

Contribution à l'étude du séchage solaire des boues et évaluation de la destruction thermique des micro-organismes pathogènes : cas des boues de la lagune anaérobie de la step du ZIE



**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE
DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT OPTION : EAU**

*Présenté et soutenu publiquement le [Date] par :
ASSEZO BRICE*

Travaux dirigés par : Yacouba Konate

UTER : GVEA

Jury d'évaluation du stage :

Président : Prénom NOM

Membres et correcteurs : Prénom NOM

Prénom NOM

Prénom NOM

■ *Promotion 2009-2010*

Table des matières

REMERCIEMENTS	iii
RESUME	iv
ABSTRACT	v
SIGLES ET ABREVIATION	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
Liste des tableaux.....	viii
Introduction.....	1
I. Contexte et justification de l'étude	2
I.1. contexte de l'étude.....	2
I.2. objectifs de l'étude	3
II. cadre d'étude.....	3
II.1. Description de la station d'épuration	3
II.2. climat de la zone d'étude.....	4
II.2.1. insolation de la zone d'étude	5
II.2.2. Température de la zone d'étude	6
II.2.2. humidité relative de la zone d'étude.....	6
II.2.3. vent de la zone d'étude	6
III. Généralités sur le traitement des boues d'épurations	7
III.1. types de boues	7
III.2. traitements des boues.....	8
III.2.1. Epaississement.....	8
III.2.2. Déshydratation.....	8
III.2.3. Stabilisation	9
III.2.4 Séchage solaire des boues	9
IV. Approche méthodologique.....	10
IV.1. recherche documentaire.....	10
IV.2. phase pratique.....	11
IV.3. phase de laboratoire.....	13
IV.3.1. Caractérisation des boues	13
IV.3.2. Paramètres physico-chimique.....	14

IV.3.3. Paramètres parasitologiques	14
IV.3.4. pouvoir calorifique des boues.....	14
V. Résultats et discussion	16
V.1. paramètres mesurés pendant le séchage solaire.....	16
V.2. caractérisation de boues.....	18
V.2.1. Matière sèches	18
V.3. Caractérisations physico-chimiques des boues.....	20
V.3.1. Paramètres mesurés in situ	20
V.3.2. Paramètres mesurés au laboratoire	21
V.3. Analyse comparative des parasites avant et Après séchage.	22
V.4. pouvoir calorifique des boues.....	25
VI. Recommandations et propositions	27
VI.1. Recommandations	27
VI.2. Proposition de dimensionnement d'un lit de séchage	28
Conclusion	31
Références bibliographique	32
ANNEXES.....	34

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu, le Tout Puissant, le Miséricordieux, qui nous a donné l'opportunité de mener à bien ce travail. Que toute la gloire lui soit rendue ainsi qu'à son fils Jésus christ.

Du fond du cœur, j'exprime ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce document. Que ceux qui ne verront pas figurer les leurs trouvent ma profonde gratitude à leur rencontre, car c'est grâce à eux tous que ce travail a pu avoir lieu. Qu'il me soit néanmoins permis d'évoquer les noms de mes encadreurs, sans lesquels ce mémoire n'aurait certainement pas vu le jour ou arrivé à terme :

Je citerai en premier lieu mon directeur de mémoire **Yacouba Konate**, qui, malgré ses multiples occupations a usé du peu de temps libre dont il disposait, pour me prodiguer d'importants conseils techniques afférents à mon thème de mémoire.

En second lieu, viens Messieurs, **Joseph WETHE, Didier LECOMPTE, Seyram SOSSOU, Boukary SAWADOGO**, qui en collaboration avec l'encadreur cités ci-dessus, m'ont prodigué à moi et à l'ensemble des collègues de la filière Eaux des conseils et leurs appuis techniques.

En dernier je citerai M. **Moustapha OUEDRAOGO, Mathieu KABORE, Pierre KABORE, Oumar SAWADOGO**, pour leur contribution à l'amélioration de ce travail ainsi que leur aide au laboratoire pour l'analyse des boues.

Je remercie également l'ensemble du corps professoral du 2IE sans distinction aucune, à travers la qualité de leurs enseignements.

Que le personnel du 2IE, l'ensemble des étudiants Ivoirien du 2IE voire d'autres communautés, trouvent ici mes sincères remerciements sur des relations de fraternité que nous avons échangées tout au long de mon séjour parmi eux.

RESUME

Le lagunage à microphytes est un système de traitement des eaux usées qui est simple, ne coûte pas cher, donc très bénéfique pour les pays en développement. Ce système, vu la conception de ses bassins et les processus épuratoires qui s'y déroulent, est destiné à accumuler les boues. La préoccupation majeure pour les boues des lagunes anaérobies se rapporte principalement à leurs charges parasitaires caractérisées par des concentrations très élevées en microorganismes pathogènes comme les œufs d'helminthes et les kystes de protozoaires.

Les résultats de l'étude du séchage solaire des boues de la lagune anaérobie de la step du 2IE nous a permis de montrer qu'avec une hauteur de boues de 10 cm on obtient un temps de séchage de 16 jours pour le séchage sans égouttage et 12 jours pour le séchage avec égouttage avec une siccité supérieur à 80%. De plus on obtient un abattement d'environ 60 à 70% des micro-organismes. Mais les valeurs obtenues sont encore très élevées ce qui nécessite un traitement secondaire avec leur valorisation,

Les caractéristiques physico-chimiques donnent des concentrations favorables pour une valorisation ultérieure de ses boues notamment l'épandage agricole. Concernant le pouvoir calorifique de ces boues séchées on a obtenus des valeurs de l'ordre de 9336,89 kJ/kg pour le PCI et 11712,47 kJ/kg.

Les résultats de cette étude permettront de mettre au point une technologie d'élimination des pathogènes dans les boues avant leur épandage.

Mots clés : séchage solaire, siccité, micro-organismes, pouvoir calorifique

ABSTRACT

The microphytes lagunage is a system of waste water treatment which is simple, not expensive and beneficial for developing countries. This system is intended to accumulate muds, considering the design of its basins and the processes épuratoires. Major concern for muds of the anaerobic lagoons refers mainly to their parasitic loads characterized by very high concentrations in pathogenic micro-organisms like helminths eggs and the protozoa cysts.

The results of the study of the solar drying of muds of the anaerobic lagoon of the step of the 2IE enabled us to show:

that with a height of muds of 10 cm one obtains a time of 16 days for drying without draining and 12 days drying with draining with a dryness superior to 80%,

an abattement from approximately 60 to 70% of the micro-organisms. But the values obtained are still very high what requires a secondary treatment with their valorization,

the physicochemical characteristics show concentrations favorable for a later valorization of its muds in particular agricultural spreading,

the calorific value of these dried muds is about 9336,89 kJ/kg for the NCV and 11712,47 kJ/kg

Key words: solar drying, dryness, micro-organisms, calorific value

SIGLES ET ABREVIATION

2IE :	Institut International de l'Eau et de l'Environnement
EIER :	Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural de Ouagadougou
ETSHER :	Ecole Inter-Etats des Techniciens Supérieurs de l'Hydraulique et de
BA :	Bassin Anaérobie
CREPA :	Centre Régional pour l'Eau Potable et l'Assainissement à faible coût
pH :	Potentiel Hydrogène
UEMOA :	Union Economique et Monétaire Ouest Africaine
DBO5 :	Demande Biologique en Oxygène
DCO :	Demande Chimique en Oxygène
NO₃⁻ :	Nitrate
Cr_{total} :	Chrome total
MES :	Matières en Suspension
PCI :	Pouvoir calorifique inferieur
PCS :	pouvoir Calorifique supérieur
OFEFP :	Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage
ETM :	Eléments de Trace Métallique

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma général des filières de lagunage de la station expérimentale pilote de 2IE	4
Figure 2 : situation géographique de la zone d'étude.....	5
Figure 3: Photo du Bassin Anaérobie ou a été prélevé les boues	11
Figure 4: séchage solaire sans égouttage.....	12
Figure 5 : balance de peser des boues	12
Figure 6 : Courbe d'évolution du poids et de l'épaisseur de la boue sans égouttage	16
Figure 7: Courbe d'évolution du poids et de l'épaisseur de la boue avec égouttage.....	17
Figure 8 : Pourcentage des matières sèches et teneur en eau des boues.....	19
Figure 9 : teneur en des métaux des boues	21
Figure 10 : Photo Œuf d'Ankyslostome viable	23
Figure 11:Photo Œuf d'ascaris non viable	23
Figure 12:Photo Œuf de trichirus trichiura non viable.....	24
Figure 13 : Gravier de granulométrie comprise entre 15 et 30mm.....	28
Figure 14: Galet de granulométrie comprise entre 7 et 15mm	29
Figure 15: Sable de granulométrie comprise entre 7 et 15mm.....	30

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des bassins de lagunage de la filière étudiée.....	4
Tableau 2: insolation mensuelle moyenne à Ouagadougou de 2005 à 2009	5
Tableau 3: Température mensuelle moyenne à ouagadougou de 2005 à 2009	6
Tableau 4: Humidité relative (%) mensuelle moyenne à ouagadougou de 2005 à 2009	6
Tableau 5: vitesse mensuelle moyenne à Ouagadougou de 2005 à 2009.....	7
Tableau 6: variation des températures en surface et dans le fond des boues au cours du séchage sans égouttage	18
Tableau 7: variation des températures en surface et dans le fond des boues au cours du séchage avec égouttage	18
Tableau 8: paramètres physico-chimique mesurés in situ	20
Tableau 9: Résultats des parasites observé dans les boues fraîches	22
Tableau 10: Résultats des parasites observé dans après séchage	24
Tableau 11: Résultats du pouvoir calorifique des boues sèches.....	26

Introduction

L'eau a toujours été synonyme de vie et de croissance. Cet 'or bleu' est tout d'abord essentiel à la survie de l'être humain, dont le corps en est lui-même constitué à plus de 60%. Suite à la révolution industrielle et à l'intensification de l'agriculture en réponse aux besoins d'une population croissante, la consommation mondiale d'eau n'a cessé d'augmenter depuis le début du XX^{ème} siècle. Or nul n'est sans ignorer qu'une consommation d'eau croissante correspond des rejets d'eaux usées croissantes, d'où une quantité importante d'eau à traiter. Pourtant qui dit épuration des eaux dit également production de boues (Angélique LÉONARD, 2002)

En effet l'objectif des stations a été essentiellement de garantir le rejet d'une eau de qualité définie en se préoccupant peu des boues engendrées par les procédés d'épuration. La tendance actuelle est différente dans le sens où les boues, au même titre que l'eau épurée, sont considérées comme un élément qui contribue à l'impact environnemental d'une station d'épuration.

