

La réduction de boues par voie biologique par le procédé MycET®

- Document de Synthèse -



J.P. Canler - J.M. Perret

La réduction de boues par voie biologique par le procédé MycET[®]

J.P. Canler et J.M. Perret

Mars 2013

Département Ecotechnologie
Thème de recherche TED E

Unité de recherche Milieux Aquatique, Ecologie et Pollutions
Centre de Lyon
5, rue de la Doua
CS 70077
69626 Villeurbanne Cedex

Remerciements :

Ce document de synthèse est le fruit d'un travail collectif de l'équipe Traitement des eaux résiduaires de l'Irstea de Lyon, en particulier pour la partie collecte des données sur site et leur traitement.

Nos remerciements vont tout particulièrement aux techniciens de l'équipe (et plus particulièrement Olivier Garcia pour son suivi continu et rigoureux mais aussi aux équipes :

- du laboratoire d'analyses physico-chimiques des milieux aquatiques de Lyon pour l'ensemble de la partie analytique
- du laboratoire de microbiologie d'Antony pour le suivi de la biodiversité fongique.

Ce document a pu être réalisé grâce à l'aide financière de l'Agence de l'eau Rhône, Méditerranéenne et Corse et d'Irstea.

Nos remerciements s'adressent également :

- au Maître d'ouvrage de l'installation étudiée, la communauté d'agglomération de Brive la Gaillarde (19) pour son autorisation d'accès au site.
- à la direction technique de la SAUR, plus particulièrement à Mme Nathalie Hyvrard, Mrs Fabrice Nauleau et Guillaume Reveau,
- ainsi qu'à tout le personnel exploitant la station d'épuration pour leur disponibilité et aide au bon déroulement de l'étude.

La réduction de boues par voie biologique par le procédé MycET®

Préambule.....	7
1 – Rappels sur la filière boue.....	8
Les différents types de boue issues du traitement des eaux usées	9
Les boues primaires.....	9
Les boues secondaires	9
Les boues tertiaires.....	10
Les boues mixtes	10
La production de boue et la « filière boue ».....	11
2 – Généralités sur les boues biologiques.....	13
Origine des boues et processus biologiques fondamentaux en condition aérobie	13
Nature des boues biologiques.....	14
La production de boue de la filière eau	15
3 – Inventaire des procédés de réduction de boue.....	15
Procédés bio-physico-chimiques.....	16
Procédés biologiques autre que le procédé MycET®	19
4 - Le Procédé MycET®	29
Principe et description du procédé de réduction de boue.....	29
Performances annoncées	33
Dimensionnement et paramètres de fonctionnement retenus.....	34
Références nationales.....	36
Résultats obtenus.....	36
Présentation de la station d'épuration de Brive la Gaillarde.....	36
Matériel et Méthode	40
Résultats obtenus.....	42
Conclusion.....	49
Bibliographie.....	51

Préambule

Dans les années 90, différents textes réglementaires ont fixé les conditions d'utilisation agricole des boues d'épuration urbaines avec, en particulier, la mise en place obligatoire de plans d'épandage. Parallèlement, le développement du traitement des eaux usées a permis de prédire un accroissement important de la production de boue à traiter pour l'ensemble du parc national de stations d'épuration.

Face à cette nouvelle situation, la problématique de la gestion des boues devient capitale voire difficile pour certaines collectivités. En effet, les débouchés de la filière épandage agricole sont pressentis comme insuffisants pour les boues en excès et la filière incinération est très coûteuse et peu acceptable socialement. Une des solutions est donc de produire moins de boues à la source, soit au niveau de la filière de traitement des eaux usées et pour un même niveau de traitement ou soit au niveau de la filière boue.

Pour répondre à ces nouvelles préoccupations, les constructeurs et leur centre de recherche ont travaillé sur le sujet et proposent différentes stratégies de réduction de boue au sein même de la station d'épuration.

Différentes technologies sont ainsi étudiées dont certaines resteront au stade recherche, et d'autres trouveront leurs première application en vraie grandeur sur certains sites.

On peut classer ces techniques en deux principaux groupes :

- Ceux faisant appel à des procédés combinant des traitements biologiques, physiques et chimiques. Par exemple, les techniques mises en œuvre peuvent être l'utilisation des ultrasons, l'oxydation chimique à l'ozone (Biolysis® O de Degremont), la solubilisation par lyse thermique (Thélis® de Véolia) ou par haute pression (Carbofil®).

- et ceux faisant uniquement appel à des procédés biologiques. On peut citer les procédés classiques comme la digestion aérobie des boues (mésophile ou thermophile appelé aussi DAT avec production d'enzymes – Procédés : S-TE process® et Biolysis® E), la digestion anaérobie des boues (avec production et récupération de gaz méthane), ou l'utilisation de champignons pour dégrader la matière organique des boues en excès (procédé MycET®).

Les différents procédés existant sur le marché seront abordés de façon succincte dans la 1^{ère} partie du document en précisant les performances de chaque système lorsque celles-ci sont connues. La seconde partie abordera le procédé Mycet, système de traitement biologique à base de cultures mycéliennes.

1 – Rappels sur la filière boue.

Lors du traitement biologique des eaux usées, basé sur la transformation de la pollution en biomasse (appelée boue), les stations d'épuration produisent différents types de boue en fonction de leurs étages de traitement aux caractéristiques bien particulières. Les différents types de boues issues du traitement des eaux usées.

Les boues produites sur la « filière eau » sont composées d'eau et de matières contenant des substances minérales et organiques.

Une filière de traitement biologique peut être composée de plusieurs étages de traitement. Préalablement au réacteur biologique, une décantation peut être réalisée et les boues produites sur cet étage, appelées boues primaires, sont composées essentiellement de matières en suspension apportées par les eaux usées. Après le réacteur biologique, une partie des boues doit être maintenue dans le système pour assurer le traitement ; et l'excédent, appelé boues en excès, doit être éliminé de la station d'épuration. Au préalable à son évacuation du site, les boues en excès subissent différents traitements qui seront assurés par la « filière boue ».

Les traitements les plus courants avant leur évacuation sont:

- de les concentrer et les séparer de la phase liquide. Cela fait intervenir des processus physiques lors des opérations d'épaississement et de déshydratation. Ces deux techniques permettent d'obtenir des concentrations ou siccités satisfaisantes. Dans certains cas particulier, l'épaississement peut se faire par flottation en raison de la faible densité de la boue,
- de les stabiliser. C'est à dire les rendre moins fermentescibles (limiter les odeurs lors de leur stockage ou de leur manipulation), en limitant la part de Matières volatiles (MV) biodégradables ou en bloquant leurs réactions biologiques. Il faut noter que plus une boue contient de MV biodégradables, plus les réactions d'oxydation biologiques sont efficaces.

De ces traitements plus ou moins poussés résultent finalement des boues liquides, pâteuses ou solides dont le classement est réalisé en fonction de leur siccité (pourcentage de matières sèches qu'elles contiennent). On parlera alors de :

- boues liquides (siccité variant de 1 à 10 %) : Elles sont très fréquentes sur les stations de très faible capacité et en zone rurale.
- - boues pâteuses (siccité variant de 10 à 30 %) : Actuellement majoritaires, elles proviennent des moyennes stations et correspondent à la siccité minimale demandée.
- - boues solides - boues avec adjonction de chaux, appelée aussi boue chaulée -, (siccité supérieure à 30 %) : Elles proviennent des stations de moyenne ou grande taille et représentent plus de 30 % des tonnages de boues évacuées.
- - boues séchées (siccité supérieure à 60 - 90 %) : Elles sont peu fréquentes en France.

A partir d'une « filière de traitement des eaux », on peut distinguer en fonction de l'étape de traitement où sont prélevées les boues différents types de boue.

Les différents types de boue issues du traitement des eaux usées

Les boues primaires

Elles proviennent du décanteur primaire et correspondent en grande partie au piégeage de la pollution particulaire d'entrée. Dans le cas où la pollution colloïdale doit être piégée, l'ajout de réactifs chimiques (coagulants et floculants) est nécessaire.

Leurs principales caractéristiques sont :

- d'avoir une bonne aptitude à la décantation, ce qui permet l'obtention de concentrations élevées par simple épaissement car elles contiennent des particules de grosse taille et de densité élevée.
- d'être favorable à la déshydratation et donc aux traitements visant à les épaisir ;
- d'avoir une teneur importante en matières organiques, fonction de la typologie des eaux d'entrée. Ce taux de matières organiques par rapport aux MES (matières en suspension) diminue lors des épisodes pluvieux ou lors d'ajout de réactifs chimiques (et plus particulièrement lors d'ajout de coagulants minéraux).

A titre d'information, les rendements obtenus peuvent être les suivants :

	DCO	DBO5	MES
Traitement primaire simple	25 à 30 %	25 à 30 %	55 à 65 %
Traitement primaire avec réactifs chimiques	55 à 60 %	55 à 60 %	> à 70 %

Les boues secondaires

Les boues secondaires, ou biologiques, proviennent du traitement biologique qui est possible grâce aux micro-organismes épurateurs du milieu, essentiellement des bactéries. Sous l'effet des paramètres de fonctionnement retenus sur le réacteur biologique, les bactéries libres épuratrices du départ vont adopter une structure en flocs. Ceux-ci sont de taille différente selon la charge massique retenue dans le système et de qualité différente (taux de MVS) selon la part d'auto oxydation de la biomasse, dépendante aussi de la charge massique et de la typologie des eaux d'entrée (fraction des MVS sur les MES). La formation de flocs va faciliter la rétention par décantation de la biomasse au sein du clarificateur.

En fonction de la charge massique retenue (quantité de MO entrante, quantité de biomasse présente dans le bassin), on distingue:

- les boues dites d'aération prolongée ($C_m \leq 0.1\text{kg de DBO5/kg MVS}$) avec un taux de MVS de l'ordre de 65 à 70 %
- les boues dites de moyenne charge ($C_m \leq 0.5\text{kg de DBO5/kg MVS}$) avec un taux de MVS de 70 à 75 %.
- les boues dites de forte charge ($C_m > 0.5\text{kg de DBO5/kg MVS}$) avec un taux de MVS supérieur de 80 %.

Les boues secondaires ou biologiques ont pour caractéristiques :

- d'être peu favorable à la déshydratation, ce qui engendre des coûts supplémentaires pour l'épaississement
- d'être de qualité variable suivant les paramètres de fonctionnement fixés ou subis qui engendrent des siccités différentes.

Les boues tertiaires

Les boues tertiaires sont le plus souvent issues d'un traitement physico-chimique après un traitement biologique (d'où la notion de traitement tertiaire) . Ce traitement tertiaire a pour principal objectif un rôle d'affinage du traitement. Il s'avère obligatoire derrière une boue activée lorsque les niveaux de rejets demandés sont très contraignants comme une teneur en MES inférieure à 20 mg MES/l , une teneur en phosphore inférieure à 1 mg Pt/l et une concentration en DCO inférieure à 60 mg/l. Elles sont le plus souvent obtenues par l'ajout de réactifs chimiques et elles sont aussi le plus souvent plus difficiles à déshydrater.

Les boues mixtes

Les boues mixtes correspondent au mélange des boues primaires et secondaires voir tertiaires. Leur aptitude à la concentration par rapport aux boues biologiques est améliorée lors d'ajout de boues primaires

En résumé, le schéma suivant représente les différentes étapes du traitement épuratoire de la file eau en lien avec les différents types de boue associées.

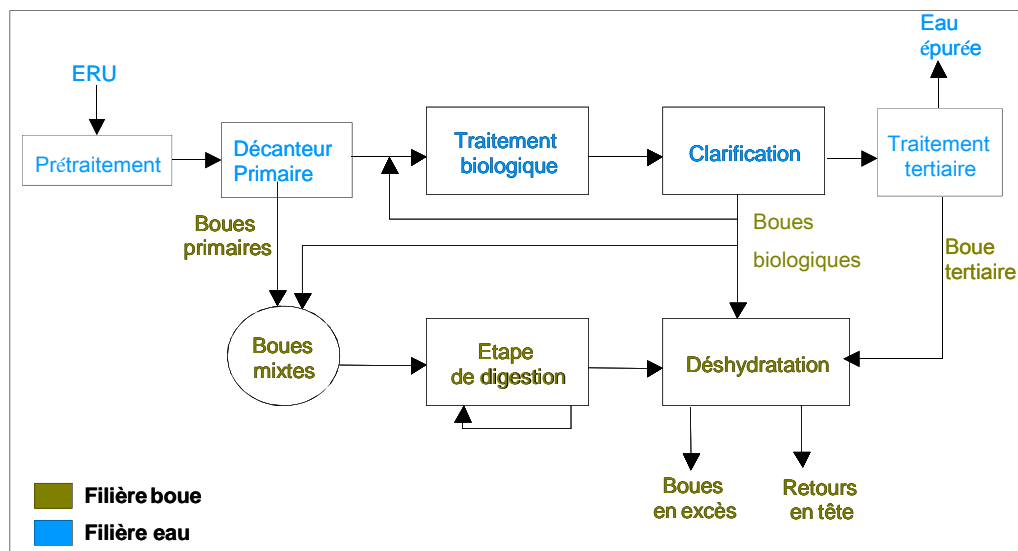


Figure 1. Schéma d'une station d'épuration intégrant l'ensemble des étapes de traitement.

La production de boue et la « filière boue »

La production de boue d'une station d'épuration est très variable et dépend :

- de la typologie des effluents d'entrée, en particulier du ratio MES/DBO₅.
- de l'âge de boue (donc de la charge massique) dans le système de traitement des eaux usées qui permet une auto-oxydation plus ou moins poussée de la boue d'où une réduction des boues produites.

Sur une station d'épuration, la filière boue est composée de différentes étapes de traitement en fonction des objectifs fixés au départ par la collectivité. Parmi ceux-ci, on recherchera :

- à produire moins de boue,
- à réduire les volumes de boues à évacuer en fixant une siccité de la boue à évacuer compatible avec les débouchés retenus : épandage agricole, incinération, compostage...
- éventuellement, à les stabiliser afin de réduire les nuisances olfactives, en limitant toute reprise de leur fermentation après traitement. En effet, les boues sont souvent stockées durant de longues périodes avant d'être valorisées en agriculture. Très chargées en MV, elles ont tendance à fermenter spontanément et à générer des nuisances olfactives. Selon la filière de stabilisation retenue et la nature de la boue, il existe trois voies de traitement: biologique, chimique et physique auxquelles correspondent des procédés de traitement résumé dans la tableau suivant :

	Voies biologiques			Voies chimiques		Voie physique
	Digestion anaérobie mésophile	Stabilisation aérobie thermophile (6 jours >50°C)	Compostage	Chaulage	Stabilisation aux nitrites	Séchage >90%
Processus mis en œuvre	Dégrade les MV selon un processus biologique contrôlé			Inhibe la dégradation putride des MV		
Type de boue traitée	Boue épaissie	Boue épaissie	Boue déshydratée	Boue déshydratée	Boue épaissie	Boue déshydratée

Types de boues en fonction du procédé de stabilisation.

