant le processus [4]. Il fait intervenir différentes communautés de microorganismes qui se succèdent, en fonction de leurs potentialités métaboliques au cours des différents stades de transformation de la matière organique et de son degré de maturité [5].

L'incorporation de compost au sol s'avère efficace pour lutter contre la dégradation de la surface du sol [1] et pour améliorer sa porosité et sa structure [4]. Les amendements organiques par applications de co-compost dans les sols permettent également une diminution de l'apport

des engrais minéraux lixiviables. Ils améliorent durablement et efficacement la fertilité du sol [4], favorisent les processus de reforestation en améliorant la nutrition et la croissance des plantes et surtout augmentent leur potentiel de survie en période de sécheresse.

Enfin, les amendements en matière organique stable accroissent le pouvoir tampon et la capacité d'échange des sols, deux paramètres conditionnant la nutrition minérale des plantes [3].

Cette mémoire s'articule en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une filière de traitement des eaux usés qui produit la boue.

Le second chapitre concerne la composition et traitement des boues et leurs impacts sur le sol.

Le troisième chapitre il consacre aux différents types des composts et les méthodes de co-compostage.

Le quatrième chapitre il se compose de deux parties, la première partie consacre à la méthode et interprétation des résultats obtenus.

Enfin cette mémoire se termine par une conclusion générale qui récapitule les résultats obtenus et énonce les principales perspectives ouvertes par ce travail.

Chapitre I :
pollution et traitement des
eaux



CHAPITRE I : pollution et traitement des eaux

I.1. Introduction

La détérioration de la qualité des ressources en eau a conduit à l'assainissement par la mise en place d'unités de traitement en l'occurrence des stations d'épuration (STEP). Leur objectif est d'améliorer la qualité des eaux usées avant leur rejet dans le milieu naturel et de protéger ainsi l'environnement [6]. Le présent chapitre définit le cadre de ce travail en apportant les connaissances nécessaires à sa compréhension et en exposant la problématique associée. Dans un premier temps seront définies les boues d'épuration, le principe du traitement biologique, le procédé de traitement des eaux usées par boues activées, la composition globale des boues résiduaires ainsi que les principales voies de leur gestion [1]. Dans un second temps seront abordés l'état du traitement des eaux usées et de la gestion des boues en Algérie ainsi que le cadre réglementaire existant actuellement. Enfin une attention particulière sera portée sur les différentes voies de recherche en rapport avec la problématique de cette thèse. Ce qui permet d'exposer l'orientation ainsi que la démarche qui a guidé ce travail [7].

I.1 Les eaux usées

La pollution de l'eau s'entend comme, une modification défavorable ou nocive des propriétés physico-chimiques et biologiques, produite directement ou indirectement par les activités humaines, les rendant impropres à l'utilisation normale établit [8]

Les eaux qu'il est nécessaire d'évacuer du milieu urbain sont constituées par les eaux usées domestiques (lessive, cuisine, douche, WC...), les eaux pluviales (précipitations atmosphériques, eaux d'arrosage, de lavage...), les eaux industrielles (eaux de procédé, eau de refroidissement, de lavage dans les activités de fabrication, de production, de transformation ou de service) ... [1].

Les eaux usées sont composées d'environ 99% d'eau et 1% de matières solides en suspension, colloïdales et dissoutes. Les conséquences de l'émission d'eaux usées non traitées ou mal traitées peuvent être classées en trois catégories :

- Effets nocifs pour la santé humaine,
- Impacts négatifs sur l'environnement,
- Répercussions néfastes sur les activités économiques [2].

I.2 Caractéristique de l'effluent entrant en station d'épuration

Suivant l'origine et la qualité des substances polluantes, on distingue quatre catégories d'eaux usées [8] :

a) Les effluents domestiques :

Sont composés d'eaux usées domestiques : eaux ménagères (eaux de lavabo, douche, baignoire, appareils ménagers ...). A ces eaux fortement polluées s'ajoutent, (selon le type de réseau séparatif ou pseudo-séparatif, ou unitaire) des eaux moins polluées qui peuvent provenir des toitures, de drainage, de cours, de sous-sol et garage [6].

b) Les effluents d'établissement industriels, communaux ou artisanaux :

La pollution industrielle est principalement des eaux liées à l'activité industrielle, telles que les eaux de refroidissement [7]. De façon générale, elles se composent des :

- Eaux de fabrication,
- Eaux des circuits de refroidissement,
- Eaux de lavage des sols et des machines,
- Rejets des services généraux
- Selon leur origine industrielle elles peuvent également contenir :
 - Des graisses (industries agroalimentaires, équarrissage) ;
 - Des hydrocarbures (raffineries) ;
 - Des métaux (traitements de surface, métallurgie) ;
 - Des acides, des bases et divers produits chimiques (industries chimiques divers, tanneries) ;
 - De l'eau chaude (circuit de refroidissement des centrales thermiques) ;
 - Des matières radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets radioactifs). 8

c) Les effluents d'agriculture :

La pollution agricole est due aux cultures (pesticides et engrais) et à l'élevage (lisiers et purins) [9]. Elle est la cause essentielle des pollutions diffuses. Les eaux agricoles issues de terres cultivées chargés d'engrais nitrates et phosphates, sous une forme ionique ou en quantité telle, qu'ils ne seraient pas finalement retenus par le sol et assimilés par les plantes, conduisent par ruissellement à un enrichissement en matières azotées ou phosphatées des nappes les plus superficielles et des eaux des cours d'eau ou des retenues [10].

d) Les effluents d'origine naturelle :

La pollution d'origine naturelle est liée directement à certains phénomènes naturels (irruptions volcaniques, gisements minéraux) [7].

L'effluent entrant en station peut comporter une part d'eaux parasites dues à des défauts de structure du réseau (mauvaise conception, malfaçons, collecteurs endommagés). On distingue les eaux parasites de temps sec qui correspondent à l'intrusion d'eau de la nappe phréatique, et les eaux parasites pluviales, qui concernent uniquement les réseaux séparatifs eaux usées et qui sont dues à des erreurs de raccordement, voire à du drainage rapide [11].

I.2. Définition et origine des boues d'épuration

Les boues des STEPs sont des résidus ou des sous-produits issus du traitement des eaux usées résiduaires urbaines (majoritairement domestiques) ou industriels avant leur réintroduction dans le milieu naturel. Les eaux du service public, utilisées pour le lavage des rues et des caniveaux, ainsi que les eaux pluviales peuvent également être acheminées vers les STEPs lorsque le réseau est unitaire [12].

Les boues urbaines ou industrielles sont des matériaux relativement complexes d'origines variées constitués de matière minérale, de matière organique ainsi que de microorganismes [12]. Leur composition, comme c'est le cas d'ailleurs des eaux épurées, peut varier en fonction de différents paramètres notamment : la provenance des eaux usées à traiter (domestiques / industrielles) entrant dans le système de collecte, les habitudes de vie et l'état sanitaire de la population raccordée au réseau d'assainissement, la taille de l'agglomération, le procédé de traitement employé, le type de réseau (unitaire / séparatif), ainsi que le climat [13].

Dans ce travail l'intérêt est porté uniquement sur les boues issues du traitement biologique des eaux usées urbaines.

I.3 Classification des principaux polluants

A la différence de divers phénomènes de pollution, celle des eaux se traduit par les effets particuliers liés aux spécificités écologiques propres aux milieux aquatiques. En effet, l'eau peut dissoudre, souvent avec facilité, de nombreuses substances chimiques et biologiques. Par conséquent, tout polluant peut être véhiculé fort loin de la source de contamination [7]. On distingue différents types de pollutions dans les eaux usées [12] :

- Les matières organiques (déjections humaines et animales, graisses...);
- Les éléments minéraux (produits azotés et phosphorés);
- Les métaux lourds (plomb, cuivre, cadmium, zinc, mercure, nickel...);
- Les hydrocarbures (industries pétrolières, raffineries...);
- Les matières pathogènes (virus, bactéries, champignons...);

