



Réf :/UAMOB/F.SNV.ST/DEP.BIO/2017

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER

Domaine : SNV Filière : Sciences Biologiques
Spécialité : Eau, santé et environnement

Présenté par :

LATEUR Aldjia

Thème

***Eco-désinfection des boues résiduaires par Micro-ondes et
Ultrasons : Etude phénoménologique.***

Soutenu le : 01 / 07 / 2017

Devant le jury composé de :

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>		
<i>M. ABARKANE</i>	<i>MCB</i>	<i>Univ. de Bouira</i>	<i>Président</i>
<i>M. DAHMOUNE Farid</i>	<i>MCA</i>	<i>Univ. de Bouira</i>	<i>Promoteur</i>
<i>M. REMINI Hocine</i>	<i>MCB</i>	<i>Univ. De Bouira</i>	<i>Co-promoteur</i>
<i>Mme MEDBOUA CHAFIAA</i>	<i>MAA</i>	<i>Univ. de Bouira</i>	<i>Examinatrice</i>

Année Universitaire : 2016/2017

Dédicaces Dédicaces

Je dédie ce mémoire à toute personne qui existe dans le train de ma vie :

Mes meilleurs ami(e)s, chandelles de mes jours et nuits et parents depuis la naissance : papa et maman Mr. Et Mme. LATEUR, que DIEU vous garde toujours à mes cotés pour que je puisse accomplir vos rêves, que la lumière éclairci toujours votre chemin et que DIEU vous offre le PARADIS de votre choix,

Mon frère MAHMOUD SAMIR, son épouse LOUIZA, mon plus beau et adorable neveu RAYANE, ma petit princesse et Ange ma nièce MELLIINA, que la vie vous réserve que de belles surprises.

Ma sœur KAHINA, son époux FARES, sa belle famille LARBI CHRIF et BELBAL surtout Mlle SAÏDI A., TATA ZOÛRA, YASMINA et surtout mes adorables nièces HOUDA et MERJEM et mon neveu bien aimé YUCEF, que vos jours sois pleins de bonheur et réussite.

Mon petit frère gâté MOHAND, que la victoire et prospérité fassent ravager en toi.

A mon oncle RACHIDE ABCHICHE et sa famille, ma tante LOUIZA, ma tante OUARDIA que Dieu vous garde toujours à mes cotés et que votre future soit meilleur.

Ma princesse KICHI NASSIMA et toute sa famille magnifique qui m'ont accueillis et offert tendresse et amour, que le PARTAGE soit à jamais notre principe et que DIEU te garde à mes cotés pour que je puisse vivre belle vie.

Ma poupée et meilleure amie SIHEM et tout membre de sa chère famille bien aimée, que votre vie soit pleine d'AMOUR et de TENDRESSE.

Ma MERJEM ABDELAZIZE, HAFIDA FODIL PACHA, SABRINE BADIS, HOUDA OUCIF et leur magnifiques familles, que vos rêves et prières se réalisent et que notre amitié soit FOREVER.

A ABDELGHANI LACHI qui ma toujours soutenu et encouragé, que Dieu te réserve de belles et bonnes surprises dans ton avenir.

A toutes les personnes que je porte dans mon cœur et qui se reconnaîtront car elles en font autant.

ALDJIA.

REMERCEMENTS

Au terme de mon modeste travail effectué, je tien à remercier Mr. ABARKANE de m'avoir fait l'honneur de présider le jury avec tant de gentillesse, j'espère que vous trouverez ici ma profonde gratitude et respectueuse admiration.

Mes vifs remerciements s'adressent à Mme MEDBOUA pour avoir accepté d'examiner le travail. Veuillez agréer mes sentiments les plus respectueux.

Mes sincères remerciements vont à M. DAMOUNE qui m'a soutenu et encadré, pour tous les efforts et l'aide précieuse déployés dans l'élaboration de ce travail et qui m'a donné les moyens nécessaires pour actualiser mes connaissances et combler mes lacunes.

Je présente mes remerciements particuliers à mon premier co-promoteur M. REMINI H. et je tien à vous signaler qu'au cours de mon travail j'ai grandement bénéficié de votre enseignement et apprécié votre expérience et votre tempérament calme.

Par le biais de ce rapport, je voudrai vous exprimer mes sincères remerciements et mon profond respect. J'ai su apprécier votre dynamisme et votre curiosité scientifique qui seront pour moi une leçon pour l'avenir.

J'exprime ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon deuxième co-promoteur et collègue M. NOUËL Khiter Amine pour sa contribution hautement distinguée dans la réalisation de ce travail qui me restera à l'esprit, son sens d'appréciation scientifique, sa rigueur pour le travail bien fait, ses suggestions pertinentes dans la recherche et surtout sa disponibilité, ont permis à maintes reprises, de clarifier mes pensées. Je ne vous remercierai jamais assez pour vos différentes orientations.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des personnes qui ont participé, de près ou de loin, au bon déroulement de mon travail.

Merci.

Sommaire

Introduction.....	1
-------------------	---

Chapitre I : Revue bibliographique sur les boues

1. Définition des boues d'épuration.....	2
2. Classification et caractérisation des boues d'épuration.....	2
3. Composition des boues d'épuration.....	2
4. Nature de l'eau contenue dans la boue.....	3
5. Les procédés de traitement des eaux usées.....	3
5. 1. 1. Principe de l'épuration biologique.....	3
5. 1. 2. Epuration anaérobie.....	4
5. 1. 3. Epuration aérobie.....	4
6. La croissance des micro-organismes et l'épuration.....	4
6. 1. Cas de milieu non renouvelé.....	5
6. 2. Cas de milieu renouvelé.....	7
6. 3. Besoin en éléments nutritifs.....	8
7. Les cultures libres (Boues activées).....	8
7. 1. Ecologie des boues activées.....	8
8. La réutilisation des boues d'épuration en agriculture.....	11
8. 1. La richesse en nutriments et oligo-éléments.....	11
8. 2. Autres éléments.....	11
8. 3. L'élimination des boues.....	12
9. Facteurs affectant la quantité de boues appliquées aux terres agricoles.....	12
9. 1. L'interdiction d'utilisation des boues non traitées.....	12
10. Classification des boues vis-à-vis des germes pathogènes.....	13
10. 1. La classe A.....	13
10. 2. La class B.....	13
11. Les germes pathogènes des boues d'épuration.....	14
11. 1. Origine des germes pathogènes.....	14
11. 2. Les différentes vois d'exposition.....	15
11. 3. Types et charge de germes pathogènes des boues.....	15

12. Traitement des boues d'épuration.....	17
12. 1. Les différents types de traitement.....	17
13. La dose infectieuse minimale.....	18
14. Les nouvelles technologies environnementales de traitement.....	20
14. 1. Les micro-ondes.....	20
14. 2. Irradiation par ultrasons.....	20

Chapitre II : Matériels et Méthodes

1. Préparation de l'échantillon.....	21
1. 1. Prélèvements et transport de l'échantillon.....	21
1. 2. Caractéristiques physico-chimiques de la boue.....	21
2. Traitement le l'échantillon.....	22
2. 1. Procédé assisté par micro-ondes.....	22
2.2. Principe d'irradiation micro-ondes.....	22
2. 3. Procédé assisté par ultrasons.....	23
2. 3. 1. Principe d'irradiation par ultrasons.....	23
2. 4. Matériels de paillasse utilisés.....	24
2. 5. Le milieu de culture.....	25
2. 5. 1. Préparation du milieu de culture.....	25
3. Procédures expérimentales et analytiques.....	25
3. 1. Estimation de la charge microbienne initiale (la FAMT).....	25
3. 2. La préparation de l'échantillon pour le traitement assisté par micro-ondes.....	26
3. 3. Traitement assisté par micro-ondes.....	27
3. 4. La préparation des échantillons pour le bain à ultrasons (les 4 essais).....	28
3. 5. Traitement assisté par ultrasons (les 4 essais).....	29

Chapitre III : Résultats et Discussion

1. Estimation de la charge microbienne initiale avant traitement.....	33
2. Traitement assisté par micro-ondes.....	33
3. Traitement assisté par ultrasons.....	38

4. Comparaison entre traitement assisté par micro-ondes et traitement assisté par ultrasons.....	46
Conclusion et perspectives.....	48
Références bibliographiques.	
Annexes.	

Abréviations

Al :	Aluminium
CO₂ :	Dioxyde de carbone
DBO :	Demande biochimique (biologique) en oxygène
DCO :	Demande chimique en oxygène
DIM :	Dose Infectieuse Minimale
E. R. U :	Eaux Résiduaires Urbaines
FAMT :	Flore Aérobie Mésophile Totale
Fe :	Fer
g:	Gramme
GHz :	Giga Hertz
GN:	Gélose Nutritive
ha:	hectare
K:	Kelvin
Kg:	Kilogramme
MHz :	Méga Hertz
MO :	Matière organique
MPa :	Méga Pic sel
MS :	Matière sèche
pH :	potentiel d'Hydrogène
µg :	Microgramme
MST :	Matière Solide Totale
MVS :	Matière Volatile Sèche
N :	Azote
ONA :	Office Nationale d'Assainissement
% :	Pourcentage
P :	Phosphore
PFU :	Unité Formant Plaque
SM :	Solution Mère
SNV-ST :	Science de la Nature et de la Vie-Science de la Terre
STEP :	Station d'Épuration des Eaux Usées
UFC :	Unité Formant Colonie

Liste des figures

Figure 1. Evolution de la vitesse spécifique de croissance des micro-organismes.....	5
Figure 2. Schéma de l'épuration, la croissance et l'oxydation de la boue.....	7
Figure 3. Les différentes voies d'exposition aux agents pathogènes.....	15
Figure 4. Lit de séchage des boues d'épuration dans la STEP de Bouira.....	21
Figure 5. Le four micro-ondes domestique « Starlight » utilisé pour le traitement des boues d'épuration.....	22
Figure 6. Le bain à ultrasons du laboratoire utilisé dans le traitement des boues d'épuration.....	23
Figure 7. La solution mère à de boue «Dilution 10^{-1} ».....	25
Figure 8. Les dilutions décimales préparées à partir de la solution mère.....	26
Figure 9. L'échantillon de boue pour micro-ondes	27
Figure 10. L'échantillon du 1 ^{er} essai.....	28
Figure 11. Echantillon du 2 ^{eme} essai.....	28
Figure 12. Echantillon du 1 ^{er} essai dans le bain à ultrasons.....	29
Figure 13. L'échantillon du 2 ^{eme} essai dans le bain à ultrason	30
Figure 14. L'échantillon du 3 ^{eme} essai dans le bain à ultrason.....	31
Figure 15. Nombre de FAMT obtenu dans la dilution 10^{-5} (20 UFC/10µl).....	33
Figure 16. Taux d'élimination de la FAMT dans le traitement par micro-ondes.....	34
Figure 17. La représentation logarithmique de réduction de la FAMT par micro-ondes.....	35
Figure 18. Les différents profiles de charge de la FAMT après traitement par micro-ondes..	36
Figure 19. Profile de la charge de la FAMT sur les boites de Pétri.....	39
Figure 20. Profile de la charge de la FAMT sur les boites de Pétri.....	40
Figure 21. Charge de la FAMT du 3 ^{eme} essai après exposition aux ultrasons.....	40
Figure 22. Charge de la FAMT des 1 ^{eres} quatre dilutions du 4 ^{eme} essai.....	41
Figure 23. Charge de la FAMT à la dilution 10^{-5}	41
Figure 24. Culture négative sur les boites de la dilution 10^{-6}	42
Figure 25. Charge de la FAMT à la dilution 10^{-4} après traitement par bain à ultrasons.....	42
Figure 26. Charge de la FAMT à la dilution 10^{-5} après traitement par bain à ultrasons.....	43
Figure 27. Taux de réduction de la FAMT dans le traitement par ultrasons des dilutions 10^{-4} et 10^{-5}	43

Figure 28. Taux de réduction de la FAMT dans le traitement par ultrasons des dilutions 10^{-4} et 10^{-5} par rapport à la SM.....	44
Figure 29. La représentation logarithmique de la réduction de la FAMT des dilutions 10^{-4} et 10^{-5} par ultrasons. (Le temps $t_0 = 0$ correspond à la charge initiale de la FAMT à 10^{-4} : $2,0 \times 10^5$ UFC/ mL, à 10^{-5} : $2,0 \times 10^4$ UFC/mL).....	44
Figure 30. La représentation logarithmique de la réduction de la FAMT aux dilutions 10^{-4} et 10^{-5} par rapport à la charge initiale. (Le temps $t_0 = 0$ correspond au log de la charge initiale de la FAMT de la SM : $2,0 \times 10^8$ UFC/mL).....	45

Liste des figures annexées

Figure 1. Représentation schématique des processus de traitement des eaux usées montrant la production de boue.

Figure 2. Epuration biologique aérobie.

Figure.3 mécanisme de la digestion anaérobie des boues.

Figure 4. Mécanisme de l'oxydation biologique aérobie.

Figure 5. Evolution de la biomasse en fonction du temps en coordonnées logarithmique. (Cas d'une souche pure et un seul substrat : le glucose).

Figure 6. Schéma simplifié d'un système d'épuration par boue activée.

Figure 7. Les bactéries de boue activée observées au microscope optique à contraste de phase (x 200).

Figure 8. Protozoaires ciliés – bouquet de Périptriches (*Vorticella sp.*) observés au microscope optique à contraste de phase (x 200).

Figure 9. Vers métazoaire - Rotifère (*Lecane sp.*) observés au microscope optique à contraste de phase (x 200).

Figure 10. Variation de la couleur de la boue après traitement.

Liste des tableaux

Tableau I. Teneur en éléments nutritifs des boues d'épuration.....	8
Tableau II. Population des boues activées.....	9
Tableau III. Normes microbiologiques de fin de produit pour les boues de classe A et de classe B.....	13
Tableau IV. Les micro-organismes pathogènes susceptibles d'être présents dans les boues d'épuration.....	16
Tableau V. Nombre typique de micro-organismes des boues d'épuration avant et après traitement.....	17
Tableau VI. Exemples de processus efficaces de traitement des boues.....	19
Tableau VII. Réduction de la FAMT après traitement assisté par micro-ondes.....	34
Tableau VIII. La charge de la FAMT après exposition au bain à ultrasons pendant 1, 3, 5, 7, 10 minutes.....	38
Tableau IX. La charge de la FAMT après exposition au bain à ultrasons pendant 20, 30, 40, 50, 60, 80 minutes.....	39
Tableau X. Charge de la FAMT après 20 et 30 minutes d'exposition au bain à ultrasons.....	40
Tableau XI. Charge de la FAMT obtenue à la dilution 10^{-5}	41
Tableau XII. Charge de la FAMT aux dilutions 10^{-4} et 10^{-5}	42

Liste des tableaux annexés

Tableau I. Classification de boue de traitement biologique.	
Tableau II. Composition chimique et propriétés de la boue non traitée et de la boue digérée.	
Tableau III. Valeurs limites des concentrations en métaux lourds dans les sols recevant des boues (en mg/kg de terre sèche) et dans les boues destinées à l'utilisation en agriculture (en mg/kg de matière sèche).	
Tableau IV. Résumé de la réduction des agents pathogènes lors du traitement des boues.	
Tableau V. Dose infectieuse minimale (MID) pour une gamme de pathogènes gastro-intestinaux.	
Tableau VI. Taux de réduction de la FAMT après traitement assisté par micro-ondes en %.	
Tableau VII. Réduction logarithmique de la FAMT après traitement assisté par micro-ondes.	

Tableau VIII. Taux de réduction de charge de la FAMT des dilutions 10^{-4} et 10^{-5} (%).

Tableau IX. Taux de réduction de charge de la FAMT des dilutions 10^{-4} et 10^{-5} par rapport à la charge de la FAMT initiale de la SM.

Tableau X. La réduction logarithmique de charge de la FAMT des dilutions 10^{-4} et 10^{-5} .

Introduction

Introduction

L'évolution accrue de l'industrialisation conjuguée à la croissance étendue des zones urbaines entraînent de graves problèmes environnementaux [1]. Parmi ces aspects la production excessive de boues résiduelles des différents traitements d'eaux usées engendrés par les populations [2]. L'un des résidus générés au cours de ces processus de traitement on trouve les boues [3, 4], potentiellement dangereuses, riches en micro-organismes pathogènes et polluants toxiques [5], causent de graves incidences sur la santé et l'environnement [6].

La neutralisation (stabilisation et détoxification) est très complexe [4], les processus d'élimination des boues couvrent 60% des charges d'exploitation des stations d'épuration [5]. Ces traitements nuisent également à l'environnement (40% des émissions totales de gaz à effet de serre dans les infrastructures d'épuration sont générés par le traitement des boues) [7, 8]

Auparavant, l'élimination des boues excessives a été entreprise par des méthodes traditionnelles, y compris l'incinération, le remplissage des terres ou le déversement dans les milieux récepteurs tel que les océans [13]. En revanche, actuellement plusieurs techniques ont été développées pour le traitement et la minimisation des volumes de boues. Il s'agit de différentes technologies ; physiques, chimiques et biologiques, ou une combinaison des trois. [10]. L'augmentation des préoccupations environnementale et les strictes lois y afférentes ont conduit au remplacement de ces techniques par des méthodes d'élimination biologiques, à savoir le compostage, la digestion aérobie et anaérobie...etc, ces processus biologiques sont maintenant largement acceptés [1, 10], en outre diverses nouvelles technologies écologiques tel que les micro-ondes, les ultrasons, l'ultra-violet, l'ozone sont appliquées à l'heure actuelle pour la destruction microbienne dans différents domaines, à l'égard du domaine médicale, scientifique, industriel et la désinfection des instruments [11].

L'objectif de cette étude est :

- La valorisation des boues à des fins agricoles sans risques biologiques.
- Application des techniques ondulaires (micro-ondes et ultrasons) écologiques, rapides et efficaces pour la désinfection de ces boues.
- Comparaison de l'efficacité des deux techniques étudiées

Ces technologies peuvent constituer au future, une alternative propre pour le traitement des boues et la fabrication depuis ces dernières d'un engrais biologique de haute valeur à zéro risque.

