



HAL
open science

Evaluation de l'efficacité des jardins filtrants® pour le traitement des boues urbaines et industrielle

Magali Berthou

► **To cite this version:**

Magali Berthou. Evaluation de l'efficacité des jardins filtrants® pour le traitement des boues urbaines et industrielle. Sciences de l'environnement. 2010. hal-01883553

HAL Id: hal-01883553

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01883553>

Submitted on 28 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

MASTER FAGE
Biologie et Ecologie pour la Forêt,
l'Agronomie et l'Environnement

Spécialité
Gestion des écosystèmes

EVALUATION DE L'EFFICACITE DES JARDINS
FILTRANTS® POUR LE TRAITEMENT DES BOUES
URBAINES ET INDUSTRIELLES

BERTHOU MAGALI

Mémoire de stage- Soutenu à Nancy le 06/09/2010

Thierry Jacquet, président et Blandine Goussebayle, Chef de
projet

Bernard Amiaud, enseignant chercheur

Société : Phytorestore
7 Impasse Milord
75018 Paris

6 septembre 2010

SOMMAIRE

1.	Introduction.....	3
2.	Présentation de la société	5
3.	Matériels et méthodes.....	6
3.1	Configuration des Jardins Filtrants® boues	6
3.1.1	Le substrat	7
3.1.2	Les plantes	8
3.2	Caractérisations de stations d'épurations urbaines.....	9
3.2.1.	Le traitement des eaux usées	9
3.2.2.	Les Jardins filtrants boues ®.....	9
3.3	Méthode de prélèvement.....	10
3.3.1	Lieu de prélèvement	10
3.3.2	Prélèvement de l'échantillon	11
3.3.3	Caractéristiques du prélèvement de chaque site	12
3.4	Méthode d'analyses.....	12
3.4.1	L'étude de la siccité	12
3.4.2	L'étude des métaux et de la valeur agronomique	12
3.4.3	L'étude des microorganismes.....	13
4.	Résultats et discussion	14
4.1	Siccité des boues.....	14
4.2	La minéralisation de la Matière organique	15
4.2.1.	Matière minérale et matière organique	15
4.2.2.	Concentration en nutriments.....	16
4.3	Concentration des métaux lourds	17
4.4	Concentration des microorganismes	19
4.5	Analyse des lixiviats.....	20
4.6	Filtre de piégeage.....	21
5.	Conclusion.....	23
6.	Bibliographie.....	24

6 septembre 2010

Remerciements

Je voudrais tout d'abord dire un grand merci à mon maître de stage pour ces conseils et le temps passé pour la correction de mon rapport.

Je remercie également Thierry Jacquet pour m'avoir confiée cette étude très intéressante et pour le partage de ses nombreuses connaissances.

Je souhaiterais également remercier Alexandra Fresneau et Frédéric Baudrier pour la confiance qui m'ont accordé au cours de ce stage

Pour finir, merci à toute l'équipe de Paris mais également de La Bioferme, Sandrine, Christelle, Eponine, Olivier, Julie, Julien, Esterelle, Philippe, Elsa, Valérie, Kévin, Didier, Jamel pour leur sympathie, leur enthousiasme et leur partage de connaissance tout au long de la durée de mon stage.

6 septembre 2010

1. Introduction

La gestion des eaux usées urbaines et industrielles est un sujet de plus en plus important pour les petites et les grandes agglomérations et la quantité des déchets issus de ce traitement est en constante augmentation. Elles doivent faire face à deux problématiques : des normes de rejet de plus en plus rigoureuses et une quantité de déchets issus de ce traitement en constante augmentation.

Les eaux usées sont collectées et dirigées vers des stations d'épurations pour leur traitement afin d'éliminer les matières organiques, azotées et phosphorées et les polluants métalliques avant d'être évacuées dans le milieu naturel. Le traitement de ces eaux usées induit une production de déchets secondaires appelés boues urbaines. La pollution se retrouve concentrée dans ces boues et pose des problèmes au niveau de leur élimination tout en respectant avec la réglementation.

Actuellement en Europe, les principales techniques d'éliminations et de valorisation des boues urbaines sont : l'épandage (30 à 40%), l'incinération (20%), l'enfouissement (20%), le compostage (5 à 10 %) (ADEME). Mais ces techniques traditionnelles sont de plus en plus controversées. Il existe un coût élevé pour l'enfouissement. De même des problèmes liés à la pollution atmosphérique et aux apports d'énergie important semble remettre en cause l'incinération. Des techniques alternatives pour les boues est donc fortement encouragée par les autorités avec notamment la technique de lits plantés de roseaux.

L'objectif de mon stage est de faire le bilan de l'efficacité de cette filière de traitement par lit plantés de roseaux et plus particulièrement des Jardins Filtrants® boues urbaines. Cette technique est développée par la société Phytorestore. Cette technique de Jardins Filtrants® intègre une fonction de traitement, un rendu esthétique et une notion de biodiversité.

Cette étude devra montrer dans quelle mesure ces Jardins Filtrants® peuvent être une alternative en substitution ou complémentaire de traitement des boues urbaines en répondant au nouveau critère à savoir : performance de stockage, de déshydratation ; qualité agronomique et d'hygénéisation finale des boues pouvant alors sortir de leur statut de déchet en devenant des composts normés (Norme NT U44-095).

Elle permettra aussi de comprendre comment s'effectue la minéralisation et qu'elle est l'influence de la rhizosphère sur le traitement des boues ? Les métaux sont ils immobilisés dans le filtre ou percolent ils au travers du casier ? Ces boues peuvent-elles réellement devenir un compost conforme à la norme NF U44-095 et sous quelles conditions ?

Après une présentation des méthodes d'analyses pour l'étude des différents paramètres d'intérêt (siccité, métaux, azote, phosphore, microorganisme), les résultats seront interprétés puis discutés pour enfin, conclure sur l'efficacité de ce traitement.

2. Présentation de la société

La société Phytorestore a été créée en 2004 par M. Thierry Jacquet. C'est une entreprise de type SAS avec un capital de 1039700€. Le principe de la société est de dépolluer l'eau, l'air et le sol par le système de la phytorestauration grâce à la mise en place de Jardins Filtrants® qui est une marque déposée dont Phytorestore a l'usage exclusif.

Cette technique a pu être mise au point par l'acquisition de 20 ans d'expérience au sein d'un bureau d'étude, « Site et Concept », fondé par M. Jacquet auparavant. Actuellement, l'entreprise possède plusieurs brevets dont le Jardins Filtrants® boues et le Filtrés de piégeage® qui font l'objet de mon étude. Phytorestore a déjà réalisé de nombreux de Jardins Filtrants® boues en France pour des villes ou des usines (près d'une vingtaine).

Elle détient également un centre de compostage en Seine et Marne (77) nommé « La Bioferme » qui utilise la technique des Jardins Filtrants® boues. Elle est régie par la rubrique n°2170 « Fabrication des engrais et supports de culture à partir de matières organiques et mettant en œuvre un procédé de transformation biologique aérobie (compostage) des matières organiques ».

Parmi les réalisations de Phytorestore, cinq réalisations font partie de l'étude sur l'efficacité des Jardins Filtrants® boues ainsi que La Bioferme à titre comparatif puisque l'enjeu est de faire des casiers plantés pour les boues urbaines comme de véritable mini centre de compostage par roseaux.



Figure 1 : Photographie et dessins de réalisations de Jardins Filtrants® (source : Phytorestore)

3. Matériels et méthodes

Pour ces cinq sites de traitement de boues urbaines, les boues proviennent d'un traitement de boue activée. En sortie de clarificateur, elles sont riches en matière organique, très fermentescible et contiennent 99% d'eau. Le traitement devra stabiliser ces boues, les déshydrater et également les hygiéniser (ADEME). Ces boues urbaines peuvent présenter un intérêt agronomique selon la filière de traitement, généralement l'épandage. Les lits plantés de roseaux dirigent ces boues vers une valorisation en amendements organiques selon la norme épandage. Cette réglementation impose des seuils à ne pas dépasser au niveau des éléments traces, des composés traces organiques et des microorganismes d'intérêt sanitaire.

