



M. MAGOUMBALA NGOAYO Wenceslas-Le Parfait

Optimisation du fonctionnement des lits de séchages des boues

Possibilité de valorisation des sous-produits dans le contexte des pays en voie de développement

Mémoire présenté

À l'université internationale de langue française au service
du développement africain

Université Senghor

Pour l'obtention de Master en Développement

**DÉPARTEMENT ENVIRONNEMENT
(SPECIALITÉ: GESTION DE L'ENVIRONNEMENT)**

Alexandrie
Egypte

2007



MAGOUMBALA NGOAYO Wenceslas-Le Parfait

Optimisation du fonctionnement des lits de séchages des boues

Possibilité de valorisation des sous-produits dans le contexte des pays en voie de développement

Mémoire présenté

À l'université internationale de langue française au service
du développement africain

Université Senghor

Pour l'obtention de Master en Développement

Composition du jury :

Président : Pr. Jean-Pierre REVERET (École des Sciences de la Gestion de l'UQAM, Montréal)
Examineurs : Pr. Marcel Ayté BAGLO (Administration Territorial, Benin)
Dr. Caroline GALLEZ (Université Senghor d'Alexandrie, Égypte)
Rapporteur : Pr. Abdeslam ENNABILI (Université Sidi Mohamad Ben Abdallah au Maroc)

**DÉPARTEMENT ENVIRONNEMENT
(SPECIALITÉ: GESTION DE L'ENVIRONNEMENT)**

Alexandrie
Égypte
2007

DEDICACE

*A mes soeurs défuntés **Annie OTTO** et **Fanny REDJEKRA**,
Vous avez été exceptionnelles pour moi et vous le resterez.*

Résumé

L'expérience montre que le dimensionnement, la construction et la gestion des lits de séchage plantés de roseaux, établis correctement assurent une déshydratation efficace par drainage et évapotranspiration de l'eau ainsi qu'une bonne décomposition de la matière organique. En général, des périodes opérationnelles courtes et problématiques en terme de déshydrations de charges apportées, de développement des roseaux, de minéralisation et d'odeur ainsi que d'un résiduel de boues de mauvaise qualité sont généralement associées à une mauvaise construction de la couche filtrante, à un nombre de lits et /ou une surface globale insuffisante.

Le travail proposé est d'étudier le comportement de deux types de substrats comme couches filtrantes à savoir : Sograp (sable fin) et Lafarge (sable grossier) qui répondent tous deux aux critères de choix de Dube. Nous avons également étudié le comportement de mélanges de boues en aération prolongée/matière de vidange pour apprécier leur capacité à céder l'eau par capillarité à la couche filtrante. Ces études sont faites dans le but d'améliorer la qualité de la matière organique résiduelle pour une valorisation agronomique comme amendements organiques. Et enfin nous avons étudié une possibilité de l'utilisation des matières organiques provenant des eaux usées dans les pays en voie de développement.

De cette étude, il ressort que plus le substrat filtrant est fin, plus il est sensible au colmatage. Les substrats les plus fins ont la meilleure performance filtrante. En effet, les substrats Sograp et Lafarge ont une meilleure performance avec les Boues en Aération Prolongée (BAP) qu'avec les matières de vidange (MV). Par contre la vitesse d'infiltration des MV et BAP sur Sograp est plus faible que celle de Lafarge.

Les différentes expériences montrent que la sensibilité des substrats au colmatage varie dans le même sens que les performances de filtration des substrats. Plus un substrat a de meilleures performances filtrantes, plus il est sensible. Il est alors difficile de définir le meilleur substrat ayant à la fois la meilleure performance épuratoire et étant moins sensible, un compromis est alors nécessaire en fonction des objectifs poursuivis.

Les résultats obtenus montrent aussi que l'aération pourrait avoir un effet positif sur le temps de succion capillaire qui nous renseigne sur l'aptitude d'un fluide à céder de l'eau par capillarité. Et parmi les différentes durées d'aération testées (5, 10 et 20 minutes), la durée de 20 minutes pourrait être la durée d'aération optimale.

Les ratios BAP/MV de 3 et 4 pourraient être les meilleurs et la nature de la matière de vidange influencerait plus le volume décanté par les différents ratios qui nous renseignent sur les risques de colmatage.

L'étude de l'acceptabilité sociale des matières organiques provenant des lits de séchage de boues dans le contexte des pays en voie de développement montre l'opportunité du développement de cette filière dans ces pays si les risques sanitaires sont réduits.

Mots clés : boues, matières de vidange, lits plantés, roseaux, pays en voie de développement

Table des matières

DEDICACE.....	I
Résumé.....	II
.....	V
Liste des tableaux et figures.....	VI
Sigles et abréviations.....	VIII
AVANT PROPOS.....	IX
Remerciements.....	X
Introduction générale.....	1
Partie 1 : Optimisation du Fonctionnement des lits de séchage des boues.....	3
Chapitre 1 : Analyse de la littérature.....	3
I- Configuration des lits de séchage plantés de roseaux.....	3
I.1- Spécificités des roseaux.....	4
3.1.1. Rôle des roseaux (Phragmites australis).....	5
I.2- Démarrage et fonctionnement des lits plantés de roseaux.....	8
I.3- Avantages du procédé séchage de boues par lits plantés de roseaux	
.....	8
II- Caractéristiques du sable.....	9
II .1- Texture.....	9
II.3- Diamètre d60.....	9
II.4- Coefficient d'uniformité (CU).....	9
.....	10
II.5- Coefficient de gradation (Cd).....	10
II.6- Coefficient de classement (S0).....	10
III- Influence des fines et de la minéralogie sur le colmatage.....	10
III.1- Minéralogie du sable.....	10
III.2- Colmatages.....	11
III.3- Choix de sable comme substrat filtrant.....	12
IV-1 Théorie de l'écoulement de l'hydraulique des lits d'infiltration-percolation.....	12
IV.2- Méthode de traçage.....	13
IV.2.1- Allure des figures de débits.....	13
Paramètres de l'écoulement.....	13
Recommandations techniques usuelles.....	15
Chapitre 2 : Matériel et méthodes.....	16

I.1 Essai sur colonnes.....	16
I.2. Echantillonnage des boues du bassin de séchage.....	18
I.2.1 Analyses effectuées sur les prélèvements.....	19
I.3. Analyses statistiques.....	20
Chapitre3 : Résultats et discussions.....	21
I. Caractéristiques physiques des substrats sablonneux : Lafarge et Sograp.....	21
II. Caractéristiques hydrauliques des substrats Lafarge et Sograp.....	21
II.1. Variation de la hauteur des bâchées en fonction du temps.....	21
II.2. Vitesses de ressuyage de la boue en aération prolongée et de matière de vidange sur le substrat Sograp.....	22
II.2.1. Infiltration de la boue en aération prolongée sur Sograp.....	22
II.2.2. Infiltration de la matière de vidange sur Sograp.....	23
II.3. Performances de filtration de boue en aération prolongée et de matière de vidange sur le sable Sograp.....	24
II.4. Vitesses de ressuyage de la boue en aération prolongée et de matière de vidange sur le substrat Lafarge.....	25
III. Optimisation du mélange boue en aération prolongée (BAP) et de la matière de vidange (MV).....	27
III. 1 Temps d'agitation optimal.....	27
III.2. Influence des ratios boue en aération prolongé et matière de vidange sur le volume décanté.....	28
III. 3. Influence de l'aération sur le volume décanté et le temps de succion capillaire.....	29
IV. Variation de l'humidité relative et des matières organiques dans le lit planté de roseaux.....	30
IV.1 Variation de l'humidité en fonction des profondeurs.....	32
V.2. Variation des matières organiques dans le lit de séchage.....	34
V.3. Détermination statistique du nombre optimal d'échantillon pour l'évaluation de :	35
Conclusions	37
Partie 2: Possibilité de valorisation des sous-produits des boues dans le contexte des pays en voie de développement.....	38
Chapitre 4 : Etude de la filière des sous produits des eaux usées dans les pays en voie de développement.....	42
I. Gestion des boues de vidange dans les pays en développement : état de l'art.....	43
II. Caractéristiques des boues de vidanges des pays en développement.	45

III. Procédés de traitement des boues de vidange adaptés au contexte des pays en développement.....	45
IV. Valorisation des sous produits de l'épuration par bassin planté en Afrique de l'ouest et du centre.....	47
V. Perception de l'utilisation des eaux usées dans le secteur agricole en Afrique de l'ouest et du centre.....	48
VI. Intervenants dans le secteur des boues de vidange dans les pays en développement.....	49
Références bibliographiques.....	49
Annexes	51
Annexe 1 : Dispositifs d'enregistrement de vitesse infiltration et de débit instantané et d'aération de boues et de matières de vidange.....	51
Annexe 2 : Photos d'un CST-mètre.....	52
Annexe 3 : les granulométries de Sograp et La farge.....	53
Fiche technique de Lafarge.....	53
Fiche technique de Sograp.....	54
Annexe 4 : les essais optimisation des ratios MV/BAP et l'effet de l'aération sur le temps de succion capillaire.....	55
Annexes 5 : Les courbes granulométriques de large et Sograp comparées à d'autres types de sables.....	59
Annexes 6 : les répartitions de la siccité, de la matière organique et matières organiques volatiles dans un bassin planté de roseaux pour le séchage des boues	60
Répartition de la hauteur des boues dans un bassin planté de roseaux	60
Répartition du taux de matières organiques en fonction de la profondeur des boues dans un bassin planté de roseaux.....	60
Répartition de la siccité en fonction de la profondeur des boues dans un bassin planté de roseaux.....	61

Liste des tableaux et figures

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques physiques des sables Lafarge et Sograp..	21
Tableau 2: Performances de filtration sur Sograp de BAP et de MV..	24
Tableau 3: Performances de BAP et MV sur Lafarge.....	27
Tableau 4: Valeurs d'humidité moyenne des différentes profondeurs	30
Tableau 5: Valeurs moyennes des différentes profondeurs.....	32
Tableau 6: Exemples de pratiques d'évacuation, d'utilisation et de traitement des boues de vidange dans les pays en voie de développement.....	43
Tableau 7: Comparaison des caractéristiques de boues de vidange et des eaux usées.....	45

Liste des figures

Figure 1: Lit de séchage de boues ou de matières de vidange planté de roseaux.....	4
Figure 2: Courbe caractéristique de débit en fonction du temps.....	14
Figure 3: Dispositif pour les essais dur colonne (photo en annexe 1)...	17
Figure 4: Dispositif expérimental d'analyse des paramètres des boues de lit planté de roseaux.....	18
Figure 5: Variation du niveau de bâchée en fonction du temps pour les substrats Sograp et Lafarge.....	22
Figure 6: Variation de débit de ressuyage en fonction du temps de la BAP sur Sograp.....	23
Figure 7: Variation de débit de ressuyage en fonction du temps de la MV.....	24
Figure 8: Variation de débit de ressuyage de MV sur Lafarge.....	25
Figure 9: Variation du débit de ressuyage de la BAP sur Lafarge.....	26

Figure 10: Variation du volume décanté des ratios BAP/MV à 5, 10 et 20 minutes d'agitation.....	27
Figure 11: Variation de volume décanté en fonction des ratios BAP/MV pour 3 couples différents.....	28
Figure 12: Variations du temps de succion capillaire et de volume décanté en fonction des ratios BAP/MV aérés et non aérés.....	29
Figure 13: Variation de l'humidité relative en fonction des profondeurs	32
Figure 14: Corrélation entre humidité relative et la profondeurs des boues.....	33
Figure 15: Corrélation entre la siccité et la profondeur des boues.....	33
Figure 16: Corrélation entre la siccité à un point et la profondeur des boues.....	34
Figure 17: Variation de la matière organique volatile en fonction des profondeurs.....	35
Figure 18: Variation du nombre d'individus d'un échantillon en fonction du degré de précision de l'estimation de la siccité moyenne...36	36
Figure 19: Variation du nombre d'individus d'un échantillon en fonction du degré de précision de l'estimation de la matière organique moyenne.....	36
Figure 20: Options spécifiques de traitement des boues de vidanges dans les pays en voie de développement.....	46
Figure 21: Intervenants du secteur des boues dans les pays en voie de développement.....	50

Sigles et abréviations

BAP:	Boue en Aération Prolongée
C/N:	rapport Carbone Nitrogène
Cd :	Coefficient de gradation
CU:	Coefficient d'Uniformité
D₁₀:	Diamètre effectif
D₆₀ :	Diamètre à 60%
DBO₅:	Demande Biologique en Oxygène en 5 jours
DCO:	Demande Chimique en Oxygène
MeS:	Matière en Suspension
MO:	Matière Organique
MSV:	Matière Sèche Volatile
MV:	Matière de Vidange
OMS:	Organisation Mondiale de la Santé
Ve:	Volume d'échantillon

AVANT PROPOS

L'eau n'est pas seulement essentielle pour l'utilisation domestique, mais elle l'est aussi pour l'agriculture, l'industrie, l'hydroélectricité et d'autres usages. La mobilisation des ressources en eau pour améliorer les conditions de vie ne doit pas compromettre la pérennité des écosystèmes d'importance vitale. L'allocation des ressources entre usages concurrents nécessite au préalable une gestion intégrée de la ressource en eau qui transcende les préoccupations sectorielles. La détérioration de la qualité de l'eau en amont réduit les possibilités d'utilisation de la ressource pour l'alimentation en eau en aval. De même, les rejets d'eaux usées nuisent à tous ceux qui se trouvent en aval. Si des politiques réalistes de lutte contre la pollution de l'eau ne sont pas mises en place et appliquées, ce sont les pauvres qui souffriront le plus. Il est fondamental à la fois de fournir les services aux utilisateurs de l'eau et de gérer l'eau en tant que ressource naturelle. Mais ce sont des domaines distincts qui requièrent des responsabilités clairement définies et des compétences spécifiques. L'alimentation en eau et l'assainissement doivent non seulement s'effectuer en liaison avec les autres utilisations de l'eau, mais ils doivent aussi être intégrés dans les politiques économiques nationales et dans les politiques sectorielles nationales telles que la santé, l'aménagement du territoire et les politiques énergétiques. Un développement durable nécessite la prise en compte de la dimension environnementale qui est une condition, de l'économie qui est un moyen, du social qui est un objectif à atteindre et de l'équité qui est à la fois un moyen, une condition et un objectif.

Ce travail est réalisé dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude (master en développement option : gestion de l'environnement). Il nous a permis d'entrevoir des possibilités de traitement et valorisation des boues et des matières de vidanges adaptées aux pays en voie de développement. Il nous a permis également de constater que la lutte contre la pauvreté passe par un cadre de vie sain, et le traitement des eaux usées contribue à l'amélioration du cadre de vie. La protection de l'environnement a un coût qu'il faut minimiser en adoptant des techniques efficaces et économiquement viables.

Remerciements

Au terme de notre formation à l'Université Senghor, Université de Langue française au service du développement africain, opérateur direct de la francophonie, nous tenons à exprimer toute notre gratitude à l'endroit de la francophonie qui nous a offert une bourse d'étude sans laquelle cette formation nous serait été inaccessible.

Cette formation a été possible pour nous grâce à la vision stratégique de renforcement de capacité de nos supérieurs hiérarchiques de l'Agence Centrafricaine de Développement Agricole (ACDA). Nous les remercions pour tous leur bien fait à notre égard.

Nos sincères remerciements à tout le corps académique de l'Université Senghor qui nous a gratifié d'un enseignement de qualité et de haut niveau en développement, que tous ses enseignants retrouvent ici l'expression de ma haute considération. Nous remercions particulièrement notre Directrice du Département Environnement madame **Caroline GALLEZ** qui n'a ménagé aucun effort pour nous trouver un encadrement scientifique nécessaire pour la rédaction de ce travail.

Nous tenons également à exprimer nos reconnaissance au Centre d'Etude en machinisme agricole, Génie rural et Eaux et Forêts (CEMAGREF) de Lyon qui a bien voulu nous accepter dans son équipe EPURE, ce qui nous a permis d'approfondir nos connaissances sur notre sujet de mémoire. Nos remercions particulièrement messieurs **Stéphane TROESCH et Alain LEINARD** pour leur précieux encadrement lors de notre séjour dans l'équipe CEMAGREF-Lyon. Que toute l'équipe EPURE de Lyon retrouve ici mes remerciements pour leur esprit d'équipe et leur coopération sans faille à notre endroit.

Que monsieur **ENNABILI Abdeslam** de l'Institut National des Plantes Médicinales et Aromatiques (**Université Sidi Mohamad Ben Abdallah au Maroc**) qui a bien voulu lire notre travail et qui nous a fait des suggestions, nous permettant d'améliorer la qualité de ce document, retrouve ici l'expression de notre reconnaissance.

Nous remercions également toute notre famille et tous nos amis qui ont bien voulu faire le sacrifice sentimental nous permettant de suivre cette formation. Un

remerciement particulier à monsieur **MABO Hamady** qui nous a fait découvrir l'Université Senghor et qui nous a convaincu de l'importance d'une telle formation.

Pendant les 18 mois que nous avons passés à Senghor, nous avons pu supporter toutes les difficultés grâce à la présence des amis que nous ne sommes pas près d'oublier. Nous les remercions pour le soutien moral et surtout leurs critiques constructifs qui nous a permis d'améliorer la qualité de ce document. Que toute la 10^e promotion de l'Université Senghor et particulièrement le département Environnement retrouve ici mes sincères amitiés.

A tout le personnel de l'université Senghor, mes sincères remerciements car sans vous mon séjour à Alexandrie aurait été plus difficile.

Introduction générale

L'eau est l'élément constitutif de notre environnement. Elle est une ressource vitale pour tous les êtres vivants, mais est aussi devenue avec la concentration urbaine, le récepteur et le vecteur de nos déchets. Si dans les pays en voie de développement, les eaux usées domestiques, peu contaminées par les déchets industriels sont déversées à tort directement dans le milieu récepteur ou servent à l'irrigation ; dans les pays industrialisés celles-ci sont traitées, dans la majorité des cas, dans des stations d'épuration avant d'être rejetées dans le milieu récepteur.

Le traitement intensif des eaux usées génère d'autres formes de déchets, les boues des stations d'épuration. Ces boues peuvent être valorisées en agriculture après un traitement leur permettant de répondre aux normes exigées (norme OMS, Directive européenne...), puis d'être utilisées comme fertilisants ou amendements organiques. Il existe deux principales méthodes de traitement des boues à savoir la méthode extensive peu coûteuse mais exigeante en espace et la méthode intensive coûteuse (incinération des boues), est moins exigeante en espace que la première.

Dans le contexte d'un développement durable, de l'évolution de la législation et d'une production croissante de boues de stations d'épuration, le traitement et la valorisation de ce sous-produit est actuellement indispensable. Aussi il convient de trouver une technologie propre permettant d'appréhender les besoins présents et futurs des collectivités locales et de répondre efficacement et durablement aux problèmes posés par le devenir des boues.

Le séchage de boues par lits plantés de roseaux est une des technologies attrayante de par sa simplicité de fonctionnement et ses faibles coûts d'exploitation vis-à-vis des performances atteignables. Le principe de traitement repose sur une déshydratation et minéralisation du stock de matière organique. La minéralisation est aérobie, évitant ainsi les problèmes olfactifs (dégagement de H₂S). Mais il convient de noter qu'un lit de séchage planté de roseaux peut présenter de dysfonctionnement lié à la déshydratation insuffisante, au surcharge (charge surfacique très importante), à la qualité de la boue et du résiduel sur le lit, à la construction du filtre, à la faible croissance des roseaux et de la couverture végétale insuffisante (Nielsen, 2004).

Ce travail a pour objectif général de contribuer à l'étude de la valorisation agricole des boues séchées par lits plantés de roseaux sur le plan technique et leur valorisation agricole dans le contexte des pays en voie de développement.

