REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté par

Gouffi Samia et Dali Wissem-Samia

Pour l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Génie des Procédés

Option : Génie des procédés de l'environnement

Thème

Les boues d'épuration : Caractéristiques, traitement, gestion et valorisation

Membres de Jury :

Mr KETRANE.R	MCA	à l'Université – BEJAIA	Président
Mr AZZOUG.M	MCA	à l'Université – BEJAIA	Encadreur
Mm AOUDIA.K	MCA	à l'Université – BEJAIA	Examinatrice

Promotion 2019-2020

Remerciements

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadrant Mr Azzoug.M, pour l'orientation, la confiance, la patience et son exigence qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Nous remercions par ailleurs vivement les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail et d'assister à la soutenance.

Sans oublier nos familles et nos amis qui par leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.

Enfin, on remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

G. Samia

D. Wissem-Samia

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers ***parents***

A mes frères : ***Samir*** *et* ***Mohamed***

A ma chère sœur : ***Samira*** *pour leur appui et leur encouragement*

A tous ceux qui me sont chers et qui m'aiment: ***mes amis***
Pour leurs soutiens moraux

A celle avec qui j'ai partagé ce travail ***Wissem-Samia et toute sa famille***

Toute la promotion de génie des ***procèdes de l'environnement année : 2019/2020***

Et à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

G. Samia

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère

Quoi que je dise quoi que je fasse je ne saurais point la remercier comme il se doit, sa présence à mon côté a toujours été ma source de force pour affronter les obstacles.

A mon cher père

Qui a été à mes côté pour me soutenir et m'encourager que ce travail traduit ma gratitude et mon affection

A mon unique sœur

Qui n'a pas cessé de me conseiller et soutenir tout au long de mes études et à qui j'ai énormément d'estime

A mes amis

Qui mon toujours encourager et à qui je souhaite plus de succès

A ma binôme Samia

Pour sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet

D. Wissem-Samia

Sommaire

Sommaire

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES

INTRODUCTION GENERALE 1

I. GENERALITES SUR LES BOUES D'EPURATIONS 2

I.1. Traitement des eaux usées 2
I.1.1. Prétraitement 3
I.1.2. Traitement primaire 4
I.1.2.1. Coagulation-floculation 4
I.1.3. Traitement secondaire 8
I.1.3.1. Procédés intensifs ou artificiels 8
I.1.4. Traitement tertiaire 11

I.2. Boues d'épuration 11
I.2.1. Définition des boues 11
I.2.2. Classification des boues 12
I.2.2.1. Boues primaires 12
I.2.2.2. Boue de traitement physicochimique 12
I.2.2.3. Boues de traitement biologique 13
I.2.3. Composition des boues 13
I.2.3.1. Eléments fertilisants et amendements 14
I.2.3.2. Matière organique 14
I.2.3.3. Eléments indésirables 14
I.2.4. Caractéristiques des boues 16
I.2.4.1. Caractéristiques physico-chimiques des boues 16
I.2.4.2. Caractéristiques biologiques 20

I.3. Opérations de traitement des boues 22
I.3.1. Objectifs du traitement des boues 22
I.3.2. Filières de traitement des boues 23
I.3.2.1. Epaississement 23
I.3.2.2. Stabilisation 24
I.3.2.3. Conditionnement 27
I.3.2.4. Déshydratation 29

I.4. Destination finale des boues et leur valorisation 35
I.4.1. Cadre réglementaire et législation 35
I.4.2. Valorisation agricole et recyclage 38
I.4.2.1. Qualité des boues 39
I.4.2.2. Epandage 39

Sommaire

I.4.2.3. Compostage 42
I.4.3. Valorisation énergétique 43
I.4.3.1. Incinération 43
I.4.3.2. Dans un four spécifique 44
I.4.3.3. Co-incinération avec des ordures ménagères 44
I.4.3.4. Oxydation thermique 45
I.4.3.5. Oxydation par voie humide 45
I.4.3.6. Pyrolyse (Thermolyse) 47
I.4.3.7. Gazéification 48
I.4.4. Récupération des produits 49
I.4.5. Mise en décharge 50
I.4.6. Solutions alternatives 50
I.4.6.1. Réhabilitation de sites et végétalisation 50
I.4.6.2. Fabrication de matériaux de construction 51
I.4.6.3. Co-combustion en cimenterie 51
I.4.6.4. Technique mycélienne 52

I.5. Impacts des boues sur l'environnement 52

I.6. Considération technico-économique 54
I.6.1. Coûts des filières d'élimination des boues urbaines 54

II. ETUDE DE CAS SUR LA GESTION ET LA VALORISATION DES BOUES RESIDUAIRES DOMESTIQUES DANS LE MONDE 55

II.1. Cas de l'Algérie 55

II.2. Cas de l'Egypte 58

II.3. Cas de l'Europe 60

II.4. Cas des USA 62

II.5. Cas du Brésil 64

II.6. Cas de la chine 67

CONCLUSION 69

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RESUMES

Liste des figures

Figure 1: Schéma du parcours des effluents dans une STEP et sous-produits générés. (AUSSEL et al, 2004)....3

Figure 2: Décantation physique-chimique. (MARCEL et PASTOR, 2013) 7

Figure 3: Schéma d'un procédée lits bactériens (CNAS, 2012)....9

Figure 4: Schéma d'un procédé disque biologique. (BONGIOVANNI, 1998)....10

Figure 5: Épuration biologique par boues activées. (MARCEL et PASTOR, 2013)....11

Figure 6: boues primaires....12

Figure 7: Boues physicochimiques....13

Figure 8: *Boues biologiques.* 13

Figure 9: Filières de traitement des boues d'épuration. (BERLAND, 2014) .... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 10: Principes d'une digestion- déshydratation des boues. (BOURRIER et al, 2017)..26

Figure 11: Le conditionnement thermique. (MARCEL et PASTOR, 2013)....29

Figure 12: Schéma du fonctionnement général d'une serre. (BERLAND, 2014)....31

Figure 13: Principe d'un sécheur direct. (BERLAND, 2014)....32

Figure 14: Principe d'un sécheur indirect. (BERLAND, 2014) 33

Figure 15: principe du filtre- presse a plateaux (BERLAND, 2014)....34

Figure 16: filtre-presse a plateaux (BERLAND, 2014)....34

Figure 17: Voies d'élimination des boues de station d'épuration. (BERLAND, 2014)....35

Figure 18: Le compost. (BOURRIER et al, 2017) 42

Figure 19: Principe du procède ATHOS. (BERLAND, 2014)....46

Figure 20: Bilan des températures sur le procédé ATHOS. (BERLAND, 2014)....46

Figure 21: Schéma représentatif des étapes de gazéification. (HERNANDEZ, 2012)....48

Figure 22: Quantités de boues produites dans six stations d'épurations du centre-nord d'Algérie. (NAKIB et al., 2014)....56

Figure 23: Valorisation des boues de stations d'épurations en Algérie. (ONA, 2012) 57

Figure 24:Production des boues en Europe (Kelessidis et Stasinakis, 2012)....60

Figure 25:Destination des boues d'épuration provenant des eaux urbaines résiduaires communiquées. (COMMISSION EUROPÉEN, 2017)....61

Figure 26: La population reliée aux réseaux des stations d'épuration et la production de boues entre 1994 et 2014 aux USA (GUDE, 2015)....62

Liste des symboles

Figure 27: Tendances de la gestion des boues entre 1994 et 2014 aux US (GUDE, 2015) 63

Figure 28: Production des boues en chine 2007-2013.(YANG et al, 2015) 67

Figure 29:Gestion des boues en chine. (GAO et al, 2020) 68

Liste des tableaux

Tableau 1 : Temps de décantation de différentes particules d'après la loi de STOKES. (BUFFLE et NEWMAN, 1992) 6

Tableau 2: Teneurs-limites en micropolluants métalliques dans les boues (mg kg-1 de matière sèche).(BROUZES et CHAUVIERE, 2009) 15

Tableau 3: Taux de réactif appliqués dans le conditionnement chimique des boues urbain . (BOURRIER et al, 2017) 28

Tableau 4:Textes règlementaires. (BERLAND, 2014) 36

Tableau 5 : Teneurs en éléments traces métalliques pour les boues en Algérie selon la norme NA 17671. 37

Tableau 6: Critère agronomique des boues(en% en masse de la matière. (BERLAND, 2014) ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 7: Valorisation agricole des boues. (BERLAND, 2014) 41

Tableau 8: Les avantages et les inconvénients des 3 types d'oxydation thermique..... 47

Tableau 9: Phases minérales trouvées par simulation d'un FB alimenté par différents biocombustibles, 600-900°C, sous pression et avec un rapport ER=0,3. (HERNANDEZ,2012) 49

Tableau 10 : IMPACTS TYPES GLOBAUX DEFAVORABLES. (ANDERSEN, 1999) 53

Tableau 11 : Les coûts moyens des filières de valorisation (ADEME, 2001) 54

Tableau 12: Caractéristiques hydrauliques de six stations d'épuration dans le centre-nord de l'Algérie 55

Tableau 13: Caractéristiques des boues (NAKIB et al., 2014) 57

Tableau 14: Estimation des boues sèches produites à partir de toutes les STEP en Egypte ,2008 58

Tableau 15: caractéristiques des boues sèches en Egypte 59

Tableau 16: Production de boues par région (2000-2001). (MACHADO, 2001)..... 64

Tableau 17: Composition moyenne des boues d'épuration au Brésil (2000-2001) et dans l'État de Paraná (2006). (MACHADO, 2001) 65

Tableau 18: Élimination définitive des boues produites 66

Tableau 19: les teneurs en éléments traces métalliques dans les boues d'épuration en chine. (GAO et al, 2020) 68

Liste des symboles

- **pi 3 :** Le pied cube.
- **a, n :** Constantes
- **V30 :** Volume occupé après 30 minutes de décantation.
- **Wt :** Teneur en humidité.
- **€/TMB :** Euro / Tonnes de matière brute.
- **BST:** Boues sèches totales.
- **BTP :** Bâtiment et des travaux publics.
- **C_D :** Coefficient de traînée
- **CEE :** Communauté Economique Européenne.
- **CET :** Centre d'enfouissement technique.
- **COT:** Carbone Organique Totale.
- **C/N :** Un Rapport Carbone Sur Azote.
- **DBO5 :** Demande biologique en oxygène (en 5 jours).
- **DCO :** La demande chimique en oxygène.
- **d_p :** Diamètre de la particule (m)
- **EH :** Equivalent-Habitants.
- **ERU :** Eaux résiduaires urbaines.
- **ER :** Equivalence ratio.
- **ETM :** Les Eléments Traces Métalliques.
- **FM :** Fraction minérale.
- **FV :** Fraction volatile.
- **g :** Accélération de la pesanteur (m/s^2)
- **HAP :** Hydrocarbures aromatiques polycycliques.
- **HCWW:** Holding Company for Water and Waste Water.
- **IB :** Indice de boue.
- **IM** (Indice de Mohlman) **:** Indice de décantation ou indice volumétrique de boue (MI/g).
- **ISDND :** Les Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux.
- **L'UE :** Union Européenne.

Liste des symboles

- **MES :** Matières en suspension (mg/L).
- **MM :** Matières minéral.
- **MMS :** Matière minérale en suspension.
- **MS :** Matières sèches (mg/L).
- **MVS :** Matières volatiles en suspension (mg/L).
- **NA :** Norme ALGERIENNE.
- **NF :** Norme AFNOR.
- **NOPWSD:** National Organization for Portable Water and Sanitary Drainage.
- **OM :** Ordures ménagères.
- **OMS :** Organisation Mondiale de la Santé.
- **ONA :** Office nationale de l'assainissement.
- **OVH :** Oxydation par voie humide.
- **PCB :** Polychlorobiphényles.
- **PCI :** Le pouvoir calorifique inferieur.
- **PCS :** Le pouvoir calorifique supérieure.
- **pH :** Potentiel Hydrogène.
- **PT :** Le phosphore total.
- **Px :** Production totale de boue.
- ρ_s **:** Masse volumique du solide (kg/m^3)
- ρ_l **:** Masse volumique du fluide (kg/m^3)
- Re_p **:** Nombre de Reynolds particulaire
- **SSA :** Cendre issues de l'incinération des boues.
- **STEP :** Station d'épuration d'eau usée.
- **TCR :** Taillis a courte ou très courte rotation.
- **UV:** Ultra-violet.
- v_p **:** Vitesse de la particule (m/s)

Introduction générale

Les boues résiduaires sont un sous-produit issu du traitement des eaux usées dans les stations d'épuration des eaux usées (STEP). Ces boues d'épurations peuvent provenir à la fois de rejets d'eaux usées domestiques ou industrielles.

Les principaux problèmes que les boues d'épurations engendrent sont : leur volume de plus en plus croissant et leur concentration élevée en matières organiques et en métaux lourds, présentant ainsi une nuisance environnementale. Par conséquent, des solutions de traitement de ces déchets solides doivent être trouvées afin de prévenir leurs impacts et de s'inscrire dans une logique de développement durable. En effet, trouver un moyen d'éliminer les boues qui ne nuirait pas de manière permanente à l'environnement est toujours un défi pour parvenir à une gestion durable des boues. Actuellement, les trois méthodes d'élimination les plus courantes des boues sont la mise en décharge, l'incinération et la valorisation sous forme d'amendements agricoles. D'autres technologies innovantes d'élimination comme la pyrolyse, l'oxydation humide et la gazéification sont aussi utilisées mais sont loin d'être généralisées. (KELESSIDIS et STASINAKIS, 2012)

Notre présent mémoire se proposer de faire une petite synthèse sur les boues issues des stations de traitement d'eaux usées domestiques. Le premier chapitre présentera leurs sources, leur composition, et les différents procédés de leur traitement et de leur valorisation. Le second chapitre quant à lui aura pour but de présenter quelques stratégies de traitement et d'élimination des boues adoptées par quelques pays développés comme les USA, les pays européens et de pays en voie de développement comme la chine, l'Egypte, l'Algérie et le Brésil entre autr

I. Généralités sur les boues d'épurations

I.1. Traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées comprend différentes étapes successives. Si les procédés diffèrent légèrement selon les stations d'épuration, en fonction de l'année de mise en service, de la sensibilité du milieu récepteur ou des contraintes d'implantation de l'usine, les principes généraux d'épuration demeurent les mêmes et les ouvrages sont ordonnés selon un ordre qui varie peu. Ces grandes étapes – prétraitement, traitements primaires, secondaires, tertiaires – correspondent à la typologie des formes de pollution :

- Les pollutions grossières sont soumises à des prétraitements (procédés physiques).
- Les pollutions particulaires sont éliminées lors de traitements primaires (physiques ou physico-chimiques).
- Les pollutions dissoutes sont dégradées par des traitements secondaires (biologiques).
- Enfin, un affinage est parfois réalisé par le biais de traitements tertiaires. (MARCEL et PASTOR, 2013)

Les caractéristiques des eaux brutes sont extrêmement variées. Il existe un certain nombre de procédés élémentaires destinés à les traiter. Les professionnels de l'eau peuvent combiner de différentes manières ces procédés, en fonction des cas spécifiques. En outre, chaque procédé pourra changer de rôle en fonction de la place qu'il occupe dans la filière du traitement et de la façon dont il est mis en œuvre. Il n'est pas simple de prétendre décrire de façon complète les différents procédés et filières de traitement. Il est, cependant, possible de proposer une classification générale de procédés de base, puis une description des étapes les plus courantes du traitement dans une station d'épuration d'eaux usées (STEP) (Figure 1).

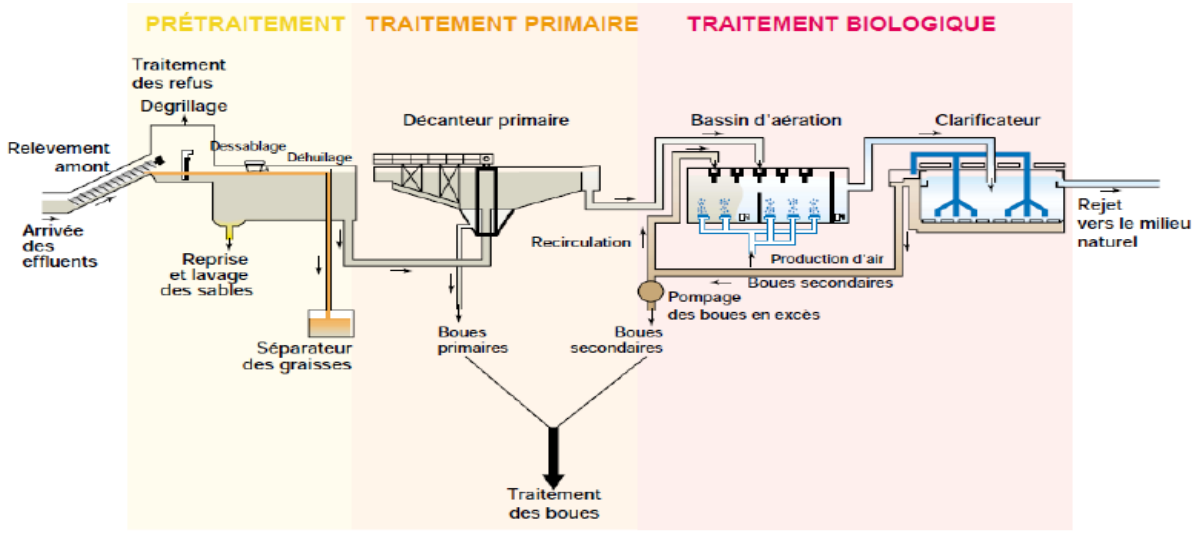

Figure 1: *Schéma du parcours des effluents dans une STEP et sous-produits générés. (AUSSEL et al, 2004)*

I.1.1. Prétraitement

Le prétraitement est la première étape de traitement qui vise à éliminer les déchets volumineux susceptibles d'endommager les équipements, par simples procédés de séparation physique.

Ainsi on y retrouve une étape de dégrillage au cours de laquelle les eaux usées passent au travers d'une grille dont les barreaux sont plus ou moins espacés, retenant ainsi les matières les plus volumineuses. L'étape de dessablage vient ensuite débarrasser les eaux usées des sables et graviers par sédimentation. Les matériaux récupérés sont alors lavés puis, selon la qualité du lavage, seront soit réutilisés soit envoyés en décharge. Une étape de dégraissage (appelée aussi déshuilage) vient parachever ces prétraitements. Elle consiste à racler les particules graisseuses se trouvant en surface des eaux soit naturellement soit par flottation via l'injection d'air au fond de l'ouvrage. (KARIA et CHRISTIAN, 2003)

I.1.2. Traitement primaire

Le traitement primaire regroupe les procédés physiques ou physico-chimiques visant à éliminer par décantation une forte proportion de matières minérales ou organiques en suspension. Ce sont ces matières qui sont responsables du trouble des eaux usées. Il ne permet d'obtenir qu'une épuration partielle des eaux usées et ne peut suffire à lui seul comme traitement des eaux usées.

La décantation primaire classique consiste en une séparation des éléments liquides et des éléments solides sous l'effet de la pesanteur. Les matières solides se déposent au fond d'un ouvrage appelé "décanteur" pour former les "boues primaires". Ces dernières sont récupérées au moyen d'un système de raclage. (KARIA et CHRISTIAN, 2003)

La décantation est encore plus performante lorsqu'elle s'accompagne d'une floculation préalable.

I.1.2.1. Coagulation-floculation

La coagulation-floculation facilite l'élimination de MES (Matières En Suspension) et des colloïdes en les rassemblant sous forme de flocs dont la séparation s'effectue par décantation, flottation et/ou filtration. C'est donc un traitement physique qui permet d'éliminer tous ou une partie des polluants des effluents notamment les fractions particulaires inertes ou vivantes, les fractions floculables des matières organiques et de certains métaux lourds, les micropolluants associés aux MES et les macromolécules colloïdales. (ADAMCZYK, 2003)

Le temps de décantation des particules coagulées dépend du type de particules, du diamètre des particules et de leur surface spécifique (voir le tableau). Ce temps va d'une seconde pour du gravier coagulé ayant un diamètre de 10 mm et une surface spécifique de 6.10^2 $m^2.m^{-3}$ à 20 ans pour du colloïde de 10^{-2} µm ayant une surface spécifique de 6.10^8 $m^2.m^{-3}$ (DEGREMONT, 2005). Il est donc impossible que certaines particules notamment les colloïdes et les particules à surface spécifique très élevée décantent naturellement. Pour obtenir la décantation de ces particules, il faudrait assembler un très grand nombre de colloïdes en agrégats d'au moins 10 à 100 µm. Malheureusement, ces particules exercent entre elles des forces de répulsion de nature électrostatique empêchant leur assemblage. (BUFFLE, 1988 ; BESRA, 2002)

a. Principe de la décantation

Toute particule présente dans l'eau est soumise à deux forces. La force de pesanteur, qui est l'élément moteur, permet la chute de cette particule. Les forces de frottement dues à la traînée du fluide s'opposent à ce mouvement. La force résultante en est la différence. STOKES a établi à partir de ces données, la loi qui permet de calculer la vitesse limite de chute d'une particule.

$$V_L^2 = \frac{4}{3}\frac{d_p}{C_D}\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} g$$

$$C_D = a\, Re_p^{-n}$$

$$Re_p = \frac{d_p \rho_l V_p}{\mu}$$

Avec V_l : Vitesse limite de chute de la particule (m/s)

d_p : Diamètre de la particule (m)

C_D : Coefficient de traînée

q_s : Masse volumique du solide (kg/m^3)

q_l : Masse volumique du fluide (kg/m^3)

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2)

a, n : Constantes

Re_p : Nombre de Reynolds particulaire

v_p : Vitesse de la particule (m/s)

a et n sont fonction du régime :

- Laminaire ($10^{-4} < Re_p < 1$)

  a = 24

  n = 1

- Intermédiaire ($1 < Re_p < 10^3$)

  a = 18,5

  n = 0,6

- Turbulent ($10^3 < Re_p < 2.10^5$)

  a = 0,44

  n = 0

b. Les suspensions colloïdales – Nécessité de la coagulation

Dans le tableau 1 sont répertoriés certains matériaux ou organismes avec leur dimension et l'ordre de grandeur du temps nécessaire pour que, sous la seule influence de leur poids, ces particules parcourent un mètre d'eau à 20 ° C. (BUFFLE et NEWMAN, 1992)

Tableau 1 : *Temps de décantation de différentes particules d'après la loi de STOKES. (BUFFLE et NEWMAN, 1992)*

Diamètre de particule		**Type de particule**	**Temps de Décantation pour 1 m d'eau**	**Surface Spécifique $m^2.m^{-3}$**	/
Mm	**µm**				
10	10^4	Gravier	1 seconde	6.10^2	MES décantation
1	10^3	Sable	10 secondes	6.10^3	
10^{-1}	10^2	Sable fin	2 minutes	6.10^4	
10^{-2}	10	Limon	2 heures	6.10^5	
10^{-2}	10	Kyste de protozoaire	20 heures	6.10^5	Colloïdes
10^{-3}	1	Argile	2 jours	6.10^6	
10^{-3}	1	Bactérie	8 jours	6.10^6	
10^{-4}	10^{-1}	Colloïde	2 ans	6.10^7	
/	10^{-2}	Colloïde	20 ans	6.10^8	
10^{-5}	/				

Le tableau 1 montre donc que les colloïdes sont des particules

- Impossibles à décanter naturellement ;
- Ayant une surface spécifique très élevée qui régit la stabilité de leur suspension dans l'eau.