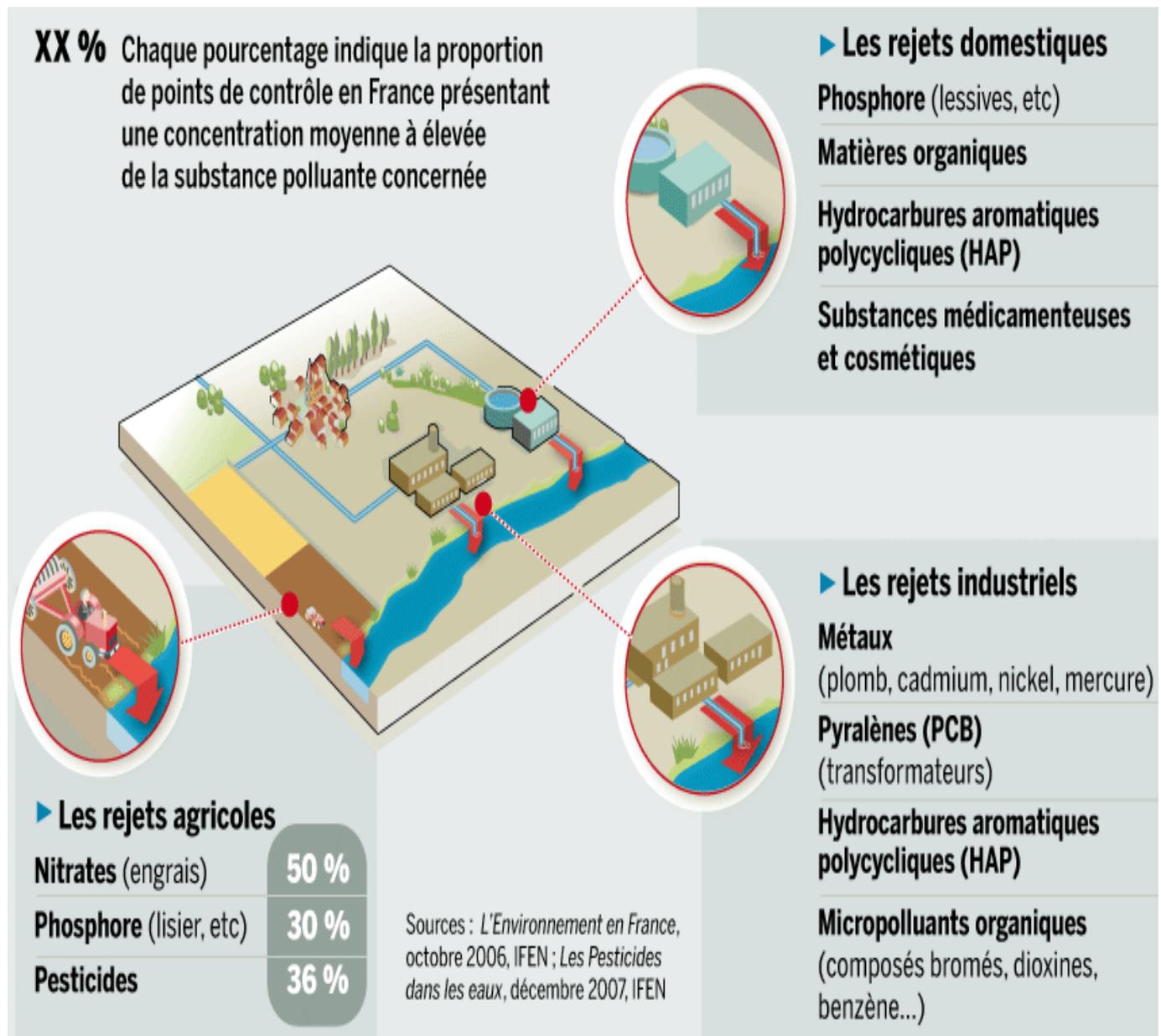


Figure I. 1 : Les différentes sources de pollution de l'eau

I.4. Principe du traitement biologique

Le principe général du traitement biologique, qui vise à éliminer la matière organique biodégradable des eaux usées, consiste à cultiver des microorganismes principalement aérobies. Ces derniers, naturellement présents dans l'eau, sont concentrés dans des bassins et mis en contact, en présence d'oxygène, avec les eaux usées contenant la pollution organique. Celle-ci est assimilée (consommée) au sein d'une chaîne alimentaire épuratrice et est oxydée, dégageant de l'énergie ainsi que des sous-produits et conduisant à la multiplication des microorganismes [14].

Il résulte de ce fait une eau épurée qui est rejetée dans le milieu naturel ou réutilisée ainsi que des boues (biomasse) facilement décantables riches en microorganismes [12] :

Eaux usées + microorganismes épurateurs + O₂ → eau épurée + biomasse + CO₂

Parmi les techniques de traitements biologiques les plus répandues et les plus largement utilisées [14] :

- le lagunage.
- les lis bactériens.
- la digestion anaérobie.
- les boues activées. Cette technique sera développée dans ce qui suit.

I.5. Fonctionnement d'une STEP à boues activées

Une station d'épuration est un ensemble d'installations par lesquelles les eaux usées sont acheminées afin d'en réduire la charge polluante. Le procédé par boues activées a été mis au point par les Anglais Arden et Lockett à Manchester en 1913 et a connu une constante amélioration depuis [15].

Le traitement des eaux usées dans une STEP à boues activées consiste en un transfert de pollution initialement sous forme soluble et particulaire, d'une phase liquide (eaux usées) vers une phase plus concentrée (boues). Les boues constituent de ce fait un déchet de la filière de traitement des eaux usées [11].

I.5.1. Filière de traitement des eaux usées :

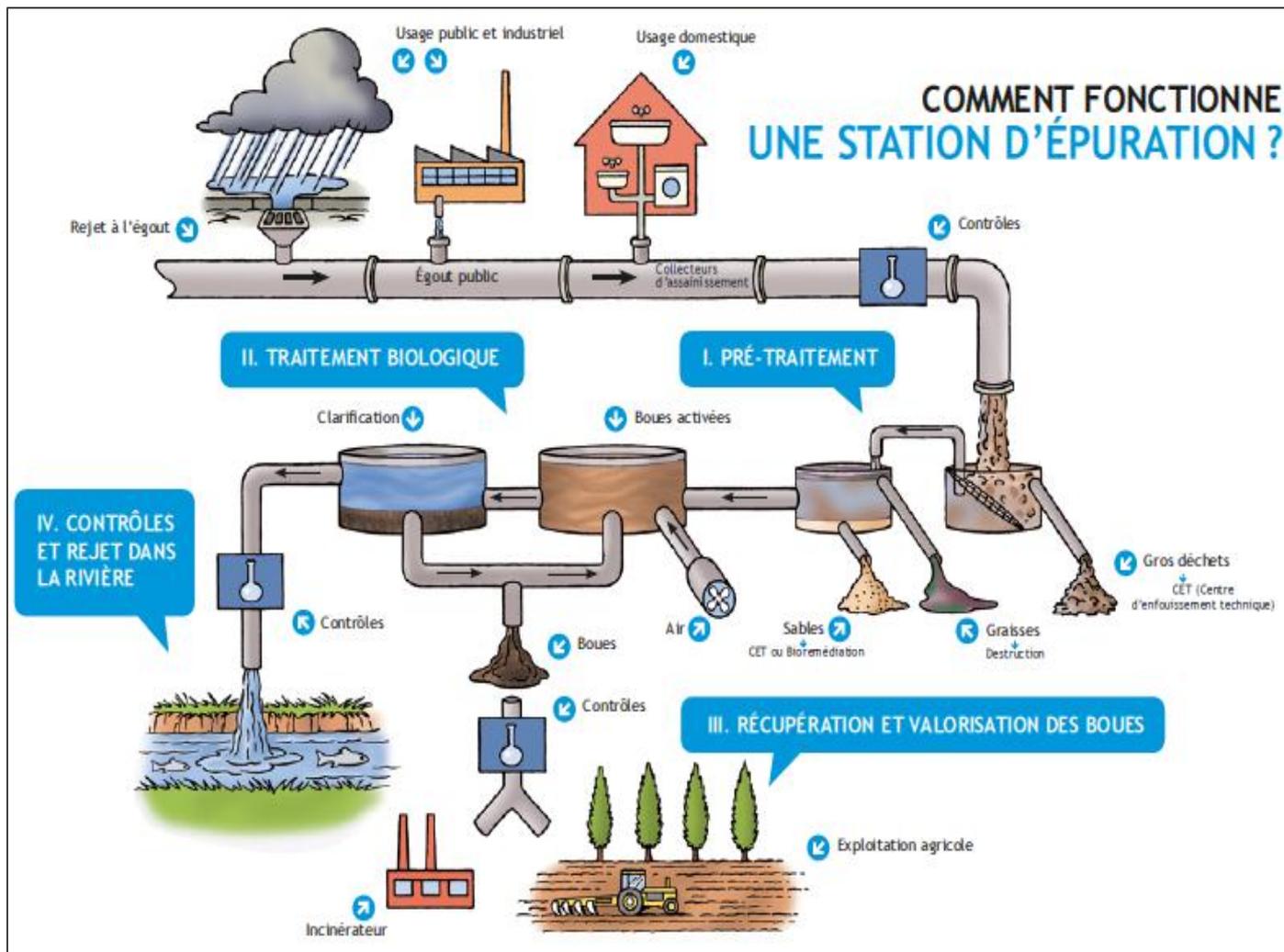


Figure I. 2 : Le schéma global d'une filière de traitement des eaux usées par boues activées est illustré sur la figure I.1.

Les eaux usées urbaines qui arrivent à la STEP sont, selon le type de réseau d'assainissement, majoritairement constituées d'eaux usées domestiques dans les cas des réseaux séparatifs, auxquelles viennent s'ajouter les eaux du service public et les eaux pluviales issues du ruissellement sur les ouvrages routiers, toitures, etc. dans le cas de réseaux unitaires [07]. Ces eaux usées subissent l'ensemble des traitements suivants :

I.5.1.1. Prétraitement

Les eaux usées sont soumises tout d'abord à des traitements de dégrossissage appelés «prétraitement ». Cette étape permet d'extraire la plus grande quantité d'éléments dont la taille des particules (débris), le pouvoir abrasif (sables, argiles) et la masse spécifique (graisses flottantes) risquent de perturber le fonctionnement des différentes unités de traitement ultérieures et d'assurer ainsi un traitement efficace des eaux usées et une protection des

ouvrages de la STEP. Le prétraitement repose essentiellement sur des critères physiques : granulométrie (dégrillage) et densité (dessablage, dégraissage) [4].

1) Dégrillage

Il permet de séparer les matières grossières ou volumineuses charriées par les eaux brutes et qui pourraient provoquer l'obturation des différentes unités de l'installation et nuire à l'efficacité des traitements ultérieurs. Le dégrillage (Figure I.3) est assuré par des grilles dont l'écartement des barreaux varie suivant la taille des objets à piéger [10].