Notre travail consiste, dans un premier temps, à définir au laboratoire à partir des essais sur colonne les substrats les mieux adaptés aux retentions physiques et à l'optimisation de la continuité capillaire de la couche filtrante recevant les boues en aération prolongée (BAP) et les matières de vidanges (MV). Les substrats les mieux adaptés pour obtenir une siccité suffisantes seront identifiés pour la mise en place du pilote, en France, la siccité est de l'ordre de 10 à 20% alors qu'au Danemark elle atteint 40 à 50% (Liénard, A. et al, 2005). Ainsi, nous allons établir progressivement :

1. les matériaux filtrants pour chaque type de boues (boues activées et matières de vidange) sur micro-pilotes (colonnes de faible diamètre non plantées).
2. optimiser le ratio quantité BAP-MV avec comme objectif l'obtention du minimum de matière en suspension (MeS) dans le percolât sans allongement excessif du temps de ressuyage.
3. optimiser l'épaississement des boues et vérifier le ressuyage sur le matériau filtrant.

Une étude bibliographique sur l'infiltration-percolation des eaux usées sur sable et sur les lits de séchage plantés de roseaux des boues sera faite. Les méthodes utilisées pour parvenir aux différents résultats obtenus seront présentées et les résultats discutés avant de tirer toute conclusion permettant d'améliorer le traitement des boues de lits de séchage planté de roseaux pour une valorisation agricole.

Dans un second temps, une étude de la possibilité de l'utilisation des boues séchées comme amendements organiques agricoles sera faite pour évaluer l'acceptabilité sociale de l'utilisation des boues dans le domaine agricole dans le contexte des pays en voie de développement.

Partie 1 : Optimisation du Fonctionnement des lits de séchage des boues

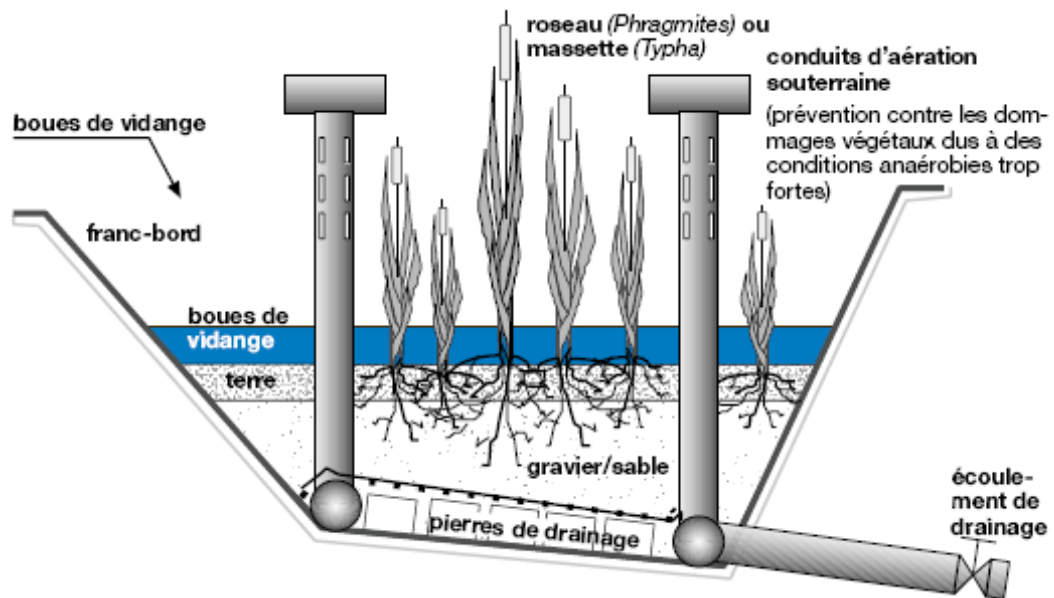
Chapitre1 : Analyse de la littérature

Le lit de séchage planté de roseaux est une des techniques extensives de traitement des boues. C'est un système de traitement biologique des eaux usées qui s'appuie sur les propriétés épuratoires des sables et aussi des rôles directs ou indirects des communautés vivantes (macrophytes, faune, bactéries...). La fiabilité de fonctionnement d'un tel système, la qualité épuratrice et la simplicité de la mise en œuvre sont tributaires des critères de conception et de fonctionnement spécifiques (Guellaf, 1999). Les critères de fonctionnement sont : l'apport de très faibles charges organiques pour limiter le développement de la biomasse par limitation de la nourriture disponible et le fonctionnement alterné de plusieurs réacteurs en parallèle pour que l'aération des interstices du matériau, nécessairement lente (s'opérant essentiellement par diffusion moléculaire), permette de rétablir au moins partiellement un taux d'oxygène compatible avec une nouvelle phase d'alimentation.

I- Configuration des lits de séchage plantés de roseaux

Le système de séchage par lits plantés de roseaux se compose d'un plancher étanche surmonté d'un massif planté de roseaux et équipé d'un réseau de drains récupérant les eaux d'égouttage des boues admises dans le bassin. Le percolât moins pollué que celui obtenu par d'autres systèmes doit néanmoins être retournés sur la filière eau de la station d'épuration.

Le media filtrant est composé, du bas vers le haut, de couches de cailloux, de gravier et de sable superposées. Ce massif est planté de roseaux (souvent de *Phragmite australis* dans les pays tempérés et *Thyha* dans les pays intertropicaux) qui coloniseraient par leurs racines l'ensemble du volume. Les boues admises dans le système sont directement extraites du bassin d'aération (ou du clarificateur) sur la base d'un cycle, défini sur un ratio (temps d'alimentation/temps de repos) optimal à la déshydratation des boues.

Figure 1: Lit de séchage de boues ou de matières de vidange planté de roseaux

Source : Koottarep, H et al (1999)

I.1- Spécificités des roseaux

Le *Phragmite australis* ou le roseau commun est un des végétaux les plus fréquents des zones humides. Il est connu comme plante des marais et appartient au groupement des hélrophytes. Il est capable de résister à des conditions de stress hydrique et salin sévères malgré la partie aérienne de la plante serait desséchée. Le roseau commun est un macrophyte constitué :

- D'un système racinaire composé de rhizomes et tiges,
- Une pousse aérienne riche en cellulose et silice qui peut atteindre 1 à 5 m de hauteur pour un diamètre à la base de 0,5 à 1,5 cm. Cette pousse est pourvue de nœuds portant des limbes à bord coupants,
- Une inflorescence,

Les caractéristiques citées ci-dessus lui confert les aspects positifs suivants :

- Une capacité drainante : le roseau assure grâce aux nombreuses ramifications des rhizomes formant un maillage serré, un bon drainage de l'eau contenue dans les boues et aussi une bonne évapotranspiration,
- Une capacité épuratoire : pour son développement végétatif, le roseau extrait des boues les minéraux nécessaires ce qui réalise ainsi une minéralisation des boues et une réduction de masse du substrat.
- Une capacité de résistance et de croissance: *Phragmite australis* par sa rusticité craint peu les conditions climatiques extrêmes et grâce à son rhizome très actif, donne naissance à des nouvelles pousses après passage par une période hivernale dans le contexte du climat tempéré.

3.1.1. Rôle des roseaux (*Phragmites australis*)

Les roseaux ont quatre rôles principaux à savoir le rôle mécanique, d'aspiration de l'eau, d'apport en oxygène et de la polymérisation des acides gras :

➤ Effet mécanique

Le développement des tiges et leur flexibilité au vent, ainsi que des rhizomes et racines qui pénètrent la couche grandissante de boues à partir de leur nœuds limitent la formation des couches colmatantes et préserveraient ainsi la filtrabilité des boues sèches. Cet effet mécanique permet d'apporter des couches successives de boues et cela pour une période de 8 à 10 ans correspondant à une hauteur cumulée pouvant atteindre 1,5 m de boues séchées (Liénard, 2005).

➤ Aspiration de l'eau

Il est probable que les roseaux améliorent la performance des lits de séchage par leur système important de rhizomes et racines qui aspirent de l'eau sur toute l'épaisseur des boues. En effet, il est connu que les racines des plantes peuvent aspirer de l'eau avec des pressions osmotiques supérieures à 16 bars en créant un gradient de concentration saline entre leurs cellules et l'extérieur par adsorption active des ions, en particulier potassium. Pour des roseaux des pressions osmotiques supérieures à 20 bars ont été observées (Rodewald-Rudescu, 1974). A l'intérieur, le gradient se poursuit vers

le cylindre central appelé xylème qui forme un réseau par lequel l'eau est transportée dans les parties aériennes de la plante. De là, elle est évacuée par la transpiration. L'énergie nécessaire pour faire passer l'eau de la phase liquide à la phase gazeuse est fournie par le rayonnement solaire.

Durant la période végétative la transpiration des roseaux est supérieure à celle de beaucoup d'autres plantes et environ le double de l'évaporation d'une surface de l'eau libre (Rodwald-Rodescu, 1974).

En milieux riches en sels (cas des boues), beaucoup de plantes peuvent augmenter la pression osmotique à l'intérieur de leur cellules et ainsi maintenir un gradient élevé par rapport au milieu extérieur. La tolérance spécifique des plantes face aux milieux salins dépend de cette capacité ainsi que de la capacité du métabolisme de la plante à supporter des concentrations élevées de sodium (Na^+). Le potassium atténue en tout état de cause les effets négatifs de la salinité sur le métabolisme et la croissance des plantes.

De très importantes variations sur la résistance au sel et sur les caractéristiques hydriques (teneur en eau et transpiration) ont été observées entre divers clones de roseaux. Elles correspondent à des milieux d'origine et des degrés de ploïdie chromosomique différents.

Le milieu d'origine semble avoir la plus grande influence sur la résistance aux sels alors que pour un même milieu de provenance, les variations de la teneur en eau de l'évaporation et de la résistance au sel semblent liées dans le sens suivant : résistance au sel, teneur en eau élevée, évaporation élevée (ceci semble être logique du point de vue physiologique). Cependant entre milieux d'origines différentes, ces variations ne pourraient pas être mises en parallèle avec les variations du niveau de ploïdie (Hubac et al, 1988).

➤ **Apports d'oxygène**

L'apport en oxygène sur toute l'épaisseur de boue permet ainsi une minéralisation aérobie. Le milieu saturé dans lequel s'enracinent les plantes aquatiques est généralement anoxique sauf à proximité des surfaces. Les plantes aquatiques ont développé un aerenchyme qui est un tissu creux allant de la tige jusqu'au bout des racines et radicules pour apporter de l'oxygène de la partie aérienne. Cet oxygène est nécessaire pour deux raisons :

- L'oxygène est indispensable pour la respiration au niveau des racines
- L'oxygène est nécessaire pour oxyder les substances phytotoxiques qui se trouvent dans l'environnement anoxique des racines (Fe(II), Mn(II), H₂S et autres produits d'une activité microbienne anaérobie (Amstrang et Amstrang, 1988).

La survie des plantes en milieu saturé dépendrait donc de leur capacité à fournir de l'oxygène pour la respiration de leurs racines mais aussi à diffuser des quantités d'oxygène suffisantes dans l'environnement des racines appelé rhizosphère.

Les quantités d'oxygènes diffusées dépendent évidemment du gradient de pression partielle qui règne entre la rhizosphère et l'atmosphère. Elles sont toutefois limitées par la capacité de transport de l'aérenchyme. Rodewald-Budescu (1974) estime que la diffusion de l'oxygène dans la rhizosphère est surtout importante pendant la période végétative aérienne et se fait uniquement par le bout des racines.

Selon Kickuth (1988), 5 à 40g d'O₂/m².j peuvent être diffusées dans la rhizosphère chez les roseaux, valeurs confirmées par Lawson (1985) à partir de considérations théoriques. Par contre Brix (1988) conteste ces valeurs qu'il juge trop élevée. Selon ses propres expériences conduites en saison hivernale, la capacité de transport d'oxygène à travers les tiges mortes ne dépasserait pas 2g/m².j dont la plus grande partie serait utilisée par la respiration des rhizomes et racines (Brix, 1989, a, b). Pour le séchage des boues, la capacité d'aération du milieu par les roseaux doit être suffisamment importante et les boues suffisamment stabilisées pour éviter que l'environnement immédiat des racines ne devienne trop réducteur.

➤ **Polymérisation des acides organiques**

La biomasse des roseaux constitue une source de lignine et d'autres substances carbonées contenant des composés aromatiques phénoliques qui sont favorables à la stabilisation biologique des boues. Ceux-ci jouent un rôle important dans l'édification des composés humiques insolubles dont ils constituent en quelque sorte l'ossature autour de laquelle s'organise l'ensemble de la molécule humique (Duchaufour, 1983). Selon Kickuth (1969) les exsudats racinaires des roseaux favoriseraient également une floculation et une polymérisation des acides organiques colloïdaux.

1.2- Démarrage et fonctionnement des lits plantés de roseaux

La phase de démarrage est cruciale, d'elle dépend la réussite et la performance du système. Pendant cette phase, l'alimentation doit être réalisée sur la base de 50 g/m²/j de matière sèche effectuée par bâchée (Aconsult, 1999). Les lits sont alimentés sur la base d'un cycle de rotation permettant le repos nécessaire au ressuyage complet.

Sur le plan de l'accumulation des matières solides, il faut prévoir environ 20 à 30 cm/an d'accroissement. Au niveau du percolât, les performances attendues sont :

- Matières en suspension (MeS) : 100 mg/L
- Demande chimique en oxygène (DCO) : 150 mg/L
- Demande biologique en oxygène (DBO) : 100 mg/L
- Les charges azotées inférieures à 10% du total traité par la station
- Les composés phosphorés inférieurs à 6% du total traité par la station
- La siccité de l'ordre de 25 à 35%
- La réduction de la masse solide totale de 25 à 30%
- La minéralisation de la matière organique qui se mesure par le rapport matière volatile/matière sèche (MV/MS) qui est de l'ordre de 45%
- Le pH est de l'ordre de 8
- Le rapport C/N est de l'ordre de 6

1.3- Avantages du procédé séchage de boues par lits plantés de roseaux

Les avantages techniques du système sont le stockage des boues de façon conforme à la réglementation. Il permet la transformation, la stabilisation et la réduction du volume des boues par minéralisation. C'est un procédé aérobie et permet le contrôle de la nuisance olfactive. Le produit final est facile à éliminer et pourrait être valorisé (compost valorisable en agriculture). Etant donné que le curage des lits se fait qu'une fois tous les 5 ou 10 ans, ce système permet une maîtrise des coûts de gestion (stockage, traitement et élimination) et sécurise la filière boues et en plus il a une bonne intégration paysagère.

Les avantages financiers sont énormes car le coût d'investissement est, selon les dispositions de constructions en France compris entre 170 à 250 €/E.H (Aconsult,1999).

II- Caractéristiques du sable

II .1- Texture

L'étude de la fraction minérale des sables est essentiellement basée sur des critères géométriques de volume et de forme des particules. Cette étude permet de prévoir la dimension des pores, leur distribution et donc la perméabilité et l'aération du massif.

La granulométrie est le résultat d'une analyse mécanique d'un échantillon de sable. De cette analyse est extrait le système de distribution de la taille des particules. Plusieurs paramètres déterminants viennent compléter la figure granulométrique.

II.2- Diamètre effectif d_{10}

Il est défini comme étant le diamètre de la maille qui laisse passer 10% du sable. Il est par conséquent un indicateur essentiel pour le choix des sables. Le d_{10} est le diamètre effectif du matériau.

II.3- Diamètre d_{60}

Le d_{60} est défini sur la figure granulométrique et correspond au diamètre laissant passer 60% de masse des grains de sables.

II.4- Coefficient d'uniformité (CU)

Le coefficient d'uniformité est un indice qui permet d'évaluer la distribution de la taille des particules. C'est le quotient entre le d_{60} et le d_{10} . La granulométrie est dite uniforme quand $CU < 2$; si $2 < CU < 5$ le sable est dit hétérogène mais la granulométrie est dite serrée puisqu'on ne sort pas du domaine de la famille des sables.

$$CU = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

II.5- Coefficient de gradation (Cd)

Il est défini comme étant le quotient du carré de d_{30} et de d_{10} multiplié par d_{60} .

$$Cd = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}}$$

Il nous renseigne sur l'effet piping qui draine des fines particules vers la base du lit d'infiltration. Hsin-Yu Shan et al.(2001) ont montré que la structure est intérieurement instable si son coefficient de gradation est plus grand que 7 et que les sols ayant un $Cd < 4$ n'ont presque aucune influence sur les performances de l'infiltration.

II.6- Coefficient de classement (S_o)

Le coefficient de classement est le rapport de d_{75} et de d_{25} , c'est un indice de variation de la pente de la figure granulométrie. D'après Musy (1991), le d_{25} et le d_{75} permettent d'évaluer les caractéristiques morphologiques de l'espace poral du sol qui influent sur le comportement de la phase liquide.

III- Influence des fines et de la minéralogie sur le colmatage

III.1- Minéralogie du sable

Le sable est constitué de minéraux stables (quartz, feldspaths, micas magnétite, biotite, andalousite, muscovite suivant le lieu d'extraction) et des éléments instables qui peuvent précipiter, dissoudre ou encore ont une capacité de rétention et de gonflement et ainsi peuvent déstabiliser le massif filtrant (calcaire et argile). Bien que la durée de fonctionnement du massif soit relativement très courte par rapport au temps de dégradation des minéraux sont considérés comme stables, Guellaf (1999) a mis en évidence l'influence néfaste d'une teneur élevée en calcaire aussi bien en milieu légèrement basique qu'acide.

III.2- Colmatages

Les particules fines sont définies comme étant celles qui passent dans un tamis de 80 μm de diamètre. Elles peuvent contenir des particules d'origine sablonneuse, schisteuse ou argileuse. Ces particules sont souvent néfastes pour l'écoulement en limitant la conductivité hydraulique du massif de sable.

Revil et al (1999), ont établi une équation mettant en évidence l'influence des fines sur la perméabilité (K) d'un massif.

$$K = K_{sd} \left(\frac{1 - \phi_v (1 - \Phi_f)}{\Phi_s} \right)^{3m}$$

Avec

- K_{sd} : perméabilité à saturation du sable lavé (sans particules fines)
- ϕ_v : teneur volumique en particules fines
- Φ_f : porosité des fines (60 à 65%)
- Φ_s : porosité du sable
- m : $m^0 + m^1 * \phi_v$ avec $1,5 < m^0 < 2$ et m^1 variable d'ajustement expérimental.

On notera que les diamètres effectifs et moyens, le coefficient d'uniformité et la porosité ont une influence sur le phénomène de colmatage.

Il y a 3 principaux types de colmatage :

Le colmatage physique : il est fortement lié à la porosité du substrat et à la concentration en matière en suspension (MeS) de l'effluent (Vigneswaran et al, 1987). D'après Lemore (1984), à l'origine, le colmatage est un phénomène mécanique tributaire de la taille des particules en suspension et de la texture des grains de sable.

Le colmatage chimique : c'est le résultat des dépôts provenant des réactions chimiques (précipitation ou altération) dues à la présence des composés instables tels que le calcaire.

Le colmatage biologique : il se développe à un âge un peu avancé d'exploitation du massif suivant le type d'alimentation, la nature de l'effluent et le développement des phases anaérobies.

Nous pouvons alors conclure que la caractérisation granulométrique et minéralogique est capitale dans le choix des substrats sableux. De ce fait la précision dans la définition des d_{10} , d_{60} , CU, teneur en fine, porosité, etc. est capitale pour un meilleur choix et afin d'aboutir à un bon rendement et un fonctionnement fiable du massif.

III.3- Choix de sable comme substrat filtrant

D'après Momeny S.R, (2003), au regard des diverses observations faites, il a conclu que les risques de colmatage sont importants dès que le d_{10} est inférieur à 0,2 mm et les fourchettes les mieux adaptées en ce qui concerne les critères de qualité de sable en infiltration-percolation sont les suivantes : $0,25 < d_{10} < 0,40$ et le $3 < CU < 6.0$ avec des teneurs en fines n'excédent pas 2,5 à 3%.