En effet, pour obtenir des vitesses de décantation plus rapides, il faudrait assembler un très grand nombre de colloïdes en agrégats d'au moins 10 à 100 mm, mais ces colloïdes exercent entre eux des forces de répulsion de nature électrostatique empêchant leur rapprochement : leur suspension peut donc rester parfaitement stable. (BUFFLE, 1988 ; BESRA, 2002)

c. *Coagulants utilisés*

L'efficacité de la clarification dépend d'abord du coagulant utilisé. Les coagulants les plus efficaces sont des sels de métaux, à bases d'aluminium ou de fer (Tableau 2).

Tableau 2: *Dérivés des sels d'aluminium et de fer utilisés dans les procédés de coagulation-floculation. (LENGO, 1994)*

Sels d'aluminium	Formule chimique	Sels de fer	Formule chimique
Sulfate d'aluminium (alun)	$Al_2(SO_4)_3$	Chlorure ferrique	$FeCl_3$
Chlorure d'aluminium	$AlCl_3$	Sulfate ferrique	$Fe_2(SO_4)_3$
Aluminate de sodium	$NaAlO_2$	Sulfate ferreux	$FeSO_4$

Ces coagulants, une fois introduits dans l'eau, forment des produits d'hydrolyse qui déterminent l'efficacité de la coagulation (Figure 2). Par exemple, lorsque l'alun est utilisé, plusieurs radicaux hydroxy alumineux monomères ou polymères sont formés. (LENGO, 1994)

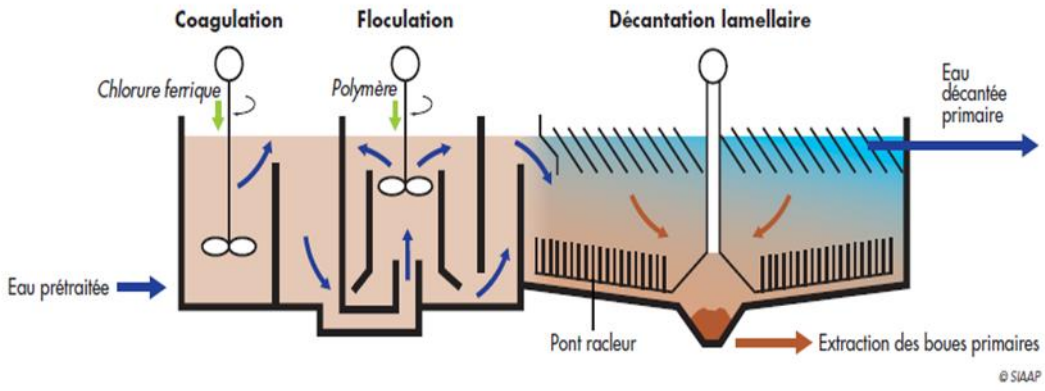

Figure 2*: Décantation physique-chimique. (MARCEL et PASTOR, 2013)*

I.1.3. Traitement secondaire

Le traitement secondaire est un traitement purement biologique des eaux usées et a pour objet de réduire la teneur en matière organique présentes dans ces eaux et leur dégradation biologique par les micro-organiques. Parmi les divers micro-organismes responsables de la dégradation on trouve les bactéries aérobies et les bactéries anaérobies. Cependant la vitesse de la dégradation des matières organiques est plus élevée au milieu aérobie, pour ce fait, les installations d'épuration biologique fonctionnent généralement en présence d'oxygène, parmi les procédés biologique d'épuration des eaux usées n distingue deux principaux types :

- Les procédés intensifs ou artificiels
- Les procédés extensifs ou naturels. (BONGIOVANNI, 1998)

I.1.3.1. Procédés intensifs ou artificiels

Les techniques les plus développées au niveau des stations d'épuration urbaines sont des procédés biologiques intensifs. Le principe de ces procédés est de localiser sur des surfaces réduites et d'intensifier les phénomènes de transformation et destruction des matières organiques que l'on peut observer dans le milieu naturel. (BONGIOVANNI, 1998)

Trois grands types de procédés sont utilisés :

- Lits bactériens
- Disques biologiques
- Boues activées

a. Lits bactériens

Le principe de fonctionnement des lits bactériens, aussi dénommés "filtres percolateurs ou "filtres ruisselants", consiste grâce à un distributeur rotatif (sprinkler), à faire ruisseler en continu les eaux à épurer sur des matériaux poreux servant de support aux micro-organismes (figure 3). Ces matériaux peuvent être minéraux (des cailloux ou de la roche volcanique telle la pouzzolane) ou synthétiques. Le film biologique formé par les bactéries se décroche au fur et à mesure que l'eau percole, assurant ainsi une auto curage du système. Un décanteur secondaire complète cette installation pour séparer l'eau clarifiée des boues produites.

Les nombreux inconvénients de ce procédé :

- Faibles rendements,
- Fréquents colmatages,
- Nuisances olfactives,
- Ne compensent pas suffisamment ses avantages, dont un faible coût de fonctionnement. (MARCEL et PASTOR, 2013)

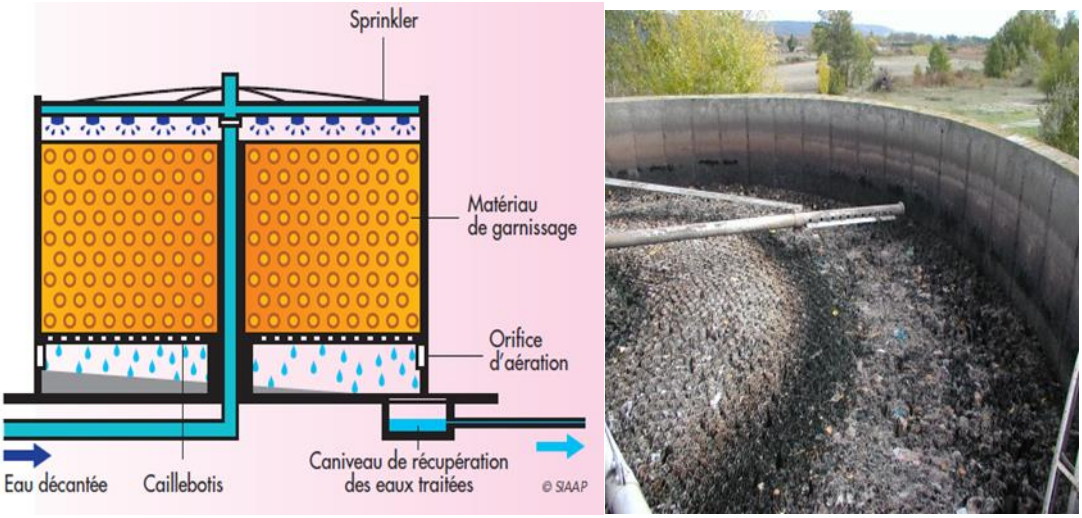

***Figure 3**: Schéma d'un procédée lits bactériens (CNAS, 2012)*

b. Disque biologique

Une autre technique faisant appel aux cultures fixées est constituée par les disques biologiques tournants. Ce procédé consiste à alimenter en eau usée, préalablement décanté une cuve contenant des disques en rotation sur un axe horizontal (Figure 4).

Les micro-organismes se développent et forment un film biologique épurateur à la surface des disques. Les disques étant semi-immergés, leur rotation permet l'oxygénation de la biomasse fixée. Le mélange d'eau traitée et de biofilm décroché est dirigé vers un décanteur pour la séparation des phases. (JEAN-PIERRE, 2001)

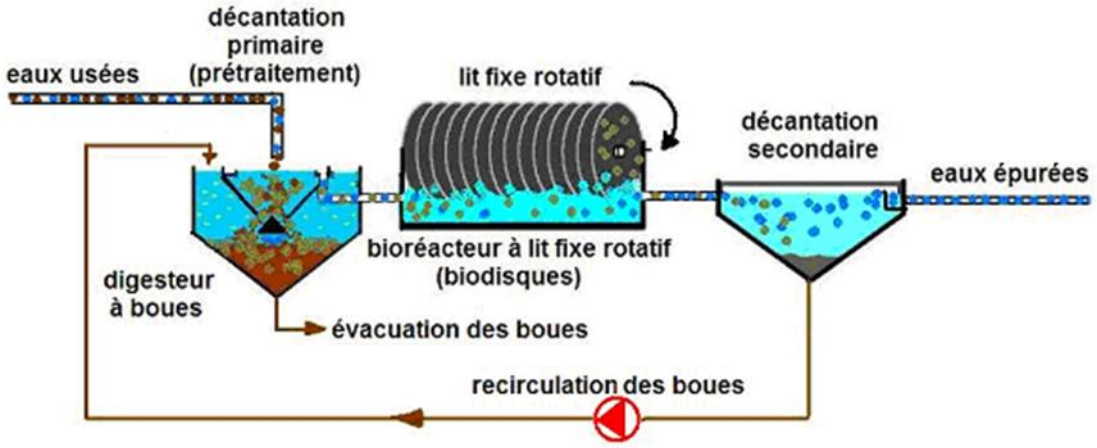

Figure 4: *Schéma d'un procédé disque biologique. (BONGIOVANNI, 1998)*

c. Boues activées

Ce type de traitement implique l'aération du bassin des eaux usées afin d'assurer les conditions adéquates (O_2) pour le développement des micro-organismes qui s'agglomèrent et forment le floc bactérien (Figure 5). Les matières organiques polluantes vont être captées par ces flocs et former des boues activées qui sont brassées et assurent l'épuration des eaux usées dans le bassin. A l'aval de ce traitement, un clarificateur (ou décanteur secondaire) permet l'isolation des boues. Pour conserver un stock constant et suffisant de bactéries dans le bassin de boues activées, une partie des boues extraites du clarificateur est renvoyée en tête de bassin. L'autre partie est évacuée du circuit et dirigée vers les unités de traitement des boues. (BASSOMPIERRE, 2007)

Les procédés par boues activées présentent certains inconvénients, liés notamment à l'incompatibilité de la vie des micro-organismes avec certains effluents – ceux contenant des produits chimiques par exemple. Par ailleurs, l'emprise au sol des bassins d'aération (Figure 5) et des clarificateurs est importante car les ouvrages sont volumineux. Cependant, cette technique bénéficie de coûts d'investissement et d'entretien raisonnables. Les ouvrages sont en outre faciles à piloter et sont plus résistants que les bio-filtres. (MARCEL et PASTOR, 2013)

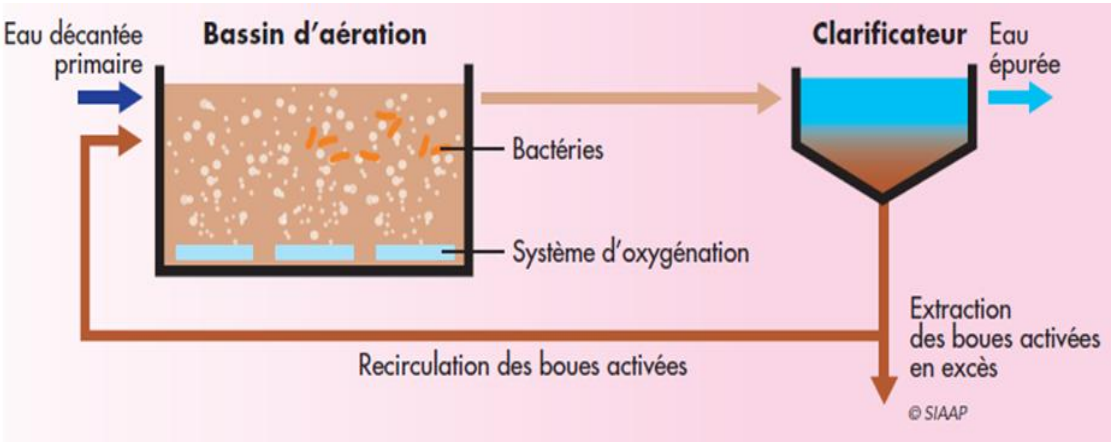

Figure 5: *Épuration biologique par boues activées. (MARCEL et PASTOR, 2013)*

I.1.4. Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire consiste essentiellement en une désinfection de l'eau juste avant rejet, parfois aussi en un affinage préalable du traitement précédent. Il est effectué de manière très variable, allant d'un simple ajout d'eau de javel ou de chlore justement dosé à un passage sous des lampes à UV. Certains encore utilisent de l'ozone (un gaz fabriqué sur place car il est instable), d'autres stockent l'eau dans des bassins peu profonds favorisant l'action du soleil. (KARIA et CHRISTIAN, 2003)

I.2. Boues d'épuration

I.2.1. Définition des boues

On appelle boues d'épuration les sédiments résiduaires issus du traitement des eaux usées. Les boues d'épuration urbaines résultent de différent traitements des eaux usées domestiques qui proviennent de l'activité humaine et éventuellement des rejets industriels dans les réseaux des collectivités après avoir subis un traitement obligatoire. (BARNAT, 2001)

La production de boue au sein d'une installation s'écrit :

$$\mathbf{P_x} = P_m + P_r + P_b$$

Où :

- $\mathbf{P_x}$: Production totale de boue.
- P_m : Production de boues résultant de l'accumulation de matière minérale.
- P_r : Production de boues résultant de l'accumulation de composés organiques non biodégradables.
- P_b : Production des boues résultant de la reproduction des micro-organismes. (AMORCE TECHNIQUE, 2012)

I.2.2. Classification des boues

Les boues d'épuration sont produites à plusieurs stades du processus d'assainissement des eaux usées. Selon des étapes du traitement au cours desquelles elles sont recueillies, on distingue :

I.2.2.1. Boues primaires

C'est des boues qui résultent du traitement primaire des eaux usées (Figure 6). Elles sont très hétérogènes, riches en matières minérales (micro-sable, terres) et contiennent de 65 à 70% de matières organique putrescible et susceptible d'évolution (DUCHENE, 1990). Elles sont riches en eaux, environ 90 à 95 % et présente une odeur fétide. (POMMEL, 1979)

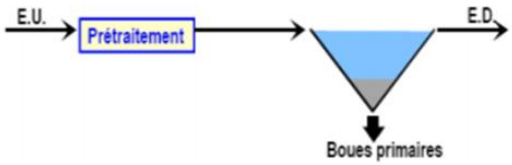

Figure 6: *boues primaires*

I.2.2.2. Boue de traitement physicochimique

Variante des boues primaires sont obtenues par adjonction de réactifs (sel de fer, d'aluminium) visant à coaguler la fraction colloïdale des matières contenus dans les eaux usées. Présentant des concentrations assez élevée, elles nécessitent une stabilisation et posent des problèmes spécifiques de destination finale du fait des ajouts des réactifs et plus particulièrement de sels métalliques. (DUCHENE, 1990)

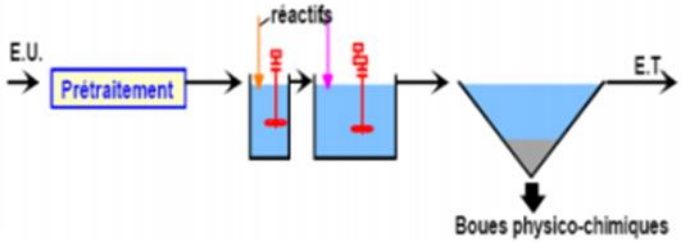

Figure 7: *Boues physicochimiques.*

I.2.2.3. Boues de traitement biologique

Ces boues sont essentiellement formées par les bactéries "cultivées" dans les ouvrages d'épuration (Figure 8). Ces bactéries se sont nourries des matières organiques contenues dans les eaux usées. 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 prélevée soutirée régulièrement entretenant ainsi la dynamique des reproductions bactériennes. (DUCHENE, 1990)

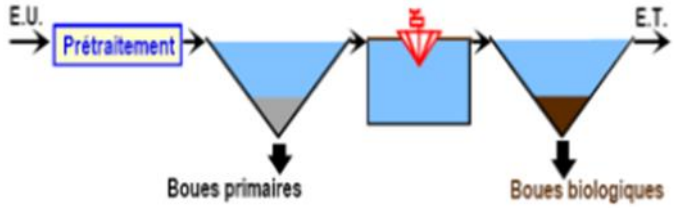

Figure 8: *Boues biologiques.*

I.2.3. Composition des boues

Les boues résiduaires issues de l'épuration des eaux usées sont principalement constituées des matières biologiques résultant de la dépollution et d'éléments minéraux présents dans le milieu. Leur composition fait apparaître :

- De l'eau,
- Des matières sèches constituées à la fois de matières organiques et de substances minérales riches en éléments nutritifs contenant de l'azote, du phosphore, du soufre, etc.,
- Des micro-organismes variés, dont des pathogènes,
- Des « éléments-traces » métalliques d'origines industrielle, domestique ou provenant de ruissellement des eaux pluviales, des « composés-traces » organiques plus ou moins dégradés par l'activité biologique. (SPDE, 2006)

I.2.3.1. Eléments fertilisants et amendements

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. (ZEBARTH et al, 2000 ; SU et al, 2004 ; WARMAN et al, 2005).

I.2.3.2. Matière organique

La concentration en matière organique peut varier de 30 à 80 %. La matière organique des boues est constituée de matière particulière éliminée par gravité dans les boues primaires, des lipides (6 à 19 % de matières organique), des polysaccharides, des protéines et des acides aminés (jusqu'à 33 % de la matière organique), de la lignine, ainsi que des produits du métabolisme et des corps microbiens résultant des traitements biologiques (digestion, stabilisation) (METAHRI, 2012).

I.2.3.3. Eléments indésirables

a. Eléments traces métalliques

Les éléments traces métalliques (Tableau 2) (ETM) présentent un risque éco-toxicologique car ils ne sont pas biodégradables. Parmi les ETM suivis dans cette étude, certains sont des oligo-éléments indispensables aux processus biologiques tels que le zinc, le cuivre et le chrome. Ils peuvent cependant devenir toxiques en fonction de leur concentration et de leur spéciation (forme chimique). D'autres, tels que le cadmium, le plomb et le mercure, sont des éléments uniquement toxiques et très utilisés par les industries pour leurs propriétés physico-chimiques. (Agence de l'eau, 2016)

***Tableau 2**: Teneurs-limites en micropolluants métalliques dans les boues (mg kg $^{-1}$ de matière sèche).(BROUZES et CHAUVIERE, 2009)*

Espèce chimique	Directive C.E.E	Norme française	
		Limites	Références
Arsenic	-	-	-
Cadmium	20 - 40	40	20
Chrome	1000 - 1750	2000	1000
Cuivre	1000 -1750	2000	1000
Mercure	16 - 25	20	10
Molybdène	-	-	-
Nickel	300 - 400	400	200
Plomb	750 - 1200	1600	800
Sélénium	-	-	-
Zinc	2500 - 4000	6000	3000

b. *Micro-organismes pathogènes*

Les boues contiennent des milliards de microorganismes vivants qui jouent un rôle essentiel dans les processus d'épuration. Seul une infime partie est pathogène (virus, bactéries, protozoaires, champignons, helminthes, etc.) et provient en majorité des excréments humains ou animaux. La concentration d'une eau usée en germes pathogènes dépend du secteur d'activité d'origine. (METAHRI, 2012)

c. *Les micropolluants organiques*

Les substances les plus fréquemment considérées sont les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) et les CTO (Composés Traces Organiques). Parmi les CTO présents dans les boues, PCB (Polychlorobiphényles) (somme des 7 PCB), Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène et Benzo(a)pyrène figurent dans l'arrêté du 8 janvier 1998 qui impose leur analyse avant l'épandage. Les boues peuvent également contenir des pesticides, des phtalates, des nitrates, …etc. (AMORCE, 2012)

I.2.4. Caractéristiques des boues

Il s'agit de déterminer les caractéristiques générales relatives à chacune des deux phases constitutives, qui s'avèrent être d'utiles points de repère.