CHAPITRE I

Synthèse

bibliographique

1. Définition des boues d'épuration

La production de boues d'épuration est une composante incontournable de l'épuration des eaux usées et constitue l'un des indicateurs de la qualité du traitement réalisé sur les stations [14].

Les éléments polluants et leurs produits de transformation retirés de la phase liquide au cours de tout traitement d'eau, quelle qu'en soit la nature, se trouvent finalement rassemblés dans la très grande majorité des cas dans des suspensions plus ou moins concentrées dénommées "boues" [12, 13].

2. Classification et caractérisation des boues d'épuration

Le caractère commun de toutes les boues est les volumes liquides qu'elles contiennent en grandes quantités, de valeur généralement faible [12]. Certaines d'entre elles sont chimiquement inertes, mais celles qui proviennent de traitements biologiques sont souvent fermentescibles et nauséabondes [12].

1)- Les boues résultant du traitement biologique des eaux résiduaires urbaines, et dont la teneur en matières volatiles peut atteindre jusqu'à 90% de la totalité des matières sèches ; elles font partie de la classe la plus répandue nommée : la **classe organique hydrophile** [12]. Les difficultés de déshydratation de ces boues sont dues à la présence d'une fraction importante de colloïdes hydrophiles [12]. 2)- Une fraction de boue biologique peut aussi être en finalité après un traitement par boues activées dans la **classe : huileuse**. Caractérisée par la présence dans les effluents de quantités même faibles d'huiles ou de graisses minérales (ou animales) [12] (**Annexe I**).

3. Composition des boues d'épuration

Les boues obtenues des différents traitements des eaux usées sont sous formes d'un liquide contenant de 0,5 à 6% de matière solide sèche [14], avec pH compris entre 7 et 8,5 [15]. Elles sont un mélange complexe d'eau ; de micro-organismes pathogènes (virus, bactéries, helminthes, protozoaires) ; composés organiques macromoléculaires non digérés (protéines, lipides et polysaccharides) ; composés inorganiques ; cendres et minéraux ; composés exogènes (les radio-isotopes : les antibiotiques ; les additifs alimentaires et les métaux lourds) [16]. La composition typique et détaillée des boues crues est indiquée dans l'**Annexe II**.

4. La nature de l'eau contenue dans la boue.

L'eau contenue dans une boue est la somme :

- d'une eau libre en plus grande partie [17], assez facilement éliminable [12].
- d'une eau liée comprenant: l'eau capillaire, l'eau d'hydratation colloïdale, l'eau cellulaire et chimiquement liée [12].

La proportion d'eau libre et d'eau liée sont donc déterminante dans l'aptitude d'une boue à la déshydratation [17, 12].

5. Les procédés de traitement des eaux usées

Divers niveaux de traitement des eaux usées sont utilisés selon le degré d'élimination de la pollution et les procédés mis en œuvre. Ils peuvent être classés en trois catégories : les traitements primaires, secondaires et tertiaires [18]. Dans chaque stade de traitement des eaux usées il y a production de boue plus au moins importante [14] (**Annexe III**).

Les procédés biologiques sont en nombre de quatre : aérobie, anoxique, anaérobie et une combinaison de l'aérobie / anoxique ou anaérobie [26] et peuvent être regroupés en deux classes : naturels et artificiels [24].

- les boues activées ;
- les lits bactériens ;
- le lagunage ;
- la filtration par le sol et les plantes (filtre planté) ;
- filtration/percolation [20].

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés aux traitements biologiques qui sont les procédés les plus utilisés [13].

5. 1. Les traitements secondaires (traitement biologique)

5. 1. 1. Principe de l'épuration biologique

En raison de son efficacité, la voie biologique constitue le mode le plus utilisé d'épuration secondaire des eaux résiduaires urbaines et de certaines eaux industrielles [19]. Son principe est de provoquer en présence ou en absence d'oxygène une prolifération plus ou moins contrôlée de micro-organismes capables de dégrader les matières organiques apportées par l'effluent. Il s'agit en fait d'un véritable transfert d'une forme non accessible de la pollution

(matières colloïdales et dissoutes) en une forme manipulable (suspension de microorganismes) [17, 20].

Les micro-organismes responsables de l'épuration s'agglomèrent sous forme de floccs et se développent en utilisant la pollution comme substrat nécessaire à la production d'énergie vitale et à la synthèse de nouvelles cellules vivantes [21] (Annexe III). La partie des éléments polluants qui n'est pas dégradée biologiquement peut être adsorbée et incorporée aux floccs de boues [21].

De nombreux micro-organismes ayant différentes vitesses de croissance, tels que les bactéries, les algues, les champignons et les protozoaires sont associés à ce processus de dégradation [21]. Cependant, les bactéries restent les micro-organismes les plus impliqués dans ce processus (environ 95 % des micro-organismes présents dans une boue activée) [18].

L'épuration biologique peut s'effectuer par voie aérobie ou anaérobie [20], en fonction des processus biochimiques qui nécessitent la présence et l'utilisation de catalyseurs très spécifiques appelés « les enzymes » intervenant dans les deux processus ; aérobies ou anaérobies [21].

5. 1. 2. Epuration anaérobie

La conversion anaérobie des matières organiques solides en sous-produits bénins est très complexe [21]. Ces traitements réservés, aux cas de pollution fortement concentrée pour laquelle l'apport d'oxygène (O_2) en quantité suffisante pose un problème, font appel à des bactéries anaérobiques telle que les méthanogènes qui n'utilisent pas l'oxygène et qui conduisent à la formation du méthane à partir de la matière organique et à un degré moindre de CO_2 [20] (Annexe IV).

5. 1. 3. Epuration aérobie

Les micro-organismes utilisés exigent un apport permanent d'oxygène [20]. Au cours de la croissance aérobie, l'énergie prélevée de la transformation du carbone organique, devient une énergie disponible pour la synthèse [21] (Annexe IV).

6. La croissance des micro-organismes et l'épuration

Regroupant une très grande diversité taxonomique, les micro-organismes possèdent des spécificités propres et, corrélativement des capacités distinctes pour l'épuration des eaux.

6. 1. Cas de milieu non renouvelé

Placés dans des conditions favorables (milieu non renouvelé), les organismes unicellulaires (bactéries et levures) croissent (augmentation de volume) puis se divisent (augmentation du nombre d'individus) [22]. Ce type de croissance cellulaire de courte durée est appelé croissance exponentielle car le nombre de cellules croit d'un facteur constant à un intervalles réguliers [22].

La durée totale d'un cycle est appelée temps de dédoublement (t_d) ou temps de génération (t_g) [22]. Ainsi que, la croissance est caractérisée par des paramètres cinétiques, vitesse de croissance (d_X / d_t), vitesse spécifique de croissance ($\mu = 1/X d_X/d_t$), avec : X peut être le nombre d'individus (N), ou La biomasse (X) [22].

Plusieurs phases successives sont observées durant la croissance des micro-organismes (**Figure 1**):

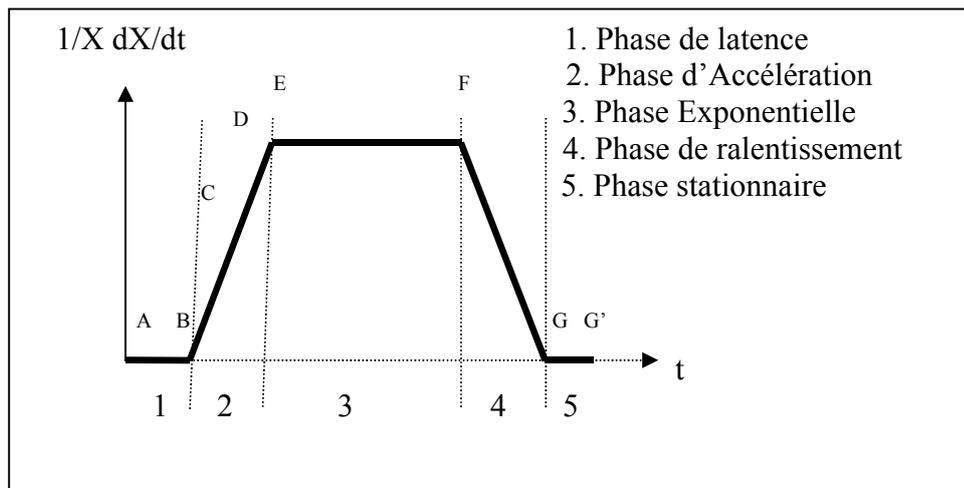


Figure 1. Evolution de la vitesse spécifique de croissance des micro-organismes. (La phase de déclin n'est pas représentée) [22].

6. 1. 1. Phase d'adaptation

Cette période "AB" est dite phase d'adaptation ou de latence ; elle sépare le moment d'inoculation du moment où la croissance devient perceptible. Cette durée d'adaptation dépend [22] :

- du type de micro-organismes ;
- du nombre de germes inoculés ;
- de l'état physiologique de ces germes ;

- de la température du milieu de culture ;
- des différences de compositions et concentrations entre l'ancien et le nouveau milieu de culture.

Les bactéries synthétisent des enzymes nécessaires à la métabolisation du substrat durant cette phase [23].

6. 1. 2. Phase d'accélération

Au cours de cette phase "BD" la multiplication cellulaire démarre avec une vitesse spécifique de croissance de plus en plus grande [22].

6. 1. 3. Phase exponentielle

Cette phase "EF" correspond à une multiplication se faisant à vitesse spécifique μ constante et à vitesse de croissance faible au début puis subit une forte accélération et devient rapidement importante [22] donnée par leur temps de génération et leur affinité pour le substrat non limitant [23].

En outre, le phénomène de respiration endogène étant négligeable, les besoins en oxygène des cellules durant cette phase sont assez variables selon les espèces [21].

Donc, La croissance exponentielle est de type « explosif » et aboutit à une augmentation très importante du nombre des micro-organismes [22].

6. 1. 4. Phase de ralentissement

Cette phase "FG" correspond à une perturbation du milieu de culture par la croissance exponentielle des micro-organismes. Elle est dû à une diminution de la concentration du substrat et de la vitesse de croissance [21] et par un épuisement du milieu nutritif ou par l'accumulation des produits inhibiteurs provenant du métabolisme bactérien [23]. Le taux néperien de croissance passe de sa valeur maximale à zéro [22] (**Annexe V**).

6. 1. 5. Phase stationnaire

C'est la période de stabilisation "GG'" (**Annexe V**) au cours de laquelle la croissance cesse lorsqu'un nutriment essentiel est épuisé (plus de substrat) [22].

Le taux de croissance dans cette phase stationnaire est alors nul [22].

6. 1. 6. Phase de déclin

La stabilisation de la culture conduit rapidement au décès des micro-organismes " G' " (**Annexe V**) et s'accompagne d'une lyse des cellules libérant des produits divers (enzymes, toxines...) [22]. Durant cette période, les besoins en oxygène sont limités aux besoins respiratoires d'entretien des cellules; c'est une phase de décroissance dite phase de respiration endogène [22].

6. 2. Cas de milieu renouvelé

Dans le cas d'une eau usée, le phénomène de croissance bactérienne est plus complexe car :

- ✓ Le substrat est complexe ;
- ✓ L'ensemencement de plusieurs souches ;
- ✓ L'épuration est réalisée dans un aérateur en continu (débit d'eau usée mis en contact avec la population microbienne) [21].

Les principaux paramètres de contrôle (DBO, concentration de la biomasse et concentration en azote) évoluent différemment durant les différentes phases de la croissance bactérienne [21] ces phases se distingues suivant la masse de micro-organismes et le temps de contact (**Figure 2**) [21].

Durant la phase de croissance exponentielle ; le plus important de la DBO est éliminée alors que la teneur en biomasse et en azote augmente, l'élimination de la DBO fléchit durant la phase de ralentissement et se stabilise à la valeur DBO résiduelle au cours de la phase de respiration endogène, bien que les teneurs en azote et en biomasse augmentent dans la phase de ralentissement pour décroître après durant la phase de la respiration endogène (**Figure 2**) [21].

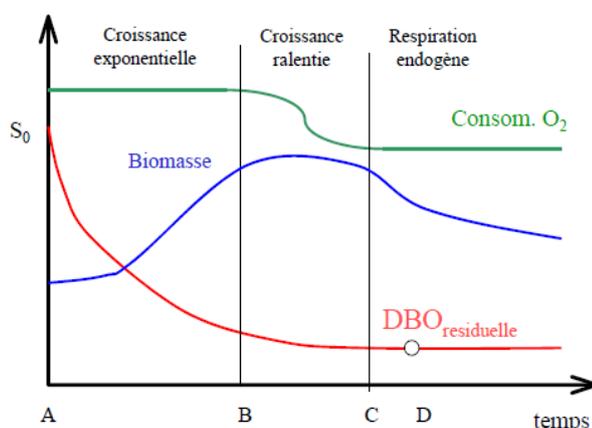


Figure 2. Schéma de l'épuration, la croissance et l'oxydation de la boue [21].

6. 3. Besoin en éléments nutritifs

En plus du carbone (le substrat), la croissance de la biomasse nécessite de l'oxygène (si aérobie), de l'azote et du phosphore (pour un % de matière sèche dans la biomasse : 14% azote - 3% phosphore et quelques métaux en trace) [21].

Donc un apport minimum d'azote et de phosphore doit être assuré dans le milieu [21] (Tableau I).

Tableau I. Teneur en éléments nutritifs des boues d'épuration (% de poids sec) [14].

Constituants	Gamme	Idéale
Azote	< 0,1-17,6	3,0
Phosphore	< 0,1-14,3	1,5
Soufre	0,6-1,5	1,0
Potassium	0,02-2,6	0,3

Pour un développement correct des micro-organismes épurateurs, les rapports suivants sont acceptés:

- ✓ DCO/N/P = 150/5/1.
- ✓ DBO/N/P = 100/5/1 [21].

7. Les cultures libres (Boues activées)

Le processus de boues activées est une méthode efficace pour le traitement des eaux usées [13, 25] et le plus répandu, où l'épuration est effectuée par des micro-organismes intimement mélangés à l'eau à traiter. En présence d'oxygène, cette microfaune dégrade la pollution organique pour en tirer l'énergie nécessaire à sa survie et à son développement. En fait, cette technique reproduit de manière intensive, le processus d'autoépuration des cours d'eau [12, 26] (Annexe V).

7. 1. Ecologie des boues activées

7. 1. 1. Structure de la boue activée

Les boues sont un micro-écosystème très complexe, essentiellement composées de bactéries vivantes et mortes, aérobies facultatives de petite taille allant du micromètre au millimètre [23], libres et agglomérées associée à une microfaune détériore et prédatrice des bactéries et des protozoaires [17, 23] (Tableau II). L'insuffisance de nourriture provoque une **agglomération des bactéries** ce qui forme les **flocs bactériens** [17].

La présence ou l'absence d'oxygène détermine trois types de milieux [27, 24] :

- **Aérobic** : milieu aéré, présence d'oxygène, le plus souvent par aération forcée ;
- **Anoxie** : pas d'aération, absence d'oxygène libre, les nitrates constituent la source d'oxygène (oxygène liée) pour certaines bactéries ;
- **Anaérobic** : pas d'oxygène dissous, ni de nitrates.

Tableau II. Populations des boues activées [23].

Charge microbienne/ litre de boues	Espèces
1 à $5 \cdot 10^5$	Métazoaires (rotifères, nématodes)
10^7	Protozoaires (flagellés, ciliés)
10^{12}	Bactéries (floculés, filamenteuses)

Les champignons et les virus sont également trouvés, mais contribuent probablement peu au traitement des eaux usées [27].

7. 1. 2. Les bactéries dans la boue activée

Elles peuvent être de type :

- Unicellulaire de forme sphérique ou cylindrique (0,5 et 5 μm) [23].
- Pluricellulaire dont la taille est souvent comprise entre 10 et 500 μm [23].
- Hétérotrophes : utilisant la matière organique comme source de carbone et comme source d'énergie pour le métabolisme [29].
- Autotrophes : utilisant le carbone des bicarbonates et du CO_2 comme source de carbone [29].

Dans les boues on trouve plusieurs bactéries libres ; sont des micro-organismes mobiles, apportés surtout par les matières fécales et les eaux de ruissellement [24]. Le manque de substrat provoque la sécrétion d'un gel ou exo-polymère, ce dernier à trois effets : L'agglomération des bactéries sous forme de floes, l'adsorption de la pollution dissoute, ainsi qu'un rôle protecteur vis-à-vis des toxiques [17]. On rencontre également les bactéries filamenteuses qui couvrent une grande diversité de genres bactériens [23] (**Annexe VI**).

L'augmentation de la population bactérienne formant des floes de quelques millimètres (Constitué de bactéries, de matières organiques et minérales et maintenu par l'exo-polymère) conduit à une diminution de la concentration en pollution [17].

a. La pollution carbonée

L'élimination de la pollution carbonée est réalisée par des bactéries hétérotrophes [29, 20], la matière organique est transformée en dioxyde de carbone (CO₂), en eau (H₂O), métabolites et en nouvelles bactéries épuratrices (les boues en excès) [24].

b. La pollution azotée

En absence d'apport en oxygène dissous, le nitrate prend le rôle d'accepteur électronique terminal, c'est une respiration anaérobie appelée la dénitrification [29, 24] réalisé par certaines bactéries chimio-organotrophes : *Alcaligenes*, *Achromobacter*, *Micrococcus* et *Pseudomonas* [27].

L'ammoniac est éliminé par les *Nitrosomonas* [27], *Nitrosococcus* et *Nitrospira* [24] (bactéries nitrifiantes) en l'oxydant en nitrite, suivi par l'oxydation de ce nitrite en nitrate par *Nitrobacter* avec production de biomasse [27, 24].

Les *Nitrosomonas* et les *Nitrobacter* sont des genres autotrophes qui réduisent le dioxyde de carbone (sous forme de bicarbonate ou de carbonate) comme source de carbone cellulaire [27].

c. La pollution phosphatée

L'élimination du phosphore est assurée par le genre *Acinetobacter* spécialement par l'espèce *Acinetobacter calcoaceticus* qui assimile de grandes quantités d'**orthophosphates**, une forme minérale dissoute de phosphates, L'alternance des phases aérobie et anaérobie, entraîne un stress qui conduit à une sur-assimilation de phosphore et une diminution globale des phosphates dans l'eau [30, 27].

