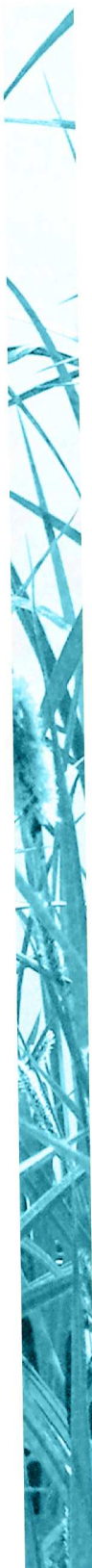


Partenariat 2011 – Domaine Ecotechnologies et pollutions
Action 28 « Amélioration de la réduction des micropolluants dans les stations de traitement des eaux usées domestiques (ARMISTIQ) »



Evaluation technique, économique et environnementale des procédés de traitement biologique des boues (compostage, lits de séchage planté de roseaux) et de séchage (thermique et solaire) des boues

ARMISTIQ – Action D

Rapport d'étape

Sophie Besnault, Samuel Martin (CIRSEE, Suez Environnement)

Jean-Marc Choubert (Irstea / Cemagref)

Décembre 2011

Avec les partenaires :

H. Budzinski (LPTC, Université Bordeaux 1)

Contexte de programmation et de réalisation

Ce document correspond à l'action 28 « Amélioration de la réduction des micropolluants dans les stations de traitement des eaux usées domestiques (ARMISTIQ) », domaine Ecotechnologies et pollutions.

Il s'agit du Livrable D2 : Evaluation technique, économique et environnementale des procédés de traitement biologique des boues (compostage, lits de séchage planté de roseaux) et de séchage (thermique et solaire) des boues.

Ces travaux sont réalisés en collaboration avec le Cemagref/Irstea Lyon (Marina Coquery, Jean-Marc Choubert, Cécile Miège, Maxime Pomies, Alexandre Tahar), le CIRSEE Suez-Environnement (Sophie Besnault, Samuel Martin-Ruel, Mar Esperanza, Auguste Bruchet), et l'ISM-LPTC, Université de Bordeaux 1 (Hélène Budzinski, Karyn Le Menach).

Les auteurs

Sophie Besnault
Sophie.Besnault@suez-env.com
CIRSEE, Suez Environnement

Samuel Martin
Samuel.Martin@suez-env.com
CIRSEE, Suez Environnement

Jean-Marc Choubert
jean-marc.choubert@irstea.fr
Irstea, centre de Lyon

Avec la participation de :

Marina Coquery (coordination du projet), marina.coquery@irstea.fr
(Irstea / Cemagref), centre de Lyon

H. Budzinski, K. Le Menach (LPTC, Université Bordeaux 1),

M. Esperanza, N. Noyon (CIRSEE, Suez Environnement),

C. Miège, S. Schiavone, L. Dherret, P. Bados (Irstea / Cemagref Lyon).

Les correspondants

Onema : Stéphane Garnaud, stephane.garnaud@onema.fr

Irstea: Marina Coquery, marina.coquery@irstea.fr

Référence du document : S. Besnault, S. Martin, J.-M. Choubert. (2011). Evaluation technique, économique et environnementale des procédés de traitement biologique des boues (compostage, lits de séchage planté de roseaux) et de séchage (thermique et solaire) des boues, Rapport d'étape – Projet ARMISTIQ, Action D, 32p.

Droits d'usage :	Confidentiel
Couverture géographique :	National
Niveau géographique :	National
Niveau de lecture :	Professionnels, experts, chercheurs
Nature de la ressource :	Rapport d'avancement

Evaluation technique, économique et environnementale des procédés de traitement biologique des boues (compostage, lits de séchage planté de roseaux) et de séchage (thermique et solaire) des boues

Rapport d'étape – Projet ARMISTIQ, Action D

Sophie Besnault, Samuel Martin et Jean-Marc Choubert

SOMMAIRE

A.	Contexte	7
B.	Description des procédés	8
1.	Procédés thermiques : Séchage des boues.....	8
1.1.	Séchage indirect ou séchage par contact.....	9
1.2.	Séchage direct ou séchage par convection	10
1.3.	Séchage mixte.....	10
1.4.	Les différents types de sècheurs	10
1.5.	Séchage solaire.....	11
2.	Procédés biologiques : Digestion anaérobie	13
3.	Procédés biologiques : Compostage des boues.....	14
4.	Procédés biologiques : Lits de séchage plantés de roseaux.....	16
C.	Campagnes de prélèvement	17
1.	Site A (séchage thermique haute température)	17
1.1.	Description du site	17
1.2.	Echantillonnage.....	19
2.	Site B (séchage thermique basse température)	20
2.1.	Description du site.....	20
2.2.	Echantillonnage.....	21
3.	Site C (digestion anaérobie et compostage)	22
1.4.	Description du site	22
1.5.	Echantillonnage.....	24
4.	Site D (séchage solaire)	25
4.1.	Description du site.....	25
4.2.	Echantillonnage.....	26
5.	Site E (compostage)	27
5.1.	Description du site.....	27
5.2.	Echantillonnage.....	28
6.	Site F (compostage)	28
6.1.	Description du site.....	28
6.2.	Echantillonnage.....	28
7.	Site G (lit de séchage planté de roseaux)	29
7.1.	Description du site.....	29
7.2.	Echantillonnage.....	29
D.	Résultats.....	30
E.	Evaluation économique	30
F.	Evaluation environnementale	30
G.	Conclusions.....	30
H.	Bibliographie	31

TABLE DES ILLUSTRATIONS : TABLEAUX

Tableau 1 : Les différents types de sècheurs thermiques	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2 : Principaux procédés de compostage	15
Tableau 3 : Caractéristiques des sècheurs du site A	19
Tableau 4 : Caractéristiques des sècheurs du site B	Erreur ! Signet non défini.

TABLE DES ILLUSTRATIONS : FIGURES

Figure 1 : Procédés de traitement des boues ayant un effet sur la matière organique	8
Figure 2 : Séchage indirect	10
Figure 3 : Séchage direct	10
Figure 4 : Principe du séchage solaire	12
Figure 5 : Scarificateur en fonctionnement	12
Figure 6 : Digesteur anaérobie mésophile	14
Figure 7 : Crible pour séparer le compost du support carboné	15
Figure 8 : Mécanismes en jeu dans un lit de séchage planté	16
Figure 9 : Ligne de traitement des boues du site A	17
Figure 10 : Schéma d'un sècheur NARA	18
Figure 11 : Sècheur NARA	18
Figure 12 : Points de prélèvements, site A	19
Figure 13 : Boue déshydratée extrudée entrant dans le sècheur	20
Figure 14 : Schéma d'un sècheur STC	20
Figure 15 : Deux sècheurs STC	21
Figure 16 : Points de prélèvement, site B	22
Figure 17 : Traitement des eaux du site C	23
Figure 18 : Etapes du procédé de compostage Amendior	24
Figure 19 : Points de prélèvement, site C	25
Figure 20 : Lignes de traitement de la STEP du site D	26
Figure 21 : Serres de séchage solaire du site D	26
Figure 22 : Points de prélèvement, site D	27
Figure 23 : Casiers de fermentation du site E	27
Figure 24 : Points de prélèvement, site E	28

Evaluation technique, économique et environnementale des procédés de traitement biologique des boues (compostage, lits de séchage planté de roseaux) et de séchage (thermique et solaire) des boues

Rapport d'étape – Projet ARMISTIQ, Action D

Sophie Besnault, Samuel Martin et Jean-Marc Choubert

Résumé

Une présence significative de micropolluants dans les boues a été mise en évidence dans un nombre croissant d'études et soulève des interrogations à propos de l'impact de ces substances lors des opérations d'élimination ou de valorisation des boues (épandage agricole, incinération, enfouissement technique, ...). De nouvelles législations sont apparues à propos de la réduction des émissions de micropolluants dans l'environnement comme en Europe, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE).

Les procédés biologiques de stations de traitement des eaux usées ont une bonne efficacité globale pour l'élimination des micropolluants bien qu'ils n'aient pas été conçus dans ce but. Cependant, une grande partie des micropolluants peut s'accumuler dans les boues. Environ 60 % de substances prioritaires et émergentes analysées dans le cadre du projet AMPERES ont été détectées dans les échantillons de boue, dont 40 % à une teneur supérieure à 0,1 mg/kg. Aux Etats-Unis également, la « Targeted National Sewage Sludge Survey » a mis en évidence une large présence de micropolluants dans les boues de STEU.

Cette présence confirmée des micropolluants dans la boue démontre l'importance d'étudier le devenir de ces molécules à travers les procédés de traitement des boues afin d'identifier les procédés les plus efficaces vis-à-vis des micropolluants, de réduire, si nécessaire, leur présence dans les boues et d'éviter une possible contamination des sols, des plantes et des milieux aquatiques.

Les principaux objectifs des traitements des boues sont la réduction du volume de boue grâce à une augmentation de la siccité, la stabilisation de la boue ainsi que la réduction de la quantité de pathogènes. Parmi les procédés les plus fréquents de traitement des boues permettant d'atteindre ces objectifs, on peut citer le chaulage, la digestion anaérobie, le compostage, les lits de séchage plantés de roseaux ou encore le séchage (solaire ou thermique).

Ce livrable a pour but de présenter une évaluation technique, économique et environnementale de procédés classiques de traitement des boues vis-à-vis des micropolluants.

Les procédés étudiés sont décrits puis les sites des campagnes de prélèvement sont présentés. Sept sites de traitement des boues sont évalués dans le cadre du projet, dont quatre sites avec des procédés biologiques (compostage, digestion anaérobie, lits de séchage plantés de roseaux) et trois sites avec des procédés thermiques (séchages thermiques haute et basse température et séchage solaire). Les campagnes d'échantillonnage ont été réalisées pour cinq des sites. Une campagne est en cours et une campagne est prévue pour 2012.

Les résultats d'analyses ainsi que l'évaluation économique et environnementale de ces procédés seront disponibles dans la version finale de ce rapport.

Mots clés

Micropolluants, boue, digestion anaérobie, séchage, compostage

Technical, economical & environmental evaluation of biological sludge treatment processes (composting, reed beds) & drying processes (thermal & solar)

Sophie Besnault, Samuel Martin and Jean-Marc Choubert

Abstract

A significant presence of micropollutants has been evidenced in an increasing number of studies and leads to interrogations about the impact of these substances during elimination and valorisation of sludge (agricultural land spreading, incineration, technical burying...). New legislations appeared about the reduction of emissions of micropollutants to the environment such as in Europe, the Water Framework Directive (WFD).

