



NOTE

Boues de Station d'Épuration :

Techniques de traitement, Valorisation et Élimination

Série Technique

DT 51

Novembre 2012

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
I GISEMENT, ORIGINE ET COMPOSITION DE BOUES DE STATION D'EPURATION URBAINE.....	4
1 Gisement	4
2 Origine des boues	5
3 Composition des boues	5
III PROCÉDÉS DE TRAITEMENT DES BOUES SUR STEP.....	8
1 Epaissement.....	8
1.1 <i>Epaissement gravitaire : la décantation (ou sédimentation)</i>	8
1.2 <i>Epaissement dynamique</i>	8
2 Déshydratation et conditionnement.....	9
2.1 <i>Les filtres-presses</i>	10
2.2 <i>La centrifugeuse</i>	12
2.3 <i>Autres procédés</i>	13
3 Séchage	13
3.1 <i>Lit de séchage</i>	13
3.2 <i>Séchage thermique</i>	16
4 Stabilisation et hygiénisation	16
4.1 <i>Les voies biologiques</i>	16
4.2 <i>Les voies chimiques</i>	19
4.3 <i>Les voies physiques : SAT (stabilisation aérobie thermophile)</i>	20
5 Synthèse des procédés de traitement sur STEP.....	20
III VALORISATION ET ELIMINATION.....	23
1 Principales filières	23
1.1 <i>Valorisation organique</i>	23
1.2 <i>Valorisation énergétique</i>	26
1.3 <i>Stockage en ISDND</i>	27
2 Solutions alternatives.....	29
2.1 <i>L'oxydation par voie humide (OVH)</i>	29
2.2 <i>La co-combustion en cimenterie</i>	29
2.3 <i>La pyrolyse ou thermolyse</i>	29
2.4 <i>La technique mycélienne</i>	30
2.5 <i>La gazéification</i>	30
PERSPECTIVES	30
CONCLUSION	31
GLOSSAIRE	32
BIBLIOGRAPHIE :.....	34

INTRODUCTION

En France, une famille de quatre personnes consomme en moyenne 150m³ d'eau par an¹. L'eau usée contient divers polluants organiques et biologiques. Le rejet des eaux usées directement dans la nature ou après un traitement insuffisant peut donc avoir impact négatif sur l'environnement et potentiellement sur les hommes. D'où l'importance du traitement des eaux usées et de ses sous-produits.

En France, la majorité des eaux usées sont traitées par des techniques biologiques, qui utilisent des bactéries présentes naturellement dans l'eau. Ces bactéries sont placées dans des conditions aérobies particulières afin d'entretenir leur consommation en azote, en carbone et en phosphore contenus dans les eaux usées.

Il existe deux types de boues : les **boues urbaines**, résidus de l'épuration des eaux usées domestiques et les **boues industrielles** produites par les unités de traitement des eaux industrielles.

La composition des boues **urbaines** dépend du type de traitement des eaux usées de la station dont elles sont issues et de la présence éventuelle d'effluents industriels. Elles possèdent néanmoins des caractéristiques communes : elles contiennent toutes de l'azote, du phosphore et de la matière organique. Elles peuvent aussi contenir des substances indésirables telles que des Eléments Traces Métalliques (ETM), des Composés Traces Organiques (CTO), des micro-organismes pathogènes et des composés pharmaceutiques.

Les **boues industrielles** sont beaucoup plus hétérogènes et dépendent du type d'industrie dont elles proviennent. Les usines de recyclage de papier produisent par exemple des boues constituées de cendres de fibres cellulosiques, d'amidon et de pigments synthétiques ainsi que des boues de désencrage de composition spécifique.

Il faut donc adapter le traitement des boues sur STEP en fonction de leurs caractéristiques (quantité, composition, pH, humidité) et du mode d'élimination ou de valorisation choisi. Les conditions économiques locales du moment (débouchés pour les produits, exutoire pour les résidus ultimes) doivent également être prises en compte.

Le présent document ne s'intéressera qu'aux boues de stations d'épuration urbaines, dont les collectivités sont responsables. Il présente les différentes étapes et technologies de traitement des boues ainsi que les conditions de valorisation ou d'élimination.

¹ Source : MONTGINOUL M, *La consommation d'eau des ménages en France : Etat des lieux*, 2002,

I GISEMENT, ORIGINE ET COMPOSITION DE BOUES DE STATION D'EPURATION URBAINE

1 Gisement

En 2006, environ 10 millions de tonnes de Matière Sèche (tMS) de boues d'épuration ont été produites dans l'Union Européenne², dont 8,7 millions de tonnes dans l'UE-15 et environ 1,2 millions de tonnes pour les 12 nouveaux États membres. La quantité de boues produites (en MS) a presque doublé par rapport à 1992 (5,5 millions tonne MS) en raison de l'augmentation de la population et de l'amélioration des procédés d'épuration des eaux usées.

En 2011, la Base de Données Eaux Résiduaires Urbaines (BDERU) a recensé en France 19 300 stations de traitement des eaux usées qui traitent une charge de pollution de 76 millions d'Équivalents Habitants (EH) provenant de 19 200 agglomérations d'assainissement³. Moins de 7% de ces stations ont une capacité égale ou supérieure à 10 000 EH et traitent plus de 80% de la charge polluante alors que près du quart des stations ont une capacité inférieure à 200 EH.

La quantité de boues produites est d'environ 1,1 million de tonnes de matière sèche (tMS) en France en 2010. 43% de ces boues sont épandues, 33% sont valorisées en compostage, 18% sont incinérées et 4% sont envoyées dans les Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) (Figure 1). En effet, il existe 154 installations de compostage et 27 usines d'incinération qui reçoivent des boues pour les valoriser avec d'autres déchets⁴.

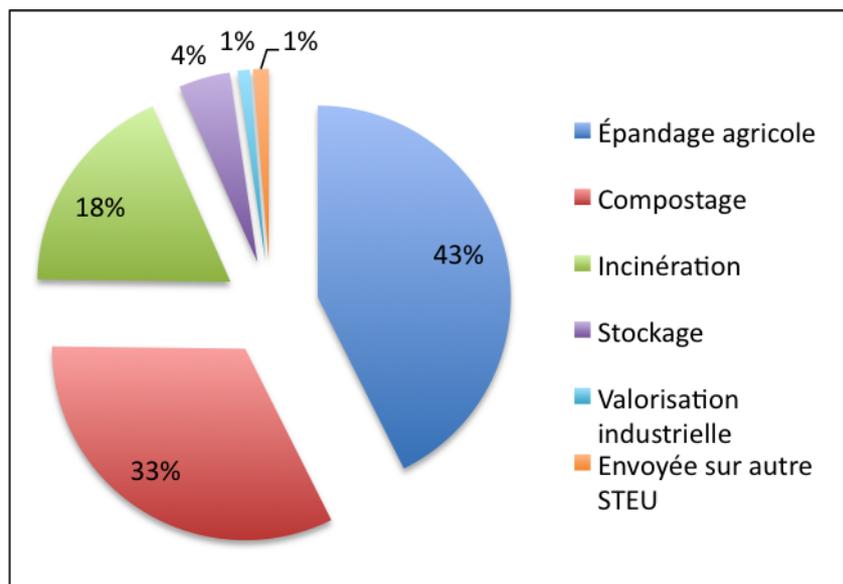


Figure 1 : Valorisation / élimination des boues produites en France en 2010

² Source Commission Européenne, rapport « Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land-Final Report-Part III: Project Interim Reports »

³ Agglomération d'assainissement : L'article 2 de la directive Eaux Résiduaires Urbaines définit l'agglomération comme une «zone dans laquelle la population et/ou les activités économiques sont suffisamment concentrées pour qu'il soit possible de collecter les eaux urbaines résiduaires pour les acheminer vers un système de traitement des eaux usées ou un point de rejet final».

⁴ Source SINOE

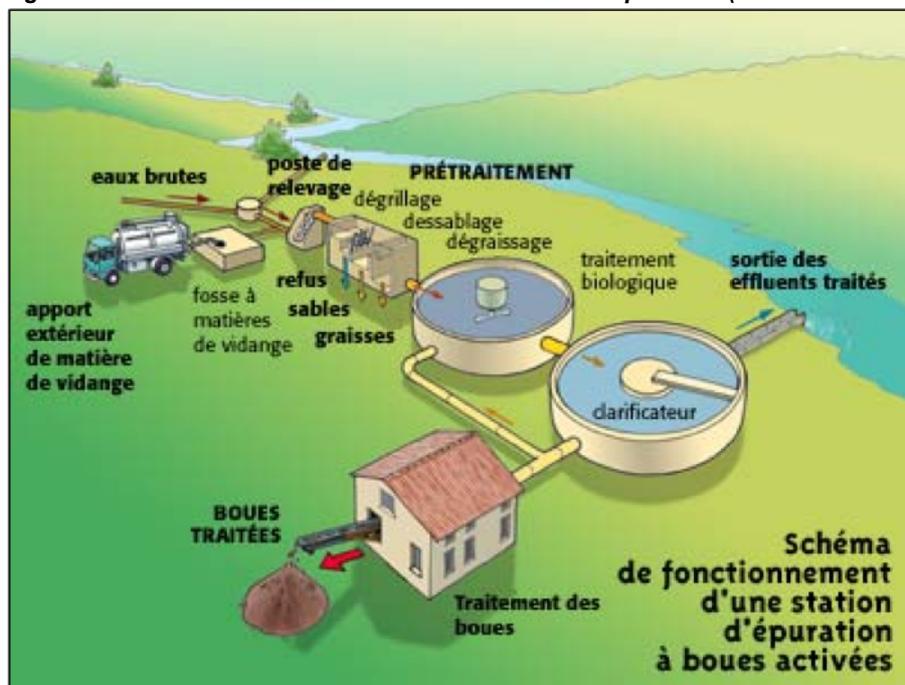
2 Origine des boues

Généralement, le traitement des eaux usées au sein d'une station d'épuration comporte quatre étapes successives (Figure 2).

- Les prétraitements : ils consistent à éliminer les éléments grossiers (dégrillage), à enlever le sable (dessablage) ainsi que les graisses (dégraisage).
- La décantation primaire : elle permet la capture des éléments en suspension.
- La digestion aérobie ou traitement biologique : réduction de la charge en matière organique de l'eau usée par des micro-organismes regroupés en « floccs » et production de boues dites « activées ». Cette phase nécessite une aération conséquente.
- La clarification : elle permet la séparation du « flocc » bactérien de la phase aqueuse.

L'eau traitée est alors rejetée dans le milieu naturel, tandis que les boues résiduelles sont collectées puis traitées en vue de leur valorisation ou de leur élimination.

Figure 2: Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration (source ADEME)



Par ailleurs, d'autres matières plus ou moins chargées, sont également traitées en station : eaux de pluie (en cas de réseau de collecte des eaux usées unitaire), matières de vidange de fosses sceptiques (lorsque la station y est autorisée), etc.

Les boues produites par les stations d'épuration sont essentiellement des particules solides non retenues par les pré-traitements et les procédés de traitement de l'eau (dégradation et séparation des polluants de l'eau).

Ces boues se composent de matières organiques non dégradées, de matières minérales, de micro-organismes et d'eau (environ 99%).