Face au problème majeur de la gestion des boues des stations d'épuration plusieurs technologies ont été développées pour leur traitement dont le séchage des boues. Ainsi, dans le cadre de notre mémoire de fin cycle master nous allons apporter notre « **Contribution à l'étude du séchage solaire des boues et évaluation de la destruction thermique des micro-organismes pathogènes : cas des boues de la lagune anaérobie de la step du 2IE** »

I. Contexte et justification de l'étude

I.1. contexte de l'étude

Le traitement naturel des eaux usées par lagunage à microphytes constitue une technologie à moindre coût, adaptée aux réalités socio économiques des pays en voies de développement. Tout comme les autres systèmes de traitement biologique, les systèmes de lagunage à microphytes conduisent inévitablement à une production des boues plus ou moins importante selon le niveau de traitement et en fonction des caractéristiques des eaux usées à traiter. C'est le cas par exemple des lagunes anaérobies où le taux d'accumulation des boues est beaucoup plus important en raison des effluents bruts qu'elles reçoivent. La préoccupation majeure pour les boues des lagunes anaérobies se rapporte principalement à leurs charges parasitaires caractérisées par des concentrations très élevées en microorganismes pathogènes comme les œufs d'helminthes et les kystes de protozoaires. Dans bien des cas, la présence des microorganismes pathogènes dans les boues s'avère gênantes quelque soit la destination de ces boues et impose la mise en place de filières de traitement complémentaires permettant d'une part la réduction de la teneur en eau des boues (pour en diminuer la quantité à stocker et à épandre, ou améliorer leurs caractéristiques physiques) et d'autre part, pour permettre les traitements d'hygiénisation ultérieurs visant à rabattre la charge en microorganisme pathogènes.

Face à la pression réglementaire pour la réduction des risques de santé publique en matière de réutilisations des boues, le séchage solaire pourrait constituer une option de traitement primaire des boues dans un contexte climatique favorable comme le climat sahélien caractérisé par de forte insolation journalière sur une longue période sèche. Aussi, compte tenu des faibles moyens financiers dont disposent les collectivités territoriales des pays africains, l'avantage du séchage solaire permettrait de réduire les coûts de traitement des boues avec moins d'intervention humaines et sans conditionnement chimiques.

I.2. objectifs de l'étude

L'objectif principal de notre étude consistera à évaluer la faisabilité technique du séchage solaire des boues des lagunes anaérobies et ses performances en termes d'amélioration des caractéristiques physico-chimiques des boues et d'abattelements des microorganismes pathogènes.

De façon spécifique il s'agira :

- de faire un test sur deux types de séchage solaire : le premier séchage solaire sera sans égouttage, par contre le second séchage solaire avec égouttage ;
- de faire une évaluation des caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des boues avant et après séchage ;
- de proposer un dimensionnement d'une unité de séchage solaire des boues des lagunes anaérobies de la step du 2IE.

II. cadre d'étude

II.1. Description de la station d'épuration

La station d'épuration est alimentée par les eaux usées produites sur le campus du 2IE (en sont exclues les eaux usées issues des laboratoires). Elle est composée de cinq filières (Figure 1). Le débit journalier admis à l'entrée de la filière 1 est en moyenne de 55 m³/j:

- ✓ Filière n° 1 : composée en série d'un bassin anaérobie (BA), un bassin facultatif (BF) et un bassin de maturation (BM).
- ✓ Filière n° 2 : composée d'un décanteur primaire, un bassin facultatif, et un bassin de maturation.
- ✓ Filière n° 3 : un décanteur primaire, un lit bactérien rectangulaire, un décanteur secondaire, et un bassin de maturation.
- ✓ Filière n° 4 : un décanteur primaire, un lit bactérien circulaire, un décanteur secondaire, et un bassin de maturation.
- ✓ Filière n° 5 : un décanteur primaire, des bassins à macrophytes de pistia stratiote.

Les caractéristiques du bassin anaérobie de la filière 1, cadre de l'étude, sont consignées dans le tableau 1.

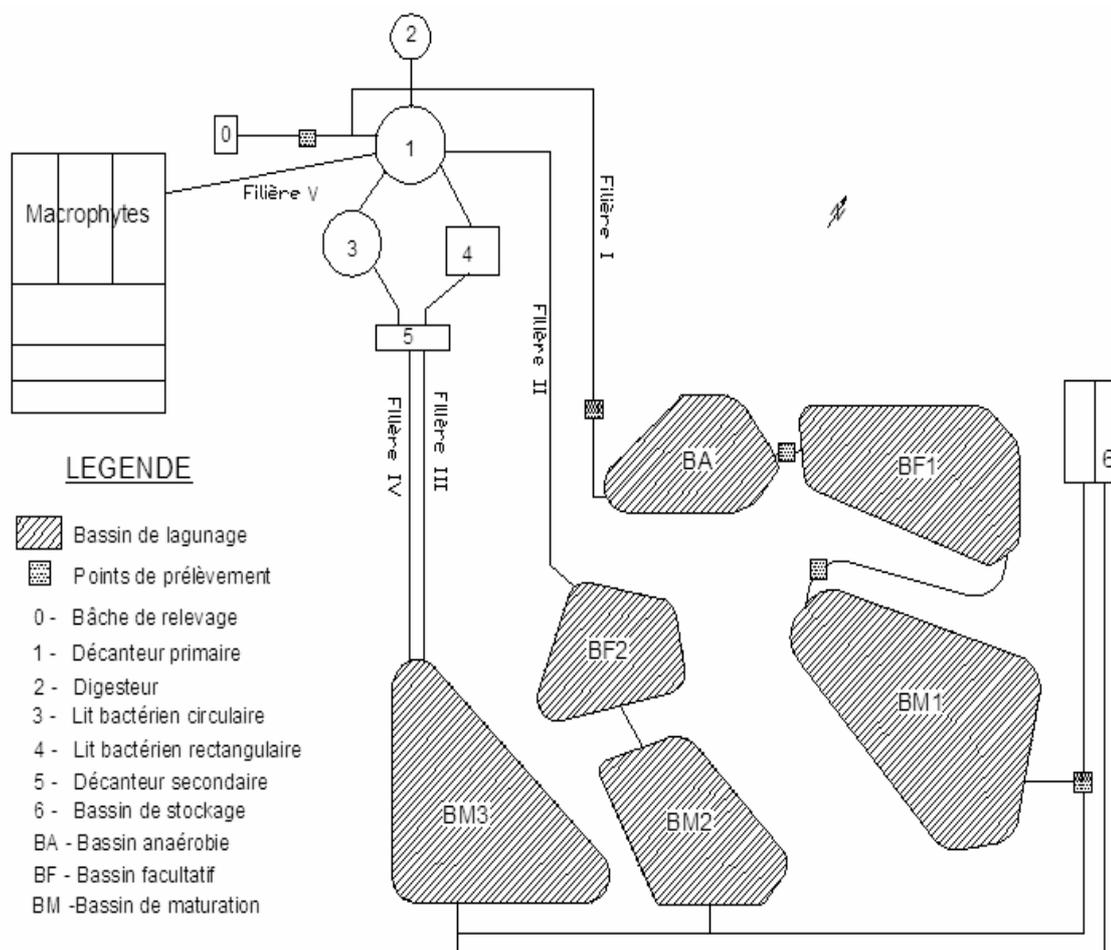


Figure 1 : Schéma général des filières de lagunage de la station expérimentale pilote de 2IE

Bassin	Profondeur (m)	Surface (m ²)	Volume (m ³)	Temps de rétention hydraulique (jours)
Bassin anaérobie	2,6	69,7	181,2	3

Tableau 1 : Caractéristiques des bassins de lagunage de la filière étudiée.

II.2. climat de la zone d'étude

L'étude a été réalisée sur le bassin anaérobie de la station pilote expérimentale (220 Équivalent-Habitant) du 2IE (Groupe EIER-ETSHER) à Ouagadougou (Figure 2). Le fonctionnement de cette station est régi par le climat soudano-sahélien de Ouagadougou

marqué par une longue période sèche, d'octobre à mai (soit huit mois), avec un ensoleillement important en durée (2 500 heures d'ensoleillement par an) et en intensité (19,5 - 22,7 MJ/m²/J) et des pertes en eau par évaporation variant de 8 mm/j en moyenne. Ainsi compte tenu des faibles moyens financiers dont disposent les collectivités territoriales des pays africains, l'avantage du séchage solaire permettrait de réduire les coûts de traitement des boues avec moins d'intervention humaines et sans conditionnement chimiques. Ce séchage solaire pourrait être favorisé par des paramètres tel que : l'insolation, la température, l'humidité relative et les vents.

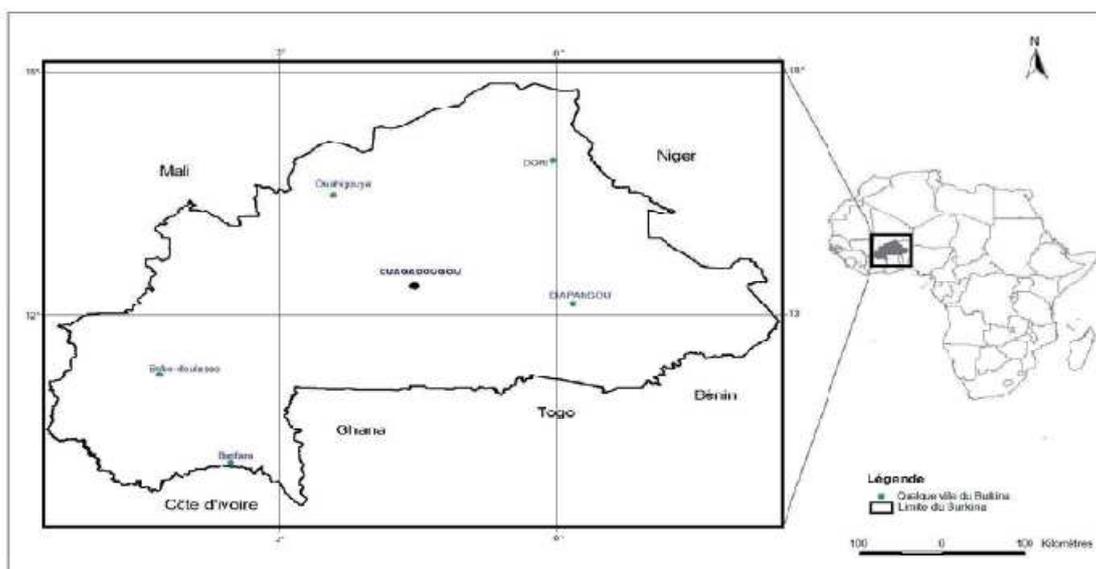


Figure 2 : situation géographique de la zone d'étude

II.2.1. insolation de la zone d'étude

Le contexte climatique favorable comme le climat sahélien caractérisé par de forte insolation journalière constitue un atout important au séchage solaire. Le tableau ci-dessous présente l'insolation moyenne mensuelle en heure à Ouagadougou de 2005 à 2009

Années	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
MOY(h)	8,7	8,6	7,5	7,3	7,7	7,7	7,5	6,5	7,3	8,8	9,5	9,5

Tableau 2: insolation mensuelle moyenne à Ouagadougou de 2005 à 2009

II.2.2. Température de la zone d'étude

La ville de Ouagadougou où s'est déroulée notre étude possède une très longue période sèche allant de Octobre à Mai (8 mois) avec des températures de plus de 40°C, ce qui constitue un avantage très important du point de vue du séchage solaire des boues.