IV-1 Théorie de l'écoulement de l'hydraulique des lits d'infiltration-percolation

L'écoulement de l'eau à travers un sol ou un milieu poreux répond à la loi thermodynamique selon laquelle il résulte des différences énergétiques entre ses états initial et final. L'énergie cinétique peut être considérée comme nulle comparée à l'énergie potentielle car la vitesse de déplacement est très faible (Molle, 2003).

Le potentiel de l'eau est la somme de 4 potentiels :

- Le potentiel de gravité lié à l'action des forces de gravité
- Le potentiel matriciel dû à l'action des forces de capillarité et d'hydratation sur le volume unitaire d'eau. Elles sont créées par les effets de tensions de surface de la phase liquide et des effets aux interfaces des phases solides /fluides.
- Le potentiel osmotique lié à la présence de substances dissoutes,
- Le potentiel géostatique.

Dans le cas général, la force ionique est considérée négligeable ; la solution du sol homogène et le sol rigide.

La description des phénomènes hydrauliques réside dans le fait que le milieu est non saturé. L'alimentation est effectuée de façon pulsée périodique par la seule force de gravité mais aussi par les forces matricielles. L'intensité des forces de rétention varie d'un point à l'autre du milieu mais aussi localement au cours du temps. Cela est dû au fait que la force de rétention dépend de la teneur en eau du milieu (Molle, 2003).

Nous venons de constater que la description d'un écoulement dans un milieu poreux non saturé comme l'infiltration-percolation est relativement très complexe. Pour

pallier ce problème on utilise la méthode de traçage qui permet d'appréhender de manière plus précise le comportement hydraulique de ce procédé.

IV.2- Méthode de traçage

Le principe de traçage est d'ajouter un élément appelé traceur à la phase liquide dont on veut connaître l'écoulement afin de suivre l'évolution de cette phase par détection du traceur. Le traceur devrait être facilement détectable en petite quantité et non toxique. Il doit être neutre vis-à-vis des réactions dans le système et non retenu par la biomasse et son coût doit être raisonnable. Le chlorure de sodium, le chlorure de lithium, les colorants radioactifs sont les plus utilisés (Molle, 2003).

IV.2.1- Allure des figures de débits

Certains auteurs comme El Messaoui (2001) considèrent même que l'eau injectée peut être assimilée à un traceur d'une part et l'évolution des figures de débits en sortie des filtres comme des distributions de temps de passage d'autre part. Cette hypothèse est contestable du fait que l'eau recueillie en sortie n'est pas celle injectée, tout au moins en partie.

Paramètres de l'écoulement

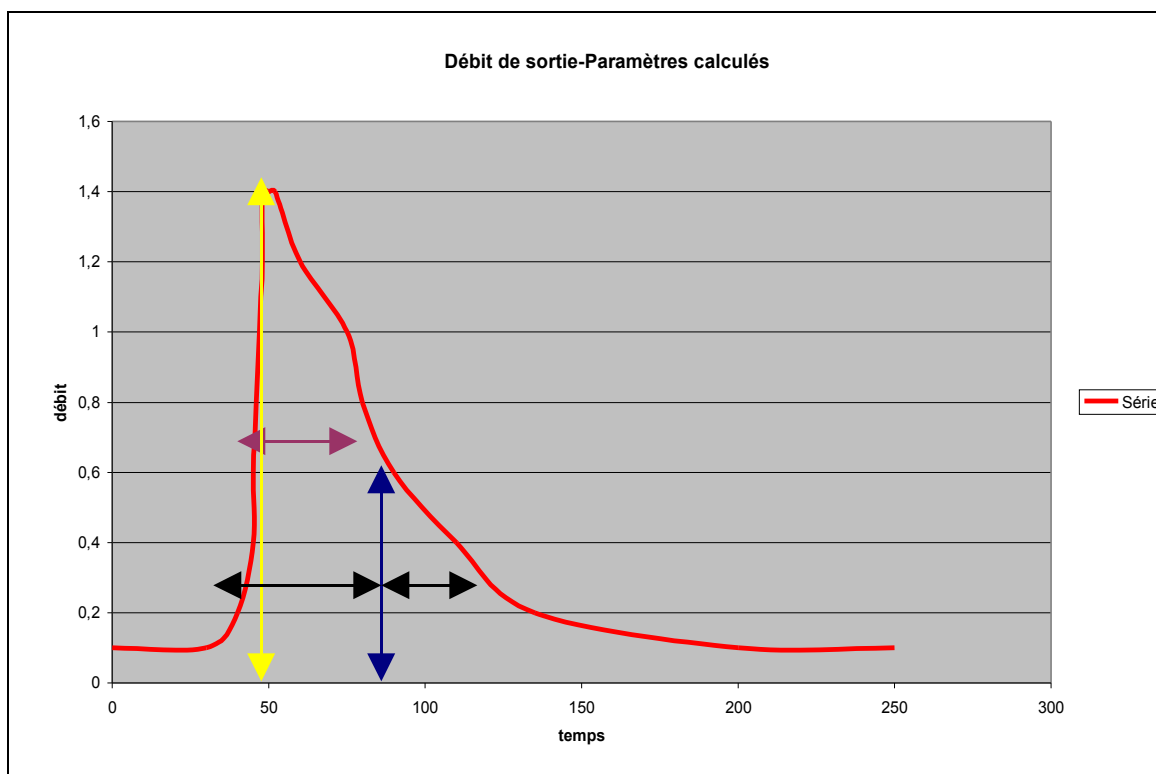
La figure de débit $Q(t) = f(t)$ ($Q(t)$ est le débit en un temps et $f(t)$ une fonction dont le variable est le temps t) permet de déterminer des figures de distribution de temps de passage. Pour chaque bâchée, les figures de débits sont considérées selon différents paramètres :

- *la variance* : qui caractérise l'étalement de la figure. Plus la valeur de ce paramètre est élevée, plus l'étalement de la figure est grand. Le réacteur tend alors vers un réacteur agité. Plus elle est faible, plus l'écoulement se rapproche de celui d'un réacteur piston.
- *l'asymétrie*: permet de connaître la distribution et la dispersion de la figure par rapport à la moyenne de temps de séjour. Si ce paramètre tend vers zéro, alors le comportement hydraulique du réacteur tend vers un type piston. Plus la valeur absolue de l'asymétrie est grande, plus le réacteur tend vers un réacteur

parfaitement mélangé. Deux cas de figure se présentent alors : l'asymétrie est négative, cela est caractéristique d'un réacteur avec un retard de réponse, ou tout du moins d'un réacteur long. Si l'asymétrie est positive, cela indique le comportement d'un réacteur court ou comportant des passages préférentiels engendrant une sortie rapide d'un important volume d'eau et une restitution plus lente de l'eau piégée dans les pores du filtre.

- *l'aplatissement* permet de savoir si l'eau se disperse de façon importante ou non dans le massif. En effet, si la dispersion est faible, cela traduit le comportement d'un réacteur piston et l'aplatissement est alors élevé. Si celui-ci est important, cela caractérise un écoulement de type réacteur agité, favorisant les mélanges et une homogénéité du milieu. L'aplatissement est alors faible.
- *le débit maximal et le temps de sortie correspondant*

Figure 2: Courbe caractéristique de débit en fonction du temps



Légende

- ◆ Asymétrie
- ◆ aplatissement
- ◆ Variance
- ◆ temps moyen de séjour

Recommandations techniques usuelles

En France la réglementation concernant l'assainissement individuel (circulaire du 20/08/84, du 21/09/84) préconise l'utilisation du sable de granulométrie comprise entre 0,25 mm et 0,60 mm avec un coefficient d'uniformité inférieur à 3,5.

L'imprécision de ce texte concernant la granulométrie montre la difficulté de sélection par la seule répartition granulométrique d'un sable qui doit assurer un compromis entre l'infiltration (granulométrie élevée) et l'épuration (granulométrie fine) (Lesavre, 1990).

Chapitre 2 : Matériel et méthodes

Nous avons effectué différentes expérimentations préliminaires à la mise en place des unités pilotes (lits de séchage plantés de roseaux). D'une part, il s'agit de déterminer les substrats pour les boues issues d'aération prolongée et les matières de vidanges dans le but d'améliorer la rétention physique des particules en suspension ainsi que la siccité par optimisation de la continuité capillaire entre la couche de surface et la couche de boues.

D'autre part, les travaux ont consisté à mettre en place un protocole d'échantillonnage sur un lit de taille réelle afin d'évaluer au mieux la nature des boues (siccité et minéralisation) en vue d'un suivi routinier et scientifique.

Ainsi, nous sommes amené à faire un échantillonnage au niveau d'un bassin pour vérifier l'homogénéité de ces paramètres (matière sèche, humidité relative, matière volatile...). Cet échantillonnage nous a également permis de calculer le nombre de prélèvements représentatifs nécessaires pour le suivi des différents paramètres (siccité, humidité relative, profondeur des boues...) boues des bassins de séchage.

1.1 Essai sur colonnes

Le but de ces essais sur colonne est de déterminer les substrats les mieux adaptés à chaque type de boues (boues en aération prolongée et matière de vidange).

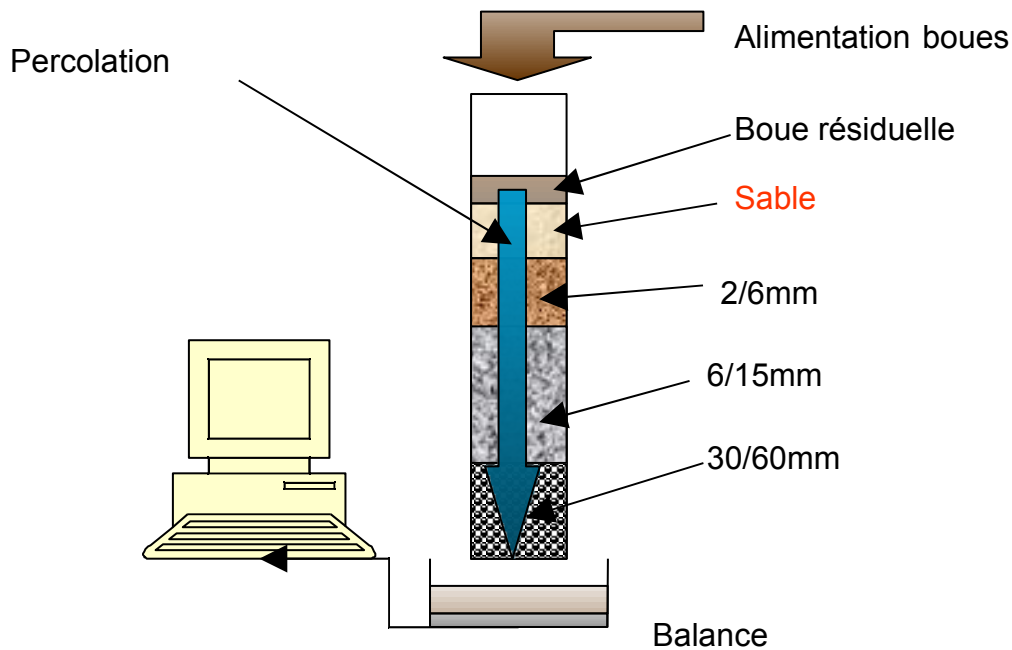
En effet, il s'agit d'optimiser la continuité hydraulique (traduite par les phénomènes de connexion capillaire) entre la couche de boue cumulée à la surface du filtre et la couche de filtration pour les différents types de boues.

Les dimensions de la colonne sont les suivantes : la hauteur est de 80 cm, et le diamètre de 20 cm. La colonne est constituée d'une succession de couche de gravier de 20/40mm (de 40 cm d'hauteur) de 6/10 mm (de 15 cm de hauteur), et sur ces couches seront disposés les différents substrats à savoir les deux types de sable (sograp et lafarge sur 5cm) pour tester leur capacité filtrante et la connexion capillaire avec la couche de boue cumulée en surface. Les caractéristiques physiques

de ces deux types de sable se trouvent en Annexe 3 et leurs courbes granulométriques en Annexe 3.

Les paramètres mesurés ont été la vitesse de ressuyage, la figure de restitution du percolât (mesurée à l'aide d'une balance enregistreuse en sortie), la vitesse d'infiltration (mesurée grâce à la sonde ultrason) et les performances sur la rétention de matière en suspension (MeS).

Figure 3: Dispositif pour les essais dur colonne (photo en annexe 1)



1.1.1. Essais d'optimisation de temps d'agitation, de définition de ratio boue en aération prolongée (BAP) et matière de vidange (MV) et de mise en évidence de l'influence de l'agitation sur la floculation

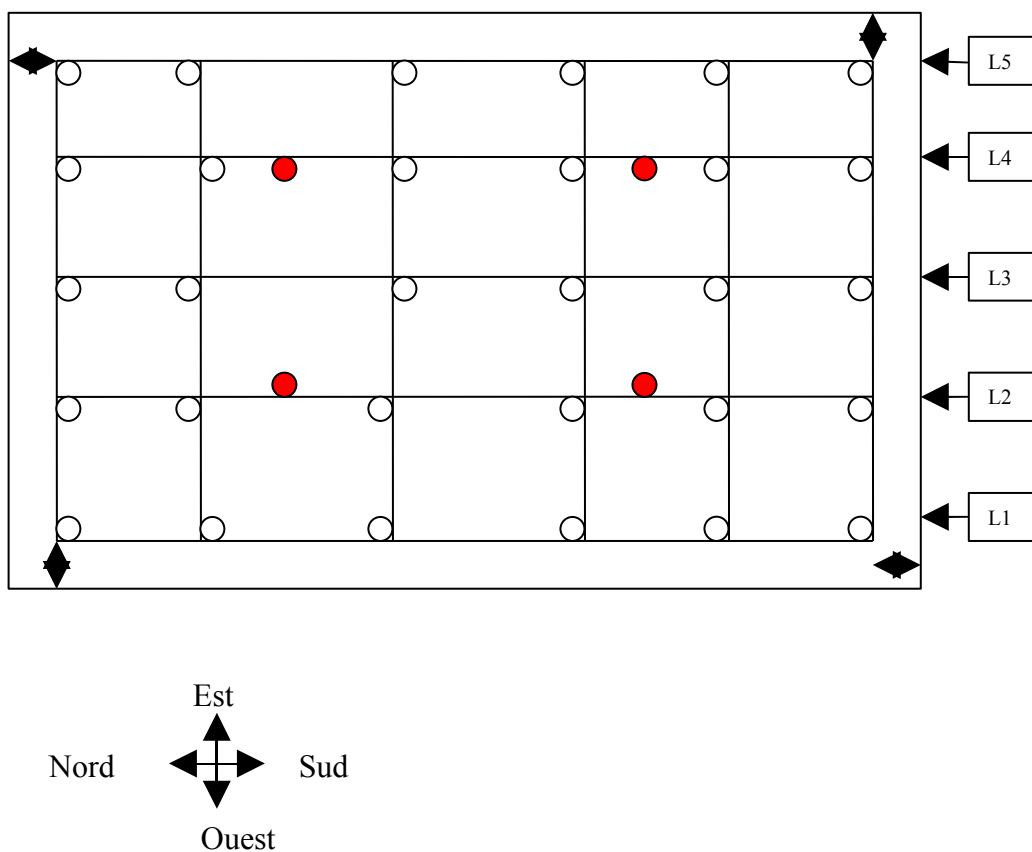
Pour nous permettre de définir le meilleur ratio, le temps d'agitation et vérifier l'influence de l'aération sur la floculation différents essais ont été réalisés. Les ratios de BAP/MV de 1 à 10 sont aérés à l'aide de Jar-tests pendant de différentes durées (5, 10 et 20 minutes) et sont laissés à la décantation pendant 20 minutes. Et d'autres ratios BAP/MV (de 1 à 10) non aéré mais agité est aussi laissé à la décantation pendant 20 minutes. Les paramètres mesurés sont le volume décanté et le temps de succion capillaire (à l'aide de CST-mètre, photo en annexe 2)

1.2. Echantillonnage des boues du bassin de séchage

Les lits de séchage plantés de roseau sont constitués de 8 bassins, chacun a une dimension de 25m x 19m (475 m²). Le but de l'échantillonnage est de mesurer l'homogénéité des boues au niveau des bassins. Pour avoir un échantillon représentatif, les prélèvements se feront à la tarière comme le montre la figure 3 ci-dessous. Afin de minimiser les effets de bord, nous commençons les prélèvements à un mètre du bord. Nous avons quadrillé le bassin et les points de prélèvements sont les intersections des droites. Pour faciliter les prélèvements, nous avons fait l'échantillonnage du seul bassin au stade de repos avancé (7 semaines de repos).

Pour chaque prélèvement nous distinguons suivant les profondeurs les boues de surface (H), les boues médianes (M) et les boues de profondeur (B).

Figure 4: Dispositif expérimental d'analyse des paramètres des boues de lit planté de roseaux



Légende

● Cheminée d'alimentation

○ Lieu de prélèvement des échantillons

◄► Bord d'un mètre

□ → Numéro de ligne et sens de numérotation des prélèvements

Pour le bassin choisi nous aurons $5 \times 6 = 30$ échantillons.

1.2.1 Analyses effectuées sur les prélèvements

La siccité

Pour chaque échantillon, nous mesurons le taux d'humidité par deux méthodes différentes. La première méthode est la classique qui consiste à obtenir la masse d'échantillon humide (M_h) avant de le mettre dans une étuve à 105°C pour évaporer l'eau afin d'obtenir la masse sèche (M_s). La différence entre la masse humide et la masse sèche ($M_h - M_s$) donne la masse de l'eau et le rapport entre la masse de l'eau et la masse de l'échantillon représente le taux d'humidité relative ($T(H)$). La siccité est obtenue en soustrayant à un le taux d'humidité relative.

$$T(H\%) = \frac{(M_h - M_s)}{M_h} \times 100 \quad (1)$$

La deuxième mesure se fait avec une micro-lance qui donne par lecture directe la capacité du condensateur et à l'aide des figures d'étalonnage (de température ou d'humidité) on définit le taux d'humidité. L'objectif poursuivi est d'établir la figure d'étalonnage de l'humidité. Le principe de fonctionnement de l'humidimètre figure en annexe.

Matière volatile

La soumission des échantillons à une température de 550°C nous permet, par différence de poids entre la matière sèche à (105°C) et la matière sèche à 550°C de mesurer les matières sèches volatiles (MSV).

$$T(MSV) = \frac{(M_s - MSV)}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

1.3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont pour but de vérifier l'homogénéité de la boue au niveau de chaque bassin. Pour ce faire, les moyennes de chaque paramètre seront calculées ainsi que les écarts types.

Une comparaison des paramètres en fonction de la profondeur sera également faite. Il est aussi important de calculer et comparer les moyennes des différents paramètres.

Le logiciel utilisé pour cette fin est Excel (2003).

Chapitre3 : Résultats et discussions

I. Caractéristiques physiques des substrats sablonneux : Lafarge et Sograp

Le Lafarge a un d_{10} de l'ordre de 0,880mm ($>0,15$ mm) et un d_{60} de l'ordre 2,097mm (<1 mm) estimés par la méthode d'interpolation linéaire. De ces deux valeurs nous déterminons la CU qui est de l'ordre de 2,385 ($<3,5$). Les fines particules ne représentent que 0,36% du total ($<2,5\%$) et la porosité s'élève à $32,1\% \pm 8,46\%$.