3 Composition des boues

Les boues urbaines sont composées principalement d'éléments fertilisants, notamment en phosphore et en azote.

Les collectivités peuvent être amenées à traiter différents types de boues suivant le traitement des eaux mis en place sur la STEP (Tableau 1) :

- les boues primaires qui proviennent du traitement primaire des eaux usées par décantation,
- les boues biologiques, biomasse en excès provenant du traitement biologique secondaire. Elles sont aussi appelées boues secondaires ou boues activées.
- les boues mixtes, mélange de boues primaires et de boues biologiques. Elles proviennent de la totalité de la station.
- les boues physico-chimiques, provenant de la décantation après traitement avec un réactif.

Les stations de traitement des eaux usées de capacité supérieure à 2 000 EH produisent presque exclusivement des boues activées.

Tableau 1: Différents types de boues de STEP

Type de boue	Boues primaires	Boues biologiques (boues secondaire ou boues activées)	Boues mixtes	Boues physico-chimiques
Origine	traitement primaire par décantation	traitement biologique secondaire	traitement primaire et secondaire	décantation après traitement avec un réactif
Composition et siccité	matière inorganique	composés organiques avec un petit pourcentage de composés inorganiques	mélange de boues primaires et de boues biologiques	
	couleur grise siccité 5%	boue granulaire, de couleur brun-jaunâtre, pulvérulente et de décantation difficile siccité 1-2%	siccité 5%	siccité 4-5%

Des éléments indésirables se trouvent également dans les boues de STEP :

- des ETM (éléments traces métalliques). Les 7 métaux les plus souvent retrouvés sont : Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Mercure (Hg), Nickel (Ni), Plomb (Pb) et Zinc (Zn). Certains de ces éléments occupent une place essentielle à faible concentration dans l'organisme (oligo-éléments), mais deviennent généralement toxiques au-delà d'une certaine concentration.
- des micropolluants organiques : les substances les plus fréquemment considérées sont les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) et les CTO (Composés Traces Organiques). Parmi les CTO présents dans les boues, PCB (Polychlorobiphényles) (somme des 7 PCB), Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène et Benzo(a)pyrène figurent dans l'arrêté du 8 janvier 1998 qui impose leur analyse avant l'épandage. Les boues peuvent également contenir des pesticides, des phtalates, des nitrates, ...
- des micro-organismes pathogènes : virus, bactéries, protozoaires, vers parasites et champignons. Ils sont présents dans les matières fécales rejetées dans les réseaux d'eaux usées et se trouvent dans les boues brutes.
- des substances à visée thérapeutique, y compris les hormones et en particulier les substances contraceptives, les résidus de traitement cancéreux...

Les substances pharmaceutiques, malgré leur faible concentration dans les boues, restent bioaccumulables et entrent dans la chaîne alimentaire. Elles peuvent donc présenter un risque pour les hommes. D'après l'étude de Thomas et al, 2002, certaines hormones ont une activité très faible après le traitement secondaire de l'eau et leurs effets sont quasi nuls après le traitement aérobie.

A savoir

Une étude menée par l'INRA sur l'épandage de différents types de composts dont les composts de boues montre que les ETM restent accumulés à la surface du sol, mais ne s'accumulent pas dans les graines. La concentration en ETM reste du même ordre grandeur que pour les sols identiques de la région. Cette étude montre également que les germes pathogènes n'ont pas d'effet sur les sols ni sur les cultures. Concernant les CTO, malgré des teneurs parfois importantes dans les composts, aucune accumulation n'a été mise en évidence.

III PROCÉDÉS DE TRAITEMENT DES BOUES SUR STEP

À la sortie des filières de traitement des eaux, les boues contiennent environ 95-99% d'eau. Cette dernière se présente normalement sous deux formes :

- eau libre : faiblement absorbée, peut être éliminée par déshydratation mécanique,
- eau liée : attachée avec des bactéries ou d'autres particules, peut être éliminée par séchage thermique ($>105^{\circ}\text{C}$).

Le traitement des boues consiste donc tout d'abord à diminuer leur teneur en eau et à réduire de manière efficace leur charge polluante et fermentescible. Il s'agit de les préparer à une étape ultime de valorisation ou d'élimination.

Il existe quatre principales techniques qui peuvent être complémentaires : l'épaississement, la stabilisation (souvent associée à une hygiénisation), la déshydratation et le séchage.

1 Epaississement

L'épaississement est généralement la première étape du traitement des boues. C'est un procédé simple, consommant peu d'énergie. Il sert principalement à réduire le volume des boues brutes et constitue une étape préalable aux traitements suivants. Le taux de siccité obtenu peut atteindre jusqu'à 10% de MS. Quelle que soit la technique utilisée, l'eau récupérée doit être recyclée en tête de station.

Diverses méthodes sont utilisées pour épaissir les boues :

- Epaississement gravitaire : la décantation (ou sédimentation)
- Epaississement dynamique :
 - la flottation,
 - la centrifugation
 - un système de drainage (gilles et table d'égouttage)

1.1 Epaississement gravitaire : la décantation (ou sédimentation)

Cette technique est la plus utilisée pour la concentration des boues. Elle est très répandue dans les grandes stations (10 000-100 000 EH). Une hauteur de 3,5 à 4m est préconisée pour le bassin de décantation, en tenant compte du volume de stockage, afin de faciliter le tassement de la boue. La siccité des boues à la sortie de ce procédé varie de 2 à 10% selon la nature des boues traitées.

Ce procédé est peu coûteux (consommation énergétique de l'ordre de 1 à 7 kWh/tMS) et d'exploitation simple mais de faible performance sur les boues biologiques (boues très fermentescibles) avec une siccité seulement de 1,5-2,5%. De plus, la mise en place de l'ouvrage nécessite une surface et un volume très importants.

Le temps de séjour des boues dans l'épaississeur est d'environ 48h. La performance est variable selon la nature des boues : pour les boues primaire, 40-80kg de MS/m²/jour, et pour les boues biologiques : 25kg de MS/m²/jour.

1.2 Epaississement dynamique

1.2.1. Flottation

Bien adaptée aux boues biologiques, la flottation a l'avantage d'être un procédé rapide par rapport à la décantation et réalisé dans des installations compactes surtout avec les matières en suspension (MES) de faible décantabilité (siccité de 3,5-5%).

Le procédé est basé sur une séparation de phases provoquée par une remontée à la surface des boues sous l'effet de la pression de fines bulles d'air. Les principaux inconvénients de cette technique sont les coûts d'exploitation élevés à cause d'une forte consommation énergétique (entre 60 à 100 kWh/tMS) et son fonctionnement délicat. Ce procédé est donc réservé principalement aux grandes stations (10 000 à 100 000 EH).

1.2.2. Centrifugation

Cette technique consiste en une séparation, sous l'effet de la force centrifuge, des phases liquide et solide en ajoutant aux boues un polymère en faible dose, permettant d'obtenir un bon compactage (siccité de 4-6%).

Il s'agit d'un procédé rapide (il traite 66 à 100 m³ de boues par heure) et compact, mais très consommateur d'énergie (150 à 300 kWh/tMS) et très sensible à la qualité des boues.

1.2.3. Drainage

La boue, préalablement floculée par traitement physico-chimique, est épanchée sur un support filtrant qui est raclé en permanence par des lames en caoutchouc. Il existe des technologies variées. Les tables, grilles et tambours d'égouttage sont des techniques simples, efficaces et financièrement abordables alors que les bennes filtrantes, bien adaptées aux petites stations et de fonctionnement très simple, ont des coûts plus élevés et nécessitent une assistance technique importante.

Le tableau 2 présente une comparaison des techniques d'épaississement sur quelques paramètres.

Tableau 2 : Performances et consommation en énergie des différentes techniques d'épaississement

Type d'épaississement	Énergie (kWh/t MS)	Conditionnement	Siccité (%)
Décantation	10 à 20	-	1,5 à 2,5
Flottation	60 à 100	-	3,5 à 5
Centrifugation	150 à 300	Polymère (5kg/tMS)	4 à 6
Drainage	30 à 60	Polymère (1,5kg/tMS)	4,5 à 6

L'épaississement par drainage est donc la technique la plus performante, elle produit des boues avec une siccité assez élevée en consommant moins d'énergie.

2 Déshydratation et conditionnement

La déshydratation constitue la seconde étape de réduction du volume des boues sur les boues épaissies, stabilisées ou non, afin d'obtenir une siccité des boues plus poussée (en moyenne comprise entre 20 et 30 % selon la nature des boues).

La déshydratation présente plusieurs avantages : elle facilite le stockage et réduit donc le coût du transport, elle améliore la stabilisation (temps de séjour augmenté) et facilite une utilisation en agriculture.

Il existe plusieurs techniques de déshydratation mécanique :

- Filtres presses
 - Filtre à plateaux
 - Filtre à plateaux membranes
 - Filtre à bande
 - Presse à vis
- Centrifugeuse

- Autres procédés
 - Panier rotatif
 - Pressoir Fournier
 - Sacs filtrants

2.1 Les filtres-presses

Le filtre-presse (Figure 3) est une technique de déshydratation qui consiste à exercer mécaniquement une forte pression sur la boue. Cette dernière libère l'eau interstitielle au travers d'un filtre. Il se forme alors, avec les solides retenus, un « gâteau » plus ou moins sec.



Figure 3 : Exemple de filtre – presse (Source : Warco Canada)

Des réactifs de coagulation / floculation sont utilisés, leur fonction principale étant d'augmenter l'agglomération des particules. Cela permet de faciliter la filtration de ces particules. Le chlorure ferrique et la chaux sont les conditionnements les plus souvent choisis, mais il est aussi possible d'utiliser des électrolytes polymères. L'emploi de polymères et de toiles spécifiques facilite la dépose du gâteau, étape cruciale de la déshydratation.

Il faut ensuite effectuer un lavage des toiles : plus la boue est « biologique », plus le lavage doit être puissant. Ce lavage génère d'ailleurs d'importantes quantités d'eaux chargées en MES, qui sont réintroduites en amont de traitement. La dilution des boues qui en résulte doit être prise en compte afin de déterminer la capacité de l'installation.

Ce système fonctionne en général de manière discontinue selon des cycles (remplissage, filtration, dépose, lavage) qui peuvent durer plus ou moins longtemps en fonction de la nature des suspensions de boues, de l'efficacité de l'alimentation et du conditionnement. La qualité de la déshydratation se juge à la facilité de décollage du gâteau.

Cette technique est très intéressante car elle s'adapte au type de boues traitées (nombre de cycles par jour, choix des polymères, taille de la maille, point d'injection, méthode de mélange. De plus, les filtres presses, ayant diminué de volume, ont pu s'intégrer à des petites stations. Par ailleurs, les coûts d'investissement d'exploitation sont globalement raisonnables et le filtre-presse fait preuve d'une relative facilité de conduite.

Il existe quatre techniques de filtres presse différentes : les **filtres à bandes**, les **filtres à plateaux**, les **filtres à membrane** et les **presses à vis** (Tableau 4)

Tableau 4: Avantages et inconvénients des différentes techniques de déshydratation par filtre-presse.