Le phosphore accumulé comme réserve dans les cellules bactériennes est extrait avec la biomasse des boues en excès [30, 27].

7. 1. 3. Autres microorganismes ou faune colonisatrice du floc

Une boue activée contient également une microfaune prédatrice, constituée de protozoaires et de métazoaires, qui participent également à l'épuration des eaux [23].

a. Les protozoaires

Ce sont des organismes eucaryotes, unicellulaires, mobiles et de taille pouvant aller de 1 à 500 μm . Ils se nourrissent essentiellement de bactéries et de molécules organiques dissoutes [28, 23], cette microfaune est très sensible aux modifications environnementales : Climat, température, turbidité [31], substrats, oxygène dissous, toxines [23].

Il existe un grand nombre d'espèces de protozoaires fixés ou mobiles au niveau des floes et jouent le rôle de bactériophages et permettent de maintenir des populations bactériennes jeunes pouvant assimiler plus facilement la matière organique [28, 31] (Annexe VI), ce sont en général des ciliés (*Vorticelles*, *Epistylis*...) [23], la sous-classe *Peritrichia* est la plus importante [31].

b. Les métazoaires

Les métazoaires sont des organismes pluricellulaires dont la taille peut aller de 100 μm à 1 mm [24] (Annexe VI), leur rôle de prédateurs bactériens permet de contribuer au renouvellement de la biomasse épuratrice [31], deux familles sont essentielles de cette microfaune : les nématodes et les rotifères [23].

8. La réutilisation des boues d'épuration en agriculture

8. 1. La richesse en nutriments et oligo-éléments

Les boues d'épuration contiennent des quantités précieuses de nutriments (azote et phosphore) et des oligo-éléments (Tableau I) [14, 16], c'est pour cette raison, qu'elles ont été historiquement appliquées aux terres agricoles dans le cadre d'un plan intégré de gestion agricole [14].

8. 2. Autres éléments

Les boues peuvent aussi contenir des résidus de nombreux produits chimiques, produits synthétiques complexes, hormones, antibiotiques et additifs alimentaires, et qui présentent des risques environnementaux en raison de leur faible biodégradabilité [16].

8. 3. L'élimination des boues

L'élimination des boues d'épuration doit être soumise à des contrôles stricts visant à protéger la qualité des sols [14] tout en favorisant leur utilisation dans l'agriculture [14, 16]. Pour cette raison, des limites strictes sont fixées sur les quantités d'éléments potentiellement toxiques autorisés dans les boues qui peuvent être utilisés dans l'agriculture.

Les taux d'application sont contrôlés pour minimiser l'accumulation dans le sol des métaux toxiques [14] (Annexe VII). Cependant, en raison des faibles niveaux de métaux dans les boues, les taux d'application sont régis dans la pratique par des taux maximaux d'application d'azote (250 ou 500 kg / ha) et d'équilibrer l'addition de phosphore avec la prise de culture [14]. Tandis que, les boues ne doivent pas être épandues sur des sols dont le pH conduit à une forte mobilité des éléments-traces, donc le pH du sol doit être supérieur à 06 [32]. Additivement au risques chimiques, les boues d'épuration non traitées sont dangereuses car riches en micro-organismes pathogènes (virus, bactéries, helminthes et protozoaires) [33, 16, 34].

9. Facteurs affectant la quantité de boues appliquées aux terres agricoles

Les facteurs affectant la quantité de boues appliquées aux terres agricoles comprennent :

La topographie, l'utilisation des terres, les conditions climatiques et la disponibilité d'autres moyens d'élimination [14].

9. 1. L'interdiction d'utilisation des boues non traitées

L'utilisation des boues non traitées est interdite (Aux royaumes unies-Angleterre) sur les:

- Herbages ou des cultures fourragères si la prairie est au pâturage ou les cultures fourragères à récolter avant un certain délai, en tenant compte notamment de la situation géographique et climatique, ne peut en aucun cas être inférieur à 3 semaines:
- Sol dans lequel les fruits et légumes se développent, à l'exception des arbres fruitiers.

- Terre destinée à la culture de fruits et légumes qui sont normalement en contact direct avec le sol et normalement mangées cru, pour une période de 10 mois précédant la récolte des cultures et pendant la récolte elle-même [14].

Seules les boues traitées peuvent être appliquées sur des terres de toute nature alors que les boues non traitées sont utilisées sauf dans le cas où elles sont injectées ou travaillées dans le sol [14].

10. Classification des boues vis-à-vis des germes pathogènes

Les boues sont classées en Classe A et Classe B en fonction du niveau de traitement destiné à réduire les agents pathogènes [14].

10. 1. La classe A

Les boues de la Classe A [13] doivent être traitées par un processus visant à réduire davantage les pathogènes à ceux normalement présents dans le sol et soient conformes aux normes microbiologiques du produit final (**Tableau III**). Elles peuvent être appliquées sans restriction à un large éventail de types de terres, y compris ceux destinés à une utilisation agricole ou horticole [14].

Tableau III. Normes microbiologiques de fin de produit pour les boues de classe A et de classe B [14].

Standard	Classe A	Classe B
<i>Coliformes fécaux</i> /g MS	< 1000	< 2.10 ⁶
<i>Salmonella</i> 4/g MS	< 3	
<i>Enterovirus</i> PFU 4/g MS	< 1	
<i>Parasites ova</i> 4/g MS	< 1	

10. 2. La classe B

Les boues de la Classe B doivent être traitées par un procédé permettant la réduction de manière significative les agents pathogènes. Avec des restrictions, ces boues peuvent être appliquées à des terres agricoles et doivent satisfaire aux normes microbiologiques du produit final (**Tableau IV**) [14].

Les restrictions à la demande sont les suivantes [14] :

- Pas de pâturage ou de récolte de fourrages avant 30 jours (d'application)
- Aucune récolte des cultures au-dessus du sol dans les 14 mois.
- Aucune récolte des cultures sous terre pendant 20 mois si la boue reste sur le sol pendant 4 mois ou plus; 38 mois si la boue reste sur le sol pendant moins de 4 mois.
- Aucune récolte de gazon dans les 12 mois suivants.
- Aucun accès public dans les 12 mois suivants (parcs, terrains de jeu, etc.)

10. 2. 1. Autres exigences

Des exigences plus rigoureuses s'appliquent lorsque les boues sont appliquées aux cultures de légumes consommées crues et qu'au moins 12 mois soient écoulés entre l'application des boues et la récolte de ces légumes. Lorsque la récolte est une salade consommée crue, l'intervalle de récolte doit être d'au moins 30 mois, lorsque des boues traitées et améliorées sont utilisées, un intervalle de récolte de 10 mois s'applique [14].

11. Les germes pathogènes des boues d'épuration

Les agents pathogènes sont des microorganismes capables de provoquer des maladies dans les espèces hôtes (Homme, animaux) [35] ou plantes [14].

Tous les principaux groupes de microorganismes contiennent des espèces pathogènes, y compris les virus (par exemple le virus de l'hépatite) [36], les bactéries (par exemple les salmonelles) [37], les champignons (par exemple *Aspergillus*) [35], les protozoaires (par exemple *Cryptosporidium*) et les helminthes (par exemple *Taenia*) [14] (**Tableau 4**).

11. 1. Origine des germes pathogènes

Additivement aux excréments urbains, hospitaliers des humains, animaux malades et porteurs sains, les sources industrielles d'agents pathogènes comprennent les usines de traitement de la viande, les abattoirs et les installations d'élevage [14], c'est des agents zoonotiques, c'est-à-dire directement transmissibles à l'homme par les animaux. Des exemples d'infections zoonotiques comprennent la salmonellose et la cryptosporidiose, ceci est un

facteur particulièrement important lorsque l'on considère les risques pour la santé humaine résultant de l'utilisation des boues dans l'agriculture [14].

11. 2. Les différentes voies d'exposition

Un certain nombre de voies d'exposition par lesquelles les denrées alimentaires deviennent contaminées par les agents pathogènes des boues d'épuration non traités peuvent être envisagées [14].

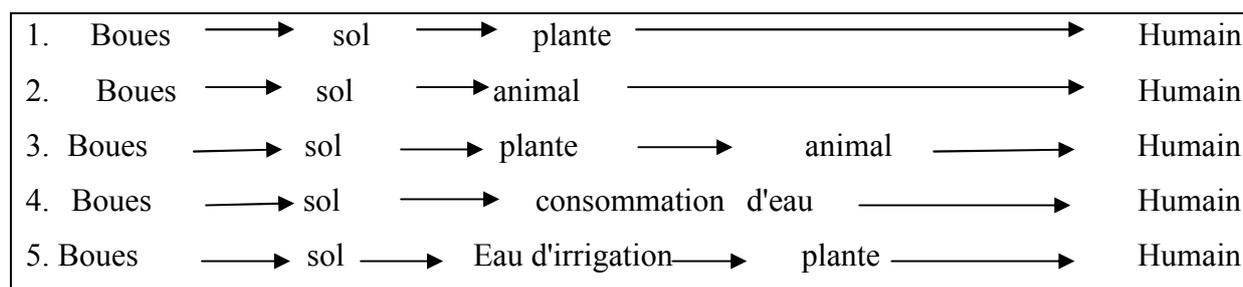


Figure 3. Les différentes voies d'exposition aux agents pathogènes [14].

D'autres voies d'exposition, qui n'impliquent pas la chaîne alimentaire, peuvent être identifiées, ceux-ci incluent le contact direct avec le sol traité par des boues ou le contact indirect probablement le plus élevé chez les enfants via les animaux de compagnie [14].

11. 3. Types et charge de germes pathogènes des boues

Les agents pathogènes varient d'une région à l'autre en fonction de la nature et de la prévalence de la maladie intestinale infectieuse endémique dans la population indigène [14].

Dans le traitement des Eaux Résiduaires Urbaines (E.R.U) les boues fraîches concentrent 90% des germes pathogènes et contiennent des [12] :

- entérobactéries 10^7 à 10^{10} par ml
- salmonelles 10 à 10^7 par ml
- œufs de parasites 10 à 10^7 par ml ainsi que des amibes et des virus.

Les parasites intestinaux, en particulier les Ascaris, constituent un fardeau majeur de la maladie dans le monde. Ces parasites forment des kystes particulièrement robustes et résistants aux conditions environnementales [14] (**Tableau IV**).

Toute évaluation des risques pour la santé associés à l'utilisation bénéfique des boues d'épuration dans l'agriculture doit tenir compte du témoignage de présence de ces deux agents pathogènes : *l'Escherichia coli* et le *Cryptosporidium* produisant des toxines de shiga reconnus comme des causes importantes de la maladie infectieuse intestinale chez l'homme [38, 14].

Tableau IV. Les micro-organismes pathogènes susceptibles d'être présents dans les boues d'épuration [14].

Bactéries	Virus	Protozoaires	Levures
<i>Salmonella</i>	<i>Hépatite A</i>	<i>Cryptosporidium</i>	<i>Candida</i>
<i>Shigella</i>	<i>Entérovirus</i>	<i>Entamoeba</i>	<i>Cryptococcus</i>
<i>Yersinia</i>	<i>Poliovirus</i>	<i>Giardia</i>	<i>Trichosporon</i>
<i>Escherichia</i>	<i>Virus coxsackie</i>	<i>Balantidium</i>	
<i>Pseudomonas</i>	<i>Echovirus</i>	<i>Toxoplasma</i>	Fungi
<i>Clostridium</i>	<i>Rotavirus</i>	<i>Sarcocystis</i>	<i>Aspergillus</i>
<i>Bacillus</i>	<i>Adenovirus</i>	<i>Cestodes</i>	<i>Phialophora</i>
<i>Listeria</i>	<i>Réovirus</i>	<i>Taenia</i>	<i>Geotrichum</i>
<i>Vibrio</i>	<i>Astrovirus</i>	<i>Diphyllobothrium</i>	<i>Trichophyton</i>
<i>Mycobacterium</i>	<i>Calicivirus</i>	<i>Echinococcus</i>	<i>Epidermophyton</i>
<i>Leptospira</i>	<i>Coronavirus</i>	Nematodes	
<i>Campylobacter</i>	<i>Norovirus</i> (virus de	<i>Ascaris</i>	
<i>Staphylococcus</i>	Norwalk)	<i>Toxocara</i>	
<i>Streptococcus</i>		<i>Trichuris</i>	
		<i>Ancylostoma</i>	
		<i>Necator</i>	
		<i>Hymenolepsis</i>	

*Les genres marqués **en gras** sont les plus dangereux.

Tableau V. Nombre typique de micro-organismes des boues d'épuration avant et après traitement [14].

Les Micro-organismes	Boue brute (Le nombre	Traitement Primaire De germes	Traitement Secondaire par 100 ml)	Boue traitée (Le nombre/g)
<i>Coliformes fécaux</i>	10^8	10^7	10^6	10^6
<i>Salmonella</i>	10^3	10^2	10	10^2
<i>Shigella</i>	10^3	10^2	1	3
<i>Listeria</i>	10^4	/	/	10^3
<i>Campylobacter</i>	10^5	/	/	10
<i>Entérovirus</i>	5×10^4	1×10^4	10^3	10^2
Œufs d' <i>helminthes</i>	8×10^2	10	0.08	10
Kystes de <i>Giardia</i>	10^4	5×10^3	2.5×10^3	10

12. Traitement des boues d'épuration

Les boues issues du traitement secondaire sont habituellement combinées avec des boues primaires et traités comme un tout [14]. Auparavant, l'élimination des boues excessives a été entreprise par des méthodes traditionnelles, y compris l'incinération, le remplissage des terres ou le déversement dans les biotopes (océans) [24, 13]. Cependant, une augmentation des préoccupations environnementales et l'apparition des lois environnementales strictes a conduit à ce que ces options d'élimination soient remplacées par de nouvelles méthodes écologiques [13].

12. 1. Les différents types de traitement

Il existe une gamme de différents procédés de traitement utilisés pour réduire la fermentation et les risques pour la santé associés aux boues d'épuration [13, 14, 40], ils reposent sur un traitement biologique, chimique ou thermique [14], ou une combinaison des trois [13].

Le traitement comporte plusieurs étapes : la stabilisation pour réduire leur caractère fermentescible, l'épaississement et la concentration pour réduire leur volume et déshydratation ainsi que le conditionnement [12, 13], des exemples de traitements efficaces sont donnés dans le **Tableau VI**.

Un traitement approprié réduit considérablement le nombre de germes pathogènes existant dans les boues d'épurations [14] (**Annexe VII**) et la forme de traitement la plus commune est la digestion anaérobie [14, 39, 13] dont le méthane qui en résulte inhibe un grand nombre des micro-organismes pathogènes [16].

La combinaison du traitement et une période appropriée de non-récolte entraînera une réduction du nombre de microorganismes pathogènes en dessous d'une dose infectieuse minimale (DIM) [14].

13. La dose infectieuse minimale

Le concept de la dose infectieuse minimale (DIM) est important ; il concerne le nombre d'organismes ingérés pour provoquer une maladie. Il varie largement en fonction non seulement de l'agent pathogène particulier, mais aussi de la susceptibilité de l'hôte [35]. Par exemple, chez les jeunes, les personnes âgées, les femmes enceintes ou celles dont l'immunité est réduite, le nombre minimal d'organismes requis pour initier la maladie est beaucoup plus petit [35] (**Annexe VIII**).

Tableau VI. Exemples de processus efficaces de traitement des boues [14].

Processus	Conditions
<ul style="list-style-type: none"> • La pasteurisation 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Minimum 30 min à 70° C, ou minimum 4 h à 55° C.
<ul style="list-style-type: none"> • La digestion Anaérobie Mésophile 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Suivi dans tous les cas par la digestion anaérobie mésophile
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ La digestion anaérobie mésophile
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rétention moyenne d'au moins 12 jours à 35 ± 3° C; ou
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rétention moyenne d'au moins 20 jours à 25 ± 3° C.
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Suivi dans chaque cas par une digestion secondaire avec un temps de rétention moyen d'au moins 14 jours
<ul style="list-style-type: none"> • La digestion aérobie thermophile 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rétention moyenne d'au moins 7 jours. Toutes les boues doivent être soumises au minimum à 55°C pendant au moins 4 h
<ul style="list-style-type: none"> • Le compostage (andains ou piles gazeuses) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Le compost doit être conservé à 40° C pendant au moins 5 jours, y compris une période de 4 h à un minimum de 55° C. Suivie d'une période de maturation.
<ul style="list-style-type: none"> • La stabilisation alcaline (avec de la chaux) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Le pH doit être égal à 12 ou plus pendant une période d'au moins 2 h
<ul style="list-style-type: none"> • Le stockage du liquide 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stockage pendant au moins 3 mois.
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Déshydratation et stockage pendant au moins 3 mois. Stockage d'au moins 14 jours si les boues sont préalablement soumises à une digestion anaérobie mésophile
<ul style="list-style-type: none"> • La déshydratation et stockage 	

14. Les nouvelles technologies environnementales de traitement

Les techniques de traitement suscitent, deviennent traditionnelles et nécessitent beaucoup d'espace, une longue durée de traitement, et peuvent poser une pollution environnementale importante et des risques pour la santé publique. Les méthodes de désinfection radiatives peuvent constituer une alternative appropriée pour les futures applications dans le traitement des boues [34].

1)- **Les micro-ondes** vu leurs rapidité et efficacité qui peut réduire les micro-organismes pathogènes au-dessous du seuil de détection analytique tout en protégeant l'environnement [13, 34] et avec les opportunités de contrôle instantané et précis de l'entrée de puissance ainsi qu'un chauffage rapide et uniforme dans tout le matériau cible constitue une technique redoutable [11].

En plus, les propriétés diélectriques des boues d'épuration c'est-à-dire ; la teneur importante en molécules dipolaires (eau et matière organique) offrent l'opportunité au chauffage par micro-ondes [40, 34].

2)- **Irradiation par ultrasons** : elle est rapide, simple, facile à utiliser et elle a l'avantage de détruire les cellules microbiennes [13, 25]. Ainsi, un traitement similaire par ultrasons a montré d'excellents résultats dans le contrôle des bactéries dans les systèmes d'eaux usées [41].