Le sable Sograp utilisé comme substrat dans les essais effectués à les caractéristiques suivants : un pourcentage de fine de 0,004% ($<2,5\%$), un d_{10} de l'ordre de 0,3234mm ($>0,15$ mm), un d_{60} de 0,9285mm (<1) et un CU de 2,8706 ($<3,5$). Le Sograp a une porosité de $38,88\% \pm 3,11\%$ (tableau)

Les deux substrats répondent tous aux critères de choix fixé par Dube (1991) pour le procédé d'infiltration percolation. En calculant le coefficient de gradation, celui-ci se situe entre 1,33 et 1,66 alors que celui de Lafarge est compris entre 0,67 et 0,69. Toutes ces valeurs sont inférieures à 4, donc les propriétés de ces deux substrats (poids surfaciques, épaisseur, permittivité, conductivité hydraulique, taille des ouvertures) n'ont presque aucune influence sur les performances d'infiltration et ont une structure intérieurement stable car leur $C_d < 7$.

Tableau 1: Caractéristiques physiques des sables Lafarge et Sograp

	d_{10} (mm)	d_{60} (mm)	% de fines	CU	Porosité (%)
Lafarge	0,880	2,097	0,362	2,385	$32,1 \pm 8,46$
Sograp	0,3234	0,9285	0	2,8706	$38,88 \pm 3,11$

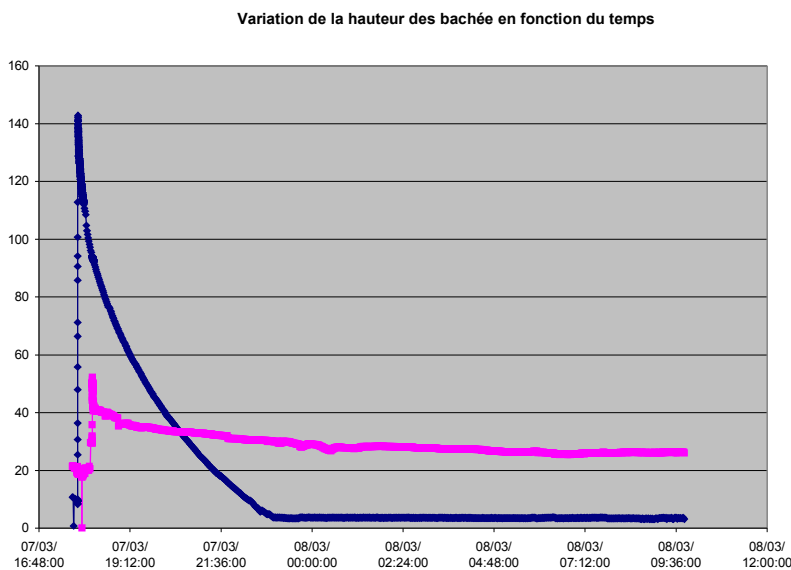
II. Caractéristiques hydrauliques des substrats Lafarge et Sograp

II.1. Variation de la hauteur des bâchées en fonction du temps

L'analyse de la courbe de variation du niveau de bâchée en fonction du temps révèle que la hauteur la plus importante est enregistrée pour le substrat Sograp qui est 145mm et la hauteur maximale enregistrée pour le substrat Lafarge est de 45mm. La forme de la courbe de variation de la hauteur de bâchée chez Sograp et Lafarge sont quasiment identique mais les valeurs minimales atteintes sont différentes (5mm chez

Sograp et 25mm chez Lafarge). La structure physique de Lafarge lui permet d'infiltrer la boue plus rapidement (hauteur maximale faible) et le colmatage est aussi rapide ce qui explique le niveau minimale du bachee qui est relativement élevé. Par contre le substrat Sograp laisse infiltrer lentement ce qui explique la hauteur maximale atteinte par la bachee (145mm) et se colmate aussi lentement.

Figure 5: Variation du niveau de bachee en fonction du temps pour les substrats Sograp et Lafarge



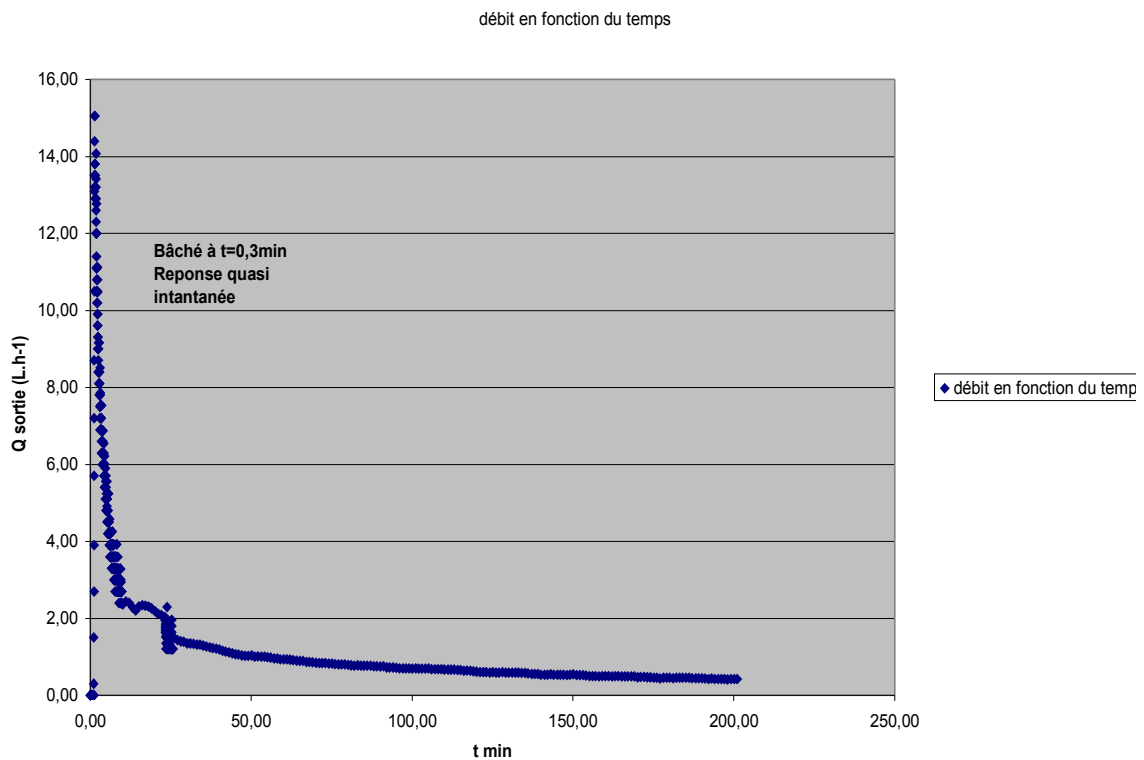
II.2. Vitesses de ressuyage de la boue en aération prolongée et de matière de vidange sur le substrat Sograp

II.2.1. Infiltration de la boue en aération prolongée sur Sograp

La vitesse de ressuyage instantanée varie de la même manière que le débit instantané. Elle nous permet de comprendre le comportement hydraulique du massif filtrant en général et particulièrement celui du substrat. Nous constatons que l'infiltration est quasi instantanée (20 secondes après la bachee) et atteint son débit maximal qui est de l'ordre de $15L.h^{-1}$. Le débit diminue progressivement avec une pente assez forte dans un premier temps (30 minutes après bachee) puis la pente de la variation du débit s'affaiblit progressivement pour se stabiliser (150 minutes après la

bâchée). La variation du débit au cours du temps met en évidence le phénomène de colmatage. Le temps de réponse étant instantané, nous pourrions conclure que le substrat cède l'eau qu'il reçoit instantanément. Cela s'explique aussi par la nature de la boue en aération prolongée assez fluide. Le débit minimal est atteint 150 minutes après la bâchée pour un volume de 5L.

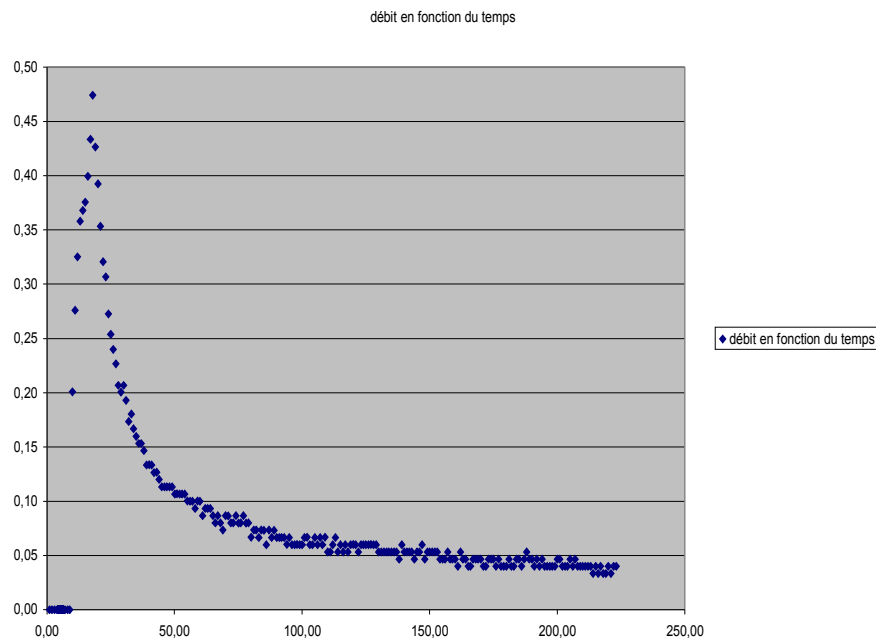
Figure 6: Variation de débit de ressuyage en fonction du temps de la BAP sur Sograp



II.2.2. Infiltration de la matière de vidange sur Sograp

La matière de vidange étant plus visqueuse que la boue en aération prolongée, cède l'eau qu'elle contient moins rapidement que les boues en aération prolongée. Le temps de réaction après la bâchée est plus grand (10 minutes). Le débit maximal est atteint à 25 minutes après la bâchée. La pente de la variation du débit en fonction du temps est relativement moins forte que pour la boue en aération prolongée et le débit minimal est atteint à 150 minutes après la première bâchée pour un volume de 3L.

Figure 7: Variation de débit de ressuyage en fonction du temps de la MV



II.3. Performances de filtration de boue en aération prolongée et de matière de vidange sur le sable Sograp

Il est important de noter que les essais ont été effectués à une petite échelle sur les colonnes alors les performances des filtrations sont à relativisés. Pour les matières de vidange la performance est calculée en mesurant le taux de matière sèche avant et après la filtration et celle de boue en aération prolongée en tenant compte par contre des matières en suspension avant et après la filtration. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau qui suit.

Tableau 2: Performances de filtration sur Sograp de BAP et de MV

		Ve (L)	MES	MS	Performance MES (%)	Performance MS (%)
BAP	Brutes	5	2,48		98,0	
	Percolât	4,177	0,058			

MV	Brutes	1		34,82	97,4%
	Percolât	0,551		1,65	

Les performances exprimées en pourcentage ne répondent aux normes de rejet des eaux traitées en vigueur mais restent intéressantes car le percolât est repris dans la filière traitement des eaux. Pour les boues en aération prolongée nous constatons une rétention des 98% des matières en suspension. Les 97,4% de matières sèches sont retenus par Sograp. Le but poursuivi est de retenir au niveau des bassins les matières organiques qui seront déshydratées et minéralisées pour être valorisées comme amendements organiques agricoles.

II.4. Vitesses de ressuyage de la boue en aération prolongée et de matière de vidange sur le substrat Lafarge

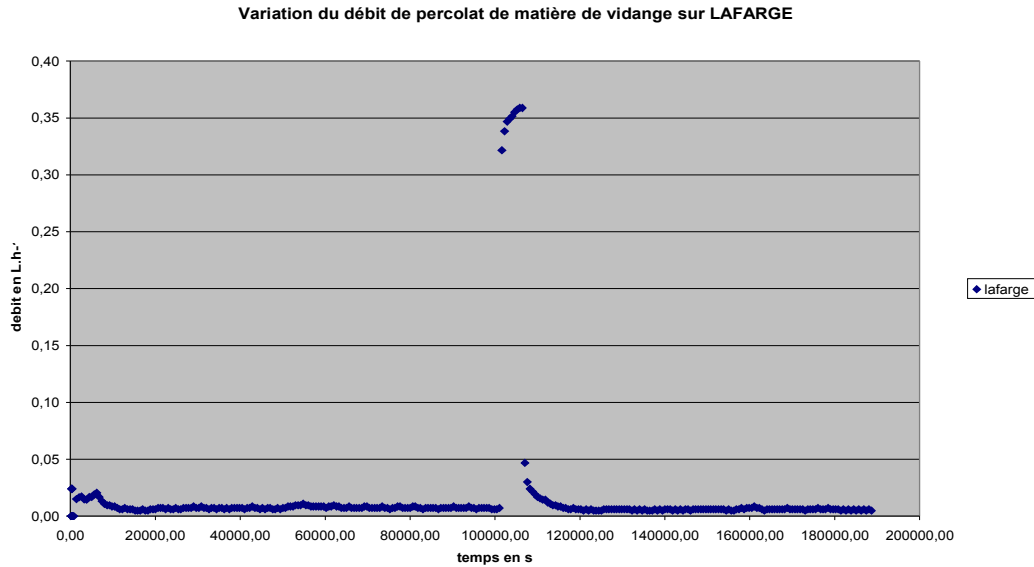
II.4.1. Infiltration de la matière de vidange sur Lafarge

Nous constatons que la figure de ressuyage de la matière de vidange sur Lafarge est discontinue avec un pic de débit qui dure quelques minutes et une chute brutale de débit à zéro. La structure grossière de Lafarge (par rapport à Sograp) est à l'origine de ce phénomène. La matière de vidange est filtrée immédiatement et à une vitesse d'infiltration assez élevée. Le débit maximal atteint est de l'ordre de 0,35L.h-1. En comparant cette courbe de variation de débit en fonction du temps à celle de Sograp nous constatons 2 principales différences :

- elle est discontinue chez Lafarge alors que celle de Sograp est continue

La figure de Sograp est divisible en 3 parties qui comprennent une phase d'augmentation de débit très rapide pour atteindre le maximum avant d'entamer la phase de baisse de débit progressive pour se stabiliser sur un minimum

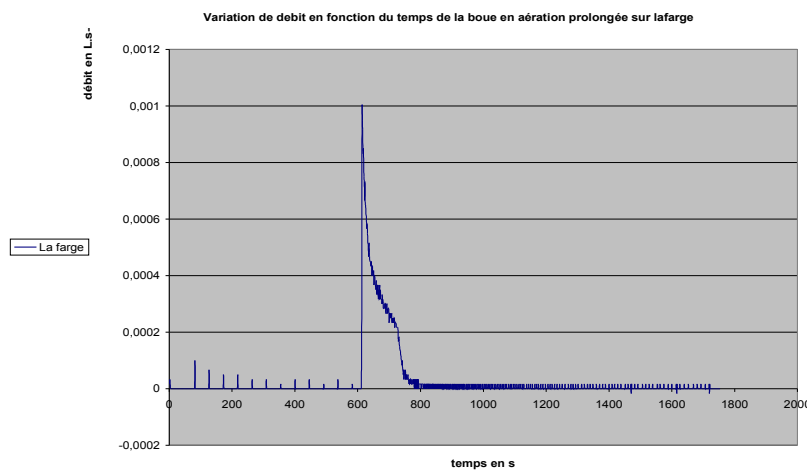
Figure 8: Variation de débit de ressuyage de MV sur Lafarge



II.4.2. Infiltration de la boue en aération prolongée sur Lafarge

La variation de débit de la boue en aération prolongée sur Lafarge est quasi identique à celle sur Sograp, à la différence que le temps de ressuyage reste très faible pour Lafarge et les valeurs maximales et minimales atteintes sont faibles pour lafarge. Le temps global de ressuyage de la boue en aération prolongée sur Sograp est de l'ordre de 3h 2mn et celui sur Lafarge est de 17mn seulement. Le débit maximal sur Lafarge est de 3,6L.h⁻¹ et celui sur Sograp est de 16L.h⁻¹. Le débit instantané maximal est de 4 fois moins sur Lafarge que sur Sograp.

Figure 9: Variation du débit de ressuyage de la BAP sur Lafarge



II.4.3. Performances de filtration de la boue en aération prolongée et de la matière de vidange sur Lafarge

Le temps de ressuyage de la boue en aération prolongée et de la matière de vidange sur Sograp est plus grand celui sur Lafarge mais les performances de filtration sont plus efficaces sur Sograp que sur Lafarge. Pour la boue en aération prolongée sur Lafarge, la performance est de l'ordre de 84,7% (84,7% des matières en suspension sont retenues par le substrat Lafarge) contre 98% retenu par Sograp. Les matières sèches des matières de vidange sont filtrées à 83,4% contre les 97,4% retenues sur Sograp.

Tableau 3: Performances de BAP et MV sur Lafarge

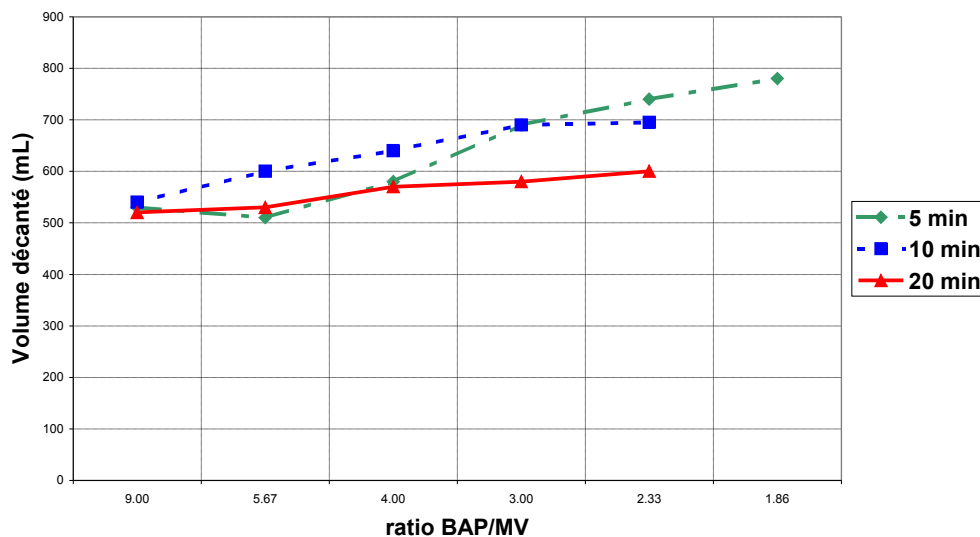
Lafarge	Paramètres	Ve(L)	MES (g/l)	MVS (%MES)	MS (g/l)	Performances MES (%)	Performances MS (%)
BAP	Brutes	5	1,34	70,3	-		
	Percolat	4,96	0,206	-	-	84,7	
Matière de vidange	Brutes				3,40		
	Percolat	4,58		-	0,55		83,4

III. Optimisation du mélange boue en aération prolongée (BAP) et de la matière de vidange (MV).

III. 1 Temps d'agitation optimal

Les différents ratios BAP/MV soumis à différentes durées d'agitation (5, 10 et 20 minutes) et laissés à la décantation pendant 20 minutes nous ont permis de tracer la courbe de la variation du volume décanté en fonction des différents ratios pour différentes durées d'agitation.