Figure I. 3 : Dégrillage

2) Dessablage

Il permet d'éliminer par décantation les graviers, sables ou particules minérales afin d'éviter le dépôt de ces particules dans les installations et de protéger les unités de traitement contre l'abrasion [1].

3) Déshuilage ou dégraissage

Il consiste à récupérer grâce à des racleurs, les matières flottantes (graisses domestiques ou industrielles, écumes) à la surface des eaux usées naturellement ou par flottation (injection de fines bulles d'air). Cette étape permet de limiter la quantité de flottants et de graisses susceptibles de se coller, de s'agglutiner et de flotter dans les ouvrages situés en aval, pouvant causer des problèmes de fermentation. Le dessablage et le déshuilage s'opèrent dans le même bassin [13].



Figure I.4 : Dessableur-déshuileur.

Les déchets éliminés au cours du prétraitement ne seront pas considérés dans cette mémoire.

I.5.1.2. Traitement primaire

Cette étape n'est pas présente sur les petites installations et tend à disparaître sur les installations récentes. Elle consiste en une simple décantation des matières en suspension naturellement décantables présentes dans les eaux usées. Les boues récupérées au fond du décanteur sont dites « boues primaires ». Elles ne sont pas stabilisées (forte teneur en matière organique) et sont fortement fermentescibles. dans la suite de ce travail [06].

I.5.1.3. Traitement secondaire

La décantation ne permet pas la séparation des matières finement dispersées et des colloïdes présents dans les eaux usées. C'est pourquoi il est nécessaire de faire appel à des traitements secondaires afin d'éliminer les particules non décantables ainsi que les matières dissoutes [08]. Au niveau des installations urbaines, cette étape est généralement réalisée par des traitements biologiques qui consistent en une dégradation biologique de la pollution contenue dans les eaux usées. Le traitement biologique le plus répandu est celui par « boues activées » appelé également « digestion aérobie » qui nécessite l'apport de l'oxygène par aération (injection d'air au fond du bassin d'aération) et qui s'opère dans des bassins d'aération (Figures I.5 et I.6).

Au cours de ce traitement les eaux usées sont mises en contact avec des microorganismes bactériens en suspension, en condition aérobie (présence d'oxygène) [11]. Ces bactéries dites «épuratrices » vont utiliser la pollution de l'eau (matière organique biodégradable) comme source d'énergie pour leur croissance et leur développement. Il se produit des composés gazeux (CO_2) et de la biomasse qui va s'agglomérer sous forme de floccs bactériens formant ainsi des « boues secondaires » ou « boues activées ». Cette floculation naturelle permet la séparation des eaux épurées de la biomasse par simple décantation lors de l'étape suivante de « clarification » [16].



Figure I.5 : Bassin biologique



Figure I.6 : Aération dans un bassin biologique

I.5.1.4. Clarification

Le clarificateur appelé également « décanteur secondaire » (Figure I.7) est un ouvrage dans lequel les floccs bactériens (boues activées) sont séparés des eaux épurées. Il obéit aux mêmes principes qu'un décanteur primaire [12].

Les eaux épurées sont récupérées en surface du clarificateur par surverse (Figure I.7) et sont réutilisées ou rejetées dans le milieu naturel alors que les boues décantées sont extraites du fond du clarificateur par aspiration. Une partie de cette biomasse (boues de recirculation) est réinjectée dans les bassins d'aération pour maintenir une concentration constante de la population microbienne permettant une activité biologique optimale et assurant ainsi la continuité de l'épuration. La partie en excès, quant à elle, est envoyée vers les ouvrages de la filière de traitement des boues [04].



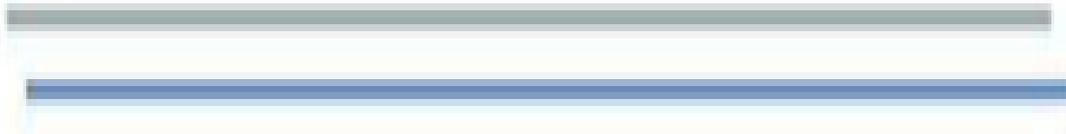
Figure I.7 : Clarificateur.



Figure I.8 : Récupération des eaux épurées du clarificateur par surverse.

Problématique :

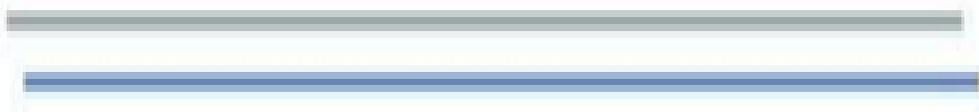
Les boues en excès issues de la filière de traitement des eaux, soutirées au bas du clarificateur, se présentent sous forme liquide. Ce qui engendrerait des volumes de stockage conséquents. Elles sont, de plus, hautement fermentescibles dégageant rapidement des odeurs désagréables et provoquant ainsi des nuisances olfactives. Ces caractéristiques sont problématiques quelle que soit la destination finale de ces boues. C'est pourquoi le traitement de ces derniers fait l'objet d'une filière spécifique dans une STEP permettant leur élimination à moindre impact économique et environnemental.



Chapitre II :

Composition et traitement

des boues résiduaires



Chapitre II : Composition et traitement des boues résiduaire

II-1. Généralité :

Les stations d'épuration urbaine assurent le traitement des eaux usées urbaine et/ou industrielle acheminée par les réseaux d'assainissement. Ce traitement, s'il a pour objet, le rejet d'une eau épurée acceptable par le milieu récepteur, produit également un résidu polluant, désigné sous le terme de boues d'épuration [2]

II-2. Définition :

Les boues sont définies comme un mélange d'eau et de matières solides, séparé par des procédés naturels ou artificiels des divers types d'eau qui le contiennent. Elles sont issues du traitement des eaux usées domestique et/ou industrielle. En effet, l'eau consommée ou utilisée par l'homme à l'échelle domestique ou industrielle génère inévitablement des déchets. Les eaux usées sont recueillies par les égouts et dirigées vers les stations d'épuration afin d'être purifiées avant leur réintroduction dans le milieu naturel [2]

II.3. Nature et origine

Selon les différentes phases de traitement des eaux usées, on obtient des boues à

Caractéristiques différentes :

II.3.1. Boues primaires

Elles sont produites par une simple décantation des matières en suspension (MES) contenues dans les eaux usées ; 70 % de MES peuvent ainsi être retenues. Avec l'évolution de la conception des stations, ce type de boues est en train de diminuer [12].

II.3.2. Boues physico-chimiques

C'est une Variante du type précédent, les matières organique particulière ou colloïdale contenues dans les eaux usées sont agglomérées par addition d'un réactif coagulant (sels de fer ou d'aluminium) ; 90 % de MES peuvent ainsi être captées et séparées par

décantation, les boues obtenues renferment une partie importante de sels minéraux issus des eaux brutes et de l'agent coagulant [12].

II.3.3. Boues biologiques

Ces boues sont essentiellement formées par les résidus de bactéries "cultivées" dans les ouvrages d'épuration. Ces bactéries se sont nourries des matières organiques contenues dans les eaux usées et les ont digérées. Pour maintenir l'activité biologique de la station à un bon niveau, une partie de la masse des bactéries ou "biomasse en excès" doit être soutirée régulièrement, entretenant ainsi la dynamique de reproduction bactérienne [12].

II.4. Principales étapes de traitements des boues

Quel que soit le mode d'épuration des eaux, les boues sont initialement constituées d'eau (99%), de matière organique fraîche très fermentescible, et des matières minérales dissoutes ou insolubles. La matière organique qui représente 35 à 85 % de la matière sèche est constituée essentiellement de cadavres de bactéries et leurs substances toxiques [19].

Selon le but de leur utilisation, des traitements complémentaires leur sont appliqués afin de :

- Réduire leur teneur en eau et ceci dans le but de réduire leur volume et d'éviter la putréfaction de la matière organique facilement décomposable [19] ;
- Stabiliser la matière organique en diminuant sa fermentescible pour réduire les mauvaises odeurs ;
- Assurer l'hygiénisme nécessaire en détruisant les micros organismes pathogènes.

II.5. Procédés de réduction de la teneur en eau des boues

II.5.1. Lit de séchage

Pour des raisons d'hygiène et afin de ne pas créer des odeurs désagréables, on utilise des lits de séchage ; on élimine en grande partie ou, en totalité l'eau par évaporation : soit par voie naturelle (lits de séchage) soit par voie thermique. La technique des lits de séchage se pratique à l'air libre sur des boues liquides et combine l'évaporation naturelle et le drainage de l'eau libre à travers une couche filtrante de sable ou de graviers ; l'emprise au sol est de 1m² pour 4 à 5 habitants raccordés. Ce système extensif donne des boues solides à 35 – 40 % de siccité mais reste fort dépendant des conditions météorologiques.

Le séchage thermique permet une élimination quasi-totale de l'eau (siccité – 95 %) les boues obtenues sont pulvérulentes ou en granulés, mais en raison du coût énergétique, ce procédé reste peu utilisé [9].

II.5.2. L'épaississement

Il vise l'augmentation de la siccité (teneur en matière sèche) des boues sans pour autant modifier le caractère liquide de la boue, ce procédé peut se faire par voie gravitaire dans un concentrateur ou par des moyens mécaniques (égouttage – flottation – centrifugation) ; la siccité des boues ne dépasse pas 7% [21].