Traitement		Principe	Avantages	Inconvénients	Siccité obtenue	Type de station adaptée
filtre presse	à bande	Compression des boues entre deux bandes de toile. Une fois la toile débarrassée de la boue, il faut la laver pour qu'elle conserve sa porosité. Ce système nécessite l'addition de polymères dont la composition et la quantité doivent être constamment adaptées à la qualité des boues. Très utilisés dans le passé, les filtres à bande sont abandonnés au profit de technologies plus simples.	<ul style="list-style-type: none"> - lavage régulier - performante pour boues biologiques - grande productivité - fonctionnement en continu 	<ul style="list-style-type: none"> - incapacité de traiter les boues fibreuses - technique quasi abandonnée 	25%	petite et moyenne station
	à plateaux	Composé de chambres de filtration dans lesquelles la boue est comprimée par des vérins hydrauliques jusqu'à formation d'un gâteau compact. L'alimentation en boues est discontinue.	<ul style="list-style-type: none"> - entretien limité - tout type de boues (préalablement épaissies) 	<ul style="list-style-type: none"> - inadapté pour les boues collantes - investissement élevé - automatisation impossible 	>30%	grande station
	à membrane	Perfectionnement du filtre-presse. Il permet tout d'abord d'éviter l'effet négatif du débit de fuite sur les floccs en fin de montée en pression.	<ul style="list-style-type: none"> - augmentation de siccité par rapport au filtre à plateaux - 40% de productivité de plus qu'un filtre à plateaux 		>34%	peu répandu
	à vis	Après la phase d'essorage - compactage, grâce à une vis d'extrusion autour de laquelle se trouve une grille filtrante. Les grilles sont autonettoyantes et spécifiques à chaque type de boue.	<ul style="list-style-type: none"> - bien adapté aux boues fibreuses - fonctionnement en continu - peu d'entretien 	<ul style="list-style-type: none"> - siccité limitée 	20%	peu répandue

2.2 La centrifugeuse

La centrifugeuse est le matériel qui a le plus évolué ces dernières années, ce qui lui a permis de se rapprocher et parfois d'égaliser les performances des filtres presses.

Il s'agit d'une séparation des phases liquide et solide, du fait de leur densité, par accélération centrifuge dans un bol dans lequel tourne une vis. Cette vis racle et évacue la phase solide. En général, la conception de la vis est adaptée à un type de boue précis. La compacité de cette technologie permet de développer des unités mobiles de déshydratation, ce qui assure une certaine flexibilité du procédé.

Elle présente de nombreux avantages par rapport au filtre-presses :

- elle est adaptable aux boues difficiles à traiter : pour les boues urbaines huileuses, la séparation des insolubles est quasi totale,
- la déshydratation peut fonctionner en continu,
- l'automatisation du procédé est totale,
- le procédé est fermé, plus compact qu'un filtre-presses.

Le principal atout des centrifugeuses résidait dans leur adaptation aux petites stations d'épuration, secteur que commencent à investir les promoteurs de filtres presses.

Il faut faire attention à ce que les boues ne contiennent pas de sable, sinon, la centrifugeuse risque de se détériorer rapidement. Un contrôle permanent de la nature des boues est donc nécessaire. De plus, les coûts d'investissement et d'exploitation (consommation importante en poly-électrolytes et en énergie) restent assez élevés. Bien que ses performances aient beaucoup progressé, la centrifugation ne permet d'atteindre qu'une siccité limitée comprise entre 20 et 25 %.

Les centrifugeuses, devenant plus économes en énergie, plus compactes, plus performantes, sont les techniques de déshydratation les plus courantes.

Trois types de conditionnement (Tableau 5) peuvent être effectués avant la déshydratation :

- **le conditionnement minéral**, avec utilisation de chaux et d'un coagulant (chlore ou sulfate ferrique). Il permet une forte augmentation de la siccité et une stabilisation des boues. Ce type de conditionnement est utilisé surtout quand les boues traitées sont destinées à l'épandage agricole ou au stockage en ISDND.
- **le conditionnement organique** au polymère. Il peut être réalisé après un ajout de coagulant éventuel.
- **le conditionnement thermique**, qui permet de dépasser 50% de siccité. Il est employé avec des boues digérées sur de grosses installations.

Tableau 5 : Comparaison des différents types de déshydratation

Technique de déshydratation	Type de boues	Siccité obtenue	Conditionnement
centrifugation	biologique	16-20 %	polymère cationique 5-8kg/tMS
filtre à bande		14-17%	polymère cationique 6kg/tMS
filtre à plateaux		30-35%	28-30% de chaux 8-10% FeCl ₃

2.3 Autres procédés

Panier rotatif

Ce système, inspiré des centrifugeuses, fonctionne avec une vis remuante et à séparation essentiellement gravitaire. Les principaux avantages résident dans une plus grande économie d'espace et une étanchéité plus poussée. Le panier rotatif peut faire partie d'une unité mobile.

Le presseur Fournier

Le presseur Fournier consiste en un système rotatif qui dépense moins d'énergie que la centrifugeuse et ne nécessite pas de grande pression pour l'alimentation des boues. Après injection, celles-ci suivent un mouvement rotatif dans un canal, à la périphérie d'une roue. Une force centrifuge de compression est alors exercée. Les boues sont essorées et l'eau est évacuée latéralement à travers des tamis. Selon les boues, la siccité peut atteindre 35%.

Les sacs filtrants

Ce procédé, à base de sacs filtrants à usage unique, est préférentiellement utilisé par les industriels, mais il peut aussi bien s'adapter aux boues urbaines. La boue préalablement floculée est introduite sous pression pour subir une évaporation. La siccité obtenue peut aller jusqu'à 25%. Ce procédé est essentiellement destiné aux petites stations et nécessite des conditions de stockage contraignantes.

3 Séchage

Le séchage est une opération unitaire du traitement des boues consistant à évaporer de l'eau libre et liée. Plusieurs techniques de séchage sont envisageables :

- Lit de séchage
 - Séchage solaire
 - Lit de sable
 - Lagune de séchage
 - Lit planté des macrophytes
- Séchage thermique
 - Séchage direct
 - Séchage indirect

Le séchage thermique vient obligatoirement après une étape de déshydratation mécanique.

3.1 Lit de séchage

Le principe du lit de séchage est d'épandre des boues liquides sur une grande surface avec un lit constitué de graviers et de sable. Il se pratique soit à l'air libre soit en bâtiment fermé avec une ventilation mécanique.

Cette technique présente l'inconvénient d'être tributaire du climat, les temps de séchage sont relativement longs et les coûts de main d'œuvre élevés. Elle ne peut s'adapter qu'aux grandes stations en raison des surfaces nécessaires.

3.1.1 Séchage solaire

La profondeur de boue lors du remplissage peut varier de 10cm à 50cm selon la nature des boues. Ce lit de séchage se trouve sous serre (Figure 4), ce qui permet de garder la chaleur, d'avoir une température de l'air et des boues plus élevée, mais également d'accélérer le séchage par les rayons du soleil.

Afin de diminuer le temps de séjour des boues et d'augmenter la siccité, des ventilateurs sont souvent installés dans les serres. De plus, le dimensionnement du lit doit prendre en compte le climat, le bilan hydrique et la siccité des boues en entrée.

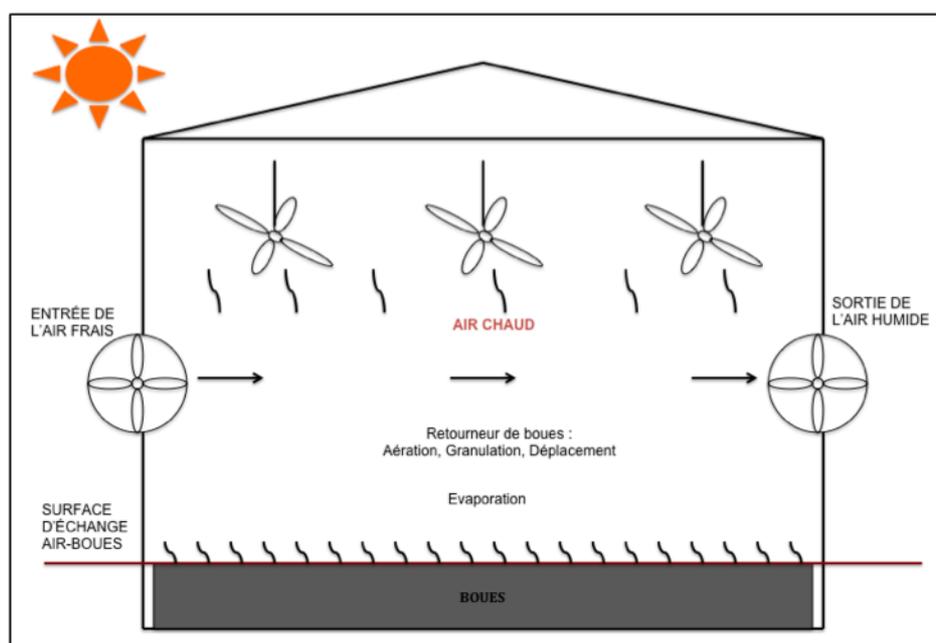


Figure 4: Schéma du fonctionnement d'une serre à séchage solaire

Cette technique est très avantageuse car elle utilise une source d'énergie renouvelable, le soleil. Les boues séchées par cette technique, ayant une siccité élevée entre 60 et 80%, peuvent être acceptées par diverses filières de valorisation énergétique ou d'élimination. De plus, les boues sont hygiénisées par la chaleur.

Cependant, cette technique a également des limites : sa performance dépend beaucoup du climat, la production d'odeur n'est pas négligeable et elle demande une surface d'implantation importante.

3.1.2 Lit de sable

Ce procédé est basé sur la simple propriété filtrante des sables. Pour éviter toute contamination des sols, le lieu et les modalités d'épandage des boues sur ces lits font l'objet d'une surveillance rigoureuse.

Le procédé consiste à épandre les boues (d'environ 30cm d'épaisseur) sur un lit de sable (étalé sur des couches de granulométrie plus importante comportant un réseau de drainage) (Figure 5) pour permettre l'absorption de l'eau interstitielle par le sable. Ensuite intervient une évaporation qui augmente la siccité des boues, jusqu'à 60% dans les conditions les plus favorables.