- et à les hygiéniser, c'est à dire réduire les agents pathogènes. Les techniques de stabilisation, aux performances très variables, utilisées pour hygiéniser les boues sont les suivantes :

Traitement	Conditions opératoires
Stabilisation aérobie thermophile	55°C - 6 jours
Compostage	60°C - 4 jours
Chaulage (à la chaux vive ou éteinte)	pH 12 - 10 jours
Stabilisation aux nitrites	pH 2 - 2 heures
Séchage total (siccité de la boue >90%)	90°C - 10 minutes

Condition de mise en œuvre du traitement d'hygiénisation.

Le choix de la filière de traitement des boues est plurifactoriel.

Notre étude est ciblée sur les procédés biologiques de réduction des boues, en particulier des boues secondaires provenant des boues activées en aération prolongée qui s'imposent en France comme le procédé dominant. Le chapitre suivant présente comment les boues biologiques sont créées et décrit les paramètres utilisés pour quantifier et identifier les boues afin d'étayer de manière compréhensible les méthodes de réduction de boue.

Ainsi, concernant la filière boue, de façon générale, les dimensionnements doivent permettre de traiter la totalité de la production de boue de la station sans provoquer d'accumulation anormale et prolongée de boue dans le décanteur primaire, le bassin d'aération, le clarificateur ou l'épaississeur.

La pérennité de la destination finale des boues est indispensable au bon fonctionnement de la station d'épuration (document technique FNDAE n°33). Les filières de traitement des boues qui peuvent être envisagées sont l'épaississement, la stabilisation, le stockage, le conditionnement, la déshydratation puis la reprise et l'évacuation.

Ainsi, en fonction, entre autre, de la nature de la boue et du traitement appliqué, il existe de nombreuses filières schématisées ci-après:

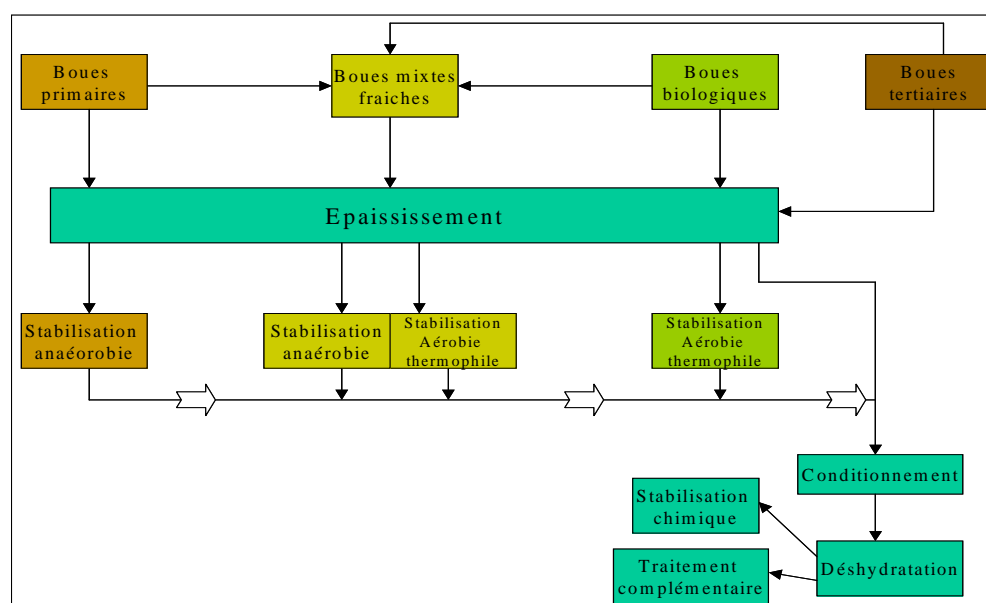


Figure 2. Schéma général des traitements des boues.

2 – Généralités sur les boues biologiques.

Origine des boues et processus biologiques fondamentaux en condition aérobie

La boue biologique produite (ou biomasse) provient principalement de la dégradation des matières carbonées, azotées et phosphorées. En effet, tous les procédés biologiques sont basés sur les activités métaboliques naturelles des organismes impliqués. Ces activités, reliées à la croissance et à la survie de ces organismes, se divisent principalement en deux classes: les activités anaboliques et les activités cataboliques.

- L'anabolisme est cette partie du métabolisme biologique qui est responsable de la croissance. Son activité consiste à transformer des composés simples et non-viables en des constituants de cellules actives.

- Le catabolisme fournit l'énergie nécessaire pour les activités anaboliques et pour le maintien des fonctions vitales. Son mécanisme consiste donc à détruire le substrat pour en retirer l'énergie et la rendre disponible pour la cellule. Les déchets issus du catabolisme en conditions aérobies sont des substances minérales comme le CO₂, le NH₃.

Lorsqu'un substrat métabolisable, donc biodégradable, est disponible dans le milieu, les cellules l'utilisent comme source de matière organique pour les activités cataboliques et anaboliques. C'est ce processus qui prédomine dans les procédés où le milieu à traiter est riche en matière organique libre (substrat « exogène ») comme par exemple les procédés de boues activées ou encore de digestion anaérobie. Par contre, si un tel substrat n'est pas présent en quantité suffisante, les cellules utilisent plutôt les substances de réserve qui se sont accumulées en période bien précise (charge massique faible); on parle alors de métabolisme « endogène ». Dans ces conditions, les cellules oxydent donc leurs propres constituants afin d'en tirer l'énergie nécessaire à leur fonction vitale. Lorsque ces réserves sont épuisées, les cellules meurent et leur lyse libère le restant de leurs constituants dans le milieu, ceux-ci devenant à nouveau disponible pour les cellules encore vivantes. La poursuite de ce processus permet une diminution globale de la quantité de biomasse active et une minéralisation de la matière organique biodégradable, il s'agit de la digestion ou stabilisation aérobie.

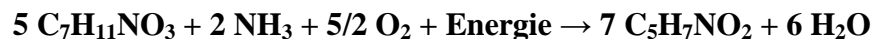
Ainsi, la production de biomasse correspond au rapport de la quantité de biomasse produite par rapport à la quantité de matière organique éliminée. En condition aérobie, et selon la charge massique, la boue a un taux de MVS variable. Pour une boue activée en aération prolongée, ce rapport est compris généralement entre 60 et 70 % de MVS/MES. Il faut noter qu'une part de l'énergie produite lors de l'oxydation de la matière organique sert à l'entretien de la cellule et offre une autre voie d'action à la réduction des boues. Les processus sont décrits par les équations suivantes qui résument le cycle de production de boue qui obéit à 3 réactions fondamentales :

Deux réactions concernent le métabolisme des micro-organismes:

- Réaction de catabolisme : production d'énergie



- Réaction d'anabolisme : synthèse de la matière vivante



La troisième réaction concerne l'auto-oxydation ou respiration endogène qui est une réaction de minéralisation de la matière vivante.



Nature des boues biologiques

Les boues comprennent une fraction minérale et une fraction organique intimement liées ; la proportion de chaque fraction a une forte influence sur les propriétés des boues.

La fraction minérale est essentiellement composée de particules et de cations multivalents comme les silicates, les oxydes de fer ou le phosphate de calcium, tandis que la fraction organique est plutôt composée de gros polymères (cellulose, lignine, d'hydrocarbures lourds), de macromolécules, de biomolécules (protéines, sucres), d'acides humiques, d'une fraction lipidique et d'environ 70 % de micro-organismes (virus, majorité de bactéries, protozoaires, métazoaires). En résumé, une boue biologique est composée de 50 % de protéines, 5 % de lipides, 15 % de polysaccharides et 30 % divers.

Les boues biologiques proviennent de la combinaison de phénomènes de floculation (production d'exopolymères en paroi bactérienne) et de matériel cellulaire issu de la consommation de la matière organique dissoute. Le degré de production d'exopolymères est fonction du domaine de charge du procédé avec une production plus importante pour les faibles domaines de charge.

En fait, la floculation est facilitée par la production d'exopolymères qui sont principalement des polysaccharides aminés ou phosphatés (Bougrier, 2005). Ainsi, ils donnent une charge globalement négative aux floes et aux micro-organismes.

Les traitements appliqués pour réduire les boues doivent être développés en adéquation avec la qualité des boues produites. En fonction du type de « filière eau », les boues résiduelles ont des caractéristiques précises. En effet, l'ensemble des procédés et les paramètres de fonctionnement modifient la qualité des boues en termes de composition (chimique et biologique) et de comportement, sans pour autant remettre en cause les filières de valorisation agricole (épandage, amendement) et/ou énergétique.

Cependant, il faut garder à l'esprit que les technologies appliquées sur la « filière boue » ne réduisent que la partie matière volatile (matière organique) pour aboutir à un taux de MVS plus faible. Par exemple, les boues digérées après certains pré-traitements contiennent moins de 50 % de matières organiques alors que dans le cas où la réduction est effectuée sur la « ligne eau », la minéralisation est beaucoup plus faible. La minéralisation influe directement sur le comportement mécanique des boues en leur conférant une meilleure aptitude à la déshydratation. De nettes améliorations en siccité et consommation en polymère peuvent être obtenues dans des proportions qui varient selon le procédé. La réduction des volumes peut alors être cumulée avec la réduction des masses.

Les procédés utilisés pour réduire les boues biologiques impliquent que les concentrations en métaux lourds, en éléments traces et en composés traces organiques retenues comme

indicatrices de la qualité des boues respectent les normes exigées après réduction compte tenu de l'effet concentration de la boue.

Les procédés de réductions de boue ne doivent pas nuire à la qualité des eaux de rejets dans le respect des normes appliquées. L'azote sous forme de nitrate ou d'ammonium et le phosphore sous forme soluble (orthophosphates) constituent les deux indicateurs physico-chimiques majeurs à prendre en compte.

Le plus souvent, le suivi de la DCO, de la DBO et des MES sont les autres paramètres principaux de qualités des eaux qui servent de références.

La production de boue de la filière eau

En boue activée, la production de boue dépend :

- de la quantité de biomasse formée à partir d'un kg de DBO₅ éliminée (AP = 0.6 kg de MVS / kg de DBO₅ éliminée) ;
- de la proportion d'auto-oxydation (fraction de matière vivante détruite journalièrement (0.06 à 0.05 kg de MVS / kg de MVS) ;
- de la quantité de matière minérale apportée par l'effluent ;
- de la quantité de matière organique difficilement biodégradable (30 % de MVS de l'effluent entrant) ;
- et des pertes de boues vers le milieu récepteur.

Il en ressort que la formule du binôme (Ph. Duchêne, 1999) est une formule simplifiée qui informe sur la production de boue d'une station d'épuration en réduisant les approximations. Le modèle du binôme tente de décrire la production de boues synthétisées lors de la transformation de la matière organique en incluant la contribution des matières en suspension de l'influent (prétraitées voire décantées en traitement primaire).

Elle peut s'écrire de manière générique : **AS = k (aDBO5 + βMES) (1)**

AS est la production de boues (par exemple journalière)

DBO5 et **MES** sont les flux à traiter (par exemple journaliers)

A et **β** (dont la somme peut par simplicité être égale à 1) et **k** sont les paramètres d'ajustement tenant compte des particularités des influents et du traitement.

En pratique, en boues activées, une approximation robuste est donnée par $a = \beta = 0,5$

La formule simplifiée peut alors s'écrire:

$$AS = k (DBO5 + MES) / 2 \quad (2)$$

Avec, par temps sec, $K=0.84$ pour les réseaux séparatif

$K=1.02$ pour les réseaux unitaires

3 – Inventaire des procédés de réduction de boue.

On peut classer ces techniques en 2 principaux groupes :

- Procédés bio-physico-chimiques : ce sont ceux qui font appel à des procédés combinant des traitements biologiques, physiques et des traitements chimiques afin de réaliser une lyse cellulaire des bactéries (boue) à traiter en vue d'une ré-assimilation ultérieure des solutés libérés lors de la lyse. Par exemple, les techniques mises en œuvre sont l'utilisation des ultrasons, l'oxydation chimique à l'ozone (Biolysis® O de Degrémont), la solubilisation par lyse thermique (Thélis® de Véolia) ou par haute pression (Carbofil®).

- Procédés biologiques : ceux-ci font uniquement appel à des procédés biologiques. On peut citer les procédés classiques comme la digestion aérobie des boues mésophile ou thermophile avec production d'enzymes (S-TE process® et Biolysis® E), la digestion anaérobie des boues (avec production et récupération de gaz méthane), ou l'utilisation de champignons pour dégrader la matière organique des boues en excès (MycET®).

Procédés bio-physico-chimiques

Cette partie est consacrée aux processus qui associent les outils physico-chimiques aux procédés biologiques. Elle a pour objectif de donner un ordre d'idée sur les technologies les plus courantes utilisées et leurs performances associées.

La mise en place du couplage d'un procédé physico-chimique avec les procédés biologiques peut se faire de différentes façons.

Ce co-traitement peut être réalisé en différents points sur une station d'épuration : au niveau du bassin d'aération, au niveau de la boucle de recirculation des boues en excès, en amont d'une digestion anaérobie, ou sur la ligne boues.

Dans la majorité des cas, il est conseillé de travailler avec une boue déjà concentrée afin de réduire l'énergie nécessaire au traitement.

La figure 3 montre les emplacements possibles du traitement physico-chimique dans les filières de traitement de l'eau et des boues.

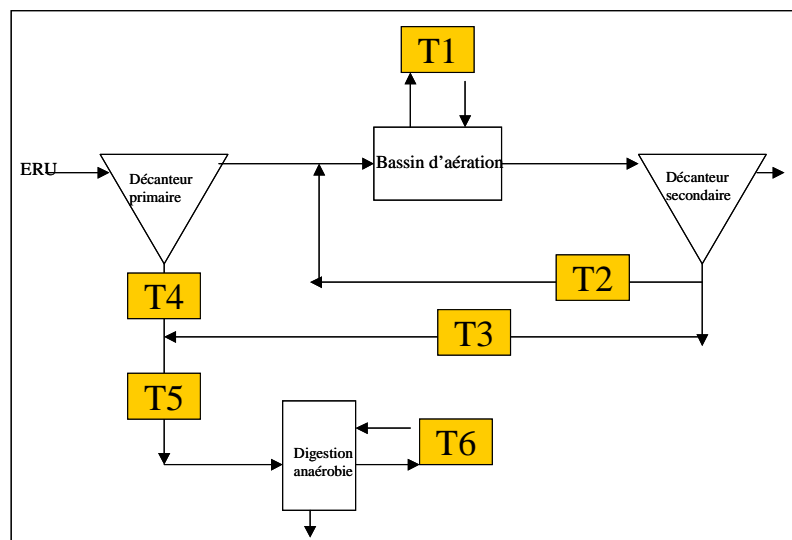


Figure 3. Place du traitement physico-chimique dans les filières de traitement de l'eau

Comme le montre le schéma ci-dessus, le traitement physico-chimique de lyse cellulaire peut être se faire aux différents stades de traitement, mais le traitement le plus efficace est celui

qui se situe sur les boues activées en excès (T2 ou T3). En effet, ces boues biologiques contiennent beaucoup de micro-organismes ; Le pré-traitement retenu permet de détruire ces bactéries et de rendre le matériel intra ou extracellulaire accessible aux micro-organismes épurateurs.