Wastewater treatment plants biological processes have a good global efficiency for micropollutants removal although they were not initially designed for this purpose. However, most of the micropollutants can accumulate in sludge. 60 % of the priority and emerging substances analysed in the AMPERES project were detected in the sludge samples, of which 40 % with a level higher than 0.1 mg/kg. In the United States as well, the « Targeted National Sewage Sludge Survey » evidenced a large presence of micropollutants in WWTP sludge.

This confirmed presence of micropollutants in sludge demonstrate the importance of studying the becoming of these substances through sludge treatment processes in order to identify the most efficient processes towards micropollutants reduction, to reduce, if necessary, their presence in sludge and to avoid a possible contamination of soils, plants and aquatic media.

The main objectives of sludge treatment processes are to reduce sludge volume with an increase of siccidity, to stabilize sludge and to reduce the number of pathogens. Some of the most frequent sludge treatment processes reaching these objectives are liming, anaerobic digestion, composting, sludge treatment reed beds or drying (solar or thermal).

This deliverable presents a technical, economical and environmental evaluation of these classical sludge treatment processes in relation to micropollutants.

The processes studies are described and the sampling campaign sites are presented in this document. Seven sludge treatment facilities are evaluated within this project, of which four with biological processes (composting, anaerobic digestion and sludge treatment reed beds) and three with thermal processes (high and low temperature thermal drying and solar drying). The sampling campaigns have been done for five facilities. One sampling campaign is ongoing and one is expected for 2012.

The results of the analysis as well as the economical and environmental evaluations will be available in the final version of this deliverable.

Key words

Micropollutants, sludge, anaerobic digestion, drying, composting

A. Contexte

La valorisation agricole des boues par épandage représente en moyenne plus de 50 % des usages finaux des boues des stations d'épuration d'Europe et des Etats Unis. Cependant, une présence significative de micropolluants dans la boue a été mise en évidence par un nombre croissant d'études et soulève des interrogations à propos de l'impact de ces substances lors des opérations d'élimination ou de valorisation de ces matières (épandage agricole, incinération, enfouissement technique, ...). De nouvelles législations sont apparues à propos de la réduction des émissions de micropolluants dans le milieu naturel, comme la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) en Europe.

Les procédés biologiques de stations de traitement des eaux usées ont une bonne efficacité globale pour l'élimination des micropolluants bien que qu'ils n'aient pas été conçus dans ce but (Coquery *et al.*, 2011). Cependant, une grande partie des micropolluants peut s'accumuler dans les boues. Environ 60 % de substances prioritaires et émergentes analysées dans le cadre du projet AMPERES ont été détectées dans les échantillons de boue, dont 40 % à une teneur supérieure à 0,1 mg/kg (Coquery *et al.*, 2011). Aux Etats-Unis également, la « Targeted National Sewage Sludge Survey » a mis en évidence une large présence de micropolluants dans les boues de STEUs.

Cette présence confirmée des micropolluants dans la boue démontre l'importance d'étudier le devenir de ces molécules à travers les procédés de traitement des boues afin d'identifier les procédés les plus efficaces vis-à-vis des micropolluants, de réduire, si nécessaire, leur présence dans les boues et d'éviter une possible contamination des sols, des plantes et des milieux aquatiques.

Les principaux objectifs des traitements des boues sont la réduction du volume de boue grâce à une augmentation de la siccité, la stabilisation de la boue ainsi que la réduction de la quantité de pathogènes. Parmi les procédés les plus fréquents de traitement des boues permettant d'atteindre ces objectifs, on peut citer le chaulage, la digestion anaérobie, le compostage, les lits plantés de roseaux ou encore le séchage (solaire ou thermique).

Ce livrable a pour but de présenter une évaluation technique, économique et environnementale de procédés classiques de traitement des boues. Les procédés sélectionnés sont des procédés biologiques (digestion anaérobie, compostage, lits de séchage plantés de roseaux) ainsi que des procédés thermiques (séchage thermiques haute et basse température et séchage solaire).

Les procédés étudiés sont décrits puis les sites des campagnes de prélèvement sont présentés. Les résultats des analyses, une étude économique et une étude environnementale seront présentés dans la version finale du rapport.

B. Description des procédés

Les boues liquides de STEU doivent être stabilisées afin de réduire leur volume (transport et stockage facilités) ainsi que pour bloquer les fermentations anaérobies qui peuvent causer des odeurs désagréables. Les boues liquides de stations d'épuration sont tout d'abord stabilisées et déshydratées, notamment en centrifugeuses et filtres presse, avant de subir des procédés qui vont permettre de les conduire à leur destination finale, comme le compostage et le séchage. Les procédés biologiques sont une bonne solution car ils utilisent la capacité fermentescible des composés les plus facilement biodégradés. Ces procédés permettent également une hygiénisation de la boue plus ou moins poussée (réduction des organismes pathogènes contenus dans la boue).

La fraction facilement biodégradée de la boue peut être éliminée par voie biologique aérobie (stabilisation biologique ou digestion aérobie thermophile) ou par voie anaérobie (digestion anaérobie mésophile ou thermophile). Afin de bloquer les fermentations non contrôlées, les micro-organismes actifs existant doivent être inhibés. Cela peut être fait en jouant sur différents paramètres : température (séchage thermique), pH (chaulage), élimination de l'eau (séchage solaire et thermique). Le compostage est un procédé aérobie thermophile qui peut être appliqué aux boues déshydratées afin de contrôler la fermentation et d'hygiéniser la boue. D'autres procédés permettent une élimination complète de la matière organique (MO) comme l'incinération, la pyrolyse/gazéification ou le procédé d'oxydation en voie humide.

Les différents traitements des boues ayant un effet sur la MO sont présentés à la Figure 1.

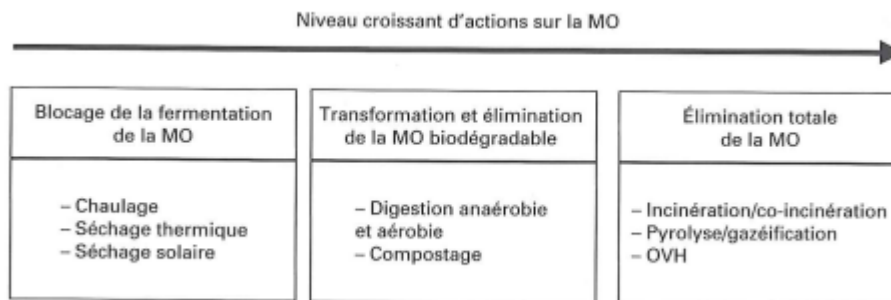


Figure 1 : Procédés de traitement des boues ayant un effet sur la matière organique

Une stabilisation biologique n'est possible que pour une boue qui présente une teneur élevée en matière biodégradable (habituellement plus de 50 % de la matière sèche), par exemple :

- Les "boues primaires" provenant d'une simple décantation des eaux usées urbaines ;
- Les "boues biologiques" provenant de traitement biologiques aérobies avec une charge forte ou moyenne (boue activée, boue provenant de biofiltres ou de lits bactériens) ;
- Un mélange des deux types de boues précédant appelé "boues mixtes" ;
- Les "boues d'aération prolongée", boues de traitement biologique aérobie à faible charge sans décantation primaire.

1. Procédés thermiques : séchage des boues

Le séchage des boues consiste à éliminer l'eau afin de réduire le volume des boues et de les stabiliser. Il est rendu nécessaire par les limitations rencontrées par une déshydratation mécanique. Pour pouvoir encore augmenter la siccité des boues déshydratées, le séchage peut classiquement être assuré par action du soleil, ou de manière plus intensive, par action de la chaleur.

Les objectifs du séchage sont de :

- Permettre la stabilisation et l'hygiénisation des boues en réduisant leur caractère fermentescible ;
- Diminuer le volume et la masse des boues afin de diminuer les coûts de transport, de diminuer le volume de stockage nécessaire et de faciliter leur manutention ;
- Améliorer les possibilités de recyclage (co-incinération en centrale d'énergie, cimenterie, valorisation comme amendement agricole) ;
- Transformer un déchet avec une image négative (boues pâteuses) en un produit (granulés de boues séchées).

L'intérêt du séchage est d'ouvrir l'éventail des solutions puisque les boues séchées peuvent être valorisées en agriculture par épandage dans le cadre d'un plan d'épandage ou mises sur le marché sous couvert d'une homologation.

Plutôt adapté à des stations de moyenne ou grande capacité, le séchage thermique, relativement onéreux, complète un traitement de déshydratation par centrifugation ou par filtres presse. Les boues séchées thermiquement peuvent également être incinérées (seules ou en co-incinération) ou, en cas de besoin, évacuées en centre de stockage des déchets ultimes. Les taux de siccité obtenus sont en général compris entre 60 et 90 %. Le séchage solaire, procédé apparu en Allemagne en 1994, est plutôt mis en œuvre dans des stations de capacité inférieure à 50 000 Equivalents Habitants. Les boues placées sous serre sont déshydratées sous l'effet de la concentration des rayons solaires. Ce procédé connaît un récent développement, avec plus d'une cinquantaine d'installations en fonctionnement en 2009 en France.

Les sécheurs thermiques sont habituellement classés en fonction des modes de transmission de la chaleur dans le sécheur (par conduction, convection et rayonnement) mais peuvent aussi être classés en fonction des températures au sein du sécheur (haute ou basse température).

La chaleur se transmet de trois manières différentes : la conduction, la convection, le rayonnement. Appliqués aux boues, ces modes de transmission de chaleur vont se traduire par des technologies différentes. Trois grands types de sécheurs existent :

- Sécheur indirect : transfert de chaleur au travers d'une surface d'échange métallique (conduction, convection) ;
- Sécheur direct : transfert de chaleur par contact direct du fluide caloporteur et de la boue (conduction) ;
- Sécheur mixte : mélange des deux systèmes, la première partie du séchage se fait dans une zone de séchage indirect, la seconde dans une zone de séchage direct.

1.1. Séchage indirect ou séchage par contact

Le chauffage se fait par conduction. La chaleur est apportée par contact entre le produit et une paroi chauffée (Figure 2). Les boues sont physiquement isolées du fluide de chauffage qui est en général de la vapeur ou de l'huile thermique. La paroi chauffée en contact avec la boue humide permet l'évaporation de l'eau interstitielle de la boue. Dans ce cas, la boue reste en masse mais doit être malaxée au sein du sécheur. Les boues sont aspirées. Un convoyage puissant est nécessaire (phase plastique).