II.5.3. La déshydratation

Elle correspond en fait à une forte augmentation de la siccité, et modifier l'état physique des boues, celles-ci passent de l'état liquide à l'état pâteux ou solide. Les filtres à bandes et les centrifugeuses donnent des boues plutôt pâteuses en raison de la performance de déshydratation qui plafonne de 18 à 20 % de siccité pour la première famille de matériels, et de 20 à 25 % pour la seconde. Les filtres presses produisent par contre des boues de structures solides 30- 35 % de siccité, en conjuguant un conditionnement au lait de chaux et des pressions élevées [5].

II.5.4. Stabilisation des boues

Dans la stabilisation biologique, les boues primaires et les boues activées en excès souvent mélangées, présentent une tendance à la fermentation, on aère ce mélange à l'air ou à l'oxygène, on assiste alors à une minéralisation de la matière organique en CO₂, ce procédé permet l'élimination de certains parasites, cette technique résume la digestion aérobie, tandis que pour la digestion anaérobie, et qui a bénéficié d'une grande publicité, permet une production des gaz combustibles [6]. Elle consiste à favoriser le développement des bactéries méthaniers qui agissent en anaérobie sur la matière organique en la décomposant en produisant le méthane, ce procédé peut être important pour certaines cultures lorsqu'on prévoit l'utilisation agricole.

Les techniques de stabilisation chimique par chaulage ou autres telles que le traitement aux nitrites à pH acide, se basent sur un blocage de l'activité biologique. La stabilisation par chaulage a connu un développement soutenu depuis plusieurs années en raison de son efficacité vis à vis de la maîtrise des nuisances olfactives et de l'intérêt calcique des boues chaulées pour les sols acides [4], La stabilisation non biologique ou chimique comporte la pasteurisation, et le traitement à la chaux. La pasteurisation consiste en l'injection de vapeur à une température de 80°C durant 30 mn ; Les boues sont désinfectées mais non stérilisées [6].

Le co-compostage constitue un procédé particulier de stabilisation biologique aérobie, il se réalise de préférence sur les boues déjà déshydratées, les boues compostées ont une structure solide [12].

II.6. Composition des boues résiduaires

La composition exacte des boues varie en fonction de l'origine des eaux usées, de la période de l'année et du type de traitement et de conditionnement pratiqué dans la station d'épuration [10]. Les boues résiduaires représentent avant tout une matière première composée de différents éléments (matière organique, éléments fertilisants (N et P,...), d'éléments traces métalliques, d'éléments traces organiques et d'agents pathogènes).

II.6.1. Carbone

Les boues contiennent surtout du carbone organique, il s'agit en grande partie de corps microbiens ou des produits d'excrétion de ces derniers (polysaccharides) qui confèrent à l'ensemble un aspect mucilagineux. On a identifié dans des digesteurs (bassin de stabilisation) de boues ; des graisses de cire, des huiles, des polysaccharides et des composés protéiniques.

II.6.2. Matière organique

Les résultats empruntés à divers auteurs, montrent que la teneur en matière organique des boues de station d'épuration varie en fonction des modes de traitement des eaux.

II.6.3. Éléments fertilisants

Selon la dose appliquée, les boues peuvent couvrir, en partie ou en totalité, les besoins des cultures en azote, en phosphore, en magnésium, calcium et en soufre ou peuvent aussi corriger des carences à l'exception de celle en potassium [17]. Les éléments traces tels que le cuivre, le zinc, le chrome et le nickel présents dans les boues sont aussi indispensables au développement des végétaux et des animaux.

II.6.4. Azote

La teneur en azote des boues favorise sa valorisation. Cette richesse en azote (ramenée à la matière sèche) est surtout importante dans la phase liquide serait des composés facilement métabolisables ou tout simplement des composés ammoniacaux directement utilisables par les plantes. Il en résulte que les boues qui ont subi une déshydratation importante notamment par passage au filtre-pressé, perdent une grande partie de leur valeur "engrais azotés solubles". Par

ailleurs, le traitement thermique des boues conduit à des produits plus pauvres en azote que la moyenne (1 à 1,5 % de la matière sèche). Il en est de même des boues qui ont subi un traitement par la chaux pouvant provoquer des pertes importantes d'azote par volatilisation d'ammoniaque [13].

II.6.5. Phosphore

Le nombre de travaux consacrés à l'étude de la disponibilité pour les plantes de l'acide phosphorique contenu dans les boues, est beaucoup plus restreint que celui ayant trait à l'appréciation de l'assimilabilité de l'azote de se même déchet. Il faut reconnaître que les résultats des expériences culturales réalisées un peu partout dans le monde sont souvent contradictoires ; le phosphore des boues étant considéré comme assimilable ou beaucoup moins assimilable que celui d'un engrais phosphaté minéral considéré comme soluble. A vrai dire, nous ne connaissons que peu de choses sur les formes du phosphore qui existent dans les boues 5 à 6% s'y trouveraient sous forme de phosphate organique, le phosphore minéral étant surtout constitué par des associations avec les composés de fer, de l'alumine, du calcium ou de magnésium qui abondent dans la plupart des boues [12].

II.6.6. Teneur en bases

II.6.6.1. Potassium

C'est l'élément le moins représenté dans les boues dix fois moins que la teneur en azote, le déficit en potassium des boues résulte de sa solubilisation et dans son entraînement dans l'effluent épuré. Par conséquent, les apports en potassium par les boues sont pratiquement négligeables. Mais la minime quantité contenue semble être rapidement assimilée [7].

II.6.6.2. Calcium

La forte charge de calcium des boues n'autorise pas à considérer ces derniers comme des amendements calcaires susceptibles d'élever le pH des sols. Il est vraisemblable en effet que le calcium des boues se trouve absorbé sous une forme facilement échangeable et certainement pas sous forme d'oxyde, d'hydroxyde ou de carbonate de calcium. Les boues additionnées par doses importantes de chaux ayant amené leur pH aux environs de 12 à 13, doivent être considérées comme de simples amendements calcaires [16].

II.6.6.3. Magnésium

La concentration en magnésium des boues est également assez élevée et souvent supérieur de celle que l'on observe dans les fumières de ferme il s'y trouve probablement sous une forme relativement mobile puisque plusieurs auteurs signalent un accroissement du contenu des horizons du sol en magnésium [12].

II.6.6.4. Sodium

Le niveau de sodium dans les boues est relativement important. La teneur en sodium a tendance à augmenter dans un sol après un apport de boue, cependant il est entraîné par lessivage [9].

II.8. Utilisation agricole des boues résiduaires

Les boues présentent un intérêt important en agriculture, la valorisation agricole consiste en épandage des boues sur les terres agricoles après vérification de l'innocuité des boues et de leur intérêt agronomique. Cependant, la valorisation agricole directe du digeste est rarement pratiquée car elle rencontre bon nombre de problèmes [15]. De plus, un certain nombre de risques sanitaires peuvent exister (présence potentielle de germes pathogènes), car l'effet thermique d'hygiénisation (comme dans le cas du compostage) n'a pas lieu en anaérobiose [11]. La diminution du volume des boues due à la dégradation des composés organiques et au séchage induit par la nature exothermique du procédé et production en fin d'un compost riche en substances humiques valorisable comme amendement organique des sols [18].

La valorisation agricole consiste à un épandage des boues sur des terres agricoles après vérification de l'innocuité de ces dernières et de leur intérêt agronomique. Les principales contraintes sont les périodes d'épandage (interdiction en période d'excédent hydrique) et l'équilibre entre les besoins des cultures et les apports de nutriments [14].

II.8.1. Valeur agronomique

II.8.1.1. Valeur amendant

Les boues sont des amendements humiques parfois leur application sur les champs cultivés contribue à améliorer les propriétés physiques de la couche labourée [14].

II.8.1.2. Valeur fertilisante

Les boues contiennent certains éléments utiles à la croissance des plantes, les quantités varient d'une boue à l'autre selon l'origine et le mode de traitement [18].

II.8.2. Législation de l'épandage des boues

L'épandage des boues est soumis à une double réglementation, administrative et technique des décrets n°93-742 et n°93-743 du 29 mars 1993. La réglementation technique définit les modalités pratiques des opérations d'épandage de boues et précise les obligations des différents intervenants de la filière ainsi que les dispositions préventives qui doivent être mises en place, pour garantir la protection de l'environnement et de la santé publique. Le décret n°97-1133 du 8 décembre 1997, relatif à l'épandage des boues et l'Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles.

D'après ce décret l'épandage sur terres agricoles peut être soumis à une procédure de déclaration ou d'autorisation au titre de la rubrique n° 2.1.3.0 de l'article R.214- 1 du Code de l'environnement [18].

II.9. Impact de l'épandage des boues sur l'environnement

II.9.1. Effets défavorables

II.9.1.1. Parasites

Le sol comme les boues contient un nombre très élevé de germes banaux, mais dans ces dernières sont concentrés des microorganismes d'origine fécale donc à priori dangereux pour l'homme et pour les animaux [15].

II.9.1.2. Phytotoxicité

Si des produits, tels que le chlorure ferrique, flocculant pour les phosphates, un excès de Chlorure peut avoir des effets néfastes sur le développement des végétaux. Ainsi, la richesse en azote ammoniacal des boues, peut inhiber la croissance racinaire du cresson alénois (plante Test) [15].

II.9.1.3. Dégradation de la structure

Les apports intensifs et répétés de certaines boues riches en sodium, risquent de dégrader la structure, particulièrement dans les sols déjà sensibles (texture limoneuse et/ou teneur en MO Faible) [15].