Le mécanisme de la destruction assistée par ultrasons des boues est complété en deux étapes:

- La première étape est appelée « **floc perdant** » : la taille des floccs microbiens commence à diminuer et le matériel extracellulaire se détache de la surface des floccs microbiens.
- La deuxième étape est connue sous le nom de « **rupture cellulaire** » : le matériel organique intracellulaire se libère de la cellule microbienne, en raison d'une perturbation de la paroi cellulaire [13].

CHAPITRE II

Matériel

Et

Méthodes

Dans cette partie nous présentons les outils, les méthodes et les procédures analytiques impliqués dans les essais pour prouver l'efficacité de ces deux techniques de désinfection écologiques et de neutralisation à fin d'une valorisation agricole des boues résiduares d'un traitement biologique des eaux usées urbaine de la ville de Bouira (Office National d'Assainissement de Bouira).

1. Préparation de l'échantillon

1. 1. Prélèvements et transport de l'échantillon

Un échantillon homogène et composite à différents points et profondeurs sur le lit de séchage de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Bouira , qui cumule des boues de différentes périodes (**Figure 4**).

L'échantillon de boue à été ramené aseptiquement dans les brefs délais au laboratoire et conservé à 4 °C.



Figure 4. Lit de séchage des boues d'épuration dans la STEP de Bouira (ONA).

1. 2. Caractéristiques physico-chimiques de la boue utilisée

La boue utilisée dans la présente étude est caractérisée par une : siccité de 91,74%,
MVS : 58 – 59%, teneur en eau : 10%, teneur en métaux lourds : Nickel (39 µg/kg),

Cuivre (63 $\mu\text{g}/\text{kg}$), Cadmium (2 $\mu\text{g}/\text{kg}$), Plomb (144 $\mu\text{g}/\text{kg}$), Zinc (488 $\mu\text{g}/\text{kg}$) (Office Nationale d'Assainissement de Bouira).

2. Traitement de l'échantillon

2.1. Procédé assisté par micro-ondes

Un four micro-ondes domestique, Starlight, P70B17L – S2 MICROWAVE OVEN a été utilisé dans cette étude. L'appareil fonctionne à une fréquence de 2450 MHz avec une puissance de sortie comprise entre 0 et 1200 W (**Figure 5**).



Figure 5. Le four micro-ondes domestique « Starlight » utilisé pour le traitement des boues d'épuration.

2. 2. Principe d'irradiation micro-ondes

L'irradiation par micro-ondes est un rayonnement électromagnétique avec une longueur d'onde comprise entre 1 mm et 1 m, correspondant à une fréquence d'oscillation de 300 - 0,3 GHz [42].

Les fours à micro-ondes domestiques et les générateurs de micro-ondes industriels fonctionnent généralement à une fréquence de 2,45 GHz avec une longueur d'onde correspondante de 12,24 cm [42, 43].

Le mécanisme du traitement par micro-ondes consiste en un effet thermique et un effet athermique (non thermique). L'effet thermique est causé par l'interaction du champ électrique oscillant avec des molécules dipolaires comme l'eau, les protéines, les graisses et d'autres complexes organiques. La rotation moléculaire résultante des dipôles permanents conduit à un frottement qui finira par entraîner le chauffage intrinsèque [42, 44].

L'effet athermal est attribué à l'orientation du dipôle en évolution rapide dans les chaînes latérales polarisées des macromolécules de la membrane cellulaire, ce qui entraîne la rupture des liaisons hydrogène, conduisant ensuite à la désintégration de la matrice des floes

et aux changements dans les structures secondaires et tertiaires des protéines des microorganismes [42, 43].

L'intensité (fréquence), la concentration, le temps de rayonnement et la profondeur de pénétration sont les principaux facteurs d'irradiation micro-ondes qui ont un impact sur la matière diélectrique [40].

2. 3. Procédé assisté par ultrasons

Un bain ultrasons du laboratoire, Ultrasonic Cleaner Set, WUC – A 10 H à été utilisé dans cette étude. L'appareil fonctionne à une fréquence de 40 KHz avec une puissance de 523 W (Figure 6).



Figure 6. Le bain à ultrasons du laboratoire utilisé dans le traitement des boues d'épuration.

2. 3. 1. Principe d'irradiation par ultrasons

Les ultrasons incluent une large gamme de fréquences entre 20 kHz et 10 MHz [25]. Lorsque l'énergie acoustique est fournie à un liquide, des bulles de gaz sont formées et grandies de taille en absorbant le gaz et la vapeur du liquide [51]. Ces bulles peuvent imploser sur place dans des conditions de température très extrêmes (5000 K) et une pression (50 MPa). Ce phénomène s'appelle cavitation et ne se rencontre qu'à des fréquences inférieures à 1MHz [52].

La cavitation entraînera :

(1) Des forces de cisaillement extrêmes dans le liquide, attaquant ainsi mécaniquement les composants;

(2) la destruction supplémentaire de composés spécifiques puisque les bulles de cavitation sont entourées par une couche limite du liquide hydrophobe qui imprègne préférentiellement la volatilité des substances hydrophobes, réagissant ensuite dans la bulle de gaz [52].

Le rayon des bulles est lié à la fréquence de l'ultrason génératrice. Les fréquences plus basses génèrent des bulles plus grandes, de sorte que plus d'énergie est libérée par l'implosion de la bulle [51]. Dans la littérature **Tiehm *et al.*, 2001 [53]** confirment que le taux de désintégration des boues augmente proportionnellement avec la taille de la bulle. Le mécanisme de cavitation joue un rôle important lors de l'application d'ultrasons aux boues d'épuration. Principalement, les forces de cisaillement générées par l'explosion de la bulle détruisent les parois cellulaires des microorganismes dans les boues [54].

2. 4. Matériels de pailleuse utilisés

- ✓ Eau physiologique (0,9 %).
- ✓ Bec bunsen
- ✓ Hotte de protection microbiologique (Cruma, CRFL2, europe)
- ✓ Bicher de 1000 ml
- ✓ Bicher de 250 ml
- ✓ Pipettes Pasteur
- ✓ Flacons stériles pour la solution mère et le milieu de culture
- ✓ L'autoclave (DaiHan, WAC – 80, korai)
- ✓ Portoir pour tubes à essai
- ✓ Tubes à essai en verre de 20-25 ml
- ✓ Papier aluminium
- ✓ Sac Stomacker stérile
- ✓ Bras mortier stérile
- ✓ Boîtes de Pétri en verre et en plastique stériles
- ✓ Balance de pailleuse

- ✓ La plaque chauffante avec agitateur

2. 5. Le milieu de culture

La gélose nutritive à pH=7

2. 5. 1. Préparation du milieu de culture

Une masse de 23 g de la gélose nutritive déshydratée a été pesé et mélangé avec 1000 mL d'eau distillée dans un bécher ou un erlenmeyer et dissout par chauffage et agitation. Le milieu homogénéisé et versé dans des flacons en verre est directement autoclavé à 120 °C pendant 20 minutes.

3. Procédures expérimentales et analytiques

3. 1. Estimation de la charge microbienne initiale (la flore aérobie mésophile totale « FAMT »)

Totalité des bactéries, levures et moisissures aérobies capables de former des colonies dans ou sur le milieu de culture solide gélosé après incubation en aérobose à 37 °C et/ou à 22 °C [55, 56].

Dans cette investigation, la FAMT à été utilisé comme indicatrice pour évaluer la capacité du four micro-ondes et le bain ultrasons à détruire les bactéries existantes dans l'échantillon de boue.

3. 1. 1. Préparation de la solution mère et les dilutions décimales

Un échantillon de 01 g de boue à été pesé et dilué dans 9 mL d'eau physiologique donnant la solution mère « Dilution 10^{-1} » (Figure 7).



Figure 7. La solution mère de boue « Dilution 10^{-1} »

Des dilutions décimales (1/10) ont été préparées à partir de cette solution mère en allant de 10^{-1} jusqu'à 10^{-11} pour un meilleur dénombrement de la FAMT comme le montre la **Figure 8**.

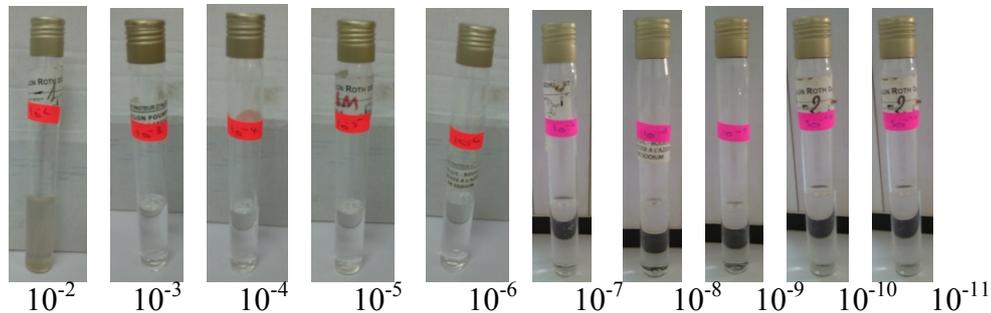


Figure 8. Les dilutions décimales préparées à partir de la solution mère.

- ✓ Chaque dilution a étéensemencée sur une boîte de Pétri contenant de la gélose nutritive (ensemencement en surface) et incubée à 22 °C pendant 72 heures.
- ✓ Un comptage du nombre de colonies microbiennes par boîte de Pétri se développant en surface a été effectué en prenant juste les boîtes contenant entre 15 et 300 colonies.
- ✓ Le nombre global de micro-organismes est déterminé par l'application de la loi :

$N = C/D$ UFC/g ou mL (N : nombre de micro-organismes/g ou mL ; C : moyenne du nombre de colonies dans les deux boîtes ; D : dilution des deux boîtes) [22, 57].

Cette loi est appliquée pour l'interprétation de toutes les analyses bactériologiques qui suivent dans cette étude.

- ✓ Le nombre N est exprimé en unités formant colonies par millilitre ou gramme de boue (UFC/mL ou g).

3. 2. La préparation de l'échantillon pour le traitement assisté par micro-ondes

Trois échantillons de 100 g de boue ont été pesés et misent dans des béciers en verre de 1000 mL (la hauteur de boue est d'environ 1 à 1,5 cm et une surface de 11 cm²) (**Figure 9**) [34].



Figure 9. L'échantillon de boue pour micro-ondes

3. 3. Traitement assisté par micro-ondes

Les échantillons de 100 g de boue contenus dans les béchers en verre ont été traités par micro-onde décrit au paragraphe II.3 en les plaçant dans la cavité micro-ondes et en exposant chacun à l'irradiation d'une des puissances 465, 1085 et 1200 W pendant des durées de temps variables : 1, 3, 5, 7 et 10 minutes successives [34].

Après le traitement par micro-ondes, l'échantillon a été retiré de la cavité et recouvert avec du papier aluminium désinfecté [34].

- ✓ Le refroidissement de l'échantillon a été effectué à température ambiante [34] et une dilution décimale de 10^{-1} a été préparée à partir de 1 g de boue traitée de chaque bécher et 9 mL d'eau physiologique pour l'ensemencement sur gélose nutritive en surface et en double boîtes, l'incubation a été faite à 22 °C pendant 72 heures.
- ✓ Un comptage du nombre moyen de colonies microbiennes par puissance et temps a été effectué en prenant les boîtes contenant entre 15 et 300 colonies.
- ✓ Le nombre N est exprimé en unités formant colonies par millilitre ou gramme de boue (UFC/mL ou g).

Les expériences de traitement par micro-ondes ont été conduites en double.

Calcul du taux de réduction :

- ❖ Charge microbienne restante après exposition en % = (nombre de la charge initiale/moyenne de charge obtenue à chaque temps et puissance) x 100%.
- ❖ Réduction en % = 100% - charge microbienne restante après exposition en %.

3. 4. La préparation des échantillons pour le traitement assisté par ultrasons

Plusieurs échantillons pour plusieurs essais ont été préparés avec différentes masses de boue d'épuration et différents volumes d'eau physiologique.

Le 1^{er} essai :

Un échantillon de 100 g de boue a été pesé, mit dans un bécher de 1000 ml et dilué dans 500 mL d'eau physiologique et broyé à l'aide d'un bras mortier et homogénéisé par des rotations manuelles puis un volume de 60 mL à été réparti en 06 tubes à essai en verre (10 mL/ tube) (**Figure 10**).

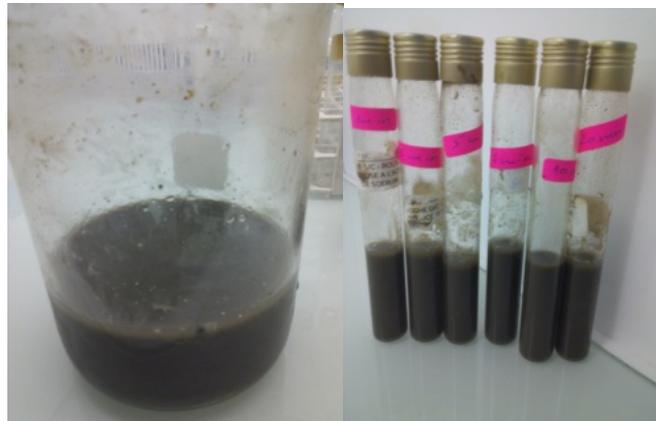


Figure 10. L'échantillon du 1^{er} essai.

Le 2^{eme} essai :

Un échantillon de 10 g de boue a été pesé et dilué dans 30 mL d'eau physiologique et versé dans un tube à essai en verre (**Figure 11**).



Figure 11. Echantillon du 2^{eme} essai.

Le 3^{ème} essai :

Un échantillon de 10 g de boue a été pesé et dilué dans 30 ml d'eau physiologique et versé dans un erlenmeyer de 1000 mL (l'ermen a pour but l'augmentation de la surface d'exposition).

Le 4^{ème} essai :

Des dilutions décimales de 10^{-2} jusqu'à 10^{-6} ont été préparées à partir d'un échantillon de 10 g de boue pesé et dilué dans 100 mL d'eau physiologique.

- ✓ Un ensemencement directe « sans traitement » de 10 µl de chaque dilution préparée a été fait sur GN en double boites et incubé à 22 °C pendant 72 heures.
- ✓ Un comptage du nombre moyen de colonies microbiennes par temps d'exposition a été effectué en prenant les boites contenant entre 15 et 300 colonies.
- ✓ Le nombre N est exprimé en unités formant colonies par millilitre ou gramme de boue (UFC/mL ou g).

Les expériences pour cet essai ont été conduites en double.

3. 5. Traitement assisté par ultrasons

Le 1^{er} essai :

Chaque tube à essai des 06 contenant 10 mL de la solution mère de boue a été exposé aux vibrations ultrasons pendant l'une de ces durées de temps successives : 1, 3, 5, 7, 10 et 20 minutes (**Figure 12**).



Figure 12. L'échantillon du 1^{er} essai dans le bain à ultrason.

- ✓ 10 μL de chaque solution de boue récupérée des tubes a étéensemencé en surface sur deux boites de Pétri contenant de la gélose nutritive et incubé à 22 °C pendant 72 h.
- ✓ Un comptage du nombre moyen de colonies microbiennes par temps d'exposition a été effectué en prenant les boites contenant entre 15 et 300 colonies.
- ✓ Le nombre N est exprimé en unités formant colonies par millilitre ou gramme de boue (UFC/mL ou g).

Les expériences pour cet essai ont été conduites en double.

Le 2^{ème} essai :

Le tube à essai préparés a été exposé aux ultrasons à une température égale à 45 °C pendant plusieurs durés de temps successives : 20, 30, 40, 50, 60 et 80 minutes (**Figure 13**).



Figure 13. L'échantillon du 2^{ème} essai dans le bain à ultrason.

- ✓ 10 μl de chaque solution de boue a étéensemencé en surface sur deux boites de Pétri contenant de la gélose nutritive et incubé à 22 °C pendant 72 h.
- ✓ Un comptage du nombre moyen de colonies microbiennes par temps d'exposition a été effectué en prenant les boites contenant entre 15 et 300 colonies.
- ✓ Le nombre N est exprimé en unités formant colonies par millilitre ou gramme de boue (UFC/mL ou g).

Les expériences pour cet essai ont été conduites en double.

Le 3^{ème} essai :

L'erenmeyer contenant la solution de boue préparée a été mise dans le bain et exposé aux ultrasons réglé à 45 °C et pendant 20 et 30 minutes successives (**Figure 14**).



Figure 14. L'échantillon du 3^{ème} essai dans le bain à ultrason.

10 µL de cette solution à chacune des deux durés de temps a été ensemencé en surface sur une boite de Pétri contenant la gélose nutritive et incubé à 22 °C pendant 72 h.

Les expériences pour cet essai ont été conduites en double.

Le 4^{ème} essai :

Sauf les dilutions 10^{-4} et 10^{-5} qui ont été misent dans le bain et exposés aux ultrasons pendant 20, 30 et 40 minutes successivement.

- ✓ 10 µL de chaque dilution a été ensemencé en surface sur deux boites de Pétri contenant la gélose nutritive et incubé à 22 °C pendant 72 h.
- ✓ Un comptage du nombre moyen de colonies microbiennes par temps d'exposition a été effectué en prenant les boites contenant entre 15 et 300 colonies.
- ✓ Le nombre N est exprimé en unités formant colonies par millilitre ou gramme de boue (UFC/mL ou g).

Les expériences pour cet essai ont été conduites en triple.

Le taux de réduction dans tous les essais 1, 2, 3, 4 est calculé suivant cette méthode :

- ❖ La charge microbienne restante après exposition en % = (nombre de la charge initiale/moyenne de charge obtenue à chaque temps et puissance) x 100%.
- ❖ La réduction en % = 100 - charge microbienne restante après exposition en %.

La représentation logarithmique de la réduction de la FAMT est réalisée par calcul du logarithme décimal de chaque nombre de la FAMT obtenu à chaque puissance et durée d'exposition.

CHAPITRE III

Résultats

Et

Discussion

Dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus au cours de cette étude qui s'est déroulée au laboratoire de la faculté SNV-ST de l'Université de Bouira. Ces résultats sont répartis en deux parties : traitement assisté par micro-ondes et par bain à ultrasons et finalisés par une étude comparative de l'efficacité de ces deux techniques.