I.2.4.1. Caractéristiques physico-chimiques des boues

a. Matières sèches MS ou siccité

Exprimée généralement en g/L pour des boues liquides et en pourcentage en masse (siccité) pour des boues solides. Elle est obtenue par séchage à 105 °C d'un échantillon de boue ensuite pesée. C'est un paramètre qui renseigne sur la consistance et la concentration en solides des boues. Une siccité élevée a pour avantage de réduire le volume de boues à transporter. Une siccité élevée facilite également l'acheminement des boues vers des sites de compostage spécialisés. (JAROZ ,1985)

BOUES = EAU + MATIERES SECHES

100% = HUMIDITE (%) + SICCITE (%)

Une boue avec une siccité de 10 % présente une humidité de 90 % :

- **Les boues liquides** : siccité de 0 à 10 % ;
- **Les boues pâteuses** : siccité de 10 à 25% ;
- **Les boues solides** : siccité de 25 à 80% ;
- **Les boues sèches** : siccité supérieure à 80%. (VECTEUR ENVIRONNEMENT, 2007)

b. Matières volatiles sèches

Exprimée en pourcentage du poids des matières sèches, elle est déterminée par calcination dans un four à 600℃ d'un échantillon à boue préalablement sèche à 105℃. (JAROZ, 1985)

c. *Matières Volatiles (MV, en concentration) ou Fraction Volatile (FV, en % de MS)*

C'est le rapport des matières volatiles MV (en g/L) sur les matières sèches MS (en g/L). Ce paramètre livre une indication sur le degré de stabilisation de la boue et son aptitude à divers traitements (déshydratation, incinération...). Plus le taux de MV est faible, plus la boue est facile à épaissir ou à déshydrater, mais plus son exo thermicité en incinération est faible. Les boues urbaines possèdent de grandes teneurs en MV (70 % en moyenne). (DJAMONET, 1987)

d. *Tests de décantation*

Ce test va permettre de déterminer un volume de flocs biologiques présents dans un litre de boues activées. Il peut être réalisé dans une éprouvette de 1 litre ou dans un cône d'IMOHF après 30 minutes d'attente.

- Prélever 1litre de boues activées et les mettre dans le cône.
- Faire éventuellement des dilutions (1/4, 1/2) avec de l'eau épurée du décanteur.
- Mesurer toutes les 5 minutes pendant 30 minutes la hauteur de boues. (PANDOLFI, 2006)
  - Indice de boue (IB) SVI (sludge volume index)

On est quelque fois amené à calculer un autre indice lorsque les boues décantent moyennement bien. Pour cela on détermine l'indice de boues en utilisant la dilution la plus faible pour laquelle le volume après 30 minutes de décantation (V 30) est inférieur à 300 mL. (PANDOLFI, 2006)

Indice de Boues (mL /g) = (V 30 de la dilution la plus faible < 300mL) / (C_{MES} en g/L). Dilution

Il caractérise l'aptitude à la décantation, et donc ultérieurement à l'épaississement puis à la déshydratation d'une boue issue d'un traitement biologique. Il est à relier indirectement aux MS et MV. (AMADOU, 2007)

L'indice de boue est défini à partir de tests de décantation permettant d'obtenir des volumes de boues compris entre 100 et 250 ml.

Si:

IB < 100 : Correspondent à des boues qui sédimentent facilement.

100 < IB < 200 : Décantation difficile (quelques filament).

IB > 200 : Mauvaise décantation (boue riche en filament). (AMADOU, 2007)

- L'indice de Mohlman (IM)

On définit l'Indice de Mohlman (IM) ou Sludge Volume Index (SVI), comme étant le rapport du volume occupé par un litre de boue après 30 minutes de décantation (sans dilution) par la concentration de matière en suspension (MES).

Indice de Mohlman (mL /g) = (V 30 minutes en mL/L) / (C_{MES} en g/L)

La valeur moyenne de l'indice de Mohlman est située entre 90 et 150 mL/g. Au-dessus de 150 mL/g des problèmes de décantation peuvent apparaître. (PANDOLFI, 2006)

e. Viscosité

Les boues fraîches, dont la concentration dépasse rarement 10 à 15 g/L, ont un comportement newtonien. Leur viscosité est alors de l'ordre de quelques mPas. Quand la teneur en MS prend des valeurs plus importantes, la boue adopte un comportement généralement rhé fluidifiant, modélisable. (SEDKI.A, 1995)

f. Matières en suspension MES

Si les MS sont faciles à déterminer sur les phases concentrées, il n'en va pas de même sur les phases clarifiées où la procédure de mesure de MES par filtration sur membrane est plus appropriée.

Afin d'écrire un bilan matière rigoureux soit en MS, soit en MES sur une opération de séparation de phase (qui ne sépare que les MES), on reliera les deux paramètres par la relation expérimentale suivante : (JARDE, 2002)

MES = MS – [substances organiques et minérales dissoutes].

g. Masse volumique

Elle permet de calculer le volume de boue à convoyer. En l'absence de mesure, pour une boue liquide ou pâteuse, on peut considérer en première approximation la pondération suivante :

$$\mathcal{S} = 1\,000\,(1 - S) + [900\,FV + 2\,700\,FM]\,S$$

FM = (1 – FV) représente la fraction de matière minérale, de masse volumique 2 700 kg/m3, la fraction organique ayant une masse volumique proche de 900 kg/m3. (ADEME, 2001)

h. Rapport carbone azote (C/N)

Ce rapport entre le carbone total et l'azote totale, mesuré sur un matériau organique, indique le degré d'évolution de la matière organique et son degré de résistance à la dégradation microbienne. Ce rapport donne une idée très juste de la vie biologique du sol et permet en conséquence d'en apprécier les propriétés physiques. (LEMAIRE et al, 1990)

i. Compressibilité

Lorsqu'on fait croître la pression au-dessus d'un filtre, on obtient un écrasement du gâteau et une augmentation de la résistance à la filtration, la représentation logarithmique de la résistance spécifique en fonction de la pression augmente et atteint des valeurs de l'ordre de 10 bars, la filtration de l'eau contenue dans les boues est pratiquement bloquée, on atteint alors la siccité limite. (DEGREMENT, 1978)

j. Teneur en eau

L'eau contenue dans la boue se présentent sous quatre grandes classes : l'eau libre, l'eau interstitielle, l'eau vicinale et l'eau d'hydratation. (DEGREMENT, 1978)

k. Pouvoir calorifique PC

Les teneurs en matière organique des boues leur donnent une aptitude à la combustion non négligeable qui permet de les incinérer. (LACEE, 1985)

l. Pouvoir calorifique inferieur PCI

Son importance est primordiale en incinération. Généralement exprimé par rapport aux MV, il est à relier au C, H, O, N, S par écriture de la stœchiométrie de combustion. Différentes approches (formule de Dulong, théorie des électrons disponibles, etc.) permettent de le calculer approximativement, à défaut de le mesurer expérimentalement à la bombe calorimétrique. (HOODA et, ALLOWAY, 1993)

J. Pouvoir calorifique supérieure PCS

C'est la quantité de chaleur, exprimée en joules par gramme, dégagée par la combustion complète de l'unité de masse combustibles, l'eau produite étant entièrement condensée et les autres produits de la combustion ramenés à la température initiale fixée à 25°C. L'unité de masse du combustible peut être exprimée sur sec ou sur humide. (Standard Methods, 2005)

I.2.4.2. Caractéristiques biologiques

Les boues résiduaires continent une grande quantité de microorganismes (virus, bactéries et parasites), ils sont éliminés de l'eau avec les boues qui décantent. La concentration de pathogènes peut être réduite significativement par les procédés de traitement des boues, comme la digestion anaérobie, aérobie et compostage. (TAUZIN et JUSTE, 1986)

a. Bactéries

Constituent le groupement le plus important responsable principal de l'élimination de la Pollution d'une part, et de la formation des flocons d'autre part. d'origine fécale et certaines sont porteuses de germes, elles peuvent donc être pathogènes. Les différents types de bactéries dans les boues sont :

- Aérobie stricte qu'elle développe qu'en présence d'air, elles sont nombreuses dans les boues activées.
- Aérobie facultative qui peut se développer en anaérobiose par consommation de l'oxygène contenue dans la matière organique (aéromonas).
- Anaérobie facultative qui peuvent supporte la présence de l'air mais ne se développement que grâce à des processus anaérobies (lactobacillus).

- Anaérobie stricte dont le développent ne s'effectue qu'en anaérobiose (Clostridium). (TAUZIN et JUSTE, 1986)

b. Virus

Les virus se trouvent, adsorbés sur la matière organique solide des boues dans une proportion non négligeable environ 30% des échantillons de boues. Leur élimination n'est pas facile à mener à bien mais selon l'utilisation ultérieure des boues, il faut s'en préoccuper. (TAUZIN et JUSTE, 1986)

c. Parasites

On trouve de très nombreux parasites dans les boues d'origine fécale ou tellurique. Les cas les plus fréquents sont les œufs d'ascaris. (TAUZIN et JUSTE, 1986)

d. Micropolluants

Les boues contiennent, en faible quantité de nombreux produits qui peuvent être soit toxique pour les plantes, soit dangereux pour l'homme par l'intermédiaire des plantes. (DIGNAC et al., 2005)

e. Composition des matières organiques

Les boues sont constituées de matières organiques complexes non dégradées. Ces dernières sont principalement constituées de quatre grandes familles : les protéines. Les lipides, et les carbohydrates (glucose) et les acides gras. (DIGNAC et al., 2005)

f. Composition des matières minérales

Il s'agit essentiellement de ce qui nomme des métaux lourds, qui ont été très largement étudié en laboratoire et sur le terrain pour leur rôle dans le développement des cultures irriguées par des boues liquides ou solide. (KOLLER, 2009)

I.3. Opérations de traitement des boues

I.3.1. Objectifs du traitement des boues

Qu'ils s'agissent de boues urbaines ou industrielles, on s'appuie, dans la conception d'un schéma de traitement de boues, sur les mêmes principes, dans la mesure où l'on poursuit en réalité deux objectifs principaux :

- La réduction des nuisances olfactives, ce qui implique évidemment, la stabilisation des boues riches en matières organiques fermentescibles ;
- La réduction du volume des boues, afin de faciliter leur manutention et diminuer leurs frais d'élimination finale. (BERLAND, 2014)

On procède généralement en deux stades, afin d'assurer une élimination plus ou moins poussée de l'humidité des boues :

- 1er stade : épaississement (sédimentation – centrifugation – flottation) ;
- 2em stade : déshydratation mécanique selon les principes de centrifugation (décanteuses continues) ou de filtration (filtres sous vide, sous pression ou à bandes presseuses).

Pour l'élimination finale des boues déshydratées, on peut envisager, en fonction de leur composition physico-chimique, trois destinations, principales :

- La mise en décharge contrôlée ;
- La valorisation agricole ou autres types de valorisation pour certaines boues industrielles ;
- L'incinération.

Comme le montre le schéma général de la figure 9, établi aussi bien pour les boues urbaines que du secteur industriel, il existe de nombreuses options, si bien qu'un nombre important de filières sont théoriquement utilisables pour résoudre un problème donné. Seule une étude préalable sérieuse du problème posé et la prise en compte, en fonction des objectifs visés, de considérations aussi bien techniques qu'économiques permettent de dégager une filière rationnelle et fiable. (BOURRIER et al, 2017)

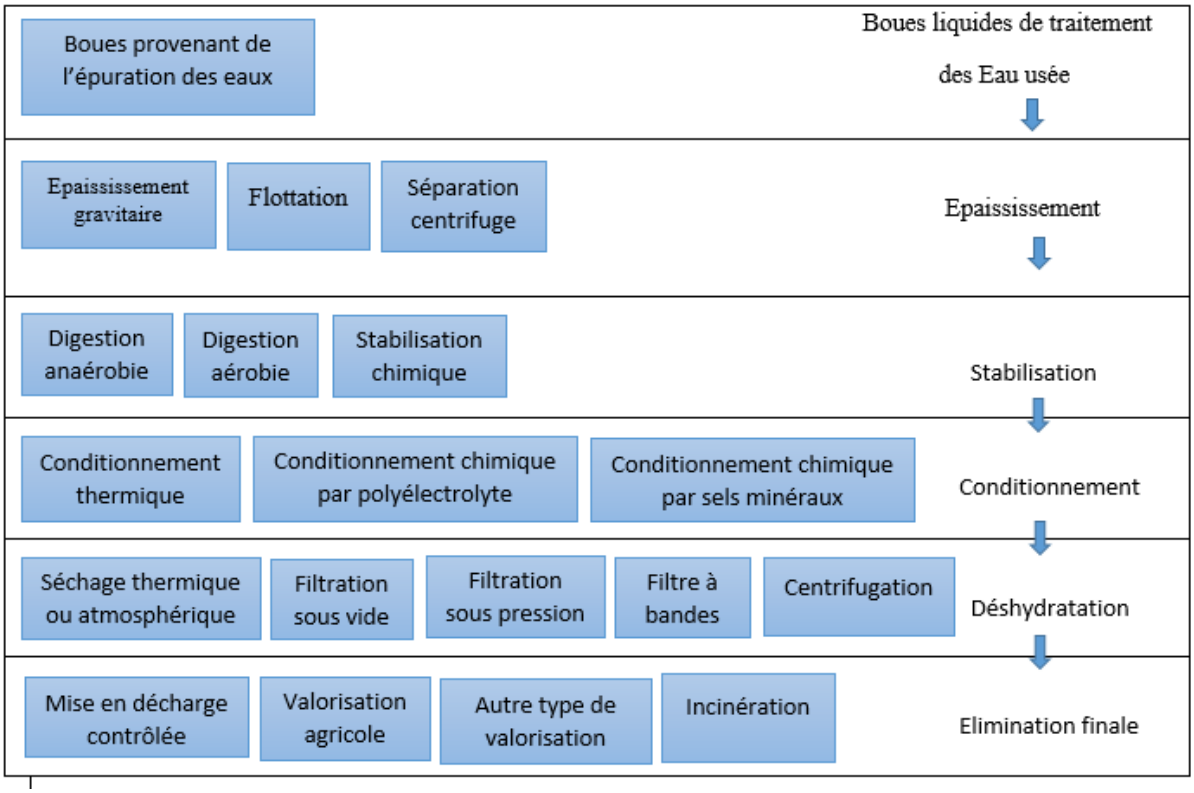

***Figure 9**: Filières de traitement des boues d'épuration. (BERLAND, 2014)*

I.3.2. Filières de traitement des boues

I.3.2.1. Epaississement

C'est le premier stade d'une réduction importante du volume des boues issues des traitements biologiques ou physico-chimiques des effluents urbains et industriels.

Les divers intérêts de l'épaississement sont :

- L'amélioration des conditions de fonctionnement et des performances des digesteurs, par suite d'une augmentation du temps de séjour des boues fraiches danse les digesteurs.
- Réduction de volume des ouvrages de conditionnement et des équipements de déshydratation mécanique ;
- La création d'un volume tampon entre les filières eau et boue, en épaississement statique, permettant d'améliorer la sécurité d'exploitation. (BOURRIER et al, 2017)

La filière boue devra donc comporter, avant l'étape de stabilisation ou de déshydratation, une phase d'épaississement afin d'augmenter la concentration pour le bon fonctionnement des installations en aval. En effet, les ouvrages de la filière eau produisent des boues primaires st de 8 à 12 g de MS/L pour les boues biologiques. (BOURRIER et al, 2017)

De nombreuses techniques sont utilisées pour réaliser l'épaississement des boues :

- L'épaississement gravitaire ou décantation ;
- La flottation ;
- L'égouttage ;
- La centrifugation. (BOURRIER et al, 2017)

a. Epaississement par décantation

Dans le cas de la décantation, aussi appelée épaississement gravitaire, la suspension boueuse est introduite dans une cuve cylindrique où le temps de séjour est élevé. Ceci permet le tassement des boues qui sont évacuées par raclage par le fond, tandis que le liquide surnageant est évacué par le haut. Cette technique peu coûteuse est largement répandue, notamment pour l'épaississement des boues primaires. (AMORCE TECHNIQUE, 2012)

b. Epaississement par flottation

Par opposition à la décantation, la flottation est un procédé de séparation solide-liquide Ou liquide-liquide qui s'applique à des particules dont la masse volumique est inférieure à Celle du liquide qui les contient. Elle est provoquée en utilisant des bulles d'air très fines ou "microbulles" de 40 à 70 microns de diamètre, semblables à celles présentes dans "l'eau blanche" débitée par le robinet d'un réseau d'eau sous forte pression. (KARINE et al, 2007)

I.3.2.2. Stabilisation

Le rôle assigné à la stabilisation est d'assurer la réduction du caractère fermentescible des boues organiques, pour éviter les nuisances, notamment l'émission de mauvaises odeurs lors de leur stockage et de leur traitement de déshydratation. La destruction des germes pathogènes peut parfois être aussi un objectif. Les boues produites à l'état liquide peuvent être stabilisées par des procédés de traitement chimiques ou biologiques (aérobies ou anaérobies).

Il existe divers types de stabilisation des boues :

- Stabilisation biologique aérobie ou anaérobie (à température ambiante ou thermophile);
- Stabilisation chimique (ajout de floculant tels que le chlorure ferrique, utilisé avec de la chaux, ou addition de polycéctrolytes ;
- Stabilisation thermique. (BOURRIER et al., 2017)

a. Stabilisation biologique

Réduit la teneur des boues en matières fermentescibles. Elle se fait soit par :

- Voie aérobie (en présence d'oxygène) dans les bassins d'aération ou dans des bassins de stabilisation aérobie.
- Voie anaérobie dans des digesteurs avec production de biogaz (méthane). (GUY ATLAN, 2003)

- **Digestion aérobie**

La dégradation de la matière organique et obtenue par oxydation biologique. Ce procédé consiste à aérer la boue pendant une période prolongée, au cours de laquelle les micro-organismes aérobies, placés en phase de respiration endogène, dégradent les matières organiques.

La stabilisation aérobie est fortement influencée par la température. Le temps de séjour des boues en aération est au minimum de 10 jours à 20° c et de 14 jours à 12°C. (BOURRIER et al., 2017)

- **Digestion anaérobie**

La digestion anaérobie des boues est un traitement qui permet d'éliminer une grande fraction de la matière organique en produisant de l'énergie se forme gaz méthane récupérable. La fermentation anaérobie est un processus biologique qui permet de transformer les substances organiques de la boue en dioxyde de carbone et en méthane. Ces procédés sont réalisés dans un réacteur clos de façon à créer l'anaérobie et à pouvoir récupérer le gaz produit. Celui-ci est recyclé au sein du digesteur pour assurer le brassage. Ce gaz est généralement composé à 65 % par le méthane pouvant être utilisé pour chauffage de l'installation. La digestion anaérobie (Figure 10) des boues s'effectue en général à une température voisine de 37° C et pH voisine de la neutralité, En 30 a 60 jours. C'est donc un processus relativement lent, du au faible taux de croissance des bactéries méthanogènes.

Cependant, un investissement important est nécessaire pour la construction de digesteurs anaérobies de boues (génie civil, équipement électromécanique), c'est pour quoi ils ne sont présents que sur des stations d'épuration d'une capacité supérieure à 70 000 EH. (BOURRIER et al, 2017)

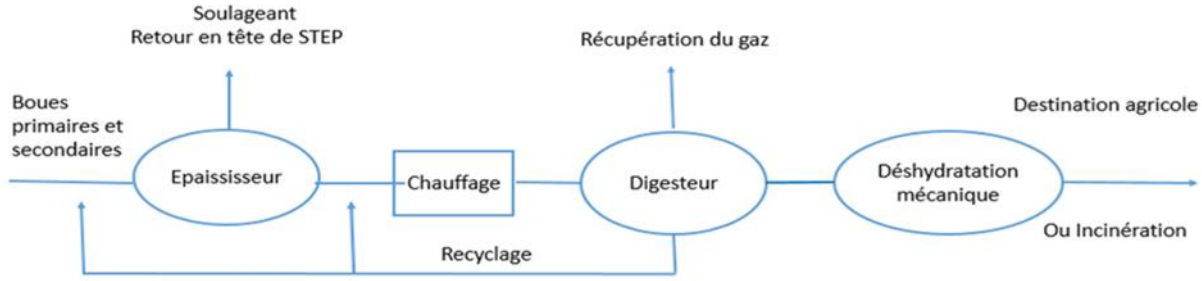

***Figure 10**: Principes d'une digestion- déshydratation des boues. (BOURRIER et al, 2017)*

b. Stabilisation chimique

La stabilisation chimique des boues est obtenue par adjonction de chaux qui, par augmentation de pH, bloque les fermentations, ce qui évite les dégagements de mauvaises odeurs. Elle est utilisée généralement en complément sur des boues déshydratées par filtre à bande presseuse ou centrifugation. (BOURRIER et al, 2017)

- **Cas de chaulage**

Le chaulage est une technique de traitement à la chaux destinée à corriger l'acidité d'un produit, d'un sol, et dans le cas présent, des boues d'épuration. La chaux est une matière généralement poudreuse et blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Le chaulage remplit deux fonctions principales :

- ✓ La stabilisation biologique : l'élévation du pH au-delà de 12 détruit ou inhibe la biomasse responsable de la fermentation ;
- ✓ L'hygiénisation de la boue : l'augmentation du pH s'accompagne d'une élévation momentanée de la température lors d'un traitement à la chaux vive.

Il permet aussi d'améliorer la siccité et la texture de la boue :

- ✓ Augmentation de la siccité par effet conjoint du mélange de la boue avec un produit sec ; en cas d'utilisation de chaux vive, il y a évaporation de l'eau ;

- ✓ Amélioration de la tenue en tas, notamment en cas de stockage avant épandage;
- ✓ Apport d'un amendement calcique pour les terres acides. (MARCEL et PASTOR, 2013)

c. Stabilisation thermique

C'est une transformation de la matière organique par oxydation en milieu aérobie avec dégagement de chaleur et production de CO_2.

- La stabilisation thermique des boues peut être réalisée par : Pasteurisation des boues liquides-à une température de 70° C pendant 30min, cela permet la destruction des germes pathogènes à l'exception de quelques espèces sporulées.
- Séchage thermique partiel ou poussé, à une température de 80 à 100 °C ;
- Cuisson dans les autoclaves (180 à 200°C) induisant à une destruction totale des germes. (BOURRIER et al, 2017)

I.3.2.3. Conditionnement

Le conditionnement des boues est obtenu par l'application de plusieurs principes physique, chimiques et thermiques. Il a pour but d'assurer la floculation de la boue pour faciliter le drainage, la filtration ou la centrifugation, ce qui optimise la déshydratation.

Le conditionnement des boues le plus souvent utilisé est de type chimique ou thermique :

a. Conditionnement chimique

Conditionnement chimique peut être réalisé au moyen de réactifs minéraux (sels de fer ou d'aluminium et chaux) ou au moyen de poly-électrolytes organique synthétiques.

Le conditionnement par réactif minéraux conduit à la formation d'un floc relativement fin est stable. Ce type de conditionnement est très particulière adapté à la déshydratation par filtration, alors que le conditionnement par poly-électrolyte conduit à la formation de flocs volumineux assez fragiles.