En ce qui concerne la place du traitement (« ligne eau » ou « ligne boues »), il s'agit de deux stratégies différentes pouvant tout autant améliorer le traitement.

Le traitement sur boues primaires (T4) a peu d'intérêt, puisqu'elles contiennent une large fraction de composés facilement biodégradables. L'intérêt est également limité pour les traitements sur les boues mixtes (T5).

Il existe peu d'études sur le traitement au niveau de la recirculation du digesteur (T6), et elles concernent l'ozonation.

Les procédés de réduction des boues activées qui associent un pré-traitement physico-chimique au niveau de la boucle de recirculation avant de les rediriger dans le bassin d'aération sont les suivants :

- **Solubilisation par Sonication (ultrasons)**

Ce procédé de prétraitement des boues par ultrasons permet de libérer le contenu cellulaire. Ceci facilite l'assimilation des matières organiques par les bactéries par une meilleure solubilisation de la DCO et par la réduction de la taille des particules qui deviennent plus accessibles et rapidement biodégradable par la biomasse active. Ce procédé réduit aussi les problèmes de bulking et de bactéries filamenteuses. Une solubilisation optimale est obtenue pour des énergies de l'ordre de 6 250 à 10 000 KJ/Kg de MS, valeur fonction du degré de traitement.

D'après les résultats bibliographiques, lorsque ce traitement est effectué sur la boue à l'entrée de digestion, il permet en plus d'augmenter la production de biogaz- et de diminuer le temps de séjour de la boue dans le digesteur.

D'autres paramètres ont une forte influence sur les performances du procédé de sonication comme la quantité d'énergie fournie dont l'augmentation accroît le taux de désintégration et la fréquence des ultrasons qui améliore la dégradation des boues pour des faibles fréquences.

Cette technologie par ultrasons est commercialisée par deux principaux constructeurs :

Ultrasons® par le constructeur Entsorga (institut Fraunhofer)

Ultrawaves&Sonotronic® par le constructeur Stereau

- **L'oxydation chimique à l'ozone**

La technique consiste à ozoner des boues décantées et à les renvoyer en amont du bassin d'aération.

Les doses optimales d'ozone injecté varient de 0,12 à 0,15 g O₃/g de MS et les performances de réduction des boues varient de 30 % à des valeurs très élevées (valeur annoncée proche de 100%). Par contre, ces performances ne prennent pas toujours compte de l'augmentation de l'azote total et des phosphates dans le surnageant recirculé en tête de station. Ce procédé a également pour conséquence d'augmenter la part de minéral dans les boues traitées.

Ce procédé est commercialisé par deux principaux constructeurs : Kurita (Japon) et Degremont (Biolysis® O).

- **Solubilisation par lyse thermique**

La lyse thermique consiste à chauffer les boues de manière optimale entre 170°C (30 minutes) et 190 °C (15 minutes). Cette technique favorise la solubilisation de la DCO mais n’améliore pas la biodégradabilité de la DCO particulaire résiduelle.

Au moins un procédé est commercialisé, Thélis® de Veolia Water Systems avec une réduction finale annoncée de 70 à 80 %.

En résumé, la comparaison en termes de performances des procédés de lyse thermique, de sonication et d’ozonation est le suivant :

Le taux de solubilisation est très différent d’une technique à l’autre. Les ultrasons et l’ozonation conduisent à des taux de solubilisation à peu près similaires d’environ 15 – 20 %.

Le traitement thermique conduit à un taux de solubilisation plus élevé de l’ordre de 40 à 55 %.

Ainsi, de par les mécanismes d’action mis en jeu, on peut supposer que les ultrasons ont un effet sur les exopolymères de structures. En solubilisant ces polymères, ils permettent la diminution de la taille des particules et facilitent ainsi la biodégradabilité de la fraction particulaire. En revanche, le traitement thermique aurait plutôt un impact sur les cellules. La hausse de température (et de pression conjointe) entraîne une rupture des parois cellulaires et un fort relargage du matériel intracellulaire.

Pour chaque technique, l’augmentation du paramètre clé (énergie fournie, dose d’ozone transférée ou température) entraîne une légère augmentation du taux de solubilisation.

	Ultrasons	Ozonation	Thermique
Solubilisation	+	+	++
Viscosité	+	+	++
Taille des particules	diminution	o	augmentation
Filtrabilité	--	-	++
Biodégradabilité	++	o / ++ (*)	++
Mécanismes	faible solubilisation et amélioration de la biodégradabilité particulaire		forte solubilisation et peu d’effet sur la biodégradabilité particulaire rupture des cellules
Effets supposés	relargage des exopolymères	oxydation des molécules des floccs	

Comparaison des performances et des mécanismes des 3 traitements considérés

- **Solubilisation à haute pression : Procédé Carbofil®**

Il s'agit d'un procédé de lyse cellulaire appliqué sur des boues biologiques à partir de très hautes pressions. La boue solubilisée retourne ensuite dans le bassin biologique. La bibliographie actuelle ne donne pas d'information sur les performances réelles de ce système qui sont peut être liées à l'absence d'installation en vraie grandeur.

Procédés biologiques autre que le procédé MycET®

De multiples procédés existent, les plus fréquents sont présentés succinctement dans les paragraphes suivants. Parmi les procédés biologiques, on distingue les modes de traitement aérobie et anaérobie. Ce deuxième mode a déjà été détaillé par de nombreux travaux de recherche, entre autre pour son intérêt énergétique à produire du méthane. Il en ressort ainsi des avantages au niveau du coût et du faible impact environnemental, et des inconvénients d'espace au sol en raison de temps de séjour plus élevés. En milieu mésophile, la réduction des MVS est de l'ordre de 30 à 50 %.

Les performances de ces systèmes biologiques (digestion aérobie ou anaérobie) sont augmentées par l'accroissement de la température des réacteurs (conditions thermophiles).

Le choix d'une technologie doit toujours prendre en compte un certain nombre de paramètres comme : la taille de la station, les moyens mis en œuvre, la nature des boues...

- **La digestion aérobie**

Principe général

Ce processus peut être considéré comme le plus naturel et le plus simple à mettre en place. Le mécanisme recherché repose sur la réaction d'auto-oxydation de la biomasse active dans un milieu pauvre en substrat, aéré et agité. Les rendements d'élimination de la matière organique biodégradable vont donc dépendre de la part du métabolisme endogène, part importante pour des âges de boue élevés (cas des boues activées en aération prolongée) et de la faible teneur en substrat. En effet, seulement de 10 à 40 % des boues biologiques sont constitués de cellules actives. Par conséquent, la quantité de cellules actives par rapport à la quantité de substrat exogène de l'effluent influence énormément le déroulement du procédé de digestion aérobie.

Le taux de minéralisation des boues dépend principalement du temps de séjour, de la température, ainsi que de l'âge des boues introduites. Un temps de séjour de 14 à 20 jours est habituellement requis pour une stabilisation adéquate de la biomasse. Mais à des températures basses et à performances égales, le temps de séjour doit être augmenté de façon importante.

Mécanismes

Dans un milieu pauvre en substrat, on peut considérer que le catabolisme endogène prédomine sur les réactions d'anabolisme ; Ce sont généralement les réactions de minéralisation qui représentent le mieux le résultat net du processus.

Si on considère la formule chimique $C_5H_7NO_2$ représentative de la biomasse cellulaire, l'activité catabolique en condition aérobie s'exprime de façon simplifiée par l'équation suivantes:



Le tableau suivant rassemble les avantages et inconvénients du procédé.

Avantages	Inconvénients
_L'opération des digesteurs aérobies est plus simple que celle des digesteurs anaérobies, et moins de problèmes d'instabilité sont rencontrés	_Les coûts d'opération des digesteurs aérobies sont très élevés, dû à la grande demande énergétique créée par les besoins en aération
_La digestion aérobie requiert une moins grande concentration de boues affluentes que la digestion anaérobie, éliminant ainsi le besoin d'un procédé d'épaississement	_Aucune récupération énergétique n'est tirée du procédé de digestion aérobie, alors que le méthane produit par la digestion anaérobie permet d'absorber certains coûts d'opération
_Comparativement aux boues traitées en anaérobiose, une plus grande partie de la valeur fertilisante des boues aérobie est conservée, ce qui favorise leur valorisation agricole.	_La performance de la digestion aérobie est très dépendante de la température; l'efficacité du traitement varie beaucoup en fonction des saisons
_Le capital requis pour la construction des digesteurs aérobies est moins élevé que pour les réacteurs anaérobies	

Principaux avantages et inconvénients du procédé conventionnel de digestion aérobie des boues comparé au procédé conventionnel de la digestion anaérobie

Autres particularités de la digestion aérobie :

✓ Procédé anoxie-aérobie

Les coûts élevés associés à l'aération ont induit le développement de procédé de digestion aérobie (ou stabilisation) à aération intermittente. Le principe de cette méthode est l'utilisation par les bactéries aérobies des nitrates pour les besoins en oxygène (anoxie) à condition que la teneur en oxygène dissous soit nulle.

Mécanismes

En conditions anoxies, de non-aération, la stabilisation de la biomasse peut être représentée par l'équation suivante :



Pendant la phase aérobie, les activités de nitrification génèrent des nitrates qui deviennent disponibles pour la respiration endogène lorsque l'aération est arrêtée .

Performances et limites

Il a été démontré que les résultats en matière de stabilisation étaient similaires à ceux obtenus en aération continue.

De plus pour une même efficacité de stabilisation, certains avantages ont été observés par rapport au procédé conventionnel :

Avantages	Inconvénients
Les coûts énergétiques associés à l'aération sont moins élevés : jusqu'à 42% moins d'air est utilisé	Déshydratabilité des boues digérées en conditions anoxiques relativement faible à cause de la présence de grande quantité de matière colloïdale
L'alcalinité produite en conditions anoxiques permet de conserver un pH près de neutralité	
La dénitrification permet un enlèvement significatif d'azote total dans les boues allant de 20% à 35%, ce qui permet une meilleure qualité de surnageant	

Avantages et inconvénients majeurs du procédé aérobie-anoxie comparés au procédé de digestion aérobie conventionnel

✓ Procédé thermophile auto thermique

Appliqué sur la boue épaissie, cette technique répond à la même logique de dégradation des matières volatiles que la digestion aérobie mésophile. Moyennant un temps de séjour moins élevé (de quelques jours), dans une cuve portée à plus de 50°C, elle permet une réduction des MS, une stabilisation de la boue et une hygiénisation.

Un des principaux avantages de cette digestion aérobie thermophile est que ses performances sont très liées aux températures élevées. La conception des réacteurs avec isolation thermique peut permettre de limiter la consommation énergétique liée à cet apport d'énergie puisque la température des boues est indépendante de celle de l'extérieur. En fonction de l'isolation, il est possible de conserver la chaleur libérée par les réactions biologiques (Température plus importante des concentrations de boues plus élevées au départ) et ainsi d'augmenter la température des boues sans source externe de chaleur pour atteindre les conditions dites thermophiles.

Principe de l'autothermie

L'énergie libérée lors de la dégradation de la matière est en partie emmagasinée par les micro-organismes pour leur propre besoin (anabolisme, maintenance cellulaire), mais une grande partie est aussi libérée sous forme de chaleur.

L'intervalle de température s'étend approximativement de 45°C à 65°C. A ces températures, la croissance de populations spécifiques, appelées organismes thermophiles, est favorisée tout en inhibant la croissance des autres populations (psychrophiles et mésophiles). Il est bien connu que généralement la rapidité de l'activité métabolique augmente avec la température (du moins jusqu'à 60-65°C) et que par conséquent le temps de rétention nécessaires pour digérer les boues à ces températures sont moins longs. A partir de 65°C, les populations bactériennes s'autorégulent. En effet, les bactéries commencent à mourir, ce qui provoque une baisse de l'activité catabolique et donc un abaissement de la température peut s'avérer

nécessaire ce qui permet à nouveau aux bactéries de croître dans des conditions de température optimale.

Limites du procédé

Augmentation de la vitesse de digestion permet de réduire de façon importante les temps de digestion requis pour obtenir une bonne stabilisation des boues	Les boues à traiter doivent être épaissies pour permettre d'atteindre les températures thermophiles
La digestion dans l'intervalle de température thermophile permet de détruire la majorité des micro-organismes pathogènes; cet effet de pasteurisation rend les boues plus facilement valorisables	Même en l'absence de nitrification, le taux de demande en oxygène est habituellement plus élevé à cause du taux plus élevé de dégradation de la matière organique
La nitrification n'a généralement pas lieu dans le procédé thermophile, réduisant ainsi la demande totale en oxygène	
L'énergie de maintenance des fonctions vitales exigées par les micro organismes thermophiles est plus élevée, ce qui signifie que pour une même quantité de matière organique métabolisée, moins de biomasse est produite, ce qui peut contribuer à diminuer la quantité de boue	

Principaux avantages et inconvénients du procédé conventionnel de digestion aérobie thermophile auto thermique des boues comparé au procédé conventionnel de la digestion aérobie.

A titre d'exemple : Application de la stabilisation aérobie thermophile - Etude du procédé S-TE PROCESS®

Ce procédé correspond à une stabilisation aérobie thermophile appliquée sur des boues activées. Les boues recirculées à partir du clarificateur passent dans un bioréacteur placé en dérivation du bassin d'aération, comme l'indique la figure ci-dessous.

Les boues de ce bioréacteur sont chauffées naturellement à 65°C par auto thermie ou par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur qui peut être alimenté par une chaudière (OTV, 1997) placée en dérivation. La lyse cellulaire des boues activées repose sur la production d'enzymes par les bactéries thermophiles qui fonctionnent de manière optimales à 65°C. Il s'en suit une solubilisation des boues qui retournent ensuite dans le bassin d'aération pour pouvoir être digérées en milieu mésophile par les boues activées. Cette solubilisation de la matière vivante repose sur l'oxydation biologique de la matière organique, la cuve doit donc être équipée d'un agitateur et d'un système d'aération. Le principe n'est pas fondamentalement différent de celui des boues activées, aux concentrations et à la température près. Toutefois, au-dessus de 40°C, la flore impliquée n'est pas la même.