II.9.2. Effet des boues sur la culture

L'amélioration des rendements a pour origine les fertilisants que l'on trouve dans les boues, elles constituent une source potentielle de matière organique utilisable, elles contiennent aussi des nutriments essentiels pour la croissance des cultures [18].

II.9.3. Effet des boues sur le sol

II.9.3.1. Effet sur les propriétés chimiques, physiques et biologiques

Les épandages des boues laissent subsister une croûte en surface du sol après infiltration de la boue, dans certaines conditions, cette croûte peut gêner les échanges gazeux et la levée des plantes. King et Morris (1972) observent, après un épandage de 50 mm de boue, que les chiendent ne croissent qu'à travers les craquelures de la croûte. La porosité de sol peut être modifiée par des apports de boues Supersperg (1975) observe que les applications annuelle de doses de boue supérieure à 60 mm provoquant un accroissement de la compacité d'un sol lourd par colmatage et diminution de volume des pores ; en revanche, des applications à dose double tous les trois ans n'ont pas cet effet cependant, l'apport de matière organique et d'ions calcium jouent un rôle favorable sur la solidité des ciments responsable de l'agrégation des particules du sol, aussi les auteurs soulignent ils l'allègement des structure défavorable des sols argileux consécutif aux applications des boues [14] ; les boues floccules à la chaux provoquent d'ailleurs une amélioration plus importante de la structure de sol que les boues non flocculés [16], du fait de l'apport plus élevés d'ions Ca^{2+} les améliorent l'agrégation des sols sableux, et constituent un bon liant contre l'érosion éolienne [14] ; selon, Grill, (1977) , l'effet des boues sur la stabilité structurale et plus durable que celui d'un engrais vert, mais moins que celui d'autres amendement organiques tels que la paille et surtout le fumier ; à cet égard, la présence d'ions Na^+ dans les boues pourrait jouer un rôle négatif, en favorisant la dispersion des colloïdes du sol.

La richesse des boues en matière organique améliore le bilan hydrique du sol par accroissement de la réserve en eau utiles, mais une telle action nécessite un apport important carbone, alors qu'un effet structural marquant apparaît même pour des doses d'apport plus faible [18].

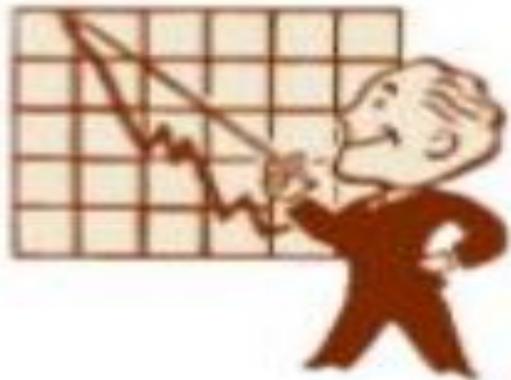
L'effet des boues sur le pH de sol est variable : diminution, surtout dans le cas des boues flocculés à la chaux [16]. Des apports de boues provoquent un enrichissement du sol en azote totale. Une fraction de cet azote entrera dans la composition des molécules organiques [13].

Le phosphore apporté par les boues de déphosphoration serait aussi à l'alimentation phosphorée des plantes varie beaucoup selon les conditions, sans que l'on connaisse bien les raisons de ce phénomène : observent que la teneur en phosphore de la feuille de l'épi sur maïs augmente significativement à la suite d'un apport de boues digérées anaérobies, ainsi que celles du seigle et Sorgho [13]. Les travaux de Sili et Mostefai, (1916) et Bekri (1916) ont montré que l'apport de boues résiduares urbaines aux sols agricoles de Tizi-Ouzou augmente les taux du phosphore assimilable [15].

L'apport des boues provoque une modification importante de pH, En général, on note une augmentation des valeurs de pH [15].

L'application des boues accroît légèrement le niveau de la conductivité électrique, qui diffère selon les doses [15].

Chapitre III : les méthodes de co-compostage



Chapitre III : les méthodes de co-compostage

III.1. Définition du co-compostage

Il existe de nombreuses définitions du co-compostage dans la littérature mais une définition très générale pourrait être : le co-compostage est un procédé biologique aérobie de dégradation et de transformation de la matière organique, permettant d'obtenir un produit valorisable à partir d'un déchet.

De façon plus précise, le co-compostage est défini comme : « un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques d'origine végétale et animale, par une succession de communautés microbiennes évoluant en conditions aérobies, entraînant une montée en température, et conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée. Le produit ainsi obtenu est appelé compost. »

Le processus de compostage est similaire à celui de l'humification naturelle des résidus organiques en substances humiques dans les sols. Le compostage accélère la transformation biologique aérobie de la matière organique impliquant la formation de substances humiques et engendrant un produit stable : le compost. Le compostage est le résultat direct de l'action de populations microbiennes diversifiées évoluant en milieu aérobie [20]. Différentes communautés de micro-organismes, constituées majoritairement de bactéries, de champignons et de protozoaires se succèdent au cours du compostage [20].

III.2. Les mécanismes impliqués

Il existe deux types de co-compostage, en présence et en absence d'oxygène. La nature du processus de décomposition y est directement liée. Lors de carence en oxygène, les microorganismes anaérobies dominent et élaborent des composés intermédiaires tels que du méthane, du sulfure d'hydrogène et quelques autres substances spécifiques des fermentations anaérobies. En l'absence d'oxygène, ces composés ne sont pas métabolisés et s'accumulent.

Un grand nombre de ces composés présentent de forts pouvoirs olfactifs et certains d'entre eux peuvent entraîner une Phytotoxicité lors de l'épandage des composts comme amendements organiques. De plus, le compostage anaérobie est un processus s'effectuant à basse température ; ainsi, les graines d'adventices et les pathogènes ne sont pas affectés et détruits par l'élévation de chaleur caractérisant un processus aérobie. Enfin, ce processus anaérobie nécessite davantage de temps que le compostage en présence d'oxygène. Ces inconvénients contrebalancent fortement les avantages de ce procédé et notre étude ne portera donc que sur le compostage aérobie, bien que plusieurs travaux aient montré la présence

possible de zones anaérobies [19] dans un compost dit « aéré ». De telles zones peuvent être expliquées par l'intense activité microbienne consommatrice d'oxygène et génératrice de gaz carbonique, combinée à un manque d'aération du compost. Dans la plupart des écosystèmes, la libération de chaleur d'origine biologique est très diffuse et disparaît trop rapidement pour engendrer une élévation de température significative. Cependant, la décomposition de matières organiques reste un cas à part pouvant produire une intense chaleur. En effet, le processus de compostage peut être très simplement schématisé par la production de chaleur au cours de l'action de micro-organismes en présence d'oxygène. La matière organique peut alors subir deux types de processus : une minéralisation complète jusqu'au CO₂ ou une humification et une production de substances humiques [20].

Plusieurs phases théoriques se succèdent au cours du compostage. La première est appelée phase mésophile du fait des températures atteintes inférieures à 45°C.

Des micro-organismes dont la température de croissance optimale est comprise entre 20 et 45°C se multiplient alors rapidement, notamment grâce à la présence de matière organique facilement biodégradable (sucres simples et acides aminés libres). Leurs métabolismes très actifs engendrent une production intense de chaleur et élèvent ainsi la température du compost à un point tel que leurs propres activités sont inhibées.

A ce moment, débute la phase thermophile où quelques champignons ainsi que de nombreuses bactéries thermophiles (température de croissance optimale comprise entre 50 et 70°C) poursuivent le processus, en augmentant encore la température du milieu jusqu'à 65 - 70°C voire plus. Durant cette phase très active, une importante part de la matière organique est perdue par minéralisation du carbone organique et dégagement de CO₂, et un assèchement du compost lié à l'évaporation de l'eau est souvent observé. Cependant, la hausse de température est cruciale pour la qualité du compost, car la chaleur détruit les pathogènes et les graines d'adventices. Ces deux premières phases peuvent être assimilées à une première phase dite de dégradation [21].

Cette phase dégradative (phase mésophile et thermophile) est suivie par une période de ralentissement de l'activité, pendant laquelle la température diminue graduellement. Des micro-organismes mésophiles colonisent à nouveau le compost. S'en suit alors une phase de maturation constructive où apparaissent lentement des éléments précurseurs de l'humus. La dégradation lente des composés résistants entraîne une coloration brun foncé à noir du compost et rend celui-ci plus fin et homogène [19]. Sa texture ressemble alors à celle d'un sol. Le compost est alors mature et le processus est achevé.

III.4. Objectifs du compostage

La mise en décharge étant interdite pour de nombreux bio-déchets (sauf les déchets ultimes), leur incinération coûteuse et peu populaire, le compostage devient de plus en plus une solution pratique, simple. Elle présente de nombreux avantages, le principal étant la valorisation des déchets pour la production d'un amendement organique stable. En effet, le champ d'application du compostage s'est élargi avec l'évolution des techniques de compostage et la problématique de gestion collective des déchets ménagers. Cette filière concerne tous types de déchets organiques tels que les déchets verts, les bio-déchets ménagers, les boues de stations d'épuration collectives ou industrielles, les déchets agroalimentaires, les effluents d'élevage... [19]

III.5. Quels déchets composter ?