Ce type de conditionnement est utilisé en particulier dans le cas d'une centrifugation ou de filtres à bande presseuse. Ces floculant minéraux sont efficaces à faibles dose (2 à 5 Kg/l de MS). (BOURRIER et al, 2017)

Le conditionnement chimique par poly-électrolytes permet essentiellement de :

- Diminuer la masse des boues déshydratation sans réduire la quantité globale de matière Organique, d'azote et de phosphates ;
- Améliorer le bilan thermique, qui abaisse le seuil d'auto combustibilité des gâteaux de boues.

La doses des réactifs minéraux et les consommation moyennes de polymères sont données par le tableau 3 pour les différents types de boues urbaines. (BOURRIER et al, 2017)

***Tableau 3**: Taux de réactif appliqués dans le conditionnement chimique des boues urbains . (BOURRIER et al, 2017)*

Type de boues	**Doses de réactifs (1)**		
	Polymères (Kg/t de MS)	**Fe CL_3 / MS (%)**	**Ca $(OH)_2$ / MS (%)**
Boues physico chimique	2.5 - 4	12- 16	20 – 30
Boue primaires	2 – 4,5	4 – 6	12 – 20
Boues fraiches mixtes	3 – 5,5	7 -10	22 – 30
Boues digérées anaérobie	4 – 7	8-10	25 – 35
Boue digérées aérobie ou d'anaérobies prolongés	5 – 8	12 – 16	30 – 50
(1) les boues de réactifs minéraux (Fe CL_3 , chaux) sont exprimées en pourcentage rapporté au poids sec de la boue.			

b. Conditionnement thermique

Cette technique consiste en un échauffement de la boue à une température comprise entre 150 et 210 °C pendant un temps de cuisson variant de 30 à 60 minutes (Figure 11)

Le conditionnement thermique est particulièrement adapté aux grandes stations d'épuration équipées de digesteurs anaérobies et d'installation de déshydratation mécanique par filtre presses. Cette technique de conditionnement entraine la perturbation de la structure hydrophile et favorise Les réactions chimiques, ce qui induit une importante rétention d'eau (plus de 50 %), avec une très nette amélioration de l'aptitude des boues a la déshydratation mécanique. (BOURRIER et al, 2017)

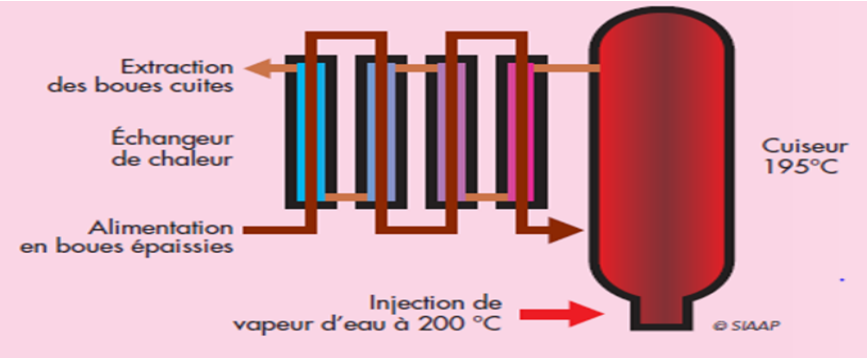

Figure 11: *Le conditionnement thermique. (MARCEL et PASTOR, 2013)*

La technique de conditionnement thermique présente de sérieux avantages :

- Pas de consommation de réactifs ;
- Importante siccité des gâteaux obtenus sur filtre-presse (de l'ordre de 50 %) ;
- Stérilisation des boues ;
- Réutilisation des gaz produits par la digestion (énergie pour les chaudières), d'où une économie de dépenses de fonctionnement. (BOURRIER et al, 2017)

Parmi les inconvénients on peut citer :

- Le risque d'entartrage et de bouchage des autoclaves ;
- Des eaux de retour très chargées engendrées par les matières organique ré-solubilisées :
  - DBO5 de 2 800 à 6 200 mg d'O_2 /l,
  - DCO de 7 400 à 15 000 mg d'O_2 /l,
  - De 500 à 1 500 mg d'O_2 /l,
- Une charge polluants exprimée en DBO5, de l'ordre de 15 % arrivent dans le bassin, due au jus de retour. Il faut l'intégrer dans le dimensionnement des bassins
- D'importantes nuisances olfactives générées par la cuisson des boues.

I.3.2.4. Déshydratation

La déshydrations des boues constitue la deuxième étape de réduction de volume des boues. Elle s'opère sur des boues épaissies, stabilisées ou non, en vue d'une élimination plus ou moins poussée de leur humidité résiduelle, de manières à les rendre soit pelle tables (siccité de 16% à 30%), soit solides (siccité > 30%).

Plusieurs techniques de déshydratation ont été mises en œuvre sur des boues urbaines préalablement conditionnes (conditionnement chimique ou thermique). (BOURRIER et al, 2017)

Le choisis de technique de déshydratation selon le contexte local et l'objectif à atteindre :

- Système drainant : c'est un égouttage à travers un système filtrant.
- Filtre-presse : filtration sous pression
- Filtre à bandes.
- Centrifugation : c'est une décantation accélérée.
- Lit de séchage : c'est une filtration et évaporation naturelle.
- Déshydratation thermique. (ANTONINI, 2000)

a. Déshydratation par séchage

Le séchage est un des procédés de traitement des boues qui consiste à éliminer une grande partie ou en totalité l'eau par évaporation. Il est rendu nécessaire par les limitations rencontrées de la déshydratation mécanique des boues. Les boues ont un comportement spécifique qui influe sur les procédés thermiques de séchage. Ce comportement dépend de la siccité atteinte. De manière générale, la chaleur se transmet de trois manières différentes : la conduction, la convection et le rayonnement. Appliqués aux boues, ces modes de transmission de chaleur vont se traduire par des technologies différentes parmi lesquelles : (BOEGLIN, 1979)

- **Séchage solaire**

Le séchage solaire repose sur la mise en contact, sous une serre (Figure 12), d'un air régulièrement renouvelé et d'une boue étalée sur une dalle béton et brassée mécaniquement. Entre l'entrée et la sortie de la serre, l'air s'enrichit en vapeur d'eau, aux dépens de la boue qui s'assèche. Un système de ventilation assure le renouvellement de l'air afin d'évacuer la vapeur d'eau issue de la boue. La quantité d'eau évaporée dépend à la fois des caractéristiques de l'air (température, humidité), et de celles de la boue (température, humidité, propriété mécaniques). (BOEGLIN, 1979)

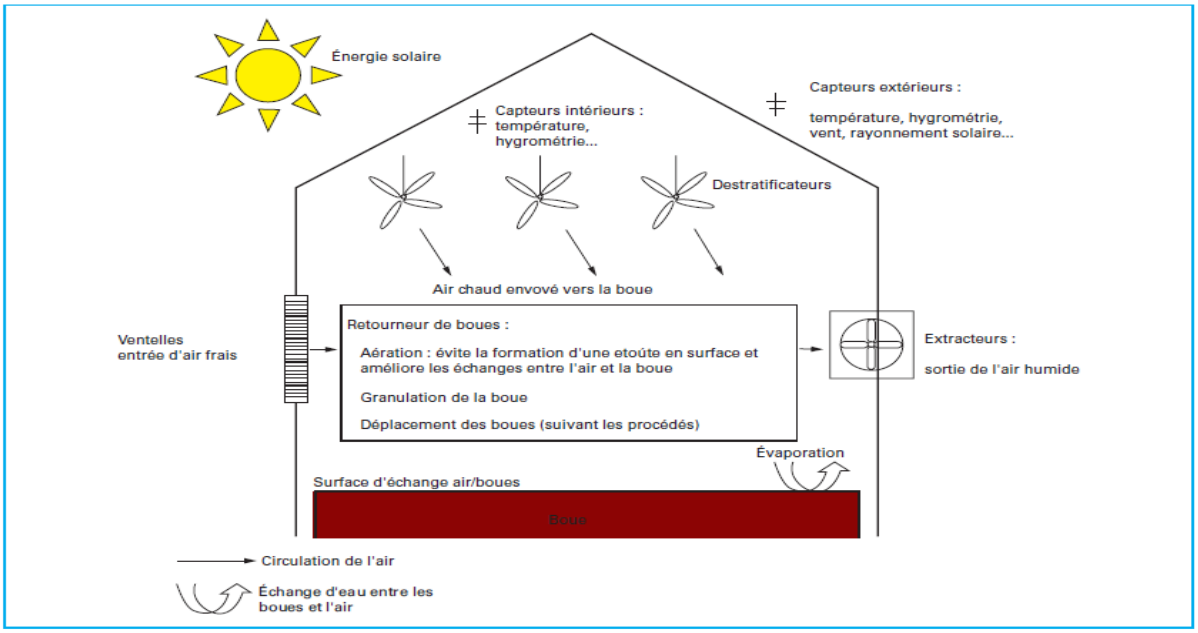

Figure 12: *Schéma du fonctionnement général d'une serre. (BERLAND, 2014)*

- **Le séchage thermique**

On se basant sur deux méthodes, Le séchage thermique est utilisé pour atteindre des teneurs en matières sèches au voisinage de 90 à 95%

Sur le plan technique, les sécheurs actuellement les plus répandus sont :

- Les sécheurs directs :
  - Sécheurs rotatifs tubulaires ;
  - Sécheurs flash et à lit fluidisé ;
  - Le procédé Centridry (système combiné de déshydratation par centrifugation et de séchage). (BERLAND, 2014)
- Les sécheurs indirects :
  - Sécheurs à disques,
  - Turbosécheurs à couche mince,
  - Sécheurs à palettes malaxeurs. (BERLAND, 2014)

— Les sécheurs directs (Figure 13), ont souvent la capacité de produire des boues sèches bien granulées, leur principal inconvénient est la relative complexité du circuit des buées, source fréquente de dysfonctionnement et d'émission d'odeurs nauséabondes. (BERLAND, 2014)

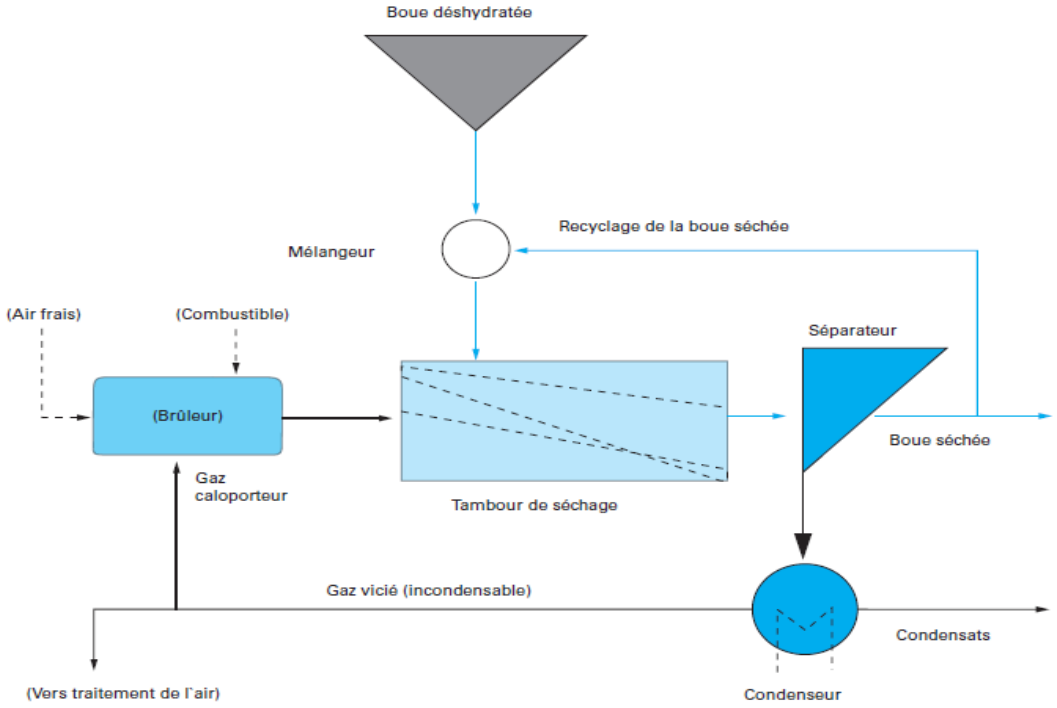

Figure 13: *Principe d'un sécheur direct. (BERLAND, 2014)*

— Pour les sécheurs indirects (Figure 14), ceux à disques offrent un temps de séjour assez élevé permettant de lisser les petites variations d'humidité à l'entrée. Leur faible vitesse de rotation les protège correctement de l'abrasion, mais les risques d'en croûtage et d'paillassonnage sont réels, car les espaces réservés à la boue sont relativement étroits. (BERLAND, 2014)

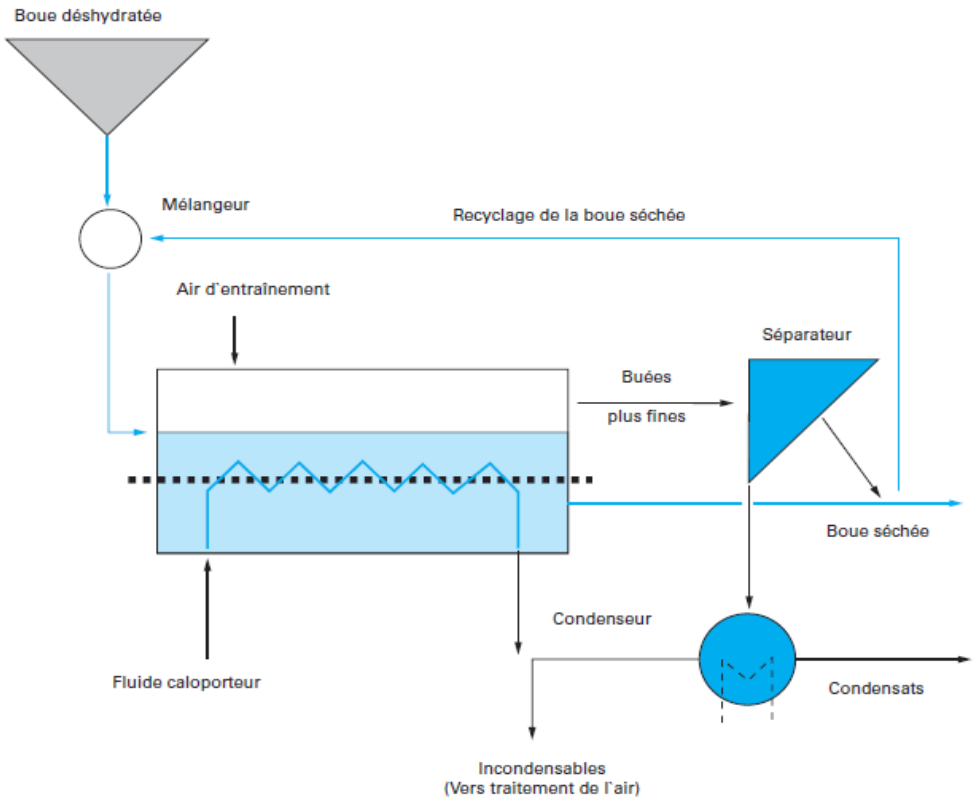

***Figure 14**: Principe d'un sécheur indirect. (BERLAND, 2014)*

b. *Déshydratation par Filtre à plateaux*

Le filtre a plateaux (Figures 15 et 16), encore appelé « filtre-presse à plateaux », permet la déshydratation de tous types de boues (urbaines, d'eau potable, industrielles) préalablement épaissies. En eaux use´ es, les filières de traitement d'eau actuellement mises en place le destine surtout à la déshydratation des boues biologiques en eaux brutes (faibles charges et aération prolongée) ou aux boues digérées. Avant de commencer à injecter la boue dans le filtre-presse, les plateaux sont plaque´ s les uns contre les autres par un sommier mobile qui est pousse par un vérin. Il est important de serrer jusqu'à une pression importante (environ 200 a` 300 bars) de façon à rendre étanche les plans de joint des plateaux.

On obtient ainsi une grande cartouche filtrante dans laquelle la boue va être injecte e sous pression. Grace à l'action de la pompe d'alimentation, la boue progresse à l'intérieur du filtre-presse en passant par le trou d'alimentation des plateaux et se diffuse dans les chambres. Les particules solides retenues par les toiles filtrantes s'empilent à l'intérieur des chambres jusqu'à création des gâteaux. La perte de charge ainsi créée est compensée par la montée en pression de la pompe (jusqu'a` 15 bars) qui régule son de´ bit en fonction de la pression.

Le liquide est collecté à la base des plateaux : c'est le filtrat, dont la sortie peut se faire, soit par cannelles et nochers, soit en bout du filtre-presse. (BERLAND, 2014)

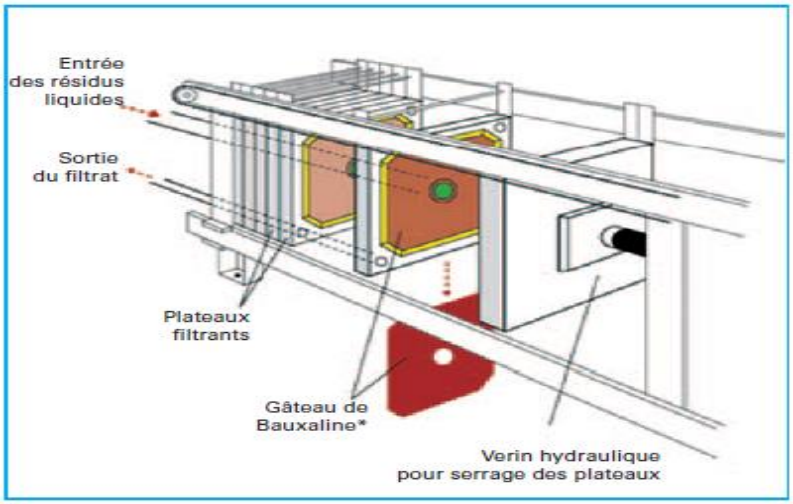

***Figure 15**: principe du filtre- presse a plateaux (BERLAND, 2014)*

***Figure 16**: filtre-presse a plateaux (BERLAND, 2014)*

c. *Déshydratation par Filtre à bande*

Principe de ce procédés et la compression des boues entre deux bandes de toile. Une fois la toile débarrassée de la boue, il faut la laver pour qu'elle conserve sa porosité. Ce système nécessite l'addition de polymères dont la composition et la quantité doivent être constamment adaptées à la qualité des boues. Très utilisés dans le passé, les filtres à bande sont abandonnés au profit de technologies plus simples. (AMORCE, 2012)

d. *Déshydratation par Filtre à membrane*

Perfectionnement du filtre-presse. Il permet tout d'abord d'éviter l'effet négatif du débit de fuite sur les flocs en fin de montée en pression. (AMORCE, 2012)

e. *Déshydratation par Filtre à Vis*

Après la phase d'essorage compactage, grâce à une vis d'extrusion autour de laquelle se trouve une grille filtrante. Les grilles sont autonettoyantes et spécifiques à chaque type de boue. (AMORCE, 2012)

I.4. Destination finale des boues et leur valorisation

La destination finale des boues d'épuration des eaux résiduaires urbaines et industrielles est souvent affaire de circonstances. Le cheminement des boues des stations d'épuration, de leur production à leur destination finale est schématisé sur la Figure suivant. (BERLAND, 2014).

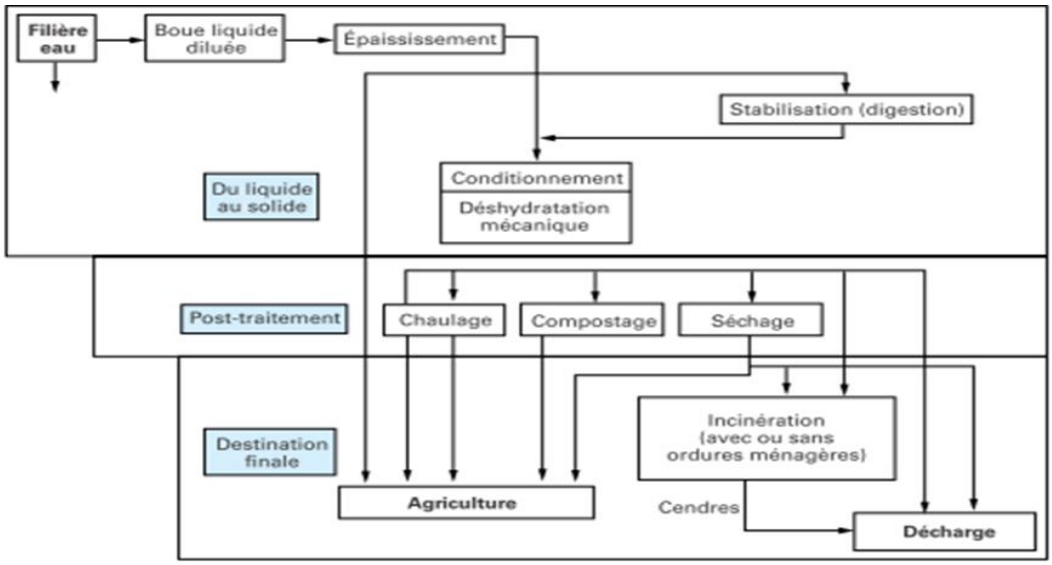

***Figure 17**: Voies d'élimination des boues de station d'épuration. (BERLAND, 2014)*

I.4.1. Cadre réglementaire et législation

Le choix de la destination des boues devra être fait, en outre, d'une manière compatible avec la préservation de l'environnement et avec les impératifs de la réglementation en vigueur qui est assez Complexe et dense. (ROUSSEL et al, 1994)

Dans le tableau 4 on trouvera les principaux textes de la réglementation française et européenne.