Figure 10: Variation du volume décanté des ratios BAP/MV à 5, 10 et 20 minutes d'agitation



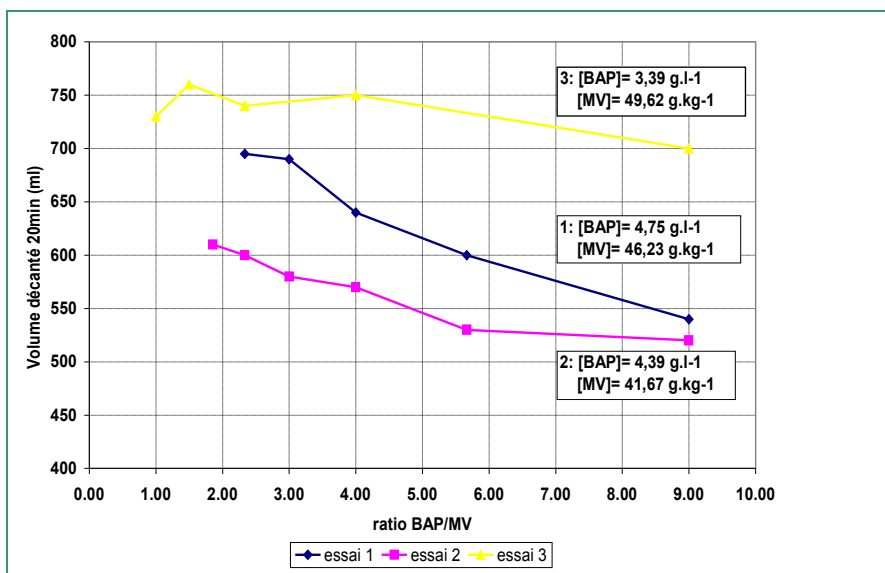
Il est important de signaler que plus le volume décanté est élevé moins le temps d'aération est optimale car la décantation rapide accélère le colmatage.

La tendance générale suivant les figures est que le volume décanté augmente quand le ratio BAP/MV est faible et cette tendance s'accroît avec la réduction du temps d'agitation. Pour des temps d'agitation inférieur à 20 minutes, il y a une variation forte pour les différents ratios. A 20 minutes d'agitation la différence entre les volumes décantés des différents ratios est faible.

III.2. Influence des ratios boue en aération prolongé et matière de vidange sur le volume décanté

Afin de mettre en évidence l'influence du ratio BAP/MV, 3 essais ont été réalisés pour chaque ratio BAP/MV variant de 1 à 10 (sans aération) et les volumes décantés ont été mesurés pour chaque ratio. Ce qui nous a permis d'obtenir la courbe qui exprime la variation du volume décanté en fonction des ratios pour 3 couples de boue en aération prolongée et matières de vidange.

Figure 11: Variation de volume décanté en fonction des ratios BAP/MV pour 3 couples différents



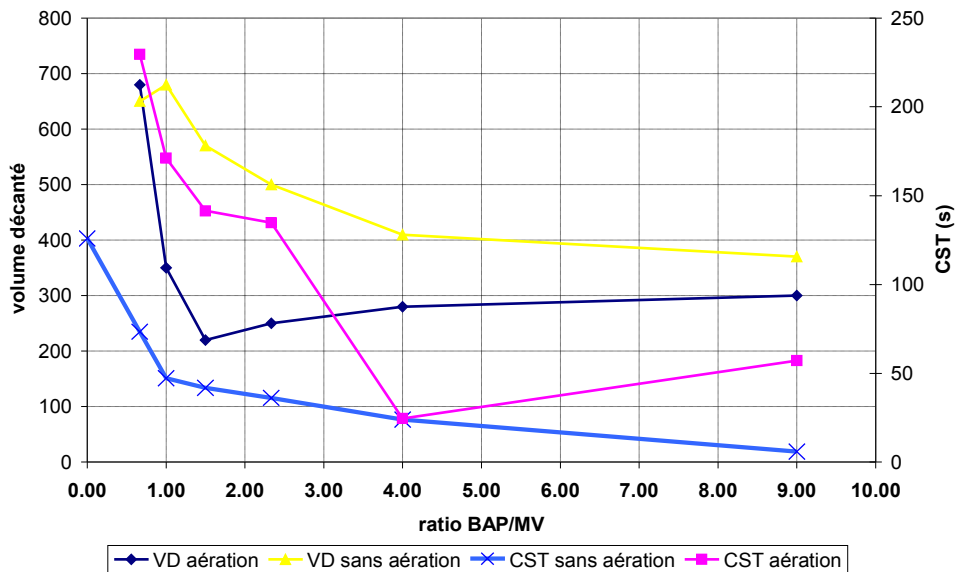
La tendance générale des 3 courbes de la figure 7 est que le volume décanté augmente avec le ratio BAP/MV. Quelle que soit la nature des boues et de la matière de vidange. Le volume décanté est influencé par le ratio BAP/MV. Etant donné que le

taux en matière sèche des matières de vidange est plus élevé (de l'ordre de 10 fois plus) que celui des boues en aération prolongée, elle pourrait avoir une grande influence sur la floculation.

III. 3. Influence de l'aération sur le volume décanté et le temps de succion capillaire

Le CST-mètre est un appareil qui nous permet de mesurer le pouvoir d'une boue ou d'une matière de vidange à céder l'eau qu'elle contient par capillarité. Deux échantillons d'un même mélange de BAP/MV ont été soumis l'un à une aération d'une durée de 20 minutes et l'autre n'a pas été aéré. Le temps de succion capillaire et le volume décanté (pour une durée de décantation de 20 minutes) des deux échantillons ont été mesurés pour les différents ratios BAP/MV (variant de 1 à 10). Et la figure qui suit a été obtenue.

Figure 12: Variations du temps de succion capillaire et de volume décanté en fonction des ratios BAP/MV aérés et non aérés



La tendance globale est que les ratios BAP/MV les plus faibles ont à la fois un volume décanté et un temps de succion capillaire plus élevés. Quand le mélange est aéré ce phénomène est atténué. En d'autres termes l'aération diminue le volume décanté et le temps de succion, donc cela a un effet positif sur le pouvoir de la boue à céder son eau par capillarité et par la floculation.

Toutes les figures peuvent être divisées en deux parties :

- La première partie pour les ratios compris entre 0 et 3 où le volume décanté et le temps de succion capillaire décroissent très rapidement.
- La deuxième partie comprise entre les ratios 3 et 10 où le volume décanté et le temps de succion capillaire varient très peu, ils sont quasi constants.

De l'analyse qui précède, nous pourrions conclure que l'aération aurait un effet positif sur la floculation et le temps de succion capillaire.

IV. Variation de l'humidité relative et des matières organiques dans le lit planté de roseaux

Nous constatons au niveau du lit de séchage que la répartition horizontale de l'humidité ne répond à aucune règle. La comparaison statistique des moyennes de l'humidité suivant les lignes nous permet de conclure qu'il y a une différence significative entre les lignes pour ce critère. La répartition de l'humidité n'obéit à aucune règle contrairement à notre attente qui est celle d'une variation liée à la distance par rapport au point d'alimentation. Etant donné que la siccité et l'humidité relative varient en sens contraire, la même conclusion reste valable pour la siccité. De même la profondeur des boues ne répond à aucune logique. L'analyse statistique des moyennes des profondeurs suivant les lignes montre qu'il n'y a aucune différence significative entre les lignes pour le paramètre profondeur des boues. Les représentations à trois dimensions de la profondeur, de l'humidité et la siccité se trouvent en annexe 6.

Tableau 4: Valeurs d'humidité moyenne des différentes profondeurs

	Humidité relative		
	hauteur	milieu	bas
Moyenne	81,04	78,25	72,07
Ecart type	05,76	07,79	07,99
Maximum	88,85	87,66	81,55
Minimum	66,62	57,04	46,98
% erreur	07,11	09,95	11,09
	Siccité		
	hauteur	milieu	bas
Moyenne	18,96	21,75	27,93
Ecart type	05,76	07,79	07,99
Maximum	33,38	42,96	53,02
Minimum	11,15	12,34	18,45
% erreur	30,40	35,81	28,60

L'analyse de variance a montré qu'il y a une différence hautement significative entre l'humidité dans les différentes profondeurs.

IV.1 Variation de l'humidité en fonction des profondeurs

Nous constatons une corrélation forte négative de l'humidité relative en fonction de la profondeur. Ce qui signifie que les boues de surface ont une humidité relative très forte donc une siccité faible. En faisant 3 classes de profondeur de centre 2,5 ; 7,5 et 12,5 cm nous obtenons des valeurs moyennes d'humidité qui se trouvent dans le tableau 5 qui suit.

Tableau 5: Valeurs moyennes des différentes profondeurs

Profondeur en cm	Humidité en %	Siccité
2,5	81,04	18,96
7,5	78,25	21,75
12,5	72,07	27,93
Coefficient de corrélation	-0,97687854	

Ces valeurs nous permettent d'obtenir la droite de régression $Y(x)$ où Y est l'humidité relative et x la profondeur des boues. La siccité a une variation opposée à celle de l'humidité. Il est alors normal que la profondeur et la siccité aient une corrélation forte et positive. Les boues de profondeur ont une siccité plus élevée que les boues de surface.

Figure 13: Variation de l'humidité relative en fonction des profondeurs

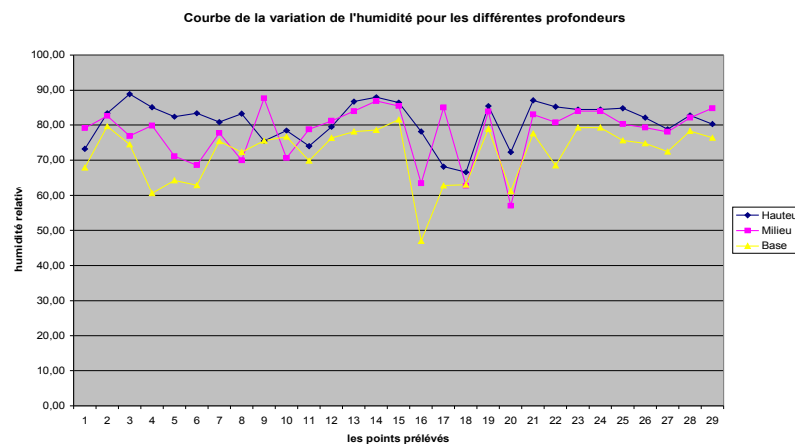


Figure 14: Corrélation entre humidité relative et la profondeurs des boues

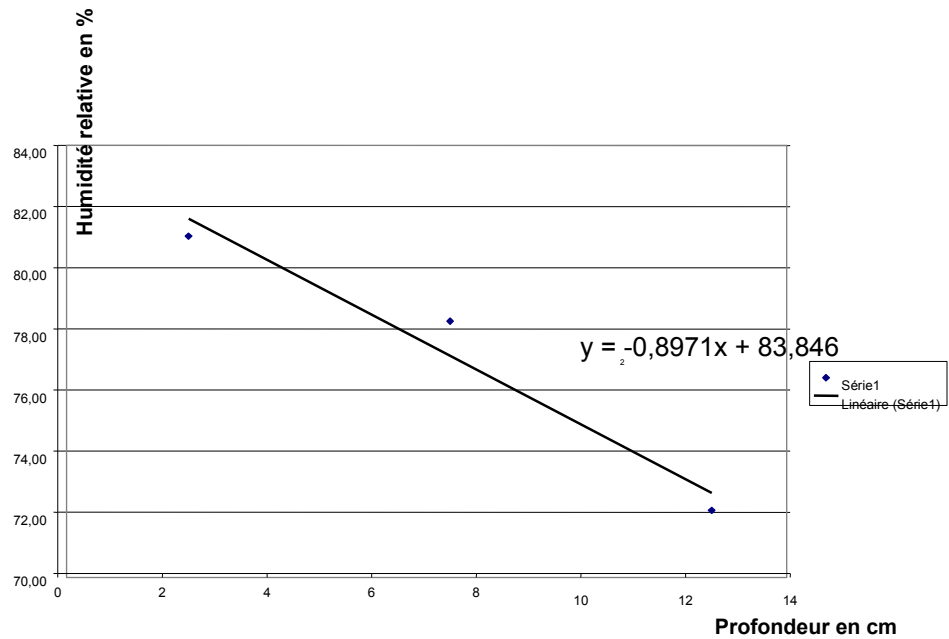
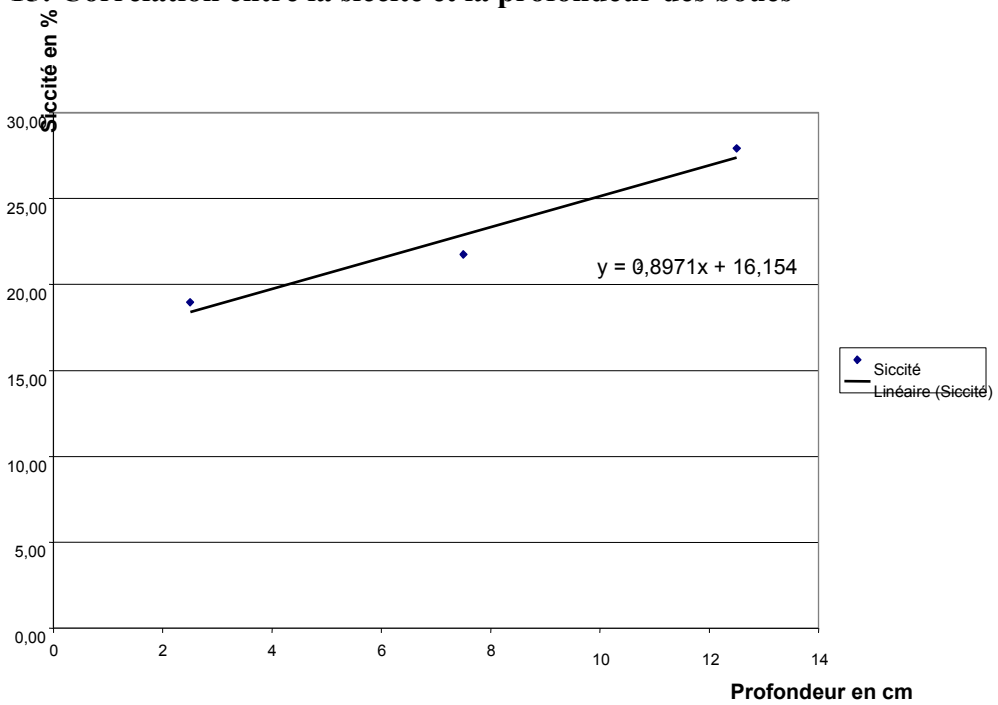


Figure 15: Corrélation entre la siccité et la profondeur des boues



La régression linéaire de l'humidité (H) en fonction de la profondeur (p) donne l'équation suivante :

$$H(p) = -0,8971 p + 83,846 \quad (5)$$

Et celle de la siccité donne en fonction de la profondeur :

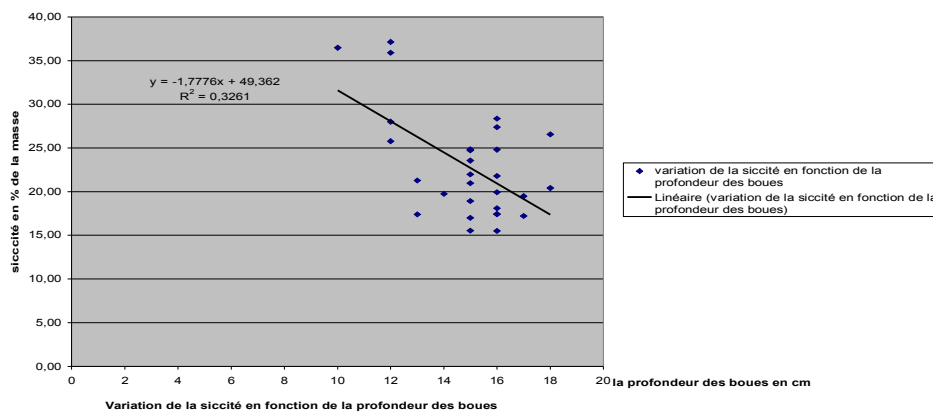
$$C(p) = 0,8971 p + 16,154 \quad (6)$$

Il est important de noter que cette linéarisation est valable dans les conditions de l'expérimentation (cas particulier à ne pas généraliser) mais la tendance générale pourrait rester la même.

V.2. Variation des matières organiques dans le lit de séchage

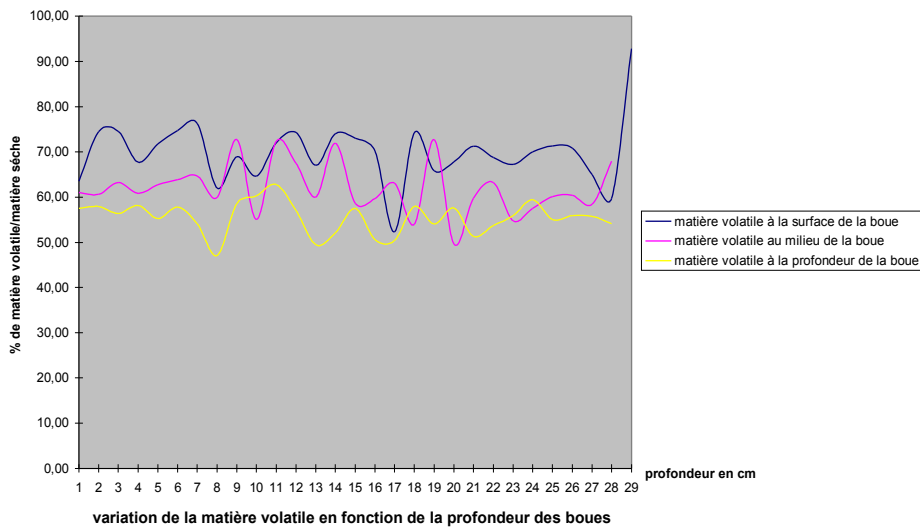
La profondeur des boues au sein du lit varie indépendamment de la disposition de point d'alimentation comme le montre la figure de la représentation (annexe 6) de taux de matière organique dans le bassin planté. Mais la siccité a une corrélation négative avec la profondeur. Plus il y a de boues sur une superficie moins la siccité est grande. Les conditions climatiques sont plus ou moins homogènes dans le lit de séchage. Sur une surface où il y a moins de boues se sèche plus rapidement que là où il y en a plus, ce que explique cette corrélation négative entre la profondeur des boues et la siccité.

Figure 16: Corrélation entre la siccité à un point et la profondeur des boues



La matière organique volatile varie de la même manière que la matière organique. Il y a une corrélation négative entre la profondeur et le taux de matière organique volatile qui nous renseigne également sur la minéralisation de la boue. Moins il y a de matière volatile (qui sont souvent des acides gras) plus la minéralisation est avancée.

Figure 17: Variation de la matière organique volatile en fonction des profondeurs



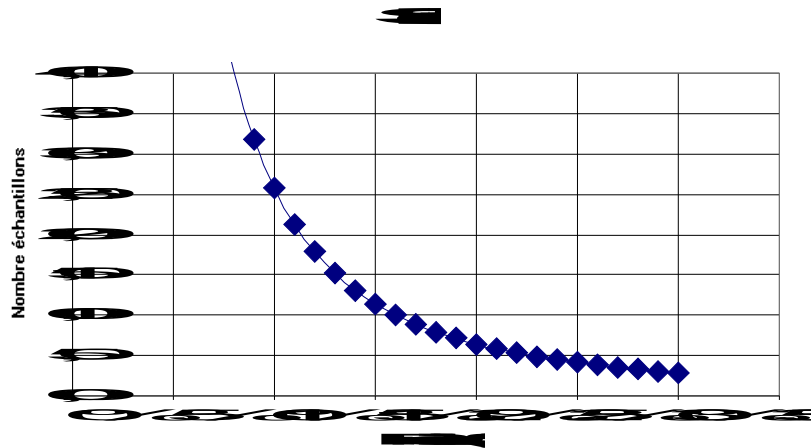
V.3. Détermination statistique du nombre optimal d'échantillon pour l'évaluation de :

- **La siccité :** Pour une population supposée normale dont l'échantillonnage est aléatoire et simple de précision d , X la moyenne, σ l'écart type le nombre de prélèvement à faire est N (Dagnelli, 1986).

$$N = \frac{(1,96 \times \sigma)^2}{(X \times d)^2}$$

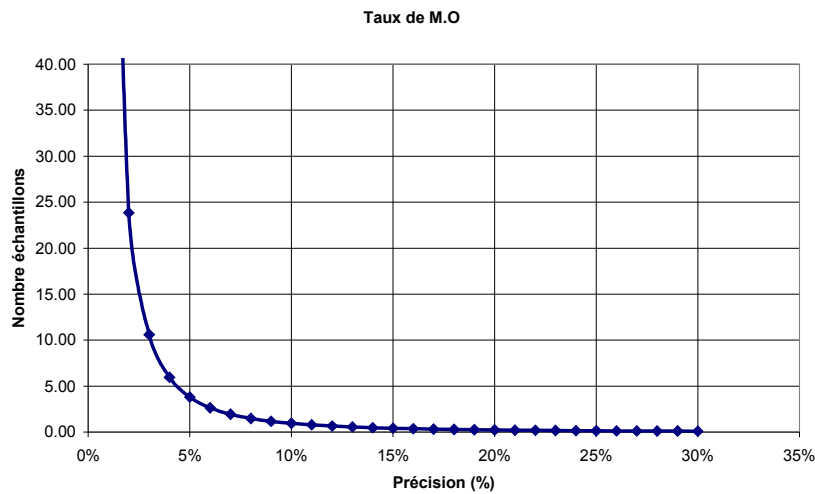
Pour le paramètre siccité cette condition est supposée remplie, alors pour un nombre de prélèvement de 6 nous aurons une précision de 20% comme la montre la figure suivante. Pour obtenir une précision de 10%, il faut prélever au moins 25 échantillons.