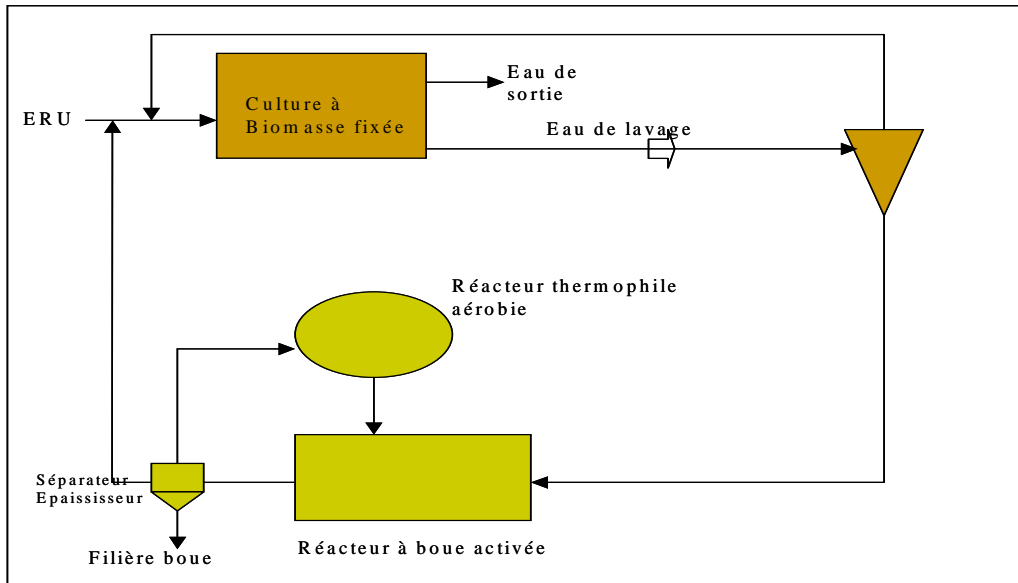


Figure 4. Schéma d'intégration du procédé S-TE Process®, dans la chaîne de traitement épuratoire (N Shiota et al)

Dimensionnement et performances sur station réelle

La mise en application du procédé au niveau d'une station d'épuration est schématisée par la figure 5 ci-dessous. Le système est équipé d'un bassin d'aération, d'un clarificateur secondaire, d'un épaisseur et du procédé S-TE Process.

Le procédé S-TE Process® c'est à dire le digesteur des boues recirculées épaissies nécessite un temps de séjour de 1 à 3 jours et une température de 65 °C.

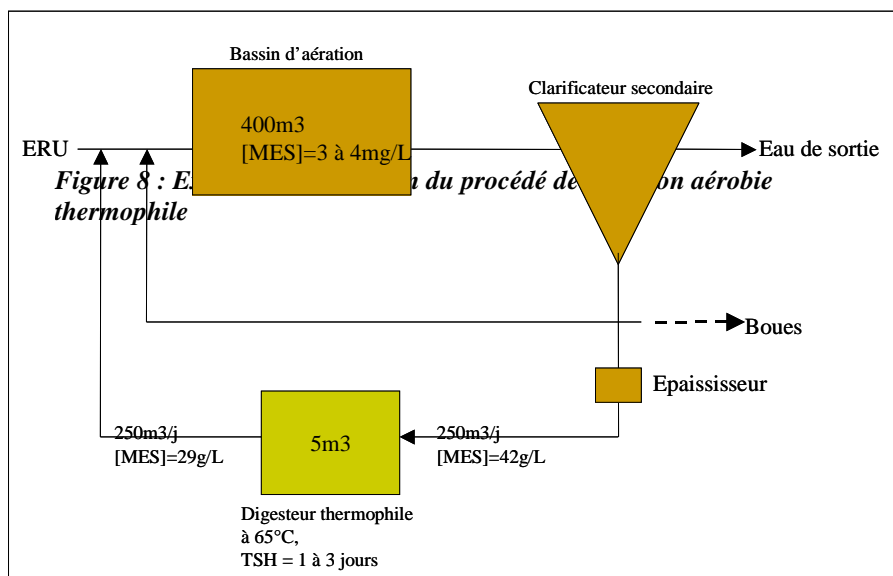


Figure 5. Mise en application du procédé S-TE Process®

L'agitation est assurée par un aérateur type aspirant qui permet de mélanger de façon homogène le réacteur. Comparé à une stabilisation aérobie conventionnelle, les temps de

séjour du procédé S-TE Process® sont divisés par deux. L'objectif recherché au niveau du taux de réduction des matières volatiles va fixer les paramètres clés de dimensionnement (temps de séjour et température) qui vont dépendre de l'activité de la flore aérobie et des caractéristiques de la boue à traiter.

Etude du procédé Biolysis® E de Dégrémont

Ce procédé est l'équivalent français du procédé Japonais S-TE Process® avec certaines différences de fonctionnement.

Le procédé a pour but de s'appliquer à une station de traitement d'eaux résiduaires par culture biologique fixée, mais le principe reste le même puisque le réacteur aérobie thermophile est placé en dérivation du bassin à boue activée. La différence réside donc au niveau de l'association des procédés biologiques de traitement qui sont

- un bassin à culture biologique fixée
- un bassin à boue activée
- et un digesteur aérobie thermophile.

Les boues issues du traitement par culture biologique fixée sont épaissies puis envoyées vers le réacteur à boue activée. En sortie de ce réacteur, une partie des boues est dirigée vers le réacteur thermophile aérobie où elles sont lysées et solubilisées avant de rejoindre le bassin à boue activée. Les boues en excès sont extraites au niveau de l'épaississeur et sont ensuite dirigées vers la filière boue. Le surnageant de l'épaississeur est renvoyé en tête de station comme le présente la figure ci-après :

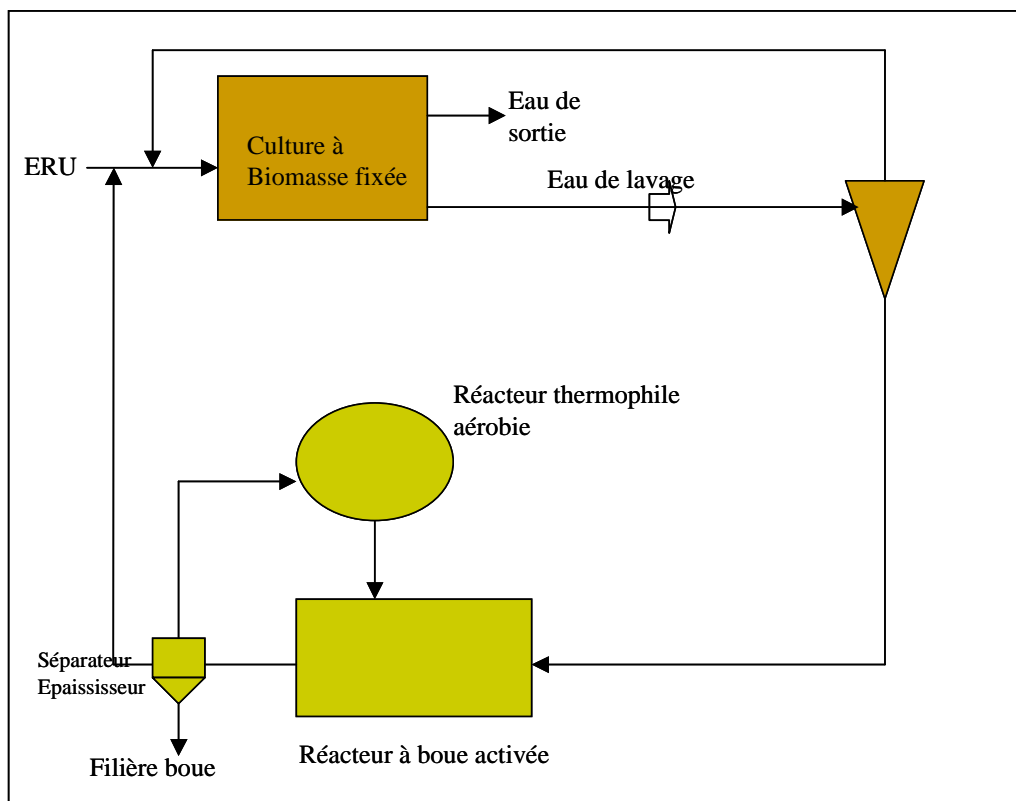


Figure 6. Intégration du procédé Biolysis® aux filières boues et eaux

Comparé au procédé S-TE Process®, le temps de séjour dans le bassin aérobie thermophile est plus court de l'ordre de 3 à 24 heures mais oblige l'implantation d'un réacteur à boue activée.

Pour des temps de séjour courts, ces procédés novateurs (S-TE process® et Biolysis E®) affichent des résultats de réductions de MS supérieur de 10 % pour S-TE Process® à 79 % pour Biolysis E® .

En conclusion, les performances des différents systèmes de réduction de boue par digestion ou stabilisation aérobie sont rassemblées dans le tableau suivant :

	Stabilisation aérobie			Prédigestion	ST-E Process	Biolysis E
	2 jours	4 jours	6 jours			
Temps de séjour	2 jours	4 jours	6 jours	16 heures	2,8 jours	3 à 36h
Température	60 °C	60°C	55°C	65°C	65°C	[50;80]
Réduction des MV(%)	[16;25]	[34;38]	[36;40]	[6;7]	X	X
Réduction des MS(%)	[11;14]	[22;24]	[23;25]	[4;5]	31	90

- **La digestion anaérobie des boues.**

Parmi les différentes techniques de stabilisation, la digestion anaérobie (ou méthanisation) est aussi une technique de réduction de boue intéressante. Cette technique utilisée depuis plusieurs décennies, est connue et maîtrisée et fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt vis pour sa récupération d'énergie et pour son taux de réduction de boues.

La digestion anaérobie thermophile permet de :

- réduire la masse de boue, en dégradant une partie des MV(et donc des MS) ;
- stabiliser la boue, sous réserve de respecter un temps de séjour suffisant dans le réacteur ;
- et d'hygiéniser partiellement la boue, en plaçant les espèces pathogènes dans un environnement peu propice à leur survie.

Principe de fonctionnement et mécanismes de la digestion anaérobie

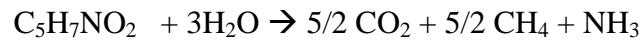
Les micro-organismes anaérobies utilisent la pollution organique (matières organiques particulaires non traitées lors du traitement aérobie de la file eau et bactéries épuratrices aérobies du bassin d'aération) comme substrat pour produire du gaz. Pour être contrôlée, cette gazéification s'opère donc nécessairement dans un réacteur confiné à une température d'environ 35°C (condition mésophile) ou plus (condition thermophile).

Il s'agit d'une fermentation sous condition anaérobie stricte. La matière organique dissoute et particulaire subissent les réactions biologiques suivantes :

- l'hydrolyse des macromolécules en composés simples par des enzymes spécifiques. Dans la pratique, l'hydrolyse est l'étape limitante.
- l'acidogénèse à partir des composés simples par une flore acidogène ;
- la gazéification en deux étapes : acétogénèse et la méthanogénèse essentiellement sous forme de CO₂ et CH₄ par une flore méthanogène. Cette étape est la plus lente et donc en théorie l'étape limitante du procédé.

Pour mener à bien une digestion, il est nécessaire d'avoir des vitesses de réactions équilibrées pour ne pas inhiber une des étapes. A ce titre, la phase acide doit en aucun cas être prédominante (augmentation des AGV et diminution du pH) car elle inhiberait la phase méthanogène. Il est donc nécessaire de garantir l'équilibre en maintenant le pH, le TAC et les AGV dans une gamme de valeurs précises.

La réaction globale qui est reconnue comme représentative du procédé est la suivante :



avec les étapes suivantes:

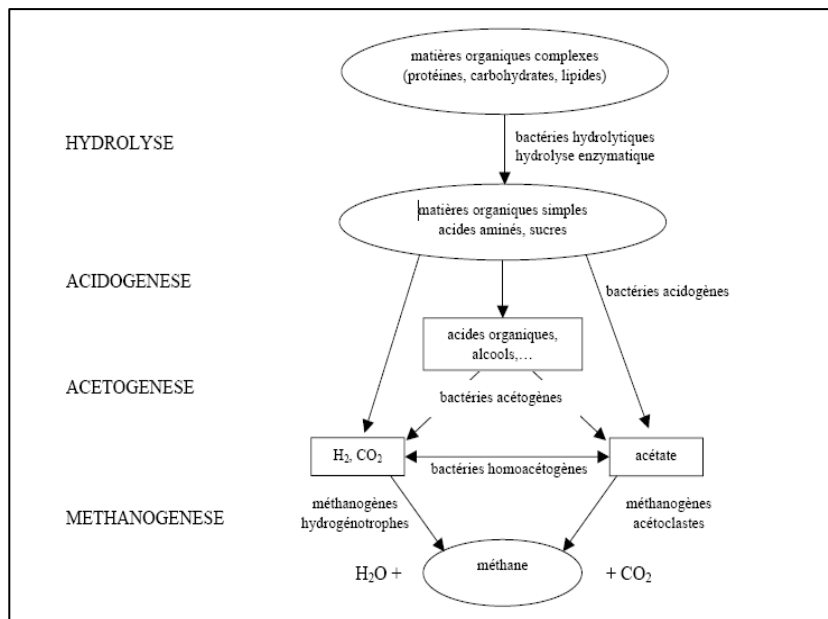


Figure 7. Les différentes étapes de la digestion anaérobie

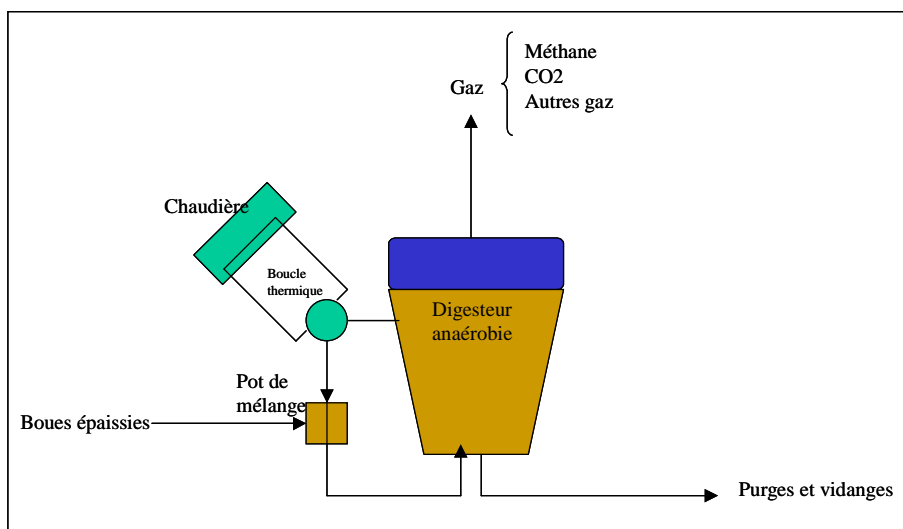


Figure 8. Schéma de principe de la digestion anaérobie

La mise en place du procédé mésophile, qui est le plus couramment utilisé, fait intervenir des concentrations assez élevées de la boue à l'entrée du digesteur. Un pré épaissement est donc indispensable.