Dans cette étude, nous avons donc analysé les boues urbaines en fonction de la Norme NF U44-095 (compost) mais également en fonction de la réglementation pour l'épandage. Ainsi, les 7 ETM (éléments traces métalliques), les microorganismes mais également la valeur agronomique au travers de l'analyse du phosphore et des composés azotés seront étudiés.

3.1 Configuration des Jardins Filtrants® boues

La réalisation des lits plantés de roseaux pour les boues urbaines est assez simple et moins coûteuse qu'une solution traditionnelle. (Steer D., 2003). Ils sont constitués, de bas en haut, d'un complexe d'étanchéité (géomembrane), d'une couche de drainant et de compost planté de macrophytes

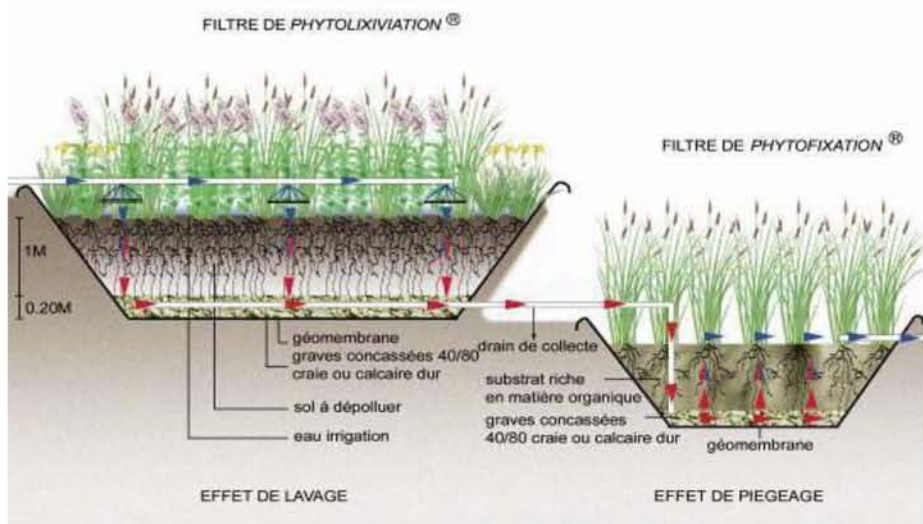


Figure 2 : Coupe type de Jardins Filtrants® boues et Filtre de piégeage (source Phytorestore)



Figure 3 : Jardins Filtrants® boues de la Bioferme (source Phytorestore)

6 septembre 2010

3.1.1 Le substrat

La société Phytorestore construit les Jardins Filtrants® en privilégiant une couche de compost importante de 30 cm au dessus de la couche de gravier. En général, les lits plantés de roseaux pour les boues urbaines sont constituées d'une importante couche de drainant avec une granulométrie différente de 10 cm fait de sable et de gravier (Liénard A., 2009). Aujourd'hui le Cemagref recommande une couche de compost de 10 cm en surface depuis 2009.

Ces réalisations permettent aux boues extraites de la station d'épuration de se déposer à la surface de ce filtre. Les matières en suspension et les matières organiques sont retenues sur le filtre grâce à la couche filtrante. L'eau présente dans les boues est filtrée et retourne en tête de station. Ces eaux sont appelées lixiviats. Ces derniers peuvent aussi passer dans un Filtre de piégeage® avant le retour en tête de station afin de permettre un traitement de la charge organique résiduelle.

L'apport d'oxygène est indispensable pour permettre la croissance des végétaux mais également pour une bonne minéralisation des boues et éviter toute fermentation. Pour cela, il existe des cheminées d'aération au bout des drains. Dans les Jardins Filtrants® boues un second réseau de drains est mis en place pour permettre une aération dite supérieure. Elle se situe entre la couche de compost et la couche de drainant.



Figure 4: Exemple de construction des Jardins Filtrants® boue de Briis sous Forges (91) en 2008
(source : Phytorestore)

3.1.2 Les plantes

Les plantes sont les acteurs principaux dans ce traitement. En effet, leurs racines contribuent à l'apport d'oxygène dans le sol dû aux phénomènes de la photosynthèse (Liénard A., 2009) mais contribuent également à l'apport d'une source d'énergie pour les microorganismes du sol. Ce lieu d'échange entre les racines, les microorganismes et les minéraux du sol est la rhizosphère. Comme le montre la figure ci-dessous, la zone rhizosphérique est un lieu d'interaction physico-chimique permanent (Hinsinger, 2001).

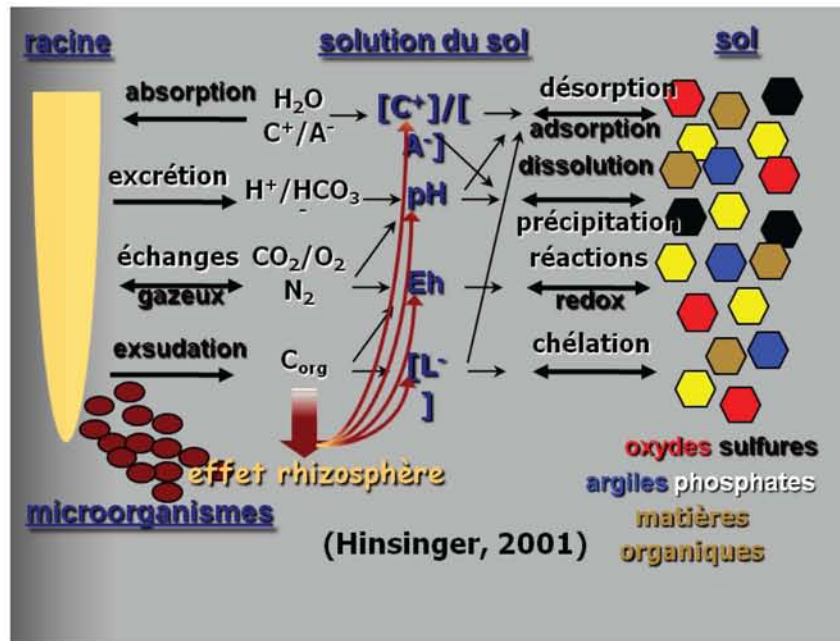


Figure 5: Interactions sol-plante dans la rhizosphère (Hinsinger, 2001)

Les plantes peuvent donc jouer un rôle indirect dans le processus épuratoire à travers ces interactions (H., 1997) d'où leur utilisation pour le traitement des boues urbaines.

Les plantes couramment utilisées pour ce type de traitement sont les roseaux communs (*Phragmites australis*). Mais dans les paragraphes qui suivent, il sera expliqué que les Jardins Filtrants® boues sont plantés également, de massettes (*Thypha latifolia* L.), de scirpes (*Scirpus sylvaticus*) et d'iris jaunes (*Iris pseudacorus* L.) du fait de la demande qui favorise la biodiversité.

Ces héliophytes sont choisis pour leur capacité à résister aux variations de charge de pH et possèdent une forte biomasse racinaire favorable à la mise en place d'une rhizosphère importante.



Figure 6 : *Iris pseudacorus* (Kirpichtchikova, 2009)



Figure 7 : *Phragmites australis* (Kirpichtchikova, 2009)

6 septembre 2010

Les Jardins Filtrants® boues urbaines sont réalisés de manière identique d'un projet à l'autre. Il faut cependant prendre en compte le critère de conception et de dimensionnement de ces ouvrages (nombre de lits, ratio MS kg/m²..). Ces derniers points vont être pris en compte pour l'étude de nos résultats.

3.2 Caractérisations de stations d'épurations urbaines

Nous avons choisi 5 stations d'épuration (STEP) traitant les boues urbaines par les Jardins Filtrants® boues car elles sont toutes supérieures à 2000 E Hab. Comme le montre les tableaux 1 et 2, les stations et la conception des casiers possèdent des caractéristiques différentes car elles sont contraintes par la place disponible.

3.2.1. Le traitement des eaux usées

Dans les cinq sites étudiés, les boues envoyées dans les Jardins Filtrants® proviennent de filière de traitement des eaux usées urbaines par boues activées. Nous pouvons voir dans le tableau 1 que les stations ont une capacité de traitement des eaux allant de 75 000 EH pour Alençon à 2 000 EH pour Le Teilleul. Par conséquence, le volume de boues par jour filtrées dans les Jardins varie également, de 80 à 36 m³/j.