III.5.1. Les boues de station d'épuration

Les boues sont définies par le Comité Européen de Normalisation (CEN) comme « un mélange d'eau et de matières solides, séparé par des procédés naturels ou artificiels des divers types d'eau qui le contiennent ». Les boues de station d'épuration sont issues du traitement des eaux usées domestiques ou industrielles. En effet, l'eau consommée ou utilisée par l'homme à l'échelle domestique ou industrielle génère inévitablement des déchets. Les eaux usées sont recueillies par les égouts et dirigées vers les stations d'épuration afin d'être purifiées avant leur réintroduction dans le milieu naturel. Leur traitement dans les stations permet de séparer une eau épurée d'un résidu secondaire, les boues, bien pourvu en matière organique, azote, phosphore ainsi qu'en oligo-éléments. Le traitement des eaux usées permet d'éliminer, d'une part, la partie la plus facilement dégradable de la matière organique et, d'autre part, les différents composés dont les eaux sont chargées (débris alimentaires, graisses, fibres textiles et cellulosiques, savons, lessives et détergents) avant leur réintroduction dans le cycle de l'eau [24]

III.5.2. Les déchets verts

Les déchets verts sont des déchets organiques issus de l'entretien des espaces verts, des jardins privés, des serres, des terrains de sports... On désigne par déchets verts les feuilles mortes, les tontes de gazon, les tailles de haies, d'arbustes, les résidus d'élagage, les déchets d'entretien de massifs, les déchets de jardin des particuliers collectés séparément ou par le biais des déchetteries [21].

III.5.3. Les déchets ménagers

Les déchets ménagers sont des déchets issus de l'activité domestique des ménages et pris en compte par les collectes usuelles ou séparatives. Ces déchets peuvent être séparés en deux sous catégories :

- ✓ La fraction résiduelle des déchets ménagers obtenue après séparation des papiers, cartons, verres et emballages. Elle est également désignée par le terme « ordures ménagères grises » du fait de la couleur de la poubelle utilisée par les collectivités qui pratiquent ce type de collecte sélective.
- ✓ La fraction fermentescible (putrescible) des ordures ménagères : déchets organiques biodégradables, ou bio déchets (déchets de cuisine, fleurs, etc.), récupérés lors de collectes sélectives visant à les isoler des autres composés non putrescibles. Les déchets verts des jardins des particuliers sont souvent collectés avec cette fraction. Les déchets de marchés constituent également cette catégorie [22].

III.6. Les Types de compostage

III 6.1. Aérobie

Le compostage aérobie est une opération de dégradation des déchets organiques en présence d'oxygène, ce procédé comprend le CO₂, le NH₃, l'eau et la chaleur, ce qui nécessite un bon mélange d'ingrédients sous des conditions contrôlées avec une humidité autour de 40-60% et rapports carbone / azote (C / N) de 25-30, ce dernier ne possède pas d'odeur désagréable ; sa maturation est beaucoup plus rapide [22]. Ce processus de compostage entraîne des variations de température et conduit à l'élaboration d'une MO humifiée qui est le compost. C'est un produit alternatif stable qui présente peu de risques de Phytotoxicité. La chaleur générée détruit les germes pathogènes et les germes des graines d'adventices [23].

III.6.2. Anaérobie

Ce processus de compostage est fait en absence d'oxygène, leurs inconvénients ; les odeurs désagréables dues au pourrissement et les risques de problèmes phytosanitaires car sa température reste basse et les organismes pathogènes ne sont pas détruits. Il consiste à la dégradation par des micro-organismes anaérobies dans un milieu saturé en eau. Il se forme du biogaz et de l'engrais organique, ainsi il y a une élaboration de composés intermédiaires comme le méthane, les acides organiques, du sulfure d'hydrogène et d'autres substances [26].

III.6 .3. Qualité du compost

L'évaluation de la maturité du compost a été largement identifiée en tant qu'un des problèmes les plus importants de l'utilisation du compost comme amendement, l'emploi de bio déchets provenant d'horizons divers rend indispensable la détermination de la qualité des composts avant leur utilisation en agriculture. En effet, les plus importants facteurs affectant le succès de l'utilisation de compost comme amendement agricole sont les degrés de stabilité et de maturité [17]. La gestion du processus de compostage doit tenir compte de la valeur agronomique potentielle du produit final en évaluant son degré de maturité.

III.6.3.1. Définition de la qualité d'un compost

La qualité d'un compost est difficile à définir et demeure une notion évasive [16]. La stabilité et la maturité du compost sont essentielles pour une utilisation optimale comme amendement et source de nutriments pour les plantes [25]. Le terme de maturité reste souvent ambigu, bien que fréquemment cité dans la littérature. Dans la majorité des articles, la stabilité et la maturité ne sont, soit définies que de manière implicite, soit pas définies du tout. Deux approches distinctes coexistent pour décrire la qualité des composts.

La première s'appuie sur la notion de transformation d'une matière organique initiale très fortement biodégradable, en une matière organique stable en fin de compostage. Le degré de stabilité du compost est alors estimé par la biodégradabilité des matières organiques et par leur humification [26].

La seconde approche considère les effets du compost sur les végétaux. Le degré de maturité est, dans ce cas, relié à l'absence de préjudice pour les plantes suite à l'utilisation de compost. En effet, l'apport de compost immature dans un sol engendre des effets négatifs sur la germination et sur la croissance et le développement des plantes. Dans cette optique, le meilleur indicateur de maturité d'un compost reste l'estimation de sa Phytotoxicité. De nombreuses études de cet aspect suggèrent qu'un compost stable ne signifie pas nécessairement qu'il soit mature puisqu'il peut encore avoir un effet inhibiteur ou phytotoxiques sur la croissance des plantes [26].

III.6.4 Importance de la qualité du compost

III .6.4. 1. Maturité et stabilité

Un compost mûr doit obligatoirement avoir une matière organique stable. Ce qui explique que la stabilité est l'opposée de la biodégradabilité, cependant, le degré de maturité et la stabilité du compost atteste la valeur de ce dernier. Un compost non mature peut entraîner des effets négatifs sur la croissance des plantes. La durée de la maturation dépend énormément de la composition des déchets compostés. Donc un compost est mûr si sa matière organique est stable, cette condition étant nécessaire et suffisante. C'est-à-dire que tout compost stable est un compost mûr [23].

Le degré de maturité du compost est estimé par l'étude de la biodégradabilité de sa matière organique, ou il existe divers indicateurs pour apprécier la maturité d'un compost, dont un des plus utilisés est le rapport C/N (Carbone total/ Azote total). Ce rapport diminue au cours du compostage et atteint une gamme de valeurs faibles [22].

III.6 .4.2. Caractéristiques physico-chimiques classiques

La majorité des études, relatives au degré de maturité des composts, se base sur l'évolution des paramètres physico-chimiques tels que le pH, le taux de matière organique, le rapport d'humification...

III.6.4.3. Valeurs agronomiques

La qualité d'un compost se juge également sur ses qualités comme amendement organique dans les sols. Le compost assure une faible mobilité des nutriments, notamment de l'azote [25]. La valeur amendant est l'aptitude des composts à entretenir ou augmenter le stock de matière organique du sol [23]. Le compost agit tout d'abord en apportant des éléments nutritifs aux sols et aussi en entretenant ou en augmentant le stock de matière organique du sol amendé. Des tests en champ permettent d'estimer les bénéfices de l'apport de composts pour les sols et pour les cultures [14].

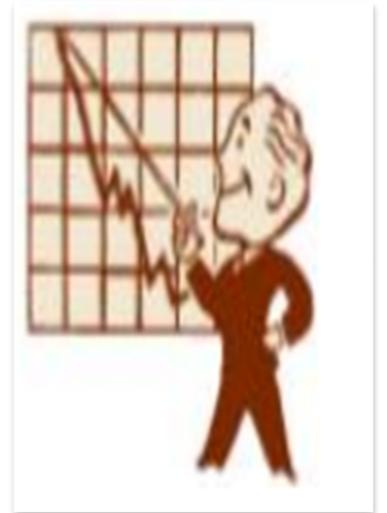
Cependant, pour évaluer plus rapidement cette valeur amendant, deux méthodes sont utilisées : l'indice de stabilité biologique (ISB) et la caractérisation biochimique de la matière organique (CBM). Le calcul d'ISB est une évaluation de la proportion de matière organique susceptible de contribuer à l'entretien de la matière organique du sol. Francou (2003) explique que Linères & Djakovitch (1993) ont mis au point cette méthode en reliant le niveau de stabilité de la matière organique à la nature biochimique du matériau à partir de taux du carbone restant

dans le sol lors d'incubations de longue durée (150 jours) et en le reliant aux fractions biochimiques suivantes : fraction soluble, hémicellulose, lignine obtenue par la méthode de Van Soest et cellulose brute obtenue par fractionnement Weende. Par la suite, Robin (1997) a proposé un autre modèle aboutissant à la détermination du taux de carbone restant dans le sol à long terme : la CBM. Le calcul de la CBM est directement inspiré de celui de l'ISB avec pour différences essentielles : le temps d'incubation qui passe à 40 jours, l'utilisation de la méthode de Van Soest pour toutes les fractions et le fait que l'on tienne compte de la proportion de matières minérales dans le produit de départ [13]. Une synthèse bibliographique (non exhaustive) récapitule la multitude d'indicateurs de maturité existant avec les valeurs seuils pour des composts immatures et des composts matures.

Vu les différences dues aux origines des matières initiales à composter et des techniques de compostage utilisées, les différents critères ne sont pas souvent cohérents et plusieurs auteurs suggèrent ainsi qu'aucun critère n'est utilisable isolément. Ils recommandent donc une combinaison de différentes techniques [16].