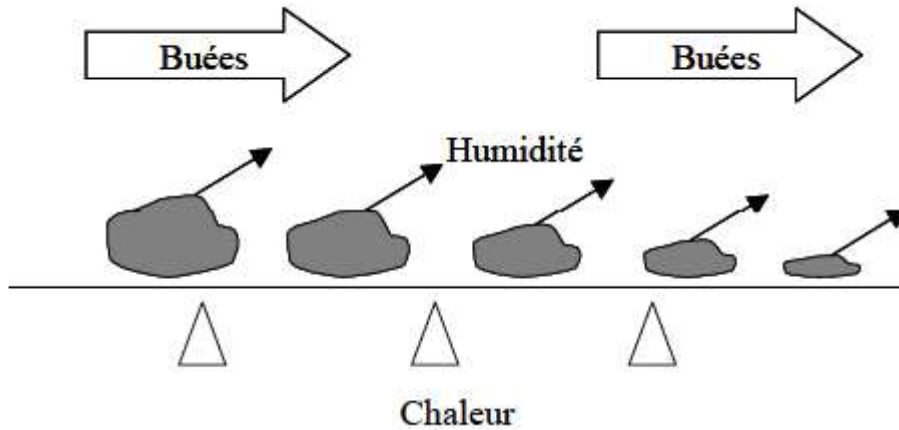


Figure 2 : Séchage indirect

1.2. Séchage direct ou séchage par convection

La chaleur est apportée au produit par un gaz chaud qui est en contact direct avec le produit. Dans ce cas, l'air chaud ou le gaz de combustion circule sur les boues à sécher généralement préalablement préparées (sauf dans les sécheurs flash et les équipements de type Centridry) comme le montre la Figure 3. La boue doit être dans un état finement divisé (granulés de quelques millimètres ou petits cylindres). L'air chaud ou le gaz de combustion contenant déjà une teneur en eau faible absorbe l'eau de la boue à sécher. L'eau est entraînée par le gaz ce qui implique de traiter de grosses quantités de gaz (gaz de fumées + vapeurs).

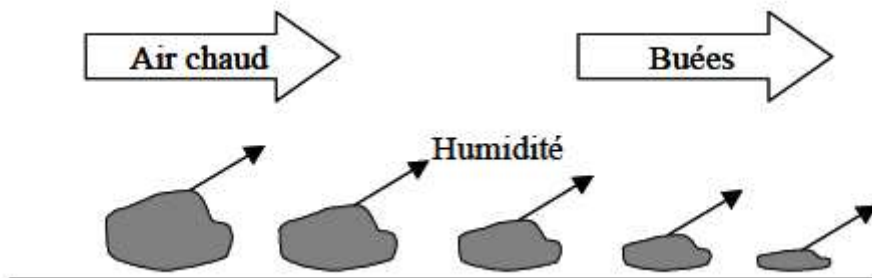


Figure 3 : Séchage direct

1.3. Séchage mixte

Le sécheur mixte met à profit à la fois les propriétés du sécheur direct et du sécheur indirect; la paroi est chauffée et l'air chaud permet l'évaporation de l'eau des boues. Les deux effets se conjuguent et se complètent.

1.4. Différents types de sécheurs

Suite aux définitions précédentes, le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente un inventaire des différents types de sécheurs existants sur le marché.

Tableau 1 : Différents types de sècheurs thermiques et équipementiers associés

Indirect	Sécheur à palette ou sécheur malaxeur	NARA
		Buss-Rovactor
		GMF
	Sécheurs à couches minces	List
		Buss DAS
		Duprat
		GEA Canzler
		GMF
	Sécheur à plateau	Seghers
	Sécheur à disques	Atlas
		KHD
		Kvaerner
		MSE
		Procalex
SIL		
STORD		
Tambour rotatif	Andritz	
	Comessa	
	Elino	
	Mannesman	
	Maguin	
	Valeb	
	Mitchell Lödige	
Direct	Sécheur à tambour ou Tambour rotatif	Andritz
		Comessa
		KHD
		Maurer Söhne
		Promeca
		Swiss Combi
		Vadeb
	Sécheur à lit fluidisé	Andritz
		Sultzer
		Barr Rosin
	Sécheur à bande	CQVB
		Andritz
		Mabarex
Sevar		
STC		
Mixte	Sécheur flash ou atomiseur	-
	Sécheur mixte à 2 étages	Innoplanna
	Sécheur mixte à 1 étage	VOMM

1.5. Séchage solaire

Le séchage solaire utilise le principe de l'effet de serre. L'énergie contenue dans le rayonnement solaire est en France variable de 1 200 à 1 750 kWh/m²/an, dont 40 % émise dans le domaine visible et 50 % dans le domaine de l'infrarouge. L'effet de serre repose sur le fait que les matériaux utilisés depuis longtemps par les serristes (verre, plexiglas, films plastiques, polycarbonate...) ont des propriétés très différentes dans les deux domaines spectraux : ils sont transparents au rayonnement solaire mais absorbent le rayonnement infrarouge, comme le décrit la Figure 4.

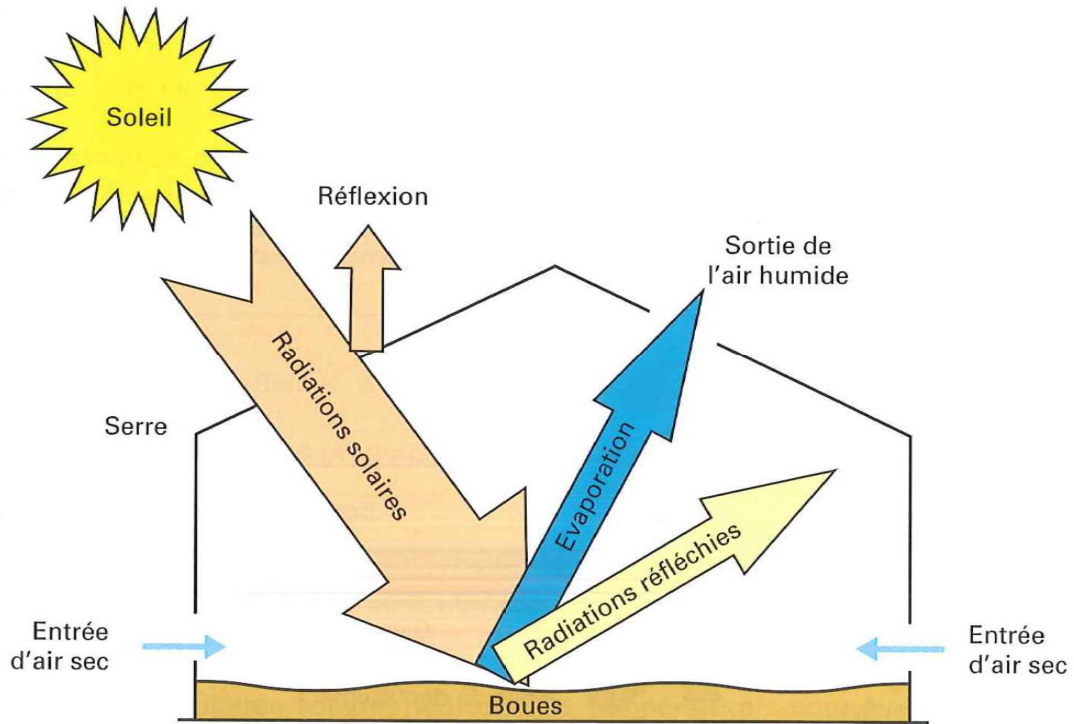


Figure 4 : Principe du séchage solaire

La serre va utiliser ce principe pour accélérer le processus d'élimination de l'eau contenue dans les boues déshydratées. Pour cela, la boue à sécher est étalée sur une épaisseur de 10 à 30 cm puis véhiculée à l'intérieur de la serre au moyen d'une machine de scarification (dans les sécheurs Héliantis), présentée à la Figure 5.



Figure 5 : Scarificateur en fonctionnement

L'échauffement de la surface du lit de boue, dû au rayonnement solaire et au rayonnement infrarouge émis par le matériau transparent de la serre, va augmenter la pression de vapeur de l'eau contenue dans la boue. Un flux d'air frais admis sur la surface du lit de boue va donc se charger d'humidité. Or

quand il est humide et plus chaud, l'air est plus léger. Les différences de température, couplées à la différence de densité engendrent un mouvement de convection naturelle. Le renouvellement continu de l'air présent dans la serre permet de maintenir un degré d'hygrométrie favorable à l'optimisation de l'évaporation.

Le séchage solaire permet d'évaporer entre 600 et 1 200 kg eau/m²/an suivant la région (en France).

2. Procédés biologiques : digestion anaérobie

La digestion anaérobie (DA) est une fermentation méthanique. Elle a un pouvoir de destruction cellulaire parmi les plus puissants du monde biologique et permet l'élimination d'une part importante de la matière organique. La DA produit du biogaz, principalement composé de méthane et de dioxyde de carbone, qui peut être utilisé pour chauffer le digesteur ou les bâtiments, pour sécher la boue ou pour produire de l'électricité par co-génération par exemple. Le biogaz produit dépend de la température, du temps de séjour et du niveau de stabilisation de la MO à l'entrée de la DA et est représentatif de la qualité de la digestion. Une digestion bien équilibrée permet la production d'environ 900 à 1 100 L de gaz pour 1 kg de MO détruite. La digestion permet une réduction de 40 à 50 % de la teneur en MO d'une boue mixte.

Les boues digérées ont une couleur noire et dégagent une odeur faible proche de celle du goudron. 90 % des salmonelles et la plupart des germes pathogènes sont détruits. Le stockage prolongé de la boue digérée n'entraîne pas de reprise de la fermentation.

Il existe différentes catégories de digestion des boues : la digestion mésophile, autour de 35°C, qui est la plus fréquente, la digestion thermophile (50-60°C), plus rarement utilisée et la digestion en deux phases, qui est une combinaison des deux procédés.