Figure 18: Variation du nombre d'individus d'un échantillon en fonction du degré de précision de l'estimation de la siccité moyenne



Matière organique : Nous supposons aussi que pour le paramètre taux de matière organique, la population est normale et l'échantillonnage est aléatoire et simple. Pour avoir une précision de 4% il faut un échantillon de 6 individus. La figure qui suit donne le nombre de prélèvement en fonction du degré de précision souhaité.

Figure 19: Variation du nombre d'individus d'un échantillon en fonction du degré de précision de l'estimation de la matière organique moyenne



Conclusions

Les différents essais qui ont été réalisés ont pour objectif d'améliorer le séchage de boues en aération prolongée (BAP/MV) et des matières de vidanges. Nous avons pu constater que la sensibilité des substrats au colmatage varie dans le même sens que les performances de filtration des substrats. Plus un substrat a de meilleures performances filtrantes, plus il est sensible. Il est alors difficile de définir le meilleur substrat ayant à la fois la meilleure performance épuratoire et moins sensible, un compromis est alors nécessaire en fonction des objectifs poursuivis.

Les substrats testés (Sograp et Lafarge) ont une performance épuratoire meilleure avec les boues en aération prolongée qu'avec les matières de vidange.

Nous avons pu constater que l'aération pourrait avoir un effet positif sur le temps de succion capillaire qui nous renseigne sur l'aptitude d'un fluide à céder de l'eau par capillarité. Et parmi les différentes durées d'aérations testées (5, 10 et 20 minutes), la durée de 20 minutes pourrait être la durée d'aération optimale.

Nous avons soupçonné aussi que les ratios BAP/MV de 3 et 4 pourraient être les meilleurs ratios et que la nature de la matière de vidange influencerait plus le volume décanté des différents ratios qui nous renseignent sur les risques de colmatage.

Pour le suivi des paramètres de lits de séchage (siccité, humidité relative, matière organique volatile...) l'humidimètre pourrait être un appareil nécessaire mais pas indispensable. Il permettrait de soupçonner des éventuels problèmes qui pourraient empêcher la minéralisation et prévenir les réactions anaérobies qui posent des problèmes olfactifs.

Vu le temps qui nous a été imparti pour faire des essais concluants, toutes les conclusions tirées de ces études devraient être validées par d'autres essais à des échelles beaucoup plus grandes.

**Partie 2: Possibilité de valorisation des sous-produits
des boues dans le contexte des pays en voie
de développement**

Chapitre 4 : Etude de la filière des sous produits des eaux usées dans les pays en voie de développement

Dans les villes des pays en voie de développement en général, les excréta ne sont pas évacués par le réseau d'égouts en cas d'assainissement individuel. Ils sont stockés dans les fosses des latrines ou fosses septiques avant d'être pompés et transportés. Les techniques visant à traiter de manière économique et durable les boues ainsi collectées font encore défaut.

Contrairement à l'épuration des eaux usées, l'évacuation des boues de vidange a été largement négligée dans les pays en développement. Les boues parviennent de manière non contrôlée et généralement non traitées dans les cours d'eau, sur des terrains vagues ou dans l'agriculture. L'atteinte à l'environnement est considérable car 65 à 100% des citoyens des villes africaines utilisent des systèmes d'élimination des boues de vidange qui ne sont raccordés à aucun réseau d'égouts d'après Strauss, M et al (1999).

Le traitement et l'utilisation des boues à des fins agricoles posent un problème quasi insoluble aux autorités, aux entreprises privées et aux utilisateurs. La mise au point de méthodes de traitement appropriées est un des instruments permettant de résoudre d'une manière durable les problèmes de gestion des boues dans les pays en voie de développement.

L'objectif de la présente étude est d'analyser la perception qu'a la population de la valorisation des boues de vidange et des sous-produits de leur traitement en agriculture. L'analyse des techniques de traitement des boues relève que la méthode de traitement des boues utilisée en Afrique du centre et de l'ouest vise une revalorisation agricole.

De ce fait, nous allons dans un premier temps faire l'état de l'art de la gestion des boues de vidange dans les pays en voie de développement en général, en suite analyser les procédés de traitement et la valorisation des boues de vidange et leurs sous-produits. Dans un second temps, l'étude des intervenants influençons cette secteur d'activité nous permettre de comprendre la perception que la population des pays en voie de développement a de l'utilisation des boues de vidanges et des sous-produits en agriculture.

I. Gestion des boues de vidange dans les pays en développement : état de l'art

Une grande partie de boues de vidange produites, ramassées et évacuées dans les centres urbains ne fait l'objet d'aucune évaluation dans les villes de l'Afrique du centre et de l'ouest. Dans les villes comme Accra, Dakar, Abidjan, Yaoundé, Bangui et d'autres villes d'Asie et d'Amérique latine, la majorité des habitants utilise des installations d'évacuation individuelle des excréta. La production journalière de boues de vidange s'élève à environ 0,2L/habitant jour pour les latrines à fosses, à 1L/habitant jour pour les fosses septiques et 2L/habitant jour pour les toilettes publiques non raccordées au réseau d'égouts.

Les données officielles relatives aux boues collectées demeurent cependant bien inférieures aux valeurs estimées. Les volumes des boues de vidanges à traiter augmenteront sans doute nettement lorsque le système urbain de collecte et de gestion des boues sera revalorisé afin de réduire la pollution et les risques pour la santé. Le tableau 6 qui suit illustre les conditions de traitement des boues de vidanges dans quelques pays en voie de développement.

Tableau 6: Exemples de pratiques d'évacuation, d'utilisation et de traitement des boues de vidange dans les pays en voie de développement

Ville/pays	Evacuation (utilisation sans traitement)	Traitement séparé	Traitement combiné
Province de Rosario		Lagunage	Lagunage du contenu des fosses septiques et des eaux usées
Kumasi (Ghana)	Evacuation dans les cours d'eaux	-----	-----
Accra (Ghana)	Evacuation marine	Décantation/épaississement suivi de lagunage, compostage des matières solides avec sciure ou des déchets solides	-----
Cotonou (Benin)	-----	lagunage	-----
Yaoundé (Cameroun)	Evacuation dans les cours d'eaux	Lagunage	-----
Dar Es Salam (Tanzanie)	Evacuation marine avec les eaux usées	-----	Co-traitement dans un système de lagunage d'eaux usées
Hanoi (Vietnam)	Utilisation en agriculture ou aquaculture	-----	Co-compostage des boues de vidange et des déchets solides

Dans certaines villes d'Afrique de l'ouest comme Accra plus de 60% de la population est desservie par des fosses septiques. Dans d'autres villes comme Manille et Bangkok, les autorités devront à l'avenir transporter et traiter 3.10^3 à 5.10^3 m³ de boues de vidange par jour (soit 500 à 800 charges de camion-citerne) après avoir revaloriser leur service de collecte et de transport des boues de vidange afin de collecter l'ensemble des boues produites (Koottatep, et al. 1999). D'après SANDEC, peu de pays en voie de développement disposent jusqu'ici d'installation pour le traitement séparé de boues de vidange ou co-traitement des boues de vidanges et des eaux usées. Dans certaines villes de l'Afrique de l'ouest et du centre les boues sont ajoutées au courant des eaux usées urbaines afin d'être co-traitées dans les installations de traitement des eaux usées, en général dans des systèmes de lagunage. Ces installations seront de ce fait surchargées et fonctionnent mal en raison du manque des mesures opérationnelles adéquates, de suivi et d'entretien.

Selon la pratique traditionnelle chinoise, les matières de vidange sont collectées auprès des ménages et des toilettes publiques au moyen des seaux et de camions-citernes de vidange par aspiration afin d'être utilisées en agriculture et en aquaculture. La grande partie d'environ 30 millions de tonnes de boues qui sont apparemment collectées dans les villes chinoises chaque année n'est pas traitée avant leur utilisation. Les autorités chinoises et les institutions de recherche soucieuses des risques potentiels pour la santé posés par cette pratique ont intensifié leur engagement dans la recherche et le développement dans le domaine des boues de vidange.

La collecte et le transport des boues dans les villes posent d'énormes problèmes étant donné que des sites appropriés pour des installations de traitements des boues de vidange ou de co-traitement des boues de vidange/eau usées ne sont disponibles qu'au périphérique des villes. Du point de vue économique et écologique, le transport de volume de boues de vidange relativement restreints (5-10 m³ par camion) dans des rues embouteillées sur de longue distance dans de grandes agglomérations urbaines n'est pas un système durable à long terme. Pour les camions-citernes de vidange par aspiration, pratique actuelle la plus répandue consiste à décharger les boues aussi près que possible des points de collecte afin d'augmenter l'efficacité des services de collecte et les revenus salariaux.

De nouveaux concepts de collecte, de transport et de traitement des matières de vidange devront donc être développés conjointement avec des systèmes d'assainissement adaptés aux différents segments socio-économiques de la population

urbaine. Il est nécessaire de réduire les volumes de boues de vidange transportés ainsi que les distances parcourues. La planification et l'installation de système de traitement décentralisation de petite et moyenne dimension simplifierait le problème de transport. Un tel système décentralisé de traitement comprendrait la déshydratation et le traitement des boues de vidange ainsi que la décharge ou la réutilisation ultérieure du liquide séparé. Selon le modèle de gestion de l'assainissement urbain centré sur les ménages, le traitement des boues de vidange incombe suivant le degré de décentralisation soit aux organisation de quartier, soit aux autorités urbaines. Dans ce cadre, tant les petites que les grandes entreprises privées peuvent également jouer un rôle important. La recherche de solutions institutionnelles et organisationnelles appropriées représente un défi aussi important que le développement de procédés et de technologie de traitement durable.

II. Caractéristiques des boues de vidanges des pays en développement.

Les propriétés des boues de vidange sont très variables. Le type de système d'évacuation, la méthode de vidange et le fait que les eaux souterraines s'infiltrent parfois dans les fosses sont les causes de ces variations spatiales et temporelles. Les caractéristiques des boues sont très différentes de celles des eaux usées comme le montre le tableau 7. Les eaux usées sont moins denses en matière en suspension et le nombre d'œufs de parasites sont 100 moins que dans les matières de vidange.

Tableau 7: Comparaison des caractéristiques de boues de vidange et des eaux usées

	Boues de vidanges	Eaux usées
Matières sèches		
Matière en suspension organique	$12 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$ mg/L	$< 10^4$ mg/L
DCO	60 - 75%	
NH ₄ -N	$7 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$ mg/L	30 - 70 mg/L
Œufs des vers parasites	$4 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$ /L	500/L

III. Procédés de traitement des boues de vidange adaptés au contexte des pays en développement

Dans la plupart des cas, pour des raisons économiques et institutionnelles, seules des technologies non ou peu mécanisées dites à faible coût sont appropriées pour le traitement des boues de vidange dans les pays en développement. Un procédé de traitement adapté doit avoir un besoin d'énergie minimal et ne doit pas nécessiter

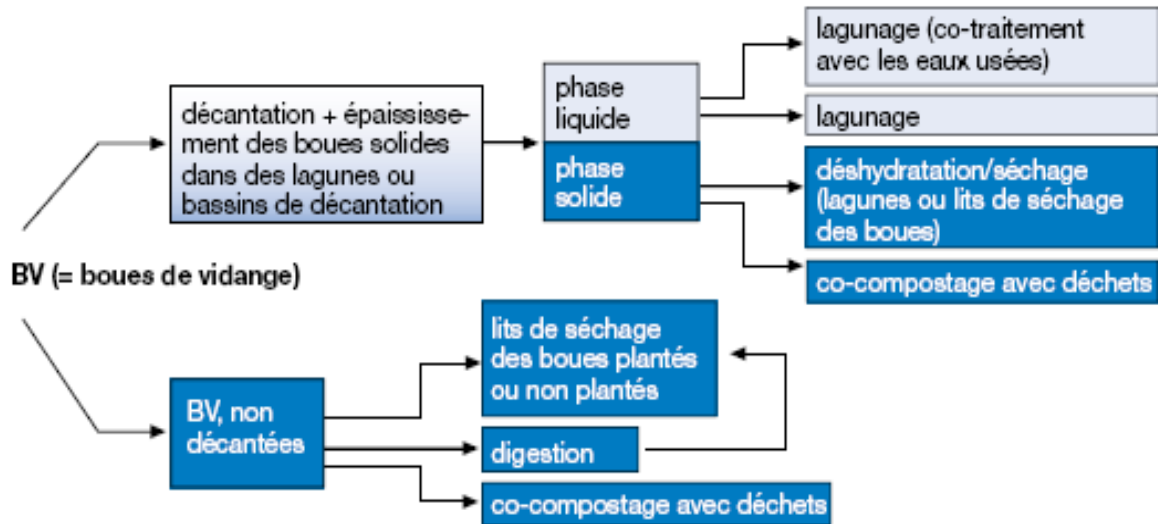
l'utilisation des produits chimiques. Ces conditions ont pour conséquence que la surface de terrain requise pour le traitement des boues de vidange est relativement grande.

Pour des raisons économiques, il n'est pas en général possible de créer un système de traitement des boues de vidanges dans les pays en voie de développement qui permettrait que les directives relatives à la qualité des effluents comparables à celles en vigueur dans les pays industrialisés soient respectées. Le recours à des procédés et des technologies qui permettraient d'atteindre des performances d'épuration de 75-80% de manière fiable constituerait déjà un grand progrès. Le gain pour l'environnement et la santé publique serait considérable par rapport au statut quo, en dépit des concentrations élevées dans les effluents

Une autre raison pour laquelle les pays en développement ne devraient pas répondre aveuglement les directives en vigueur dans les pays industrialisés réside dans les objectifs en partie différents du traitement des boues de vidanges et des eaux usées car dans les pays développés le traitement des eaux usées sert principalement à la protection de l'environnement (réduction des substances oxydoréductrices et des substances nutritives). Dans les pays en développement en revanche, le traitement des eaux usées et des boues de vidange doit être orienté vers la possibilité de l'utilisation agricole. Les critères d'hygiène tels que la concentration des œufs des vers parasites sont alors fondamentaux.

La figure 15 montre quels sont les procédés ou combinaison de procédés sont jugés appropriés pour les pays en développement.

Figure 20: Options spécifiques de traitement des boues de vidanges dans les pays en voie de développement



Source : Heinss, U., et al. (1999)

IV. Valorisation des sous produits de l'épuration par bassin planté en Afrique de l'ouest et du centre.

La plupart des stations d'épuration des eaux usées des villes d'Afrique de l'ouest et du centre n'a pas été conçue au départ en prenant en considération le volet valorisation des sous-produits qui en découlent. Or des pratiques de maraîchage et d'horticulture avec réutilisation des eaux usées et effluents se développent de plus en plus dans les villes africaines du fait de la baisse de fertilité des sols, du chômage et de la forte demande en produits maraîchers. Les effluents traités, la biomasse végétale collectée et les boues extraites des bassins de stabilisation sont les principaux sous-produits d'épuration par bassins plantés utilisés principalement en maraîchage, en horticulture et pour l'arrosage des espaces verts.

Les rendements d'arrosage dépendent des villes, des saisons climatiques et de la disponibilité. Il est de 9,75L/m²/j à Ouagadougou d'après Cissé, G. (1997) et de 135L/m²/j à Niamey selon Abdou (2002). La fréquence de période d'arrosage varie de la même manière que les rendements d'arrosage ; elle est en moyenne d'une fois par jour et peut atteindre 3fois/jour en saison sèche. Les principales raisons de choix de cette activité est le chômage en milieu urbain et la baisse des revenus. Cette activité est essentiellement pratiquée par des hommes mariés qui occupent les parcelles soit de manière illégale ou par métayage.

Les sous-produits d'épuration des eaux par bassins plantés s'ils sont utilisés dans des conditions optimales offrent assez d'avantages dont notamment : gratuité, pérennité, richesse en nutriments, la création d'emploi, la garantie de revenus substantiels, etc. les

inconvenients sont essentiellement liés à l'utilisation des eaux usées. Les effluents ont un niveau de pollution élevée, susceptibles d'avoir des conséquences directes et indirectes chez les agriculteurs et les consommateurs.

L'utilisation des sous-produits d'épuration par bassins plantés seule ne comble pas le besoin nutritionnel des plantes, l'utilisation des amendements organiques leurs est associée pour combler les limites nutritionnelles de ces sous-produits.

V. Perception de l'utilisation des eaux usées dans le secteur agricole en Afrique de l'ouest et du centre

Dans le secteur de l'agriculture périurbaine, l'importance des eaux usées est différemment appréciée suivant qu'on soit dans des zones à déficit hydrologique ou dans les zones nanties. En effet, dans les villes des pays sahéliens, à déficit pluviométrique important comme Ouagadougou, Niamey, et Dakar, les agriculteurs urbains pensent que les eaux usées et polluées représentent une ressource en eau précieuse permettant de pratiquer le maraîchage pendant les saisons sèches à la suite des cultures pluviales. Par contre dans les pays pluviométrie abondante comme Cameroun et la République Centrafricaine, les eaux usées sont appréciées pour leurs valeurs nutritionnelles. Pour les agriculteurs périurbains l'utilisation des eaux usées présente les avantages suivants :

- La gratuité, la quasi-pérennité et la croissance de la ressource eaux usées, quelque soit la saison climatique ; les eaux usées représente une alternative à la pénurie d'eau déjà très rare surtout en saison sèche.
- Le potentiel nutritif des eaux usées qui permettent d'améliorer la fertilité des sols et d'accroître le rendement des cultures et la qualité des produits.
- La possibilité d'améliorer l'aspect environnemental de la cité du fait de la création d'espace verts et de la diminution des quantités de charges polluantes déversées sans traitement dans les cours d'eau.
- L'utilisation des eaux usées en agriculture urbaine représente une importante activité économique et la garantie de revenus substantiels pour les promoteurs. D'après Abdou, A (2002) cette activité produit un revenu de 850.000 FCFA/an/promoteur à Niamey. Une étude comparative mener à Kumasi par Cornish estime de 385.000 CFA à 550.000 FCFA/an/promoteur et à Dakar ce revenu varie entre 350.000 à 1.200.000 FCFA/an/promoteur. Dans une région où

le SMING varie entre 15.000 et 35.000 CFA cette activité reste une source de revenu substantielle (Wéthé, et al. 2001).