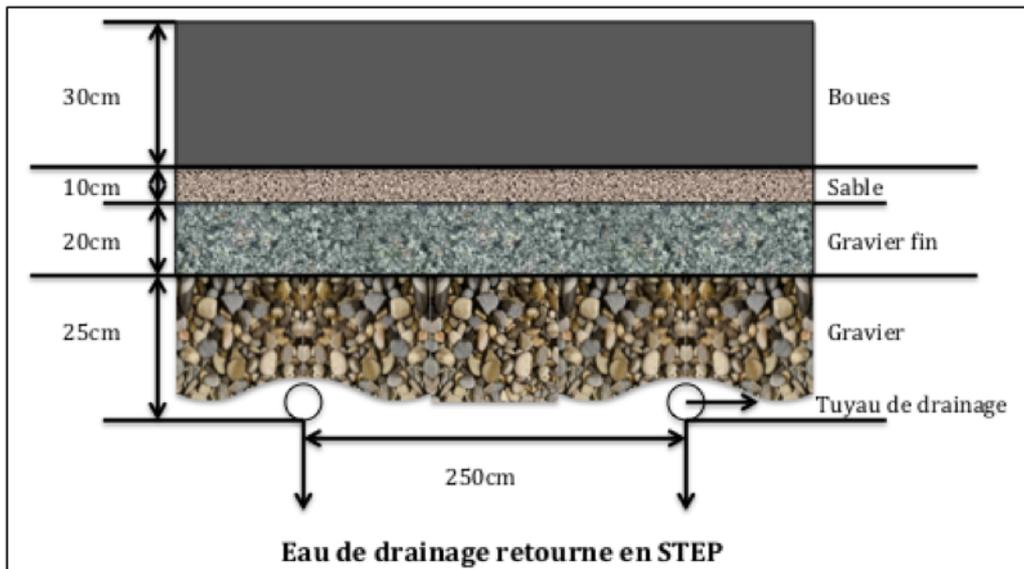


Figure 5 : Schéma de la composition principale du lit de sable

3.1.3 Lagune de séchage

Le principe de cette technique est quasiment le même que pour le séchage sur lit de sable en absence de percolation. Par contre, la profondeur de boue est 3 à 4 fois plus importante (0,7-1,4 m) et le temps de séjour est d'environ 1 à 3 ans avant curage. La qualité du sol doit être prise en compte avant installation d'une lagune, afin d'éviter la contamination de la nappe. A savoir que les boues préalablement digérées peuvent améliorer la siccité du produit à la sortie.

3.1.4 Lit planté des macrophytes

Les plantes les plus souvent choisies sont les roseaux en raison de leur fort indice foliaire qui favorise l'évapo-transpiration et de leur croissance rapide ayant des besoins importants en eau. Ce sont des conditions très avantageuses pour le séchage des boues.

Les boues à traiter sont prélevées directement du bassin d'aération et déposées sur le bassin planté de roseaux. Celui-ci est constitué d'une granulométrie croissante de la surface vers le fond et drainé.

Le passage de l'eau interstitielle de la boue activée est assuré par un anneau libre qui est présent en permanence autour de chaque tige de roseau, alors que les MES sont retenues en surface et s'accumulent progressivement.

Le bon fonctionnement du procédé repose donc sur un développement dense des roseaux de manière à ce que l'eau puisse être évacuée en tous points dans les lits. La partie aérienne des roseaux se développe du printemps à l'automne et elle reste en place durant l'hiver. Pendant cette période de froid, les racines conservent leur rôle.

Cependant, ce type de séchage nécessite un pilotage délicat que ce soit pour l'aération des couches épandues ou pour l'alimentation en boues. Il est souvent couplé à un épandage agricole d'une partie des boues déposées sur les lits de plantes. Ce procédé requiert l'utilisation d'un additif qui permet aux boues de préserver un caractère fertilisant et de réduire les odeurs.

3.2 Séchage thermique

Ce type de séchage repose sur deux méthodes :

- le **séchage direct**, c'est à dire que les boues sont au contact de la source chaude et que l'air est injecté directement pour permettre leur combustion. Il nécessite ensuite un traitement spécifique de cet air, chargé en polluants de toutes sortes. Les sècheurs directs ne peuvent généralement pas produire des boues de siccité supérieure à 70 % à cause de risques d'inflammation ou d'explosion.
- le **séchage indirect**, qui est un séchage total. Les boues sont chauffées par un fluide caloporteur circulant dans des tuyaux parfaitement isolés. Les sècheurs indirects peuvent former, sans aucun danger, des boues de siccité supérieure à 90 % et parfois même à 95 %.

Tous les types de sècheurs nécessitent, néanmoins, une surveillance attentive continue par un personnel qualifié, du fait du risque d'endommagement des installations, causé par le durcissement des boues de siccité supérieure à 60 %.

Dans tous les cas, ces systèmes sont très consommateurs d'énergie : la consommation électrique est d'environ de 30-70 kWh par tonne d'eau évaporée et la consommation en énergie thermique est comprise entre 3 000 et 4 000 kJ/kg d'eau évaporée soit une consommation de 80L de fioul/tonne d'eau évaporée. Il est donc quasiment obligatoire, pour le séchage thermique, d'utiliser une source d'énergie économique si l'on veut obtenir au final un bilan intéressant. Il semble alors très intéressant de valoriser le biogaz produit par la station d'épuration comme source d'énergie du sècheur.

Il est fortement recommandé d'effectuer une étude préalable la plus complète possible des différentes étapes déjà subies par les boues et de leur devenir pour pouvoir évaluer la pertinence d'un séchage thermique final.

4 Stabilisation et hygiénisation

Bien que la stabilisation et l'hygiénisation présentent chacune une finalité différente, on peut les regrouper au sein d'une seule étape visant à réduire au maximum toutes les nuisances de natures biologiques que peuvent produire les boues déshydratées. Ces deux traitements sont souvent assurés par un même procédé.

La stabilisation consiste à réduire au maximum l'activité biologique de dégradation des boues et plus particulièrement leur fermentation. Elle réduit fortement la nuisance olfactive, les émissions de méthane, les risques de lixiviation, les populations bactériennes et la Demande Biologique en Oxygène (DBO₅).

L'hygiénisation est, quant à elle, destinée à réduire la présence d'agents pathogènes dans les boues afin d'éviter une contamination éventuelle dans le cas d'une utilisation pour la valorisation d'un écosystème (épandage ou revégétalisation par exemple). Ces deux étapes peuvent être assurées de manière biologique, chimique ou physique.

4.1 Les voies biologiques

4.1.1 Digestion aérobie : le compostage

Le compostage est une dégradation par voie aérobie des éléments organiques fermentescibles des boues. Ce procédé conduit à la formation d'un produit, appelé compost,

riche en matières humiques, mais également à des dégagements de gaz carbonique, d'ammoniaque, d'eau, d'azote et de chaleur. Il nécessite un apport en oxygène, en eau et en matières organiques, sources de carbone et d'azote, pour assurer une croissance suffisante des bactéries aérobies. Les matières organiques sont dégradées en phases successives, ce qui permet de déterminer le degré de maturation du produit.

Le compostage présente deux principaux avantages, celui de stabiliser mais aussi celui d'hygiéniser un « déchet » pour en faire un « produit » conforme à la norme NFU 44-095.⁵

Nécessité d'un co-compostage

Les boues ne sont pas « auto-compostables » à cause de leur humidité trop élevée (malgré l'épaississement et la déshydratation préalables), de l'absence d'élément structurant et d'un rapport carbone / azote (C/N) trop faible. Il faut donc mélanger les boues avec un support structurant carboné apportant une source supplémentaire de carbone et facilitant l'aération. Pour cela, des écorces, des copeaux, des déchets verts, des rafles de maïs ou de la paille sont souvent utilisés.

A la fin du cycle de compostage, le support structurant est souvent criblé afin de le recycler, ce qui permet une diminution des approvisionnements. Par exemple, lors de l'utilisation d'écorces, le criblage peut être effectué après la phase de fermentation du compost et avant la phase de maturation. Cela permet le recyclage du substrat grossier et un meilleur contrôle de la granulométrie du compost.

La nature du support carboné ainsi que la proportion du mélange boue/support varient de manière significative selon les plates-formes. Le compostage fait donc appel à un savoir-faire propre à chaque exploitant.

Processus de « fermentation » aérobie

L'efficacité de la réaction dépend de l'aération du substrat. Celui-ci devrait être travaillé en andains, bien aéré et humidifié de manière optimale. Les techniques d'aérations forcées (aspiration ou soufflage) se sont développées pour accélérer encore le processus de dégradation et augmenter la productivité. Par ailleurs, une aération efficace permet de limiter les émissions de CH₄ et les odeurs.

Les systèmes d'aération forcée sont préférables par rapport à l'aération par retournements. En effet, la demande des boues en oxygène est très importante du fait de leur nature hautement fermentescible. De plus, le système d'aération par retournements semble souvent confronté à des problèmes d'odeurs et il nécessite un programme précis d'aération. Cependant, cette technique permet d'assurer une meilleure homogénéisation des boues et d'une hygiénisation totale du produit par effets thermiques. L'idéal serait donc de coupler une aération forcée à une aération par retournements pour un coût raisonnable.

La température des boues compostées en phase thermophile peut atteindre en moyenne 65°C, pour une durée variant de 10 à 67 jours, la période de montée en température durant de 1 à 8 jours.

Affinage du produit et maturation

En fonction des exigences du client et de la granulométrie du support carboné, un criblage final peut être opéré. Ensuite, la maturation, qui consiste à stocker le compost dans un hangar aéré ou à l'extérieur, met un terme à son élaboration (il est rare que des plate-formes n'en effectuent pas). La durée de cette étape varie entre 50 et 180 jours.

⁵ Voir « Cadre juridique de la gestion des boues de STEP »

La fin de la maturation se décide en fonction de l'aspect et de l'odeur du compost, de la baisse de la température ou à l'aide d'un respiromètre.

Qualité du compost

Quelle que soit la technique utilisée, la plupart des composts obtenus sont relativement de bonne qualité : taux de matière sèche compris entre 35 et 70%, charge polluante organique très réduite, pH neutre, produit stable et qualité agronomique. Il est également plus facile à transporter et à stocker que des boues brutes ou stabilisées chimiquement.

Le compostage permet de stabiliser et d'hygiéniser efficacement les boues en vue d'une valorisation.

4.1.2 Digestion anaérobie : la méthanisation

Contrairement au compostage, la méthanisation est une fermentation de la matière organique des boues en l'absence d'oxygène. Il existe trois types de fermentations liées à la température ambiante :

- la **fermentation psychophile** (entre 15 et 20°C) : digestion froide et lente (plusieurs semaines) mais ne nécessitant pas de chauffage.
- la **fermentation mésophile** (entre 30 et 35°C) : procédé reposant sur l'activité des entérobactéries (bactéries de l'intestin).
- la **fermentation thermophile** (entre 50 et 60°C) : seules les bactéries thermophiles et les actinomycètes subsistent. Le temps de séjour est court, mais l'exploitation s'avère délicate.

C'est la digestion mésophile qui est la plus répandue. La méthanisation correspond donc essentiellement à une technique de stabilisation plus que d'hygiénisation (les principaux micro-organismes pathogènes des boues étant des germes fécaux, les températures atteintes n'ont aucun effet sur eux). Cette technique permet une réduction supplémentaire (jusqu'à la moitié) du volume des boues, ce qui rend le stockage et le transport plus aisés et moins onéreux.

La digestion anaérobie produit d'une part un digestat pouvant être valorisé en agriculture et, d'autre part, du biogaz principalement constitué de méthane (environ 65 %) et de dioxyde de carbone (environ 35%).

Depuis quelques dizaines d'années, la méthanisation est également considérée comme une voie de valorisation énergétique efficace si le biogaz produit est récupéré et réutilisé.

L'avantage principal de la méthanisation est donc la valorisation du biogaz produit qui peut être effectuée de trois manières :

- **Valorisation thermique** : valable si un débouché pérenne et régulier est disponible sur l'année, pour la chaleur, à proximité du lieu de production (industrie, réseau de chaleur) ou en interne (digesteur de boues). La mise en œuvre et l'exploitation de ces équipements sont parfaitement maîtrisées.
- **Valorisation électrique**, cogénération ou production alternée : Cette voie offre actuellement le plus de garantie en termes de débouchés (consommation propre de la STEP, rachat par EDF) et donc de recettes. Elle est très répandue à l'étranger et se développe en France.