- La digestion mésophile (35-40°C) (Figure 6) : une installation de digestion mésophile des boues comporte un ou plusieurs réacteurs en parallèle suivis par une unité de stockage de la boue digérée, permettant d'adapter le rythme de la digestion à la déshydratation. Le temps de séjour varie de 16 à 25 jours et la charge organique de 1.5 à 2.5 kg MO/m³/j. C'est le procédé le plus répandu grâce à sa facilité d'exploitation, l'homogénéisation et la quantité de biogaz produite. Mais ce procédé a un coût d'investissement relativement élevé et est sensible aux variations de charge (au maximum +8 à 15 % de surcharge journalière selon l'état du digesteur).
- La digestion thermophile (50-60°C) est moins répandue. Le temps de séjour varie de 8 à 12 jours et la charge organique de 2.5 à 5 kg MO/m³/j. Son coût d'investissement est plus réduit grâce à sa charge plus élevée et l'élimination de MO est plus importante que pour la digestion mésophile (2 à 5 % de la MO totale). Par contre, la production de biogaz est moins importante donc la récupération d'énergie est moindre, l'exploitation est plus délicate, les retours en tête sont plus chargés et plus de réactifs sont nécessaires pour la déshydratation.
- La digestion anaérobie en deux phases. Deux étapes fondamentales de la digestion anaérobies sont séparées : acidification/hydrolyse et méthanogénèse (production de méthane). Ces deux étapes sont fondamentalement différentes car elles ne font pas appel aux mêmes populations bactériennes, qui n'ont pas les mêmes conditions optimales de fonctionnement, et les cinétiques de chaque étape sont différentes. La première phase a un temps de séjour d'environ deux jours à une température de 55°C, la charge organique est de 10 à 30 kg MO/m³/j. La seconde phase a un temps de séjour d'environ 10 jours à une température de 37°C, la charge organique est de 2 à 4 kg MO/m³/j. La séparation des deux étapes permet une réduction du volume global des réacteurs et une meilleure destruction des germes pathogènes. Les variations de charge sont mieux encaissées et l'homogénéisation est meilleure car la boue est plus fluide.



Figure 6 : Digesteur anaérobie mésophile

3. Procédés biologiques : compostage des boues

Le compostage des boues est une fermentation contrôlée qui consiste à transformer la matière organique par voie aérobie et à former des composés humiques et pré-humiques stables. Il permet une réduction du volume des boues, le stockage sur des périodes longues, une hygiénisation, une modification de la texture, une stabilisation biologique et une amélioration de la qualité agronomique de la boue. Le compost produit peut être épandu sur les champs pour les cultures comme engrais.

La boue doit être aérée pendant le procédé mais la boue déshydratée a fréquemment une porosité réduite, c'est pourquoi un support carboné est généralement ajouté afin d'atteindre 20 % de vide dans le mélange. La dégradation de MO par différents micro-organismes est accompagnée par une élévation de température qui peut atteindre plus de 70°C, ainsi, les germes pathogènes sont détruits et l'humidité du produit est réduite par évaporation. Le compostage est habituellement appliqué à des boues fraîches mais peut aussi avoir lieu après une digestion anaérobie.

Les bactéries, les actinomycètes et les champignons biodégradent les glucides, les protéines, les lipides, l'hémicellulose et la lignine présents dans la boue. L'aération permet l'apport d'oxygène mais aussi l'évacuation de la vapeur d'eau et du gaz carbonique produits pendant le procédé de compostage. Le ratio optimal d'humidité du mélange de départ se situe entre 55 et 65 % (35 à 45 % de siccité). Plus la teneur en matières organiques biodégradables est élevée, plus les réactions exothermiques provenant de leur dégradation vont permettre une évaporation de l'eau et par conséquent un séchage du compost. Pour atteindre une siccité élevée du compost, il est nécessaire d'insuffler un volume d'air important et donc de consommer de l'énergie (jusqu'à plus de 80 % de la consommation globale de l'installation).

Le support carboné crée des espaces dans le mélange, permettant ainsi la circulation de l'air, donne une stabilité mécanique au mélange ce qui facilite sa manutention, apporte du carbone équilibrant le ratio C/N et absorbe une partie de l'humidité, améliorant la structure du produit. Différents supports organiques peuvent être utilisés comme la sciure, les déchets d'espace verts broyés, les copeaux ou plaquettes de bois, les écorces broyées, Une partie du support carboné est récupérée par criblage avec des machines comme celle de la Figure 7.



Figure 7 : Crible pour séparer le compost du support carboné

Le compostage est divisé en deux étapes : la fermentation qui dure environ 4 semaines et la maturation qui dure de un à trois mois. Pendant la maturation, le produit est retourné périodiquement. Le ratio C/N et le pH diminuent, l'azote se nitrifie. Le retournement est fait avec des machines adaptées et permet une aération du tas et une re-distribution des espaces vides. Il assure aussi que tout le produit soit soumis à des conditions d'hygiénisation.

Différentes sortes de compostages existent, elles sont classifiées selon si le système est ouvert ou confiné, si l'aération est naturelle ou forcée, si la régulation de la température est possible ou non... Les différents procédés de compostage sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Principaux procédés de compostage

	Système	Aération (aspiration ou soufflage)	Retournement mécanique	Régulation ventilation / température	Déodorisation
Andains	Ouvert	Naturelle	Possible	Non	Non
		Forcée	Possible	Possible	Non
	Confiné	Forcée	Non	Possible	Oui
Couloirs	Confiné	Forcée	Oui	Oui	Oui
Tunnels	Confiné	Forcée	Non	Oui	Oui
Casiers	Ouvert ou confiné	Forcée	Possible	Oui	Oui
Cylindres tournants	Confiné	Forcée	Oui	Oui	Oui
Bioconteneurs (Thermocompostage)	Confiné	Forcée	Oui	Oui	Oui
Amendor	Confiné	Forcée	Possible	Oui	Oui

Pour limiter les émissions d'odeurs, les systèmes de compostage avec une ventilation forcée et contrôlée qui permet la récupération de la phase gazeuse et son traitement par une désodorisation chimique ou biologique sont de plus en plus fréquents.

4. Procédés biologiques : lits de séchage plantés de roseaux

Le principe des lits séchage des boues sur lits plantés de roseaux (LSPR) repose sur la mise en place d'un massif filtrant reconstitué et drainé, sur lequel des boues sont disposées et dans lequel des macrophytes se développent (ex. *Phragmites australis*). Les bassins fonctionnent par cycles d'alimentation et de repos. De nombreuses installations existent en France et dans le monde, souvent pour le traitement des boues issues du procédé boues activées aération prolongée. Le Cemagref contribue activement depuis le début des années 90 au développement de la filière (Liénard *et al.*, 1995 ; Troesch, 2009). Les recherches actuelles s'attèlent à l'adaptation de la filière pour le traitement des matières de vidanges (Vincent, 2011) issue de l'assainissement non-collectif.

Le massif filtrant est reconstitué avec des matériaux de granulométrie croissante (de la surface vers le fond). Le processus de filtration retient la matière organique à la surface des lits ce qui limiterait la diminution de la porosité au sein du massif filtrant, et donc ralentirait la circulation de l'eau et de l'air. Ainsi, la boue est retenue en surface et s'accumule progressivement. L'espace libre autour de chaque tige de roseaux assure le passage de l'eau interstitielle de la boue, qui percole au sein du massif pour être drainée à sa base, puis est renvoyée en tête de station par pompage (Figure 8).

Le bon fonctionnement du procédé repose sur un développement dense des roseaux, en tous points du lit filtrant, de manière à ce que l'eau puisse être évacuée en permanence. En été, les roseaux contribuent à la déshydratation des boues accumulées par l'évapotranspiration foliaire. Par une action mécanique, les végétaux participent au maintien de la porosité au sein de la boue permettant son craquellement. La boue accumulée est retirée tous les 5 à 8 ans.

Il est indispensable de maintenir des conditions aérobies propices à la transformation de la matière organique accumulée. Ainsi la bonne pratique de dimensionnement et d'exploitation vise à limiter la charge surfacique appliquée, et à appliquer un temps de repos suffisamment long. Aussi la couche drainante est mise en contact avec l'atmosphère via des cheminées d'aération afin que l'oxygène de l'air diffuse par le fond du lit, en plus des apports par le sommet.

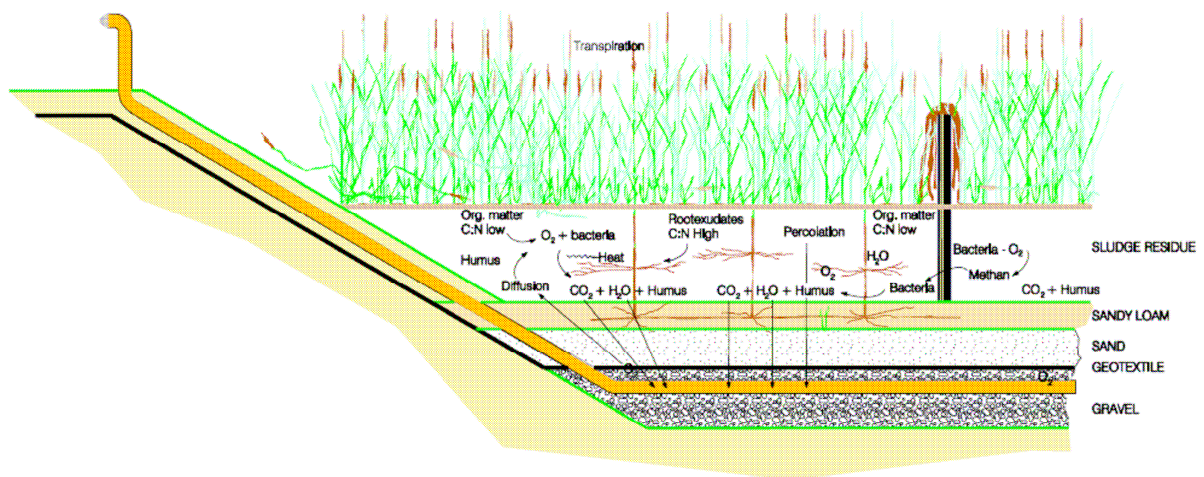


Figure 8 : Mécanismes en jeu dans un lit de séchage planté (Nielsen, 2005 cité par Troesch, 2009)

C. Campagnes de prélèvement

1. Site A (séchage thermique haute température)

1.1. Description du site

Le site A, dont la capacité est de 70 000 tonnes par an, traite les boues de tous types provenant d'une quinzaine de sites différents (boues biologiques, boues primaires, boues tertiaires, boues industrielles, boues digérées ou boues mixtes avec ou sans chaux).

L'installation peut être décomposée en trois zones distinctes : le dépotage et le stockage des boues déshydratées, l'atelier de séchage et le stockage des boues séchées. Comme le montre la Figure 9, les boues arrivant au site A sont stockées dans un silo, elles passent ensuite dans le sécheur, sont refroidies et mises en forme grâce à une pelletisation, puis stockées à nouveau dans des silos. La buée produite lors du séchage est condensée et ensuite dirigée vers des stations de traitement des eaux usées.