***Tableau 4**:Textes règlementaires. (BERLAND, 2014)*

a. Principaux textes de la réglementation française		
Classement	**Date**	**Objet**
Loi	13/07/1979	Relative aux matières fertilisantes.
Norme NF U 44041	1985	Conditions de valorisation agricole des boues : teneurs de référence en métaux dans les boues et teneurs limites dans le sol.
Circulaire	11/03/1987	Conditions de mise en décharge.
Loi	13/07/1992	Conditions de mise en décharge (décharge de classe 2 ...).
Décret	03/02/1993	Plans départementaux et régionaux d'élimination des déchets...
Arrêté modifié	18/12/1992	Règles applicables aux décharges de classe 1 ... (déchets dangereux et industriels spéciaux).
Décret	15/05/1997	Relatif à la classification des déchets dangereux.
Arrêté	09/09/1997	Relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installations de stockage des déchets ménagers et assimilés.
Décret Arrêté	08/12/1997 08/01/1998	Relatifs à l'épandage des boues sur les sols agricoles.
b. Principales directives de la réglementation européenne		
N°	**Objet des directives**	
Directive 86/278	Conditions à respecter pour la valorisation agricole des boues urbaines ou assimilées.	
Directive 89/429	Incinération des résidus urbains.	
Directive 91/271	Sur l'assainissement des agglomérations : l'article 14 préconise la valorisation agricole et interdit le rejet en mer à partir de 1997.	
Directive 91/689	Les boues sont considérées comme des déchets dangereux, si elles ne sont pas recyclable en agriculture, ni traitées...	

La législation a toute son importance dans une politique de gestion des déchets dans une optique de développement durable et de préservation de l'environnement et de la santé de l'homme. A l'heure actuelle l'Algérie ne dispose pas de textes règlementaires concernant la gestion des boues résiduaires. Cependant une norme algérienne a été établie en 2010.

C'est la norme NA 17671 relative aux boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines utilisées comme matières fertilisantes dont l'objectif est de fixer les dénominations et spécifications des boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines et les conditions de leur mise en œuvre ainsi que les restrictions de leur emploi en présence de métaux lourds.

La norme NA 17671 fixe de ce fait des limites quant à la concentration maximale en éléments traces métalliques (Tableau 5). Cependant cette norme n'aborde pas les teneurs limites admissibles en micropolluants organiques (composés traces organiques) qui sont également toxiques et peuvent s'accumuler dans le sol.

La norme algérienne NA 17671 a été livrée aux unités de traitement, notamment à l'Office National d'Assainissement (ONA) qui est le gestionnaire de la plupart des stations d'épuration implantées sur le territoire national (120 STEP exploitées par l'ONA, en janvier 2014. (SITE OFFICIEL DE l'ONA)

Tableau 5 : *Teneurs en éléments traces métalliques pour les boues en Algérie selon la norme NA 17671.*

Eléments traces métalliques	Teneurs (mg/kg de MS)*
Cd	20
Cr	1000
Cu	1000
Hg	10
Ni	200
Pb	800
Se	100
Zn	3000
Cr + Cu + Ni + Zn	4000

* : Aucune teneur des boues en l'un de ces éléments traces ne doit excéder le double de la teneur de référence correspondante, de même que pour la somme des teneurs en Cr, Cu, Ni et Zn.

I.4.2. Valorisation agricole et recyclage

La réutilisation agricole des boues est une voie d'élimination intéressante qui doit être prioritaire chaque fois qu'elle est réglementairement techniquement et économiquement possible. Elle est largement pratiquée pour les boues urbaines, mais aussi sur certaines boues industrielles (agroalimentaires, papeterie). (COLIN, 1986)

L'intérêt des divers composants est fortement dépendant des types de cultures et de la nature des sols. On recherchera, dans certains cas, les éléments fertilisants (surtout azote et phosphore), dans d'autres plutôt la matière organique ou encore le calcium pour les terrains à tendance acide. Par ailleurs, l'utilisation agricole des boues suppose la réalisation d'une bonne stabilisation biologique (par voie aérobie ou anaérobie) afin de supprimer les risques d'odeurs nauséabondes et d'éviter « l'effet dépressif » sur les cultures en diminuant le rapport carbone assimilable/azote assimilable. (BERLAND, 2014)

Le tableau 6 récapitule les éléments contenus dans les boues susceptibles de présenter de l'intérêt pour cultures

Tableau 6:*Critère agronomique des boues(en% en masse de la matière. (BERLAND, 2014)*

Critères	Eau résiduaire urbaine			Eau résiduaire de papeterie
	Décantation primaire + Epuration biologique		Epuration biologique Aération prolongée	Décantation primaire
	Boues fraiches mixtes	Boues digérées		
Matières organique	65 à 80	45 à 60	55 à 65	45 à 60
Azote (en N)	3,5 à 4,5	2 à 4	3 à 5	0,3 à 0,4
Phosphore (en P)	2 à 2,5	1 à 2	1,5 à 2	0,1 à 0,15
Potassium (en K)	2 à 2,5	0,2 à 0,3	0,2 à 0,3	0,15
Calcium (en Ca)	5 à 10	5 à 10	5 à 10	5 à 10

I.4.2.1. Qualité des boues

On distingue trois familles d'éléments ou composés pouvant altérer la qualité des boues destinées à l'épandage:

• Les éléments traces métalliques et plus particulièrement les métaux lourds (Cd, Hg, Pb). Certains de ces métaux se classent dans la catégorie des oligo-éléments (Zn, Cu) et sont utiles à la croissance végétale. Cependant, en teneurs trop élevées, ils deviennent toxiques. Quant aux métaux lourds, les risques pour la santé sont aujourd'hui bien connus. Les teneurs admises sont précisées dans les textes réglementaires.

• Les polluants organiques : pesticides, détergents, PCB, HAP. Sauf cas particulier (pollution, accident), les teneurs couramment observées restent faibles ;

• Les micro-organismes pathogènes : bactéries, parasites, virus, champignons. D'un point de vue épidémiologique, les seuls risques majeurs pour l'homme et les animaux sont la présence de salmonelles ou d'œufs de ténia. Pour faire face à ces risques sanitaires (ainsi qu'aux nuisances olfactives), les directives imposent un traitement afin de réduire le pouvoir fermentescible des boues et de les hygiéniser. (OTV, 1997)

I.4.2.2. Epandage

Les boues peuvent être épandues sous forme liquide (après épaississement préliminaire), soit sous forme plus ou moins déshydratée à l'état pâteux (issues de filtres à bande presseuse ou de centrifugeuses) ou solide (issues de lit de séchage ou filtres-presse). Ce sont les boues liquides qui permettent la meilleure valorisation agronomique, dans la mesure où l'on peut les épandre facilement avec des matériels bien connus du type citerne à vidange ou à lisier. De plus, elles permettent d'apporter au sol simultanément de la matière organique, de l'azote (N) assez rapidement assimilable, du phosphore (P) et des oligoéléments. Toutefois, l'épandage liquide requiert des équipements de stockage importants et appropriés, ainsi que des terrains proches du lieu de production pour réduire les frais de transport. (BERLAND, 2014)

L'épandage des boues d'épuration consiste leur utilisation comme des éléments nutritifs, sur les sols inertes, érodés ou faiblement végétalisés à l'aide de matériels appropriés. Cette technique est recommandée pour permettre la réhabilitation des sites stériles tels que les décharges, les carrières. L'aménagement des espaces verts urbains est aussi envisageable, L'épandage et rentable par comparaison à l'utilisation d'engrais minéraux de commerce. Malgré les intérêts qu'elle présente, cette valorisation a des limites. Elle est assez mal acceptée quand la présence des ETM, des CTO et les germes pathogènes dans les boues dépassent certaines valeurs. (BENGTSSON et TILLMAN, 2004)

La limitation de l'épandage agricole peut provenir :

- Du risque d'odeurs se dégageant de boues insuffisamment stabilisées ;
- Des risques bactériologiques, qui ne doivent cependant pas être surestimés, car l'action microbienne du sol est importante ;
- De la contamination des boues par des métaux lourds (Zn, Cd, Cu, Pb, Ni, etc.) ;
- Ce risque n'est à craindre que pour les boues des zones fortement urbanisées (ruissellement) et industrialisées. (BERLAND, 2014)

L'épandage agricole des boues est soumis à un certain nombre de contraintes, dont la première est le respect de la réglementation française, concrétisée par la norme NF U 44-041, qui fixe les teneurs en métaux lourds à ne pas dépasser dans les boues, pour un apport maximal de 30 tonnes de matières sèches par hectare en 10 ans.

Pour des informations complémentaires, il convient de se référer au décret du 8/12/1997 et à l'arrêté du 8/1/1998 relatifs à l'épandage des boues aux sols agricoles (Tableau 7). (BERLAND, 2014)

Tableau 7: *Valorisation agricole des boues. (BERLAND, 2014)*

a) Teneurs limites en éléments-traces métalliques			
Métaux	**NF U 44-041 Teneurs de Références dans les boues (mg/kg MS)**	**Teneurs limites dans le sol (mg/kg sol sec)**	**Directive CEE Teneurs limites dans le Sol (mg/kg sol sec)**
Cadmium	20	2	3
Chrome	1000	150	200
Cuivre	1000	100	140
Mercure	10	1	1.5
Nickel	200	50	75
Plomb	800	100	300
Sélénium	100	10	-
Zinc	3000	300	300
Cr + Cu + Ni + Zn	4000	-	-

b) Flux cumulé maximal en éléments-traces métalliques apporté par les déchets ou effluents pour les pâturages ou les sols de pH inférieur à 6			
Eléments-traces métalliques	**Flux cumulé maximal apporté en 10 ans (g/m^2)**	**Éléments-trace métalliques**	**Flux cumulé maximal apporté en 10 ans (g/m^2)**
Cadmium	0,015	Sélénium (1)	0,12
Chrome	1,2	Zinc	3
Cuivre	1,2	Chrome + cuivre + nickel+ Zinc	4
Mercure	0,012	-	-
Nickel	0,3	-	-
Plomb	0,9	-	-

c) Teneurs limites en composés-traces organiques dans les déchets ou effluents				
Composés-traces organiques	**Valeur limite dans les déchets ou effluents (mg/kg MS)**		**Flux cumulé maximal apporté par les déchets ou effluents en 10 ans (mg/m^2)**	
-	**Cas général**	**Epandage sur pâturages**	**Cas générale**	**Epandage sur pâturages**
Total des 7 principaux PCB (2) ..	0,8	0,8	1,2	1,2
Fluoranthène	5	4	7,5	6
Benzo(b)fluoranthène	2,5	2,5	4	4
Benzo(a)pyrène	2	1 ,5	3	2

(1) Pour le pâturage uniquement.
(2) Polychlorobiphényles (PCB) 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180.

I.4.2.3. Compostage

Compostage est un processus de dégradation contrôlée de manière fermentescibles en présence d'oxygène, produisant du gaz carbonique, de la chaleur, et un résidu organique stabilisé riche en composés humiques ; le compost. Le compostage s'apparente donc à un traitement biologique poussé, qui permet :

- La réduction de la qualité de produit brut initial ;
- L'augmentation de la teneur en matière sèche (évaporation) ;
- L'hygiénisation par chaleur ;
- L'obtention d'un produit riche en matières humiques, sels minéraux et micro-organismes. (BOURRIER et al, 2017)

Le produit organique ainsi obtenu (Figure 18) peut s'intégrer aisément dans une filière de valorisation agricole ou dans une filière commerciale à destination des professionnels, des collectivités ou des particulières, dans le respect de critères technique, légaux et commerciaux. C'est une filière de développement durable et de protection de l'environnement. (BOURRIER et al., 2017)

***Figure 18**: Le compost. (BOURRIER et al, 2017)*

I.4.3. Valorisation énergétique

I.4.3.1. Incinération

Les boues ont une valeur énergétique assimilable à celui du lignite et de certains biocombustibles. Elles peuvent être donc valorisées par combustion (chambre de combustion ou chaudière). L'énergie produite peut être utilisé par la STEP, qui gagne en autonomie énergétique. Leur Pouvoir Calorifique (faculté d'incinération) est influencé par sa teneur en matière organique et sa siccité. En conséquence, des résultats plus optimaux sont obtenus si le choix de cette filière est lié au choix de la filière de traitement de boues. (HERNANDEZ, 2012)

Les caractéristiques à définir en vue de l'élimination d'une boue par l'incinération sont les suivants ;

a. Bilan thermique

Il s'agit de déterminer les pouvoirs calorifiques inférieur (PCI) et supérieure (PCS) le bon fonctionnement thermique de l'incinération est essentiellement conditionné par la valeur de PCI (exprimée en Kcal/KG de MS ou de MV), qui exprime la quantité de chaleur produits par la combustion complète du déchet, en considérant que l'eau dégagée par la combustion se trouve à l'état de vapeur. (BOURRIER et al, 2017)

Il existe une humidité limite pour une boue contenant des matières organiques, en dessous de l'quelle l'incinération peut se faire sans apport extérieur de calories, l'énergie fournie par la combustion de la matière organique étant suffisant pour évaporer l'eau. Cette valeur limite, appelée auto combustibilité, dépend du PCI. Elle se situe, pour les boues biologiques, entre 60 % et 70 % pour un rapport MV/MS de 50 % à 80 %. (BOURRIER et al, 2017)

La technologie d'incinération est déjà bien connue et, en termes d'efficacité énergétique, beaucoup de progrès ont été faits durant les dernières années. En plus cette filière présente quelques autres avantages fondamentaux :

- Réduction du volume : jusqu'à 90% (par rapport au volume après déshydratation mécanique) ;
- Destruction thermique des polluants organiques ;
- Minimisation des odeurs.

Cependant, cette filière présente également des contraintes fortes:

- Transfert de la pollution à l'air ;
- Production de cendres, un sous-produit à gérer ;
- Les investissements et les coûts de fonctionnement font que cette solution ne s'adapte qu'à de gros gisements de boues, issus de grandes Steps ;
- Le regroupement de petits gisements sur un site centralisateur serait envisageable mais implique une logistique complexe ;
- Acceptabilité sociale. (HERNANDEZ, 2012)

I.4.3.2. Dans un four spécifique

Cette solution est adoptée par des stations qui produisent de grandes quantités de boue mais peut aussi être le résultat d'une association de plusieurs stations d'épuration qui valorisent leurs boues conjointement. (JEAN-PIERRE, 2001)

I.4.3.3. Co-incinération avec des ordures ménagères

La Co-incinération d'ordures ménagères (OM) et des boues, produits aux caractéristiques très différentes (PCI, teneur en eau et en matière organique), nécessite d'adapter certaines caractéristiques des boues. Selon le volume de boues à incinérer, on peut envisager deux solutions :

• Le mélange préalable de boues sèches avec les ordures ménagères

• L'injection de boues pâteuses directement dans le four d'incinération, par exemple le procédé PYROMIXTM.

Cette option est envisagée lorsque le volume de boue ne justifie pas la construction d'un four et qu'un incinérateur ménager est situé à proximité. La capacité thermique du four doit être telle qu'elle permet l'introduction de boues. La boue sous forme pâteuse (15 à 30% MS) est plutôt considérée comme un fluide de refroidissement alors qu'une boue de teneur en matières sèches supérieure à 60% possède un pouvoir calorifique inférieur proche des ordures et fait office de combustible. (JEAN-PIERRE, 2001)

Des quantités importantes de cendres sont issues de l'incinération des boues de station d'épuration. La valorisation de ces cendres comme matière première secondaire pour l'élaboration de matériau dans le domaine du bâtiment et des travaux publics (BTP).

- Valorisation des cendres dans les produits céramiques.
- Valorisation des cendres comme filler minéral dans les revêtements bitumineux.
- Fabrication de matériaux légers à base de cendres.
- Valorisation des cendres dans le domaine de la construction.
- Réutilisation des cendres dans des produits de types « béton ». (BOEGLIN, 2000)

I.4.3.4. Oxydation thermique

L'oxydation thermique des boues d'épuration est la solution qui répond le mieux aux critères de réduction de volume et d'hygiénisation. En effet, quelle que soit la technique de combustion utilisée, les boues sont complètement minéralisées et les germes pathogènes totalement détruits. On distingue aujourd'hui deux grands principes d'oxydation appliqués aux boues : l'oxydation en phase gazeuse, autrement dit l'incinération, et l'oxydation en phase liquide, ou oxydation par voie humide : OVH. (BOEGLIN, 2000)

I.4.3.5. Oxydation par voie humide

L'Oxydation par voie humide (OVH) est une technologie de traitement des boues d'épuration, d'origine municipale ou industrielle, permettant l'évacuation d'un résidu minéral inerte (moins de 5 % de carbone organique total) en lieu et place des boues produites par la station d'épuration. Ce procède consiste en une oxydation (par injection d'oxygène) en milieu aqueux (sous 50-55 bars) et sous température (environ 250 °C) de boues épaissies (40 à 80 g MS/L) (Figures 19, 20). Ce milieu hautement réactionnel favorise l'oxydation de la matière organique contenue dans les boues en CO_2, H_2O et CO gazeux et en composes aqueux facilement biodégradables (acide acétique, NH_4). Aucun apport énergétique n'est nécessaire puisque le système est auto thermique. Le résidu produit, appelé´ « techno sable », est très facilement des hydratable par filtre-presse (siccité supérieure a` 60 %) et valorisable, notamment en soubassements routiers. Cette technologie s'adapte bien aux boues urbaines flottées, égouttées ou filtrées, dont la charge organique est de l'ordre de 40 a` 80 g/L et la teneur en matière sèche de l'ordre de 5 %.

En pratique, on évapore seulement 10 a` 20 % de l'eau. D'où un bilan énergétique beaucoup plus favorable que l'incinération ou le séchage. De plus, le volume des gaz a` traiter est beaucoup plus faible (procède confiné). (BERLAND, 2014)

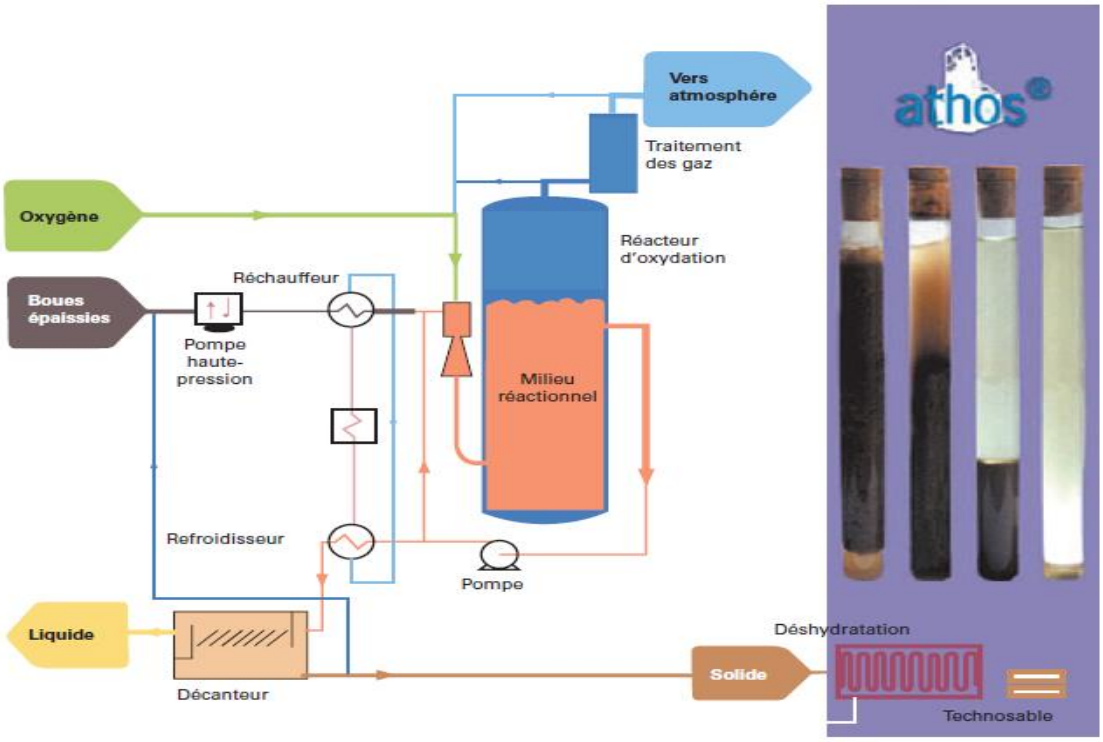

Figure 19: *Principe du procède ATHOS. (BERLAND, 2014)*

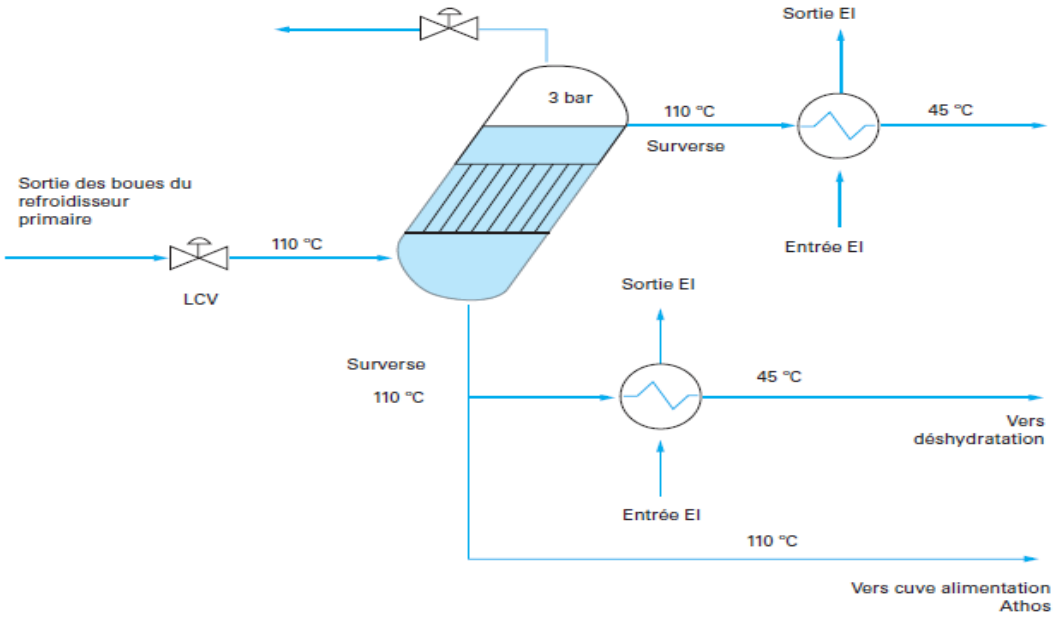

Figure 20*: Bilan des températures sur le procédé ATHOS. (BERLAND, 2014)*

Le tableau 8 ci-après présente les avantages et les inconvénients des 3 types d'oxydation thermique. (EMMANUEL, 2000)

***Tableau 8**: Les avantages et les inconvénients des 3 types d'oxydation thermique*

Type d'oxydation thermique	Avantages	Incontinents
Incinération directe	- Adaptation aux grosses capacités –Pas de transport de boue - Stockage réduit et peu de résidus - Cendres d'incinération pouvant être valorisées sous conditions	- Complexité et coût du traitement - Inadaptée aux petites et moyennes unités
Co-incinération	- Investissements réduits - Solution aisée à mettre en œuvre (Secours possible) - Séchage parfois imposé	- Dépendance à la filière OM (Distance, capacité) - Coût du transport
Oxydation par Voie Humide	- Boues liquides - Pas de fumées - Intégration dans la "filière eau" - Sous-produit déshydratable - Compacité de l'unité - Bonne adaptabilité - Sous-produits recyclables	- Équipement sous pression - Faible retour d'expérience - Technicité des opérateurs

I.4.3.6. Pyrolyse (Thermolyse)

Les procédés de pyrolyse ont été industriellement mis en œuvre sur du charbon depuis plus de 60 ans. Son application aux boues est plus récente. Il s'agit de la décomposition du déchet à moyenne température en l'absence d'agent oxydant ce qui donne lieu à :

- Des gaz légers combustibles (CO,CH_4, H_2)

- Des gaz condensables formés par une fraction aqueuse contenant des composés organiques hydrosolubles et une fraction organique contenant des substances non solubles dans l'eau (principalement des hydrocarbures). La fraction organique peut atteindre un PCI d'autour de 22-28 MJ/kg et peuvent normalement être utilisés comme bio huiles. Cependant les huiles de pyrolyse des boues sont oxygénées et azotées.