Années	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
T Min	17,3	20,9	24,9	27,2	27,4	25,5	23,5	22,9	23,1	24,4	19,9	17,8
T Max	32,2	36,8	39,5	40,0	38,2	35,6	32,7	31,3	32,7	36,0	36,1	34,3

Tableau 3: Température mensuelle moyenne à Ouagadougou de 2005 à 2009

II.2.2. humidité relative de la zone d'étude

De même que le temps d'insolation et la température l'humidité relative de l'aire est un facteur très capital pour le séchage des boues. L'évaporation est facilitée par une faible humidité relative.

Années	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
MIN	15	13	14	21	32	42	54	60	56	38	19	16
MAX	41	40	41	56	72	81	90	94	93	82	64	51
MOY	28	26,5	27,5	38,5	52	61,5	72	77	74,5	60	41,5	33,5

Tableau 4: Humidité relative (%) mensuelle moyenne à Ouagadougou de 2005 à 2009

II.2.3. vent de la zone d'étude

CHAMMEM (2008) dans l'étude du séchage solaire sous serre de boues d'épuration par convection forcée a remarqué que l'augmentation des vitesses d'air à l'interface des boues entraîne une augmentation de la quantité d'eau évaporée donc une intensification des échanges convectifs. Par ailleurs, l'augmentation de vitesse induit un assèchement plus rapide de la surface d'échange. Au fur et à mesure que la vitesse de l'air augmente, l'effet d'assèchement devient plus dominant. La quantité d'eau évaporée en surface ainsi que l'efficacité du séchage dépendent donc de l'intensité du débit d'air soufflé et de l'état de

l'interface boues-air. Le tableau ci-dessous montre les vitesses (m/s) moyennes des vents à Ouagadougou ces 5 dernières années.

Années	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
MOY	2,7	2,7	3,0	2,6	3,1	3,8	2,6	2,2	2,1	2,1	2,0	2,3

Tableau 5: vitesse mensuelle moyenne à Ouagadougou de 2005 à 2009

III. Généralités sur le traitement des boues d'épurations

III.1. types de boues

Les boues sont composées d'éléments recueillis à différents stades de l'épuration d'une eau usée : matières minérales en suspension, matières organiques non biodégradables et microorganismes. Ainsi Selon le type de traitement mis en œuvre on distingue :

- Les boues primaires : Ce sont les dépôts récupérés par une simple décantation des eaux usées (dans les décanteurs-digesteurs par exemple). Elles présentent de concentrations élevées en matières minérales (sables, terre...) mais aussi en matière organique pouvant évoluer.
- les boues physico-chimiques : elles ressemblent aux boues primaires sauf que durant le traitement de l'eau usée, il a été rajouté un réactif (sels de fer, d'aluminium, et autres agents flocculant) pour agglomérer les fines particules et améliorer la décantation.
- les boues biologiques : elles sont aussi appelées boues secondaires, elles proviennent d'une épuration biologique des eaux (boues activées, disques biologiques, lits bactériens...). Ces boues, de concentrations médiocres (10 g/l), sont très organiques car elles sont principalement constituées de corps bactériens et de leurs sécrétions.
- Les boues mixtes constituées d'un mélange de boues primaires et boues biologiques, et proviennent pour la plupart des stations de traitement complètes.
- Les boues d'aération prolongée, obtenues sans décantation primaire avec des matières polluantes intensivement aérées. Les boues sont peu concentrées, moins organiques et donc moins susceptibles de produire des nuisances.

Aussi selon l'état physique (l'état physique, dépendant de la siccité traduit la consistance des boues) on a :

- Les boues liquides avec une siccité de 0 à 10 %.
- Les boues pâteuses avec une siccité de 10 à 25 %.
- Les boues solides avec une siccité de 25 à 85 %.
- Les boues sèches avec une siccité supérieure à 85 %.

III.2. traitements des boues

Les traitements appliqués aux boues "brutes" ont plusieurs objectifs. Ils visent, selon la dévolution finale des boues, à réduire leur volume, leur pouvoir de fermentation lié à leur teneur en matière organique, ou éventuellement à les hygiéniser, c'est-à-dire en éliminer les bactéries et parasites présents. Ces traitements permettent de limiter les nuisances olfactives, les risques sanitaires, mais aussi faciliter leur stockage, avant leur élimination ou leur valorisation. Les principales étapes du traitement des boues sont :

III.2.1. Epaissement

C'est le premier stade de traitement des boues. Son principe consiste à enlever une partie plus ou moins importante de l'eau contenue dans les boues. L'épaississement peut être gravitaire, ou s'effectuer par flottation, par égouttage ou par centrifugation. Il a pour objectif de réduire le volume des boues brutes et d'augmenter la concentration des matières (résultat : 3 à 8% de siccité selon les techniques utilisées). L'épaississement facilite en particulier les traitements ultérieurs.

III.2.2. Déshydratation

Elle peut intervenir avant ou après la stabilisation. Elle permet de pousser plus loin la réduction du volume des boues. Elle est effectuée sur des boues épaissies, stabilisées ou non, et vise à éliminer d'une façon plus ou moins poussée leur humidité. La déshydratation recourt à trois grandes familles de techniques : la filtration, la centrifugation et le lit de séchage (technique de moins en moins utilisée sous sa forme rustique). Ces procédés nécessitent un conditionnement préalable des boues, généralement par un réactif flocculant permettant d'agglomérer les matières solides et de favoriser ainsi la séparation liquide / solide. La siccité finale varie entre 12 à 40% selon les boues et les matériels utilisés.

III.2.3. Stabilisation

Elle permet de diminuer le pouvoir de fermentation des boues, c'est-à-dire soit de dégrader les matières organiques qu'elles contiennent, soit de bloquer leurs réactions biologiques. Cette opération peut aussi assurer une fonction d'hygiénisation partielle, c'est-à-dire d'élimination des agents pathogènes présents dans les boues. Elle permet, puisqu'elle évite la fermentation des boues de limiter les nuisances olfactives. La stabilisation peut être obtenue par des moyens biologiques, chimiques ou thermiques. Si elle intervient après l'épaississement, la stabilisation est souvent obtenue par digestion anaérobie. Lorsqu'elle est mise en œuvre après déshydratation, elle est réalisée par chaulage (ajout de chaux), compostage ou séchage.

III.2.4 Séchage solaire des boues

A ce jour aucune étude n'a encore été menée pour évaluer l'efficacité du séchage solaire dans le traitement des boues des lagunes anaérobies dans les pays en développement. Le type de séchage solaire réalisé est le séchage solaire sous serre bien développé en Europe, notamment en Allemagne (procédé IST) au cours des années 90 et sont en pleine expansion en France actuellement. Mais cette technologie demande de lourds investissements pour leur réalisation.

III.2.4.1. Historique du séchage solaire

L'utilisation de lits de séchage sous serre s'est développée en Europe dans les années 80. Le principe utilisé consistait à :

- ▷ Mettre les boues à l'abri des eaux de pluie;
- ▷ Créer un courant d'air orientable à l'aide de vantelles (le taux d'évaporation étant augmenté par l'effet de serre) : l'ouverture des cotés favorisant les échanges d'air, donc l'augmentation de l'eau évaporée, ce qui permettait d'éviter une atmosphère saturée empêchant l'évaporation de l'eau de se poursuivre ;
- ▷ Agiter régulièrement la boue pour évacuer l'eau capillaire emprisonnée dans les boues.

III.2.4.2. avantage du séchage solaire

Le séchage solaire s'est rapidement imposé comme une solution efficace permettant de répondre aux attentes des collectivités dans le respect des contraintes réglementaire, en offrant un choix multiple de débouchés pour le traitement des boues. Il permet entre autre :

- ▷ La réduction du volume (les volumes des boues sont réduits de 3 à 5 fois) : l'influence est direct sur les coûts de transport et sur le stockage ;
- ▷ L'hygiénisation : les températures et les temps de séjour entraînent généralement l'élimination des micro-organismes au cours de séchage ;
- ▷ La stabilisation : la diminution de la teneur en eau, rendant toutes activité biologique impossible, stabilise la boue sèche ;
- ▷ La réduction des odeurs émises : le stockage de la boue sèche n'engendre pas de problèmes d'odeur, contrairement à celui des boues fraîches ;
- ▷ L'augmentation du pouvoir calorifique des boues qui peut être intéressant en vue d'une incinération ;
- ▷ La mise en forme accompagnant le séchage : une mise en forme (granulée) de la matière séchée est souvent possible, facilitant le transport et la manutention.

III.2.4.3 contraintes du séchage solaire

Le séchage solaire dépend fortement des conditions climatiques et atmosphériques. En effet en période hivernale la serre est souvent utilisée en lieu de stockage. Ce système nécessite de la place (une parcelle ensoleillée) et du temps pour que la boue puisse sécher à la siccité désirée. Le séchage solaire présente également des contraintes par rapport aux odeurs générées. Pour un site situé à proximité d'habitations, les émissions d'odeurs lors du séchage peuvent être source de nuisances plus ou moins importante selon la direction et la force des vents dominants et la présence ou non d'un dispositif de traitement de l'air.

IV. Approche méthodologique

IV.1. recherche documentaire

La recherche documentaire s'est consacrée à la mobilisation de toutes les sources d'information relative à notre thématique. Celle-ci s'est déroulée dans les bibliothèques du 2iE (ex Groupe EIER-ETSHER) et du CREPA. Elle s'est également attardée sur la navigation internet. Pendant cette phase de l'étude, nous avons consulté des revues et des articles relatifs

aux techniques alternatives de gestion et de traitement des boues, divers rapports d'études réalisées dans le monde, des études sur le séchage solaire des boues ont également été consultés. L'imprégnation de ces différents documents a permis de saisir le contexte général de l'étude et de mieux cerner les différents enjeux surtout dans le cotexte sahélien.

A l'issu de ces travaux préparatoires a découlé la phase pratique.

IV.2. phase pratique

La phase pratique a consisté à la réalisation des caisses de séchage des boues à l'atelier. A cet effet deux types de séchage solaire ont été testés avec différentes hauteurs de boue (10cm, 15cm, 20 et 30cm): le séchage solaire sans égouttage et le séchage solaire avec égouttage. Après réalisation des caisses de séchage un prélèvement des boues dans le BA et a la mesure de paramètre in situ tel que : le pH, la conductivité ont été mesurés. L'appareillage utilisé est le multiparamètre WTW 330i.