	Honfleur	Alençon	Marines	Yerville	Le Teilleul
Département français	14	61	95	76	50
Date de mise en service	2004	2006	2007	2008	2008
Capacité (EH)	26 000	75 000	3 500	5 700	2 000
Type de traitement des eaux usées	boue activée	boue activée	boue activée	boue activée	boue activée
volume de boue à extraire (m³/j)	80-120	50	38	36	51
Concentration de MES (g/l)	3	16	8	8	10

Figure 8 : Caractérisations des stations de traitements des eaux usées

3.2.2. Les Jardins Filtrants® boues

Du fait de la capacité de traitement des stations, le dimensionnement et le nombre de casiers seront également différents. Les superficies des filtres sont proportionnelles à la taille de la capacité de la station d'épuration. En effet, nous pouvons voir d'après le tableau 2 que les stations possèdent 3 à 4 casiers allant de 2700m² pour Honfleur à 333 m² pour Le Teilleul. Un casier doit être alimenté pendant une semaine avec une extraction par jour, voir deux pour les grosses stations (Honfleur et Alençon). Le Teilleul, par son faible débit, nécessite une extraction par semaine. Ainsi, ce casier pourra bénéficier de 2 à 3 semaines de repos.

Des Filtres de piégeages en fin de traitement sont utilisés pour Marines et Yerville pour les ETMs

La Bioferme est un site de traitement de boues urbaines et industrielles. Elle est composée de 24 casiers de 300 m² et de 2 Filtres de Piégeage® de 10 m². La masse de compost produit ne dépassera pas les 10 t par jours.

	Honfleur	Alençon	Marines	Yerville	Le Teilleul
Nombres de Casiers	3	3	3	4	3
Surface total	8 200	2 400	1 800	2 500	
Surface des casiers (m2)	2 700	800	600	600	333
Nombres d'extraction	2 / jours	2 / jours	1/jour	1/jour	1/sem
Quantité de boue à traiter (kg MS/m ²)	75	85	85	75	85
Type de végétaux plantés	Phragmites/Iris Typhas	Phragmites/Iris Typhas	Phragmites/Iris Typhas	Phragmites/Iris Typhas	Phragmites/Iris Typhas
Filtre de piégeage®	-	-	165m ²	25m ²	-

Figure 9 : Caractéristiques des Jardins Filtrants® boues lors de l'étude

3.3 Méthode de prélèvement

3.3.1 Lieu de prélèvement

Le prélèvement de l'échantillon de boue sera donc effectué dans le casier le plus sec de la station. Il s'effectue au milieu du casier dans une surface de 1m².

- Cheminée d'aération
- Bouche d'alimentation
- Zone de prélèvement
- Point de prélèvement

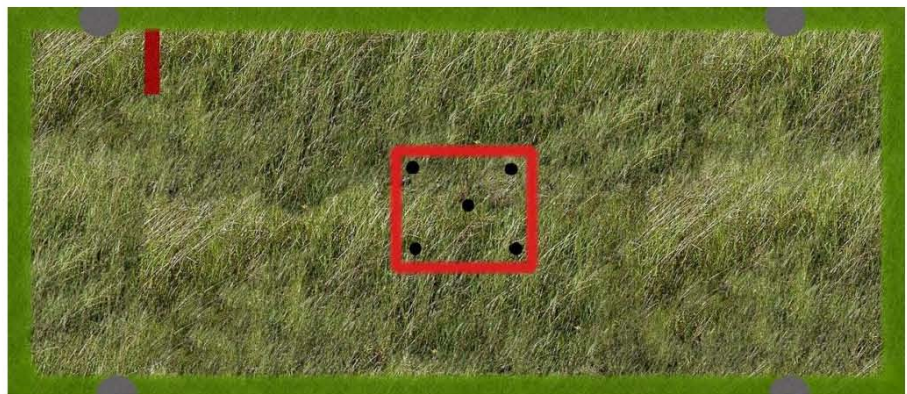


Figure 10 : vue en plan masse de la zone de prélèvement

Suivant la quantité d'échantillon nécessaire pour l'étude et la quantité de boue prélevée, plusieurs points de prélèvement sont nécessaires. La boue sera alors recueillie dans un même flacon puis homogénéisée.

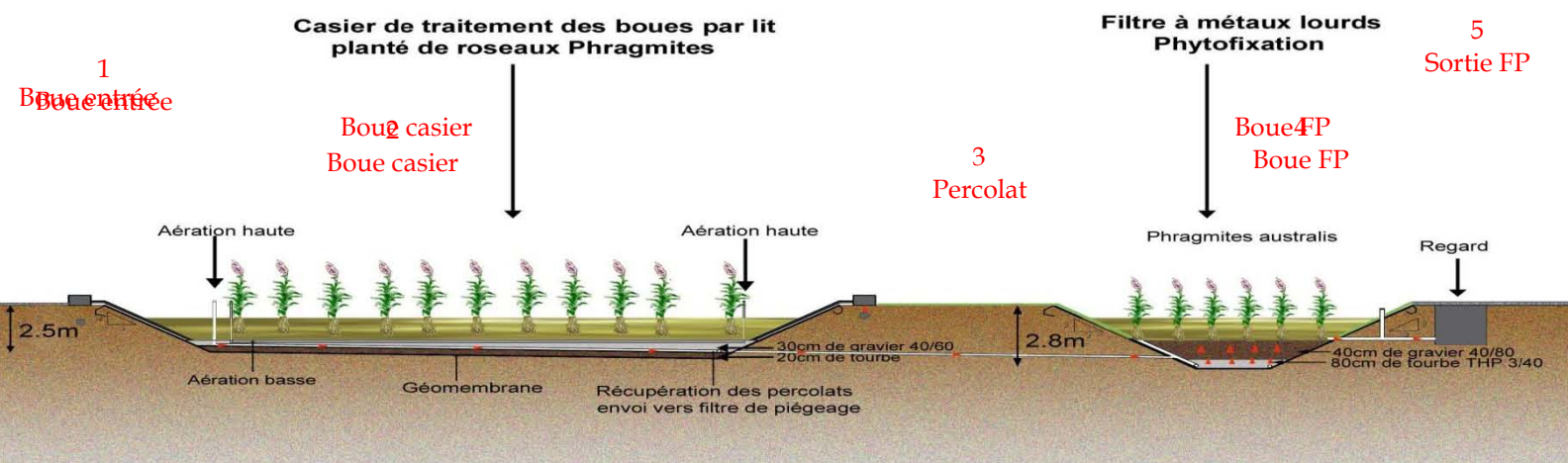


Figure 11 : Coupe transversale de Jardins Filtrants® boues et du Filtre de Piégeage® avec les points de prélèvement de l'étude (source Phytorestore)

Le tableau n°3, indique la nature des différents prélèvements sur les différents sites.

Prélèvement	1	2	3	4	5
Honfleur	×	×	×		
Alençon		×	×		
Marines		×		×	×
Yerville		×	×	×	×
Le Teilleul		×	×		

Figure 12 : Les différents prélèvements sur les différents sites

3.3.2 Prélèvement de l'échantillon

Il est réalisé à l'aide d'un carotteur de 1 mètre de longueur et de 10 cm de diamètre. Suivant l'âge de la station et l'épaisseur de boue dans le casier, nous avons pu obtenir des carottes de 15 cm à 50 cm de longueur.

Le prélèvement de 50 cm correspondant à la station d'Honfleur a été scindé en 3 comme le montre le schéma 2.

	Type de boue	n°	L (cm)
B	entrée	A	
C	surface	B	0-20
D	intermédiaire	C	20-40
	profond	D	40-50

Figure 13 : Découpage de la carotte de prélèvement d'Honfleur

Pour chaque lieu de prélèvement une fiche descriptive du casier est remplie afin de relever les caractéristiques des lieux de prélèvement (végétaux, épaisseur de boue, température du casier,...).