- Du coke, formé par le carbone fixe et la matière minérale du déchet. Il concentre de nombreux polluants : métaux lourds, chlorures, etc.

Cependant, grâce à sa porosité et sa nature basique, pourrait absorber des composés acides (tels que SO_2 et SH_2). (HERNANDEZ, 2012)

La proportion relative de ces produits dépend des paramètres opératoires du traitement. Selon la température et la vitesse de chauffe, on différencie deux types de pyrolyse :

- La pyrolyse lente : chauffage lent (dizaine de minutes) à basse température (400-500°C). Produit majoritairement du coke. Les gaz produits peuvent être brûlés pour fournir l'énergie nécessaire au procédé.
- La pyrolyse rapide ou flash-pyrolyse : chauffage rapide (quelques secondes) à haute température (600-900°C). La production de gaz et surtout d'huiles est favorisée et le coke produit peut-être brûler pour fournir de l'énergie (pyro-gazéification). (HERNANDEZ, 2012)

I.4.3.7. Gazéification

De manière générale, la gazéification consiste en la transformation d'un solide combustible en un produit gazeux (Figure 21). La gazéification thermique a lieu par réaction du solide avec un agent à haute température. Le gaz issu de ces réactions est majoritairement constitué d'hydrogène (H_2), de monoxyde et dioxyde de carbone (CO, CO_2), d'eau (H_2O), de méthane (CH4) et d'autres composés en moindre concentration. Ce gaz peut être valorisé comme combustible de chauffage, de moteur ou de turbine. Il peut servir à produire des carburants liquides via la synthèse de Fischer-Tropsch. Il peut également être utilisé pour produire de l'hydrogène ou d'autres produits chimiques. (HERNANDEZ, 2012)

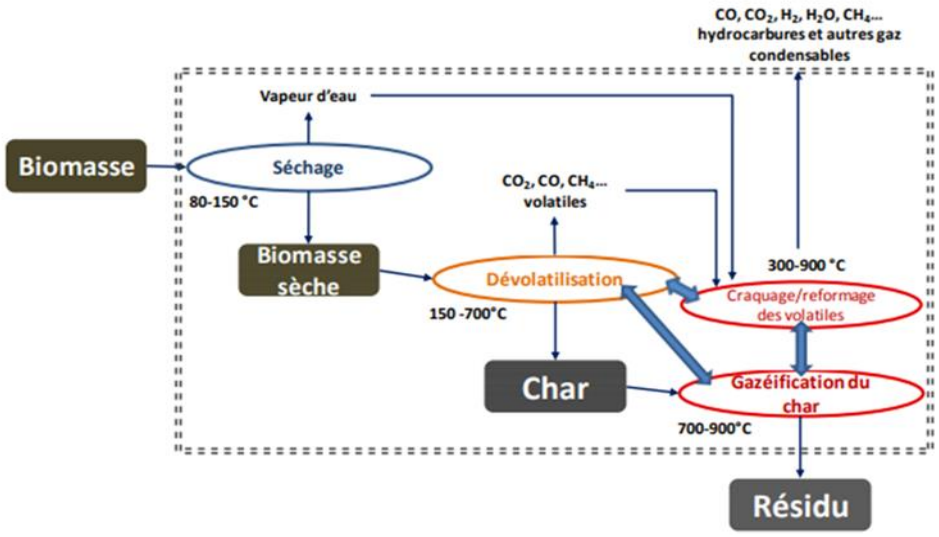

Figure 21: *Schéma représentatif des étapes de gazéification. (HERNANDEZ, 2012)*

I.4.4. Récupération des produits

Le résidu solide résultant de la gazéification représente, dans le cas des boues, environ 30% de la masse initiale sèche. Il résulte des transformations subies par la MM du solide initial lors du traitement thermique et de la carbonisation de la matière organique. La minéralogie de ce résidu n'est pas bien connue. La modélisation, à l'équilibre thermodynamique, de la minéralogie des résidus résultants de différentes biomasses prédit des phases minérales similaires à celles des cendres d'incinération (Tableau 9). Cependant il faut noter que les conditions étudiées dans cette simulation sont relativement oxydantes (ER=0,3) et donc propices à cette similitude. (BOEGLIN, 1979)

***Tableau 9**: Phases minérales trouvées par simulation d'un FB alimenté par différents biocombustibles, 600-900°C, sous pression et avec un rapport ER=0,3. (HERNANDEZ,2012)*

Groupe minéral	Principales formes	Commentaires
Silicates	Ca^{-}, K^{-}, Mg^{-}, Na^{-} et Al silicates	-
Phosphates	$Ca_3(PO_4)_2$	Présent pour tous les calculs réalisés
Carbonates	$CaCO_3$ et CaO	Formés en présence de grandes quantités de Ca
Alcalins	K_2CO_3, KCl, Na_2 CO et NaCl.	Problèmes d'agglomération dans les réacteurs à lit fluidisé.
Sulfures et hydroxydes	-	Formés en petites quantités
Oxydes	Al- et Fe-oxydes	-

Des études minéralogiques des cendres issues de l'incinération de boues (Sewage Sludge Ash, SSA) montrent que les principales phases minérales présentes sont : SiO_2, P_2O_5, FeO_3, Al_2O, $Ca_3(PO_4)_2$, $AlPO_4$, $CaSO_4$, Ca $(OH)_2$, CaO, $CaCO_3$.

Il doit être rappelé que les températures et l'apport d'oxydant sont plus élevés en incinération qu'en gazéification, pouvant donner lieu à une minéralogie spécifique et des résultats différents sont attendus pour les résidus issus de la gazéification de boues. (HERNANDEZ, 2012)

I.4.5. Mise en décharge

C'est une mise en décharge contrôlée qui tend à se restreindre et n'être tolérée que pour les déchets ultimes, dont des boues à concentrations élevées en contaminants, qui ne peuvent être valorisés. Cette mise en décharge contrôlée consiste en un Centre technique d'enfouissement (CET) de ces boues, le plus souvent mélangées avec des ordures ménagères, suivi de la récupération et du traitement des lixiviats. Cette solution perd progressivement de son intérêt pour des raisons financières et des problèmes environnementaux tels que l'émanation d'odeurs nauséabondes ainsi que l'entraînement d'éléments minéraux et organiques toxiques par les eaux superficielles et la contamination des nappes phréatiques. (MARTTINEN et al., 2003 ; LOOSER et al, 1999)

I.4.6. Solutions alternatives

À la suite de gros travaux d'aménagement, comme les talus routier et autoroutier, la réhabilitation de friches industrielles, de friches urbaines ou de décharges, la création de pistes de ski, permet un apport de matière organique en grande quantité, nécessaire à la réinstallation du couvert végétal et à la cicatrisation du paysage. (BERLAND, 2014)

L'utilisation des boues en sylviculture sur taillis a courte ou très courte rotation (TCR ou TTCR), permet d'utiliser les propriété s fertilisantes des boues pour la production de biomasse ligneuse. Des matières fertilisantes commerciales peuvent aussi être fabriquées à partir de la matière sèche des boues d'épuration. (BERLAND, 2014)

I.4.6.1. Réhabilitation de sites et végétalisation

La réhabilitation des sites passant par leur revégétalisation, de nombreux essais de plantation ont été réalisés, la création de pistes cyclables, etc., le sol a parfois disparu. Il devient alors nécessaire de réhabiliter ces sites par l'apport massif de matière organique permettant au couvert végétal de se réinstaller et au paysage de cicatriser. Les boues, une fois traitées afin de leur conférer une qualité réglementaire, sont donc utilisées comme matériaux de remblayage ou de recouvrement pour la réhabilitation de tels sites. Ce type de valorisation peut être ponctuel, ne nécessitant qu'un épandage unique pratiqué pour implanter un couvert végétal ou encore, dans le cas où la biomasse est exploitée ou exportée, l'apport de boues peut devenir régulier, proportionné aux besoins des végétaux et des sols reconstitués.

Dans le premier cas, il faut une bonne programmation pour mobiliser, au moment voulu, les quantités de boues nécessaires à la réhabilitation. (CHEN, 2012)

I.4.6.2. Fabrication de matériaux de construction

Il est possible d'utiliser les boues d'épuration dans la synthèse des agrégats légers utilisables pour la préparation de matériaux de construction, tels que la brique, le ciment à mortier et mélangé, le béton ou le ciment Portland. Ainsi, les bio briques, par exemple, peuvent contenir jusqu' à 40 % de boues tout en se conformant aux standards structuraux américains. Grâce à l'ajout de boues, le mélange destiné à leur fabrication présente davantage de plasticité. D'autre part, l'addition de matière organique allonge la durée de vie utile des installations de production de briques en élargissant la gamme des matières premières. Les contaminants organiques contenus dans les boues, en brûlant pendant la cuisson, laissent de petits vides uni rendent la brique plus poreuse et plus adhérente au mortier ; les bio briques sont par ailleurs de 10 % plus légères que les briques standard en raison de leur porosité. Par conséquent, il est possible d'observer une diminution appréciable des coûts reliés au transport de tels matériaux de construction. À titre indicatif, l'addition de 2 % à 3 % de boues sèches permet d'économiser 500 pi 3 d'essence par 1 000 briques. À l'heure actuelle, il s'agit d'un marché en expansion au Japon ainsi qu'aux États-Unis. Par exemple, un fabricant de briques du Maryland produit, à l'échelle industrielle, des briques contenant 15 %, 30 % ou 50 % de boues. (CHEN, 2012)

I.4.6.3. Co-combustion en cimenterie

Encore au stade expérimental, 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.

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 entrainer une diminution de la résistance mécanique. (AMORCE, 2012)

I.4.6.4. Technique mycélienne

Cette technique consiste à utiliser un cocktail de certaines souches mycéliennes (moisissures), pour une réduction naturelle du volume de boues. La matière réduite est transformée sous forme d'eau et d'élément gazeux, sans générer de pollution.

Le mélange mycélien est adapté à l'installation et élaboré in situ dans un bioréacteur. Ce dernier alimente automatiquement les cuves de traitement aérobie et il permet l'auto entretien des espèces ainsi que leur bio-augmentation. Le temps de séjour dans la cuve est d'environ 5 à 10 jours minimum avec 1-3 mg d'oxygène dissous par litre. (AMORCE, 2012)

I.5. Impacts des boues sur l'environnement

Les boues d'épuration sont considérées comme des déchets dangereux, qu'il tend à se concentrer les métaux lourds et les composés organiques faiblement biodégradables ainsi que, des organismes pathogènes (virus, bactéries…etc.) présent dans les eaux usées.

La plupart des polluants présents dans les boues d'épuration sont adsorbés par les particules du sol. Les modifications de la composition du sol vont essentiellement dépendre des propriétés du sol récepteur (sol de décharge), le substratum de la décharge, de situation géographique dans laquelle s'y trouve, et de climat du milieu. Les lixiviats ou jus de décharge constituent le principal contaminant de la nappe phréatique. Les boues contiennent notamment des eaux et des éléments polluants les lixiviats qui peuvent percoler dans les nappes phréatiques, lors d'une période fortement pluvieuse et suivant au l'écoulement des eaux, ils vont affecter les eaux de surface.

Le transport des quantités importantes des boues d'épuration et la mise en décharge présentent l'impact le plus important à cause de la dispersion des substances toxiques dans l'atmosphère et principalement l'émission gazeuse de sulfure et de l'azote qui peuvent être dangereuses pour la santé humaine et animale. (CLAUS et ROBERT, 2008)

L'étude Inter-Agences de l'Eau met en évidence un profil type d'impacts défavorables générés sur l'environnement, selon les trois voies principales d'élimination ou de valorisation des boues. Le tableau suivant les reprend. (ANDERSEN, 1999)

***Tableau 10** : IMPACTS TYPES GLOBAUX DEFAVORABLES. (ANDERSEN, 1999)*

/	**IMPACTS TYPES GLOBAUX DEFAVORABLES**
Elimination : STOCKAGE	Effet de serre additionnel, Dispersion de substances toxiques dans l'air, Acidification des sols et eaux (pluies acides).
Valorisation énergétique : COMBUSTION	Dispersion de substances polluantes dans l'air, Emission de toxiques dans les écosystèmes aquatiques, Utilisation de ressources naturelles.
Valorisation agronomique : EPANDAGE[6]	Emission de toxiques dans les écosystèmes terrestres, Dispersion de substances polluantes dans l'air par le biais du transport routier.

[6] Epandage de boues brutes, chaulées, compostées ou séchées.

I.6. Considération technico-économique

I.6.1. Coûts des filières d'élimination des boues urbaines

Comme pour l'estimation de la production de boues, il est assez difficile d'évaluer le coût d'une filière d'élimination. La plupart du temps, le prix est fixé au cas par cas, en fonction du contexte économique local, de la quantité et de la régularité de la production, ou encore de l'intérêt que peut présenter la boue pour le process lorsqu'il s'agit d'une valorisation.

Les prix énoncés incluent les coûts d'équipement et de génie civil, d'énergie, le coût de l'investissement ramené à un coût annuel sur la base d'un amortissement d'emprunt sur 15 ans au taux de 6 %, des réactifs utilisés, de la main d'œuvre, du transport, de l'épandage ou de la mise en décharge. (ARLABOSSE, 2001)

Les coûts moyens des filières de valorisation par ordre croissant sont présentés dans le tableau ci-dessous : (ADEME, 2001)

Tableau 11 : *Les coûts moyens des filières de valorisation (ADEME, 2001)*

Filière de traitement	Coûts (€/TMB)
Valorisation agricole directe	30 à 45
Compostage	65 à 80
Méthanisation	65 à 80
ISDND	105 à 120
Incinération	120 à 135

II. Etude de cas sur la gestion et la valorisation des boues résiduaires domestiques dans le monde

Comme la demande mondiale en énergie renouvelable et en matière organique augmente, les déchets organiques, y compris les boues d'épuration, pourraient être l'une des ressources disponibles à cet effet. Ce substrat peut être utilisé comme ressource énergétique pour l'électricité et la chaleur. De plus, les boues d'épuration peuvent être considérées comme un substrat pour la fertilisation et l'assainissement des sols si la technologie appliquée permet obtenir le produit de qualité. Ces réutilisations des boues d'épuration sont économiquement viables et écologiquement durables par rapport à traitement des déchets et mise en décharge.

II.1. Cas de l'Algérie

Une étude a été faite par (NAKIB et al., 2014) qui avait pour but d'évaluer les boues d'épuration du centre-nord de l'Algérie (Mitidja région) en termes qualitatifs et quantitatifs. L'enquête est limité à six stations d'épurations représentatives de la région centre-nord algérien (Beni-Messous, Boumerdes, Kolea, Medea, Reghaia, et Tipaza).

Le tableau 12 présente les caractéristiques hydrauliques des six stations d'épuration. La recherche dans cette étude a été menée entre 2009 et 2013, avec les délais d'étude pour

Les six STEP étant: Beni-Messous (septembre 2009–Juin 2010), Tipaza (novembre 2010-juin 2011), Boumerdes (janvier 2010-mai 2011), Reghaia (avril 2011-février 2012), Medea (novembre 2009-juin 2012) et Kolea (septembre 2012-juin 2013).

***Tableau 12**: Caractéristiques hydrauliques de six stations d'épuration dans le centre-nord de l'Algérie*

Villes	Beni-Messous	Tipaza	Boumerdes	Reghaia	Medea	Kolea
Volume (m^3/j)	50400	11200	15000	80000	15000	11000
Capacité (équivalent habitant)	250000	70000	7000	26000	75000	60000

L'enquête qui a été faite par (NAKIB et al., 2014) leur a permis de conclure que la quantité totale de boues dans les six stations du centre-nord d'Algérie été de 5221 tonnes/an et la figure 22 nous montre plus en détail la production des six Step des wilayas représentatives.

A titre indicatif, en 2015, la production des boues au niveau des 58 STEP de type boues activées gérées par l'ONA, était de 54000 tonnes de matière sèches par an et a atteint une quantité de 90000 tonnes en 2016 (NAKIB et al., 2014).

A horizon 2020, la production de boue devrait augmenter de plus 50% et devrait atteindre une quantité estimée de plus de 150000 tonnes/an.

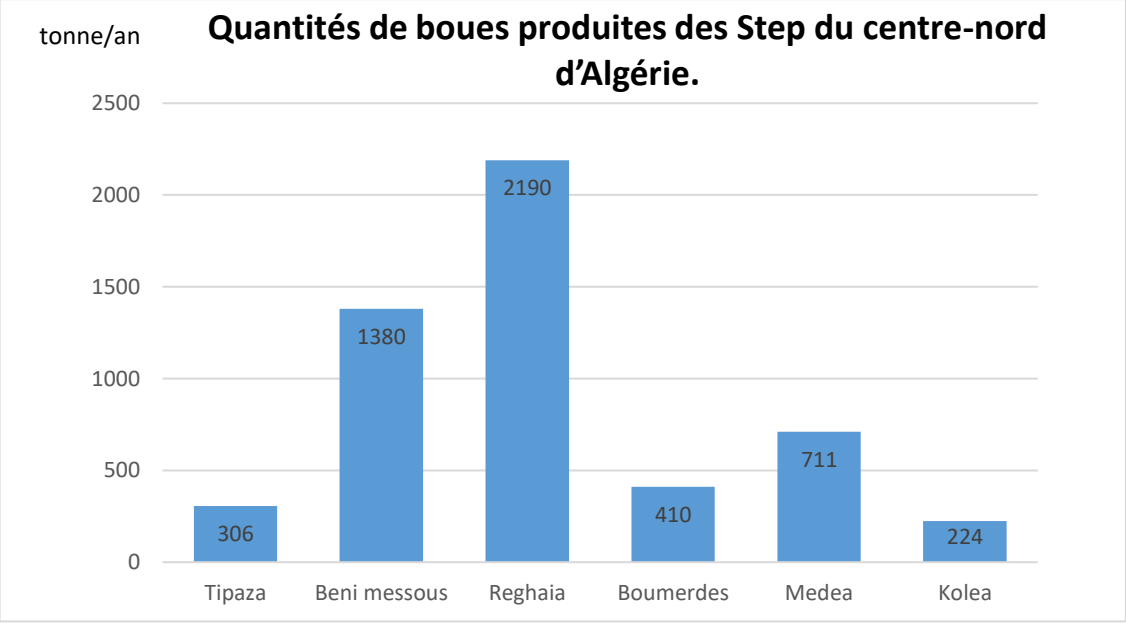

Figure 22: *Quantités de boues produites dans six stations d'épurations du centre-nord d'Algérie. (NAKIB et al., 2014)*

Les boues d'épurations sont composées d'eau et de matières sèches contenant des substances minérales et organiques (Tableau 13).

***Tableau 13**: Caractéristiques des boues (NAKIB et al., 2014)*

	Beni-Messous	Boumerdes	Reghaia	Kolea	Media	Tipaza
MO%	51	53.5	34	52	28	40.8
C % MS	22.3	31.10	21.6	32.3	15	16.2
N% MS	2.62	3.07	1.45	2.43	2.06	1.6
P_2O_5 % MS	5.62	2.60	2.2	6	0.33	0.22
K_2O % MS	0.048	0.07	0.05	0.043	0.19	0.074
C/N	8.65	10.13	14.89	12.8	7.32	10.12
Sècheresse %	51	17.46	35	41	44	48
pH	6.59	7.25	7.37	7.36	7.25	7.74
CaO %	3.68	5.07	-	6.2	-	1.85
MgO %	-	1.66	1.2	0.56	-	0.95

La figure 23 représente les différents moyens de gestion et de valorisation des boues d'épuration adoptés par l'Algérie.