Figure 3: Photo du Bassin Anaérobie ou ont été prélevées les boues



Figure 4: séchage solaire sans égouttage

Pour suivre l'évolution du séchage de ces boues plusieurs paramètres ont été mesurés. Ce sont :



Figure 5 : balance de peser des boues

- ▷ La température dans le fond et en surface des boues ainsi que la température journalière.
- ▷ La masse des boues au fur et à mesure que le séchage s'effectue jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de variation de la masse.
- ▷ L'épaisseur des boues au cours du séchage jusqu'à ce que l'épaisseur soit également constante
- ▷ L'humidité relative de l'air ainsi que la vitesse du vent susceptible d'influencer le séchage des boues.

IV.3. phase de laboratoire

La phase de labo a consisté à l'analyse de plusieurs paramètres avant et après séchage des boues de la station du BA.

IV.3.1. Caractérisation des boues

Pour la caractérisation des boues les paramètres déterminés sont :

- ❖ Les Matières Sèches Totales (MS) (Standard Methods, 2005)

Principe : Un échantillon bien mélangé de boues est évaporé dans une vaisselle en porcelaine de masse connue et séché jusqu'à masse constante dans un bain de sable+étuve à 105°C.

L'augmentation de la masse au dessus de celle de la porcelaine représente la masse des matières sèches totales. L'appareillage utilisé est :

- Vaisselle en porcelaine pour évaporation
- Four pour la préparation des vaisselles et la perte au feu
- Bain de sable
- Dessiccateur
- Etuve ou four de séchage de 105°C
- Balance analytique
- Seringue pour prélèvement
- Eprouvette graduée

Le cycle de séchage (pendant 30min) refroidissement-dessiccateur-pesée jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

- ❖ Les Matières Volatiles (Standard Methods, 2005)

Principe : Le résidu sec issu de l'analyse précédente est brûlé dans un four à 550°C jusqu'à masse constante. La diminution de masse représente la masse des matières volatiles. Les matières restant représentent les matières minérales. Les équipements sont les mêmes que ceux utilisés pour l'analyse des matières sèches

IV.3.2. Paramètres physico-chimique

Dans notre étude nous nous sommes limités aux paramètres pouvant vérifier l'efficacité du séchage solaire sur les boues ce sont :

- ⊃ La demande chimique en oxygène (DCO)
- ⊃ La demande biologique en oxygène (DBO₅)
- ⊃ Les nitrates NO₃⁻
- ⊃ Le phosphore total P et les ortho phosphate PO₄³⁻
- ⊃ Le potassium k⁺
- ⊃ Le calcium Ca⁺
- ⊃ Le chrome Cr
- ⊃ Le Nickel Ni
- ⊃ Le Cadmium Cd

IV.3.3. Paramètres parasitologiques

Les paramètres parasitologiques (œufs d'helminthes et kystes de protozoaires) sont déterminés par la méthode de concentration décrite par Schwartzbrod et *al* (1998). Cette méthode a été utilisée sur les échantillons de boues humides et de boues sèches. Le dénombrement des œufs d'helminthes est réalisé directement sur le culot de centrifugation, celui des kystes de protozoaires est réalisé après coloration au lugol. Les résultats sont exprimés en nombre d'œufs ou de kystes par gramme de boues exprimé en matière sèche. La viabilité des œufs et kystes n'a pas été réalisées. Les différentes étapes de la méthode de Schwartzbrod sont présentées en annexe.

IV.3.4. pouvoir calorifique des boues

Pouvoir calorifique supérieur : Quantité de chaleur, exprimée en joules par gramme, dégagée par la combustion complète de l'unité de masse combustibles, l'eau produite étant

entièrement condensée et les autres produits de la combustion ramenés à la température initiale fixée à 25°C. L'unité de masse du combustible peut être exprimée sur sec ou sur humide.

Pouvoir calorifique inférieur : Quantité de chaleur exprimée en joules par gramme, dégagée par la combustion complète de l'unité de masse du combustible, l'eau demeurant à l'état de vapeur et les autres produits de la combustion étant ramenés à la température initiale fixée à 25 °C. Il est plus directement utilisable dans les conditions normales de combustion. L'unité de masse du combustible peut être exprimée sur sec ou sur humide.

La prise d'essai est réalisée dans une bombe calorimétrique en présence d'oxygène. Le pouvoir calorifique supérieur est donc déterminé à volume constant à partir de l'élévation de température constatée compte tenu des réactions chimiques secondaires et éventuellement des pertes thermiques. Cette méthode est décrite par la norme NF M 03-005 « Détermination du pouvoir calorifique supérieur et calcul du pouvoir calorifique inférieur »

Le pouvoir calorifique inférieur est calculé ensuite à partir d'une décomposition élémentaire du combustible mesuré.

Le matériel nécessaire pour l'expérience :

- Calorimètre adiabatique.
 - Vase calorimètre en métal poli destiné à recevoir la bombe. Sa section doit être telle que la bombe soit juste immergée avec 2l d'eau environ.
 - Jaquette : récipient métallique calorifugé, et comportant une double paroi remplie d'eau.
 - Agitateur
- Bombe calorimétrique. Sa surface doit être inattaquable par les produits de combustion. Elle est destinée à recevoir la coupelle et le dispositif d'allumage électrique. Elle doit pouvoir résister à une pression de 210 bars.
- Coupelles.
- Thermomètre. Gradué en 0.01°C et muni d'un dispositif permettant les lectures à 0.0001°C
- Réfrigérateur pour maintenir l'eau utilisée à basse température.

- Fil d'allumage en platine ou en nickel-chrome de 0.10 mm de diamètre.
- Vibreur mécanique destiné à frapper doucement le thermomètre pendant 10 s toutes les 10 minutes, afin d'éviter l'adhérence de la colonne de mercure.
- Chronomètre
- Eau distillée
- Oxygène sous pression et exempt de matières combustibles.

V. Résultats et discussion

Le bassin anaérobie ou les boues ont été prélevées pour cette études présente une distribution presque régulière et l'accumulation des boues dans ce bassin se présente sous la forme d'une cloche. Le volume occupé par les boues est égale $66,12\text{m}^3$, soit 64,04 % du volume du bassin (Naon 2007).

V.1. paramètres mesurés pendant le séchage solaire

Les figures suivantes présentent les courbes d'évolution du poids et de l'épaisseur des boues pendant le séchage

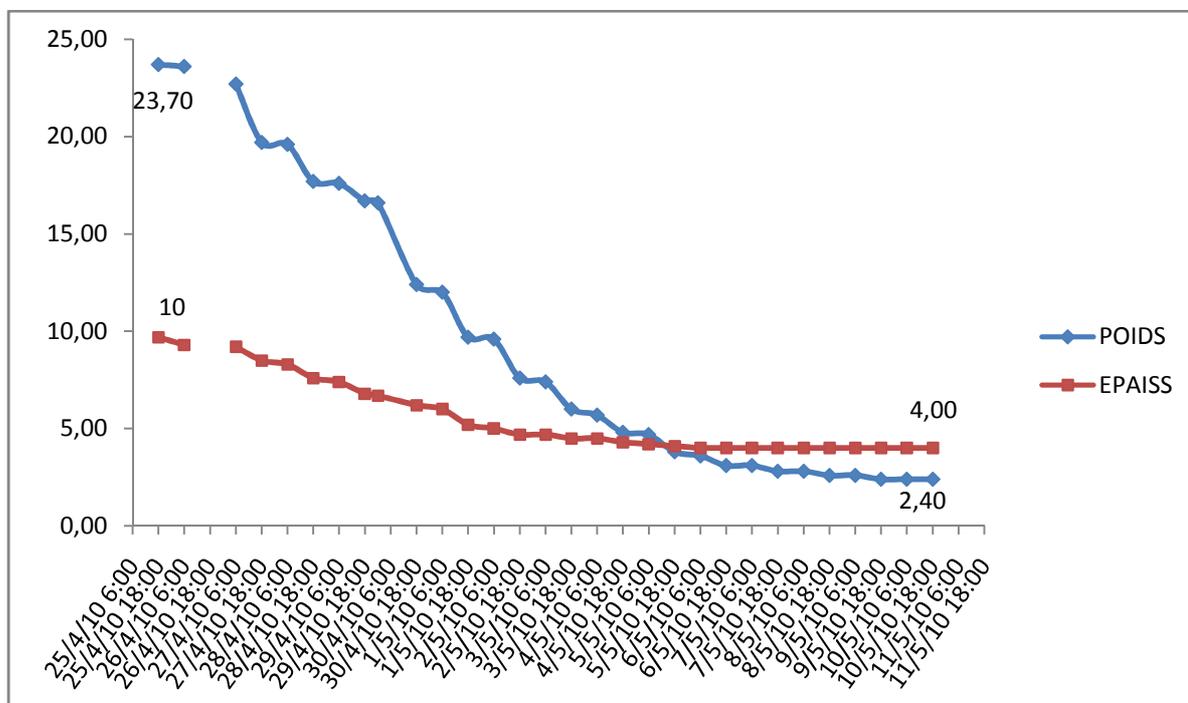


Figure 6 : Courbe d'évolution du poids et de l'épaisseur de la boue sans égouttage

Pour une épaisseur de boue de 10 cm nous constatons une réduction du poids de 89,87% du poids initial pour le séchage sans égouttage et 88,53% lors du séchage avec égouttage. Concernant les épaisseurs on a une réduction de 62% pour le séchage sans égouttage et 61% pour séchage avec égouttage pour un temps de séchage de 16 jours pour le premier et 12 jours pour le second.