Figure 14 : Prélèvement de la boue du casier



Figure 15 : Carotte de boue

3.3.3 Caractéristiques du prélèvement de chaque site

Sur les 5 stations d'épuration, nous avons constaté que chaque STEP a une gestion différente. En effet, nous avons pu voir précédemment que leur caractéristique de conception est différente, mais l'environnement du casier l'est également. Ces caractéristiques ont leurs importances car elles influencent le traitement des boues comme nous allons le constater à partir des résultats d'analyse.

Les prélèvements sont effectués dans des zones denses en végétaux et en bon état. Nous avons pu constater que dans les casiers, les phragmites avaient pris toute la place au détriment des autres espèces présentes au démarrage.

	Honfleur	Alençon	Marines	Yerville	Le Teilleul	Bioferme
Température des boues (°C)	18.9	22.2	?	16.6	22.2	16
Epaisseur de boue dans le casier (cm)	100	20	+50	33	25	20
Taille de la carotte de boue (cm)	50	15	30	16	14	15
Type de végétaux	Phragmites	Phragmites	Phragmites	Phragmites	Phragmites	Phragmites
Etat des végétaux lors de l'étude	+++	+++	-	+++	+++	+++
Temps de repos du casier	15 jours	21 jours	15 jours	15 jours	4 mois	21 jours

+++ Bon ; ++ moyen ; + passable, - mauvais
 Figure 16: Description du lieu de prélèvement

3.4 Méthode d'analyses

3.4.1 L'étude de la siccité

La siccité correspond au pourcentage massique de matière sèche. Les échantillons sont séchés à 105°C pendant au moins 15h. Ces mesures sont obtenues dans le laboratoire de la société en utilisant une étuve.

3.4.2 L'étude des métaux et de la valeur agronomique

⇒ Les boues

Elles sont analysées par le Laboratoire SAS COFRAC. Il réalise une extraction à l'eau régale selon la norme NF EN 13346 pour les éléments traces métalliques ; le dosage du Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Mo, Zn, est fait selon la norme NF EN ISO 11885 par spectrométrie d'émission plasma. Pour le mercure, il utilise une méthode interne selon la norme NF EN ISO 12338.

6 septembre 2010

⇒ Les lixivats :

Pour l'analyse des lixivats des casiers, nous avons étudié la méthode de test en cuve LANGE qui sont des mesures par spectrophotomètre. Les éléments étudiés pour ces eaux sont : les métaux lourds (Cadmium, Chrome, Cuivre, Zinc, Plomb, Nickel), l'azote (total, ammonium, nitrite, nitrate) et la DCO (demande chimique en oxygène). Tous ces tests sont réalisés au moyen de ces cuves lues après réaction au Spectrophotomètre DR 2800.

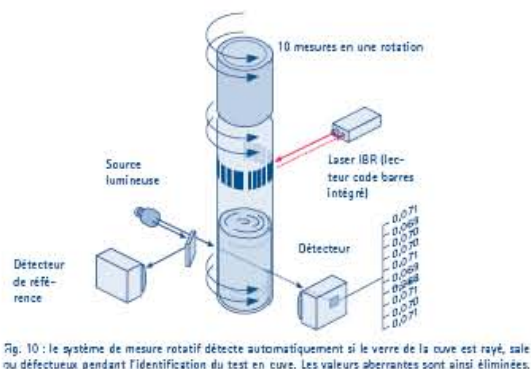


Figure 17 : Cuve test Lange (source : rapport d'application Lange)

3.4.3 L'étude des microorganismes

Les microorganismes recherchés sont ceux correspondant à la norme NF U44-095. La quantité nécessaire pour leur détermination est de 1 litre contenue dans un flacon stérile.

Agents pathogènes	Méthodes	Normes d'analyse du Laboratoire
Escherichia coli	Incorporation	NF ISO 16649-2
Clostridium perfringens	Incorporation	NF EN ISO 7937
Entérocoques	NPP microplaques	NF EN ISO 7899-1
Œufs d'helminthes viables	Flottation	Méthode interne
Listeria monocytogenes	Enrichissement	NF EN ISO 11290-1
Salmonelles	Enrichissement	NF EN ISO 6579

Figure 18 : Méthodes d'analyse des agents pathogènes étudiés par SAS Laboratoire

4. Résultats et discussion

4.1 Siccité des boues

Les boues séchées sont évaluées en déterminant le pourcentage de matières sèches. Les graphiques ci-dessous présentent les siccités des différentes STEP et pour Honfleur nous les avons représentés suivant la profondeur de l'échantillon.

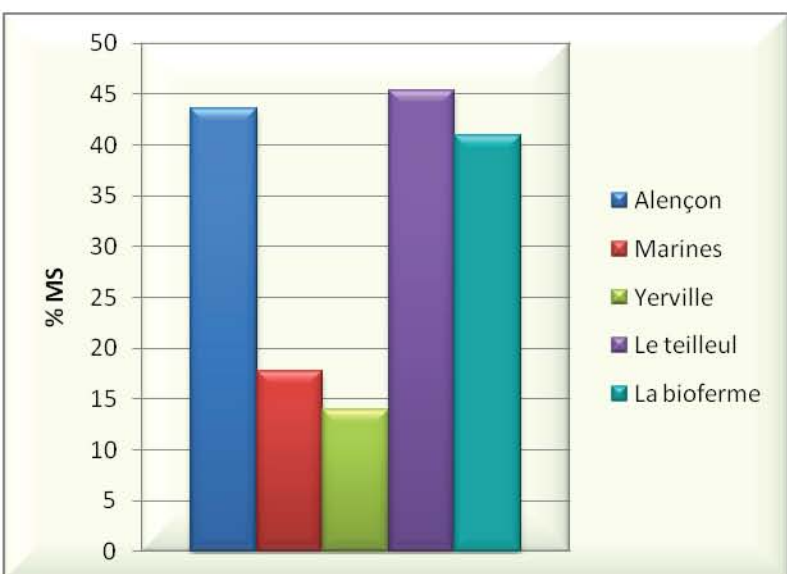


Figure 19 : Pourcentage de MS des STEP en surface des Jardins Filtrants® boues

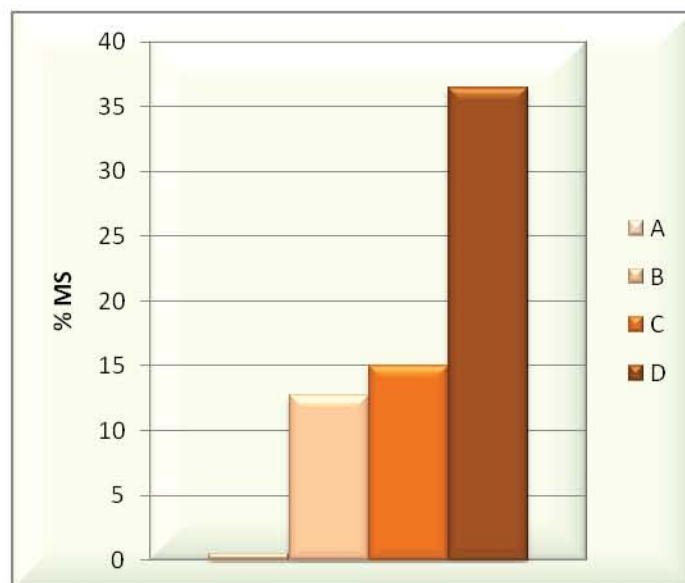


Figure 20 : Siccité (en %MS) d'Honfleur à différentes profondeurs

D'après les résultats présentés dans les graphiques 1 et 2, nous pouvons voir que les performances attendues de 15% de siccité, évoqué lors de leur exploitation par le Cemagref sur le système de lits de séchage planté de roseau, est obtenue, voir dépassées pour tous les Jardins Filtrants® étudiés.

En effet, Le Teilleul et Alençon présentent des siccités en surface de 45,3% et 43,6% respectivement. La matière sèche des trois autres sites est comprise entre 12,7% et 17,7%. Les jardins filtrants® boues de la Bioferme présente une siccité de 44%.

Nous pouvons également voir d'après le graphique 2, que la siccité augmente avec la profondeur du casier. En effet, les boues d'Honfleur présentent une siccité de 12,7% en surface pour atteindre 36,4% à 40 cm de profondeur.