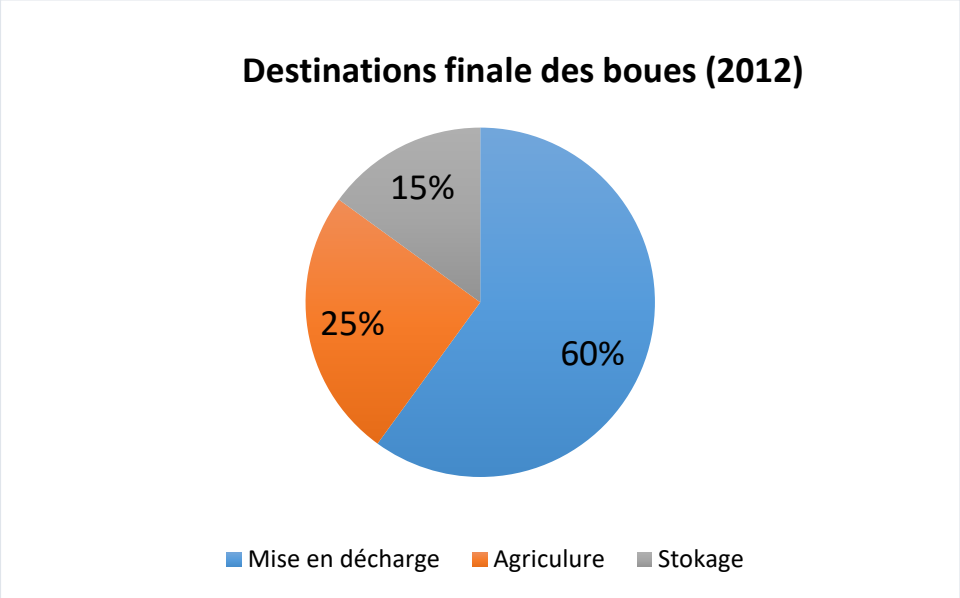

***Figure 23**: Valorisation des boues de stations d'épurations en Algérie. (ONA, 2012)*

II.2. Cas de l'Egypte

Actuellement, l'Égypte compte 303 stations d'épuration qui produisent 11,85x10^6 m^3 / jour d'eaux usées. La production de boues sèches d'épuration a été estimée à 5,8x10^3 t / jour avec un taux de production de 0,48 kg / m^3 d'eaux usées traitées (Ghazy et al., 2009). Les tableaux 14 et 15 indiquent respectivement les quantités estimées de boues d'épuration sèches produites dans toutes les stations d'épuration égyptiennes en 2008 ainsi quel leurs caractéristiques.

***Tableau 14**: Estimation des boues sèches produites à partir de toutes les STEP en Egypte ,2008*

Type de STEP	Nombre de STEP	Taux de production de boues (kg/m^3)	Capacité de Traitement des Eaux usées 10^3 m^3/j	Estimation des boues d'épuration sèches (50% DS)	
				Quantités t/j	Volume m^3/j
Boues activées	97	0.225	6703	1508	2793
Fossé d'oxydation	47	0.225	833	187	347
Filtre anti-ruissellement	9	0.22	291	64	119
Aération prolongée	17	0.1	170	17	31
Bassins d'oxydation	35	0.05	266	13	25
Lagune aérée	4	0.1	197	20	36
Traitement primaire	22	0.15	2021	303	561
Autres*	72	0.2	1372	274	508
Total	303	-	11850	2387	4421

Tableau 15: *caractéristiques des boues sèches en Egypte*

Step	Rawash	Al Berka	Al Gabel	Site Alex	Shobera	Halwan	Standard égyptien
Zn(mg/kg)	1810	1370	1640	804	232-604*	155-8097*	2800
Cu(mg/kg)	321	497	639	220	63-322*	119-988*	1500
Pb(mg/kg)	218	15800	1320	384	195-1213*	50-302*	300
Cd (mg/kg)	4.6-50*	2.5-40*	0.9-6.21*	4-100*	4.5*	15-312*	32
Cr(mg/kg)	769*	333*	312-993*	89*	130*	172*	1200
As(mg/kg)	4-25*	0.4-30*	0.2-28*	9*	0.3*	/	41
Hg(mg/kg)	0.5-15*	3.7	0.1-10*	16	7.7*	/	17
Ni(mg/kg)	25-211*	5-645*	43-215*	57-100*	29*	23-188*	420
%MO	/	/	/	/	/	/	57
%NKN	/	/	/	/	/	/	3.16
%P	/	/	/	/	/	/	1.13
%K	/	/	/	/	/	/	0.28

* : résultats de l'analyse d'échantillonnage des études précédentes. (METAP, 1999 ; AFESD, 2007).

Historiquement, la plupart des boues d'épurations étaient utilisées dans les décharges, au fil du temps, ils se sont rabattus sur l'utilisation agricole à cause de la diminution des décharges et afin de conserver les nutriments et autre matériaux récupérables des boues d'épuration.

L'utilisation des boues d'épuration dans l'agriculture en Égypte peut offrir l'utilisation la plus durable et la plus bénéfique des boues d'épuration pour les Conditions égyptiennes. C'est l'itinéraire le plus économique d'élimination des boues car les agriculteurs égyptiens sont préparés pour payer toute source de fumier organique. Environ 0,66 million des tonnes de boues d'épuration séchées ont déjà été vendues aux agriculteurs en 2007, qui représentent plus de 85% du total produit des boues de toutes les stations d'épuration en Égypte selon les données HCWW (Holding Company for Water and Waste water) data.

II.3. Cas de l'Europe

Le traitement municipal des eaux usées entraîne la production de grandes quantités de boues d'épuration qui semble être différenciée de matière significative entre les pays de l'espace européen (Figure 24), ce qui nécessite une gestion adéquate et acceptée sur le plan environnemental avant l'élimination finale. (Kelessidis et Stasinakis, 2012)

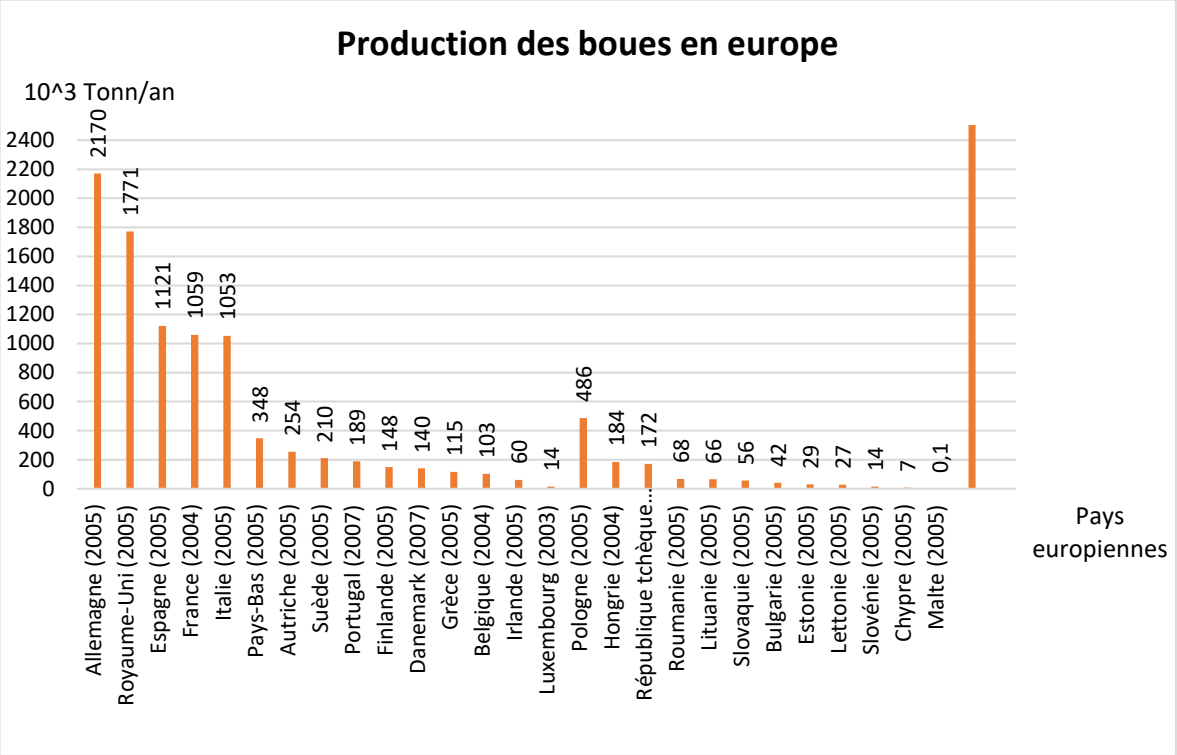

***Figure 24**:Production des boues en Europe (Kelessidis et Stasinakis, 2012)*

Dans l'Union européenne, la gestion des boues reste une question ouverte et difficile pour les états membres, car la législation européenne relative est fragmentaire et assez ancienne, tandis que les données publiées concernant le traitement et l'élimination des boues dans différents pays européens sont souvent incomplètes et inhomogènes. L'objectif principal de la présente étude était d'exposer la situation actuelle et de discuter des perspectives futures pour le traitement et l'élimination des boues dans les pays de l'UE.

Sur la base des données de 2014, certaines données factuelles et chiffrées significatives sur la gestion des boues d'épuration peuvent être épinglées:

- 8,7 millions de tonnes de boues d'épuration, sous la forme de matière sèche solide, ont été produites dans l'Union européenne, ce qui représente environ 17 kg par habitant;
- La Bulgarie, Chypre, l'Italie, le Portugal et la Roumanie ont affiché des volumes inférieurs à 10 kg par habitant, ce qui laisse à penser que le niveau de collecte et de traitement est insuffisant;
- 58 % des boues d'épuration générées ont été réutilisées, essentiellement dans l'agriculture (Figure.25). (COMMISSION EUROPÉEN, 2017)

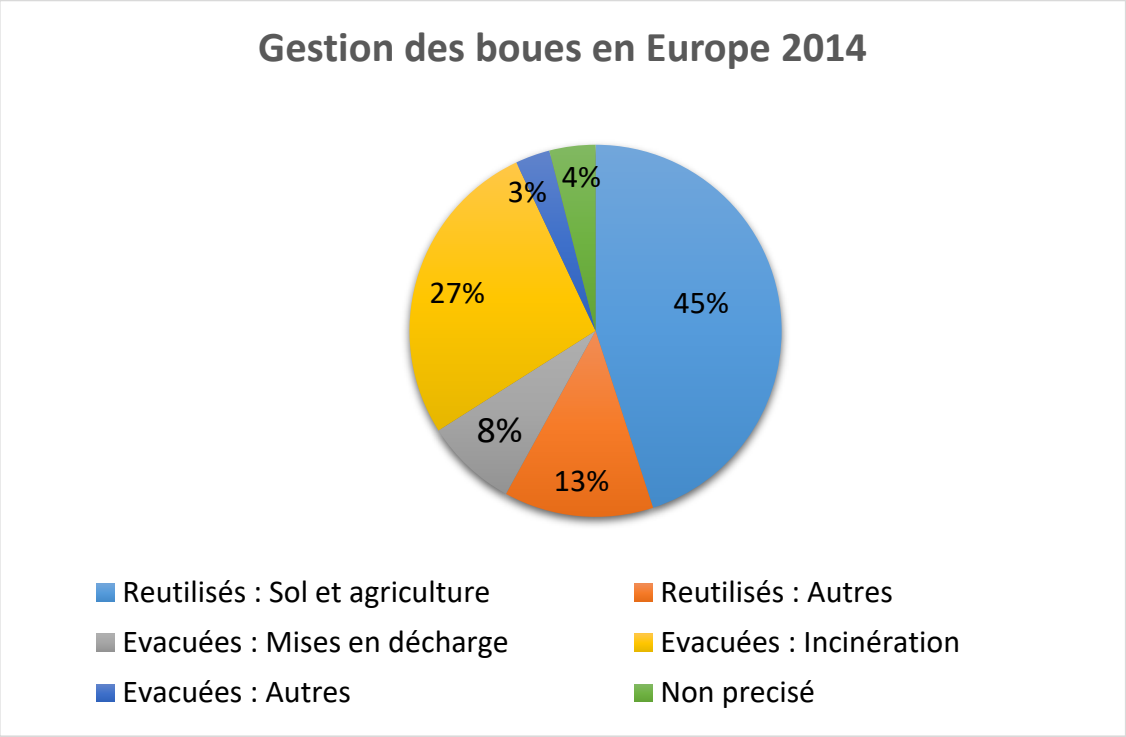

***Figure 25**:Destination des boues d'épuration provenant des eaux urbaines résiduaires communiquées. (COMMISSION EUROPÉEN, 2017)*

II.4. Cas des USA

La population bénéficiant de l'assainissement des eaux usées a augmenté régulièrement aux États-Unis par le passé (Figure 26). Les usines de traitement des eaux usées produisent de grandes quantités de boues qui doivent être correctement traité avant l'élimination ou d'autres applications de réutilisation finale comme bio solides.

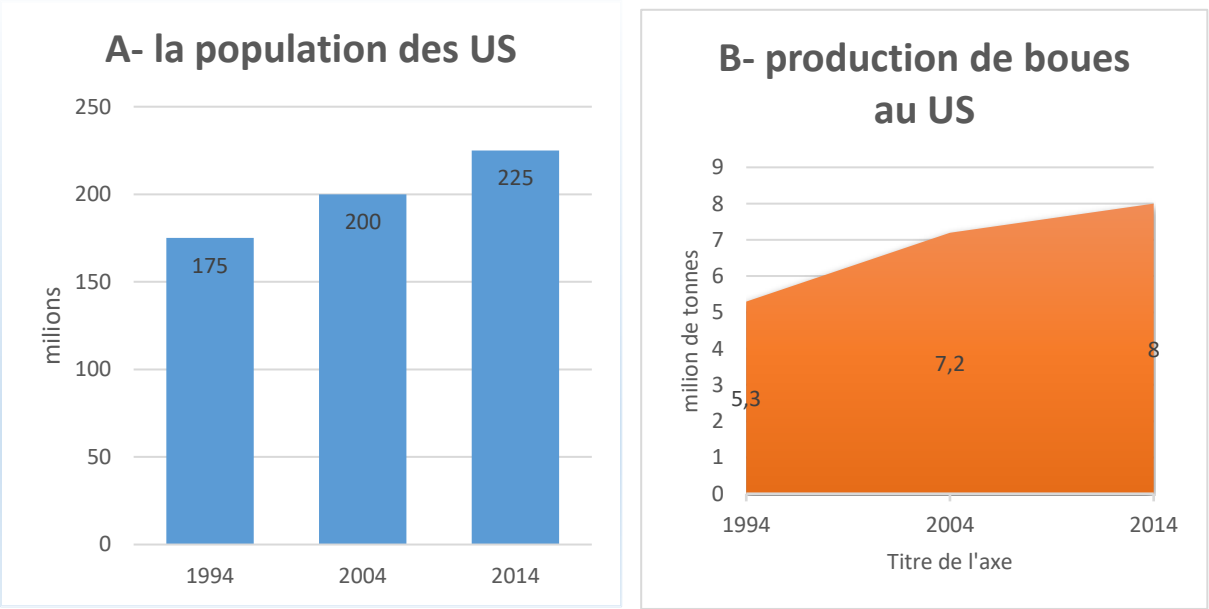

Figure 26: *La population reliée aux réseaux des stations d'épuration et la production de boues entre 1994 et 2014 aux USA (GUDE, 2015)*

Environ huit millions des tonnes de bio solides sont générées à partir des eaux usées traitement qui dessert 75% de la population américaine (225 millions en 2014) avec des besoins en assainissement. Les bio solides peuvent être utilisé pour diverses utilisations bénéfiques (Wang et al ,2008). La figure 27 montre les tendances des utilisations et des pratiques d'élimination des bio solides au cours des dernières décennies.

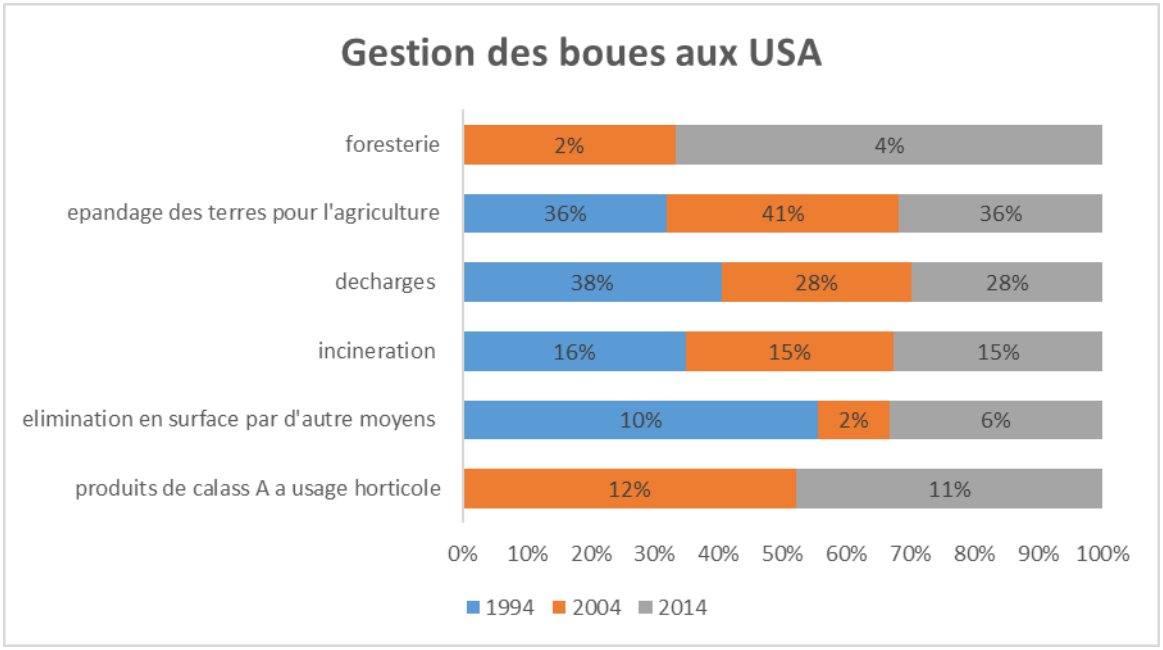

Figure 27: *Tendances de la gestion des boues entre 1994 et 2014 aux US (GUDE, 2015)*

On peut remarquer que l'intérêt pour la classe A produits (sans agents pathogènes et sans danger) pour l'irrigation a augmenté au cours des dernières années alors que les quantités de boues dirigé vers les décharges a décliné. Remise en état et foresterie les demandes ont également augmenté. La situation idéale serait pour utiliser toutes les boues en épandage, plusieurs problèmes qui empêchent l'utilisation des bio solides pour l'agriculture applications qui incluent l'accumulation de concentrations de métaux, de soufre, de chlore et surtout l'azote, ainsi que d'autres éléments tels que métaux (zinc (Zn), cuivre (Cu), nickel (Ni), cadmium (Cd), plomb (Pb), mercure (Hg) et chrome (Cr)).

II.5. Cas du Brésil

Il n'existe aujourd'hui que peu d'études sur la production de boues au Brésil. Machado (2001) a réalisé une enquête sur la production de boues sur le territoire brésilien entre 2000 et 2001. Dans son ouvrage, 275 stations d'épuration ont été analysées sur un total de 984. Le tableau 16 présente l'estimation de production de boues d'épuration par région.

Tableau 16: *Production de boues par région (2000-2001). (MACHADO, 2001)*

Régions du brésil	N° de station d'épuration des eaux usées	Production de boues* informé ($t.ans^{-1}$)	Production de boues estimée
Nord	03	-	328
Nord-est	66	-	15.668
Centre Ouest	66	11.385	19.497
Sud-ouest	48	274.719	98.139
Sud	92	22.529	18.092
Total analysé	275	308.633	151.724

Actuellement, très peu de systèmes de traitement des eaux usées disposent d'informations sur la composition des boues produits dans leurs installations. L'enquête développée par Machado (2001), par exemple, a mis en évidence une grande incertitude sur la moyenne brésilienne, comme le montre le tableau 17. Il est important de souligner que les eaux des entreprises de traitement situées dans le sud, le sud-est et le district fédéral sont celles qui ont contribué le plus d'informations.

Tableau 17: *Composition moyenne des boues d'épuration au Brésil (2000-2001) et dans l'État de Paraná (2006). (MACHADO, 2001)*

Paramètres	moyenne brésilienne	Ecart moyen	moyenne anaérobie de sanepar (1)	Ecart moyen	Moyenne aérobie de sanepar (1)	Ecart moyen
pH	7.33	2.02	11.6	1.4	12.4	0.4
Matière organique %	56.19	7.96	-	-	-	-
Nitrogène %	5.75	8.88	1.07	0.26	1.28	0.9
Carbone %	28.16	6.00	12.56	6.00	4.37	0.5
Sulfure %	0.30	0.25	-	-	-	-
Phosphor %	1.82	1.58	0.26	0.30	0.29	0.50
Potassium%	0.36	0.53	0.16	0.10	0.22	0.10
Calcium %	4.25	6.55	19.85	8.40	33.66	40.50
Magnésiu,%	0.22	0.20	3.17	3.50	0.53	0.20
Arsenic, mg/kg M.S	14.69	31.14	-	-	-	-
Plomb, mg/kg M.S	80.37	95.42	28.9	20.78	17.97	2.96
Cuivre, mg/kg M.S	255.39	256.93	73.73	59.01	116.67	18.05
Chrome, mg/kg M.S	143.72	212.84	28.11	24.69	77.01	50.83
Mercure, mg/kg M.S	2.53	4.11	0.52	0.50	0.23	0.41
Nickel, mg/kg M.S	41.99	73.85	18.06	13.14	38.91	12.81
Zinc, mg/kg M.S	688.83	814.80	219.49	123.24	458.53	249.01

En général, les stations d'épuration brésiliennes n'ont pas de contamination par des métaux lourds dans leurs boues. La contamination des boues n'a été détectée que dans certains cas isolés. Ces contaminations métalliques sont liées à des irrégularités de contributions des zones industrielles.

Le brésil a un fort potentiel d'utilisation des boues dans son domaine agricole figure 28, bien que l'agro-industrie est une activité économique importante, les informations de Sabesp (la société d'assainissement de São Paulo), montrent qu'environ 90% des boues produites dans l'État de São Paulo sont mis en décharge, alors que le quota utilisé dans l'agriculture ne représente environ que 10% du total des boues générées, le tableau 18 représente la destination finale des boues au brésil selon l'étude de Machado (2001).