Ainsi, la station d'épuration d'Achères, la plus importante d'Europe, est énergétiquement autonome à 60 % grâce à la simple valorisation du biogaz produit par méthanisation de ses boues.

- **Utilisation sous forme de biocarburant** : filière encore marginale en raison des contraintes techniques donc financières de mise aux normes Gaz Naturel pour Véhicules (GNV) du biogaz. Cette solution a été développée à Communauté Urbaine de Lille pour des bus de ville (flotte captive).

Raccordement au réseau de gaz naturel : l'injection de biométhane (biogaz épuré) issu de la méthanisation des boues d'épuration n'a pas encore reçu l'approbation de l'ANSES.

De plus, la méthanisation permet de diminuer voir atténuer l'odeur des boues liée à leur stabilisation.

Cependant, des difficultés d'exploitation sont rencontrées, notamment le colmatage des canalisations, la corrosion, le moussage etc.. En outre, la maintenance des installations est assez lourde et coûteuse (8,5 €/tMS en moyenne). La consommation énergétique des digesteurs varie de 2 à 37 €/tMS.

Le potentiel de production d'énergie renouvelable issue du biogaz produit par la méthanisation des boues est très important en France. La méthanisation est ainsi un procédé qui tend à se développer dans les collectivités.

4.2 Les voies chimiques

4.2.1 Chaulage

Comme le compostage et la méthanisation, le chaulage permet de stabiliser les boues en même temps qu'il les hygiénise. Ce procédé intervient après la déshydratation et consiste à déverser de la chaux vive (CaO) ou éteinte (Ca(OH)₂) sur les boues, initiant une réaction chimique exothermique. Il permet également une augmentation du pH des boues (supérieur à 12). Le chaulage est une opération totalement maîtrisable avec un coût d'investissement modeste. Toutefois, il est moins efficace que d'autres techniques en ce qui concerne l'abattement des bactéries sporulées et les œufs d'helminthes.

D'après les résultats d'une enquête réalisée par le Service de l'eau et de l'assainissement de la ville d'Amiens⁶, le chaulage réduit très efficacement la contamination fécale ainsi que la croissance des micro-organismes pathogènes d'origine fécale dans les boues. Il permet également de supprimer les odeurs (stabilisation), d'augmenter encore plus la siccité des boues (25-35%) et d'améliorer leur structure (plus granuleuse) pour faciliter le transport ainsi que le stockage.

Il s'agit d'une opération finale du traitement des boues. La boue chaulée peut ensuite être utilisée en agriculture ou envoyée en stockage (ISDND), mais rarement incinérée.

4.2.2 Stabilisation aux sels de nitrite

Le traitement aux sels de nitrite est bien adapté, techniquement et économiquement, aux petites stations d'épuration. Il assure une stabilisation assez performante par oxydation des composés malodorants, une inhibition de l'activité fermentative, ainsi qu'une hygiénisation (il élimine la plupart des germes fécaux). L'opération ne dure que deux heures environ.

Ce procédé permet aussi d'augmenter la siccité des boues (2 à 5% de plus) ainsi que leur qualité fertilisante, ce qui se révèle particulièrement intéressant en vue d'une utilisation agricole. Il pourrait être une solution alternative au chaulage. A la différence de ce dernier, la stabilisation au nitrite est réalisée en phase liquide, avec des boues épaissies, sans augmenter la masse sèche à évacuer.

⁶ Données ADEME, 1998

4.3 Les voies physiques : SAT (stabilisation aérobie thermophile)

La stabilisation aérobie thermophile sert de pré-digestion et d'hygiénisation en amont de la digestion anaérobie sans aucune action extérieure.

Cette technique a pour but de dégrader la Matière Organique (MO) partiellement oxydée et adsorbée sur les floccs en présence d'oxygène.

La réaction d'oxydation est naturellement exothermique, la chaleur étant produite par échauffement spontané. Elle permet, par l'utilisation de réacteurs clos isolés thermiquement et alimentés en air surpressé, de maintenir une température de l'ordre de 50-60°C, des rendements de destruction de la MO de 50% et une élimination importante des mauvaises odeurs. Un temps de séjour minimum d'environ 6 jours est nécessaire pour obtenir une siccité d'au moins 25 à 35 %, selon la nature des boues entrantes.

5 Synthèse des procédés de traitement sur STEP

Les étapes de traitement présentées dans ce document ne sont ni successives ni obligatoires. Le choix de technique de traitement dépend la nature de boues à traiter et des filières de valorisation /élimination prévues. Le tableau 6 compare les techniques présentées dans les chapitres précédents.

Tableau 6: Tableau récapitulatif des étapes de traitement des boues, techniques, avantages et inconvénients, siccité obtenues et types de station adaptés.

Traitement		Avantages	Inconvénients	Siccité atteinte	Station adaptée		
Épaississement	gravitaire	décantation + drainage	- exploitation simple - peu coûteuse	- faible performance avec les boues biologiques - temps de séjour très long	2-10%	Tout type de station	
	dynamique	égouttage (drainage)	- simple et efficace - peu coûteux - performante		4,5-6%	petite et moyenne station	
		centrifugation	- rapide et compact	- consommateur d'énergie - très sensible à la qualité des boues	4-6%		
		flottation	- bien adapté aux boues biologiques - rapide	- forte demande énergétique - investissement élevé - fonctionnement délicat	3,5-5%	grande station	
Stabilisation - Hygiénisation	chimique	chaux	- augmentation du pH des boues (>12) - réduction de la contamination fécale et des germes d'origine fécale - pas d'odeur indésirable, augmentation de la siccité et de la valeur agronomique - facilite le transport et le stockage des boues	- manipulation délicate (chaux vive le plus souvent)	25-35%		
		traitement aux nitrites	- efficace contre la plupart des germes fécaux - augmentation de la siccité - réaction rapide			petite station	
	biologique	digestion aérobie	compostage	- siccité atteinte élevée - pH neutre, produit stable - facilite le transport et le stockage des boues - logique « produit » possible		35-70%	Moyenne et grosse station
		digestion anaérobie	méthanisation	- réduction jusqu'à 50% du volume - facile à transporter et stocker - production de biogaz	- pas efficace pour l'élimination des germes pathogènes	20-30%	grande station
		stabilisation aérobie thermophile (SAT)		- solution alternative à la méthanisation - faible temps de séjour - moins d'investissement - boues sorties peuvent directement être épandues - nuisance olfactive réduite	- moins performant que la méthanisation - consomme plus d'énergie que la méthanisation	22%	tout type de station

Déshydratation		centrifugation	<ul style="list-style-type: none"> - fonctionnement en continu - totalement automatisé et fermé, plus compact que filtre presse 	<ul style="list-style-type: none"> - coût élevé - nécessite un contrôle de la nature des boues 	20 (jusque 30% si chaulage préalable)	tout type de station
	filtre presse	à bande	<ul style="list-style-type: none"> - lavage régulier - performante pour boues biologique - grande productivité - fonctionnement en continu 	<ul style="list-style-type: none"> - incapacité de traiter les boues fibreuses - technique abandonnée 	25%	petite et moyenne station
		à plateaux	<ul style="list-style-type: none"> - entretien limité - tout type de boues (préalablement épaissies) 	<ul style="list-style-type: none"> - inadapté pour les boues collantes - investissement élevé - automatisation possible 	>30%	grande station
		à membrane	<ul style="list-style-type: none"> - augmentation de siccité par rapport au filtre à plateaux - 40% de productivité en plus que le filtre à plateaux 			peu répandue
		à vis	<ul style="list-style-type: none"> - bien adapté aux boues fibreuses - fonctionnement en continu - peu d'entretien 	<ul style="list-style-type: none"> - siccité limitée 	20%	peu répandue
Séchage	lit de séchage	solaire	<ul style="list-style-type: none"> - séchage rapide pour une quantité importante, forte réduction des volumes à gérer - hygiénisation des boues par la chaleur 	<ul style="list-style-type: none"> - demande en surface importante - nuisance olfactive 	60-80%	moyenne station
		lagune de séchage	<ul style="list-style-type: none"> - procédé rustique et peu onéreux 	<ul style="list-style-type: none"> - temps de séjour très long (1-3 ans) - risque de contamination de la nappe phréatique - grande surface 	10-40%	
		au sable	<ul style="list-style-type: none"> - siccité atteinte élevée : réduction de volumes importante, rustique - procédé peu onéreux 	<ul style="list-style-type: none"> - nécessite une surveillance rigoureuse 	≤60%	
		à macrophyte	<ul style="list-style-type: none"> - boues prélevées directement du bassin de STEP - temps de séjour d'environ 28 jours 		10-20%	petite et moyenne station
	thermique	indirect (total)	<ul style="list-style-type: none"> - bonne élimination des micro-organismes - pas d'odeur indésirable 	<ul style="list-style-type: none"> - coût très élevé - consommateur d'énergie - difficultés d'exploitation liées à l'entretien (arrêt) du sécheur 	90-95%	
direct (partiel)	<70%					

III VALORISATION ET ELIMINATION

1 Principales filières

1.1 Valorisation organique

En 2008, la valorisation agricole était la principale voie d'élimination des boues des STEP (environ 47 % du tonnage annuel national directement épandu et 26% composté). Il s'agit de la solution la moins onéreuse mais également la plus fragile en raison des difficultés liées à l'acceptation par le monde agricole de ces « déchets » devenus « produits ».

Epandage des boues

D'après la directive européenne du 12 Juin 1986 transposée dans le code de l'environnement (articles R211-25 à R 211-47), les boues ont le statut de déchets avant celui de fertilisants potentiels.

Ces textes réglementaires définissent précisément toutes les modalités techniques d'épandage que doivent respecter les producteurs de boues pour prévenir tout risque sanitaire et écologique de contamination du sol et des cultures.

Afin de mieux gérer l'utilisation agronomique des boues de STEP, l'arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescription techniques applicables aux épandages de boues sur les sol agricoles, (pris en application du décret n°97-1133) a rassemblé ces prérogatives dans le cadre d'un **Plan d'épandage** qui contient :

- une **étude préalable** sur les caractéristiques des boues, du sol et leur aptitude à l'épandage, sur les modalités techniques de la mise en œuvre (les périodes et les matériels d'épandage, conditions de stockage).
Cette étude justifie du respect des conditions édictées par la loi qui impose également que les capacités d'entreposage doivent tenir compte des périodes où l'épandage est interdit (par exemple en hiver) ou impossible (période de sécheresse). L'étude doit également prévoir une autre filière d'élimination en cas d'incident.
- un « **registre d'épandage** ». Il s'agit d'une synthèse des activités d'épandage contenant les parcelles épandues, caractéristiques des boues, des sols, etc., une copie de ce registre doit être transmise au préfet tous les ans et le producteur de boues doit garder ce document pendant dix ans.