1. Estimation de la charge microbienne initiale avant traitement

Le nombre de la flore aérobie mésophile totale « FAMT » dans la boue d'épuration prélevée sur le lit de séchage de la station d'épuration de la ville de Bouira est de $2,0 \times 10^8$ UFC/mL ou g.



Figure 15. Nombre de FAMT obtenu à la dilution 10^{-5} (20 UFC/10 μ L).

Ce résultat répond parfaitement à ce qui a été développé dans la partie théorique et confirmé par **Godfree, 2003 [14]** et **Degrement, 2005 [12]**.

2. Traitement assisté par micro-ondes

Les résultats de réduction de la Flore Aérobie Mésophile Totale dans l'échantillon de 100 g de boue obtenu à différents niveaux d'entrée de puissance micro-ondes et les temps de contact sont montrés dans les **Tableaux VII** et les figures **16, 17, 18** respectivement.

Tableau VII. Réduction de charge de la FAMT après traitement assisté par micro-ondes.

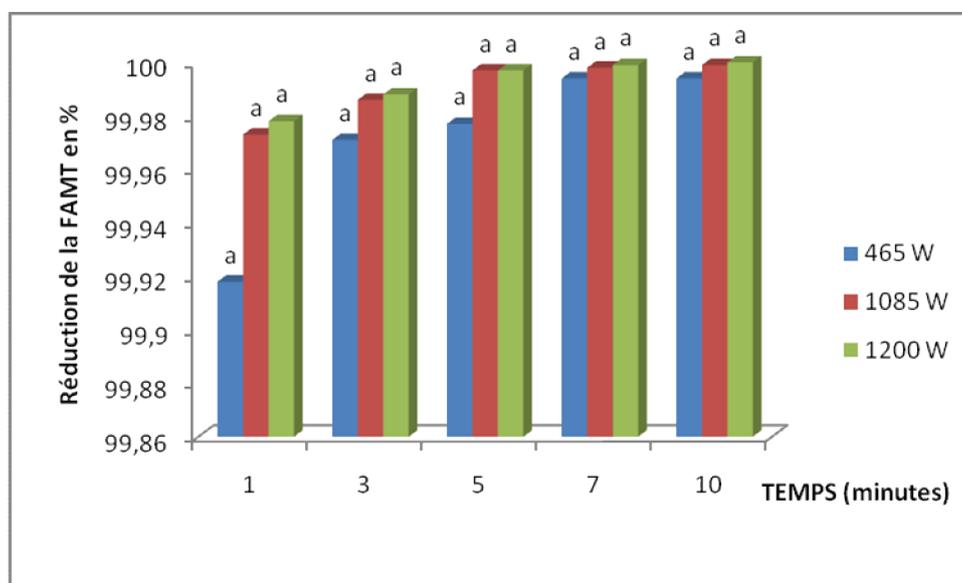
	Puissance (W)		
	465	1085	1200
Temps (min)	N (UFCx10 ³ /mL ou g)	N (UFCx10 ³ /mL ou g)	N (UFCx10 ³ /mL ou g)
01	164 ± 6 ^a	53 ± 1 ^a	44 ± 4 ^a
03	96 ± 5 ^b	28 ± 2 ^b	24 ± 2 ^b
05	44 ± 5 ^c	5,5 ± 0,5 ^c	4 ± 1 ^c
07	12 ± 0 ^d	2,5 ± 0,5 ^d	1 ± 1 ^d
10	10 ± 1 ^d	1,5 ± 0,5 ^d	0 ± 0 ^d

N : nombre restant de la charge microbienne.

a, b, c : la différence observée entre les moyennes est statistiquement significative au niveau de confiance 95% ($P \leq 0,05$).

d: la différence observée entre les moyennes n'est pas statistiquement significative ($P > 0,05$).

Pour les taux de réduction de la FAMT en % (**Annexe VII**).

**Figure 16.** Taux de réduction de la FAMT dans le traitement assisté par micro-ondes.

La réduction logarithmique de la FAMT ainsi que les variables profils de la couleur de boue après traitement par micro-ondes en fonction de la puissance d'irradiation et la durée d'exposition sont en **Annexe IX, X**.

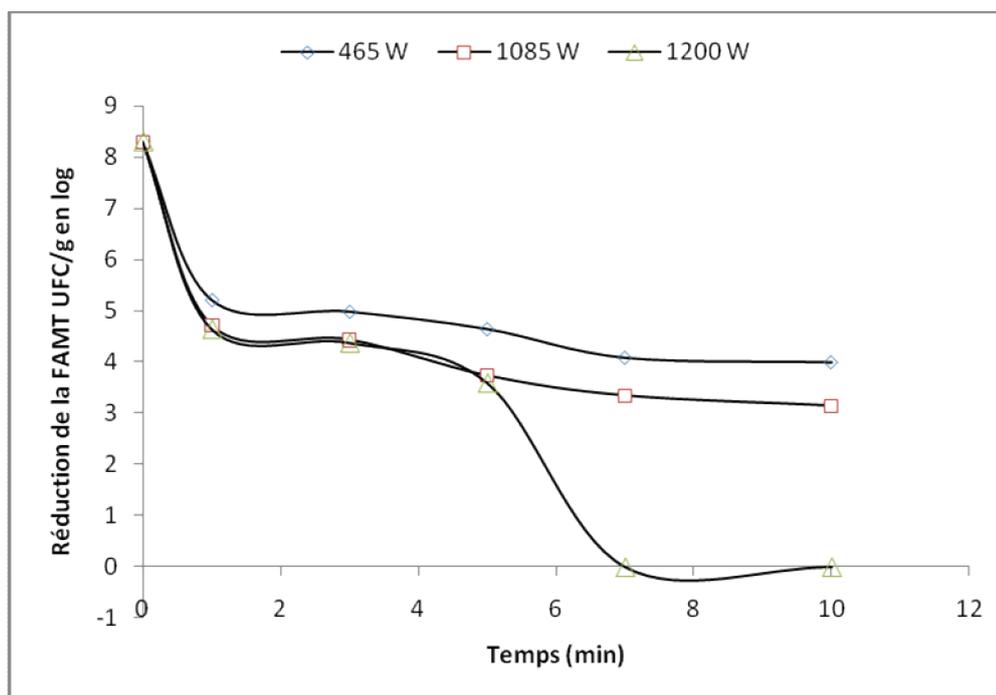
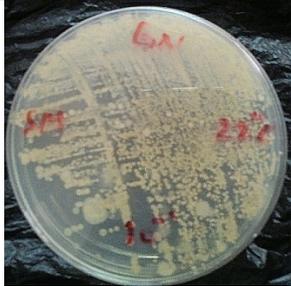
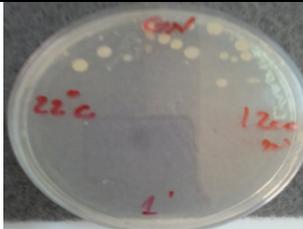
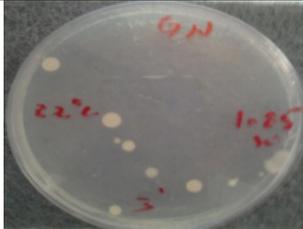
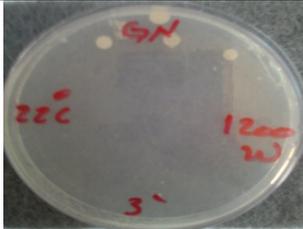
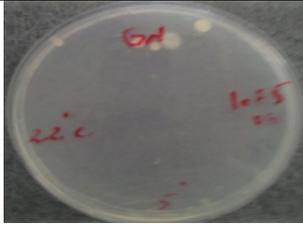
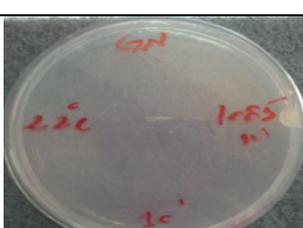


Figure 17. La représentation logarithmique de réduction de la FAMT par micro-ondes. (Le temps $t_0 = 0$ correspond à la charge initiale de la FAMT : $2,0 \times 10^8$ UFC/g MS).

Figure 18. Les différents profils de charge de la FAMT après traitement par micro-ondes.

La charge de FAMT _{boue} avant traitement			
			
La charge de FAMT _{boue} après traitement par micro-ondes			
Temps/puissance	465 (W)	1085 (W)	1200 (W)
1 (min)			
3 (min)			
5 (min)			
7 (min)			
10 (min)			

Les résultats du **Tableau VII** et les **Figures 16, 17, 18** démontrent que l'irradiation par micro-ondes est très rapidement efficace à l'image de l'élimination de 99,9% après 1 minute à toutes les puissances testées, dans l'échantillon de boues d'épuration étudié. Les taux d'élimination maximale (100%) sont atteints à 5, 7 et 10 minutes à toutes les puissances. Cette réduction confirmée témoigne une désinfection rapide et globale par cette méthode, cette efficacité est inévitablement causée par l'effet thermique et athermique induisant un chauffage intracellulaire et une déstabilisation membranaire et une défloculation [42, 43, 44].

Dans cette étude, la destruction de la FAMT au cours du traitement par micro-ondes peut être attribuée à la fois aux effets athermique (rayons électromagnétiques) et thermique (la température). L'effet de l'irradiation électromagnétique est le facteur majeur de destruction des pathogènes dans le traitement par micro-ondes, les effets athermiques des micro-ondes entraînent une dénaturation des cellules et une mort microbienne [34]. En outre, la membrane cellulaire est une double couche lipidique sélectivement perméable, et les lipides absorbent les micro-ondes en plus du visible. Ainsi, il est possible que l'irradiation micro-ondes cause des dommages substantiels aux membranes cellulaires, ce qui entraîne la libération du matériel intracellulaire conduisant à la mort cellulaire [43, 44, 46]. Quelques autres études ont indiqué que l'irradiation par les micro-ondes pourrait affecter la structure et la fonction chromosomique et la tolérance des cellules aux mutagènes standards et aux réparations de lésions [47].

L'effet de cette technique est cependant satisfaisant, nos résultats sont cohérents avec ceux des études antérieures ; celles de **Lamb et Siores, 2010 [45]** et **Mawioo *et al.*, 2016 [34]** bien que ces études aient utilisés des échantillons et des germes différents.

Dans la littérature ; les augmentations de température dans les boues dépendent en grande partie de leur teneur en eau; les échantillons plus grands nécessiteront un temps de contact plus long pour atteindre la température mortelle nécessaire à une réduction complète. Les microorganismes doivent être exposés pendant une durée minimale supplémentaire pour assurer une mort complète après avoir atteint la température létale minimale [34]. Dans notre étude, pour une quantité de 100 g de matière traitée (boue), le temps de contact nécessaire pour une réduction bactérienne complète varie avec le niveau de puissance utilisé ; le temps d'exposition augmente à fur et à mesure que le niveau de puissance est faible.

Une réduction complète des bactéries (FAMT) était obtenue sur des temps de contact courts lorsque la boue était irradiée à des niveaux de puissance micro-ondes plus élevés. Une entrée de puissance élevée entraîne une élévation rapide de la température intracellulaire et dans l'espace interstitiel, qui est un facteur clé de la mort bactérienne. A la puissance 1085 W et 1200 W par exemple, la réduction des FAMT au dessous du seuil de détection analytique a eu lieu après 05 minutes d'exposition, alors qu'à la puissance 465 W, c'est après 07 minutes d'exposition qu'il y a eu cette réduction sans ignorer la destruction cellulaire importante obtenue à des faibles puissances et temps d'exposition.

3. Traitement assisté par ultrasons

Les résultats de réduction de la Flore Aérobique Mésophile Totale (FAMT) dans l'échantillon de 100 g et 10 g de boue obtenu à différents essais sont montrés dans les **Tableaux VIII, IX, X, XI, XII** et les **Figures 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30** respectivement.

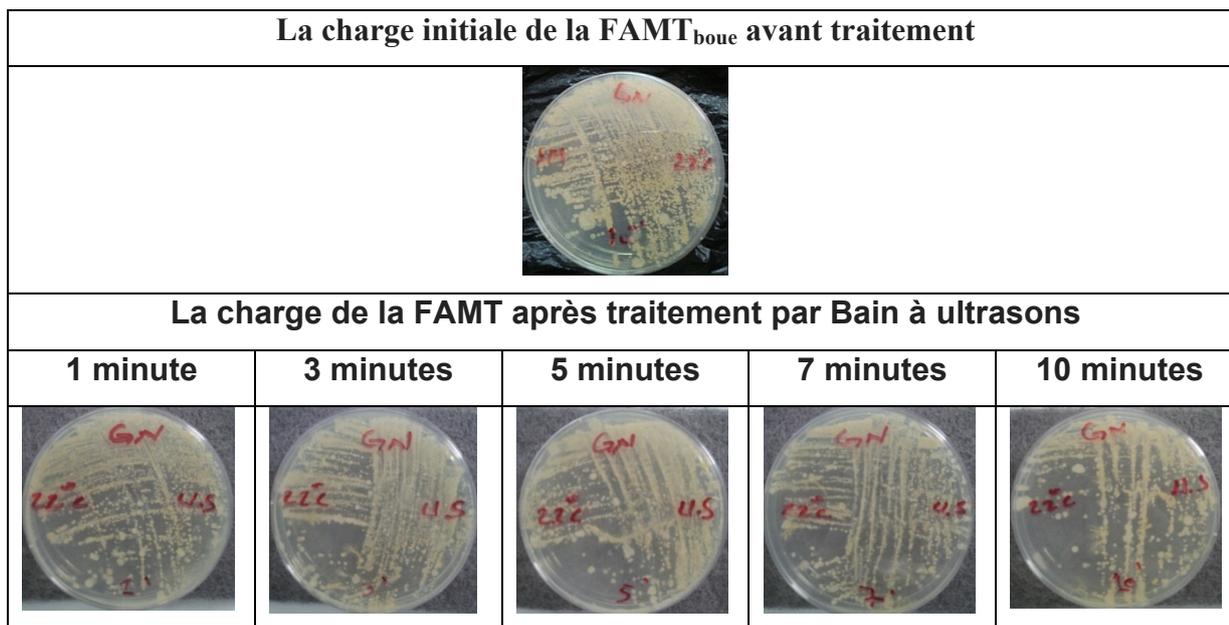
Le 1^{er} essai :

Tableau VIII. La charge de la FAMT après exposition au bain à ultrasons pendant 1, 3, 5, 7, 10 minutes

Nombre de charge (UFC/10 μ L)	Temps (minutes)				
	1	3	5	7	10
N Test 1	>300	>300	>300	>300	>300
N Test 2	>300	>300	>300	>300	>300

>300 : incomptable ou indénombrable

Figure 19. Profile de la charge FAMT sur les boîtes de Petri.



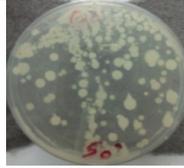
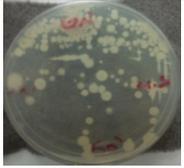
Le 2^{ème} essai :

Tableau IX. La charge de la FAMT après exposition au bain à ultrasons pendant 20, 30, 40, 50, 60, 80 minutes

Nombre de charge (UFC/10µL)	Temps (minutes)					
	20	30	40	50	60	80
N Test 1	>300	>300	>300	>300	>300	>300
NTest 2	>300	>300	>300	>300	>300	>300

>300 : incomptable ou indénombrable.

Figure 20. Profile de la charge de la FAMT sur les boîtes de Petri.

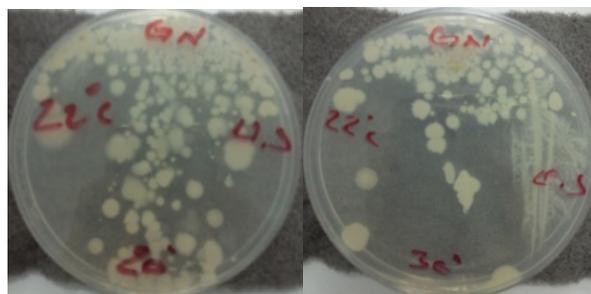
La charge initiale de la FAMT _{boue} avant traitement					
					
La charge de la FAMT après traitement par Bain à ultrasons					
20 minutes	30 minutes	40 minutes	50 minutes	60 minutes	80 minutes
					

Le 3^{ème} essai :

Tableau X. Charge de la FAMT après 20 et 30 minutes d'exposition au bain à ultrasons.

Nombre de charge (UFC/10 μ L)	Temps (minutes)	
	20	30
N Test 1	>300	>300
N Test 2	>300	>300

>300 : Incomptable ou indénombrable.



Après 20 minutes Après 30 minutes

Figure 21. Charge de la FAMT du 3^{ème} essai après exposition aux ultrasons.

Le 4^{eme} essai :

✓ Avant exposition au bain ultrasons

Pour les dilutions : 10^{-1} jusqu'à 10^{-4} : incomptable (>300 UFC/10 μ L)

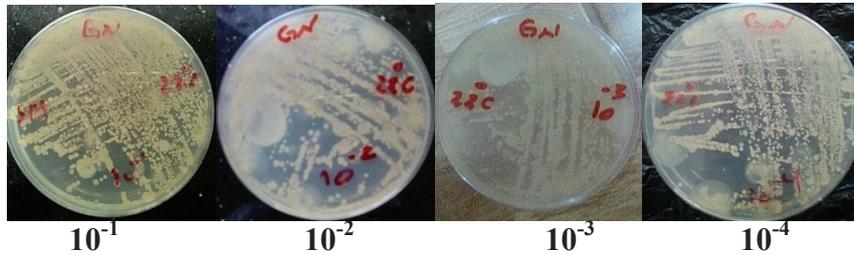


Figure 22. Charge de la FAMT des 1^{eres} quatre dilutions du 4^{eme} essai.

Tableau XI. Charge de la FAMT obtenue dans la dilution 10^{-5} .

Nombre de charge (UFC/mL ou g)	Dilution 10^{-5}
N Test 1	17×10^3
N Test 2	20×10^3
N Test 3	23×10^3



Figure 23. Charge de la FAMT à la dilution 10^{-5}

Pour les dilutions 10^{-6} jusqu'à 10^{-11} : 00 UFC/10 μ L.