Ces premiers résultats montrent que plus le temps de repos des casiers est long plus la siccité sera importante en dépit des dimensionnements élevés des lits. Alençon, Le Teilleul et la Bioferme sont les Jardins Filtrants® boues avec le temps de repos le plus long (plus de 15 jours) alors que leur dimensionnement est différent (cf. tableau 2) et bien supérieur à la recommandation du Cemagref de 50Kg MS/m²/an. Les prélèvements d'Honfleur mettent en évidence le processus de déshydratation des boues. En effet, elles perdent 35% d'humidité entre leurs arrivées dans le casier et les

6 septembre 2010

40 cm de profondeur. Des résultats similaires ont été démontrés en Espagne où des effluents de 1-3% MS augmentaient de 20-30% dans les lits plantés (Uggetti E., 2009).

Même si le rôle des roseaux suscite des débats sur le maintien ou non de la perméabilité des lits plantés, tous les auteurs s'accordent sur les effets suivants :

- Les roseaux augmentent l'évapotranspiration du lits en diminuant le volume d'eau contenue initialement dans les boues brutes (Naylor S., 2003) (Goulden M.L., 2007) .
- Ils favorisent la percolation au travers du filtre en créant des chemins autour de leurs tiges. Ainsi l'eau interstitielle peut rejoindre les drains en fond de bassin pour retourner en tête de station (Liénard A., 2009).

4.2 La minéralisation de la Matière organique

4.2.1. Matière minérale et matière organique

En sortie du traitement des eaux, les boues contiennent majoritairement de l'eau mais également de la matière organique et de la matière minérale dissoutes ou insolubles (ADEME, 2006). Cette généralité est démontrée par l'analyse de la boue d'entrée d'Honfleur qui contient 99,5% d'eau.

Le contenu en matière organique est très fermentescible et doit être minéralisé afin d'apporter des éléments nutritifs aux plantes mais aussi avoir une composition idéale pour espérer faire de cette boue un compost normé NF U44-051.

D'après le graphique 4, les boues provenant des filtres ont une proportion en humidité inférieure à une boue d'entrée. En revanche la part de matière organique (MO) et de matière minérale (MM) est plus importante. A cette profondeur de 20 cm, la minéralisation s'effectue moins bien. Le pourcentage de MO est supérieur à celui de la MM.

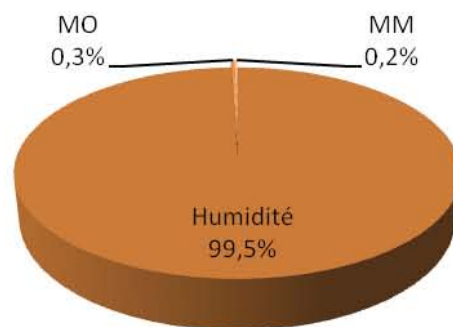


Figure 21 : Répartition de la matière organique (MO), matière minérale (MM) et de l'humidité en % des boues entrée d'Honfleur

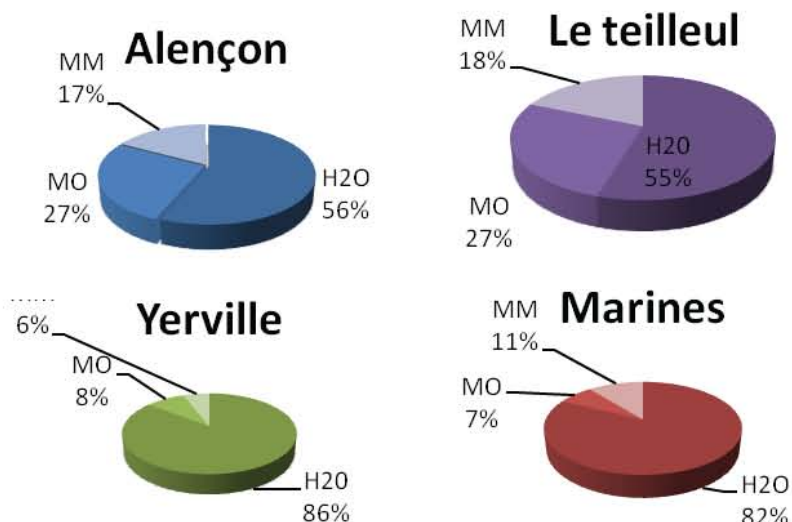


Figure 22 : Répartition de la matière organique (MO), matière minérale (MM) et de l'humidité des cinq STEPS en %

6 septembre 2010

En revanche, nous observons qu'à partir de 40 cm de profondeur le pourcentage de matière minérale (23%) est supérieur à celui de la matière organique (13,3%). Nous pouvons penser que la maturation est plus importante. En effet à cette profondeur, ces boues urbaines ont bénéficié de 5 ans de processus de minéralisation.

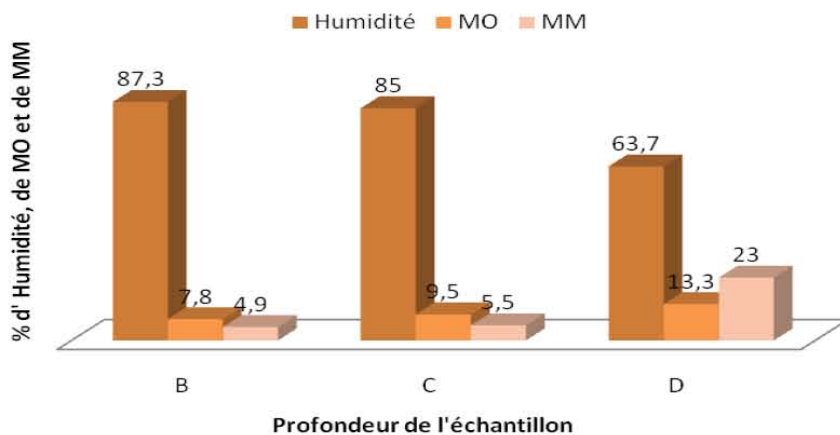


Figure 23 : Proportion de MO, MM et humidité en fonction de la profondeur de la STEP d' Honfleur

Cette minéralisation constatée au niveau de 40 cm de profondeur, se retrouve-t-elle au niveau de la concentration des éléments nutritifs ?

4.2.2. Concentration en nutriments

Pour se rendre compte de l'apport nutritionnel de la boue urbaine nécessaire à la croissance des hélrophytes, nous avons analysé les éléments azotés et le phosphore. Ce premier tableau indique les concentrations de ces éléments en surface (les 20 premiers centimètres).

	NO ₃ -	NH ₄ ⁺	N org	N tot	Phosphore
Honfleur	< 0,031	3,721	46,539	<48,394	65,24
Alençon	3,746	0,218	39,622	43,586	22,69
Marines	<0,023	3,44	24,63	<28,093	57,87
Yerville	0,09	1,338	42,602	44,03	53,83
Le Teilleul	2,255	0,901	40,246	43,405	28,01
Bioferme	0.656		24.9		7.91

Figure 24 : Valeur agronomique (g/kg MS) des 5 sites de Jardins Filtrants® boues

En surface, les boues urbaines permettent un apport d'azote compris entre 43 et 50 g/kg MS suivant les différents sites. La part d'azote organique est toujours la plus importante suivie par ammonium pour Honfleur, Marines, et Yerville. En revanche, pour Alençon et Le Teilleul, les concentrations en NH₄ sont inférieures à celle de NO₃⁻. Ces derniers résultats mettent en évidence le processus de nitrification. Ces

6 septembre 2010

réactions ont pu se mettre en place grâce à un temps de maturation de la boue plus importante.

Le tableau 6 représente les concentrations en éléments azotés et en phosphore suivant la profondeur du prélèvement dans le casier d'Honfleur.

Prélèvement	NO3-	NH4+	N org	N tot	Phosphore
A	< 0,864	2,16	45,37	<48,394	62,66
B	< 0,031	3,721	46,539	<50,291	65,24
C	<0,027	3,482	44,988	<48,497	67,58
D	0,08	1,012	18,008	19,1	13,68

Figure 25 : Valeur agronomique (g/kg MS) d'Honfleur en fonction des profondeurs

A partir de 40 cm de profondeur, la concentration en azote diminue pour atteindre 19.1 g/kg de MS alors que celle du nitrate augmente. La diminution d'azote total est due à la diminution en ammonium et en azote organique. Ces constatations mettent en évidence l'amélioration du processus de nitrification dans l'horizon le plus profond.