Pour les stations d'épuration de plus de 2000 EH (flux de polluant journalier >120kg DBO₅) :

- un **programme prévisionnel annuel**, avant chaque campagne. Il doit préciser les parcelles réceptrices pour la campagne suivante, leurs caractéristiques ainsi que les cultures pratiquées.
- un **bilan annuel de programme d'épandage**, en forme de registre, témoignant d'un suivi continu de la qualité des épandages et des boues, en précisant leurs caractéristiques (surtout leurs teneurs en métaux lourds, en micro-polluants et en micro-organismes pathogènes ainsi que leur intérêt agronomique), leur provenance et leur origine.
Ce registre doit aussi contenir l'accord signé avec l'utilisateur, les quantités de boues concernées et leurs préconisations d'emploi. Il doit également définir les dates d'utilisation, les parcelles réceptrices, etc.

En fonction de la qualité des boues et notamment de leur charge polluante, la fréquence des analyses peut varier. Il est généralement admis qu'après la première année, cette périodicité est réduite de moitié. Par ailleurs, si un mélange de boues est autorisé, ce qui est assez rare, ces analyses sont à effectuer sur les différentes composantes et doivent faire mention de la proportion du mélange.

Enfin, une solution alternative à l'épandage doit être prévue, au cas où l'exploitant aurait à gérer un lot de boues non conforme aux exigences réglementaires d'épandage.

Malgré les coûts croissants de traitement des boues nécessaires à une valorisation agricole, l'épandage reste la filière la plus économe.

Avant d'être épandues, les boues peuvent avoir subi un ou plusieurs traitements (Figure 6).

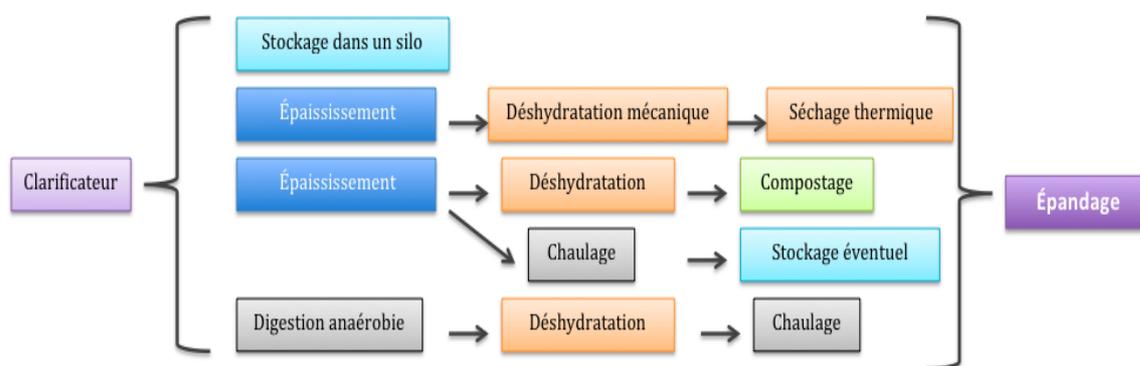


Figure 6 : Différentes étapes de traitement des boues avant épandage

Les boues traitées en vue d'un épandage peuvent être :

- Boues liquides : siccité 2-5%, produites par les petites stations (< 2000EH), elles ont subi un épaississement ou un stockage en silo.
- Boues pâteuses : siccité 15-25%, issues de la digestion biologique, correspondent à des STEP de taille moyenne (65 000-20 000 EH). Elles ont subi une déshydratation sur filtre à bande ou une centrifugation.
- Boues chaulées : siccité 25-30%, ce type de boues peut être pâteux ou solide, produit par des STEP de taille moyenne à grande (20 000-100 000 EH). Elles sont issues d'un chaulage après une déshydratation.
- Boues compostées : siccité 35-70%, issues d'un compostage des boues déshydratées.
- Boues de lagunage : siccité de 10-20%, elles correspondent à une catégorie particulière de boues liquides traitées de façon extensive par des macrophytes.
- Boues solides : résultent d'un traitement par filtre presse ou d'un séchage thermique. Elles sont produites surtout par des grandes STEP (coût de production assez important).



Figure 5 : Épandage agricole

Il existe deux débouchés dérivés de l'épandage agricole : la revégétalisation et les cultures énergétiques.

La **revégétalisation** est encore peu exploitée et reste à développer. Aucun arrêté ne fixe de prescriptions techniques applicables à l'épandage des boues en revégétalisation. Au lieu

d'utiliser des boues traitées comme amendement pour des cultures, les boues sont utilisées comme substrat nourricier sur des sols inertes, érodés ou faiblement végétalisés. Cette technique est préconisée pour permettre la réhabilitation paysagère de sites défrichés stériles tels que les carrières, les décharges, les constructions d'autoroutes ou les travaux de terrassement. L'aménagement des espaces verts urbains est aussi envisageable.

Cette technique est sujette, au sens du décret du code de l'environnement, aux mêmes dispositions que celles de l'épandage agricole, mais elle est inscrite dans un cadre différent. Le but de ce procédé n'est pas d'optimiser la production végétale mais plutôt d'assurer un développement durable des plantes.

Encore peu développée, la méthode des **cultures énergétiques** filtrantes consiste à épandre des eaux usées ou des boues brutes sur des sylvicultures de saules qui tiendront lieu de biofiltres (en particulier pour les métaux lourds) et seront ensuite valorisés sous forme de bois-énergie. Les cultures de Taillis en très Courte Rotation (TtCR) sont notamment développées par la société Bionis Environnement.

L'épandage des boues présente des avantages agronomiques : les boues de STEP sont riches en éléments fertilisants (N et P). En effet, dans les boues liquides, la plupart de l'azote se trouve sous forme d'ammonium qui est facilement assimilé par les végétaux. Dans les boues pâteuses et solides, l'azote est sous forme organique et sera disponible à long terme. De plus, l'apport de phosphore par les boues est très important, quasiment égal à celui des engrais chimiques.

Malgré les intérêts qu'elle présente, cette valorisation a des limites. Elle est assez mal acceptée par le grand public à cause de la présence des ETM, des CTO et les germes pathogènes dans les boues.

Valorisation sous forme de compost

Comme indiqué précédemment, le compostage est d'abord un procédé de stabilisation de la matière organique puis un procédé de valorisation organique produisant un compost soumis aux mêmes contraintes réglementaires que l'épandage agricole.

Cependant, le compostage présente plusieurs avantages par rapport à l'épandage après chaulage :

- réduction du volume des boues et de leur teneur en eau,
- réduction des odeurs,
- meilleure maniabilité (meilleure structure que les boues non compostées),
- stabilisation et hygiénisation naturelles sans additifs chimiques,
- plus grand intérêt agronomique (une grande quantité d'humus riche en éléments fertilisants).

La valorisation agricole après compostage est garantie en raison de la qualité du produit final, qui, s'il est commercialisé, peut garantir la rentabilité de l'opération.

A cause d'un rapport trop faible carbone/azote (C/N), et de l'absence d'élément structurant, les boues de STEP ne sont pas compostables seules. Il est donc nécessaire de mélanger les boues avec des déchets verts qui permettent de structurer et d'aérer le substrat, afin d'obtenir un produit final de bonne qualité. Ce procédé nécessite des garanties quant à la qualité et à la quantité des deux flux (déchets verts et boues) afin d'assurer un mélange homogène dans la durée.

L'utilisation du compost fournit aux végétaux un support aéré, un réservoir d'eau et de nutriments. Ceci permet un enracinement important des végétaux, favorise leur productivité et diminue les risques d'érosion.

1.2 Valorisation énergétique

En 2008, environ 19% du tonnage des boues produites en France étaient valorisés par traitement thermique.

Après une première déshydratation, les boues sont incinérées dans des fours spécifiques (solution dédiée) ou peuvent être mélangées avec d'autres déchets tels que des déchets ménagers et traitées dans des installations de traitement thermique de déchets non dangereux.

- Le traitement thermique dédié (mono – incinération)

Les boues déshydratées restent des déchets difficiles à brûler en raison de leur texture compacte et de leur humidité importante (55-70%), donc de faible pouvoir calorifique. Dans ce contexte, les fours traditionnels à grille sont mal adaptés. D'autres procédés de combustion favorisant le brassage et l'oxydation de la matière ont donc été développés.

Il est avantageux de déshydrater préalablement les boues (partiellement) afin d'augmenter leur pouvoir calorifique et de réduire les volumes à traiter. En général, pour des raisons techniques (seuil d'auto-combustion) la siccité des boues traitées dans un four spécifique est comprise entre 25 et 45%.

Un des procédés les plus connus est le **four à lit de sable fluidisé** (Figure 7). Les températures de combustion sont généralement comprises entre 850 et 900°C. En sortie de réacteur, du sable chaud est mélangé aux boues, afin de créer une turbulence facilitant la combustion, puis il est réintroduit en bas du réacteur de fluidisation. Le principal intérêt de cette technique réside dans le fait que la combustion est auto-entretenu si les boues ont une siccité supérieure ou égale à 26%.

La chaleur produite dans l'installation peut être valorisée dans un réseau de chaleur, permettant de réduire le coût du fonctionnement de l'usine.

Alors que le traitement thermique dédié n'était autrefois envisageable que pour des stations d'épuration de taille importante (capacité supérieure à 100.000 EH), cette solution peut maintenant être envisagée pour des gisements plus modestes. Malgré tout, le coût de cette filière reste relativement élevé.

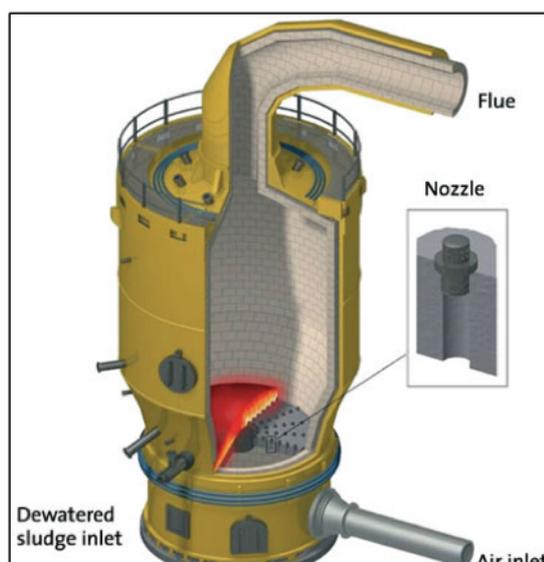


Figure 6 : Exemple de mono-incinérateur Pyrofluid™ (Source : Photothèque VéoliaEau)

- Le co-traitement avec les ordures ménagères

La co-combustion consiste à valoriser thermiquement des boues en utilisant les équipements d'une installation de traitement thermique. Ce procédé est assez performant, mais il est surtout simple et économique, ce qui explique l'intérêt grandissant que lui portent de plus en plus de collectivités. Le coût du co-traitement thermique de boues est en moyenne de 75 €/HT/tMB.

D'un point de vue technique, la capacité de traitement, les proportions du mélange, la composition des déchets ménagers et la composition des boues sont les principaux paramètres dont il faudra tenir compte.

En réalité le co-traitement n'est envisageable que si le four se trouve à proximité des stations d'épuration, afin d'éviter des coûts de transport prohibitifs. Par ailleurs, il est nécessaire d'aménager une zone de stockage bien dimensionnée sur le site de l'UIOM afin de faire face aux variations de flux.