Figure 24. Culture négative sur les boîtes de la dilution 10^{-6} .

✓ Après exposition au bain ultrasons

Tableau XII. Charge de la FAMT aux dilutions 10^{-4} et 10^{-5} .

Temps (min)	Nombre de charge par dilutions (UFCx 10^2 /mL)	
	10^{-4}	10^{-5}
20	$175 \pm 5,56^a$	$10,33 \pm 3,05^a$
30	$170 \pm 5,29^a$	$2,5 \pm 3,53^b$
40	$111 \pm 2,82^b$	0 ± 0^b

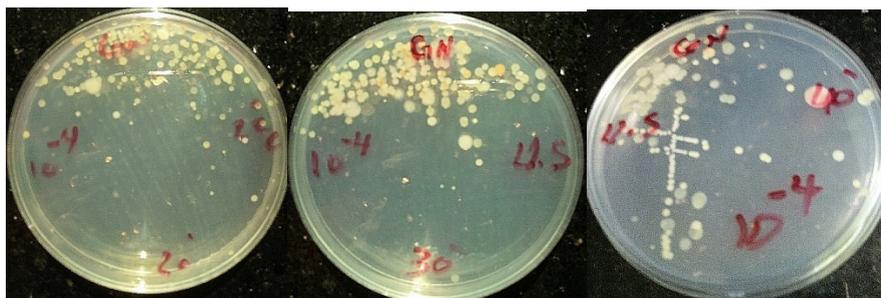


Figure 25. Charge de la FAMT à la dilution 10^{-4} après traitement par bain à ultrasons.



Figure 26. Charge de la FAMT à la dilution 10^{-5} après traitement par bain à ultrasons.

Le taux de réduction de la charge de la FAMT aux dilutions 10^{-4} et 10^{-5} par rapport à leur charge initiale et à la charge initiale de la SM (**Annexe XI**).

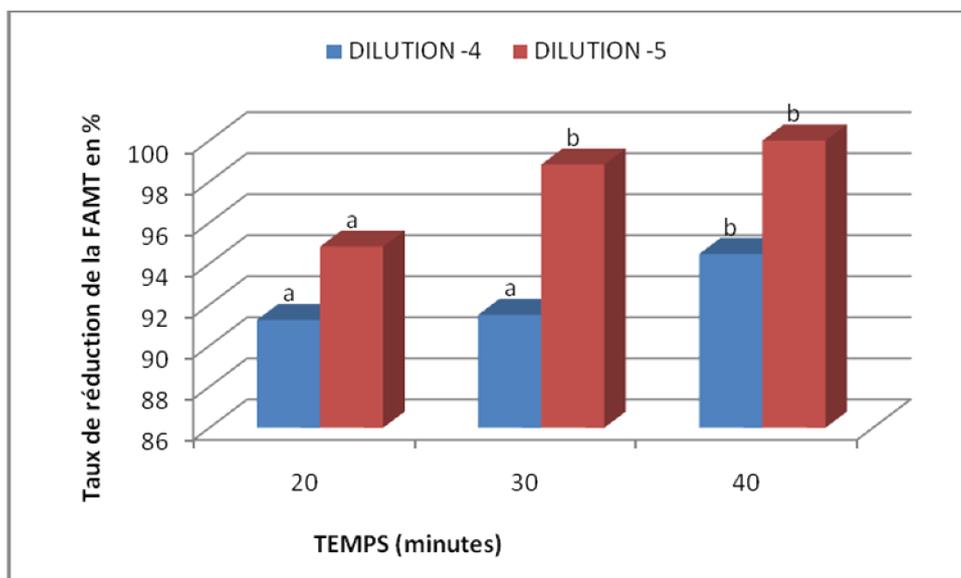


Figure 27. Taux de réduction de la FAMT dans le traitement par ultrasons des dilutions 10^{-4} et 10^{-5} . (Le temps $t_0 = 0$ correspond à la charge initiale de la FAMT à la dilution 10^{-4} : $2,0 \times 10^5$ UFC/g MS, à la dilution 10^{-5} : $2,0 \times 10^4$ UFC/g MS)

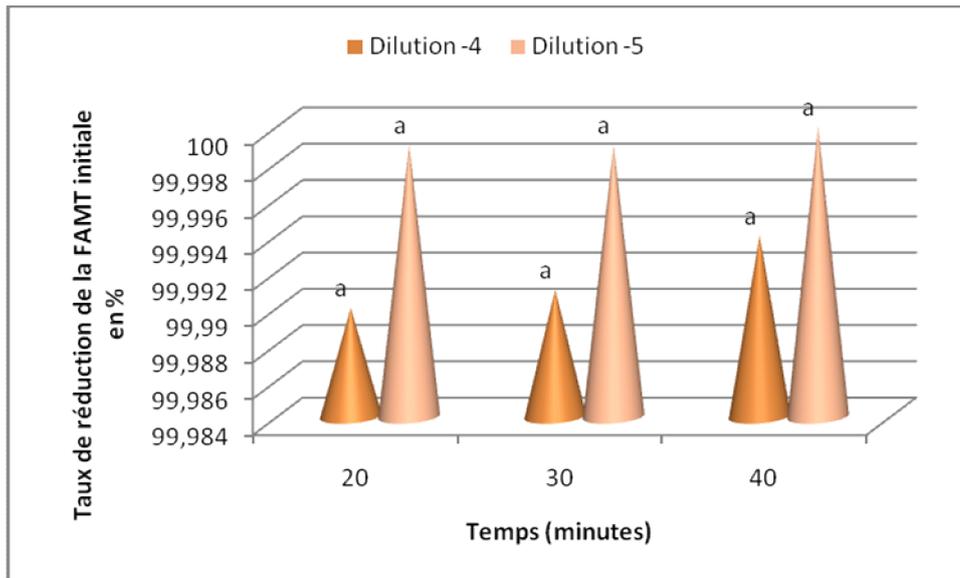


Figure 28. Taux de réduction de la FAMT dans le traitement par ultrasons des dilutions 10^{-4} et 10^{-5} par rapport à la SM. (Le temps $t_0 = 0$ correspond à la charge initiale de la FAMT de la SM : $2,0 \times 10^8$ UFC/g MS).

La réduction logarithmique de charge de la FAMT des dilutions 10^{-4} et 10^{-5} (**Annexe XII**)

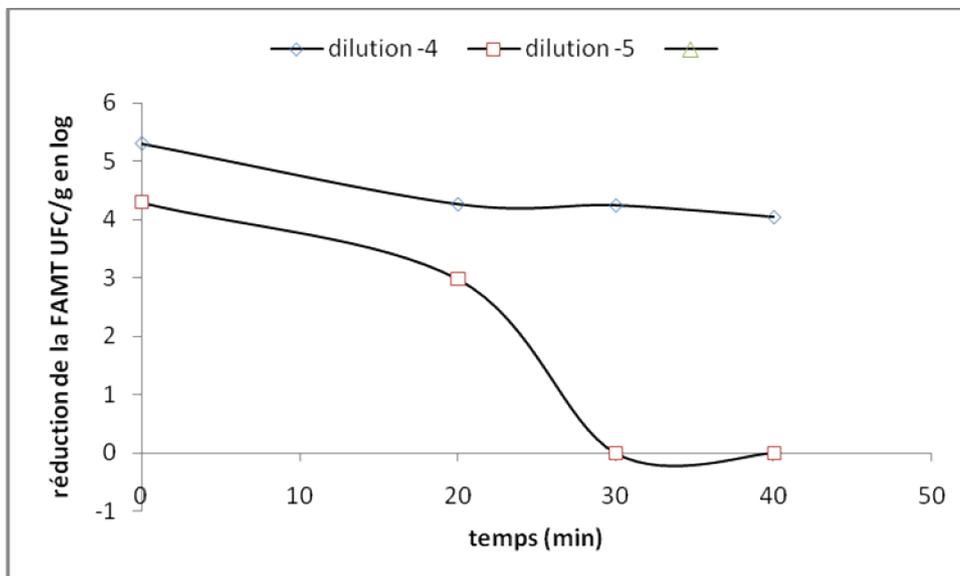


Figure 29. La représentation logarithmique de la réduction de la FAMT des dilutions 10^{-4} et 10^{-5} par ultrasons. (Le temps $t_0 = 0$ correspond à la charge initiale de la FAMT à 10^{-4} : $2,0 \times 10^5$ UFC/ mL, à 10^{-5} : $2,0 \times 10^4$ UFC/mL).

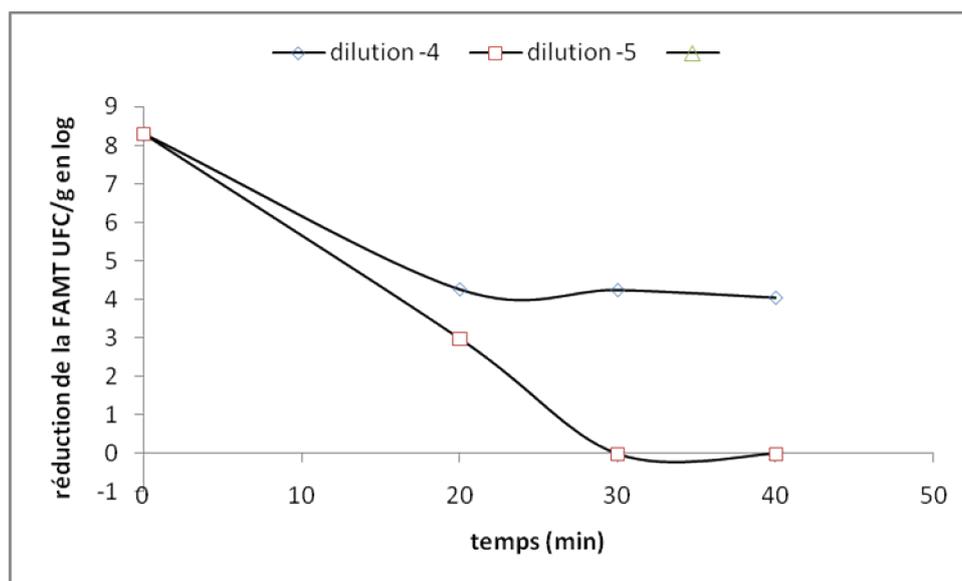


Figure 30. La représentation logarithmique de la réduction de la FAMT aux dilutions 10^{-4} et 10^{-5} par rapport à la charge initiale. (Le temps $t_0 = 0$ correspond au log de la charge initiale de la FAMT de la SM : 2.0×10^8 UFC/mL).

L'analyse des données des **Tableaux VIII, IX, X, XI, XII** et le témoignage des **Figures 19, 20, 21, 22,23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30** démontrent que :

- Aucune réduction de la FAMT après exposition aux ultrasons n'a été obtenue en utilisant directement la solution de boue, à courte durée d'exposition.
- La variation de la température utilisée au 2^{ème} et 3^{ème} essai n'a pas aussi contribué à la réduction de la FAMT avec le grand et le petit échantillon vu qu'elle n'est pas une température létale.
- Une réduction de la FAMT non significative ; vu le nombre qui est resté incomptable, à été observée en exposant l'échantillon de boue pendant une durée de temps plus longue et en utilisant de grande surface « erlenmeyer » pour porter l'échantillon de boue.

La réduction par bain à ultrasons de la FAMT n'est pas concluante et n'a pas d'effets observés à de courtes durées de traitement et a des fortes charges initiales. Cette observation est cohérente avec celle d'études antérieures ; celles de **Broekman et al., 2010 [41]** et **Dewil et al., 2006 [52]** bien que ces études aient utilisé des échantillons et des germes différents et un appareil à ultrason plus performant « la sonotrode à ultrasons ».

D'après **Broekman *et al.*, 2010 [41]**, même la sonotrode à ultrasons n'a pas grand effet sur les micro-organismes, à de faible intensité et à courte durée de traitement. Tandis que **Dewil *et al.*, 2006 [52]** ont obtenue une efficacité même dans les conditions déjà cités. La charge initiale, la durée et l'intensité sont fortement liées entre elles et nécessitent un équilibrage lors de l'irradiation ultrasonore [13].

Par contre en analysant les résultats dans les **figures 27, 28, 29, 30** avec les dilutions et les durées d'expositions utilisées, nous constatons une réduction importante de la FAMT avec :

- Plus de 91% de la FAMT a été éliminée à la dilution 10^{-4} dans les 20 premières minutes d'exposition et un rapprochement des 95% après les 40 minutes.
- Une réduction au dessous du seuil de détection analytique (100%) a été obtenue plus rapidement avec la dilution 10^{-5} vu la faible charge en FAMT qu'elle contenait.

Dans nos expériences, l'utilisation d'une boue concentrée (solution mère) a retardé l'effet de traitement par ultrasons même après une longue durée d'exposition, alors qu'après avoir effectué des dilutions, une réduction de la FAMT au dessous du seuil de détection analytique a été observé. Donc, comme ce qui a été constaté dans l'étude de **Broekman *et al.*, 2010 [41]**, pour les traitements de gros volumes (des grandes charges), des équipements de haute puissance, ainsi que de longues durées d'exposition sont nécessaires.

4. Comparaison entre traitement assisté par micro-ondes et traitement assisté par ultrasons

Le traitement par four à micro-ondes est plus rapide et efficace que le traitement par bain à ultrasons.

L'exposition d'une boue chargée en micro-organismes au four à micro-ondes, réduit la charge de la FAMT dès la plus petite puissance et dans une courte durée de traitement alors que le bain à ultrasons n'a réduit la charge de la FAMT qu'après une forte dilution et une durée d'exposition plus longue.

L'irradiation par ultrasons pendant une courte durée ne peut que casser les floccs microbiens, sans détruire la paroi cellulaire, alors qu'une durée plus longue peut détruire complètement les cellules bactériennes.

Cependant, l'irradiation par micro-ondes pendant une courte durée casse les floccs microbiens et induit une mort bactérienne directe et complète.

Donc au terme de temps de traitement et l'efficacité de désinfection les deux techniques qualifiées écologiques (selon «la [Commission UE - L'écotechnologie au service du développement durable, 2002](#) » ; les techniques écologiques sont : les techniques intégrées qui évitent la formation de polluants durant les procédés de production), ont un effet destructeur de la FAMT, sauf que la technique la plus pertinente est celles des micro-ondes vu la charge initiale importante des boues des Stations d'Épuration Urbaines (STEP) et la rapidité de désinfection de cette technique. Pour ce si nous considérons que pour la neutralisation des boues des STEP afin d'une valorisation agricole sans risque microbiologique, la meilleure technique est la désinfection totale par Micro-ondes.

Conclusion et perspectives

Le recours aux technologies vertes pour parier aux besoins actuels durant l'extension démographique peut paraître la meilleure alternative à entreprendre pour un développement durable. Dans cette étude qui a pour fin de trouver des techniques écologiques qui permettent le traitement et la réutilisation sans risques biologiques des boues (déchets spéciaux), ces résultats montrent que le traitement des boues résiduelles de l'épuration biologique par micro-ondes a éliminé complètement la Flore Aérobie Mésophile Totale mais également les temps d'action sont minimes ; 99% d'élimination au bout de 1 min et une destruction totale (100%) de la FMAT après 5 min d'exposition, encore les puissances utilisées 465 W, 1085 W, 1200 W sont des puissances d'un four micro-ondes domestique. Pareillement le traitement par ultrasons a aussi permis une élimination complète de la Flore Aérobie Mésophile Totale, mais après une longue durée d'exposition 20-40 min. Outre la durée et l'intensité qui sont fortement liées entre elles et nécessitent un équilibrage lors de l'irradiation ultrasonore, la charge initiale est un facteur primordial qui limite le traitement.