L'utilisation des eaux usées ne présente pas que des avantages. Au rang des inconvénients liés à l'utilisation des eaux usées polluées en agriculture urbaine, on relève :

- La pollution trop élevée des eaux usées d'arrosage, la concentration élevée des matières en suspension est susceptible de colmater le sol, les teneurs en coliformes et streptocoques fécaux, germe témoins de la contamination fécale sont au-delà des trois logarithmes exigées par les normes de l'OMS en matières d'eau d'arrosage des plantes.
- Les risques accrus de la contamination et d'exposition à des maladies d'origine : démangeaison cutanée, bilharziose, paludisme, maux de ventre, typhoïdes etc.
- Les risques accrus de contamination des produits de la récolte avec des conséquences certaines pour les manipulateurs de ces légumes et les consommateurs

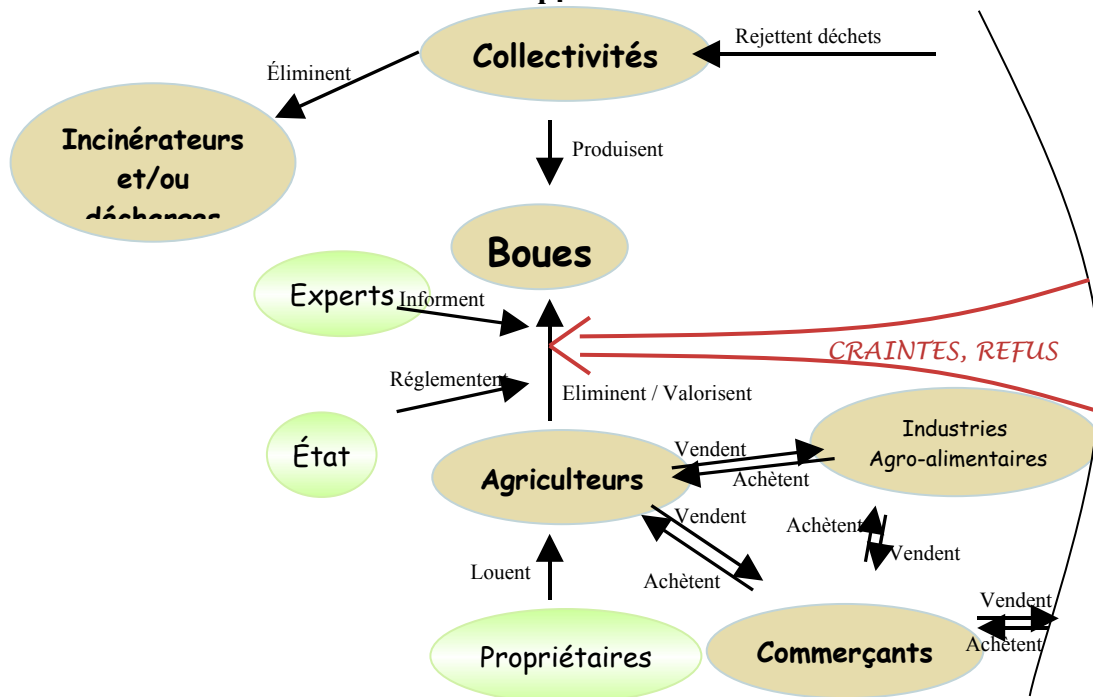
VI. Intervenants dans le secteur des boues de vidange dans les pays en développement

Dans ce secteur de boues beaucoup d'acteurs interviennent et influencent son l'évolution. Contrairement en Europe où la valorisation des boues est mal perçue dans le domaine agricole par le consommateur, dans les pays en voie de développement elles sont considérées comme des fertilisants. Dans des pays où plus de la moitié des habitants vit avec moins d'un dollar par jour, les consommateurs ne s'intéressent pas à la traçabilité des produits agricoles car l'autosuffisance alimentaire est loin d'être atteinte. Le secteur Agro-industriel dans la plupart par des pays en développement n'est pas très développé donc n'influence pas donc considérablement le secteur de valorisation en agriculture des sous-produits des eaux usées et des boues de vidange.

Les normes en vigueur établies par l'Etat ne sont pas respectées pour deux raisons. La première est liée au manque de techniques adéquates pour atteindre les performances voulues et la seconde aux services de contrôle qui sont inefficaces par manque de moyens de travail. Les normes de rejet des eaux usées même si elles respectent les normes internationales, elles ne sont pas appliquées par l'absence de service de surveillance de l'application de ces normes. La population par ignorance ou préoccupée par de problèmes de survie (alimentation, chômage...) ne se préoccupe pas (ou peu) des questions environnementales. A l'ère de la décentralisation, la gestion des

déchets est confiée aux collectivités locales qui peuvent à leur tour la confier à une société privée. La décentralisation n'est pas accompagnée de moyens d'exercice de compétences confiées aux collectivités. Le traitement des eaux usées qui a pour objectif de ramener la teneur de ces eaux à un niveau assimilable par la nature, produit aussi des boues. Les boues sont des matières premières pour l'agriculture périurbaines et les produits agricoles sont vendus sur le marché local ou aux industriels. Il est important de noter que souvent les industriels signent des contrats avec des agriculteurs qui les pourvurent en matières premières agricoles. De ce fait, les industriels évitent les problèmes liés à l'utilisation des eaux usées et des boues en proposant aux agriculteurs les techniques appropriées pour préserver la qualité de leurs matières premières. Le secteur de traitement des boues et des matières de vidange est réglementé par l'Etat sous le contrôle des experts qui donnent leurs avis sur le mode de gestion du secteur et proposent des normes de rejet. Les différents intervenants du secteur des boues et leur niveau d'intervention sont indiqués dans la figure 21 qui suit.

Figure 21: Intervenants du secteur des boues dans les pays en voie de développement



Conclusion

Les pays en voie de développement en général ont un problème de gestion des eaux usées et des boues de vidange. L'une des principales causes est étalement urbain anarchique. A cette première cause s'ajoute le manque de plan d'urbanisation adéquate.

Il apparaît dans cette étude que la majorité de la population utilise les installations d'évacuation individuelle dont la gestion échappe au pouvoir public et souvent ces installations ne respectent les normes en vigueur.

Les structures de traitement des eaux usées et des boues de vidange adaptés aux pays en voie de développement devrait avoir : un besoin minimal en énergie, exclues l'utilisation des produits chimiques, de performance d'épuration de 75-80% et économique viable.

Les eaux usées et les sous-produits d'épuration sont valorisés en agriculture périurbaine en Afrique de l'ouest et du centre. Cette pratique procure entre 350.000 FCFA à 850.000 FCFA par an par promoteur.

Pour les agriculteurs périurbains les eaux usées représente une ressource en eaux permettant de pallier aux déficits pluviométriques et d'améliorer la fertilité du sol. Les consommateurs locaux ne sont pas informés des risques liés à l'utilisation des eaux usées et de ces sous-produits en agriculture. De ce fait, les produits provenant de cette agriculture sont appréciés pour leurs qualités organoleptiques et visuelles. L'une des causes de la perception favorable de l'utilisation des eaux usées et de ces sous-produits en agriculture est la pauvreté. L'autosuffisance alimentaire est loin d'être atteinte dans ces différents pays.

VII Conclusion générale et recommandation

Généralement la construction d'un lit de séchage est importante en terme de composition des couches prises individuellement, mais aussi au regard des connexions capillaires entre les couches de matériaux, tout particulièrement entre la couche supérieure et la couche de boue résiduelle.

Des expériences entreprises, il en ressort que la nature du substrat filtrant influe sur l'efficacité et la durabilité du système. La qualité des influents dépend en grande partie de la nature du substrat. Le colmatage du système de filtration qui nuit au bon fonctionnement du dispositif est en grande partie lié au substrat. De ce fait, suivant la nature des boues de vidange, la granulométrie du sable à utiliser est à définir. Il est également nécessaire de noter qu'un compromis doit être fait entre le colmatage et la qualité des effluents. Plus un substrat est fin, plus il est sensible au colmatage qui est à la source du dysfonctionnement du système. Les substrats les plus fins ont une performance épuratrice élevée.

L'étude de l'aération des boues de vidange montre que l'aération a un effet positif sur le volume décanté. Il est important de noter que l'aération des boues de vidange réduit le colmatage. Le temps optimal d'aération est de 20 minutes pour un brassage à 70 rotations par minutes. Un mélange boue en aération prolongée /matière de vidange est plus influencé par la qualité de la matière de vidange.

L'aération joue un rôle positif sur le temps de succion capillaire donc assure une meilleure déshydratation des boues. Elle permet aussi de réduire le temps de repos d'un lit. La déshydratation des boues ne se fait pas d'une manière uniforme dans le bassin, de même que l'accumulation des matières organiques et la minéralisation. La hauteur des boues dans le bassin est corrélée avec le taux de matière organique et la minéralisation. Plus la hauteur est élevée, moins vite se fait la minéralisation et le taux de matière organique reste faible.

L'étude de la valorisation des eaux usées et des sous-produits dans les pays en voie de développement montre que ces sous-produits sont valorisés et procurent des revenus substantiels. Ce secteur permet de lutter contre le chômage dans les zones périurbaines. Toute fois, l'utilisation des sous-produits des eaux usées est perçue comme un vecteur de certaines maladies (les maladies hydriques). La gestion

des boues de vidange dans les pays moins avancés est problématique. L'étalement urbain et le manque de volonté politique sont à l'origine des difficultés que rencontre ce secteur.

Les systèmes de traitement des boues de vidanges adaptés aux pays en voie de développement devraient être moins consommateurs d'énergie, simple et économique viable. De ce fait, les systèmes extensifs sont les plus appropriés mais les espaces nécessaires à leur construction doivent être réservés.

Dans un contexte international préoccupé par l'intégrité environnementale, la gestion des déchets en général et des eaux usées en particulier devient une préoccupation majeure. Dans les pays en développement la pauvreté occulte les problèmes environnementaux car la préoccupation de survie prime. Le développement durable impose une gestion rationnelle des ressources naturelles. L'eau fait partie de ces ressources dont la pérennité de l'humanité est fortement dépendante.

Le séchage des boues par bassin planté de roseaux est une alternative intéressante pour l'épuration des eaux usées et permet de valoriser les sous-produits. Pour mieux valoriser son fonctionnement dans le contexte des pays en voie de développement il convient de :

- Répertorier les espèces proches de *Fragmites australis* (exemple typha...) et d'étudier leur comportement dans les conditions locales en remplacement de *Fragmites australis*.
- Faire une étude de coût de traitement de eaux usées et des matières de vidange dans les conditions des pays en développement et le comparer à la disponibilité de la population à payer pour ce genre de service afin d'évaluer sa viabilité économique.
- Etant donné que la qualité des boues de vidange et des eaux usées dans les pays en voie de développement est très variable et dépend du mode vie de la population, une étude de la qualité du compost ressorti doit être faite et la teneur en métaux lourds définie.

- Les pays en voie de développement doivent se regrouper en de grandes zones climatiques pour créer de centre de recherche scientifique pouvant entreprendre de recherche dans ce secteur.

Ces quelques recommandations permettent d'adapté cette technique au contexte de chaque pays afin de garantir sa valorisation économique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdou A. ; 2002** ; Analyse des performances et diagnostic du potentiel de réutilisation des sous produits de l'épuration dans la ville de Niamey. Mémoire de fin d'étude EIER. 490p.
- Aconsult 2005** Etude de marché "gestion biologique des déchets organiques" - Club Atout Boues –203p.
- Amrstrong J.;Amrstrong W.; 1988**; *Phragmites australis*: A preliminary study of soil oxidising sites and internal gas transport pathways. New Phytol., in press
- Brix H., 1989**; Gas exchange through dead culm of reed; *Phragmites australis* (CAV). TRIN. Ex. STEUDEL: Aquatic Botany, 35, 81-98p
- CISSE G., 1997** ; Impact sanitaire de l'utilisation d'eaux polluées en agriculture urbaine. Cas du maraîchage à Ouagadougou (Burkina Faso). Thèse de doctorat EPFL.
- Dagnelli P., 1986**; Théorie et méthodes statistiques applications, les presses agronomiques de Gembloux, volume 1, 325p .
- Duchaufour, 1983**; Pédologie; Tome 1. Pédogenèse et classification; Masson. Paris 491p.
- El Messaoui, 2001**; Infiltration percolation en traitement des eaux usées: Etude des performances et adaptation du procédé; Thèse de Doctorat en Science de l'Environnement; Fondation Universitaire luxembourgeoise, Arlon, 228p + Annexes, 2001.
- Guellaf H., 1996**; Les massifs de sables dans les filières "cultures fixées sur supports fins": caractérisation granulométrique, hydraulique et minéralogique; Rapport de stage pour l'Ecole Supérieure des Energies et de matériaux; université d'Orléan; 114p + annexes.
- Heinss, U ; Larmie, S.A ; Strauss, M ; 1998** ; Solids Separation and Pond System for treatment of faecal Sludges in the Tropics- lessons learnt and Recommendations for preliminary Design, EAWAG/SANDEC, Report No. 05/98.
- Hsin-Yu Shan, Wu-Liang Wang et Ting-Chang, 2003**; Effet des conditions aux limites sur le comportement hydraulique des géotextiles dans les systèmes de filtrations; Department of civil engineering, National Chiao Tung University, 1001 Ta Hsueh Road, hsinchu, Taiwan.
- Hubac JM., Hubac C., Gorenflot R., 1988**; Transpiration journalière, distribution géographique et polyploïdie chez les roseaux *Phragmites australis* (CAV). TRIN. Ex. STEUD. In"Delepini R., Gaillard J. et Morand Ph (rédacteurs) Valorisation des algues et autres végétaux aquatiques; Brest, IFREMER, Paris, CNRS, 161-163p.
- Kickhut R., 1969**; Höhere Wasserpflanzen und Gewas Serreinhalting; Schriftenreihe Vereinigung deutsch Gewasserschutz, EV-VDG, 19, 3-14p.
- Kickhut R.; 1988**; **cours d'écochimie, hiver 87/88 Université de Kassel,**

Witzenhausen

- Koottatep, Th., Polprasert, C, Oanh, N.T.K.** (1999). "Preliminary Guidelines for Design and Operation of Constructed Wetland Treating Septage Treatment, Bangkok, March. Im Druck
- Lawson G., 1985;** cultivating reeds (*Phragmites australis*) for root zone treatment of sewage; Institute of Terrestrial Ecology, Merlewood Research station; 66p.
- Lemore C., 1984;** Colmatage et décolmatage des tranchées d'épandage en assainissement autonome; Thèse de Doctorat ENPC, Université de Paris Val-de-Marne, pp.1007+annexes.
- Lesavre J., 1990,** Infiltration-percolation par bassins des eaux résiduaires urbaines. Etat de l'art. Journée technique "les bassins d'infiltration" ARSTATE.
- Liénard, A., Molle, P., Troesch, S.; 2005** état de l'art de séchage de boues par lits de séchage 20 ans de recherche, colloque sur les traitements des boues par lit de séchage, rapport.
- Revil A., Cathes L.M., 1999;** Permeability of shaly sands Water research, Vol.35, No 3, pp 651-662.
- Strauss, M., Heinss, U., Montangero, A.** (1999). "On-Site Sanitation: When the Pits are full-Planning for Resource Protection and Faecal Sludge management". Water Research and Technology, im Druck.
- Rodewald-Rubescu L., 1974;** Das Schufrohr. *Fragmites communis* Trinius. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 303p.
- Vigneswaran S., Suazo R.B., 1987;** A detailed investigation of physical and biological clogging during artificial recharge; water air and soil pollution, Vol.35, pp.119-140.
- Wéthé J., Kientga M, Koné D., Kuéla N. , 2001;** Profil du recyclage des eaux usées dans l'agriculture urbaine à Ouagadougou. Projet de recherche/consultation pour le développement durable de l'agriculture urbaine en Afrique de l'Ouest. IAGU – EIER – RFAU/AOC. p101.

Annexes

Annexes

Annexe 1 : Dispositifs d'enregistrement de vitesse d'infiltration et de débit instantané et d'aération de boues et de matières de vidange



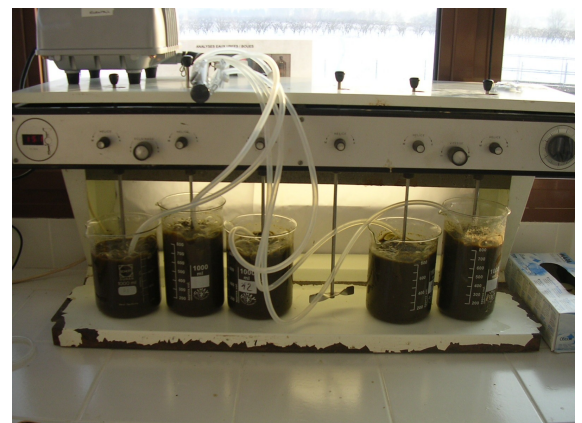
Enregistreur des vitesses de ressuyage et d'infiltration



Colonnes d'essai d'infiltration-percolation

Dispositif d'aération jar test

Jar-test pour l'aération des boues et de matières de vidange



Annexe 2 : Photos d'un CST-mètre

Description du CST-mètre



Annexe 3 : les granulométries de Sograp et La farge

Fiche technique de Lafarge

fiche technique						
matériaux:		Lafarge		Granulométrie		
masse ini (g)		360,4		Date de l'essai: 22/03/2006		
Tamisage						
Tamis S.I (mm)		tamisat		%		
taille (mm)	poids vide (g)	poids brut	poids Net	séparé	combiné	
0,001	412,5	412,5	0	0,00	0,00	
0,05	431,6	431,5	0	0,00	0,00	
0,1	427,2	427	0	0,00	0,00	
0,125	437,2	437,3	0,1	0,03	0,03	
0,16	419,1	419,2	0,1	0,03	0,06	
0,2	449,2	449,4	0,2	0,06	0,11	
0,25	442	442,2	0,2	0,06	0,17	
0,315	447,5	448	0,5	0,14	0,31	
0,4	467,9	469,6	1,7	0,47	0,78	
0,5	456,9	461,1	4,2	1,17	1,94	
0,63	496,5	506	9,5	2,64	4,58	
0,8	496,6	508,7	12,1	3,36	7,94	
1	515	533,7	18,7	5,19	13,12	
1,25	514,5	538,9	24,4	6,77	19,89	
1,6	542,1	587,1	45	12,49	32,38	
2	540,7	605,7	65	18,04	50,42	
2,5	537,7	715,1	177,4	49,22	99,64	
		Récupéré	359,1			
		perte	1,30			
porosité par le calcul						
poids (g)	volume (mL)	masse volumique apparente (kg/m3)	poids' (g)	volume' (mL)	masse volumique réelle	porosité %
415,8	250	1663,2	410,7	167	2459,3	32,4
417,4	250	1669,6	342,2	140	2444,3	31,7
419,3	250	1677,2			moyenne	32,0
332,3	200	1661,5			ecart-type	0,48
327,3	200	1636,5				
	moyenne	1661,6		moyenne	2451,8	32,2
	ecart type	15,3		ecart-type	10,6	
					porosité (calcul)	
					moyenne	32,1
					ecart-type	0,36