Le four le plus couramment utilisé est le **four à grille**. Les boues peuvent être introduites dans le four sous deux formes : soit elles sont juste déshydratées, soit elles sont pré-séchées. Pour éviter un traitement encore plus coûteux des fumées, il est préférable de "filer" doucement, au travers d'injecteurs, pulvériser et projeter les boues brutes au lieu de les émettre. Ce procédé permet de concentrer les résidus dans les mâchefers et non dans les cendres volantes. De même, il est préférable de traiter des boues séchées en granulés plutôt que pulvérulentes.

Il est généralement convenu, pour des raisons techniques, que la siccité des boues pâteuses éliminées par co-traitement thermique doit être comprise entre 15 et 35%. Il est également admis que le taux de matière organique doit être supérieur à 40%.

Un **procédé alternatif** consiste à sécher intensément une partie des boues (préalablement déshydratées à 35%) jusqu'à 95% de MS pour, ensuite, la mélanger à l'autre partie non séchée et obtenir ainsi une siccité moyenne d'environ 65% aisément transformable en granulés. Une partie de ces granulés est envoyée dans les fours alors que l'autre partie est orientée vers le sécheur pour fabriquer des boues à 95% de siccité.

L'intérêt principal du traitement thermique des boues de STEP est tout d'abord de transformer les boues en cendres, avec une réduction de volume d'environ 90%. Ce produit représente un déchet ultime qui sera stocké. De plus, la combustion des boues offre une possibilité de valorisation énergétique des boues, surtout dans les fours de capacité importante.

1.3 Stockage en ISDND

Le stockage en ISDND représentait 8% du tonnage des boues produites en France en 2008. L'intérêt de cette voie d'élimination réside dans la valorisation éventuelle du biogaz produit par la fermentation anaérobie des boues dans l'ISDND.

Malgré une **déshydratation à 30 % obligatoire** et une réglementation plus stricte de l'enfouissement⁷, cette option reste une voie d'élimination peu onéreuse. Le coût d'évacuation pourrait néanmoins augmenter fortement lorsqu'il s'agira de stabiliser totalement les boues pour pouvoir les stocker. Le coût dépend également de la distance entre la station d'épuration et la distance séparant la STEP de l'ISDND.

A retenir

Cette voie doit être considérée comme une solution légitime mais de dernier recours d'élimination. De plus, la Directive européenne 91/271 du 21 mai 1991 « interdit la mise en décharge des déchets n'étant pas considérés comme des déchets ultimes ou contenant plus de 70 % d'eau et plus de 10 à 20 % de matière organique ». L'échéance a été prévue pour juillet 2002, mais n'a pas pu être respectée en France ni dans les autres pays européens. Une autre directive européenne, du 26 avril 1999, a donc planifié la **réduction progressive de la mise en décharge des déchets municipaux biodégradables jusqu'en 2015**.

⁷ Voir « Cadre juridique de la gestion des boues de STEP »

Le schéma ci dessous (figure 8) présente une vue globale des techniques de traitement sur STEP et les destinations des boues traitées

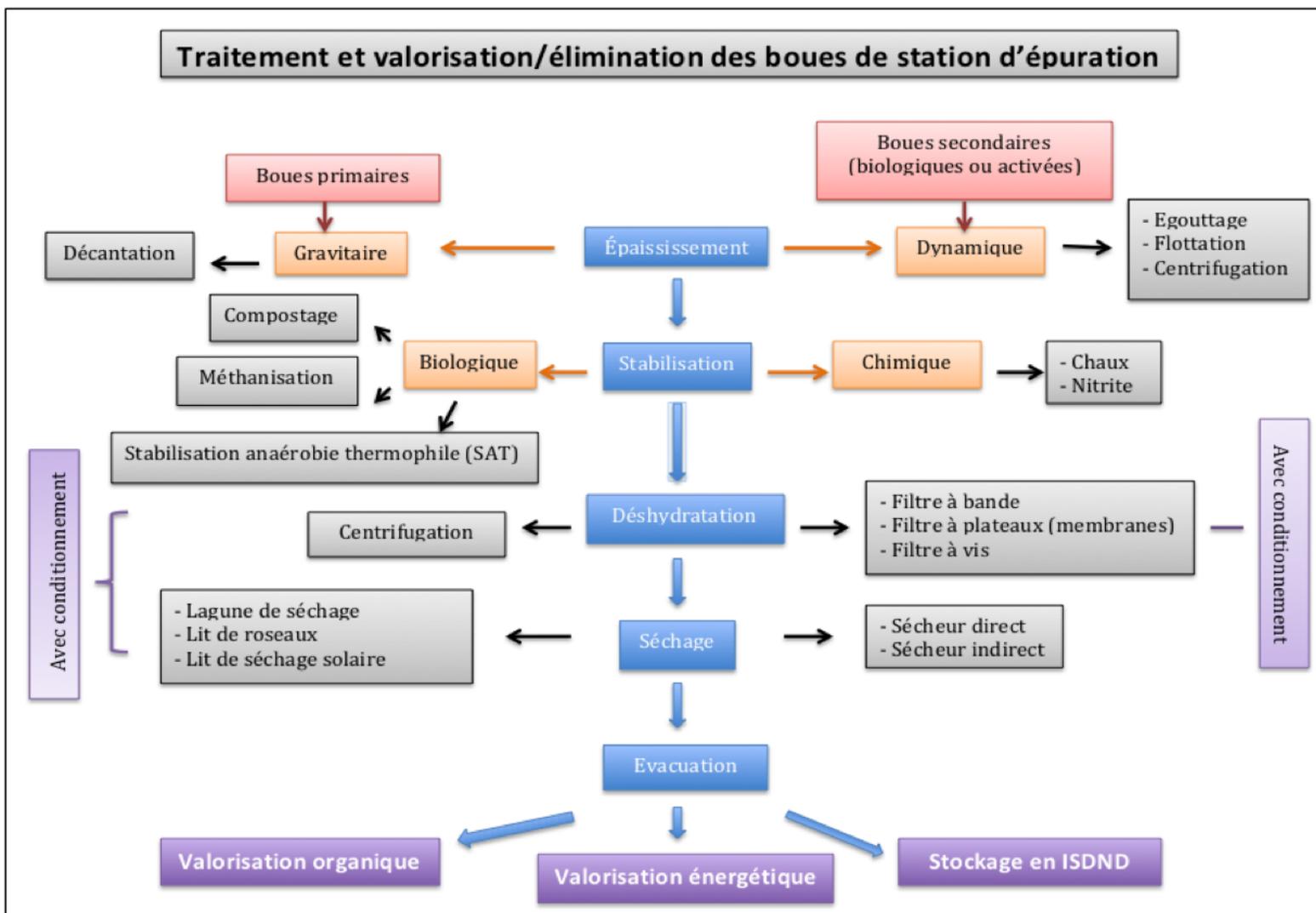


Figure 7: Techniques de traitement des boues et leurs destinations

2 Solutions alternatives

2.1 L'oxydation par voie humide (OVH)

L'oxydation par voie humide consiste à traiter thermiquement des boues en s'affranchissant des étapes de déshydratation et de séchage. Il s'agit de chauffer les boues à 200-250°C, sous pression (jusqu'à 50 bars) et en présence d'oxygène pur, pour éviter une évaporation de l'eau. Le temps de séjour varie entre 30 et 60 minutes. La réaction détruit jusqu'à 95% de la matière organique en la transformant principalement en dioxyde de carbone et en ammoniac.

On obtient ainsi :

- une solution aqueuse, renvoyée en tête de station pour être recyclée,
- des gaz de combustion traités ultérieurement dans un réacteur catalytique,
- un résidu solide minéral à 50% de siccité contenant moins de 5% de MO.

Cette technique permet de traiter des boues sortant directement de l'épaississeur (siccité inférieure à 10%).

Elle présente également les avantages :

- de simplifier le traitement de l'air par rapport à l'incinération (diminution de moitié des émissions de CO₂ et de fumées dépourvues de poussières, de métaux lourds et de dioxines),
- d'être bien adaptée aux stations de capacité moyenne (50 000 à 150 000 EH).

Le coût moyen de cette technique en cours de développement est d'environ 50€/t de boues brutes.

2.2 La co-combustion en cimenterie

Encore au stade expérimental, cette technique offre une possibilité d'élimination des boues d'épuration déshydratées ou séchées. En effet, les boues de siccité supérieure à 90% ont un pouvoir calorifique important (de 10 à 12 MJ/kg). Elles peuvent donc être utilisées comme combustible et remplacer une partie de la consommation en énergie fossile. De plus, la chaleur produite par le processus peut être utilisée pour le séchage des boues.

Cependant, pour pouvoir profiter de cette chaleur, la station d'épuration doit être à proximité de la cimenterie. En outre, la teneur en phosphore des boues peut être un élément limitant de cette technique. En effet, une teneur supérieure à 0,5% de phosphore peut entraîner une diminution de la résistance mécanique.

2.3 La pyrolyse ou thermolyse

Ce procédé correspond à une dégradation des boues séchées en l'absence d'air (O₂ < 2%) et à une température comprise entre 400 et 700°C. A la fin de ce procédé, un gaz combustible et un composé solide (cendres), aussi appelé « coke », sont obtenus.

Le gaz récupéré peut être réutilisé comme une source d'énergie, mais il nécessite une structure supplémentaire pour exploiter le potentiel énergétique de ces gaz formés.

2.4 La technique mycélienne

Cette technique consiste à utiliser un cocktail de certaines souches mycéliennes (moisissures), pour une réduction naturelle du volume de boues. La matière réduite est transformée sous forme d'eau et d'élément gazeux, sans générer de pollution.

Le mélange mycélien est adapté à l'installation et élaboré *in situ* dans un bioréacteur. Ce dernier alimente automatiquement les cuves de traitement aérobie et il permet l'auto-entretien des espèces ainsi que leur bio-augmentation. Le temps de séjour dans la cuve est d'environ 5 à 10 jours minimum avec 1-3 mg d'oxygène dissous par litre.

2.5 La gazéification

La gazéification consiste à convertir à forte température (900-1100°C) une énergie contenue dans un matériau solide en un résidu inerte et un gaz calorifique valorisable sous forme de chaleur ou d'électricité, avec des rendements énergétiques et un bilan environnemental favorables.

Cependant, cette technique nécessite des boues préalablement séchées à 90%, ce qui grève pour le moment le coût de cette solution alternative.