Néanmoins, avec les développements ultérieurs, la technologie des micro-ondes et ultrasons peuvent être considérées comme des options prometteuses pour le traitement rapide et efficace des boues résiduelles ainsi que leur valorisation agricole à zéro risque. En particulier, des essais à d'autres puissances industrielles sur d'autres microorganismes tels que *Cryptosporidium* ; les œufs d'helminthes (*Ascaris lumbricoides*) ; les entérovirus ; ... etc. sont envisageables pour évaluer et optimiser la capacité des micro-ondes et ultrasons ou la combinaison des deux techniques dans les traitements des boues à risque biologique.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. CHANG, Chia-Jung, TYAGI, Vinay Kumar, LO, Shang-Lien. Effects of microwave and alkali induced pretreatment on sludge solubilization and subsequent aerobic digestion. *Bioresource Technology* [en ligne]. 2011, 102, p 7633–7640. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (14.06.2017).
- [2]. HREIZ, Rainier, LATIFI, M.A, ROCHE, Nicolas. Optimal design and operation of activated sludge processes: State-of-the-art. *Chemical Engineering Journal* [en ligne]. 2015, 281, p 900–920. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (14.06.2017).
- [3]. SVANSTROM, Magdalena, FROLING, Morgan, MODELL, Michael, PETERS, William A., TESTER Jefferson. Environmental assessment of supercritical water oxidation of sewage sludge. *Resources, Conservation and Recycling* [en ligne]. 2004, 41, p 321–338. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (14.06.2017).
- [4]. ABELLEIRA, J, PEREZ-ELVIRA, S.I, SANCHEZ-ONETO, J, PORTELA, J.R, NEBOT, E. Advanced Thermal Hydrolysis of secondary sewage sludge: A novel process combining thermal hydrolysis and hydrogen peroxide addition. *Resources, Conservation and Recycling* [en ligne]. 2012, 59, p 52– 57. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (14.06.2017).
- [5]. YAN, Peng, WANG, Jing, CHEN, You-Peng, JI, Fang-Ying, SHEN, Yu, LIN, Fang Fang, LIN, Yu-Lian, GUO, Jin-Song, ZHANG, Hong, OUYANG, Wen-Juan. Investigation of microbial community structure in an advanced activated sludge side-stream reactor process with alkaline treatment. *International Biodeterioration & Biodegradation* [en ligne]. 2015, 104, p 356-362. Disponible sur: www.sci-hub.cc. (13.06.2017).
- [6]. BOLOBAJEV, Juri, KATTEL, Eneliis, VIISIMAA, Marika, GOI, Anna, TRAPIDO, Marina, TENNO, Tenno, DULOVA, Niina. Reuse of ferric sludge as an iron source for the Fenton-based process in wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal* [en ligne]. 2014, 255, p 8–13. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (13.06.2017).
- [7]. B R O W N, Sally, B E E C H E R, ned, C A R P E N T E R, Andrew. Calculator Tool for Determining Greenhouse Gas Emissions for Biosolids Processing and End Use. *Environ. Sci. Technol* [en ligne]. 2010, 44, p 9509–9515. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (13.06.2017).
- [8]. PILLI, Sridhar, YAN, S, TYAGI, R. D, SURAMPALLI, R.Y. Overview of Fenton pretreatment of sludge aiming to enhance anaerobic digestion. *Rev Environ Sci Biotechnol* [en ligne]. 2015, 14, p 453–472. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (13.06.2017).
- [9]. XU, Jianbo, YUAN, Haiping, LIN, Jinxian, YUAN, wenxiang. Evaluation of thermal, thermal-alkaline, alkaline and electrochemical pretreatments on sludge to enhance anaerobic

Références bibliographiques

- biogas production. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* [en ligne]. 2014, 45, p 2531–2536. Disponible sur: www.sci-hub.cc. (13.06.2017).
- [10]. SEMBLANTE, Galilee U, HAIA, Faisal I, HUANG, Xia, Ball, Andrew S, PRICED, William E, NGHIEMA, Long D. Trace organic contaminants in biosolids: Impact of conventional wastewater and sludge processing technologies and emerging alternatives. *Journal of Hazardous Materials* [en ligne]. 2015, 300, p 1–17. Disponible sur: www.sci-hub.cc. (13.06.2017).
- [11]. HAQUE, Kazi E. Microwave energy for mineral treatment processes—a brief review. *Int. J. Miner. Process* [en ligne]. 1999, 57, p 1–24. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (13.05.2017).
- [12]. DEGREMONT. *Mémento technique de l'eau*. Tome 1-Tome 2. 10^{ème} édition. DEGEMENT SUEZ, 2005. 2503 p. (ISBN 10 : 2743007176, ISBN 13 : 9782743007171).
- [13]. ANJUM, Muzammil, AL-MAKISHAH, Naif.H, BARAKAT, M.A, Wastewater sludge stabilization using pre-treatment methods, *Process Safety and Environment Protection* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.05.022> (09.05.2017).
- [14]. GODFREE, Alan. *Health constraints on the agricultural recycling of wastewater sludges*. In: *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. UK: Duncan Mara et Nigel Horan, 2003, 621 p. (ISBN 0-12-470100-0).
- [15]. HENZE, Mogens et COMEAU, Yves. Wastewater Characterization. In : HENZ Mogens. *Biological Wastewater Treatment : principles Modelling and Design*. London-Uk: M. Henze, M.C.M. van Loosdrecht, G.A. Ekama et D. Brdjanovic, 2008, p. 33-52. (ISBN: 9781843391883)
- [16]. AFOLABI, O.O.D, SOHAIL, M. Microwaving human faecal sludge as a viable sanitation technology option for treatment and value recovery _ A critical review, *Journal of Environmental Management* [en ligne]. 2016, Vol 1-15, p. 1-15. Disponible sur: www.sci-hub.cc. (04.04.2017)
- [17]. Min-Jin Kim. *The effect of sludge retention time: On Dewaterability Of Activated Sludge*. Master des sciences appliqués, Canada: université de Toronto, 2001, 227 p.
- [18]. MOULIN Solène, ROZEN-RECHELS David, STANKOVIC Milena. *Traitement des eaux usées* [en ligne]. ATELIER L'EAU : Qualité vs Quantité, 1^{er} semestre. Paris : CERESERTI, 2013, 13 p. Disponible sur : www.google.com. (12.03.2017)
- [19]. NOUR, Abdelmadjid. TRAITEMENT BIOLOGIQUE DES EAUX USEES PAR LES BACTERIES ANAEROBIES BUTYRIQUES (CLOSTRIDIUM BUTYRICUM) QUI

Références bibliographiques

- PRODIUSENT DE L'HYDROGENE. *Laboratoire de polyclinique central d'El Bayadh* [en ligne]. 2007, 8 p. Disponible sur : www.google.com. (15.03.2017)
- [20]. METAHRI, Mohammed Said. *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* [en ligne]. Agriculture, Génie des procédés. Tizi-Ouzou : université Mouloud MAMERI, 2012, 172 p. Disponible sur : www.google.com. (27.03.2017)
- [21]. DHAOUADI Hatem. *Les procédés biologiques d'épuration* [en ligne]. Traitement des Eaux Usées Urbaines. Tunisie : Université Virtuelle de Tunis, 2008, 34 p. Disponible sur : www.google.com. (15.03.2017)
- [22]. GUIRAUD J-P. Techniques d'estimation des populations microbiennes. **In** : *Microbiologie Alimentaire*. Paris : DUNOD, 1998, 552 p. (ISBN : 210003666)
- [23]. PANDOLFI Denis. *Caractérisation morphologique et physiologique de la biomasse des boues activées par analyse d'images* [en ligne]. Génie des Procédés et des Produits. Lorraine : Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006, 166 p. Disponible sur : www.google.com. (10.04.2017)
- [24]. SIAAP. La cité de l'eau et de l'assainissement : l'assainissement des eaux usées en agglomérations parisiennes : principes et procédés. 2^{ème} édition. Paris : SIAAP, 2013, 92 p. Disponible sur : www.google.com. (23.04.2017)
- [25]. GENG, Yucong, ZHANG, Bo, DU, Lianzhu, TANGA Zhi, LIA, Qiang, Zhoua Zheng et YINA Xiaobo. Improving methane production during the anaerobic digestion of waste activated sludge: Cao-ultrasonic pretreatment and using different seed sludges. *Procedia Environmental Sciences* [en ligne]. 2016, p 743-752. Disponible sur: www.sci-hub.cc. (05.05.2017)
- [26]. State of Maine. *Notes on activated sludge process control*. Department of Environmental Protection, 2009, 245 p.
- [27]. HORAN, Nigel. Suspended growth processes. **In**: *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. UK: Duncan Mara et Nigel Horan, 2003, 621 p. (ISBN 0-12-470100-0).
- [28]. HORAN, Nigel. Protozoa. **In**: *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. UK: Duncan Mara et Nigel Horan, 2003, 621 p. (ISBN 0-12-470100-0).
- [29]. WENTZEL, M C, EKAMA George A et Loewenthal R E. Fundamentals of biological behaviour and wastewater strength tests. **In**: *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. UK: Duncan Mara et Nigel Horan, 2003, 621 p. (ISBN 0-12-470100-0).

Références bibliographiques

- [30]. CLOETE, T E, EHLERS, M M, HEERDEN, J van et ATKINSON B. The microbiology of phosphorus removal in activated sludge. . **In:** *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. UK: Duncan Mara et Nigel Horan, 2003, 621 p. (ISBN 0-12-470100-0).
- [31]. Madoni, Paolo. Protozoa as indicators of wastewater treatment efficiency. **In:** *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. UK: Duncan Mara et Nigel Horan, 2003, 621 p. (ISBN 0-12-470100-0).
- [32]. RODIER, John et coll. Qualité des eaux et des boues utilisées en agriculture. In : *L'ANALYSE DE L'EAU : Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer*. 8^{ème} édition. Dunod, 2005, 1365 p. (ISBN 2100496123)
- [33]. FIDJELAND, Jørgen, MAGRI, Maria Elisa, JONSSON, Hakan, ALBIHN Ann, VINNERAS Bjorn. The potential for self-sanitisation of faecal sludge by intrinsic ammonia. *water research* [en ligne]. 2013, 47, p 6014-6023. Disponible sur: www.sci-hub.cc. (15.05.2017)
- [34]. MAWIOO, Peter M, RWEYEMAMU, Audax, GARCIA, Hector A, HOOIJMANS, Christine M, BRDJANOVIC, Damir. Evaluation of a microwave based reactor for the treatment of blackwater sludge. *Science of the Total Environment* [en ligne]. 2016, 548–549, p 72–81. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (10.12.2016)
- [35]. WILLEY, Joanne M, SHERWOOD, Linda M, WOOLVERTON, Christopher J. *Microbiologie*. 4^{ème} édition. Bruxelles: De Boeck, 2013 , 1070 p. (ISBN: 978-2-8041-8039-3).
- [36]. HERITAGE, John. Viruses. **In:** *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. UK: Duncan Mara et Nigel Horan, 2003, 621 p. (ISBN 0-12-470100-0).
- [37]. SCHREODER, Edward D et WUERTZ, Stefan. Bacteria. **In:** *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. UK: Duncan Mara et Nigel Horan, 2003, 621 p. (ISBN 0-12-470100-0).
- [38]. HUFFMAN, Debra, QUINTERO-BETACOURT, Walter et ROSE, Joan. Emerging waterborne pathogens. **In:** *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. UK: Duncan Mara et Nigel Horan, 2003, 621 p. (ISBN 0-12-470100-0).
- [39]. ALAGOZ, B. Aylin, YENIGUN, Orhan, ERDINCLER, Ays_en. Enhancement of anaerobic digestion efficiency of wastewater sludge and olive waste: Synergistic effect of co-digestion and ultrasonic/microwave sludge pre-treatment. *Waste Management* [en ligne]. 2015, p 1-7. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (02.05.2017)
- [40]. APPELS, Lise, HOUTMEYERS, Sofie, DEGREVE, Jan, IMPE, Jan Van, DEWIL, Raf. Influence of microwave pre-treatment on sludge solubilization and pilot scale semi-

Références bibliographiques

continuous anaerobic digestion. *Bioresource Technology* [en ligne]. 2013, 128, p 598–603. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (06.05.2017)

[41]. BROEKMAN, S, POHLMANN, O, BEARDWOOD, E.S, CORDEMANS DE MEULENAER, E. Ultrasonic treatment for microbiological control of water systems. *Ultrasonics Sonochemistry* [en ligne]. 2010, 17, p 1041–1048. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (08.06.2017).

[42]. ESKICIOGLU, Cigdem, TERZIAN, Nicolas, KENNEDY, Kevin J, DROSTE, Ronald L, HAMODA Mohamed. Athermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge. *WATER RESEARCH* [en ligne]. 2007, 41, p 2457 – 2466. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (02.06.2017).

[43]. TANG, Bing, YU, Linfeng, HUANG, Shaosong, LUO, Jianzhong, ZHUO, Ying. Energy efficiency of pre-treating excess sewage sludge with microwave irradiation. *Bioresource Technology* [en ligne]. 2010, 101, p 5092–5097. Disponible sur: www.sci-hub.cc. (30.03.2017).

[44]. YU, Qiang, LEI, Heng Yi, LI Zhong, LI, Hua Liang, CHEN, Kai, ZHANG, XingHong, LIANG, RenLi. Physical and chemical properties of waste-activated sludge after microwave treatment. *water research* [en ligne]. 2010, 44, p 2841-2849. Disponible sur: www.sci-hub.cc. (15.04.2017).

[45]. LAMB, A. S, et SIORES, E. A review of the role of microwave in the destruction of pathogenic bacteria. [en ligne]. 2010, p 23-29. Disponible sur: www.sci-hub.cc. (01.06.2017).

[46]. TYAGI, Vinay Kumar, LO, Shang-Lien. Enhancement in mesophilic aerobic digestion of waste activated sludge by chemically assisted thermal pretreatment method. *Bioresource Technology* [en ligne]. 2012, 119, p 105–113. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (15.04.2017).

[47]. TYAGI, Vinay Kumar, LO, Shang-Lien. Microwave irradiation: A sustainable way for sludge treatment and resource recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en ligne]. 2013, 18, p 288–305. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (15.03.2017).

[48]. SOLYOM, Katalin, MATO, Rafael B, PEREZ-ELVIRA, Sara Isabel, COCERO, María José. The influence of the energy absorbed from microwave pretreatment on biogas production from secondary wastewater sludge. *Bioresource Technology* [en ligne]. 2011, 102, p 10849–10854. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (04.06.2017).

[49]. HONG, Seung M, PARK, Jae K, LEE, Y.O. Mechanisms of microwave irradiation involved in the destruction of fecal coliforms from biosolids. *Water Research* [en ligne]. 2004, 38, p 1615–1625. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (01.03.2017).

Références bibliographiques

- [50]. VALERO, A, CEJUDO, M, GERCIA-GIMENO, R.M. Inactivation kinetics for Salmonella Enteritidis in potato omelet using microwave heating treatments. *Food Control* [en ligne]. 2014, 43, p 175-182. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (26.05.2017).
- [51]. LABORDE, J-L, BOUYER, C, CALTAGIRONE, J-P, GKARD, A. Acoustic bubble cavitation at low frequencies. *Ultrasonics* [en ligne]. 1998, 36, p 589-594. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (11.06.2017).
- [52]. DEWIL, Raf, BAEYENSA, Jan et GOUTVRIND, Rebecca. The Use of Ultrasonics in the Treatment of Waste Activated Sludge. *Chinese J. Chem. Eng* [en ligne]. 2006, 14, 1, p 105-113. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (11.06.2017).
- [53]. TIEHM, A, NICKEL, K, ZELHORN, M et NEIS, U. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. *Wat. Res.* [en ligne]. 2001, Vol. 35, No. 8, pp. 2003–2009. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (11.06.2017).
- [54]. ONYECHE, T.I, SCHLAFER, O, BORMANN, SCHRAODER, H, C, SIEVERS, M. Ultrasonic cell disruption of stabilised sludge with subsequent anaerobic digestion. *Ultrasonics* [en ligne] 2002, 40, p 31–35. Disponible sur : www.sci-hub.cc. (11.06.2017).
- [55]. Organisation internationale de Normalisation (ISO). Qualité de l'eau – Dénombrement des micro-organismes revivifiables – comptage des colonies par inoculation dans ou sur un milieu de culture nutritif gélosé = Water quality – Enumeration of viable micro-organisms – Colony count by inoculation in or on a nutrient agar culture medium. Norme Internationale ISO 6222. 1988, 2 p.
- [56]. DELARRAS, Camille. Méthodes de travail en microbiologie. **In** : *Microbiologie pratique pour le laboratoire d'analyses ou de contrôle sanitaire*. Paris : Lavoisier, 2007, 476 p. (ISBN : 978-2-7430-0945-8)
- [57]. JOFFIN, Christiane, JOFFIN, Jean-Noël. Troisième partie – Fiches techniques. **In** : *Microbiologie alimentaire*. 5^{ème} édition. Bordeaux : Centre Régional de Documentation Pédagogique d'Aquitaine (crdp Aquitaine), 1999, 212 p. (ISBN : 2-86617-342-2).

Annexes

Annexe I

Tableau I. Classification de boue de traitement biologique [12].

Caractéristique principale de la boue	Origine	Traitement de l'eau	Éléments composants
Organique hydrophile	ERU	Tout traitement biologique ou physico chimique	Matière organique prédominante : M.O/M.S 40 à 90% ; matière protéinique souvent très fermentescibles ; déchets végétaux ou animaux ; huile et graisse animale et souvent minérale ; hydroxydes hydrophiles (Al, Fe) en traitement physico-chimique ; hydrocarbures (pétrochimie)

Annexe II

Tableau II. Composition chimique et propriétés de la boue non traitée et de la boue digérée [14].

constituants	Boue primaire	non traitée	Boue primaire	Digérée
	Gamme	Typique	Gamme	Typique
Matière sèche totale (MST)%	2.0-8.0	5.0	6.0-12.0	10.0
Solides volatiles (% de MST)	60-80	65	30-60	40
Huiles et graisses (% de MST)				
Ether soluble	6-30		5-30	18
Extrait d'éther	7-35			
Protéines (% du MST)	20-30	25	15-20	18
Azote (N, % du MST)	1,5-4	2,5	1.6-6.0	3.0
Phosphore (P ₂ O ₅ , % de MST)	0.8-2.8	1.6	1.5-4.0	2.5
Potassium (K ₂ O, % de MST)	0.0-0.1	0.4	0.0-3.0	1.0
Cellulose (% de MST)	8.0-15.0	10.0	8.8-15.0	10.0
Fer (pas le sulfure)	2.0-4.0	2.5	3.0-8.0	4.0
Silice (SiO ₂ , % de MST)	15.0-20.0		10.0-20.0	
pH	5.0-8.0	6.0	6.5-7.5	7.0
alcalinité (mg/l comme CaCO ₃)	500-1500	600	2500-3500	3000
acides organiques (mg/L)	200-2000	500	100-600	200
contenu énergétique (KJ/kg)	23000-29000	25500	9300-14000	11500

Annexe III

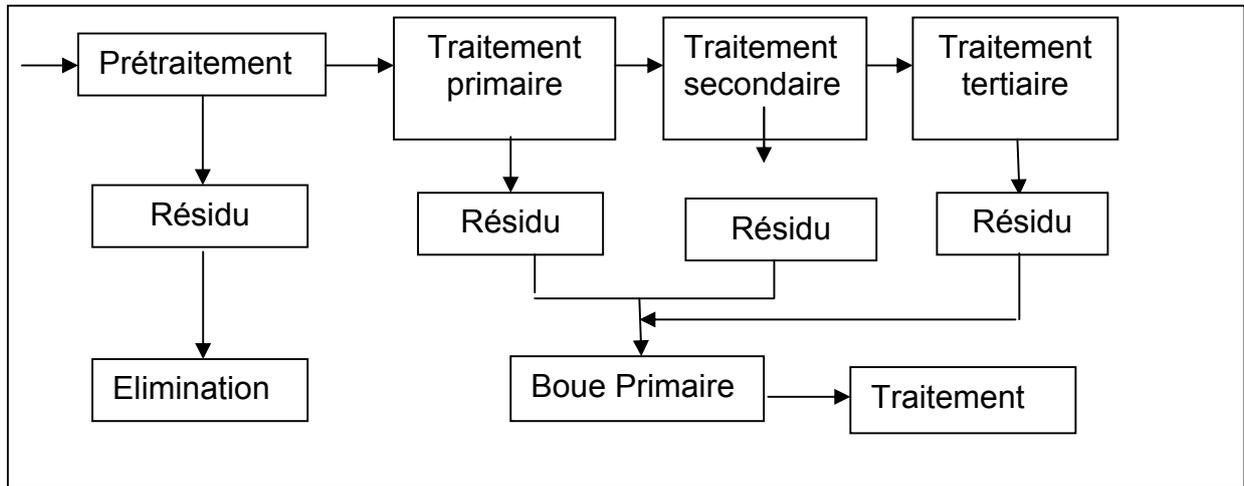


Figure 1. Représentation schématique des processus de traitement des eaux usées montrant la production de boue [14].