Chapitre IV :

Matériels et méthodes



Chapitre IV : Matériels et méthodes

L'objectif de notre travail est d'étudier le processus de Co-compostage entre la boue issue des stations d'épuration du traitement des eaux usées et les déchets verts, qui est un processus de décomposition et de transformation contrôlé des déchets organiques sous l'action de populations microbiennes aérobies variées afin d'obtenir un produit stabilisé, hygiénisé appelé « le Co-compost ». Tout au long du processus, diverses communautés de micro-organismes. Ces communautés se composent essentiellement de bactéries, d'actinomycètes, de champignons, de protozoaires qui représentent la microfaune, notamment des acariens, collemboles, araignées, vers de terre... qui représentent la mésofaune et la macrofaune. La faune est présente naturellement dans les composts, et de ce fait le processus de compostage démarre sans aide extérieure. Ces deux composte permet de valoriser ces deux déchets pour former un produit stable.

IV. 1. Echantillonnage

IV.1.1. Echantillonnage des boues

Les boues étudiées dans cette mémoire proviennent de la STEP des eaux usées urbaines qui se situe au niveau de la ville de Bougaa. Il s'agit d'une station de traitement par boues activées à faible charge. Les prélèvements ont été effectués manuellement dans des boites en plastique stérilisé.

IV .1.2. Echantillonnage des déchets verts

Les déchets vert ou végétaux proviennent de marche de gros de fruits et légumes au niveau de la ville de Bordj Bou Arreridj, Les prélèvements ont été effectués manuellement dans des boites en plastique stérilisé.

IV.2. Préparation des échantillons aux analyses

Les échantillons composites de boues collectés de la station d'ONA ont une texture pâteuse. Ils sont séchés dans une étuve pendant 24 heures à 105°C puis broyés dans un broyeur à disques.

IV.3. Préparation le Co-compostage :

IV.3.1 Préparation et analyse de boue :

- après récupération des boues ont à réduit le volume d'eau dans les lis de séchage, et puis mesure l'humidité finale.
- La deuxième étape et la stabilisation de la MO de la boue, selon les travaux de Mr. Ayeche on a trouvé qu'il faut ajouter 50% de la chaux dans la boue pour la stabilisation de la MO pour conserver la matière organique dans cette boue.
- La dernière étape et de broyer la boue pour réduire leur taille des particules le produit réalisé est-il sont envoyée dans un laboratoire pour mesure les métaux lourd, pH, la MO et la MS (figure IV-10)

IV.3.2. Préparation de l'amendement (déchet végétale)

- La première étape consiste à broyer les végétaux (déchet ménage, déchet jardin ...) pour réduire leur taille et obtenir un mélange homogène pour faciliter leur décomposition
- Après ont à souffler l'air dans le produit qui déjà broyer cela nous permet de pouvoir hygiéniser le produit et stocke pendant 12 semaine
- Le produit fini de notre échantillon est envoyée dans un laboratoire pour mesure les métaux lourd, ph et la MO métaux lourd, pH, la MO et la MS (figure IV-09)



Figure. IV .9 compostage DV



Figure. IV .10 compostage boues

IV.3. Comment enrichir un sol pauvre ? :

- Faire un échantillonnage du sol pauvre, enlever dans un défèrent site de la terre
- Mélanger le co-composte dans des 26 tas selon le tableau suivant à l'aide d'un doseur qui se présente la figure suivante



Figure. IV .11 doseur et mélangeur des amendements

- Mélanger bien le co-compost avec la sole ave un mélangeur spécifique (figure IV.13)
- On met dans chaque pau à peu prés20 grain d'orge dans les conditions optimale



Figure IV.12 : les étapes d'enrichissement de la sole

Tableau IV .1 : protocole de mélange

N : d'échantillon	Pourcentage de boue (%)	Pourcentage de DV (%)	Résultats après un mois de culture
01	0	0	
02	2	2	
03	2	4	

04	2	6	
05	2	8	
06	2	10	
07	4	2	
08	4	4	

09	4	6	
10	4	8	
11	4	10	
12	6	2	
13	6	4	

14	6	6	
15	6	8	
16	6	10	
17	8	2	
18	8	4	

19	8	6	
20	8	8	
21	8	10	
22	10	2	
23	10	4	

24	10	6	
25	10	8	
26	10	10	



Figure IV.13 : mélangeur boue – chaux

IV.4 Choisir le bon pourcentage de co-compostage :

D'après le diagramme qui est présenté dans les figure IV.18 et IV.19 montre qu'après un mois de culture on a trouvé que longueur de plante est presque stable à partir du mélange N° 12 (42.25 cm) par contre les pots de la sole non enrichi par les composte n'a donné aucune résultats d'où les grains d'orge sont pourris. D'où on a opté pour le meilleur pourcentage de Co-compostage qui est 6% boue et 2% de déchet vert pour le reste de notre travail.

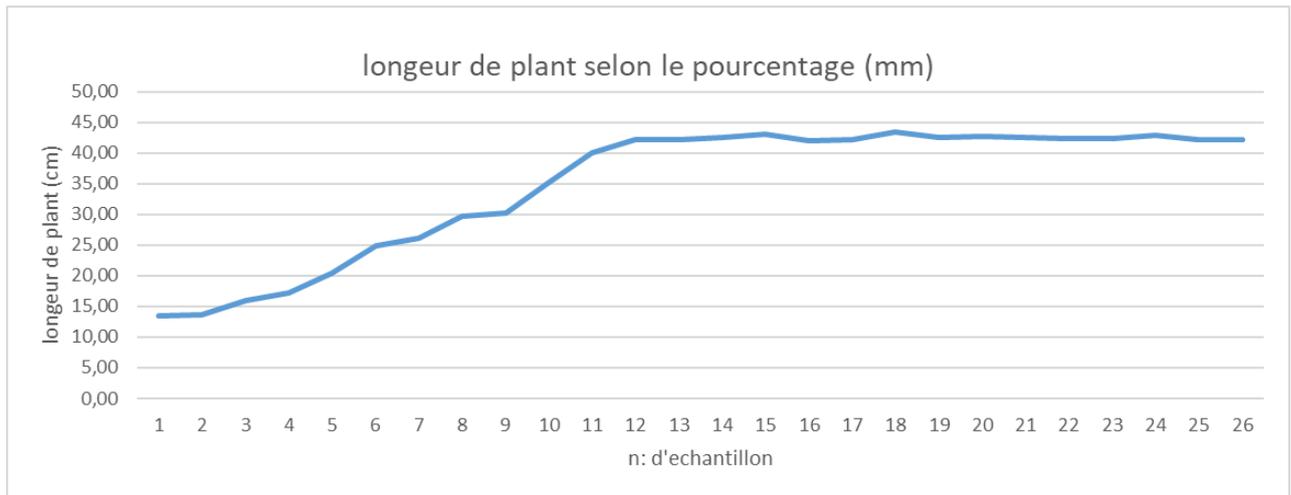


Figure IV.17 longueurs de plant selon le pourcentage de boue et de DV



Figure IV.18. Echantillon 0 témoin



Figure IV.19. Echantillon N 12

IV.5. Caractérisations physiques et chimiques

Les échantillons de compost utilisés pour les analyses physico-chimiques ont été tamisés à 20 mm, lyophilisés puis broyés à 1 mm (Cyclotec® Sample Mill, FOSS).

IV.4.1. Mesure du pH



Figure IV.14 Mesure du pH

Dans un bécher, 10 g de compost tamisé ont été mélangés à 100 mL d'eau bi-distillée. La mesure du pH est effectuée après dix minutes d'homogénéisation à température ambiante à l'aide d'un pH mètre Metrohm (Herisau, Suisse). L'expérience a été faite sur 3 échantillons en parallèle.

IV.4 .2. Matière sèche

La teneur en matière sèche et en eau dans les boues, prélevées à la sortie de la bande presseuse, est obtenue par séchage d'un échantillon dans une étuve à 105°C jusqu'à stabilisation du poids selon la norme NF EN 12880. Cette procédure permet d'une part de quantifier la teneur en eau libre dans l'échantillon et d'autre part d'exprimer les résultats en fonction de la masse sèche.

L'expérience consiste à introduire dans un creuset, préalablement séché et pesé, une masse connue de boues ou DV déshydratées (boues ou DV brutes). L'ensemble (creuset + boues ou DV) est séché dans une étuve à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à obtention d'une masse constante. Connaissant la masse initiale et la masse finale après perte d'eau, la teneur en matière sèche est calculée :

$$MS \% = \frac{(m_1 - m_v) * 100}{(m_0 - m_v)}$$

Où :

m_v : la masse du creuset vide (en g)

m_0 et m_1 sont les masses respectives du creuset rempli de boues avant et après séchage (en g).

L'expérience a été faite sur 3 échantillons en parallèle.



Figure IV.15 étuves

IV.4.3. Matière organique

La teneur en matière organique totale (MO en % de MS) a été déterminée par la perte en masse lors de la calcination de l'échantillon à 550°C , durant 16 heures.



Figure IV.16 : Four à moufle

IV.5. Analyse des métaux lourds

Les échantillons des composts ont été analysés au laboratoire d'analyse (Service des analyses élémentaires) CETIM groupe GICA, pour la détermination quantitative des éléments des métaux lourds ; B, Cr, Ni, Cu, As, Mo, Cd, Pb et Hg par ICPMS modèle X série 2, L'analyse a été effectuée par un Spectromètre ICP-MS de 4mg de chaque échantillon de compost.

IV.6 Résultats et discussions :

IV.6.1 L'analyse des métaux lourds

L'analyse des métaux lourds de la boue STEP Bougaa et le DV au laboratoire de CETIM montre que la teneur en éléments traces (Cd, Cr, Cu, Ni, Zn) inférieures aux valeurs de référence de la norme Algérienne NA 17671.