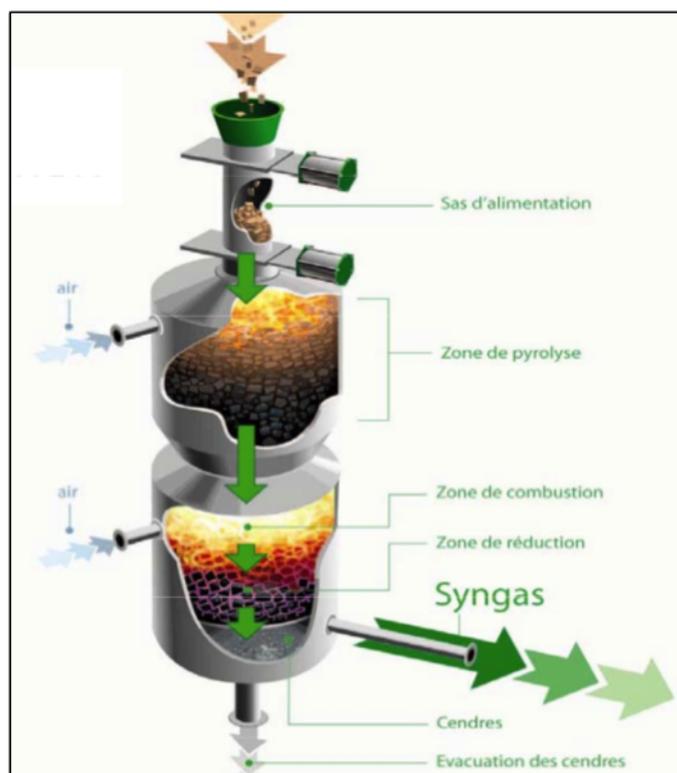


Figure 8 : Exemple de gazéification des boues (NOTAR, Xylowatt)

PERSPECTIVES

Des chercheurs de Veolia Eau ont lancé en 2010 un programme de recherche sur la fabrication de plastique biodégradable à partir des boues de STEP. La première expérience a été effectuée à l'usine d'AQUIRIS à Bruxelles. En effet, certaines bactéries présentes dans les boues ont la capacité de produire des PHA (polyhydroxyalcanoate, molécule de plastique biodégradable) en cas d'absence de nutriments.

Un kilogramme de DCO (Demande Chimique en Oxygène) peut ainsi produire 0,15kg de PHA, le rendement pouvant sûrement être augmenté avec l'évolution de la technique.

CONCLUSION

Le traitement des eaux usées conduit à la production de boues, qui contiennent des composés inertes et organiques, des polluants et des pathogènes. Un traitement adapté et performant de ces boues est donc indispensable pour maîtriser de façon globale l'assainissement des eaux usées.

D'importants progrès technologiques ont ainsi été réalisés au cours des quinze dernières années, au niveau du traitement des boues. Il s'agit en effet de pouvoir adapter les procédés aux conditions les plus variées (traitement d'effluents industriels sur la STEP, mélange avec des eaux pluviales, présence de composés pharmaceutiques dans les eaux usées, ...).

Dans tous les cas, le choix de filières de valorisation ou d'élimination des boues produites doit prendre en compte l'existence et la pérennité des débouchés potentiels, notamment pour l'épandage, et essayer de mutualiser les équipements de traitement des déchets existants sur le territoire (plateforme de compostage, unité de valorisation énergétique à proximité, ...) Cependant, il faut également tenir compte des évolutions réglementaires, françaises et européennes, qui peuvent créer de nouvelles contraintes, ayant des impacts sur le coût de l'assainissement.

Le développement d'une démarche de prévention efficace dans les réseaux d'assainissement permettrait par ailleurs de produire des boues moins polluées, donc plus faciles à traiter et à valoriser en agriculture. En effet, il est préférable de réduire à la source les éléments indésirables des eaux, donc des boues, plutôt que d'adopter des traitements de plus en plus lourds.

La maîtrise de l'assainissement des eaux usées et de la valorisation des boues n'est en fait possible que si tous les acteurs du secteur, usagés, collectivités, industriels, organismes nationaux et européens, entretiennent une logique partenariale de concertation et de responsabilités partagées.

GLOSSAIRE

B

Boue biologique : boue provenant d'un traitement biologique.

Boue fraîche : boue non stabilisée.

Boue hygiénisée : boue traitée pour inactiver les parasites et les micro-organismes pathogènes ou à en réduire la quantité.

Boue physico-chimique : boue provenant d'un traitement physico-chimique de précipitation.

Boue primaire : boue issue du décanteur primaire.

Boue secondaire : boue issue d'un traitement secondaire.

Boue stabilisée : boue dont la tendance à se dégrader est maintenue en dessous d'un niveau défini.

C

Chaux vive : Le principal constituant de la **chaux vive** est l'oxyde de calcium, qui a pour formule CaO.

Chaux éteinte : Hydroxyde de calcium, Ca(OH)₂

CTO : Composé Trace Organique

D

DCO : Demande Chimique en Oxygène

E

EH : Équivalent Habitant

ET : Élément Trace

ETM : Élément Trace Métallique (anciennement métaux lourds),

Etat de la matière dans l'eau : Dissoute, colloïdale, en suspension (ou MES).

Etat de l'eau dans la matière solide : libre, interstitielle (liée à la structure de la matière), constitutive (intégrée dans la matière).

H

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

I

ISDND : Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux

M

Macrophyte : Végétal de grande taille peuplant les écosystèmes aquatiques.

MES : Matière En Suspension
MO : Matière Organique
MF : Matière Fertilisante
MV (S) : Matière Volatile (sèche)

O

OVH : Oxydation par Voie Humide

P

PHA : Polyhydroxyalcanoate

S

SAT : Stabilisation Aérobie Thermophile

STEP : Station d'épuration

Siccité : Quantité de solide restant après un chauffage à 110° C pendant 2 heures. Elle s'exprime en %. Siccité = $MS \cdot 100 / \text{production de boues}$

T

tMS : Tonne de Matière Sèche

U

UIOM : Usine d'Incinération des Ordures Ménagères

BIBLIOGRAPHIE :

Ouvrages :

ADEME, *Le Compostage des Déchets Organiques Municipaux*, mars 1997

AFNOR, *La Filière des Boues*, 1999

AMORCE, *Valorisation du Biogaz*, juillet 1998

Boeglin J.C., *Traitements et destinations finales des boues résiduelles*, 2000, [en ligne] disponible sur <<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/genie-des-procedes-et-protection-de-l-environnement-42327210/traitements-et-destinations-finales-des-boues-residuelles-j3944/>>, consulté le 19/04/2012

Brison C., *Le séchage solaire des boues : État actuel de l'art et retours d'expérience*, [en ligne] disponible sur <www.fndae.fr/documentation/PDF/fndae_36_chap_1_2.pdf>, consulté le 20/04/2012

Commission of the European Communities, *Report from the commission to the council, the european parliament, the european economic and social committee and the committee of the regions-Implementation of Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment, as amended by Commission Directive 98/15/EC of 27 February 1998*, 2004, p32, [en ligne] disponible sur <eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/com/2004/com2004_0248en01.pdf>, consulté le 25/04/2012

Déléry L et al., *Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues de station d'épuration – Introduction générale*, 2007, p10,11

European commission-Environment, *Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land-Final Report-Part III: Project Interim Reports*, 2010, p1, 2, [en ligne] disponible sur <ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/part_iii_report.pdf>

Favreau G., *Traitement et valorisation des boues de station d'épuration*, 2011, [en ligne] disponible sur <www.cr-champagne-ardenne.fr/getFile.aspx?FILEID=5933>, consulté le 23/04/2012

Gaid A., *Traitement des boues*, 2008, [en ligne] disponible sur <<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/genie-civil-gestion-de-l-eau-42234210/traitement-des-boues-c5221/>>, consulté le 19/04/2012

GMF GOUDA Processing Solutions, *Sludge treatment for cement factories*, [en ligne] disponible sur <www.gmfgouda.com/uploads/docs/GMF_leaflet_Cement_dryer_EN_Gindd.Pdf>, consulté le 23/04/2012

Grosclaude G., *Un point sur...L'eau - Tome II - Usages et Polluants*, INRA, Paris 1999, p187

Guibelin É., *Lutte contre la pollution des eaux - Traitement des boues d'épuration*, 1999, p11
Hocquet C. et Golla G., *Bilan 2008 de l'assainissement en France*, 2010, p3, 13, [en ligne] disponible sur <http://www.eaufrance.fr/spip.php?rubrique188&id_article=854>, consulté le 25/04/2012

Houot S. et al., *Qualité des composts issus de déchets ménagers : apport du site Qualiagro*, 2012

Liénard A. et al., *Traitement des boues par lits plantés de roseaux : rappels des points clefs de cette technique*, [en ligne] disponible sur <<https://epnac.cemagref.fr/documentation/documents-pdf/traitement-des-boues-par-lits-plantes-de-roseaux-rappels-des-points-clefs-de-cette-technique>>, consulté le 20/04/2012

Mouton R., *Le Retour à la Terre des Déchets Organiques*, Chambre d'Agriculture des Bouches-du-Rhône, 1998

Office international de l'eau, Service National d'Information et de Documentation sur l'Eau (SNIDE), *La stabilisation des boues de station d'épuration : techniques de mesure du procédé*, 2001, [en ligne] disponible sur <www.oieau.org/documentation/IMG/pdf/02-StabBoues.pdf>, consulté le 20/04/2012

Petit K., *Actualisation des connaissances sur les éléments biologiques et minéraux persistants dans les boues des station d'épuration. Impacte sur la santé publique*, 2007, p52-62

SYPREA, *Données générales sur l'assainissement*, octobre 2000, p2, [en ligne] disponible sur <www.syprea.org/sites/syprea/-upload-/2122_17249_20060920092456.pdf>, consulté le 20/04/2012

SYPREA, *Le Recyclage Agricole : Enjeux, Contraintes et Avenir*, juillet 1997

Articles de presse :

Dossier Technique Environnement Magazine, *Comment Venir à Bout des Boues ?*, avril 1997

Environnement et Technique, *Vers une Nouvelle Réglementation de la Valorisation Agricole des Boues Urbaines*, novembre 1997

Bermejo M., *Compostage des Boues de Station d'Épuration Urbaine en France*, INSA Toulouse, Sciences et Techniques, 2ème trimestre 1998

Defaye S., *Les Boues d'Épuration Comporte-elles un Risque de Pollution des Sols ? Biomasse Normandie, Environnement et Technique*, juin 1998.

Reverdy A.L., et al., *La méthanisation des boues d'épuration urbaines – état des lieux en France et étant de l'art*, TSM n°5, mai 2012

Présentation des Guides des Bonnes Pratiques pour la Production et l'Utilisation des Boues, CEN/TC 308, TSM n°1, janvier 1999

Site internet :

ACTU-ENVIRONNEMENT, *Station d'épuration : vers une production de bioplastiques en 2020 ?*, [en ligne] disponible sur <<http://www.actu-environnement.com/ae/news/stations-epuration-bioplastiques-boues-PHA-micro-organismes-15454.php4>>, consulté le 09/05/2012

ADEME et CNB, *Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture*, [en ligne] disponible sur <<http://www.ademe.fr/partenaires/boues/default.htm>>, consulté le 23/04/2012

AQUIRIS, *Des eaux usées au plastique biodégradable*, [en ligne] disponible sur <<http://www.aquiris.be/article.php?ident=576>>, consulté le 09/05/2012

INSPIRE, *Transformer les boues d'épuration en plastique biodégradable*, [en ligne] disponible sur <<http://www.inspire-institut.org/transformer-les-boues-depuration-en-plastique-biodegradable.html>>, consulté le 09/05/2012

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, *Portail d'information sur l'assainissement communal*, [en ligne] disponible sur <<http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr>>, consulté le 10/05/2012

Waternunc, *"MYCET TM" UN PROCÉDÉ INNOVANT ET ÉCOLOGIQUE DE RÉDUCTION DES BOUES D'ÉPURATION*, [en ligne] disponible sur <http://www.waternunc.com/fr/saur27_2002>, consulté le 23/04/2012