Les autres paramètres sont résumés dans le tableau suivant. Les contraintes essentielles à maintenir sont les conditions de température et de pH, car les bactéries spécifiques sont sensibles aux variations de ces paramètres.

Paramètres physico-chimiques		Paramètres opératoires	
concentration en MS de la boue en entrée en g/L	30 à 80	température en °C	30 à 37
teneur en MV en %	60 à 80		
pH	6,6 à 7,5	TSH en jours	20
AGV mgCH ₃ COOH/L	100 à 500		
TAC en mgCACO ₃ /L	1500 à 6500		
AGV/TAC	< 0,25		

Principaux paramètres de fonctionnement d'un digesteur anaérobie mésophile

Performances

La digestion anaérobie permet une réduction de la matière sèche d'environ 50 % (tableau suivant) et la production d'un biogaz, composé principalement de méthane (55 à 70 %) et de dioxyde de carbone (25 à 40 %).

Dans le même temps, les micro-organismes anaérobies consomment peu d'énergie, ce qui entraîne une production de boues limitée (3 à 20 fois inférieure à un traitement aérobie). En effet, les micro-organismes anaérobies n'utilisent environ que 10 à 15% de l'énergie du substrat pour leur croissance, le reste étant utilisé pour la production du biogaz. Enfin, la digestion anaérobie permet une réduction des microorganismes pathogènes.

Pour atteindre cet objectif, il est possible d'utiliser des traitements physico-chimiques ou biologiques de lyse cellulaire. En effet, la réduction de la taille des particules permet d'augmenter la biodégradation dont dépend la production de gaz et de boues résiduelles. La réduction de la taille des particules agirait aussi sur la diminution du temps de digestion. Ainsi, il serait possible d'atteindre les mêmes performances de digestion avec des débits plus élevés ou des digesteurs plus petits.

Paramètres de performances	Boues primaires	Boues mixtes
Réduction des MVS (en %)	50 à 55	45 à 50
Volume de gaz produit (en Nm ³ /kg MV détruit)	0.85 à 1.2	0.75 à 1

Performances de la digestion anaérobie, selon le type de boue)

Avantages et inconvénients de la digestion anaérobie

Les avantages de la digestion anaérobie des boues sont :

- une réduction de la matière sèche des boues de l'ordre de 50 % (OTV, 1997)
- une production d'un gaz valorisable sous forme d'énergie (chauffage, cogénération, Électricité)
- une réduction du nombre de micro-organismes pathogènes
- un intérêt agronomique lié à une concentration importante en azote ammoniacal (NH_4^+) et en phosphates (PO_4^{3-}) due à la lyse de la matière organique
- une possibilité de biodégrader certains composés xénobiotiques, c'est à dire les substances possédant des propriétés toxiques, même à très faible concentration (exemple des pesticides)
- une demande en énergie plus faible que les procédés aérobies et sans apport en oxygène.

Cependant, elle comporte aussi quelques inconvénients :

- une forte sensibilité aux variations de charges organiques et aux composés toxiques
- une dégradation plus lente que pour les procédés aérobies
- une absence de traitement de l'azote (le flux d'azote des retours en tête de station est à considérer dans le dimensionnement)
- un démarrage des installations lent
- des coûts d'investissement importants
- une chute du pouvoir calorifique des boues (à considérer si les boues sont incinérées).

✓ Autre procédé : La prédation

Dans le cadre du projet WIRES 2007, des chercheurs ont développé un procédé qui favorise le développement des organismes proto et métazoaires, prédateurs naturels des bactéries.

Principe de fonctionnement

Le principe repose sur l'installation d'un chémostat équivalent à un bioréacteur placé en amont du bassin d'aération. Le chémostat, aéré et agité, reçoit uniquement les eaux usées brutes dont 30 % sont by passée dans le bassin d'aération. La recirculation des boues du clarificateur située en amont du bassin d'aération se fait en aval du chémostat. Il permet la croissance des bactéries qui se fait de manière dispersée, sans phénomène de floculation. Cet état dispersé des bactéries favorise la prédation des organismes proto et métazoaires.

Performances

L'expérience menée sur des eaux brutes a permis une réduction de 23 % des MES, de 24 % des MVS et de 13 % des matières minérales en suspension.

Parmi les nombreux systèmes de réduction de la masse de boue, un autre procédé appelé le procédé MycET® commercialisé par Stereau a été implanté récemment sur différentes installations françaises de capacité nominale de traitement relativement importante (de 20 000 à 215 000 EH). Son principe et les résultats obtenus sont abordés dans le chapitre suivant.

4 - Le Procédé MycET®

Le procédé MycET® est basé sur l'utilisation d'un cocktail de champignons microscopiques, appelé aussi mycètes, pour réaliser une réduction de la masse de boues en excès de la station d'épuration. Implanté en tête de la filière de traitement des boues, il est installé le plus souvent sur des stations de type boue activée et alimenté par les boues en excès issues du poste recirculation compte tenu de sa concentration plus élevée.

Principe et description du procédé de réduction de boue

La mise en œuvre du procédé MycET® a été développée par Berthon J.Y. et Grizard D. de la société Biovitis et a ensuite été brevetée (INPI 0202947) par la SAUR. Il s'agit d'un procédé de dégradation des molécules organiques par des champignons en culture libre et en présence d'oxygène. Les organismes présents sont des micro-organismes mycéliens mésophiles et thermophiles mais aussi des bactéries, levures, protozoaires et amibes, de manière à ce que l'association est un effet synergique du point de vue de la dégradation des boues.

Les champignons synthétisent des enzymes en quantité importante qui dégradent la matière organique morte et vivante (organismes saprophytes), leur permettant de faire fonctionner leur métabolisme en produisant des spores et du CO₂. En effet, les mycètes sont des êtres eucaryotes, hétérotrophes vis à vis du carbone et ils ne peuvent absorber que les petites molécules organiques dissoutes. Ils produisent donc des enzymes extracellulaires qui dégradent les grosses molécules, captées physiquement au préalable par adsorption sur la biomasse.

La mise en place du procédé suit une méthodologie adaptée en quatre étapes :

- Caractérisation chimique précise de l'effluent,
- Sélection des souches de champignons pour permettre le maintien d'une population viable dans les effluents et le réacteur biologique,
- Ensemencement du milieu par un inoculum fongique comprenant la ou les souches de champignons préalablement sélectionnées,
- Bio-digestion de la matière organique par les champignons en culture libre et en présence d'oxygène.

La filière (voir schéma ci-après) s'intègre dans la filière boue, au niveau de la boucle de recirculation, en dérivation entre le clarificateur et le bassin d'aération et est ainsi composée :

- d'un réacteur spécifique appelé par le constructeur « réacteur de contact aérobie » ou « cuve de digestion mycélienne », ensemencé régulièrement par un cocktail de champignons sélectionnés. La fréquence d'ensemencement est de l'ordre du temps de séjours de la biomasse dans ce réacteur (équivalent à l'âge de la boue dans ce bassin, soit de l'ordre de 20 jours). Ce réacteur, agité et aéré en continu est alimenté avec les boues en excès de la station d'épuration. L'agitation permet d'améliorer les transferts de matières (substrat/biomasse) ainsi que le transfert d'oxygène au sein du réacteur. La concentration en boue ne doit pas excéder 30 g de MES / l, compromis pour maintenir un

minimum de transfert d'O₂ dans le bassin et obtenir un réacteur compact tout en respectant le temps de séjour de la boue dans l'ouvrage.

- D'un bio-réacteur qui permet le développement des souches mère et de réaliser ainsi un apport de souches mycéliennes à une fréquence donnée dans le réacteur de contact aérobie. Ce bio-réacteur est composé :
 - o D'un réservoir dans lequel se trouve la solution enrichie en mycètes qui sera injectée ensuite dans le bassin de contact aérobie. Le substrat carboné apporté pour la croissance des souches mycéliennes est une solution composée de mélasse diluée par de l'eau traitée ;
 - o D'un garnissage lamellaire alvéolé, ou lit de ruissellement, situé au-dessus du réservoir et permettant le développement des espèces mycéliennes. La surface du support est aspergée en continu par recirculation de la solution du réservoir. Ce passage de la solution sur les lamelles a principalement pour but de favoriser les transferts (matières et oxygène) ente les phases biotiques et abiotiques ;
 - o D'un système de ventilation pour l'apport d'O₂ fonctionnant en continu et protégé par un filtre afin d'éviter la pollution du bioréacteur par des bactéries présentes dans l'air environnant ;
 - o D'un système d'alimentation en mélasse (cuve et pompe).

- Des extractions de boues du réacteur MycET ont lieu journalièrement vers le poste de déshydratation des boues. Le volume de boues extrait permet ainsi l'alimentation concomitante du réacteur en boues en excès de la file de traitement des eaux préalablement épaissies ou non suivant la concentration en MES du bassin recherchée.

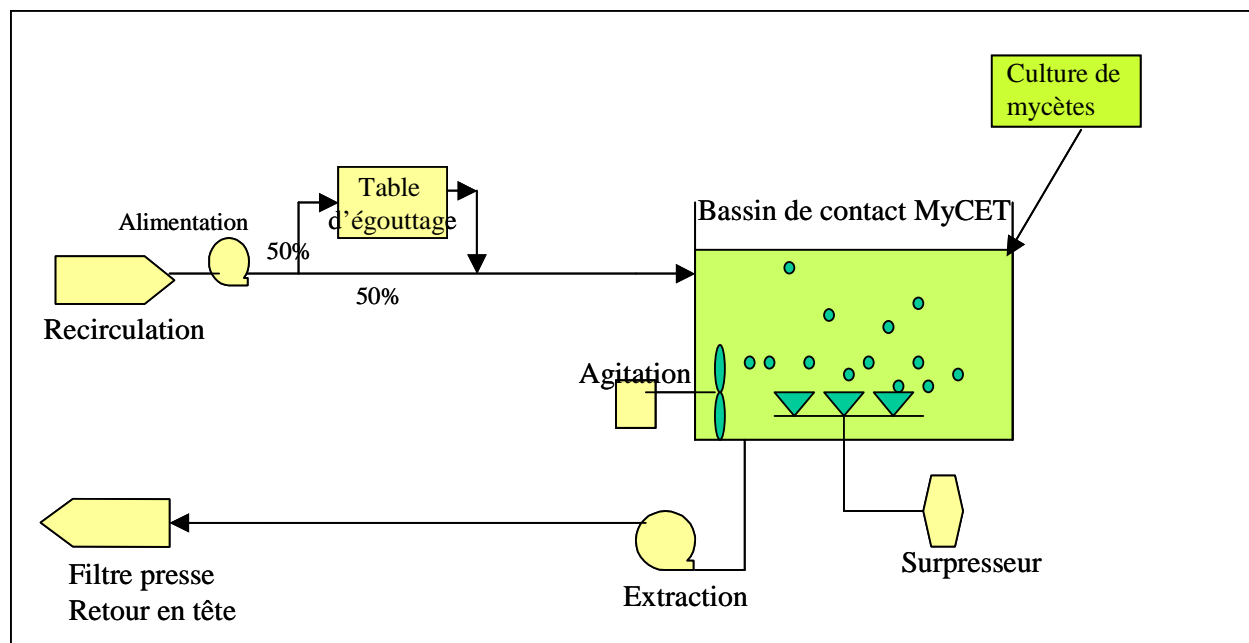


Figure 9. Schéma d'intégration du procédé MycET® dans la filière boue, sur la boucle de recirculation

Le taux de croissance optimal des espèces mycéliennes est de l'ordre de 0.05 j⁻¹ ce qui induit de maintenir un temps de séjour des boues de l'ordre de 20 jours (= 1/0,05) pour garder la population dans le réacteur de contact. De plus, les paramètres influençant le bon

Les deux principales formules utilisées sont les suivantes:

Temps de séjour = ([MES] bassin x Volume du bassin) / Volume d'extraction journalier.

Temps de séjour = [MES] apportée / Cv appliquée

- Les besoins en oxygène : La quantité d'oxygène est liée aux besoins du métabolisme mycélien, à la dégradation du carbone et au traitement de l'azote (une faible valeur en N-NH₄⁺ révèle une aération suffisante). Les concentrations recherchées en O₂ dans le réacteur sont de l'ordre de 0,5 mg/l (variant de 0,1 à 1mg/l).
- Le volume du bioréacteur, dimensionné pour des injections d'inoculum toutes les trois semaines dans le bassin de contact (en raison de l'âge de boue dans ce réacteur), doit représenter environ 1/500ème du volume du réacteur Mycet.

Qualité de la boue obtenue après le traitement Mycet

Composés azotés

Dans le réacteur de contact, l'azote est éliminé dans les mêmes proportions que le carbone soit un rapport C (DBO₅) /N (N-NH₄⁺) de 100/5, valeur inchangée.

L'azote organique, contenu dans la boue dégradée, est libéré, ammonifié, puis éliminé par nitrification-dénitrification simultanées. La dénitrification est favorisée par la forte concentration des boues associée à des faibles teneurs en O₂ dans le réacteur. Les retours en têtes de station suite à la déshydratation des boues résiduelles sont exempts d'ammonium et la quasi-totalité des nitrates formés est éliminée dans le réacteur.

Phosphore

Le procédé étant aérobic strict, le phosphore sur-accumulé lors d'une déphosphatation biologique sur la file eau n'est pas relargué en raison de l'absence de zone anaérobie. En revanche, le contenu de la matière organique (biomasse déphosphatante ou non) dégradée par les mycètes va se retrouver en phase liquide et sera ensuite renvoyé en tête de station par les retours de la filière de déshydratation.

Suivant la filière de traitement de l'eau, le devenir de ce phosphore sera différent :

- Cas d'une déphosphatation biologique pure : le phosphore relargué correspond à la quantité de matière organique dégradée sur la file boue. Le phosphore ainsi libéré représente le phosphore constitutif de la biomasse réduite et sera renvoyé dans la file eau. Son traitement sera fonction des possibilités de la biomasse déphosphatante.

- Cas d'une déphosphatation physico-chimique ou mixte : le phosphore libéré lors de l'étape de réduction de boue se recomplexe avec les hydroxydes de fer présents dans la boue ou apportés. Le précipité formé s'accumule dans la filière boue résiduelle. Il faudra dans le cas d'une valorisation agricole, vérifier que le phosphore n'est pas un paramètre limitant (Barillon et al).