Dans la bibliographie, des résultats similaires sont démontrés. (Uggetti E., 2009), (Melidis P., 2010).

Le phosphore est concentré en surface entre 53.83 et 65,24 g/kg de MS sauf pour Alençon et Le Teilleul qui présentent des concentrations plus faibles (22.69 et 28.01 g/kg MS). L'horizon le plus profond de Honfleur en contient 13.68g/kg MS.

Le phosphore est moins mobile que les autres éléments nutritifs. Il a une forte réactivité avec les constituants du sol (Hinsinger, 2001). Il a donc tendance à s'accumuler en surface du casier.

En comparant la boue urbaine d'entrée d'Honfleur et la boue présente à l'horizon D, nous pouvons constater une amélioration de la minéralisation des boues urbaines par la diminution des concentrations en phosphore et en NTK (ammonium+ azote organique) au cours du temps.

4.3 Concentration des métaux lourds

Des métaux comme le Fer, Zinc et Cu sont des oligoéléments indispensables aux processus biologiques. Mais leur forme chimique, leur concentration et le contexte environnemental de leur biodisponibilité peuvent les rendre toxiques. C'est pourquoi les boues urbaines doivent respecter certaines concentrations en métaux pour être épandues ou utilisées comme compost.

Le tableau ci-après, présente les concentrations des 7 ETM dans 6 sites comparées avec les seuils de la norme épandage (arrêté du 08/01/98) et le compost.

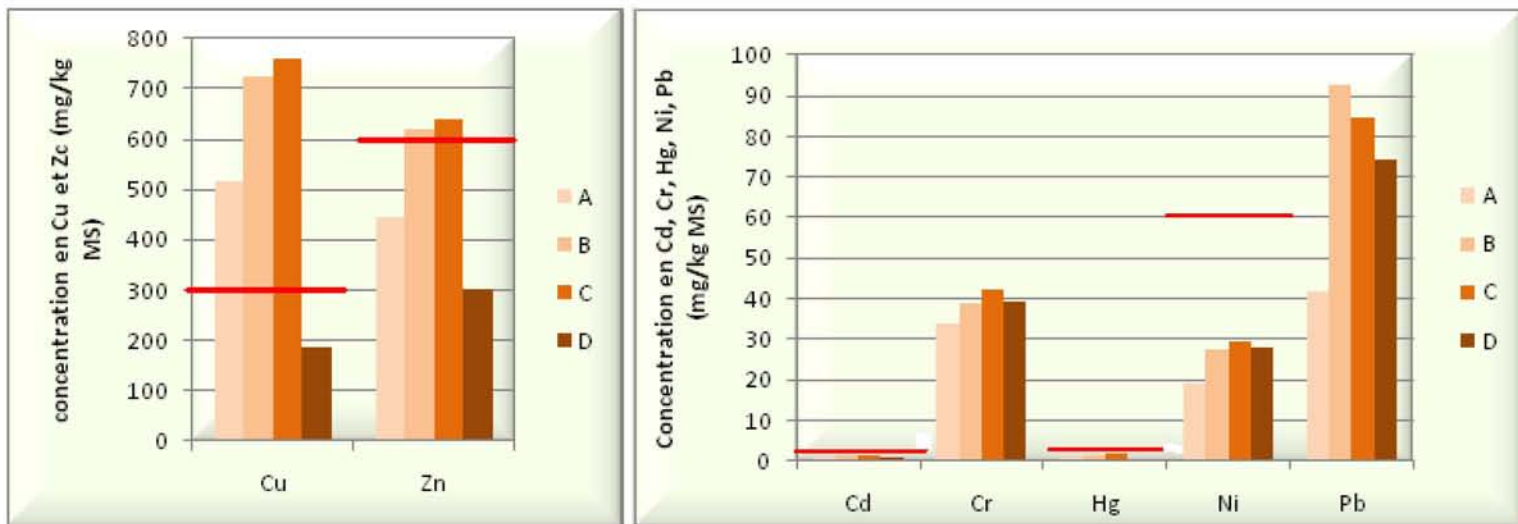
6 septembre 2010

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Cr+Cu+Ni+Zn	C O U E
Seuil épandage	10	1000	1000	10	200	800	3000	4000	
Seuil compost	3	120	300	2	60	180	600		
Honfleur	1,32	38,8	722,7	1,38	27,37	92,7	620	1409,33	E
Alençon	6,01	37,92	316,56	5,05	25,08	116,2	1536,01	1916	E
Marines	1,53	44,4	431,1	2,28	27,45	54,6	466,2	969	E
Yerville	1,78	19,59	308,8	1,3	15,6	23,92	698	1042	E
Le Teilleul	4,79	27,5	171,4	1,22	20,69	69,5	924,04	1144	E
Bioferme	0,66	28,9	110		16	47,6	449	603,9	C

C = boue compostable ; E = boue à épandre.

Figure 26 : Concentration en mg/kg MS des 7 ETM des 5 Jardins Filtrants® boues comparées aux valeurs seuil de compost (valeurs supérieures en rouge) et d'épandage.

Tout d'abord, nous pouvons constater que les boues urbaines provenant des Jardins Filtrants® issus de traitements boues activées ne sont, pour le moment, pas qualifiées de compost, mais épandables. Seules les boues traitées dans les casiers de la bioferme sont conforme à la norme compost. Puis, si nous observons les concentrations dans le détail, nous pouvons constater que les métaux les plus concentrés sont le Cu et le Zn.



— Valeur seuil de la norme compost (toute valeur non représenté est au dessus de l'échelle graphique)

Figure 27 : Concentration en mg/kg MS des ETM du Jardin Filtrants® boues urbaines d'Honfleur suivant les profondeurs.

Suivant les profondeurs, les boues urbaines peuvent être valorisées à partir de l'horizon D car pour les horizons moins profonds les valeurs seuils sont dépassées.

L'interprétation de ces résultats est difficile car les métaux peuvent se trouver sous différentes formes dans le sol (ions libres, échangeables, associés à des constituants du sol,...). Leur disponibilité peut également changer suivant les conditions du

6 septembre 2010

milieu. La rhizosphère est un lieu où les conditions physico-chimiques varient en permanence comme le pH (Hinsinger, 2001). En effet, en modifiant le pH de la rhizosphère, la spéciation et la biodisponibilité des éléments traces métalliques, dont le Cu et Zn, peuvent varier et être libérés. Les changements des conditions rédox peuvent également affecter ces spéciations.

Nous pouvons supposer que pour le site de la Bioferme, la gestion de fermeture et d'ouverture des vannes permet de créer des fluctuations de période hydromorphie/réduction et aération/oxigénéation favorables à la remobilisation des métaux et à leur lixiviation. (Kirpichtchikova, 2009) et donc favoriser un abaissement de ces concentrations.

4.4 Concentration des microorganismes

Les boues doivent être traitées pour limiter leur pouvoir fermentescible et les risques sanitaires liés à leur utilisation. Leur présence est donc réglementée que le produit soit épandu ou composté. La norme épandage ne prend en compte que les salmonelles, entérovirus et œufs d'helminthes viables. Une boue est considérée comme hygiénisée, donc épandable, quand les concentrations en Salmonelles sont inférieures à 8 NPP : 10g MS, entérovirus < 3 NPPUC/10g et les œufs d'helminthes viables < «3/10 g MS.

Ici nous nous sommes plutôt focalisé sur les microorganismes pathogènes pour répondre au critère de la norme compost.

Echantillon	Clostridium	E Coli	Listéria monocytogènes	Œufs d'helminthes viables	Entérocoques	Salmonelles	
Seuil compost	10 ³	10 ⁴	Abs dans 1g	Abs dans 1g MB	10 ⁵	Abs dans 1g MB	
Unité du résultat	/g MB	/g MB	/g MB	/g MB	/g MB	Dans 1g	
Honfleur	A	17000	6 600	Abs	Abs	3200	Abs
	B	210000	15000	Abs	Abs	33000	Abs
	C	350000	1100	Abs	Abs	12000	Abs
	D	340000	38000	Prés	Abs	120000	Abs
Alençon	B	0	0	Abs	Prés	650	Abs
Yerville	A	37	8700	Prés	Abs	24000	Abs
	B	840	22000	Abs	Abs	840000	Abs
Le Teilleul	B	0	0	Abs	Prés	<6	Abs

Figure 30 : Les microorganismes pathogènes des différents sites étudiés en fonction de la norme en vigueur (les valeurs en rouge dépassent la réglementation).