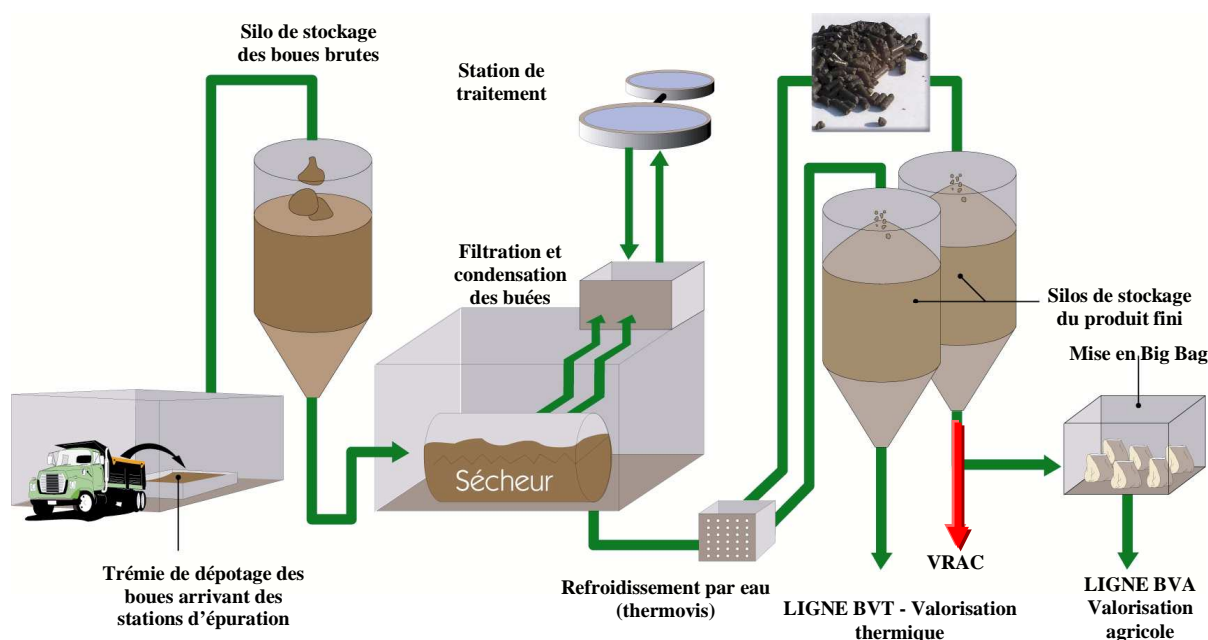


Figure 9 : Ligne de traitement des boues du site A

Le site A est équipé de deux sécheurs thermiques indirect NARA (Figure 10 et Figure 11). Chaque sécheur est composé d'une auge en forme de double enveloppe. Dans cette auge sont disposés deux arbres parallèles et, sur chaque arbre, un nombre important de palettes de géométrie spécifique. L'ensemble de la double enveloppe de l'auge, des arbres et des palettes creuses est parcouru par un fluide caloporteur. Celui-ci est soit de la vapeur saturée sèche, à une pression comprise entre 5 et 10 bar, soit de l'huile thermique à une température de 160 à 200°C. Les deux arbres tournent à faible vitesse en sens opposé l'un de l'autre, ce qui malaxe la boue et lui confère une grande homogénéité. Son temps de séjour élevé (5 h) contribue à l'hygiénisation poussée de la boue séchée.

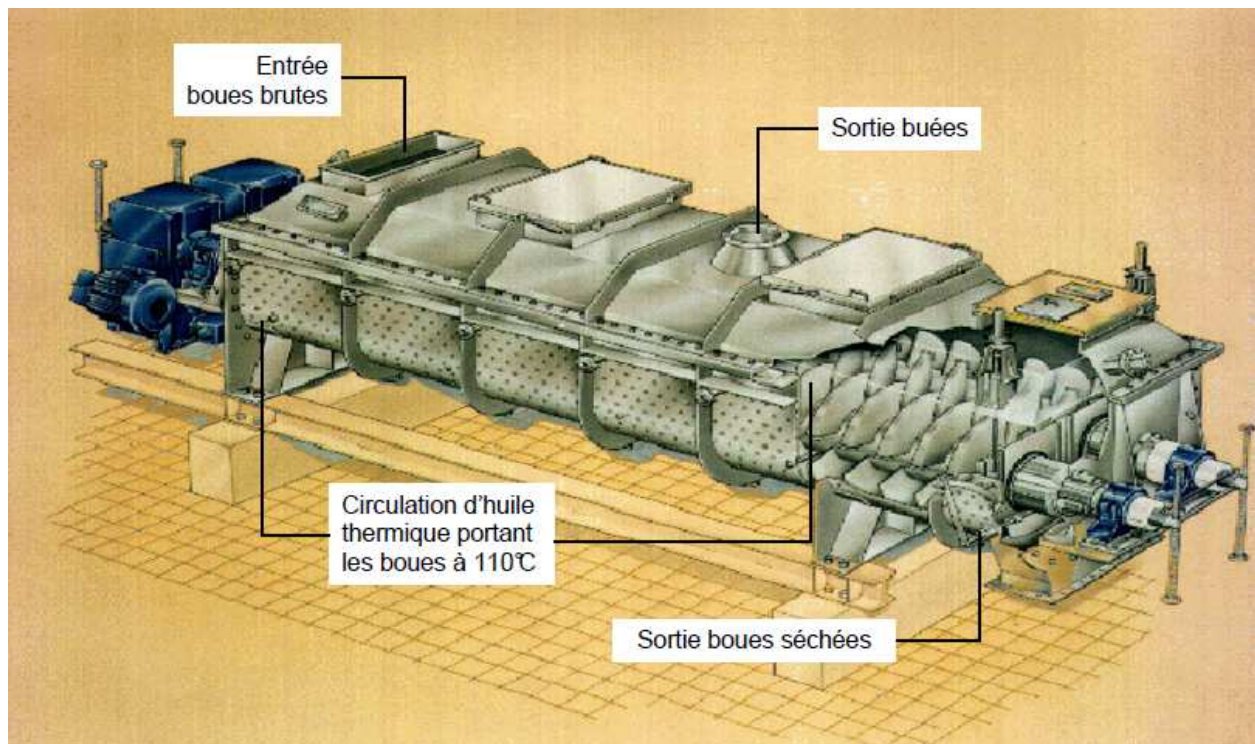


Figure 10 : Schéma d'un sécheur NARA

Le site A dispose de deux lignes de traitement des boues en parallèle (BVA et BVT). Chacun des deux sécheurs a une capacité nominale d'évaporation de $3,4T_{\text{eau}}/\text{h}$. La température des buées est d'environ 115°C et la température à l'intérieur des sécheurs d'environ 120°C . A l'entrée du sécheur, la siccité des boues est comprise entre 16 et 55%. A la sortie du sécheur, la siccité peut atteindre 90 % pour les deux lignes.

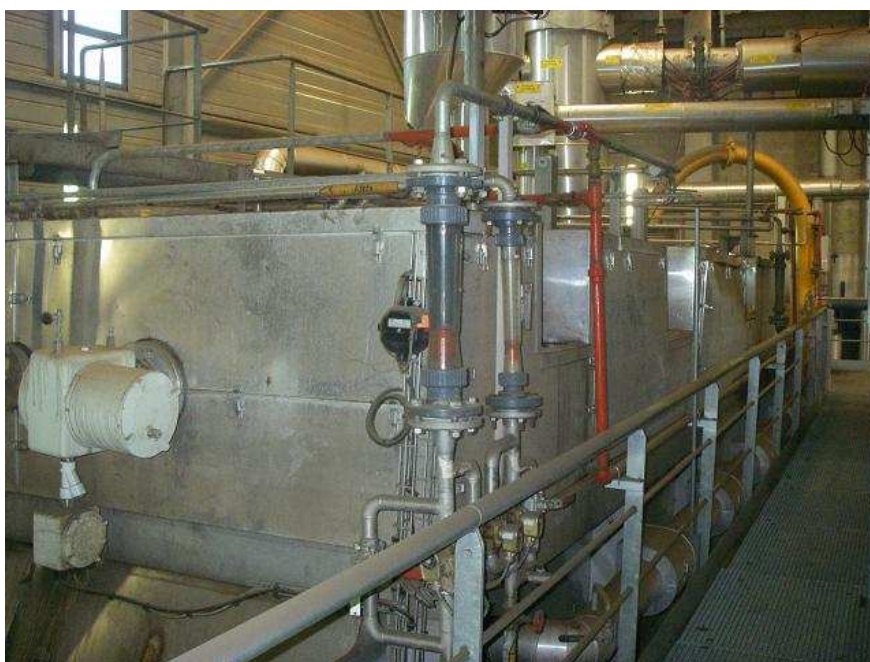


Figure 11 : Sécheur NARA

Les caractéristiques des sècheurs du site A sont réunies dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques des sècheurs du site A

Marque	GMF
Type de sécheur	NARA 14 W 190
Nombre	2
Type de sécheur	Sécheur strictement indirect
Capacité évaporatoire	3,4 T H ₂ O/h
Surface d'échange	190 m ²
Temps de séjour	5h
Température	120°C
Recirculation des boues	Pas de recirculation
Charge entrante	76 m ³ /j
Charge entrante	27840 kg MS/j
Condensats	48 m ³ /j

1.2. Echantillonnage

La campagne s'est déroulée pendant deux jours. Les prélèvements de boues ont été effectués à l'entrée et à la sortie du sécheur sur les deux lignes. Les prélèvements sur la ligne BVA ont été réalisés en une journée. Deux échantillons représentatifs ont été obtenus. Les prélèvements sur la ligne BVT ont été faits en deux journées. Les échantillons de ces deux jours ont été ensuite mélangés et homogénéisés. Deux échantillons de boues de la ligne BVT ont été également obtenus. Afin d'étudier le transfert des micropolluants vers la phase liquide, un prélèvement de condensat a été effectué lors de la campagne sur la ligne BVT. Les points de prélèvement sont indiqués sur la Figure 12.