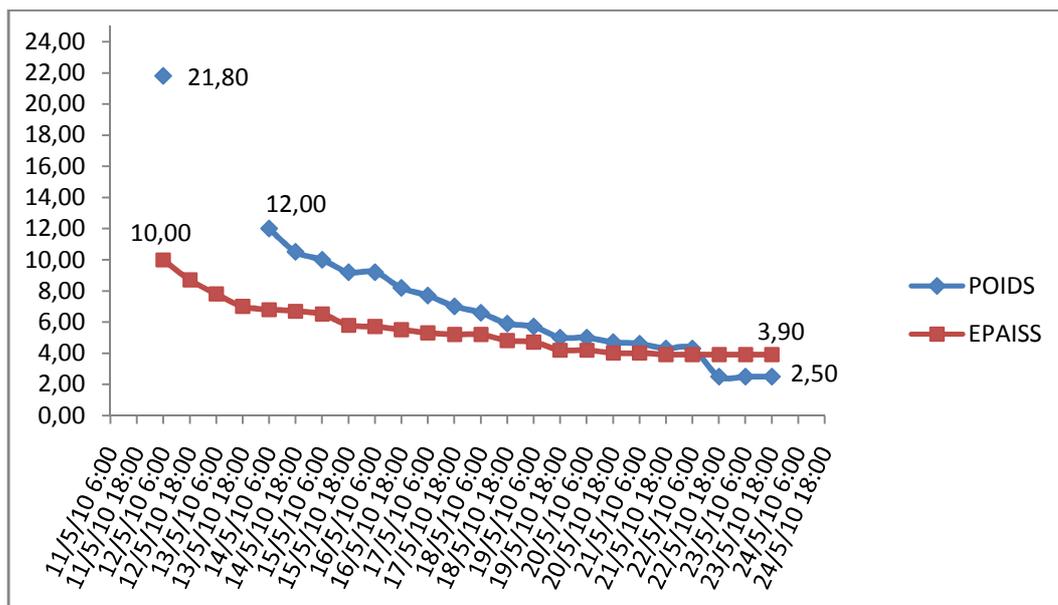


Figure 7: Courbe d'évolution du poids et de l'épaisseur de la boue avec égouttage

Epaisseur (cm)			Min	Max	Moy	Ecart
10	Fond	Jour	22,65	42,30	32,48	13,89
		Nuit	24,50	32,70	28,60	5,80
	Surface	Jour	22,44	47,65	35,05	17,83
		Nuit	22,80	27,80	25,30	3,54
15	Fond	Jour	24,60	40,60	32,60	11,31
		Nuit	26,00	31,10	28,55	3,61
	Surface	Jour	22,90	45,50	34,20	15,98
		Nuit	23,10	26,76	24,93	2,59
20	Fond	Jour	25,30	34,50	29,90	6,51
		Nuit	25,70	31,20	28,45	3,89
	Surface	Jour	23,10	37,43	30,27	10,13
		Nuit	23,06	27,60	25,33	3,21
30	Fond	Jour	28,20	34,50	31,35	4,45

Surface	Nuit	29,60	32,00	30,80	1,70
	Jour	23,20	42,10	32,65	13,36
	Nuit	23,20	27,23	25,22	2,85

Tableau 6: variation des températures en surface et dans le fond du récipient contenant les boues au cours du séchage sans égouttage

Epaisseur (cm)			Min	Max	Moy	Ecart
10	Fond	Jour	25,70	40,10	32,90	10,18
		Nuit	32,60	34,70	33,65	1,48
	Surface	Jour	25,55	46,70	36,13	14,96
		Nuit	28,60	35,95	32,28	5,20

Tableau 7: variation des températures en surface et dans le fond du récipient contenant les boues au cours du séchage avec égouttage

Nous constatons une température moyenne de 35,05 pour le séchage sans égouttage par contre une température moyenne de 36,13 pour le séchage avec égouttage, ceci pourrait s'expliquer par le fait que la température moyenne de la ville de Ouagadougou est 40°C pour le mois d'Avril et 38,2°C pour le mois de Mai

V.2. caractérisation de boues

Les boues de station d'épuration sont constituées d'eau et de matières sèches.

La siccité : est le pourcentage massique de matière sèche. Ainsi une boue d'épuration avec une siccité de 10 % présente une humidité de 90 % (Haoua AMADOU, 2007)

V.2.1. Matière sèches

Cette mesure c'est effectuer par la mise en place des échantillons dans une étuve à 105°C. Ainsi connaissant la masse initiale après perte d'eau, la teneur en matière sèche est calculée par la formule suivante :

$$Ms = 100 * \left(1 - \frac{P_1 - P_{105}}{P_0}\right)$$

P₁ : Poids porcelaine + boue (g)

P_0 : Poids de boue

P_{105} : Poids porcelaine + boue après passage à l'étuve 105°C

La siccité des boues du bassin anaérobie varie autour d'une moyenne de 7,72 % valeur comprise entre 0% et 10%, ce qui montre qu'on est dans le cas des boues liquides. Cette valeur est très proche de celle trouvée par Naon en 2007 (8,86 %) après caractérisation des boues de ce même bassin. Par contre celle des boues sèche est autour de (96,82%) qui sont supérieures à 85% ce qui témoigne de l'état de siccité très avancé.

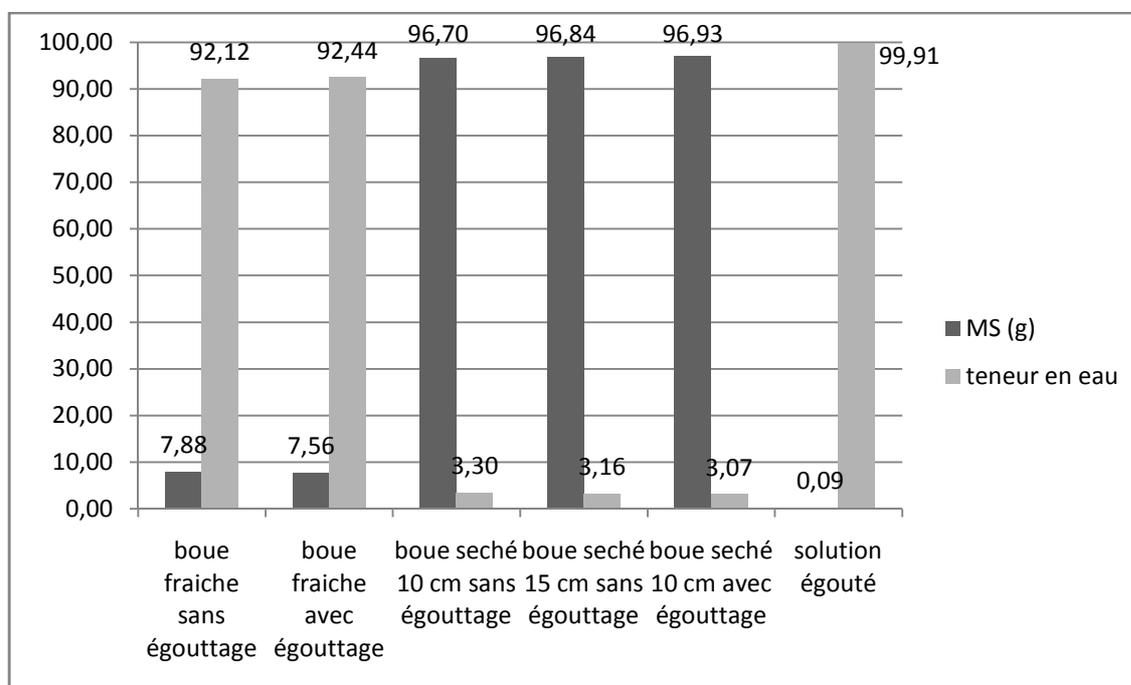


Figure 8 : Pourcentage des matières sèches et teneur en eau des boues

V.2.2 Matière volatile

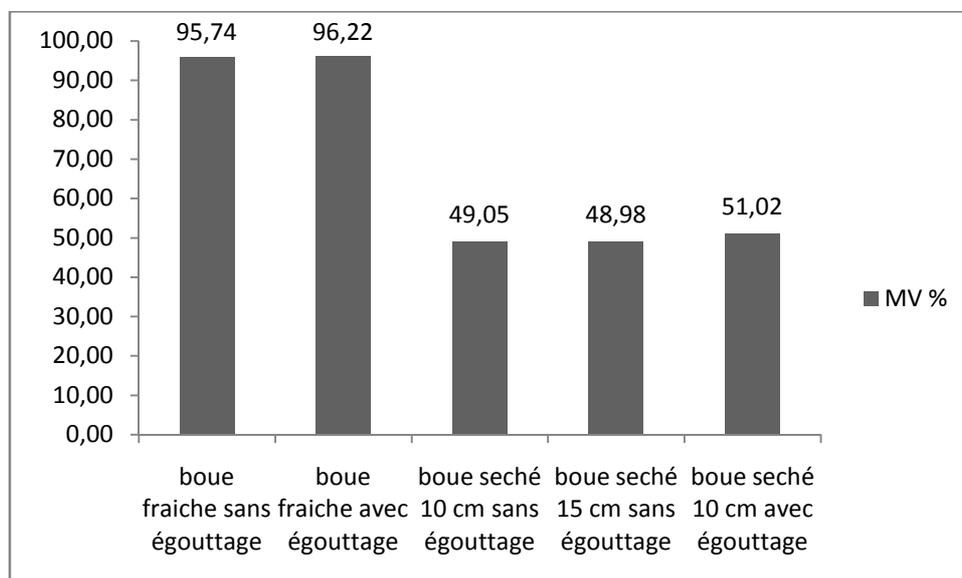


Figure 9 : Pourcentage des matières volatiles des boues

La teneur en matière volatile des boues s'exprime en pourcentage du poids des matières sèches. Elle permet d'évaluer le degré de stabilisation des boues et leur aptitude à subir divers traitements (digestion, incinération, ...) Les valeurs élevées des MV des boues fraîches (95,74 ; 96,22) peuvent s'expliquer par le fait que les boues du bassin anaérobie contiennent davantage de matières organiques du fait de l'apport des matières fraîches transportées par les effluents bruts arrivant directement dans ce bassin.

V.3. Caractérisations physico-chimiques des boues

V.3.1. Paramètres mesurés in situ

Les tableaux 6 présentent respectivement les valeurs du pH, de la conductivité et de la température des boues juste après leur prélèvement in situ du bassin anaérobie

	Min	Max
pH	6,3	6,5
conductivité (mV)	27	29
Température (°C)	29	31

Tableau 8: paramètres physico-chimique mesurés in situ

V.3.2. Paramètres mesurés au laboratoire

Paramètres (mg/g MS)	DCO	DBO	Phosp tot	ortho phosp	NO3-	Na+
boue fraiche sans égouttage	721,84	11,32	0,26	0,23	1,25	36,23
boue fraiche avec égouttage	857,36	10,81	0,54	0,54	1,62	35,13
boue séchée 10 cm sans égouttage	265,32	6,21	0,31	0,17	0,31	11,39
boue séchée 15 cm sans égouttage	496,49	7,31	0,29	0,24	0,58	11,70
boue séchée 20 cm sans égouttage	550,65	7,81	1,82	0,34	1,30	29,94
boue séchée 10 cm avec égouttage	768,04	6,51	1,30	0,30	1,04	72,90
solution égoutté (mg/l)	302,25	4	0,1	2,97	0,6	56

Tableau 6 : Résultats de paramètres physico-chimique après analyse des boues

Les valeurs élevées des DCO sont due au fait que le bassin anaérobie reçoit directement les eaux brute et ils rendent compte de la quantité des principaux éléments carbonés biodégradables ou non, susceptibles d'être oxydés dans le bassin