Au regard de ces résultats, aucun Jardins Filtrants® ne présentent des conditions d'hygiénisation suffisantes pour être considérées comme compost. Par ailleurs, nous observons pour Alençon et Le Teilleul une disparition de la plupart des microorganismes pathogènes mais les œufs d'helminthes résistent aux conditions de ces stations. Nous pouvons penser que le changement des conditions physico

6 septembre 2010

chimiques des ces Jardins Filtrants® créés par le manque d'alimentation (perte d'eau, changement de p H,...) améliore l'hygénéisation des filtres.

Les œufs d'helminthes survivent grâce à une coque protectrice qui leur permet d'être plus résistants que les autres (OMS, 1987). En revanche, nous pouvons supposer qu'ils sont peu compétitifs car dans les autres sites, nous retrouvons tous les autres microorganismes sauf les œufs d'helminthe et les salmonelles.

Ces derniers sont des bactéries aero-anaérobies facultatives. Elles sont absentes dans tous les prélèvements, même dans les boues d'entrée. Elle fait l'objet de détection dans les publications traitant des lits plantés de roseaux. Ces pathogènes ne sont pas détectés ni dans l'effluent d'entrée, ni en profondeur (Uggetti E., 2009). Les UV doivent avoir un pouvoir désinfectant sur ces microorganismes. Nielsen constate également leur disparition au bout de 5 jours (Nielsen, 2004). Il montre également la diminution des entérocoques et d'E Coli 4 mois après l'extraction (réduction de 6 log).

Ces deux bactéries (entérocoque et dE. Coli) sont des bactéries vivantes en condition anaérobie. Cette caractéristique explique leur augmentation dans les horizons les plus profonds. En revanche, elles sont éradiquées en surface si elles sont soumises à un manque d'eau de plusieurs semaines (Alençon et Le Teilleul).

La bactérie la plus abondante dans les prélèvements est le clostridium. Elle est anaérobie strict ce qui explique sa présence en abondance dans les horizons les plus profonds. Elle est absente en surface pour Alençon et Le Teilleul. Au moment du curage, le brassage du compost et leur aération pourra éliminer ces pathogènes par le biais d'antains comme cela se pratique en Allemagne.

4.5 Analyse des lixiviats

Les lixiviats sont les eaux qui percolent au travers des Jardins filtrants. La plupart des prélèvements correspond aux eaux de tous les Jardins Filtrants® boues de chaque site. En effet, nous prélevons les boues dans les casiers le plus sec donc une faible quantité de percolat .

Pour nous rendre compte de la charge de ces eaux, nous les avons comparés à l'arrêté 2170 (2002) pour les eaux de rejet dans le milieu naturel des ICPE.

	DCO	Cr (mg/l)	Ni (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)	Cd (mg/l)	Pb (mg/l)
Arrêté 2170	<300	<0,5		0,5	<2		<0,5
Honfleur	113	0,0565	1,065	0,325	<0,2	<0,02	<0,1
Alençon	16,9	0,0285	0,035	< 0,1	<0,2	<0,02	<0,1
Le teilleul	43	<0,03	0,145	0,13	<0,2	<0,02	<0,1
Yerville	131	0,038	0,269	0,256	<0,2	<0,02	0,231

Figure 31 : Concentration en ETM et DCO des lixiviats pour les différents sites.

Nous constatons que ces lixiviats sont sous les valeurs de l'arrêt. Cela témoigne du stockage et du traitement des éléments dans les Jardins Filtrants® qui permettent aux eaux de retourner en tête de station sans recharger les eaux usées. Ces valeurs sont en accord avec le Cemagref : DCO < 150 mg/l (demande chimique en oxygène), MES < 100 mg/l (Liénard, 1999). Avec des valeurs en éléments nutritifs assez faibles, ne dépassant pas les 10% en azote et les 6% en phosphore. Ils montrent également que ces eaux ne sont pas septiques.

4.6 Filtre de piégeage

Les filtres de piégeages® sont mis en place pour des stations désireuses de diminuer leur charge avant un retour en tête de station.

Ils peuvent se présenter sous deux formes : ascendant ou descendant (Figure 4 et 5). Le site de Yerville dispose d'un Filtre de piégeage ascendant à la différence de Marines qui lui est un descendant. Il s'agit du sens d'écoulement des eaux.

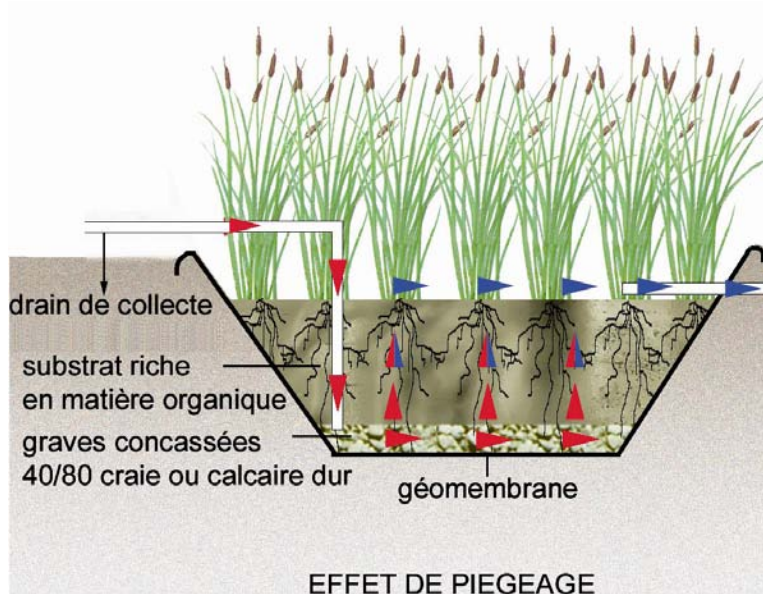


Figure 32 : Filtre de piégeage ascendant (source *Phytorestore*)

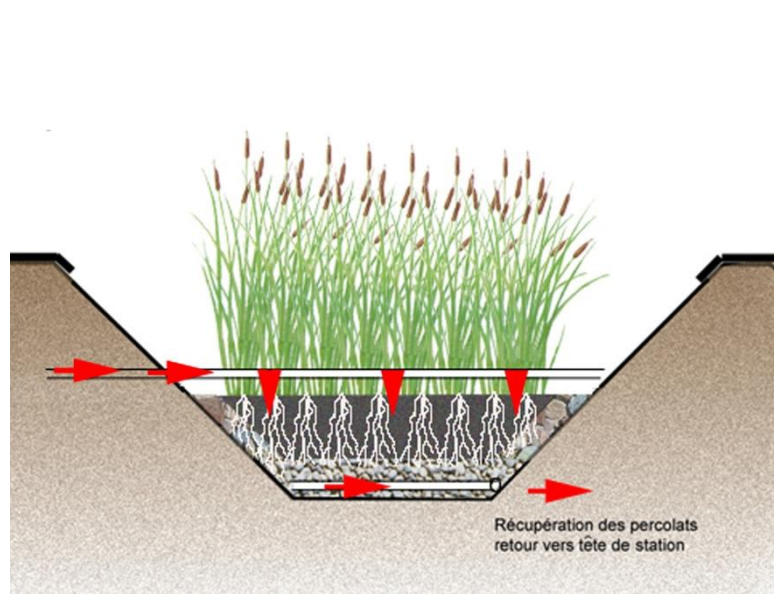


Figure 33 : Filtre de piégeage descendant (source *Phytorestore*)

STEP	Prélèvement	DCO	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zc
YERVILLE	3	131	<0,02	0,038	0,256	0,553	0,231	< 0,2
	4	135	0,331	98,4	29,39	49,7	29,48	100,3
	5		<0,02	0,055	0,28	0,7888	0,1495	<0,2
MARINES	-	-	-	-	-	-	-	-
	5		0,645	25,53	68,39	14,8	55	170
	4	108	<0,02	0,053	0,2935	0,931	0,116	<0,2

Figure 34 : Concentrations en ETM (mg/l) et en DCO du Filtre de piégeage® et des lixiviats d'entrée et sortie du filtre.