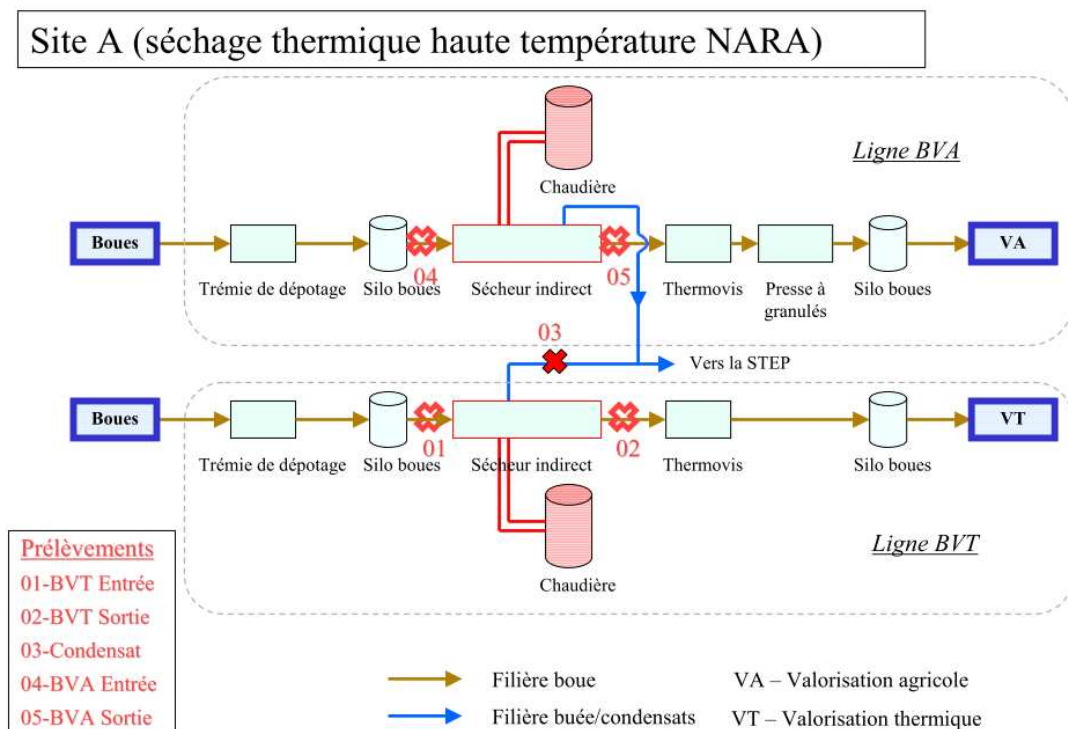


Figure 12 : Points de prélèvements, site A

2. Site B (séchage thermique basse température)

2.1. Description du site

Le site B traite les boues de la station d'épuration de 2.8 millions d'équivalents habitants attenante et a une capacité de 180 000 T de boues traitées par an. Les boues traitées sont un mélange de boues primaires (60 à 80 %) et de boues biologiques (20 à 40 %) de la STEU attenante. Des boues mixtes d'une autre STEU peuvent également être traitées sur le site en moindre quantité. Le séchage des boues du site B est un séchage basse température de type STC. C'est un sécheur à bande et donc un sécheur direct. Ce type de sécheur a été développé par l'entreprise *Sistemas de Transferencia de Calor* et est communément appelé « sécheur STC ».

Dans ce sécheur, la boue est d'abord mise en forme dans une extrudeuse afin d'augmenter la surface d'échange (« spaghetti »), comme le montre la Figure 13.



Figure 13 : Boue déshydratée extrudée entrant dans le sécheur

Les spaghetti sont ensuite disposés sur des bandes transporteuses où ils sont soumis à un écoulement d'air chaud parallèlement ou perpendiculairement à leur sens de déplacement. Dans ce système, le fluide caloporteur (ici de l'air chaud) est à basse température (environ 70°C). L'air est recyclé et re-circule dans le sécheur, ce qui permet une récupération d'énergie et une limitation de la consommation de l'installation (Figure 14 et Figure 15).

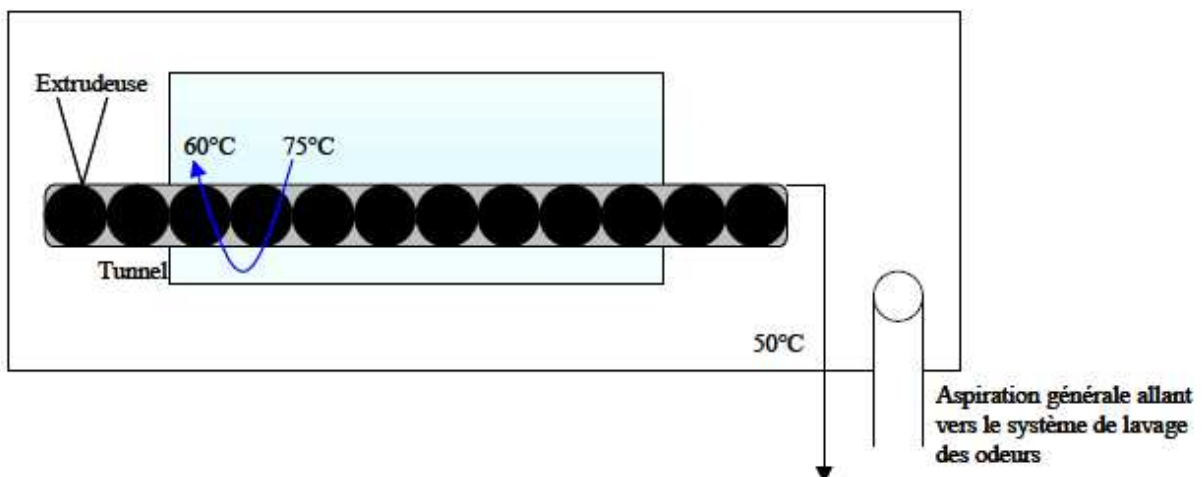


Figure 14 : Schéma d'un sécheur STC



Figure 15 : Deux sècheurs STC

Le site B dispose de quatre lignes de traitement en parallèle alimentées à partir d'un même silo où les boues à traiter sont mélangées. Les caractéristiques des sècheurs du site B sont réunies dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Tableau 4 : Caractéristiques des sècheurs du site B

Marque	STC
Type de sécheur	Sécheur à bande direct
Nombre	4
Capacité évaporatoire	4 T H ₂ O/h
Temps de séjour	1,8 h
Température	72°C
Recirculation des boues	Pas de recirculation
Charge entrante	144 m ³ /j
Charge entrante	45072 kg MS/j
Condensats	90 m ³ /j

2.2. Echantillonnage

La campagne de prélèvements s'est déroulée sur le site B pendant deux jours (J1 et J2). Les points de prélèvement se trouvaient à l'entrée du sécheur ainsi qu'à la sortie du sécheur. Quatre échantillons de boues ont été prélevés pendant deux jours (deux échantillons d'entrée du sécheur et deux échantillons de sortie du sécheur). Un prélèvement de condensat a été également effectué en J1. Les points de prélèvement sont indiqués sur la Figure 16.

Site B (Séchage thermique basse température STC)

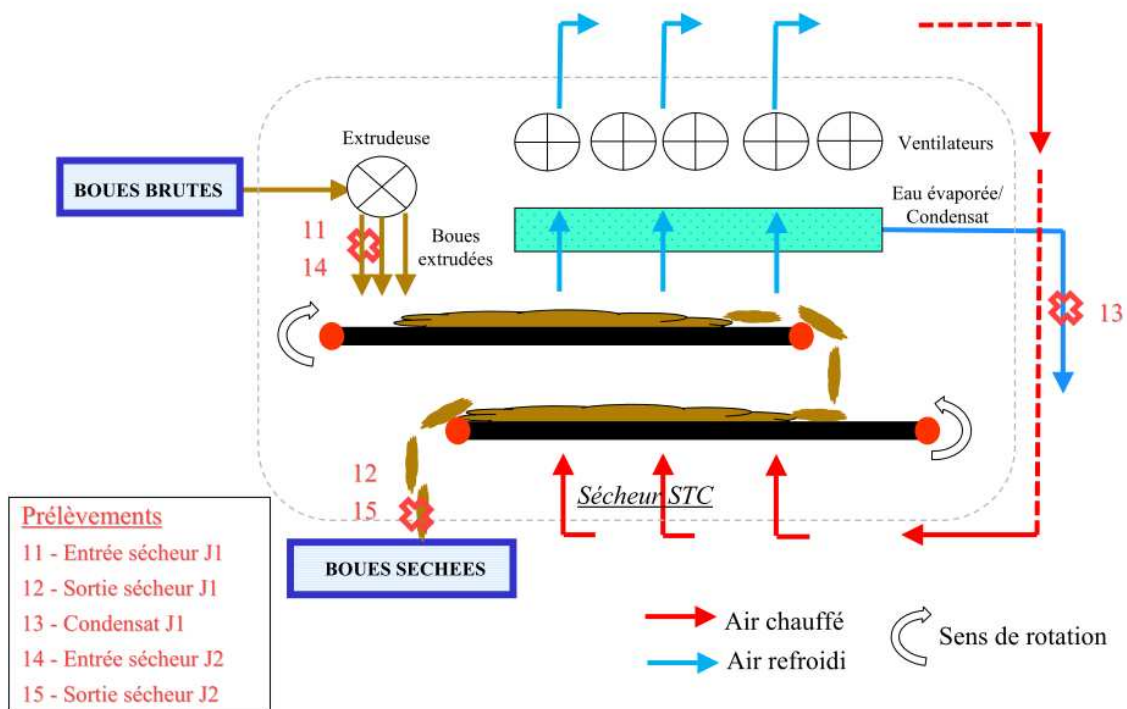


Figure 16 : Points de prélèvement, site B

3. Site C (digestion anaérobie et compostage)

1.4. Description du site

La digestion anaérobie n'est pas habituellement suivie d'un compostage car les objectifs de ces deux procédés de traitement des boues sont assez similaires. Ainsi, il n'a pas été facile de sélectionner un site combinant ces deux procédés. Le site C possède un digesteur mésophile ainsi qu'un procédé de compostage Adonis de la société Amendor afin de traiter les boues de la station (110 000 EH). La STEU traite les eaux usées avec un procédé R3F (réacteur à flore fixe fluidisée) comme le montre la Figure 17.