Métaux et hydrocarbures

Les métaux se retrouvent plus concentrés dans les boues, à une hauteur de 30% de plus, en raison d'une réduction de boue de cet ordre.

Rhéologie

La qualité des boues résiduelles est fonction de la nature de l'effluent et de la nature des microorganismes utilisés. Avec l'utilisation de MycET®, les auteurs de ce procédé évoquent que les boues ressortent moins hydrophiles, moins élastiques et moins visqueuses par destruction du réseau protéique. Des tests de filtrabilité sous pression ont permis, par ailleurs, de mettre en évidence des temps de filtration divisés par 3 par rapport à la boue en entrée de bassin.

Performances annoncées

Les performances annoncées du procédé sont fonction du taux de MVS (part de matières organiques) des boues à traiter. Ce taux dépend de nombreux facteurs, comme du type de filière retenue, de son dimensionnement, de ses paramètres de fonctionnement et de la composition des eaux à traiter. On retiendra, pour les différents domaines de charge de la filière boue activée, les taux de MVS suivants:

Cas des stations traitant des eaux usées urbaines en réseau séparatif et en l'absence de déphosphatation physico-chimique.

Domaine de charge de la boue activée	Aération prolongée	Faible charge	Moyenne charge	Forte charge
Teneur en MVS des boues	65 %	70 %	75 %	80 %

Les rendements annoncés sont regroupés ci-après :

Teneur en MVS des boues à traiter	50 – 55%	75 – 80%
Rendement annoncés sur les MES	15 à 20%	30 à 35%
Soit Rendement sur les MVS de l'ordre de	25%	40%

Une réduction de 30% sur les MES des boues à traiter est ainsi avancée, soit un rendement de l'ordre de 35% sur les MVS pour des boues activées à taux de MVS élevé (Moyenne charge).

Les performances du procédé garanties par le constructeur pour les différentes charges massiques de fonctionnement de la boue activée amont, sont présentées dans le tableau suivant.

Cm	Rendement attendu sur les MES
0.05 à 0.06 kg DBO ₅ /kg MVS.j	20%
0.06 à 0.07 kg DBO ₅ /kg MVS.j	22%
0.07 à 0.08 kg DBO ₅ /kg MVS.j	24%
0.1 à 0.12 kg DBO ₅ /kg MVS.j	25% à 30%

Au-delà de cette charge massique, d'autres filières de réduction de boues seront privilégiées comme par exemple les procédés anaérobies de traitement.

Dimensionnement et paramètres de fonctionnement retenus

Les boues à traiter peuvent être issues de différentes filières de traitement, mais les installations équipées de ce procédé sont des boues activées faible charge / aération prolongée, avec un taux de MVS de l'ordre de 65 à 70 %.

Le temps de séjour des boues dans le réacteur de contact aérobie doit être de l'ordre de 20 jours pour le maintien optimal de la population de champignons.

La concentration en MES est fixée à une fourchette de 20 à 25 g/l pour une bonne optimisation énergétique du procédé.

La Charge volumique appliquée au réacteur est de l'ordre de 1.5 à 2 kg de MES /m³ de réacteur.jour (données maximales).

Afin d'obtenir ces valeurs,

- la concentration moyenne des boues à traiter doit être de l'ordre de 30 g MES /l (1.5 kg de MES /m³ de réacteur.jour x 20 jours)

- la concentration moyenne des boues dans le réacteur doit être de l'ordre de 21 g MES /l compte tenu du rendement escompté de 30% (30 g MES /l x 70%).

Au sein du réacteur, la respiration endogène est prise en compte pour 0.025 à 0.035 kg d'O₂ /kg de MVS.j.

Commentaires et limites du système :

Pour tous les procédés biologiques, le maintien de la biomasse (dans notre cas, les champignons) nécessite de maintenir un âge de boue moyen de l'ordre de 20 jours (en lien avec le taux de croissance) afin d'éviter de lessiver la quantité de biomasse active nécessaire au traitement. Cet âge de boue est dépendant de la température du réacteur qui va intervenir sur son taux de croissance.

La concentration dans le réacteur est un compromis entre la compacité de l'ouvrage (réacteur plus compact pour des concentrations élevées en MES) et les rendements

d'oxygénation du système (transfert en oxygène pénalisé pour des fortes concentrations en MES et pour des bassins d'immersion élevée). Le bon compromis se situe autour de 25 g MES /l.

A titre d'exemple, le tableau suivant présente, pour différentes concentrations dans le réacteur, les conséquences sur les charges volumiques appliquées.

[MES] réacteur	30 g/l	25 g/l	30 g/l
Rendement escompté sur les MES	30%	30%	25%
D'où [MES] entrée	43 g/l (30 g/l et 70 %)	35 g/l	40 g/l
Cv* appliquée en MES	2,1 kg de MES/ m ³ de réacteur. j	1,7 kg de MES/ m ³ de réacteur. j	2,0 kg de MES/ m ³ de réacteur. j
Synthèse	1,5 à 2 kg de MES / m ³ de réacteur. j		

* Charge volumique = [MES] d'entrée dans le réacteur / temps de séjour

Le dimensionnement et le fonctionnement optimal se situe aux valeurs suivantes :

Sur la base d'un rendement de l'ordre de 30 % pour des boues à 75 % de MVS, les MES d'entrée du réacteur devront être de l'ordre de 35 g/l (soit une concentration en MES dans le réacteur de 25 g/l) ce qui occasionne une charge volumique de 1,7 kg de MES/ m³ de réacteur. J.

Autres points de conception :

- l'obtention d'une concentration d'entrée des boues de l'ordre de 35 g MES /l nécessite une étape préalable d'épaississement des boues recirculées. Elle est réalisée généralement à l'amont par épaissement dynamique (tambour ou grille d'égouttage) ou par filtration sur membranes pour le système MycET+.
- Le volume du réacteur est obtenu à partir du flux de MES à traiter et de la charge volumique retenue (proche de 1,7 kg de MES/ m³ de réacteur. j).
- Le réacteur de contact aérobie estensemencé à son démarrage avec des souches de champignons préalablement sélectionnées. Le volume apporté correspond à 2 % du volume total du réacteur.
- Toutes les trois semaines, la solution mère de champignons produite sur place est ré-injectée sur la base d'un apport de l'ordre de 1 à 1,5 l d'inoculum par m³ de réacteur, ce qui représente 0,15 % du volume total du réacteur de contact aérobie.
- Un bio-réacteur est aussi prévu pour produire sur place la solution mère de champignons. Ce réacteur doit disposer d'un volume qui correspond à 0,2 % du réacteur de contact aérobie.

Références nationales

Au moment de cette étude, en 2010, huit stations d'épuration françaises étaient équipées du procédé MycET®.

Sites	Capacité(EH)	Date de mise en route du réacteur Mycet	Remarques
Ouistreham (14)	15 000	2003	MycET+
Nîmes (30)	230 000	2008	
Brive (19)	215 000	2007	
La Baule / Guérande / Livéry (44)	178 000	2007	
Genlis (21)	15 000	2008	MycET+
Bannalec (29)	5 000	?	
Luxeuil les Bains (70)	20 000	?	MycET+
Coutances (50)	10 000	?	

Résultats obtenus

Afin de mesurer les performances de ce nouveau procédé et d'obtenir un premier retour d'expérience, un suivi poussé de ce système a été retenu.

Compte tenu de la difficulté de trouver des sites avec un fonctionnement stable aussi bien sur la file eau que la file boue et la possibilité de se rapprocher des valeurs nominales, le choix de réaliser le suivi d'un seul site a été arrêté. Les installations existantes ayant toutes un fonctionnement spécifique, la généralisation des résultats obtenus sur le procédé était de toute façon difficile.

En accord avec le constructeur, le site de mesure équipé du procédé MycET® retenu a été la station d'épuration de la communauté d'agglomération de Brive la Gaillarde (19), dimensionnée pour traiter la pollution de 215 000 équivalents habitant et exploitée par la SAUR.

Présentation de la station d'épuration de Brive la Gaillarde

Présentation générale

Le dimensionnement de cette station d'épuration doit permettre de traiter les charges suivantes :

Flux de DBO₅ : 12 870 kg/j

Flux de DCO : 26 310 kg/j

Flux de MES : 19 450 kg/j Pour un volume journalier à traiter de : 41 100 m³/j

Les niveaux de rejet demandés sont les suivants :

Paramètres	DBO ₅	DCO	MES	NK*	N-NO ³ *	PT*
Concentration en mg/l	20	100	25	15	7	2.5

* : en moyenne annuelle

Pour traiter ces charges et respecter les niveaux de rejet, la « file eau » de l'installation est constituée des étapes suivantes :

- Relevage
- Prétraitements en 2 files parallèles
- Dégrillage fin – 2 appareils équipés de compacteur
- Dessableur-dégraisseur – 2 ouvrages avec laveur et classificateur des sables

Avec,

- 1 poste de réception et de traitement des produits de curage
- 1 poste de réception, stockage et traitement biologique des graisses (2 lipocycles)
- 1 poste de réception et stockage des Matières de vidange

Traitement biologique en 2 files parallèles

- Déphosphatation physico-chimique (FeCl₃)
- Zone de contact
- Bassin d'anaérobie
- Bassin d'aération avec aération fines bulles séquencée et agitateurs
- Dégazeur-répartiteur
- 3 clarificateurs

La « file boue » de l'installation est constituée des étapes suivantes :

- Extraction au niveau de la recirculation des boues

Avec une fosse de dépotage de boues extérieures

- 2 Tambours épaisseur
- Procédé MycET®
- 2 lignes de filtres à plateaux
- 1 sécheur

Evacuation des boues séchées ou non directement en épandage agricole ou via une filière de compostage

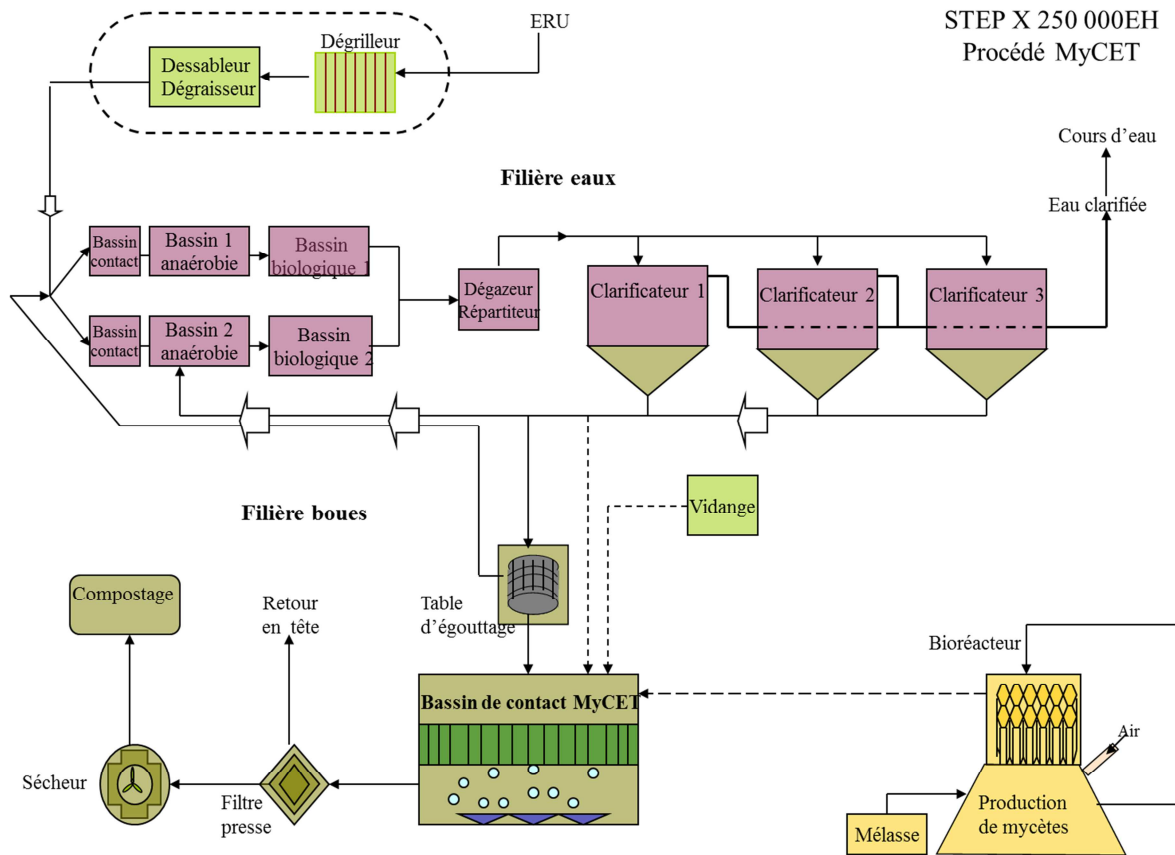


Figure 13.: Schéma général e l'installation

Sur la charge traitée de dimensionnement et hors boues extérieures, la quantité de boue produite est de l'ordre de :

Kg de MES /j : 14079 kg MES/j (dont 1091 kg de boues de déphosphatation)

Concentration en MES des boue recirculées : 8.5 g/l

Taux de MVS : 72%

Le procédé MycET®

- Conception

Il est intégré en tête de la filière boue et composé des deux parties suivantes :

- le réacteur de contact aérobie

Il est composé d'un bassin circulaire d'un volume de 5089 m^3 ($S= 1018 \text{ m}^2$, $H \text{ maxi} = 5 \text{ m}$) en raison de la charge volumique retenue de $1,56 \text{ kg de MS /m}^3 \text{ de réacteur. J.}$

Ce bassin est équipé d'un système continu d'aération / brassage par l'intermédiaire de 3 mélangeurs aérateurs submersibles OKI de 29 kWh unitaire (soit une PSB de 17.1 Wh/m^3) reliés à 2 surpresseurs.

Ce bassin est instrumenté de différent de capteurs :

- une mesure de hauteur de boue,
- une mesure d' O_2 dissous,
- une mesure de concentration en MES,
- une mesure du pH et de la Température des boues du bassin.

- le bioréacteur

Bassin de volume de 10 m³ équipé de lamelles en surface pour cultiver le cocktail mycélien sur support aéré.

Cocktail de champignons complété par de la Mélasse (nutriments) diluée avec de l'eau industrielle.

Recirculation interne et continue du mélange (2 pompes de 40 m³/h)

Ventilation continue de l'ouvrage (1500 m³/h)

A la mise en route de la station d'épuration, le réacteur de contact est ensemencé lors de son démarrage initial par un cocktail pur de champignons correspondant à 2% de son volume, soit 100 m³ de cocktail.

Par la suite, en fonctionnement de routine, il est régulièrement réensemencé toutes les 3 semaines par 7 m³ de culture de champignons en provenance du bioréacteur (soit 1.4 % de son volume).