Tableau IV. 2 : Analyse la teneur en éléments traces (Cd, Cr, Cu, Ni, Zn) de la boue STEP Bougaa et le DV.

Paramètres mesurés au laboratoire	Résultats (mg/kg)		Valeurs limites (norme NA 17671)
	La boue	DV	
Nickel	27,5	7.62	200
Cuivre	99	14.97	1000

Cadmium	1,8	0.21	20
Plomb	139	18.73	800
Mercure	0,7	0.2	10

D'après les résultats obtenus d'analyse de la teneur en éléments traces métaux lourds de la boue et le DV on remarque qu'il ne dépasse pas la norme exigée ce qui ne confère que le co-compost ne pose aucun problème dans l'épandage agricole.

IV.6.2 Caractéristiques des composants initiaux et du compost final

Tableau IV. 3 Caractéristiques des composants initiaux et du compost final

Paramètre	Compost Déchet vert	Compost Boue	Co_compost
pH	7,1	7,3	7,4
MO%	71,3	72,9	72,1
Ms %	4,8	12,4	8,6

La caractérisation des DV et boue mélangée afin d'obtenir un compost montre des résultats similaires concernant le pH et la teneur en MO et une variation de la teneur en MS.

Le co-compost obtenu montre que le pH et de la teneur en MO presque identiques à celles des composants de départ. Par contre la teneur en MS présente la moyenne des MS des produits de départ.

IV7. Résultats des analyses de sole étudiées :

Tableau IV 4 : Caractéristiques de sole après mélange avec le co-compost

Paramètre	Sole avant l'ajoute de compost	Sole après l'ajoute de compost
pH	6,5	7,0

MO %	0,971	57,36
-------------	-------	-------

D'après les résultats obtenus, on remarque augmentation du pH du sol après l'ajout du co-compost ce qui implique la présence des substances alcalines dans le co-compost, l'origine de cette augmentation causé par la présence de la chaux comme stabilisant de la boue d'ONA.

D'autre part, on remarque une augmentation de la teneur en MO cette augmentation est due évidemment au co-compost ajoute qui est très riche en MO résulte de la décomposition et fermentation des de déchets de nature principalement végétale ainsi que la boue de la STEP.



Conclusion générale



Conclusion générale

Notre travail réalisé dans le cadre d'une évaluation de la valorisation agricole des boues résiduaires et des déchets vert, issues de la STEP ouest de Sétif (la station de Bougaa) et les déchets vert du marché de gros ; ainsi leur effet sur le matière organique et le pH des sols agricoles.

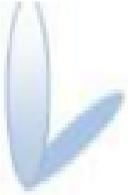
Les résultats obtenu montre qu'après un mois de culture on a trouvé que longueur de plante est presque stable à partir du mélange N° 12 (42.25 cm) par contre les pots de la sole non enrichi par les composte n'a donné aucune résultats d'où les grains d'orge sont pourris. D'où on a opté pour le meilleur pourcentage de Co-compostage qui est 6% boue et 2% de déchet vert.

L'analyse des métaux lourds d'après les résultats obtenu montre que la teneur en éléments traces de la boue et le DV ne dépasse pas la norme exigée ce qui ne confère que le co-composte ne pose aucun problème dans l'épandage agricole.

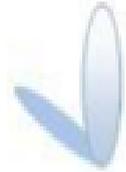
D'autre part le pH du mélange de sol amendé avec différent dose de co-composte (boues résiduaires urbaine et déchets vert) est légèrement basique. Les meilleures doses donnent un pH de 7,5. La caractérisation des DV et boue mélangée afin d'obtenir un composte montre des résultats similaires concernant le pH et la teneur en MO et une variation de la teneur en MS d'où le meilleure co-compost obtenu montre que le pH et de la teneur en MO presque identiques à celles des composants de départ. Par contre la teneur en MS présente la moyenne des MS des produits de départ.

L'analyse de la matière organique montre que l'augmentation de la matière organique augmente avec l'augmentation du pourcentage du mélange, la meilleure augmentation de longueur des feuilles de la plante est 47,5% pour le mélange N°12.

En fin, on peut dire que le co-compostage des boues de station de traitement des eaux usées et les déchets verts donnent des résultats très significatifs dans le domaine d'épandage agricole.



Références bibliographiques



Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] ingénieur isim, 2006. Analyse de cycle de vie appliquée aux systèmes de traitement des eaux usées, thèse doctorat de l'institut national polytechnique de lorraine, spécialité génie des procédés et des produits.

[2] s. boukary, 2018. Traitement des eaux usées industrielles par des procédés membranaires sous climat sahélien : cas des eaux usées de brasserie au burkina faso, thèse doctorat de l'université de montpellier (um).

[3] s. amir, 2005. Contribution a la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost, thèse doctorat de l'institut national polytechnique de toulouse.

[4] s. amir, 2005. Contribution a la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost, thèse doctorat de l'institut national polytechnique de toulouse.

[5] b. fouzia, 2016. Caractérisation et valorisation des boues issues d'un office d'assainissement. Cas onaboumerdes (step boumerdes), thèse doctorat d'université m'hamed bougara-boumerdes.

[6] z. bakiri, 2007. Traitement des eaux usées par des procédés biologiques classiques : expérimentation et modélisation, thèse magister de faculté des sciences de l'ingénieur département de génie des procédés.

[7] z. bakiri, 2014. Analyse et optimisation des eaux usées urbaines par boues activées : application au décanteur secondaire, thèse doctorat d'université ferhat abbas sétif -1 faculté de technologie département de génie des procédés.

[8] m. mohammed saïd, 2012. Élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la step est de la ville de tizi-ouzou, thèse de doctorat spécialité : agronomie option : génie des procédés.

[9] a. heduit, c. boutin, e.risch, i. mur, p. roux, s. gillot, 2011. Filière de traitement des eaux usées par boues activées (ba). Rapport d'onema (office national de l'eau et des milieux aquatiques).

[10] m. kinda fidele, 2020. Conception d'une station expérimentale de traitement des eaux usées par filtres plantés des macrophytes, thèse de doctorat d'université côte d'azur Ongole.

[11] a. seddini, c. mounira, 2013. Étude de la qualité des eaux épurées par le lagunage naturel en Algérie, département d'hydraulique, faculté de technologie, université de Tlemcen, Algérie,

[12] a. soobadar, 2009. Impacts agronomiques et environnementaux de l'épandage de vinasse et de cendre de charbon/bagasse sur les terres agricoles de l'île Maurice, thèse de doctorat de l'université d'Avignon et des pays de Vaucluse.

- [13] p. marquet, m. agin, 2005. La valorisation des boues d'épuration, rapport syndicat des professionnels du recyclage par valorisation agronomique.
- [14] b. de caevel. j.-p. chabrier.o. polle, 2007. Revue des filieres de traitement/valorisation des boues criteres de choix d'une filiere adaptee et arbre de decision, rapport syndicat des professionnels du recyclage par valorisation agronomique.
- [15] b. nabil, 2017. Effet de l'épandage des boues résiduares urbaines sur la conductivité électrique et le pH d'un sol alluvial (cas de l'orangeriaie de boukhalfa), thèse en vue de l'obtention du diplôme de master en agronomie spécialité : réhabilitation et restauration des sols.
- [16] b. nabil, 2002. Traitement eaux usees urbaines, thèse en vue de l'obtention du diplôme de master en génie des procédés.
- [17] ademe, 2005. Guide-pratique-utiliser-dechets-verts-et-cuisine-au-jardin.
- [18] k. souhaib, 2015. Traitement d'eaux usées par adsorption sur des polymères de cyclodextrine et développement de capteurs chimiques à base de membranes de verres de chalcogénures destinées à la détection des ions hg^{2+} , thèse présentée à l'université du littoral côte d'opale pour obtenir le grade de docteur de l'université du littoral côte d'opale mention : chimie spécialité : chimie environnementale.
- [19] b. tayeb, 2013. Caractérisation physico-chimique et valorisation d'une boue de station d'épuration, thèse pour l'obtention du diplôme de magister en hydraulique.
- [20] m. richard, m. pradel, 2014. Les filières de traitement et de valorisation des boues d'épuration en france. Rapport d'enquête.
- [21] b. tayeb, 2007. Revue des filieres de traitement/valorisation des boues criteres de choix d'une filiere adaptee et arbre de decision associe, rapport finale.
- [22] b. samuel, 2020. Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en île-de-france, cette étude a été réalisée à l'ors ile-de-france.
- [23] c. bassompierre, 2007. Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers : de la conception d'un pilote à la validation de modèles, thèse pour obtenir le grade de docteur de l'inp grenoble.
- [24] a. remy, 2007. Co-compostage de boues de station d'épuration et de déchets verts : nouvelle méthodologie du suivi des transformations de la matière organique, these pour obtenir le grade de docteur de l'universite paul cezanne.
- [25] d. lachassagne, 2014. Devenir de micropolluants présents dans les boues d'épuration, du traitement à l'épandage agricole : application aux micropolluants métalliques (cd, cu) et organiques (médicaments) issus du traitement biologique conventionnel d'effluents urbains ou hospitaliers, thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de limoges.
- [26] m. fatima, 2023. Influence de la qualité des composts et leur extrait sur la protection des plantes contre les maladies fongiques, these de doctorat de 3ème cycle filière : sciences agronomiques spécialité : phytopharmacie et protection des végétaux intitulé.