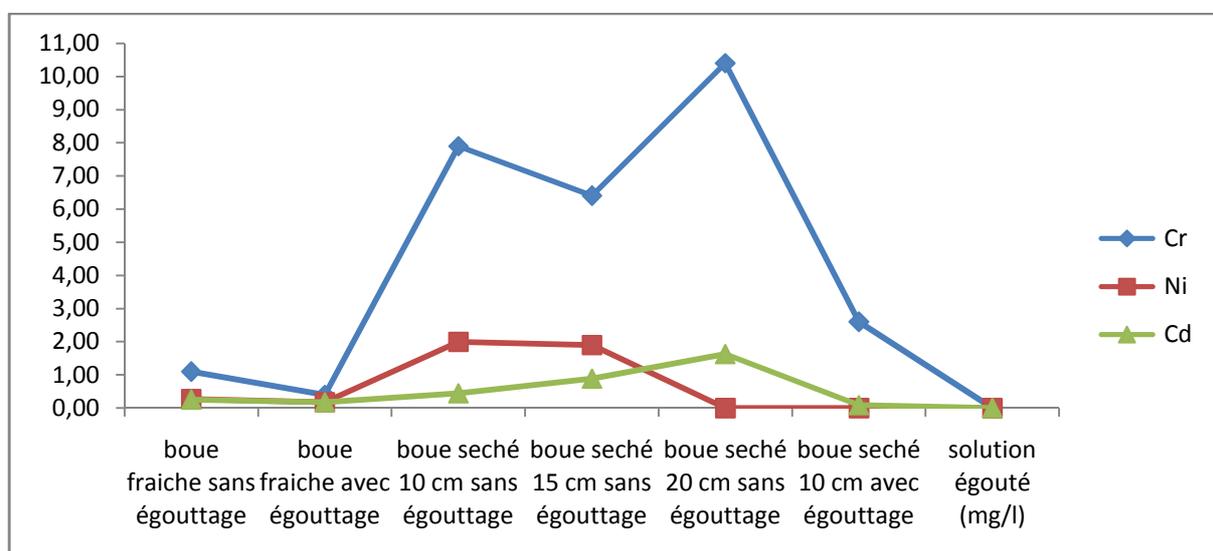


Figure 9 : teneur des métaux des boues (mg/kg MS)

L'observation du graphique de la figure 9 montre qu'il y a un fort taux de métaux dans les boues sèches par contre on a de faibles concentrations dans les boues fraiche. Une étude menée sur les éléments traces métalliques (ETM) à l'Ile de la Réunion sur les boues

mentionnent que les boues ne doivent pas être épandues sur les terrains dont le pH avant épandage est inférieur à 6 alors que les mesure in-situ des boues on montré des valeurs de pH supérieur à 6. De plus les valeurs des concentrations des métaux de notre bassin sont largement inférieurs aux valeurs limite en mg/kg MS autorisé pour l'épandage des boues (Cr : 2 ; Ni : 50 ; Cd : 2). Les concentrations obtenues dans la solution égouttée sont presque nulle. Il en ressort donc que les sont retenus par les boues sèches. Ce qui expliquerait les fortes concentrations obtenues comparativement à celle des boues fraîches prélevées dans les mêmes conditions.

V.3. Analyse comparative des parasites avant et après séchage.

➤ **Avant séchage :**

	parasites	nb œuf/g de boue
boue fraiche sans égouttage	<i>Entamoeba histolitica</i>	7100
	<i>Ankylostoma duodenale</i>	2840
	<i>Ascaris lumbricoides</i>	3124
	<i>Trichuris trichiura</i>	1420
boue fraiche avec égouttage	<i>Ascaris lumbricoides</i>	11076
	<i>Trichuris trichiura</i>	426

Tableau 9: Résultats des parasites observés dans les boues fraîches

On a observé sur les boues fraîches des valeurs très élevées de parasites comme kyste *Entamoeba histoica* et comme œufs d'helminthes *Ankylostoma duedenale*, *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura*. Les études antérieures menées par Y. Konaté et al sur le même bassin confirment ces résultats.



Figure 10 : Photo Œuf d'Ankyslostome viable



Figure 11:Photo Œuf d'ascaris non viable

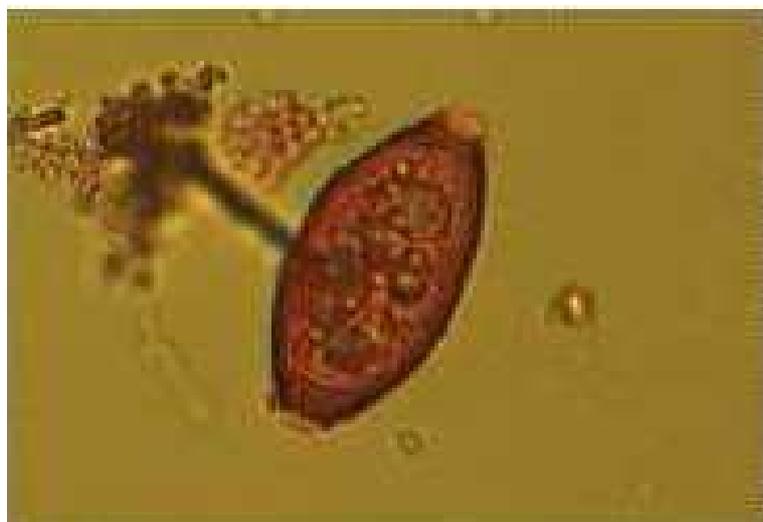


Figure 12:Photo Œuf de trichirus trichiura non viable

➤ Après séchage :

	parasites	nb œuf/g de boue
boue séchée 10 cm sans égouttage	<i>Entamoeba histolitica</i>	834
	<i>Ascaris lumbricoides</i>	237
boue séchée 15 cm sans égouttage	<i>Ascaris lumbricoides</i>	671
	<i>Trichuris trichiura</i>	79
boue séchée 20 cm sans égouttage	<i>Ascaris lumbricoides</i>	420
boue séchée 10 cm avec égouttage	<i>Trichuris trichiura</i>	671

Tableau 10: Résultats des parasites observés dans les boues après séchage

On observe une réduction de l'ordre de 60 à 70% de c'est parasites après séchage mais les valeurs obtenues constituent un risque considérable pour les boues séchées.

V.4. pouvoir calorifique des boues.

La valeur du pouvoir calorifique supérieur est mesurée à partir de la formule suivante :

$$PCS_{huile} = \frac{(4,1855 \times E \times \Delta T) - (4,1855 \times 2,3(L_i - L_f))}{m_{\text{échantillon}}}$$

PCS_{huile} en (J/g)

Avec :

E (cal/°C) : Étalonnage pour pouvoirs calorifiques. E est calculé en faisant au moins 5 déterminations concordantes du pouvoir calorifique supérieur de l'acide benzoïque de qualité « étalon pour calorimétrie ». E a été calculé au laboratoire et sa valeur est de 2460 cal/°C (voir annexe).

$\Delta T (=T_f - T_i)$: différence entre la température initiale et la température maximale en °C.

2.3*(L_i-L_f) (cal) : correction due à la chaleur de combustion du fil d'allumage : *2.3cal/cm x cm fil brûlés*

Le pouvoir calorifique supérieur à volume constant sur un échantillon anhydre est égal à :

$$\frac{PCS \times 100}{100 - h_i}$$

h_i : humidité de l'échantillon sec à l'air en pourcentage sur masse humide.

On prendra :

B) Le PCI se déduit, par le calcul, du PCS en connaissant le nombre de molécules d'eau formées et la chaleur dégagée par le passage de l'état de vapeur d'eau à l'état liquide à la température initiale.

On admet généralement pour un produit anhydre la formule moyenne approchée suivante :

$$\text{PCI anhydre} = \text{PCS anhydre} - (2508 \cdot 9H/100)$$

H étant le % massique anhydre d'hydrogène dans le combustible. On prendra $H = 4,15$ est la valeur trouvée moyenne trouvée lors de la caractérisation de boues d'épuration municipales de différentes sources en Thailand des analyses proches et finales ».

Le tableau ci-dessous donne comme valeur moyenne du PCI : 9336,85 kJ/kg et PCS : 11712,47 kJ/kg ces valeurs sont très proches du pouvoir calorifique des boues d'épuration séchées qui sont ajoutées comme combustible de substitution et comme matière première de remplacement dans des cimenteries en Suisse. Elles ont un pouvoir calorifique de l'ordre de 10 MJ/kg (OFEFP Berne, 2004)

	PCI (kJ/kg)	PCS (kJ/kg)
boue séchée 10 cm sans égouttage	8143	10600
boue séchée 15 cm sans égouttage	12526	14984
boue séchée 20 cm sans égouttage	6880	9011
boue séchée 10 cm avec égouttage	9797	12256
MOY	9336,85	11712,47

Tableau 11: Résultats du pouvoir calorifique des boues sèches

VI. Recommandations et propositions

VI.1 Recommandations

Le choix d'un type de destination pour les boues fait intervenir de nombreux paramètres environnementaux, techniques, géographiques, économiques...

La solution retenue devra respecter la réglementation sur l'environnement. Ainsi, la présence d'éléments indésirables dans les boues de certaines stations peut les rendre, selon les critères réglementaires impropres à la valorisation. Pour la valorisation des boues s'épuration il faut prendre les précautions suivantes :

- ✓ Les conditions de l'épandage doivent correspondre aux besoins des cultures ;
- ✓ Le pH du sol doit être supérieur à 6 ;
- ✓ Tenir un registre doit être tenu dans lequel sont inscrites les quantités de boues produites, les quantités livrées à l'agriculteur, les résultats des analyses ;
- ✓ Analyser les boues produites tous les six mois (matières sèches, matières organiques, pH, N, P, Cu, Cd, Ni, Pb, Zn) ;
- ✓ Ne pas épandre des boues sur des cultures consommées à l'état cru. Un délai de six mois entre l'épandage des boues et la culture est recommandé. Les boues ne pourront donc être épandues qu'une année sur trois lorsque le sol est laissé en jachère.

Les paramètres physico-chimiques obtenus après analyse des boues du bassin anaérobie présentent des teneurs non toxiques pour la valorisation. Le seul facteur limitant reste les pathogènes présents dans ces boues. Ainsi comme recommandation nous proposons :

- ▷ Un lit de séchage solaire pour réduire la teneur en eau qui pourrait faciliter la manutention des boues issues du bassin.
- ▷ Le compost ou Co-compostage avec ordures ménagers (paille) des boues séchés qui pourrait hygiéniser les pathogènes qui ne seront pas éliminés par le séchage solaire avant une éventuelle réutilisation comme amendement agricole.
- ▷ L'épandage des boues séchés mais seulement pour les cultures qui ne sont pas consommé à l'état cru.
- ▷ L'utilisation de boues séchées comme source d'énergie dans des fours

VI.2. Proposition de dimensionnement d'un lit de séchage

Deux types de séchage ont été mis en œuvre au cours de notre étude, l'un était sans égouttage par contre l'autre avec égouttage. Ainsi pour une surface $0,5 \text{ m}^2$ et une hauteur de $0,1 \text{ m}$ on a obtenu 16 jours pour le premier et 12 pour le second avec une siccité obtenus après séchage de plus 90%.