- Fonctionnement

Des boues du réacteur de contact aérobies sont extraites par bâchées et dirigées vers la déshydratation (2 ouvrages de maturation suivis de 2 files parallèles de filtre à plateaux). Le volume de boues du bassin diminue et permet ainsi son alimentation par des boues de recirculation. Suivant la concentration des boues recherchée dans le réacteur, celles-ci alimentent directement le bassin de contact (circuit appelé by-pass par le constructeur) ou elles sont épaissies après apport de polymère sur 2 tambours épaississeurs installés en parallèle.

Les jus de tambours, constitués d'eau interstitielle et d'eau de lavage des appareils (eau industrielle), retournent en tête de l'installation par le biais du poste toutes eaux.

Le pilotage du procédé est ainsi réalisé automatiquement sur des consignes d'une concentration en MES recherchée et d'une hauteur de boue maximale dans le bassin. Les boues d'alimentation sont épaissies ou non suivant la concentration en MES mesurée et le volume de boue dans le bassin.

Les extractions des boues du bassin vers la déshydratation sont effectuées en journée, durant la présence du personnel d'exploitation. Ces extractions ne sont pas réalisées les week-end et jours fériés.

L'aération est asservie à une consigne en O₂ dissous, le brassage par les OKI étant continu.

- Dimensionnement et paramètres de fonctionnement à capacité nominale

Le dimensionnement du réacteur de contact aérobies, à capacité nominale de l'installation, est synthétisé dans le tableau suivant :

	Quantité de boue à traiter En Kg/j	Charge volumique En Kg/m ³ réacteur.j	Temps de séjour En jour	Rendement prévu En %	Concentration dans le réacteur En g/l	Concentration des boues en entrée du réacteur En g/l
En MS	7820	1.56	23	30%	25	35.8
En MES*	7351	1.47			23.5	33.6

* avec le ratio moyen MES/MS = 0.94

Les principaux paramètres de fonctionnement du réacteur de contact aérobie, sont les suivants :

- Aération continue pour obtenir entre 0.1 et 1 mg d'O₂ dissous /l, avec pour consigne une valeur moyenne de 0.5 mg d'O₂ /l
- Une concentration en MES dans le réacteur de 22 à 25 g MES /l, correspondant à un compromis entre le transfert d'oxygène et la compacité du procédé
- Un pH et une température non réglés, mais suivis en tant qu'indicateurs de fonctionnement du process, avec comme objectif un pH moyen à 6.5 (fourchette comprise entre 6 et 7) et une température comprise entre 10 et 35°C.

De plus, de faibles concentrations en DCO filtrée et N-NH₄⁺ au sein du réacteur de contact aérobie sont également suivies comme indicateurs de bon fonctionnement du procédé MycET®.

Matériel et Méthode

- Durée et Précautions prises :

Le procédé MycET® de réduction de boue nécessite de fonctionner avec un temps de séjour de l'ordre de 20 jours, la durée du suivi en continu du procédé devait être d'au moins deux fois le temps de séjour. Afin de se situer dans des conditions optimales de fonctionnement, un ré-ensemencement du réacteur de contact aérobie à partir du bioréacteur est effectué juste avant nos mesures puis ensuite toutes les 3 semaines.

- Déroulement des mesures

Le suivi continu est réalisé par une succession de prélèvements 24 h, entrecoupés de périodes de prélèvements cumulés sur 5 à 6 jours sur toute la période de l'étude.

- Points de prélèvements et mesures de débits

Trois points de mesure sont instrumentés en doublon (sécurité supplémentaire) pour effectuer des prélèvements continus par pompage et proportionnels aux débits. Les points de mesures sont les suivants :

- Point d'extraction des boues de recirculation qui alimentent le réacteur Mycet,
- Jus de retours des tambours épaisseurs renvoyés en tête de station,
- Extractions des boues du réacteur de contact vers la déshydratation.

Parallèlement, des prélèvements manuels sont aussi effectués lors de chaque suivi poussé de 24 heures afin de les croiser avec les résultats analytiques obtenus par prélèvements automatiques. Ils sont réalisés sur les mêmes points de mesures.

Les mesures de débit de la station sont vérifiées soit par la mise en place d'un canal de mesure supplémentaire soit par empotement.

- Données STEP

En parallèle à notre étude, les données de suivi du fonctionnement de l'installation (paramètres enregistrés en continu sur le site et synthétisés au niveau des bilans journaliers et mensuels : Débits, temps de fonctionnement des organes moteurs, compteurs électriques) ont été analysées, comparées avec nos mesures et traitées.

Durant la période de suivi, pour ne pas fausser les mesures, l'exploitant a interdit tout dépotage de boues extérieures à la station afin de maintenir une charge de boue à traiter la plus constante sur le réacteur Mycet.

- Calage préalable à l'étude par l'exploitant / paramètres de fonctionnement

Pour notre suivi, l'installation est calée, en accord avec le constructeur, sur les valeurs de fonctionnement suivantes :

Flux de MES à traiter par jour : 6000 kg MES/j

Volume de réacteur : 5089 m³

Soit une Cv appliquée de 1.2 kg MES/m³ de réacteur.jour (entre 1 à 1.4)

Temps de séjour de la boue : 20 jours

[MES] à l'entrée : 1.2 x 20j = 24 g/l

Rendement escompté : 25 % sur les MES

[MES] dans le réacteur : 24 x (1 - 0.25) = 18 g MES/l

Pour le calcul du rendement sur les MES, la formule retenue est la suivante :

Rendement d'élimination des MES = (Flux entrants en MES – flux sortants en MES – flux en MES accumulés ou déstockés dans le réacteur) / Flux en MES entrants.

Les différents flux sont obtenus à partir d'un bon bilan hydraulique ainsi que d'un échantillonnage correct pour la mesure des MES.

Un bilan hydraulique a donc été réalisé afin d'obtenir sur la période considérée les volumes nécessaires au calcul des différents flux mis en jeu :

Les volumes entrant sur le réacteur Mycet sont composés des volumes d'extraction des boues au niveau du poste Recirculation des boues + l'Eau Industrielle pour le lavage des tambours + le Polymère ajouté pour la phase d'épaississement sur les tambours + l'Ensemencement du réacteur à partir du bioréacteur + la Pluviométrie.

Les volumes sortants sont composés des extractions vers la déshydratation Filtre presse + la part liée à l'évaporation + les retours liés aux jus de tambours épaisseur.

Les volumes accumulés ou déstockés sont obtenues à partir de la différence des flux de MES aux 2 extrêmes de l'étude (début et fin de l'étude). Ce flux est obtenu après homogénéisation du réacteur par la mesure de son volume et de sa concentration.

Afin de lever les incertitudes sur le bilan hydraulique, un « bilan masse » sur les chlorures est réalisé. Ce composé est un bon traceur puisqu'il n'est pas utilisé par la biomasse et ne se fixe pas sur le particulaire. Ce bilan permettra de vérifier notre bilan hydraulique.

Résultats obtenus

Performances du procédé MycET[®]

Les résultats obtenus sur les 43 jours de suivi du procédé MycET[®], permettent de calculer les performances du système en termes de réduction de boues.

Les différents flux obtenus sur les 43 jours de suivi, soit 2 temps de séjour, sont les suivants :

	Entrée réacteur	Sortie réacteur vers la déshydratation	Delta bassin	bilan
En Tonnes MES	+ 225,4	- 185,3	+ 1,48	- 41,6
En Tonnes MVS	+ 119,2	- 87,6	+ 1,48	- 33,1
En Tonnes MS	+ 227,4	- 192,3	+ 1,64	- 36,8
En Tonnes MV	+ 115,6	- 89,5	+ 2,33	- 28,4

Ces résultats permettent de calculer les performances de réduction de boue suivant les différents paramètres considérés :

	En MES	En MVS	En MS	En MV
Réduction de boue	18.5%	27.8%	16.2%	24.6%

Réduction de boue obtenue sur le réacteur de contact aérobic

Les résultats peuvent être exprimés en MES (exempt de sels dissous) ou en MS. Pour l'avenir, il conviendra d'être précis sur l'unité utilisée. On note un écart important entre le rendement en MES et celui en MVS en raison d'un taux de MVS relativement bas sur cette installation (53 %).

Ces rendements de réduction des MES sont obtenus sur une période de 43 jours de suivi avec les paramètres de fonctionnement du réacteur de contact aérobic relativement stables suivants :

- Volume du bassin : 4948 m³ (4.86 x 1018 m²)
- Cv moyenne:
225446 kg MES / 43j = 5243 kg MES /j
et 5243 / 4948 m³ = 1.06 kg MES / m³.j
- Taux de MVS moyen des boues recirculées : 52.8 % (50.6 à 56%)
- [MES] moyenne bassin: 18.3 g/l

- Taux de MVS moyen bassin: 47.4 % (45.5 à 49.6%)
- Temps de séjour moyen : $4948 \text{ m}^3 / (10921 \text{ m}^3 / 43\text{j}) = 19.5 \text{ jours}$
- $[\text{O}_2]$ dissous dans le bassin : de 0.2 à 2 mg O_2/l
- pH dans le bassin: de 6 à 6.9
- Température dans le bassin: de 26.4 à 31°C

On observe un taux de MVS des boues de recirculation très faible et de l'ordre de 53%. Ce taux exceptionnellement bas est à rapprocher de la Cm de fonctionnement des boues activées et de rejets industriels de type minéral bien identifié par la collectivité au niveau du réseau d'assainissement.

Synthèse :

	Dimensionnement constructeur	Mesuré par la collectivité	Obtenue par l'étude Irstea
Cv en kg de MES/m ³ de réacteur .j	1,56	1,32	1,1
Temps de séjour	23 j	23,5 j	19,5 j
Rendement en MES	30 %	27,3 %	18,5 %
Concentration en MES des boues à traiter	35,8 g/l	31 g/l	22,1 g/l
Concentration en MES des boues dans le réacteur	25 g/l	22,5 g/l	18,1 g/l

On note que les paramètres de fonctionnement retenus pour l'étude Irstea concernant l'évaluation du procédé MyCET[®] sont différents des données de dimensionnement.

Deux objectifs ont été arrêtés :

- Maintenir un temps de séjour de l'ordre de 20 jours afin d'éviter pour l'avenir d'avoir des volumes de réacteur trop importants
- Et fonctionner avec des concentrations en MES dans le réacteur peu élevées, de l'ordre de 20 g/l, pour ne pas trop pénaliser le transfert en O_2 qui était limité sur cette installation.

Ces choix vont entraîner des charges volumiques plus faibles puisqu'elles correspondent aussi au ratio de la concentration en MES d'entrée sur le temps de séjour dans le réacteur, d'où une Cv de 1,1 kg de MES/m³ de réacteur et par jour.

On note des rendements en MES relativement faibles avec un temps de séjour proche de 20 jours. Tous les paramètres de fonctionnement n'ont pas été limitants et seule la teneur en MVS de la boue d'entrée, très faible, a pénalisé le rendement.

En exploitation courante sur plus d'un an (données de la collectivité), le calcul des performances du procédé sur les MES est régulièrement réalisé par l'exploitant et le résultat annoncé est de l'ordre de 27% mais la démarche de calcul retenue par l'exploitant est beaucoup moins précise.

A titre de comparaison, en utilisant le même mode de calcul que la station (pas de prélèvement des retours des tambours épaisseur mais prise en compte d'un taux de capture moyen des appareils, prélèvements réguliers mais ponctuels des boues, ...), le rendement de réduction des MES obtenu au niveau du réacteur de contact aérobie MycET est de 20.1% pour la même période de suivi (soit 2% de plus). L'obtention des 27% par l'exploitant (d'où 25% avec plus de précision) peut s'expliquer par un calage différent du procédé (temps de séjour plus élevé, taux de MVS plus important).

Le calage retenu pour notre étude est celui qui devait se rapprocher le plus du dimensionnement du constructeur.

Suivi des populations mycélienne au cours du temps

Une caractérisation de la biodiversité mycélienne a été menée sur cette installation en parallèle à notre étude avec des prises d'échantillons aux points de prélèvement suivants :

- Dans le bioréacteur, producteur de souches mycéliennes,
- Au niveau des boues recirculées de la file eau avant son traitement par le procédé Mycet[®], et donc avant ensemencement mycélien,
- Et dans le réacteur Mycet.

Les prélèvements se sont étalés sur toute la durée de l'étude (43 jours) et l'identification des populations (approche qualitative) dans le réacteur Mycet est toujours comparée aux souches apportées par l'ensemencement mais aussi à la durée entre le dernier ensemencement et le prélèvement.

Le protocole retenu pour le suivi des populations mycéliennes a nécessité une extraction puis une amplification de l'ADN par PCR. Les échantillons sont ensuite caractérisés par électrophorèse par la méthode ARISA et comparés aux 6 souches mycéliennes de référence entrant dans le cocktail mycélien pur de la société Biovitis.

Par respect de la confidentialité, on nommera S1 à S6 les 6 souches de référence présentes et identifiées dans le cocktail mycélien du départ fourni par la société Biovitis avec une proportion plus importante des deux souches S1 et S2.

Les principaux résultats obtenus lors du suivi sont les suivants :

- Dans le bioréacteur

Son rôle initial est d'auto entretenir les souches mycéliennes du cocktail de départ. Les suivis ont montrés qu'à partir des 6 souches introduites, on observe une évolution forte des différentes populations pour aboutir en fin de suivi à une seule souche dominante (S3). Les autres souches ont considérablement diminuées, voir ont disparues de ce réacteur (ou sont non détectables par nos outils de mesure). Ce bioréacteur, alimenté en substrat (mélasse) et avec ses paramètres de fonctionnement, a un effet très sélectif sur les populations apportées au départ.

- Dans le réacteur MycET

Plusieurs espèces mycéliennes non identifiées dans le bioréacteur et dans le cocktail du départ apparaissent, avec une proportion relativement élevée pour une nouvelle souche. Ce point confirme encore la forte sélectivité du milieu pour les souches mycéliennes. L'absence ou la non détection des souches du départ pose le problème de la sélection des souches initiales dont le milieu et les paramètres de fonctionnement retenus ne permettent pas leur développement.

Le suivi des boues de la file eau montre un certain nombre de souches mycéliennes dont La nouvelle souche identifiée dans le réacteur MycET. Cette population est probablement apportée par l'effluent à traiter et les conditions du milieu favorisent le développement de ces populations présentes.

En conclusion, la technique ARISA retenue pour ce suivi, couplée aux amorces PCR sélectionnées au cours d'études antérieures, permet d'identifier et de discriminer les six souches mycéliennes sélectionnées au départ par la société Biovitis et de suivre leur évolution au cours du temps aux différents stades du procédé MycET[®].

Les souches pures constituant le cocktail initial semble avoir beaucoup de difficultés à se maintenir au cours du temps dans le bioréacteur et encore plus dans le bassin MycET.

Des souches mycéliennes sont naturellement présentes dans les boues. Leurs profils électrophorétiques sont relativement stables au cours du temps.