Tableau 18: *Élimination définitive des boues produites*

Elimination finale	**Quantité évaluée (t BST/an)**	**Volume évaluée (%)**	**Quantité estimé (t BST /an)**	**Volume estimé (%)**
Décharge	138418	44.9	75844	50
Agriculture	17333	5.6	22973	15.1
Indéfini	152883	49.5	52907	34.9
Totale	308633	-	151724	-

II.6. Cas de la chine

La production de boues par habitant dans la partie orientale de la Chine était plus élevée que dans la partie occidentale de la Chine. La capacité nationale de traitement des eaux usées en Chine a augmenté rapidement ces dernières années.

Une grande quantité de boues a été un grand problème et a soulevé des préoccupations importantes en Chine. Le présent document a examiné la situation actuelle de la production, de la gestion, du traitement et de l'élimination des boues en Chine. La production totale de boues en Chine a connu une croissance annuelle moyenne de 13 % de 2007 à 2013 comme le montre la figure 29, et 6,25 millions de tonnes de solides secs ont été produites en 2013. La production de boues par habitant en Chine est inférieure à celle des pays développés. Cependant, la gestion des boues est mauvaise en Chine. Les agents administratifs des boues ne sont pas conformes les uns aux autres. Les lois et règlements de gestion des boues sont incomplets et parfois irréalistes. (YANG et al, 2015)

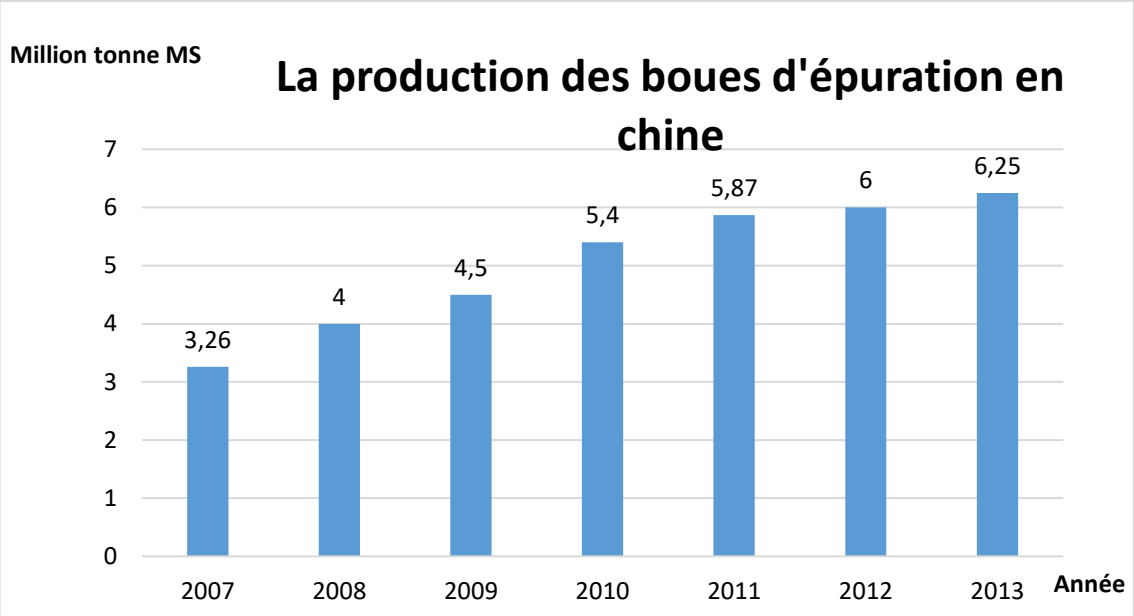

***Figure 28**: Production des boues en chine 2007-2013.(YANG et al, 2015)*

Les caractéristiques des boues d'épuration dépendent du traitement des eaux usées et des procédés de traitement des boues. Les boues d'épuration produites dans différentes usines présentent une grande variabilité dans leur composition chimique, la première et la teneur en humidité. La deuxième caractéristique la plus importante des boues d'épuration est sa forte teneur en métaux lourds. Les oligo-éléments dans les boues d'épuration en chine sont indiqué dans le tableau 19.

Tableau 19: les teneurs en éléments traces métalliques dans les boues d'épuration en chine. (GAO et al, 2020)

les teneurs en éléments traces métalliques en chine	Valeurs (%)
Zn	0%
Cd	0%
Cu	58%
Ni	7%
Pb	1%
Cr	34%
Mo	0%
Sr	0%

Plus de 80 % des boues en chine sont éliminées dans des décharges sauvages. Seule une petite partie est enfouie dans des décharges sanitaires (Figure 29).

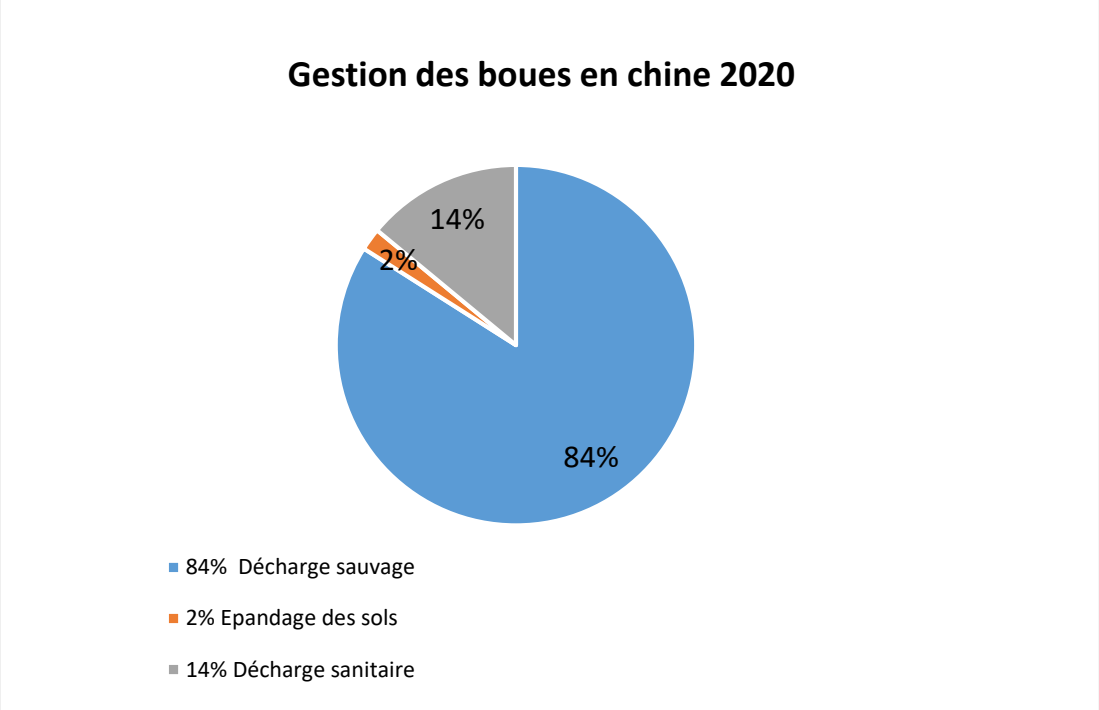

***Figure 29**:Gestion des boues en chine. (GAO et al, 2020)*

Conclusion

Après notre étude, on constate que la production des boues d'épuration croit continuellement avec l'augmentation de la population. Le choix des procédés de traitement et les moyens de valorisation adoptés dépendent de la nature des boues qui varient d'un pays a un autre. Les principales voies de valorisation utilisées dans le monde sont : l'agriculture, la mise en décharge et l'incinération. On remarque que dans les pays sous développé (Algérie, brésil, Egypte) la mise en décharge est le moyen le plus utilisé, tant dis que pour les pays développés (USA, Europe), la voie majoritaire de valorisation des boues est leur épandage agricole.

On estime que pour une meilleure gestion des boues d'épurations en Algérie, il est préférable d'augmenter le pourcentage de valorisation agricole, car les terres algériennes contiennent un taux élevé de calcaire qui nécessite l'ajout de matière organique pour augmenter l'humidité et la production agricole, C'est l'itinéraire le plus économique et l'utilisation la plus durable et bénéfique. Elle peut aussi favoriser la valorisation énergétique (pyrolyse, oxydation, gazéification) afin de produire un biogaz (utilisé pour le chauffage, électricité ...), des cendres (utilisé pour la fabrication des matériaux de construction), ou bien opter l'aménagement des paysages et les gros travaux d'aménagement, comme les talus routier et autoroutier.

Références Bibliographiques

- **Adamvzy Z**. « Particle adsorption and deposition: role of electrostatic interactions ». Advances in Colloid and Interface Science, 100-102, 267-347. 2003.
- **Ademe, les** « boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture »: dossier documentaire, Paris, 59p, 2001.
- **AFESD,** Arab Fund for Economic and Social Development, « Sludge management project in Greater Cairo ». Summary of technico, 2007
- **Agence de l'eau**, Arthur Andersen. « Audit environnemental et économique des filières d'élimination des boues d'épuration urbaines ». Les études des Agences de l'Eau 2016.
- **Amadou H.** « Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de station d'épuration urbaine ». Thèses de doctorat, Université Lounis Pasteur. P: 170.2007.
- **Amorce**. « Boues de Station d'Epuration : Techniques de traitement, Valorisation et Elimination ». Série Technique DT 51. Pp 34. 2012.
- **Antonin, G.** « Les procédés de valorisation thermique des boues ». Actes Du Colloque Les Boues. Quels Enjeux ? Quelles Solutions ?, Pau, France, 23-24 Février. 2000.
- **Arlabosse, P.** « Etude des procèdes de séchage des boues urbaines et industrielles ». Rapport final. Ecole Nationale des Mines d'Albi-Carmaux.183 pages. 2001.
- **Aussel Henri., Colette le Bache., Gaziella Domier**. « Traitement des eaux usées » ED 5026, 4 p ,2004.
- **Barna, Saida**. «Les boues d'épuration document de synthèse», comité sécurité alimentaire d'Aprifel, page 4, 2001.
- **Bassompierre Cindy**. « Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers: de la conception d'un pilote à la validation de modèles». Domain_stic. Inge. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007. Français.
- **Bengtsson, M., Tillman, A.M.**, Actors and interprétations in an environmental controversy: « the Swedish debate on sewage sludge use in agriculture ». Resources, Conservation and Recycling, 42, 1, 65-82. 2004.
- **Bonjiovanni, J.-M**., « Traitement des boues résiduaires par l'association en série d'une déshydratation mécanique et d'un séchage thermique », Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour (1998).

- **Buffle J**. « Complexation reactions in aquatic systems »: an analytical approach. - p. Chichester, John and Wiley 692. 1988.
- **Buffle, J. and Newman, M.** « The use of filtration and ultrafiltration for size fractionation of aquatic particles, colloids, and macromolecule » s. In Buffle J. and van Leuween, Environmental particles Lewis Publishers.p 171-230. 1992.
- **Boeling J-C**.– « Méthodologie pour l'étude et la caractérisation des boues résiduaires en vue du choix de leur mode de traitement.L'eau et l'Industrie» n° 40 déc. 1979
- **Boeling J-C.-** Procédés chimie - bio - agro | Opérations unitaires. « Génie de la réaction chimique. Traitements et destinations finales des boues résiduaires ». P 2- 23. 10 septembre 2000.
- **Bourrier, R., Marc, S., Bechir,** S. « Guide technique de l'assainissement » 5éme Edition, 1041 p ,2017.
- **Chen mao Zhe**; « Faisabilité technique et environnementale de l'utilisation dans des matériaux de construction cimentaires de cendres d'incinération de boues de station d'épuration »,2012.
- **Claus Bliefert, Robert Perraud**. « Chimie de l'environnement, air, eau, sols, déchets », PP 478.2008.
- **Colin, F.** « Connaissances en matière d'utilisation agricole des boues », Rapport IRH pour le ministère de l'Environnement n° 78-02-06 ,177pages, 1986.
- **Commission européenne** « Neuvième rapport sur l'état de mise en œuvre et les programmes de mise en œuvre de la directive 91/271/CEE du Conseil relative au traitement des eaux urbaines résiduaires », Bruxelles, PP 18, 2017.
- **Dégermant,** mémento technique de l'eau, dixième édition, tom 1 et 2. 2005.
- **Dégerment**- Mémento technique de l'eau, 1236p, 8éme Ed, 178, relié, 1978.
- **Diagnac M.F.H.S. Francou C. Dernne S**., « Pyrolyticstudy of compost and wasteorganicmatter ». Org. Geochem 36. p: 1071, 2005.
- **Djamonet**. « Utilisation agricole des boues d'origine urbaine », synthèse bibliographique. Centre nationale de documentation et d'information sur l'eau, 2rue de Madrid, 750089 PARIS. 1987.
- **Duchene, P**. « les systèmes de traitement des boues de stations d'épurations des petites collectivités ». Documentation technique du FNDE. N° 09 p 8-9, 1990.
- **Emmanuel Adler** « Le maire des boues d'épuration ». PP 97, 2000.

- **Gao Ningbo, Kamran, Cui Quan, Paul T. Williams,** « Thermochemical conversion of sewage sludge: A critical review ». Progress in Energy and Combustion Science 79,100843. PP 32, 2020.
- **Gude VG**. « Energy positive wastewater treatment and sludge management ». Edorium J Waste Manag 1:10 –15, 2015.
- **Guy, Atlan** : « Les boues d'épuration et leurs perspectives de gestion en Île-de-France » ,2003.
- **Hooda, P.S. Alloway, B.J.** « Effects of time and temperature on the bioavailability of Cd and Pb from sludge-amended soils ». J. Soil Sci, PP 44, 97-110, 1993.
- **Jarde E.** Composition organique de boues résiduaires de stations d'épuration lorraines : « caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation » [en ligne]. 2002.
- **Jaroz, J**. « le traitement des boues de station d'épuration », centre de formation et de documentation sur l'environnement industriel, paris 06 - France, 1985.
- **Jean-Pierre Canler**. « Performances des systèmes de traitement biologique aérobie des graisses, documentation technique FNDAE » N°24, 2001.
- **Karia, GL. R.A, Christian.** Wastewater traitement : « concepts and design approch », 365 pages, 2003.
- **Karine, Marie, Béatrice PETIT**, « actualisation des connaissances sur les éléments biologiques et minéraux persistants dans les boues des stations d'épurations ». Impact sur la sante publique, école nationale vétérinaire d'Alfort. P13, 14, 15, 16, 17, 18. 2007.
- **Kelessidis A, Stasinakis A, «** Waste Management », Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries, pp. 1186–1195, 14 February 2012.
- **Koller E, «** Traitement des pollutions industrielles, Eau, Air, Déchets, Sols, Boues ». Technique et ingénierie, Série environnement et sécurité ; 2ème édition DUNOD. P: 569,2009.
- **Lacee, C**. « Analyses des boues AFEE », TOME 1, 135pages ; TOME 2 ,127pages, 1985.
- **Lemaire F ; Dartigue A ; Riviere L M** - Les substrats : problèmes particuliers posés par les cultures de plantes ornementales en pots et conteneurs, les relations entre les systèmes racinaires des végétaux et les sols ou substrats artificiels. Compte rendu des séminaires du groupe d'étude des racines. (Aix en provence). pp :55-71, 1990.

- **Lengo, K.M.** « Effets comparés de divers coagulants sur l'enlèvement de la Matière organique des eaux à potabiliser - influence de la préhydrolysation ». Mémoire de maîtrise - Département de Génie Civil. Montréal. École Polytechnique de 120 p. 1994.
- **Machado M. F**. de S. A situação brasileira dos biossólidos (The Brasilizian situation of biossolids) Dissertação (Mestrado). FEC - Universidade de Campinas. Campinas, p 828 ,2001.
- **Marttinen S. K., Kettunen R. H., Rintala J. A**., « Occurrence and removal of organic pollutants in sewages and landfill leachates ». The Science of the Total Environment, 301, 1-12. 2003.
- **Marcel, Francis Pastor.** L'assainissement des eaux usées en agglomération parisienne : « principes et procédés SIAAP, colombe », p 92 .2013.
- **Metahri M. S.** « Elimination 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 LMC. Tizi-Ouzou : Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012
- **METAP,** The Mediterranean Environmental Technical Assistance Programed, « Strategic management plan for agricultural use of sewage sludge in Cairo ». Final report summary, Cairo, Egypt.1995.
- **Nakib Naamar, Ahmed Kettab, Ali Berreksi & Laila Mandi**: Study of the prospects foragricultural utilization of sludge produced from WWTPS in North Central Algeria, Desalination and Water Treatment, 2014.
- **OECD** : organisation for economic co-operation and developement .https://stat.oecd.org.
- **ONA** : Office National de l'Assainissement. ONA. https://ona-dz.org/,2014.
- **OTV**. « Traiter et valoriser les boues », collection OTV édition, 1997.
- **Pandolfi, Denis**. « Caractérisation morphologique et physiologique de la biomasse des boues activées par analyse d'images » Lorraine. p 133, 2006.
- **Pommel, B**. « La valorisation agricole des déchets : les boues résiduaires urbaines» ,70 pages, 1979.
- **Roussel, P. Desachy, C. et Chalot, F.** « Les réglementations nationales et européennes », Session de formation continue à l'ENGREF, Paris, nov. 1994.
- **Sedki, A**. « Etude eco-toxicologique de la contamination ». Thèse doct. etat,univ Cadi ayyad,Fac. SCI.Semlalia,Marrakech,Maroc.p140 ,1995.
- **SPDE : Syndicat professionnel des entreprises**. « La gestion intégrée des boues urbaines des délégataires de services d'eau et d'assainissement » [en ligne].

Connex Consulting de services d'eau et d'assainissement 83 avenue Foch, 75116 Paris : 2006,

- **Tauzin C. Juste C. «** Effet de l'application à long terme de diverses matières fertilisantes sur l'enrichissement en métaux lourds des parcelles ». Rapport du contrat 4084/93 ministère de l'environnement. P: 158, 1986.
- **Vecteur environnement**. « Caractérisation des boues d'épuration municipales » Partie I : Paramètres agronomiques. Article technique. 52 p. 2007
- **Wang H, Brown SL, Magesan GN, et al**. «Technological options for the management of biosolids ». Environ Sci Pollut Res Int 2008 Jun;15(4):308–17
- **Yang, Guyand. Guangming, Zhang. Hongchen, Wang**. « Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China». Journal homepage: Science Direct. Renmin University of China, 59 Zhongguancun Street, Beijing 100872, PP 66-71, 2015.
- **Zebarth B. J., Mcdougall R., Neilsen G., Neilsen D**. « Availability of nitrogen from municipal sewage sludge for dryland forage grass ». Can. J. Plant Sci, pp 80, 575–582, 2000.

Résumé

L'élimination des déchets de station d'épuration est un problème majeur qui touche l'environnement négativement, notamment la santé humaine.

Le présent travail, consiste à étudier la valorisation des boues d'épuration dans différents pays (Algérie, brésil, chine, USA, Égypte, Europe). La production croissante et les nuisances des boues sont les principales raisons de leur valorisation.

Le choix de la filière de traitement et les analyse des boues dépend de leur origine et leur destination finale. Le traitement vise deux principaux objectifs : réduction de volume (épaississement, déshydratations), réduction du pouvoir fermentescible (stabilisation). Les filières de traitement sont différentes mais l'objectifs reste le même.

La valorisation agricole peut être considérée comme le mode de recyclage le plus adopté pour rééquilibrer le cycle biogéochimique (C, N, P), la protection de l'environnement est d'un très grand intérêt économique. La mise en décharge et l'incinération sont des moyens de valorisation fortement utilisé mais elles nécessitent des espaces de plus en plus importants. On peut aussi utiliser des solutions alternatives tel que la pyrolyse, la gazéification et l'oxydation par voie humide, mais elles sont couteuses.

Mots-clés : boues, valorisation, station d'épuration, traitements, environnement, déchets.

Summary

Disposal of wastewater treatment plant waste is a major problem that affects the environment negatively, especially human health.

The present work consists of studying the valuation of sewage sludge in different countries (Algeria, Brazil, China, USA, Egypt, and Europe). The increasing production and nuisance of sludge are the main reasons for their recovery.

The choice of the treatment process and the sludge analysis depends on their origin and their final destination. The treatment has two main objectives: reduction in volume (thickening, dehydration), reduction in fermentability (stabilization). The treatment routes are different but the objectives remain the same.

Agricultural recovery can be considered as the most adopted recycling method for rebalancing the biogeochemical cycle (C, N, and P), environmental protection and of great economic interest; landfill and incineration are highly used recovery methods, but they require increasingly large spaces. Alternative solutions such as pyrolysis, gasification and wet oxidation can also be used, but they are expensive.

Keywords: sludge, recovery, treatment plant, treatments, environment, waste.

Agzul

Tukksa n yiḍumman n tiɣsar n usizdeg d ugur ameqqran i iḥuzan tawennaḍt s wudem n diri, ladɣa tazmert n umdan.

Leqdic-a, d tazrawt yerzan allus n useqdec n waluḍ n tzuliɣin deg tmura yemgarraden (Lezzayer, Brésil, Chine, USA, Maṣer, Europe). Afares yettnernin akked uḍurru i d-ixeddem waluḍ i d timental tigejdanin n wallus n useqdec-ines.

Afran n yiberdan n ulawi d tesleḍt n waluḍ yeqqen ɣer wansa d-yekka d wanda ara yerr. Alawi yeqsed sin n yiswan : asenqes deg ubleɣ (asuzer, tukksa n waman), asenqes deg tezmert n urukkem (aserked). Iberdan n ulawi mgarradent maca iswi d yiwen.

Asɣalet deg tfellaḥt yettwaḥsaben d abrid i ttawin s waṭas i useggem n tsufeɣt tabyukimant (C.N.P), aseḥbiber ɣef twennaḍt, deg-s lfayda tameqqrant deg tdamsa. Tarusi deg ugudi neɣ asraɣ n yiḍumman, ttwaseqdacen s waṭas maca ttaḥwaǧen imukan imeqqranen. Llant daɣen tifratin-nniḍen am rekku s leḥmu, asireg d useksed s ubrid aneddaw, d acu ttasent-d ɣlayit.

Awalen-tisura : aluḍ, allus n useqdec, tiɣsert n usizdeg, asekker, tawennaḍt, iḍumman.