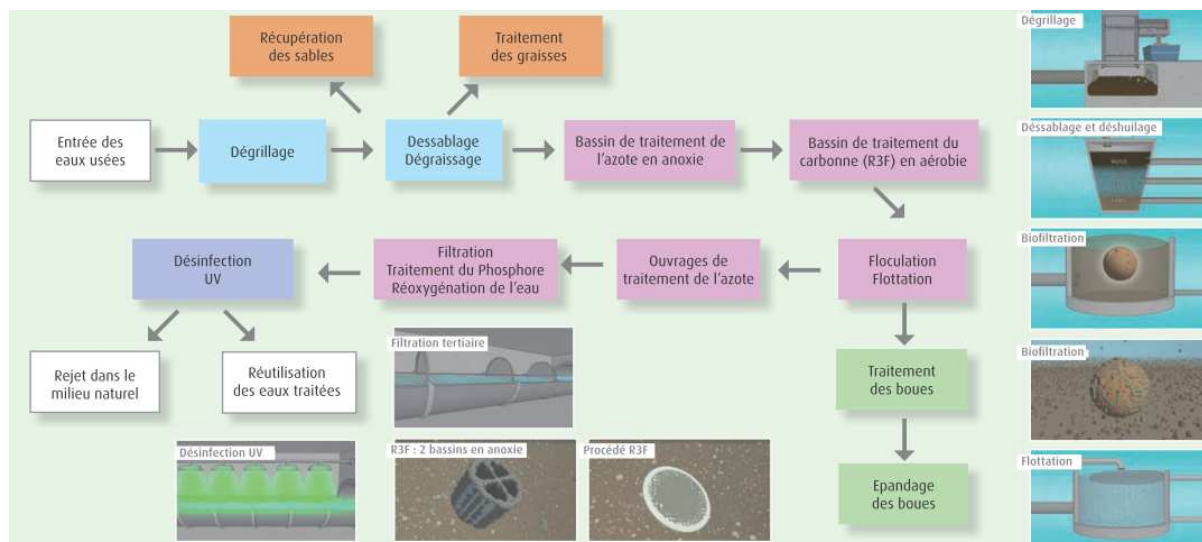


Figure 17 : Traitement des eaux du site C

Les boues du site C sont extraites du flottateur puis égouttées et digérées lors d'une digestion anaérobie mésophile, puis déshydratées et mélangées avec des refus de criblage et des déchets verts pour être compostées. La capacité de l'unité de compostage est de 3 150 tonnes de compost produit par an.

Le compostage se fait en trois étapes. D'abord, le mélange boues-déchets verts-refus de criblage est mis en fermentation dans un tunnel fermé avec recirculation d'air chaud pendant 7 à 10 jours. La température peut dépasser 70°C dans le tunnel ce qui garantit une bonne élimination des germes pathogènes. Ensuite, la phase de maturation s'effectue en tunnels en aération forcée pendant 15 à 20 jours. Le compost final est criblé à une maille de 20mm et le refus retourne à la première étape du compostage.

Les différentes étapes du procédé sont décrites dans la Figure 18.

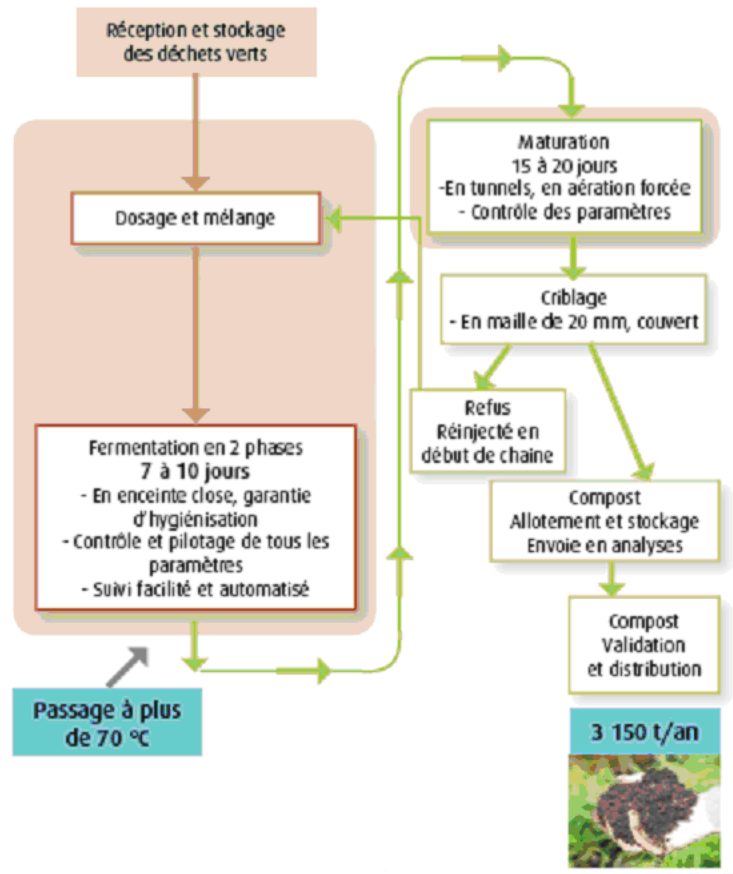


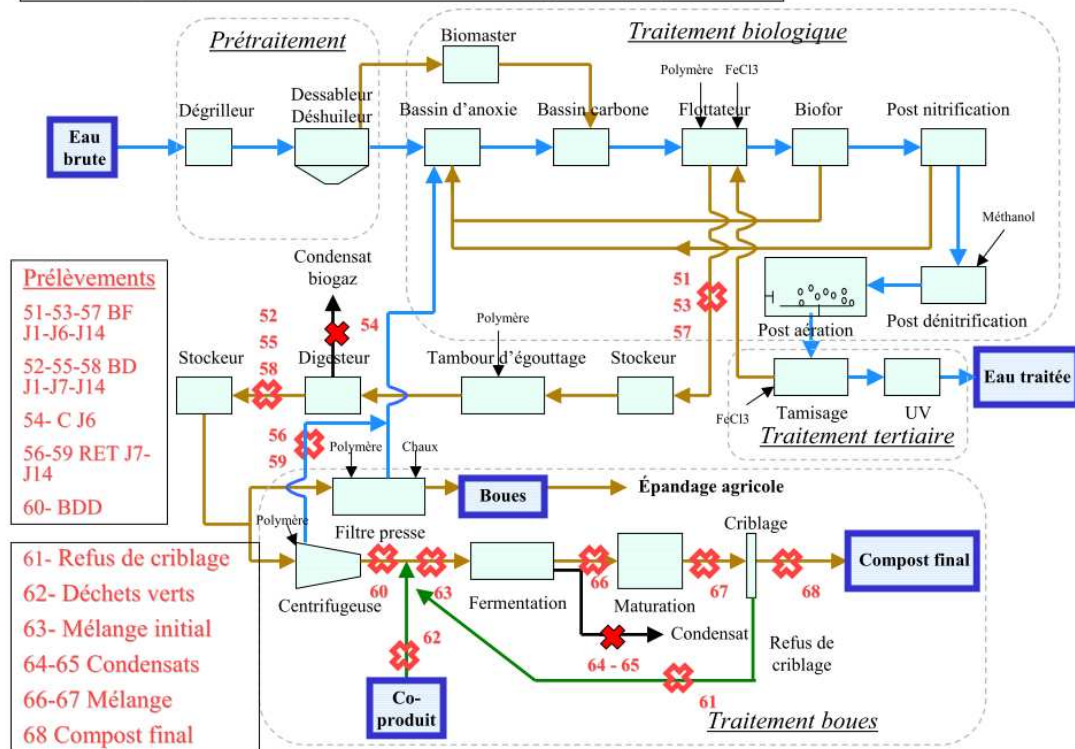
Figure 18 : Etapes du procédé de compostage Amendor

1.5. Echantillonnage

Les prélèvements de boues ont été effectués à l'entrée du flottateur, à la sortie du digesteur, à la sortie de la centrifugeuse, à l'entrée du tunnel de fermentation, à la sortie du tunnel de fermentation, à la sortie du tunnel de la maturation, après le criblage (compost final). Un condensat de biogaz ainsi que des retours en tête de la centrifugeuse ont été prélevés afin d'évaluer les transferts vers la phase liquide. Des prélèvements des déchets verts et de refus de criblage ont également été effectués. Le condensat de l'air chaud recirculant pendant la fermentation du compost a été prélevé afin d'évaluer les transferts vers la phase liquide pendant le compostage.

Les prélèvements ont été réalisés sur un lot de boue en suivant l'ensemble du procédé de traitement des boues : de la digestion anaérobie au compostage. Les points de prélèvement sont indiqués sur la Figure 19.

Site C (Digestion anaérobie et compostage)



BF : Boues flottées ; BD : Boues digérées liquides ; C : Condensat ; RET : Retour en tête ; BDD : Boues digérées déshydratées

Figure 19 : Points de prélèvement, site C

4. Site D (séchage solaire)

4.1. Description du site

Le site D traite les boues de la station de 32 000 EH attenante. La station possède trois lignes de traitement biologique classiques en parallèle comme le montre la Figure 20.

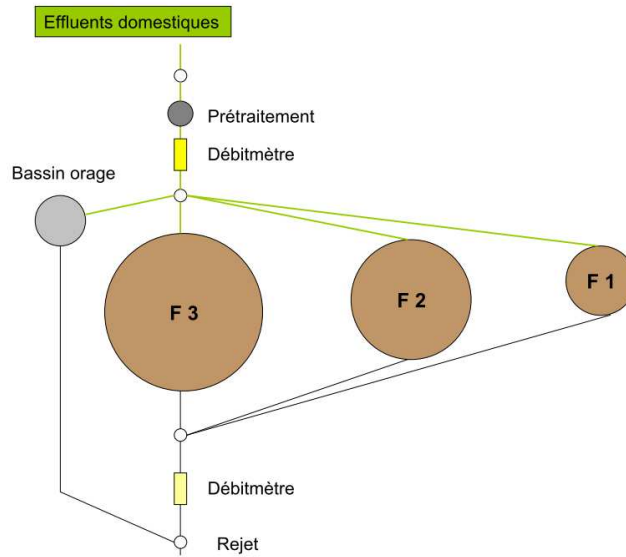


Figure 20 : Lignes de traitement de la STEP du site D

Deux serres Héliantis (Figure 21) traitent les boues biologiques après une grille d'égouttage et un filtre presse sur le site D. La siccité des boues en entrée est d'environ 25 % et peut atteindre 90 % à la fin du séchage solaire. La capacité de séchage des serres est de 5 T par jour au maximum.



Figure 21 : Serres de séchage solaire du site D

4.2. Echantillonnage

La campagne d'échantillonnage des boues visait à suivre un même lot de boues afin d'évaluer l'impact du séchage solaire sur les familles de molécules analysées. Six prélèvements de boues ont été effectués sur le site D. Le premier prélèvement a été fait sur un tas de boues déshydratées. Les cinq autres ont été faits sur le même lot de boues 5, 8, 13, 21 et 27 jours après le premier prélèvement comme le montre la Figure 22.