Les études mené pas Naon en 2007 sur ce même bassin on montré que le volume occupé par les boues est égale $66,12\text{m}^3$, soit **64,04 %** du volume total du bassin. Au regard des résultats obtenus lors des expérimentations nous proposons :

- ❖ Les mois de mars et d'avril avec des températures moyennes respectives de 39,5 et 40°C comme période de séchage,
- ❖ Trois (03) lits de séchage filtrant vu le temps réduit lors du séchage avec égouttage,
- ❖ Longueur 11m
- ❖ Largeur 10 m
- ❖ La profondeur brute du lit sera de 1,2 m répartie comme suit
 - Gravier d'épaisseur 0,25 m et de granulométrie comprise entre 15 et 30 mm



Figure 13 : Gravier de granulométrie comprise entre 15 et 30mm

- Galets d'épaisseur 0,25 m et de granulométrie comprise entre 7 et 15 mm



Figure 14: Galet de granulométrie comprise entre 7 et 15mm

- Sable d'épaisseur 0,2m et de granulométrie comprise entre 0,2 et 0,6 mm



Figure 15: Sable de granulométrie comprise entre 7 et 15mm

- Une couche de boue de 0, 2 m,
- Une revanche de 0,2 m.
- Une pente de 0,5 % pour recueillir le lixiviat

Conclusion

La présente étude menée sur le séchage solaire des boues du bassin anaérobie de la STEP du 2IE nous a permis de d'évaluer approximativement dans des conditions naturelle le temps pour les deux types de séchages (sans égouttage, avec égouttage). Nous avons obtenu pour une épaisseur de 10 cm de boue, 16 jours pour le séchage sans égouttage et 12 jours pour le se avec égouttage avec une siccité supérieur à 80%.

Il ressort après l'analyse des paramètres physico-chimique de ces boues séchés ont des concentrations qui respectent les normes de qualité des amendements organiques à usage agricole. Les résultats de l'analyse parasitologiques sur les mêmes boues ont montré qu'il a un abattement considérable des œufs d'helminthes et kystes après le séchage, mais teneurs obtenues concernant ces parasites sur les boues séchés constituent un réel danger notamment pour une valorisation immédiate sans traitement secondaire. Concernant le pouvoir calorifique des boues séchées l'étude nous a permis d'évaluer les performances de ces boues comme combustible dans un incinérateur.

Pour terminer nous suggérons :

- Etant donne les risques sanitaires que pourrait engendrer ses boues une étude pour un traitement secondaire après séchage de ces boues avant une éventuelle valorisation,
- Une étude plus poussée concernant la valorisation énergétique des ses boues.

Références bibliographique

Ouvrages et articles :

1. Angélique LÉONARD, 2002 : « étude du séchage convectif de boue de station d'épuration. Suivi de la texture par microtomographie à rayon X »
2. Haoua AMADOU, 2007 : Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaine.
3. Naon K ABDU, 2007: Accumulation et caractérisation physico-chimique des boues dans les bassins de lagunage à microphytes
4. Patricia Le Strat, GLS : Les procédés "écologiques" pour le traitement des boues urbaines
5. DEGREMONT, 1989 : « Mémento technique de l'eau : tome 1 et 2 », 9^{ème} édition.
6. CEMAGREF, 2004 : « Guide des procédés extensifs d'épuration des eaux usées adaptés aux petites et moyennes collectivités », rédigés par J.M. BERLAND, C. BOUTIN, J. DUCHEMIN, P. DUCHENE, 41 pages
7. Tebr CHAMMEM, Hatem MHIRI(2008) : Etude du séchage solaire sous serre des boues d'épuration par convection forcée
8. Standard Methods, 2005
9. MAIGA et al. 2006 : « Performances épuratoires d'une filière de trois étages de bassins de lagunage à microphytes sous climat sahélien : cas de la station de traitement des eaux usées de l'EIER » de SUD SCIENCES et TECHNOLOGIES n°14 janvier 2006

10. CEMAGREF, 2004 : « Guide des procédés extensifs d'épuration des eaux usées adaptés aux petites et moyennes collectivités », rédigé par J.M. BERLAND, C. BOUTIN, J. DUCHEMIN, P. DUCHENE, 41 pages.
11. Mohamed Hédi Romdhana, Didier Lecomte, Bruno Ladevie, Caroline Sablayrolles, « Monitoring of pathogenic microorganisms contamination during heat drying process of sewage sludge », 2009.
12. Puchong. T, Vissanu. M, Pramoch. R, Boonyarach. K, Kitipat Siemanond, Thirasak. R, « Predicting the heating value of sewage sludges in Thailand from proximate and ultimate analyses » 2005.
13. Emmanuel DOELSCH, Avril 2004 : « Eléments Trace Métallique (ETM) ; Inventaire pour l'Ile de la Reunion (sols, déchets, végétaux) ».
14. Roula SALAHEDDINR, 2005 : « Caractérisation physico-chimique et valorisation des boues résiduaire urbaine pour la confection de substrat de culture en pépinière hors sol »
15. Y. Konaté et al, performance épuratoire d'un bassin Anaérobique en climat sahélien: cas de la station d'épuration du 2IE Ouagadougou

Sites internet:

1. <http://id.erudit.org/iderudit/019163ar>
2. <http://www.reynier.com/ciaf/Pays-mono/Burkina/Geograph/Climat.html>
3. www.revues.org

ANNEXES

Annexe1 : TEMPERATURE MENSUELLE (°C), HUMIDITE RELATIVE MENSUELLE (%), INSOLATION MENSUELLE (Heures), VITESSE MOYENNE MENSUELLE DU VENT A 10 METRES (m/s)

OUAGADOUGOU AERO

Années	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	MOY
2005	18,0	23,7	27,3	28,7	27,2	25,3	23,4	22,8	23,7	23,6	20,0	17,9	23,5
2006	19,2	20,9	23,8	26,2	27,9	25,7	23,9	23,2	22,8	24,2	18,7	16,5	22,8
2007	16,5	18,8	23,6	27,5	27,5	26,4	24,0	22,7	23,1	25,3	21,4	18,3	22,9
2008	15,4	18,7	23,7	26,6	26,8	24,8	22,8	22,6	22,7	23,7	18,8	18,5	22,1
2009	17,2	22,4	26,3	26,9	27,4	25,2	23,5	23,1	23,4	25,0	20,6	17,6	23,2
MOY	17,3	20,9	24,9	27,2	27,4	25,5	23,5	22,9	23,1	24,4	19,9	17,8	22,9

TEMPERATURE MAXIMALE MENSUELLE (°C)

Années	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	MOY
2005	31,8	37,3	40,2	40,4	38,1	35,0	32,0	31,1	33,0	36,1	36,6	34,8	35,5
2006	34,6	36,6	39,8	40,6	38,6	36,7	33,5	31,5	32,5	35,4	35,4	33,2	35,7
2007	32,2	36,8	38,9	39,1	37,7	36,3	33,1	30,7	32,7	36,8	36,8	33,7	35,4
2008	30,0	35,5	39,0	39,8	38,2	35,0	31,8	31,5	32,2	35,7	36,1	34,5	34,9
2009	32,2	37,8	39,8	39,9	38,3	35,1	33,0	31,8	33,1	36,0	35,6	35,2	35,7
MOY	32,2	36,8	39,5	40,0	38,2	35,6	32,7	31,3	32,7	36,0	36,1	34,3	35,4

Contribution à l'étude du séchage solaire des boues et évaluation de la destruction thermique des micro-organismes pathogènes : cas des boues de la lagune anaérobie de la step du 2IE

HUMIDITE RELATIVE MINIMALE MENSUELLE (%)

Années	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	MOY
2005	15	15	16	23	31	43	56	60	56	36	18	16	32
2006	15	14	12	17	31	39	51	60	55	43	20	16	31
2007	15	12	12	27	35	42	52	62	56	31	19	16	31
2008	14	9	13	19	31	42	57	58	56	36	16	15	31
2009	15	14	15	20	33	44	53	59	55	41	21	18	32
MOY	15	13	14	21	32	42	54	60	56	38	19	16	31

HUMIDITE RELATIVE MAXIMALE MENSUELLE (%)

Années	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	MOY
2005	38	39	45	61	72	84	91	94	92	81	66	53	68
2006	42	39	38	48	68	80	89	95	94	86	62	50	66
2007	41	40	36	67	74	78	91	95	94	76	64	47	67
2008	41	35	40	47	71	83	92	94	93	86	65	49	66
2009	42	45	44	58	74	80	90	94	92	83	62	54	68
MOY	41	40	41	56	72	81	90	94	93	82	64	51	67

INSOLATION MENSUELLE (Heures)

Années	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	MOY
2005	7,4	7,1	7,4	8,2	8,1	7,6	7,0	6,1	7,9	9,6	8,9	10,2	8,0
2006	9,4	9,1	7,5	6,8	7,3	7,9	8,0	6,3	7,2	8,4	10,1	9,1	8,1
2007	7,8	9,7	7,4	6,2	7,3	8,0	7,7	6,2	7,5	8,8	9,1	9,1	7,9
2008	9,8	9,1	8,3	7,7	7,3	7,7	7,1	6,9	6,7	8,7	9,6	9,4	8,2
2009	8,9	8,1	7,0	7,5	8,6	7,1	7,7	7,1	7,4	8,5	9,7	9,6	8,1
MOY	8,7	8,6	7,5	7,3	7,7	7,7	7,5	6,5	7,3	8,8	9,5	9,5	8,0

VITESSE MOYENNE MENSUELLE DU VENT A 10 METRES (m/s)

Années	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	MOY
2005	2,8	2,8	4,4	2,5	3,1	2,9	2,2	1,9	1,8	1,7	1,2	1,6	2,4
2006	1,7	2,2	2,4	2,3	3,2	6,1	2,5	2,2	2,3	1,8	2,2	2,5	2,6
2007	3,3	2,7	2,8	2,6	2,9	3,6	2,7	2,4	2,0	2,2	2,2	2,6	2,7
2008	3,3	3,2	2,8	2,9	3,2	3,1	2,7	2,2	2,3	2,2	2,0	2,4	2,7
2009	2,4	2,6	2,7	2,6	3,3	3,2	2,8	2,3	2,3	2,7	2,3	2,3	2,6
MOY	2,7	2,7	3,0	2,6	3,1	3,8	2,6	2,2	2,1	2,1	2,0	2,3	2,6

Annexe2: Quantification and Viability DETERMINATION for Helminth Eggs in Sludge (Modified EPA METHOD)

J . Schwartzbrod et al., Faculty of Pharmacy, University Henri Poincaré, France, 1998

Homogenize the sludge sample for 30 seconds using a blender with 22,000 rpm

(the blended sample should be equivalent to 10 g TS ;liquid sludges may be blended undiluted ,while dewatered or dried sludges should be resuspended in tap water to give a volume of approx.400 ml

Screen the sludge through a 160 um screen with 2l of water per sample

Collect the filtrate in the same 2 –l contained

Let it settle overnight or for 3 hours (**for water ,start at this stage**)

Suck up as much of the supernatant as possible

And place the sediment in a 450 ml centrifugal flask Rinse the 2-litre contained 2 to 3 times

Centrifuge at 400 g for 3 min. (1,450 rpm)

Pour the supernatant and **resuspend** the deposit of 150 ml with ZnSO₄ Of 1.3 density

Homogenise with a spatula

Centrifuge at 400 g for 3 min.(1050 rpm)

Pour the ZnSO₄ supernatant in a 2 litre flasks and dilute it with at least 1 l of water Let it settle for 3 hours

Suck up as much of the supernatant as possible and resuspend the deposit by shaking ,empty it in 2 tubes of 50 ml and rinse 2 to 3times with deionise water place the rinsing liquid in the 50 ml tubes Centrifuges at 480 g for 3 mn.(1600 rpm)

Regroup the deposits in a 1 tube of 50 ml and centrifuge at 480 g for 3 minutes

Resuspend the deposits in a 15 ml acid /alcohol (H₂SO₄+C₂H₅OH)

Or 5 ml acetic acid solution And add 10 ml ethyl ether or 5 ml ethyl acetate

Shake and open occasionally to let out the gas

Centrifuge at 660 g for 3 min.