6 septembre 2010

Les résultats ne mettent pas en évidence clairement l'efficacité des Filtres de Piégeage®. Les eaux de sortie du filtre sont plus chargées que l'entrée dans le Filtre de piégeage® pour Yerville. Les lixiviats de Marines sont difficilement interprétables car ils ne disposent pas de regard en amont du Filtre de Piégeage. Il est donc difficile de comparer l'efficacité des deux conceptions.

Il aurait pu être intéressant de comparer le compost initial pour avoir une meilleure idée de la proportion de métaux accumulés dans le compost du Filtre de Piégeage.

La Bioferme possède deux Filtres de piégeages® ascendants de 100 m² chacun. Dans ce cas là, un bon abattement est constaté entre l'entrée et la sortie du Filtre de piégeage (FP). L'abattement de la DCO est de 50%, 70% pour le Cr et 30% pour le Cu et le Zn. Ainsi le temps de passage au travers du filtre est beaucoup plus grand avant la sortie et permet sans doute de retenir plus d'éléments.

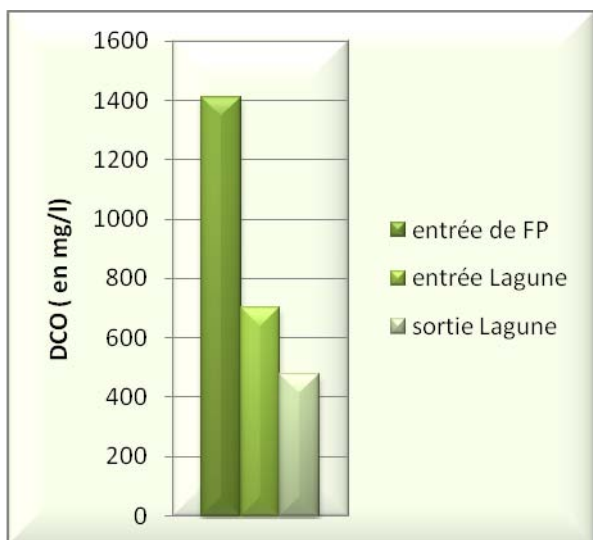


Figure 34 : Concentrations en DCO des lixiviats de la Bioferme

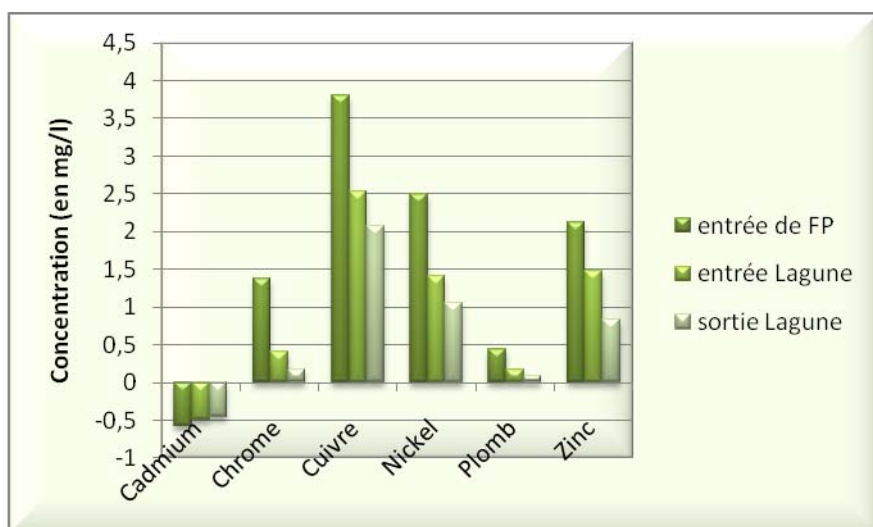


Figure 35 : Concentrations en ETM dans les lixiviats de la Bioferme

D'après ces résultats, nous pouvons émettre l'hypothèse que les dimensionnements des Filtres de piégeage® sont importants pour obtenir une meilleure efficacité.

5. Conclusion

Le traitement par Jardins Filtrants® des déchets que sont les boues urbaine, peut être une piste pour leur valorisation sous forme compost. En effet, nous avons pu voir au travers de ce rapport que :

- la déshydratation des boues est efficace avec une siccité supérieure aux valeurs attendues ;
- une concentration en matière minérale en augmentation ;
- un faible relargage des métaux dans les lixiviats ;
- une hygénisation possible et améliorable par le curage.

Mais tous ces résultats sont concluants après un séchage important des Jardins Filtrants® boues par le biais de grandes périodes de repos supérieurs à 3 semaines.

Les boues urbaines traitées par Jardins Filtrants® boues doivent être curé pas avant 8 à 10 ans de stockage. Un repos de 3 à 4 mois est préconisé. D'après cette étude, nous pouvons conclure que ces recommandations sont très importantes pour les boues urbaines et industrielles puisse atteindre les valeurs de la réglementation compost (NF U44-095).

Une exploitation plus rigoureuse par une ouverture et une fermeture des casiers des Jardins Filtrants® peut permettre de diminuer les concentrations en métaux après de véritables cycles d'oxydo-réduction. En effet, nous avons pu voir que pour ce critère, seules les boues de la Bioferme respect les valeurs de la norme compost.

La qualité du produit final pourrait être également améliorée par un apport de déchet vert et une meilleure oxygénation.

L'efficacité des Filtres de Piégeages® n'a pas pu être clairement démontrée dans les stations urbaines étudiées. Nous pourrions envisager d'augmenter leur dimensionnement afin d'augmenter leur efficacité et surtout changer leur gestion en organisant des vrais cycles de casiers ouverts ou fermés pour faire les cycles d'oxydoréductions préconisés par Kirpichtchikova (Kirpichtchikova, 2009).

6. Bibliographie

ADEME. (s.d.). <http://www.ademe.fr/partenaires/boues/pages/f15.htm>. Consulté le août 2, 2010, sur Les boues municipales et leur utilisation en agriculture.

Goulden M.L., L. M. (2007). Factors that control Typha marsh evapotranspiration. *Aquatic Botany*, 86: 97-106.

H., B. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 35 : 11-17.

Hinsinger. (2001). *Intéactions chimiques entre racines et minéraux du sol*. Université Montpellier 2: Ecole doctorale Biologie Intégrative.

Kirpichtchikova. (2009). Phytoremédiation par Jardins Filtrants d'un sol pollué par des métaux lourds. *Thèse, universiyé Joseph Fourier - Grenoble I*.

l'environnement, m. d. (2002). Arrêté 2170 : Fabrication des engrais et supports de culture à partir de matières organiques et mettant en oeuvre un procédé de transformation biologique aérobie (compostage) des matières organiques. *Journal officiel*.

Liénard A., T. S. (2009). Traitement des boues par lits plantés de roseaux : rappels des points clefs de cette technique. *Ingénieries n° spécial*, p.41 à 49.

Liénard. (1999). Déshydratation de boues par lits de séchage plantés de roseaux. *Ingénieries EAT*, N°17 pp 33-43.

Melidis P., G. G. (2010). Dewatering of primary settled urban sludge in a vertical flow wetland. *Desalination*, 395-398.

Naylor S., B. J. (2003). Treatment of freshwater fish farm effluent using constructed wetlands : the role of plants and substrate. *Water Science and Technology*, 48: 215-222.

Nielsen, S. (2004). Reduction of pathogenic micro-organisms in sludge reed bed systems. *Orbicon*.

OMS. (1987). *Lutte contre les parasitoses intestinales*. Genève: Rapport d'un comité OMS d'experts, série de rapports techniques 749.

Steer D., A. T. (2003). Life-cycle economic model of small treatment wetlands for domestic wastewater disposal. *Ecologie Economics*, 44: 356-369.

Uggetti E., L. E. (2009). Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds: Characterization of three full-scale systems in Catalonia, Spain. *Bioresource Technology*, 3882-3890.