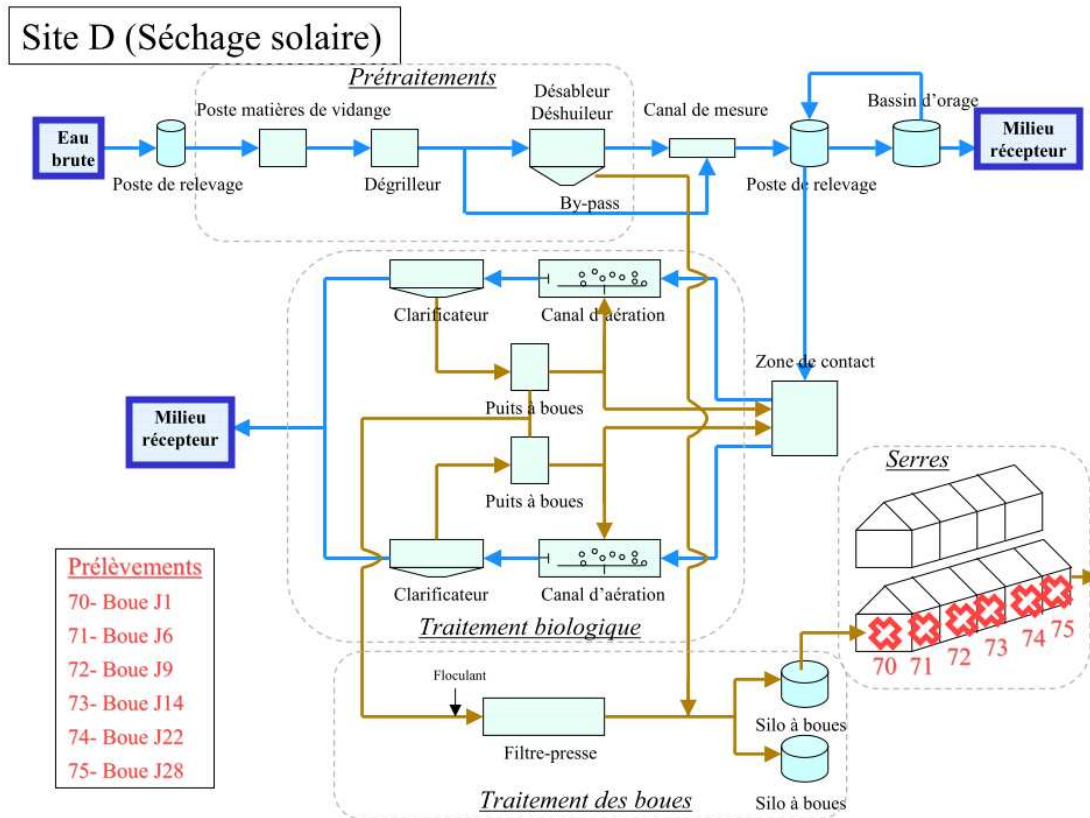


Figure 22 : Points de prélèvement, site D

5. Site E (compostage)

5.1. Description du site

Le site E traite les boues provenant d'une dizaine de stations. Il a une capacité de production de 15 000 T de compost par an. Les boues sont co-compostées avec des déchets verts et des refus de criblage. Le mélange est fermenté dans un casier semi-fermé (ventilé sous une toiture) pendant 4 à 6 semaines, comme sur la Figure 23.



Figure 23 : Casiers de fermentation du site E

Un retournement du mélange est effectué chaque semaine. Le mélange fermenté est ensuite criblé puis subit une maturation en extérieur pendant 6 à 8 semaines.

5.2. Echantillonnage

L'objectif de la campagne de prélèvement sur le site E est de suivre le même lot de boues au cours du processus du compostage, c'est-à-dire la fermentation, le retournement, le criblage, la maturation. Deux prélèvements de condensat ont été également réalisés lors de la fermentation afin d'évaluer les transferts vers la phase liquide. Les points de prélèvement sont indiqués sur la Figure 24.

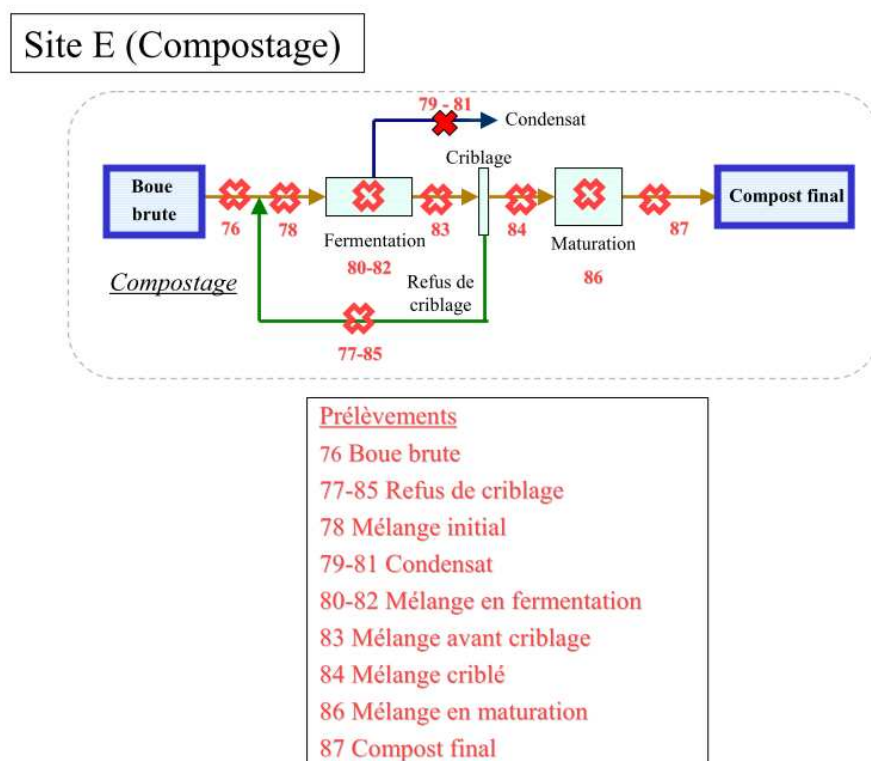


Figure 24 : Points de prélèvement, site E

6. Site F (compostage)

6.1. Description du site

Le site F a une capacité de production de 8 500 T de compost par an. Les boues sont mélangées à des déchets verts et à des refus de criblage. Le compostage en andains extérieurs non ventilés a une durée de 2 à 3 mois.

6.2. Echantillonnage

Prévu pour 2012.

7. Site G (lit de séchage planté de roseaux)

7.1. Description du site

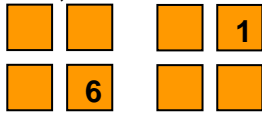
Deux installations lits de séchage plantés de roseaux ont été étudiées dans le cadre du projet ARMISTIQ. Il s'agit des installations déjà étudiés en 2007 dans le cadre du projet AMPERES :

- Site G1, lit de séchage planté de roseaux (8 lits de 470 m² chacun) en fonctionnement depuis 5 ans. Traitement des boues d'une station à boues activées aération prolongée recevant 50 % de sa charge nominale (13 000 EH, réseau unitaire) et des matières de vidange (< 10 %) ;
- Site G2, lit de séchage planté de roseaux (8 lits, 75 m² chacun) en fonctionnement depuis 4 ans. Traitement des boues d'une station à boues activées aération prolongée recevant 60 % de sa charge nominale (2 900 EH, réseau séparatif avec infiltration d'eau claire parasite).

Les filtres des 2 installations comportaient 50 à 60 cm de boues.

G2 (2.900 EH)

8 lits, 75 m² chacun



Filtre 1, 1 pp.
Filtre 6, 1 pp.

30 kgMS/m².an

G1 (13.000 EH)

8 lits de 470 m² chacun



50 kgMS/m².an

7.2. Echantillonnage

En décembre 2010, des échantillons de boues ont été reconstitués dans l'espace à partir de prélèvements individuels collectés en haut et en bas de filtres des deux LSPR (photos ci-dessous lors de l'étape de prélèvement (E. Vray)).



Cavité après prélèvement individuel en un point



Réceptacles verre des prélèvements de boues

En chaque point de chaque installation, les 20 premiers cm de boues, et les 20 derniers cm de boues sont collectés sur une surface de 0.3 m². Les échantillons individuels sont ensuite réunis pour constituer un échantillon moyen haut de filtre et fond de filtre. Ces échantillons sont ensuite débarrassés des débris grossiers (végétaux, minéraux) et mélangés avant d'être répartis dans les flacons destinés aux laboratoires d'analyses.

Les analyses de micropolluants sont en cours.

Prochaine campagne prévue mi-2012 4 échantillons.

D. Résultats

Prévu pour 2012.

E. Evaluation économique

Prévue pour 2012.

F. Evaluation environnementale

Prévue pour 2012.

G. Conclusions

Sept sites de traitement des boues sont évalués dans le cadre du projet, dont quatre sites avec des procédés biologiques (compostage, digestion anaérobie, lits de séchage plantés de roseaux) et trois sites avec des procédés thermiques (séchages thermiques haute et basse température et séchage solaire). Les campagnes d'échantillonnage ont été réalisées pour cinq des sites. Une campagne est en cours et une campagne est prévue pour 2012.

Les résultats d'analyses ainsi que l'évaluation économique et environnementale de ces procédés seront disponibles dans la version finale de ce rapport.

H. Bibliographie

Coquery M., Pomies M., Martin-Ruel S., Budzinski H., Miege C., Esperanza M., Soulier C., Choubert J-M. (2011) *Mesurer les micropolluants dans les eaux usées brutes et traitées. Protocoles et résultats pour l'analyse des concentrations et des flux*, TSM n°1/2, Janvier/Février 2011, pp 25-43

EPA (2009) *Targeted National Sewage Sludge Survey*, EPA-822-R-08-014

Degrémont Mémento technique de l'eau

Liénard A., Duchene P. et Gorini D. (1995). A study of activated sludge dewatering in experimental reed-planted or unplanted sludge drying beds. *Water Science and Technology*, 32(3), 251-261.

Nielsen S. (2005b). Sludge reed bed facilities: operation and problems. *Water Science and Technology*, 51(9), 99-107.

Troesch S. (2009). Traitement et valorisation des boues et des matières de vidange par lits de séchage plantés de roseaux. Thèse de doctorat de l'université de Savoie, spécialité génie des procédés, 292 p.

Vincent J. (2011). Traitement et valorisation des boues et des matières de vidange par lits de séchage plantés de roseaux. Thèse de doctorat de l'université de Montpellier I, spécialité génie des procédés, 200 p.

Onema
Hall C – Le Nadar
5 square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Cemagref
Parc de Tourvoie
BP 44,
92163 Antony cedex
01 40 96 61 21
www.cemagref.fr