Suck up as much supernatant as possible to leave less than 1 ml of liquid

Quantification

Number of helminth eggs / liter = (Σ helminth eggs present / V) \times k

V = volume of initial sample sludge

K = constant related to the performance of the method (k = 1.42)

Reduce the weight of dry sludge diluted

Annexe 3 : DETERMINATION DU POUVOIR CALORIFIQUE DES COMBUSTIBLES SOLIDES

Référence: LBEB-ABH5

Objet : La procédure a pour objectif de présenter les instructions à suivre pour réaliser les mesures de pouvoir calorifique des combustibles solides.

Domaine d'application : La procédure s'applique aux combustibles solides (la biomasse solide).

Résumé de la procédure : La prise d'essai est réalisée dans une bombe calorimétrique en présence d'oxygène. Le pouvoir calorifique supérieur est donc déterminé à volume constant à partir de l'élévation de température constatée compte tenu des réactions chimiques secondaires et éventuellement des pertes thermiques. Le pouvoir calorifique inférieur est calculé ensuite à partir d'une décomposition élémentaire du combustible mesuré.

Définitions

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

Pouvoir calorifique inférieur. Quantité de chaleur exprimée en joules par gramme, dégagée par la combustion complète de l'unité de masse du combustible, l'eau demeurant à l'état de vapeur et les autres produits de la combustion étant ramenés à la température initiale fixée à 25 °C. Il est plus directement utilisable dans les conditions normales de combustion. L'unité de masse du combustible peut être exprimée sur sec ou sur humide.

Matériel

Le port de la blouse est obligatoire dans un laboratoire de chimie, celle-ci doit être portée pendant toutes les manipulations. Des lunettes de protection et des gants sont également disponibles si nécessaire.

Matériel nécessaire pour l'expérience :

Calorimètre adiabatique.

Vase calorimètre en métal poli destiné à recevoir la bombe. Sa section doit être telle que la bombe soit juste immergée avec 2l d'eau environ.

Jaquette : récipient métallique calorifugé, et comportant une double paroi remplie d'eau.

Agitateur

Bombe calorimétrique. Sa surface doit être inattaquable par les produits de combustion. Elle est destinée à recevoir la coupelle et le dispositif d'allumage électrique. Elle doit pouvoir résister à une pression de 210 bars.

Coupelles.

Thermomètre. Gradué en 0.01°C et muni d'un dispositif permettant les lectures à 0.0001°C

Réfrigérateur pour maintenir l'eau utilisée à basse température.

Fil d'allumage en platine ou en nickel-chrome de 0.10 mm de diamètre.

Vibreux mécanique destiné à frapper doucement le thermomètre pendant 10 s toutes les 10 minutes, afin d'éviter l'adhérence de la colonne de mercure.

Pipettes Pasteur

Chronomètre

Eau distillée

Oxygène sous pression et exempt de matières combustibles.

Références

Cette méthode est décrite par la norme NF M 03-005 « Détermination du pouvoir calorifique supérieur et calcul du pouvoir calorifique inférieur »

Mode opératoire

Dans un premier temps, l'appareillage est étalonné avec une pastille d'acide benzoïque. La masse en eau est déterminée (bombe calorimétrique et calorimètre).

Les échantillons sont broyés pour avoir une granulométrie inférieure à 0.2 mm, ils sont ensuite pesés à 0.1 mg près.

Introduire dans la coupelle, une masse d'échantillon permettant d'obtenir une élévation de température de 1 à 2 °C (entre 0.8 et 1g d'échantillon).

Noter la masse de l'échantillon.

Placer la coupelle sur son support et relier les 2 bornes de la bombe par un fil d'allumage de longueur ($L_i = 11\text{cm}$) et de chaleur de combustion connus (2.3 cal/cm). Ce fil devra être en contact avec la l'échantillon.

Ajuster le couvercle et le visser sur le corps de la bombe.

Charger avec précaution la bombe en oxygène jusqu'à une pression de 25 bars.

Introduire dans le vase calorimétrique une quantité d'eau suffisante pour immerger la face supérieure du couvercle de la bombe. La température de l'eau doit être stable et comprise entre 19 et 21°C . Cette quantité, vérifiée par pesée, doit être la même à 1g près que celle utilisée au cours de l'étalonnage de la bombe calorimétrique pour la détermination de la capacité calorifique effective. Elle sera de $2\,000\text{g}$.

Placer la bombe dans le vase calorimétrique et celui-ci dans la jaquette, établir les connexions, ajuster le thermomètre et mettre l'agitateur en marche.

Ajuster la température de la jaquette (bouton « *cold/manual control/hot* ») de manière à ce qu'elle soit égale à $\pm 0.01^\circ\text{C}$ près à celle du vase calorimétrique et attendre 3 minutes.

Noter la température initiale (T_i) et lancer la combustion en appuyant sur le bouton « *ignite* ».

Surveiller l'élévation de température du vase toutes les minutes jusqu'à ce que 3 lectures successives soient identiques. Noter cette température comme température finale (T_f). Les observations thermométriques seront lues à 0.001°C au moyen d'un dispositif donnant cette précision (loupe).

Retirer la bombe du calorimètre, la laisser reposer pendant 2 minutes, réduire lentement la pression à l'aide de la soupape située sur le dessus de la bombe jusqu'à la pression atmosphérique et ouvrir la bombe.

Vérifier si la combustion est complète, c'est-à-dire s'il n'y a pas de dépôt de suie à l'intérieur de la bombe ou de traces de carbone résiduel sur les parois de la coupelle.

Mesurer et noter en cm la longueur du fil d'allumage métallique qui n'a pas brûlé (L_f).

Rincer soigneusement l'intérieur de la bombe et du couvercle avec un peu d'eau distillée.

Expression de résultats ou Calculs

A) La valeur du pouvoir calorifique supérieur est mesurée à partir de la formule suivante :

$$PCS_{\text{huile}} = \frac{(4,1855 \times E \times \Delta T) - (4,1855 \times 2,3(L_i - L_f))}{m_{\text{échantillon}}}$$

PCS_{huile} en (J/g)

Avec :

E (cal/°C) : Étalonnage pour pouvoirs calorifiques. E est calculé en faisant au moins 5 déterminations concordantes du pouvoir calorifique supérieur de l'acide benzoïque de qualité « étalon pour calorimétrie ». E a été calculé au laboratoire et sa valeur est de 2460 cal/°C (voir annexe).

$\Delta T (=T_f - T_i)$: différence entre la température initiale et la température maximale en °C.

$2.3*(L_i - L_f)$ (cal) : correction due à la chaleur de combustion du fil d'allumage : $2.3 \text{ cal/cm} \times \text{cm fil brûlés}$

Le pouvoir calorifique supérieur à volume constant sur un échantillon anhydre est égal à :

$$\frac{PCS \times 100}{100 - h_i}$$

h_i : humidité de l'échantillon sec à l'air en pourcentage sur masse humide.

On prendra :

B) Le PCI se déduit, par le calcul, du PCS en connaissant le nombre de molécules d'eau formées et la chaleur dégagée par le passage de l'état de vapeur d'eau à l'état liquide à la température initiale.

On admet généralement pour un produit anhydre la formule moyenne approchée suivante :

$$\text{PCI anhyd} = \text{PCS anhydre} - (2508 \cdot 9H/100)$$

H étant le % massique anhydre d'hydrogène dans le combustible. On prendra $H = 4,15$.

Dans la pratique, le PCI d'un corps varie dans de fortes proportions suivant son degré d'humidité. La quantité de chaleur fournie diminue quand la teneur en eau du biocombustible augmente.

La formule suivante peut être utilisée pour le calcul du PCI en fonction de son humidité :

$$P_e = P_0 \times \frac{100 - h_i}{100} - 25,08h_i$$

h_i % eau dans les boues (sur base humide)

P_e , PCI à l'humidité h_i (J/g)

P_0 , PCI sur combustible anhydre (J/g)

Etalonnage du calorimètre

Pour l'étalonnage utiliser de l'acide benzoïque étalon pour PCS.

Cinq mesures sont nécessaires pour la détermination de l'équivalent en eau. Pour chaque mesure peser une pastille de 1 g d'acide benzoïque et noter la masse (soit M) avec une précision de 0.001 g (balance de précision).

Équivalent en eau :

$$E \left(\frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}} \right) = \frac{M \times \text{PCS}_{ac\ benz(etalon)} + C_{fil}}{4,1855 \times \Delta T}$$

C_{fil} (J) : correction due à la chaleur de combustion du fil d'allumage. Elle est égale à :

$$4.1855 \text{ J/cal} \times 2.3 \text{ cal/cm} \times \text{cm de fil brûlés}$$

Contribution à l'étude du séchage solaire des boues et évaluation de la destruction thermique des micro-organismes pathogènes : cas des boues de la lagune anaérobie de la step du 2IE

$\Delta T = (T_f - T_i)$: différence entre la température initiale et la température maximale en °C.

PCS_{acBenz} (étalon) = 26465 J/g

Fidélité de la méthode

<i>PCI</i>	<i>Repétabilité</i>	<i>Reproductibilité</i>
	<i>R</i>	<i>R</i>
<i>de 0 à 1 ml</i>	<i>0,1 ml</i>	<i>0,2 ml</i>
<i>De 1 à 25 ml</i>	<i>0,1 ou 1% de la moyenne des deux résultats</i>	<i>0,2 ou 5% de la moyenne des deux résultats</i>