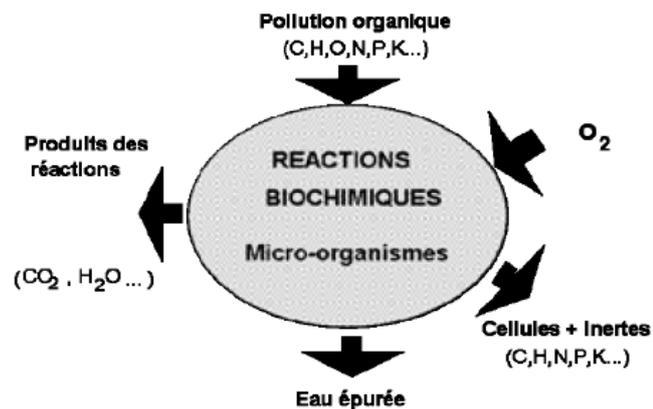


Figure 2. Epuration biologique aérobie [21].

Annexe IV

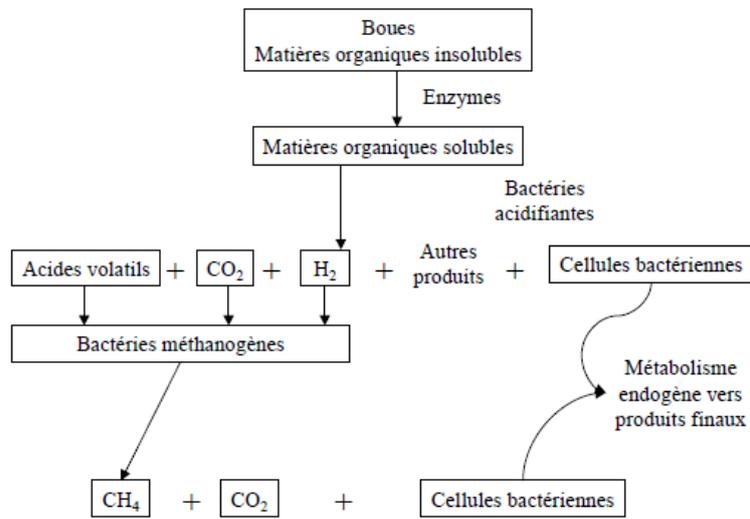


Figure.3 mécanisme de la digestion anaérobie des boues [21].

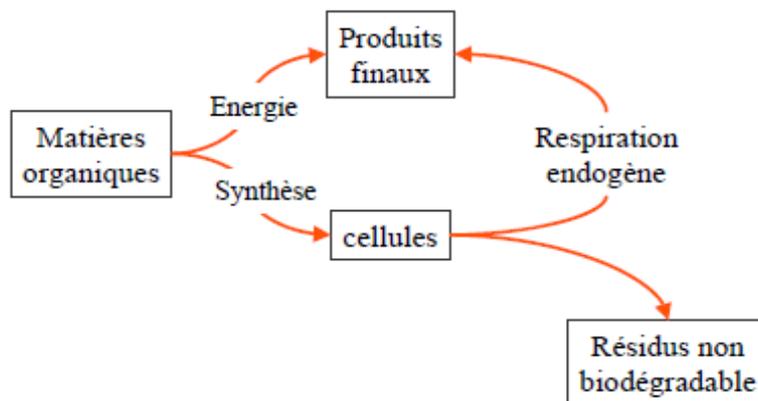


Figure 4. Mécanisme de l'oxydation biologique aérobie [21].

Annexe V

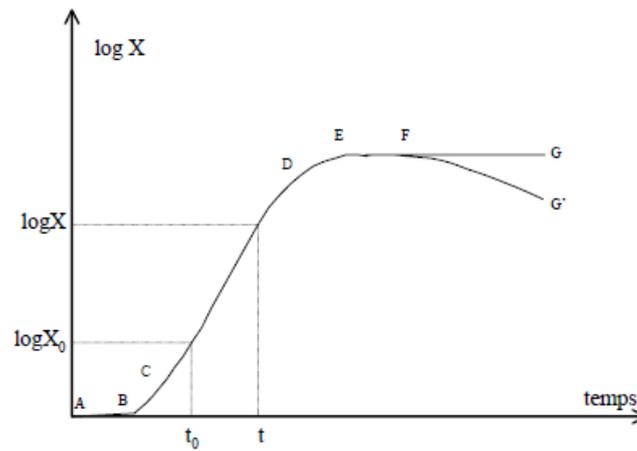


Figure 5. Evolution de la biomasse en fonction du temps en coordonnées logarithmique. (Cas d'une souche pure et un seul substrat : le glucose) [21].

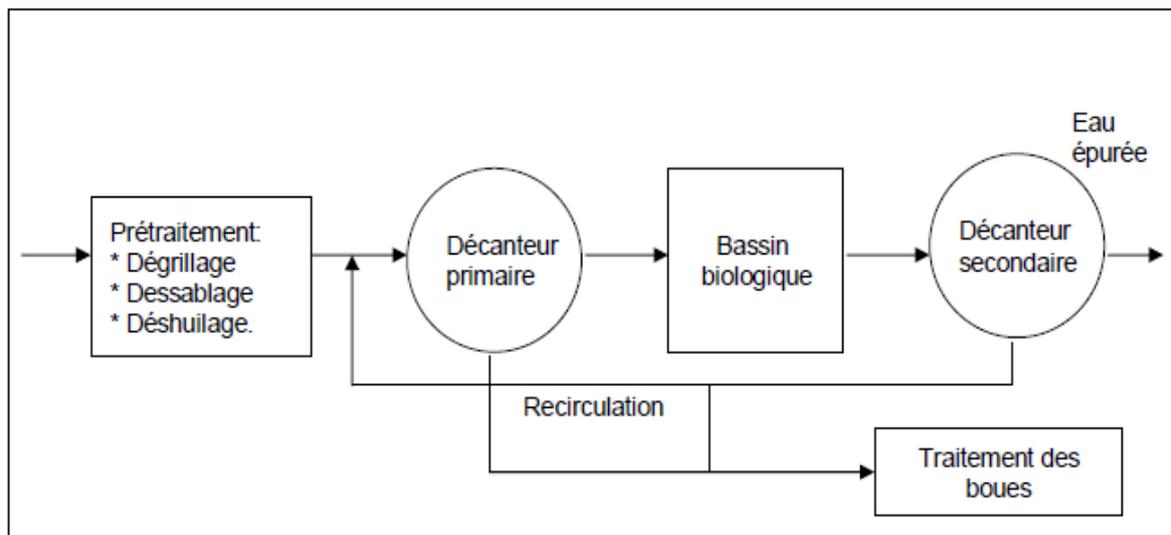


Figure 6. Schéma simplifié d'un système d'épuration par boue activée [23].

Annexe VI

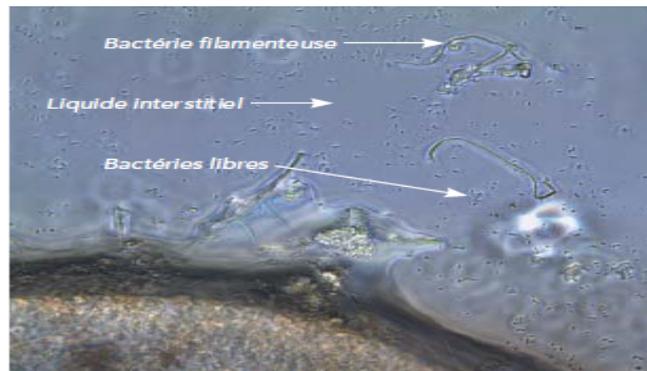


Figure 7. Les bactéries de boue activée observées au microscope optique à contraste de phase (x 200) [24].



Figure 8. Protozoaires ciliés – bouquet de Péritriches (*Vorticella* sp.) observés au microscope optique à contraste de phase (x 200) [24].



Figure 9. Vers métazoaire - Rotifère (*Lecane* sp.) observés au microscope optique à contraste de phase (x 200) [24].

Annexe VII

Tableau III. Valeurs limites des concentrations en métaux lourds dans les sols recevant des boues (en mg/kg de terre sèche) et dans les boues destinées à l'utilisation en agriculture (en mg/kg de matière sèche) [32].

Paramètres	Valeurs limites dans	Valeurs limites dans les
	le sol	boues
Cadmium	2	20
Chrome	150	1000
Cuivre	100	1000
Mercure	1	10
Nickel	50	200
Plomb	100	800
Sélénium	10	100
Zinc	300	3000
Chrome + cuivre + nickel + zinc	/	4000

Tableau IV. Résumé de la réduction des agents pathogènes lors du traitement des boues [14].

Le traitement	La réduction (en log)		
	Bactéries	Virus	Parasites
Digestion anaérobie mésophile	0,5 – 4	0,5 – 2	0
Digestion aérobie	0,5 – 4	0,5 – 2	0
Compostage	2 - > 4	2 - > 4	2 - > 4
Séchage à l'air	0,5 – 4	0,5 – 4	0,5 – 4
Stabilisation par la chaux	2 - > 4	> 4	0

Annexe VIII

Tableau V. Dose infectieuse minimale (MID) pour une gamme de pathogènes gastro-intestinaux [14].

Organismes	DIM
<i>Salmonella spp.</i>	$10^4 - 10^7$
<i>Salmonella typhi</i>	10
<i>Escherichia coli</i> O157 :H7	$10 - 10^2$
<i>Vibrio cholerae</i>	10^3
<i>Giardia intestinalis</i>	$10 - 10^2$
<i>Cryptosporidium paroum</i>	$10 - 10^2$
<i>Entamoeba histolytica</i>	$10 - 10^2$
Hepatitis A virus	1 – 10 PFU

Tableau VI. Taux de réduction de la FAMT après traitement assisté par micro-ondes en %.

	Puissance (W)		
	465	1085	1200
	%	%	%
Temps (min)			
01	99,918 ± 0,004 ^a	99,973 ± 0,000 ^a	99,978 ± 0,001 ^a
03	99,971 ± 0,032 ^a	99,986 ± 0,000 ^a	99,988 ± 0,000 ^a
05	99,977 ± 0,003 ^a	99,997 ± 0 ^a	99,997 ± 0,000 ^a
07	99,994 ± 0 ^a	99,998 ± 0,000 ^a	99,999 ± 0,000 ^a
10	99,994 ± 0,000 ^a	99,999 ± 0,000 ^a	100 ± 0 ^a

a: la différence observée entre les moyennes n'est pas statistiquement significative au niveau de confiance 95% ($P > 0,05$)

Annexe IX

Tableau VII. Réduction logarithmique de la FAMT après traitement assisté par micro-ondes.

Puissance (W)	465	1085	1200
	Log	Log	Log
Temps (min)			
01	5,21 ± 0,021 ^a	4,72 ± 0,014 ^a	4,64 ± 0,056 ^a
03	4,98 ± 0,028 ^b	4,44 ± 0,049 ^b	4,37 ± 0,049 ^b
05	4,64 ± 0,070 ^c	3,74 ± 0,056 ^c	3,59 ± 0,155 ^c
07	4,08 ± 0 ^d	3,35 ± 0,070 ^d	-∞
10	3,99 ± 0,063 ^d	3,15 ± 0,212 ^d	-∞

a, b, c : la différence observée entre les moyennes est statistiquement significative au niveau de confiance 95% ($P < 0,05$).

d: la différence observée entre les moyenne est statistiquement non significative au niveau de confiance 95% ($P > 0,05$).

Annexes X

Figure 10. Variation de couleur de boue après traitement.

La boue d'épuration avant traitement			
			
La boue d'épuration après traitement par micro-ondes			
Temps/puissance	465 W	1085 W	1200 W
1 min			
3 min			
5 min			
7 min			
10 min			

Annexe XI

Tableau VIII. Taux de réduction de charge de la FAMT des dilutions 10^{-4} et 10^{-5} (%).

Temps (min)	Taux de réduction par dilution en %	
	10^{-4}	10^{-5}
20	91,25 ± 0,2 ^a	94,83 ± 1,52 ^a
30	91,5 ± 0,2 ^a	98,83 ± 1,25 ^b
40	94,47 ± 0,07 ^b	100 ± 0 ^b

a, b : la différence observée entre les moyennes est statistiquement significative au niveau de confiance 95% ($P < 0,05$).

Tableau IX. Taux de réduction de charge de la FAMT des dilutions 10^{-4} et 10^{-5} par rapport à la charge de la FAMT initiale de la SM.

Dilutions	10^{-4}	10^{-5}
Temps (min)	%	%
20	99,990 ± 0,0008 ^a	99,999 ± 0,000 ^a
30	99,991 ± 0,0004 ^a	99,999 ± 0,000 ^a
40	99,994 ± 0,0003 ^a	100 ± 0 ^a

a: la différence observée entre les moyenne est statistiquement non significative au niveau de confiance 95% ($P > 0,05$).

Annexe XII

Tableau X. La réduction logarithmique de charge de la FAMT des dilutions 10^{-4} et 10^{-5} .

Dilutions	10^{-4}	10^{-5}
Temps (min)	Log (UFC/mL ou g)	Log (UFC/mL ou g)
20	$4,24 \pm 0,01^a$	$2,97 \pm 0,14^a$
30	$4,23 \pm 0,01^a$	$-\infty$
40	$4,04 \pm 0,006^b$	$-\infty$

a, b : la différence observée entre les moyennes est statistiquement significative au niveau de confiance 95% ($P < 0,05$).

Résumé

La production excessive de boues résiduaires des différents traitements d'eaux usées potentiellement dangereuses, riches en micro-organismes pathogènes et polluants toxiques, causent de graves incidences sur la santé et l'environnement. Pour la valorisation agricole de ces boues sans risque, une méthode de traitement par micro-ondes et ultrasons ont été utilisées au laboratoire pour désinfecter la boue résiduaire et éliminer les germes pathogènes. La boue été exposés aux micro-ondes à différentes puissances (465 W, 1085 W, 1200 W) et aux ultrasons à une fréquence de 40 GHz pendant de courtes et de longues durées de temps. Les résultats obtenus montrent une réduction de 99,9% de la flore aérobique mésophile totale et jusqu'au dessous des niveaux de détection analytique ou le 100% après traitement assisté par micro-ondes et une réduction de 95% de la même flore jusqu'au dessous des niveaux de détection analytique ou le 100% après traitement assisté par ultrasons. En outre, les résultats indiquent que les conditions opératoires du four micro-ondes et ultrasons, y compris la puissance de rayonnement, l'intensité (fréquence) et le temps de contact peuvent être optimisé pour atteindre la neutralisation totale des risques biologiques. Ces technologies peuvent constituer dans le future, une alternative propre pour : i)- Le traitement des boues, ii)- La fabrication des engrais biologiques de haute valeur à zéro risque.

Mots clé : Boues résiduaires, Micro-ondes, ultrasons, Eco-désinfection, Germes pathogènes.

Abstract

The excessive production of waste sludge from the various potentially hazardous wastewater treatments, which are rich in pathogenic micro-organisms and toxic pollutants, have serious effects on health and the environment. A microwave and ultrasonic treatment methods was used in the laboratory to disinfect the waste sludge and eliminate pathogenic germs. The sludge was exposed to microwaves at different powers (465 W, 1085 W, 1200 W) and times and also exposed to ultrasound at a given frequency 40 GHz and during short and long time periods. The results obtained show a 99.9% reduction in total mesophilic aerobic flora and below analytical detection levels or 100% after microwave assisted treatment and a 95% reduction in total mesophilic aerobic flora to below analytical detection levels or 100% after ultrasound assisted treatment. In addition, the results indicate that microwave and ultrasonic operating conditions, including radiation power, intensity (frequency) and contact time, can be modified to achieve complete pathogen reduction. These technologies may constitute in the future a clean alternative for the treatment of sludge and the manufacture there from a high-value biological fertilizer at zero risk.

Key words: Waste sludge, Microwave, Ultrasound, Eco-disinfection, Pathogenic germs.

ملخص

الإفراط في إنتاج الحمأة من العلاجات المختلفة لمياه الصرف الصحي مع ما تحويه من كائنات حية دقيقة المسببة للأمراض والملوثات السامة، تسبب تأثيرات خطيرة على الصحة والبيئة. لاستغلالها في الزراعة تم استخدام طريقة معالجة بالميكروويف والموجات فوق الصوتية في المختبر لتطهير حمأة الصرف الصحي والقضاء على الجراثيم فيها. تعرضت الحمأة لفرن ميكروويف في القوى (465 واط، 1085 واط، 1200 واط) والفترات الزمنية المختلفة و أيضا الموجات فوق الصوتية على تردد معين 40 جيجا هرتز لفترات قصيرة وطويلة من الزمن. أظهرت النتائج انخفاضا بنسبة 99,9% في إجمالي الميكروبات الهوائية المعتدلة الى ما دون مستويات الكشف التحليلية أي 100% بعد المعالجة بفرن الموجات القصيرة (الميكروويف) و انخفاضا بنسبة 95% في إجمالي الميكروبات الهوائية المعتدلة الى ما دون مستويات الكشف التحليلية أي 100% بعد المعالجة بالموجات فوق الصوتية بالإضافة إلى ذلك، تشير النتائج إلى أن ظروف تشغيل فرن الميكروويف والموجات فوق الصوتية، بما في ذلك قوة الإشعاع، وكثافة التردد ومدة التعرض يمكن تعديلها لتحقيق خفض كامل للأخطار. قد تكون هذه التقنيات في المستقبل، بديلا نظيفا لمعالجة الحمأة وتصنيع الأسمدة البيولوجية ذات قيمة عالية بدون مخاطر.

كلمات البحث: الحمأة، الميكروويف، الموجات فوق الصوتية، صديقة للتطهير، كائنات حية دقيقة مسببات الأمراض.