Si les souches du cocktail MycET[®] ne semblent pas s'être développées dans le bassin pendant la durée de l'étude, d'autres souches, probablement communes dans les boues activées, se sont maintenues de manière stable sur cette période. Parmi elles, une souche majeure (M2), avait déjà été identifiée dans le bassin MycET de cette station au cours des études menées antérieurement, en janvier et février 2009 et sur quatre autres stations équipées du procédé MycET[®]. Les faibles performances de réduction de boue obtenues peuvent aussi s'expliquer par la difficulté de maintenir les souches préalablement sélectionnée pour dégrader ce substrat.

Consommation énergétique

Le suivi du système sur une longue durée a permis de réaliser une approche de la consommation énergétique du procédé à partir des enregistrements et relevés effectués par l'exploitant.

Ainsi, les principaux organes moteurs du procédé MycET[®] fonctionnant en continu sont les 2 surpresseurs pour l'aération, les 3 OKI pour l'agitation du réacteur de contact ainsi que la recirculation et la ventilation du bioréacteur.

Sur les 43 jours de suivi, le calcul de la consommation énergétique du procédé MycET[®] donne comme résultats :

4.66 kWh / kg de MES éliminé ou 5.63 kWh / Kg de MVS éliminé

La répartition des consommations énergétiques ramenées à l'ensemble de la station permet la représentation suivante :

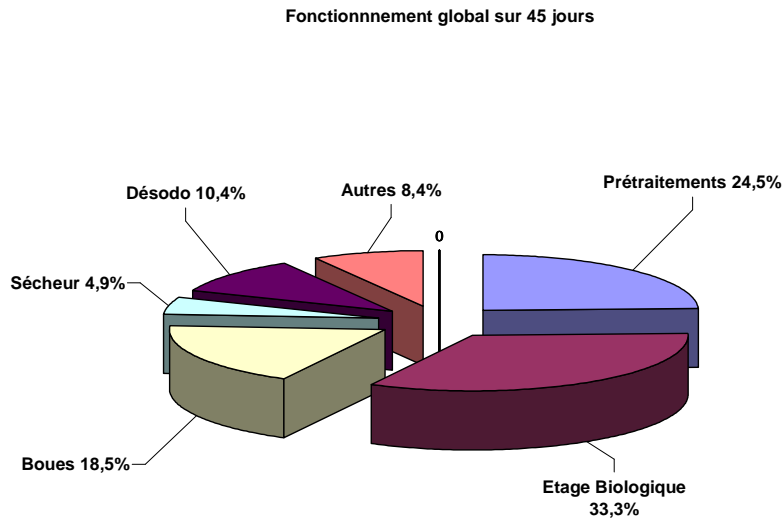


Figure 14. Répartition des consommations énergétiques

Cette répartition, 57,8 % « file eau » et 42,2 % « file boue et annexes » révèle que le poste boue et la désodorisation ont un impact très important sur la consommation de la station.

Enfin, la consommation énergétique totale de la station, ramenée aux flux de DBO₅ éliminés durant notre suivi, donne une consommation spécifique de 4.32 kWh/kg de DBO₅ éliminé. Cette valeur est très importante et s'explique en partie par le degré d'équipements de l'installation (désodorisation, procédé MycET[®] et sécheur).

Métaux dans les boues

Des analyses de métaux (Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg) ont été réalisées afin de vérifier que la réduction de boue occasionnant ainsi une concentration plus élevée de métaux dans les boues restait encore compatible avec un épandage agricole des boues. Deux échantillons, en entrée et en sortie du réacteur de contact aérobie (sortie Tambour épaisseur / sortie filtres à plateaux) ont été analysés.

Les résultats obtenus montrent des concentrations nettement inférieures aux teneurs limites en éléments traces dans les boues pour l'épandage en agriculture et cette réduction de boue n'affecte pas le devenir des boues en agriculture.

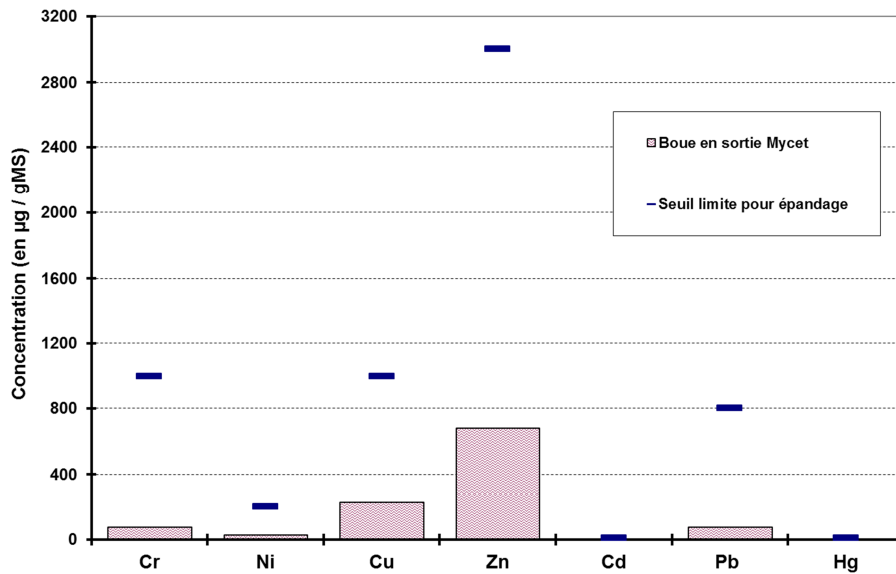


Figure 15. Résultats des analyses de sels métalliques en sortie du réacteur de contact aérobie

Exploitation

En fonctionnement courant, la conduite du procédé Mycet[®] est automatisée et intégrée dans l'automate général de la station. Son pilotage nécessite par contre la présence de l'exploitant pour le démarrage des filtres à tambour et plus particulièrement l'affinage des réglages en lien avec la qualité des retours mais aussi pour la partie déshydratation des boues. Ce suivi n'est pas spécifique au procédé Mycet[®] mais général à toute filière boue

L'asservissement de l'alimentation sur des mesure de MES et de hauteur de boue du bassin a correctement fonctionné durant notre suivi.

Le ré-ensemencement du réacteur à partir de la culture de champignons du bioréacteur est réalisé toutes les 3 semaines mais de façon manuelle : vidange du volume vers le réacteur de contact, alimentation du bioréacteur en mélasse et dilution à l'eau industrielle.

Il est à noter de très fortes variations de performances dans le temps des tambours épaisseurs, avec des périodes de colmatage important qui induisent des retours chargés en MES en tête de station. Ceux-ci peuvent expliquer les rendements élevés du réacteur Mycet calculés par la station d'épuration car ces retours ne sont pas pris en compte. Ces dysfonctionnements peuvent s'expliquer par des lavages insuffisants, à rapprocher peut être d'une pression de service de l'eau industrielle faible.

La fourchette de concentration en O₂ dissous optimale pour le développement des champignons, annoncée entre 0.1 et 1 mg/l est difficile à tenir même avec un seul surpresseur en fonctionnement ce qui explique en partie les fortes consommations énergétiques du procédé. De plus, un seul surpresseur à son débit minimum ne permet pas de maintenir une suspension homogène en MES du réacteur.

Le suivi classique du procédé pour son fonctionnement correcte et stable nécessite un passage journalier et régulier du personnel exploitant, en particulier pour un suivi des tambours épaisseurs, du niveau de polymère dans les cuves et une maintenance hebdomadaire des capteurs de mesure (MES, O₂, hauteur de boue).

Production spécifique de boues de la filière boue activée

Le suivi du système et plus particulièrement de la quantité de boue produite par la station sur une longue durée nous a également permis de mesurer la production spécifique de boues de l'installation et de vérifier cette valeur avec les données annoncées par Irstea, valeur fréquemment remise en cause par la profession.

Cette production spécifique de boue, exprimée en kg de MES / kg de DBO₅ éliminée a nécessité pour la même période le suivi des flux éliminés en DBO₅ par la station. Tous les flux apportés à la station et rejetés ont été caractérisés y compris les apports extérieurs (matières de vidanges et graisses). De plus, un échantillonnage a été réalisé en continu par la station sur les matières de vidanges dépotées et sur les boues de sortie des lipocycles.

Ce suivi a permis le calcul des flux :

- de DBO₅ éliminée sur l'installation,
- de la totalité des MS apportées par les Matières de vidanges,
- de la totalité des MES apportées par le traitement des graisses (sortie des lipocycles),
- des MES stockées ou déstockées de la file eau : delta de MES sur les 3 Clarificateurs et les 2 Bassins d'Aération entre le début et la fin de la campagne de mesure.

La production spécifique de boue moyenne ainsi calculée sur la durée du suivi, soit 43 jours, est de 0.74 kg MES / kg DBO₅ éliminé.

Cette faible production de boue est à rapprocher des paramètres de fonctionnement de l'installation: Une Cm moyenne de 0.037 kg DBO₅ appliqué / kg MVS.j d'où un âge de boue élevé (70 jours) et malgré un ratio MES/DBO₅ élevé de l'eau brute égal à 1,66.

Conclusion

Le suivi continu du procédé MycET[®] sur une période représentant deux fois le temps de séjour des boues dans le réacteur a permis d'obtenir les performances réelles du procédé dans les conditions mesurées (Cm faible, taux de MVS/MES faible lié à la typologie des effluents et à la charge massique).

Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau suivant.

	Rendement en MES de MycET [®]	Cv appliquée en kg de MES/m ³ réac.	Temps de séjour de la boue	% MVS boues à traiter	[MES] boues à traiter	[MES] boues dans le réacteur	Cm de la BA à l'amont
Constructeur	30 %	1,56	23 j	/	/	/	/
Maître d'ouvrage	27,3 %	1,32	23,5 j	61,7 %	31 g/l	22,5 g/l	/
Exploitant	20.1 %	1.07					
Irstea	18.5 % (27.8% en MVS)	1,06	19.5 j	52,8 % (7,12 g MES/l)	22 g/l	18,3 g/l	0.037

Synthèse des Réduction de boue sur le réacteur de contact aérobie

On observe que la réduction de boue mesurée est de 18.5% sur les MES, ce qui correspond à une valeur faible. Cette valeur s'explique par la faible Cm de fonctionnement de la boue activée amont, égale à 0.037 kg DBO₅ appliqué / kg MVS.j. Ce résultat correspond aux performances du procédé annoncées par le constructeur en fonction de la Charge massique de la filière biologique amont.

Cm	Rendement sur les MES attendu
0.05 à 0.06 kg DBO ₅ /kg MVS.j	20%
0.06 à 0.07 kg DBO ₅ /kg MVS.j	22%
0.07 à 0.08 kg DBO ₅ /kg MVS.j	24%
0.1 à 0.12 kg DBO ₅ /kg MVS.j	25% à 30%

Cette Charge massique de fonctionnement, non représentative du créneau d'application du procédé, est le résultat d'une station d'épuration récente (d'où un taux de charge faible) et d'une difficulté dans la gestion du taux de boue dans les réacteurs biologiques.

De plus, sur ce site, cette très faible Charge massique couplée au rejet de type minéral d'un industriel occasionne un taux de MVS excessivement bas (52.8%) qui va aussi limiter le rendement d'élimination des MES au niveau du réacteur de contact aérobie.

Le résultat obtenu sur le procédé MycET[®] permet de mieux préciser le rendement en MES et ses paramètres de fonctionnement. Ses performances de réduction de boues obtenues ainsi que les résultats sur la caractérisation de la biodiversité mycélienne dans le temps mettent en avant certaines interrogations :

- la réduction de boue obtenue sur le réacteur MycET est la combinaison de deux procédés : procédé MycET[®] et procédé de digestion aérobie thermophile (DAT) dont les proportions ne sont pas évidentes à déterminer. Il est probable, compte tenu du suivi biologique, que la part DAT soit prépondérante.

- les résultats biologiques obtenus sur le réacteur MycET montrent que les souches mycéliennes sont naturelles, apportées probablement par l'effluent à traiter et que leur développement est assuré par les paramètres de fonctionnement du réacteur MycET.

Ces dernières années, au vu des cahiers de charges des appels d'offre de construction de stations d'épuration en France, les procédés de réduction de boue ne sont plus du tout d'actualité.

En ces périodes de crise énergétique, les nouveaux projets doivent s'inscrire plus fortement dans le développement durable et les gains énergétiques. Ainsi, les digesteurs anaérobies des boues ont pris la place des procédés comme MycET[®] sur les files de traitement des boues des stations d'épuration. Ces systèmes permettent également une réduction des boues mais en produisant du biogaz valorisable énergétiquement sous forme de chaleur ou d'électricité.

Ainsi, la problématique de réduction de boue n'est plus un sujet prioritaire pour l'ensemble de la profession.

Bibliographie

- Adrian S., Reveau G. (2008). Retours d'expérience du procédé MycET®. L'eau, l'industrie, les nuisances n°317, pp 53-55
- Barillon, B., Fleury, S. et Nauleau, F. (2006). MycET® : procédé de réduction des boues par voie mycélienne. Conférence N°26 JIE 2006 Poitiers.
- Bougrier (2005). Optimisation du procédé de méthanisation par mise en place d'un co-traitement physico-chimique: Application au gisement de biogaz représenté par les boues d'épuration des eaux usées. Thèse
- Desjardins, B. et Lessard, P. (1992). Digestion aérobie des boues : principes, modélisation, modélisation et contrôle. Sciences et Techniques de l'eau, vol. 25, n° 3, p. 209-226.
- Déléris, S., Lebrun, T. et Geaugey, V. (2002). Biolysis E & Biolysis 0, deux innovations technologiques pour la réduction de la production de boues à la source. Dechets - revues francophone d'écologie industrielle - n°28 - 4^{ème} trimestre
- Deleris, S. et al (2007b). Minimization of sludge production in biological processes. Water Science & Technology 46:10 (2002) 63-70
- Duchène, Ph. (1999) Estimation de la production des boues. Document Cemagref.
- Edeline, F. (1998). Epuration physico-chimique des eaux, Collection theorie et technologies. Cebedo et technique de documentation.
- Fleury, S. (2004). Un procédé novateur de réduction des boues d'épuration. L'eau, l'industrie, les nuisances, n°277, pp 53-56.
- Ginestet, P. (2007). Comparative evaluation of sludge reduction. 91 p. IWA Publishing. OTV. (1997). Traiter et valoriser les boues, 457 p. OTV.
- More-Chevallier M. (2008). Les procédés de réduction de boues d'épuration par voie biologique. Mémoire Master 2 : Biologie, chimie, Environnement, spécialité des milieux Aquatiques, Université de perpignan, 59 p.
- Pernelle J.J., Goubet A. (2010) Etude de la diversité fongique du procédé MycET® de la station de Brive – St Pantaléon de Larche (19), 8 p.