Fiche technique de Sograp

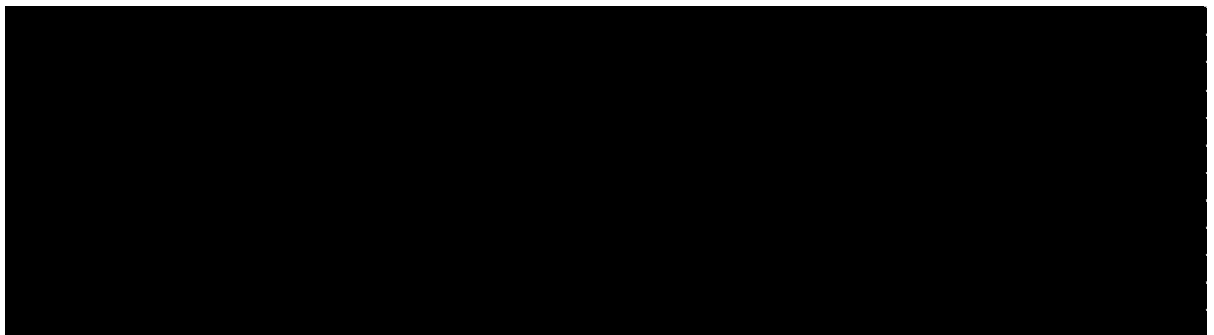
fiche technique						
matériaux:		sograp		Granulométrie		
masse ini (g)		244		Date de l'essai: 11/10/2005		
Tamisage						
Tamis S.I (mm)		tamisat			%	
taille (mm)	poids vide (g)	poids brut	poids Net	séparé	combiné	
0,001	412,5	414,1	1,6	0,66	0,66	
0,05	431,4	431,5	0,1	0,04	0,70	
0,1	426,8	427,9	1,1	0,45	1,15	
0,125	437,1	438,8	1,7	0,70	1,84	
0,16	419	421	2	0,82	2,66	
0,2	449	451,8	2,8	1,15	3,81	
0,25	441,9	446,8	4,9	2,01	5,82	
0,315	447,2	455,9	8,7	3,57	9,39	
0,4	467,8	482,8	15	6,15	15,53	
0,5	457	482	25	10,25	25,78	
0,63	496,8	531,9	35,1	14,39	40,16	
0,8	497,2	526	28,8	11,80	51,97	
1	514,8	545,3	30,5	12,50	64,47	
1,25	514,6	540,2	25,6	10,49	74,96	
1,6	542,4	562,9	20,5	8,40	83,36	
2	541,5	555,7	14,2	5,82	89,18	
2,5	538,1	564,6	26,5	10,86	100,04	
		Récupéré	244,1			
		perte	-0,10			
porosité par le calcul						
poids (g)	volume (mL)	masse volumique apparente (kg/m3)	poids' (g)	volume' (mL)	masse volumique réelle	porosité %
341,1	200	1705,5	420,6	172	2445,3	
334,9	200	1674,5	335,1	133,9	2502,6	
413,7	250	1654,8				
420,6	250	1682,4				
	moyenne	1679,3		moyenne	2474,0	32,1

Annexe 4 : les essais optimisation des ratios MV/BAP et l'effet de l'aération sur le temps de succion capillaire

Jar-Tests Optimisation MV/BAP								
Conditions opératoires:		24/01/2006					MS(g.kg-1)	MVS(% MS)
t1 agitation		rpm,	pendant		mn	BAP	4,298	41,457
t2 agitation		rpm,	pendant		mn	MV	70,3	58,9
VD		mn						
Volume jar test	0,8L							
V MV (L)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6		
V BAP (L)	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4		
BAP/MV	9,00	4,00	2,33	1,50	1,00	0,67		
VD (ml)	530	510	580	690	740	780		

Conditions opératoires:		31/01/2006					MS(g.l-1)	MVS(% MS)
t1 agitation		rpm,	pendant		mn	BAP	4,75	67,2
t2 agitation		rpm,	pendant		mn	MV	46,23	56,9
VD		mn						
Volume jar test	0,8L							
V MV (L)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35		
V BAP (L)	0,9	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65		
V MV (L) (pr 800ml)	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28		
V BAP (L) (pour 800ml)	0,72	0,68	0,64	0,60	0,56	0,52		
BAP/MV	9,00	5,67	4,00	3,00	2,33	1,86		
VD (ml)	540	600	640	690	695			

Conditions opératoires:		31/01/2006					MS(g.l-1)	MVS(% MS)
t1 agitation		rpm,	pendant		mn	BAP	4,75	67,2
t2 agitation		rpm,	pendant		mn	MV	46,23	56,9
VD		mn						
Volume jar test	0,8L							
V MV (L)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35		
V BAP (L)	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7		
V MV (L) (pr 800ml)	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28		
V BAP (L) (pour 800ml)	0,81	0,72	0,64	0,56	0,49	0,42		
BAP/MV	9,00	5,67	4,00	3,00	2,33	1,86		
VD (ml)	560	580	630	700	670			



Conditions opératoires:		08/02/2006 Uniquement aération pendant 25 min					MS(g.l-1)	MVS(% MS)
t1 agitation		rpm,	pendant		mn	BAP		
t2 agitation		rpm,	pendant		mn	MV		
VD		mn						
Volume jar test	0,8L							
V MV (L)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35		
V BAP (L)	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7		
V MV (L) (pr 800ml)	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28		
V BAP (L) (pour 800ml)	0,81	0,72	0,64	0,56	0,49	0,42		
BAP/MV	9,00	5,67	4,00	3,00	2,33	1,86		
VD (ml)	700	750	740	760	730			

Conditions opératoires:		15/02/2006 Sans aération					MS(g.l-1)	MVS(% MS)
t1 agitation		rpm,	pendant		mn	BAP		
t2 agitation		rpm,	pendant		mn	MV		
VD		mn						
Volume jar test	0,8L							
V MV (L)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,05	
V BAP (L)	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,950	
V MV (L) (pr 800ml)	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,04	
V BAP (L) (pour 800ml)	0,81	0,72	0,64	0,56	0,49	0,42	0,90	
BAP/MV	9,00	5,67	4,00	3,00	2,33	1,86	19,00	
VD (ml)	520	530	570	580	600	610		

Conditions opératoires:		15/02/2006 Avec aération (surpresseur)					MS(g.l-1)	MVS(% MS)
t1 agitation		rpm,	pendant		mn	BAP		
t2 agitation		rpm,	pendant		mn	MV		
t aération								
VD		mn						
Volume jar test	0,8L							
V MV (L)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35		
V BAP (L)	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7		
V MV (L) (pr 800ml)	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28		
V BAP (L) (pour 800ml)	0,81	0,72	0,64	0,56	0,49	0,42		
BAP/MV	9,00	5,67	4,00	3,00	2,33	1,86		
Eh initial	-280,00	-280,00	-300,00	-300,00	-300,00	-315,00		
Eh final								
VD (ml)	580	630	600	690	695	700		

Conditions opératoires:		15/02/2006		Avec aération (surpresseur)				MS(g.l-1)	MVS(% MS)
t1 agitation		rpm,		pendant		mn	BAP		
t2 agitation		rpm,		pendant		mn	MV		
t aération								MS(g.kg-1) MVS(% MS)	
VD		mn					BAP	4,39 72,8	
							MV	41,67 64,9	
Volume jar test	0,8L								
V MV (L)		0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35		
V BAP (L)		0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7		
V MV (L) (pr 800ml)		0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28		
V BAP (L) (pour 800ml)		0,81	0,72	0,64	0,56	0,49	0,42		
BAP/MV		9,00	5,67	4,00	3,00	2,33	1,86		
VD (ml)		580	630	600	690	695	700		

Conditions opératoires:		15/02/2006		Avec faible aération (mini pompe)				MS(g.l-1)	MVS(% MS)
t1 agitation		rpm,		pendant		mn	BAP		
t2 agitation		rpm,		pendant		mn	MV		
t aération								MS(g.kg-1) MVS(% MS)	
VD		mn					BAP	4,39 72,8	
							MV	41,67 64,9	
Volume jar test	0,8L								
V MV (L)		0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35		
V BAP (L)		0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7		
V MV (L) (pr 800ml)		0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28		
V BAP (L) (pour 800ml)		0,81	0,72	0,64	0,56	0,49	0,42		
BAP/MV		9,00	5,67	4,00	3,00	2,33	1,86		
VD (ml)		700	750	740	760	730			

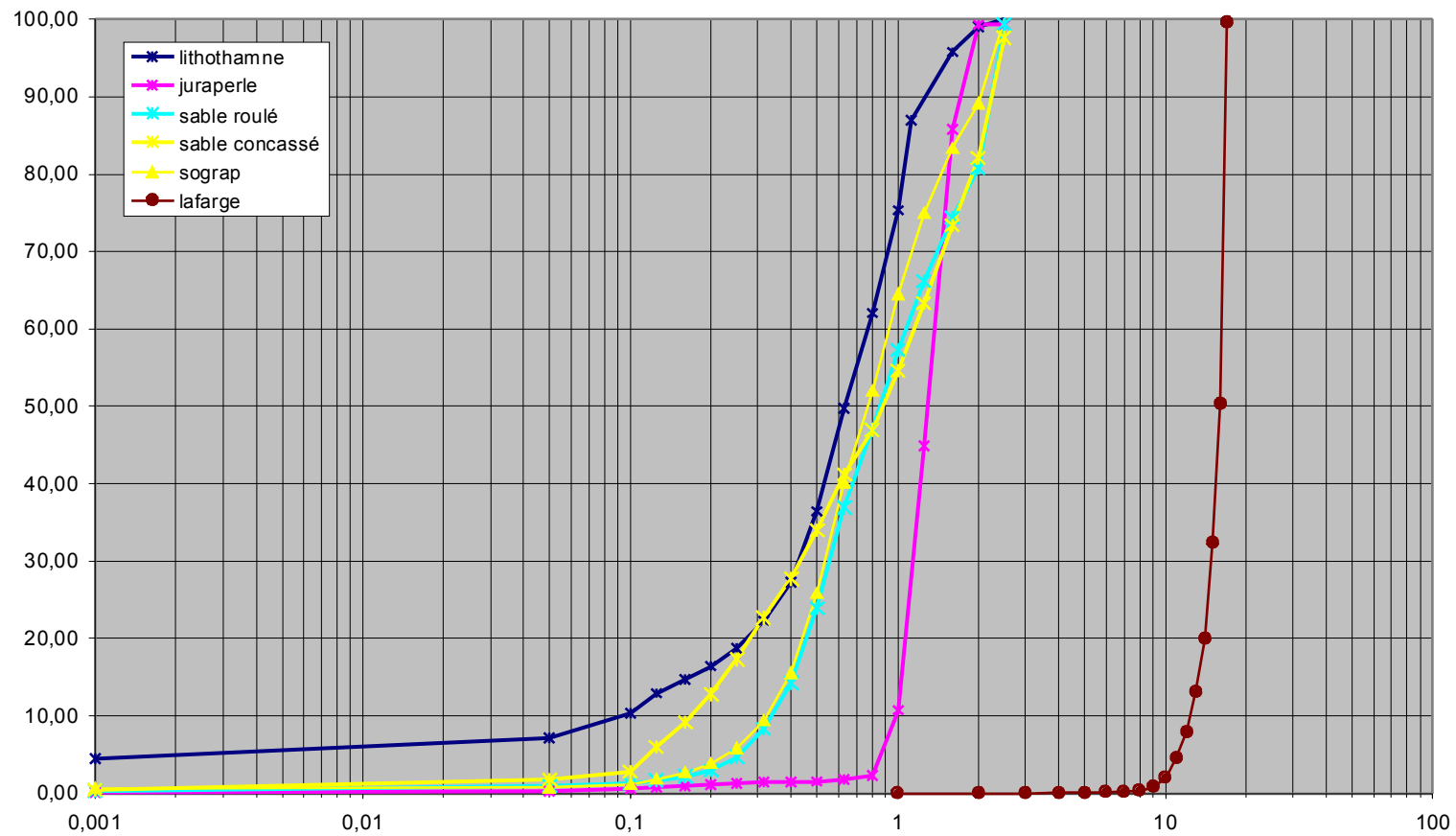
Conditions opératoires:		23/03/2006		Avec faible aération (mini pompe)				MS(g.l-1)	MVS(% MES)
t1 agitation		rpm,		pendant		mn	BAP	3,39 78,5	
t2 agitation		rpm,		pendant		mn	MV	49,62 65,3	
t aération								MS(g.kg-1) MVS(% MS)	
VD		mn					BAP		
							MV		
Volume jar test	0,8L								
V MV (L)		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6		
V BAP (L)		0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4		
V MV (L) (pr 800ml)		0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48		
V BAP (L) (pour 800ml)		0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16		
BAP/MV		9,00	4,00	2,33	1,50	1,00	0,67		
Eh initial									
Eh final									
VD (ml)		700	750	740	760	730			
CST (s)		26,3	95,6	132,3					

Conditions opératoires:		23/03/2006		Avec faible aération (mini pompe)				MS(g.l-1)	MVS(% MES)
t1 agitation		rpm,		pendant		mn	BAP	3,39 78,5	
t2 agitation		rpm,		pendant		mn	MV	49,62 65,3	
t aération								MS(g.kg-1) MVS(% MS)	
VD		mn					BAP		
							MV		
Volume jar test	0,8L								
V MV (L)		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6		
V BAP (L)		0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4		
V MV (L) (pr 800ml)		0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48		
V BAP (L) (pour 800ml)		0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16		
BAP/MV		9,00	4,00	2,33	1,50	1,00	0,67		
VD (ml)		700	750	740	760	730			
CST (s)		26,3	95,6	132,3					

Conditions opératoires:		23/06/2006	Sans aération				MS(g.l-1)	MVS(% MS)
t1 agitation		rpm,	pendant		mn	BAP		
t2 agitation		rpm,	pendant		mn	MV		
t aération							MS(g.kg-1)	MVS(% MS)
VD		mn				BAP		
						MV		
Volume jar test	0,8L							
V MV (L)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1	0
V BAP (L)	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,0	1
V MV (L) (pr 800ml)	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,80	
V BAP (L) (pour 800ml)	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16	0,00	
BAP/MV	9,00	4,00	2,33	1,50	1,00	0,67	0,00	
Eh initial								
Eh final								
VD (ml)	700	750	740	760	730			
CST (s)	36,6	90,5	176,7				6,5	281
Conditions opératoires:		13/06/2006	Avec faible aération (mini pompe)				MS(g.l-1)	MVS(% MES)
t1 agitation	70	rpm,	pendant	20	mn	BAP		
t2 agitation	-	rpm,	pendant	-	mn	MV		
t aération	20						MS(g.kg-1)	MVS(% MS)
VD	20	mn				BAP		
						MV		
Volume jar test	0,8L							
V MV (L)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1	0
V BAP (L)	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,0	1
V MV (L) (pr 800ml)	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48		
V BAP (L) (pour 800ml)	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16		
BAP/MV	9,00	4,00	2,33	1,50	1,00	0,67		
Eh initial								
Eh final								
VD (ml)	300	280	250	220	350	680		
CST (s)	57,2	24,5	134,7	141,5	171,2	229,6	403,1	4,3
Conditions opératoires:		13/06/2006	Sans aération				MS(g.l-1)	MVS(% MS)
t1 agitation	70	rpm,	pendant	20	mn	BAP		
t2 agitation	-	rpm,	pendant	-	mn	MV		
t aération							MS(g.kg-1)	MVS(% MS)
VD	20	mn				BAP		
						MV		
Volume jar test	0,8L							
V MV (L)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1	0
V BAP (L)	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,0	1
V MV (L) (pr 800ml)	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,80	
V BAP (L) (pour 800ml)	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25	0,16	0,00	
BAP/MV	9,00	4,00	2,33	1,50	1,00	0,67	0,00	
Eh initial								
Eh final								
VD (ml)	370	410	500	570	680	650		
CST (s)	18,9	76,5	115,7	133,6	151,1	235	403,1	4,3

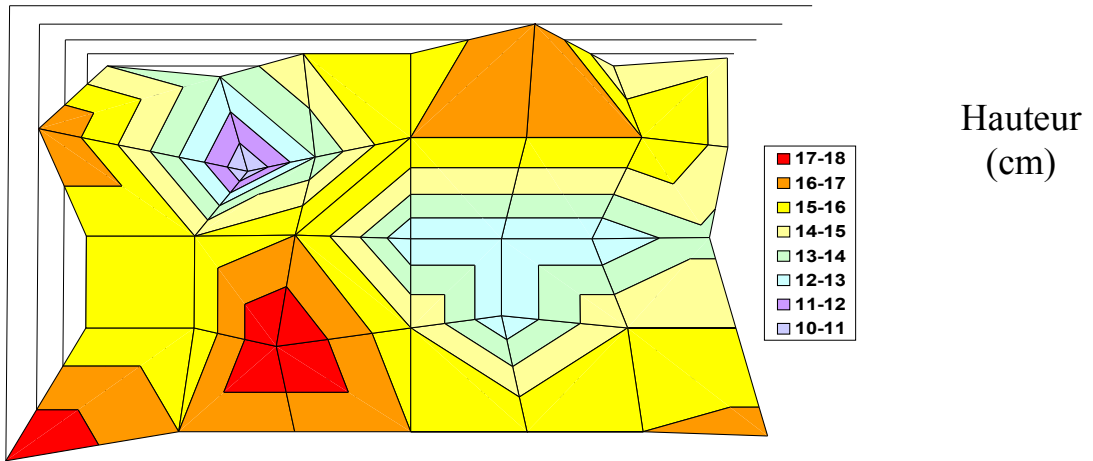
ANNEXES

Annexes 5 : Les courbes granulométriques de large et Sograp comparées à d'autres types de sables

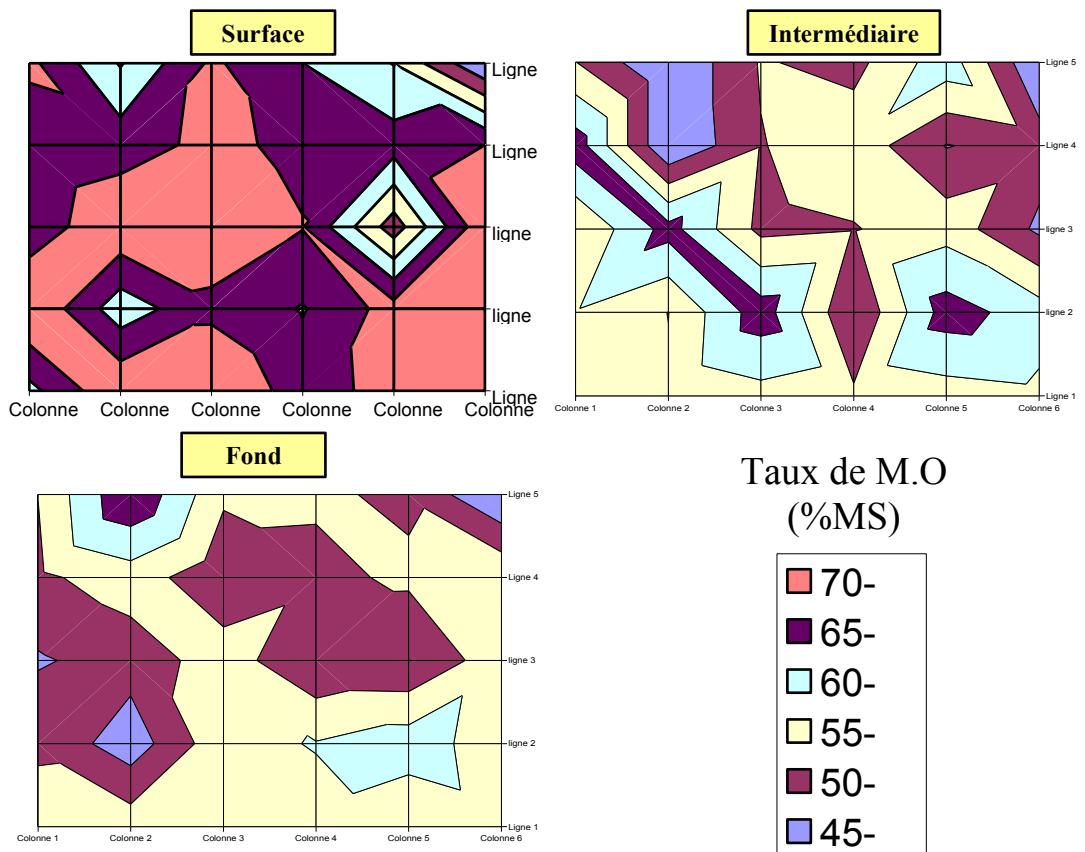


Annexes 6 : les répartitions de la siccité, de la matière organique et matières organiques volatiles dans un bassin planté de roseaux pour le séchage des boues

Répartition de la hauteur des boues dans un bassin planté de roseaux



Répartition du taux de matières organiques en fonction de la profondeur des boues dans un bassin planté de roseaux



Réparation de la siccité en fonction de la profondeur des boues dans un bassin planté de roseaux

