

# Etude des procédés de séchage des boues urbaines et industrielles





**ETUDE N° 99-0217/1A**

**ÉTUDE DES PROCÉDES DE SECHAGE DES  
BOUES URBAINES ET INDUSTRIELLES**

**RAPPORT FINAL**

**mars 2001**

**P. ARLABOSSE - Ecole Nationale des Mines d'Albi-Carmaux**

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

**RECORD**, Etude des procédés de séchage des boues urbaines et industrielles, 2001, 187 p, n°99-0217/1A.

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

© RECORD, 2001

Etude RECORD n°99-0217/1A

## RÉSUMÉ

Face au durcissement des contraintes d'admission dans la plupart des filières d'élimination et devant une production inévitable et en constante augmentation, il est nécessaire de trouver des solutions pour réduire les volumes de boues produites mais aussi pour valoriser ce déchet. Le séchage est une opération qui permet de réduire de façon considérable le volume de la boue mais aussi de préserver l'ensemble des possibilités d'élimination dans les principales filières actuelles. Néanmoins, le paradoxe repose dans le fait d'appliquer une technique coûteuse et techniquement assez sophistiquée à un déchet.

L'étude réalisée par l'École des Mines d'Albi Carmaux a permis de réaliser un inventaire des différentes technologies disponibles sur le marché pour sécher les boues résiduaires, qu'elles soient urbaines ou industrielles. Jusqu'à un passé récent, le séchage de boues a été un problème de transfert de technologies existantes, appliquées dans le domaine de l'agroalimentaire ou de la chimie. Ceci explique que l'on retrouve la plupart des procédés classiques de séchage. Après avoir décrit le principe de fonctionnement de ces séchoirs, leurs performances ont été comparées. Le nombre de références de ces séchoirs dans le domaine des boues résiduaires a aussi été recensé dans la mesure du possible.

Dans la seconde partie de cette étude, un état de l'art des recherches en cours est proposé. L'objectif de cette synthèse bibliographique est de mettre en évidence le développement de nouvelles solutions spécialement développées pour les boues résiduaires ou au contraire de mettre en évidence les verrous scientifiques et les manques à combler. Un nombre restreint d'équipes travaillant dans cette thématique a été recensé. Les travaux restent très appliqués : ils se concentrent sur la détermination des cinétiques de séchage dans un procédé donné et sur l'étude de l'influence des conditions opératoires. Une nouvelle voie de recherche concerne l'intégration de techniques de séchage dans un matériel de séparation mécanique.

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
<b>CHAPITRE 1 : La place du séchage dans le traitement des boues .....</b>	<b>6</b>
I. Les boues résiduelles .....	7
II. Des classifications .....	7
II.1 Classification en fonction de l'origine de l'effluent.....	8
II.2 Classification en fonction de la nature de la matrice solide.....	9
II.3 Classification en fonction de l'état physique de la boue .....	10
II.4 Classification en fonction de la nature de la liaison eau/matrice solide.....	10
II.5 Classification en fonction du traitement utilisé pour l'épuration des eaux usées urbaines ...	12
II.6 Conclusions sur les classifications disponibles.....	13
III. La production française et les filières d'élimination.....	14
III.1 Production de boues urbaines : tonnage et filières d'élimination.....	14
III.2 Production de boues industrielles .....	20
IV. Les filières actuelles d'élimination : leurs réglementations et leurs coûts .....	22
IV.1 Législation applicable aux boues urbaines.....	23
IV.1.1 L'épandage.....	23
IV.1.1.1 Les grandes lignes de l'ancienne législation.....	23
IV.1.1.2 Les limites de l'ancienne législation.....	25
IV.1.1.3 La nouvelle législation.....	25
IV.1.1.4 Les délais et l'évolution probable de cette réglementation.....	29
IV.1.2 La mise en décharge.....	30
IV.1.2.1 La législation en vigueur.....	30
IV.1.2.2 L'évolution probable de cette réglementation .....	31
IV.1.3 L'incinération.....	31
IV.1.3.1 La législation en vigueur.....	31
IV.1.3.2 L'évolution probable de cette réglementation .....	33
IV.1.4 Le compostage.....	34
IV.1.5 Coûts des filières d'élimination des boues urbaines.....	34
IV.2 Législation applicable aux boues industrielles.....	40
IV.2.1 L'épandage .....	40
IV.2.2 La mise en décharge.....	41
IV.2.2.1 Législation en vigueur .....	41
IV.2.2.2 Evolution probable de la législation .....	42
IV.2.3 L'incinération.....	42
IV.3 Synthèse.....	43
VI. Le séchage des boues.....	44
VI.1 Faut-il sécher les boues ?.....	45
VI.2 Comment sécher les boues ? .....	47
VII. Conclusion.....	48
<b>CHAPITRE 2 : Les procédés de séchage des boues.....</b>	<b>49</b>
I. L'installation de séchage des boues .....	49
I.1 La place du séchage dans la filière boue.....	49
I.2 Éléments principaux d'un poste de séchage .....	51
I.3 Quelques définitions.....	53
II. Les séchoirs indirects.....	55
II.1 Les différentes technologies de séchage indirect disponibles .....	57
II.1.1 Les séchoirs à disques.....	59
II.1.2 Les séchoirs à palettes, les séchoirs malaxeurs.....	62
II.1.3 Les séchoirs à couche mince.....	64
II.1.4 Les séchoirs indirects à tambour rotatif.....	67
II.1.5 Autres séchoirs indirects.....	69
II.1.5.1 Les procédés couplant la déshydratation mécanique et le séchage indirect.....	70
II.1.5.2 Les séchoirs à plateaux.....	71
II.1.5.3 Les séchoirs sous vide.....	72
II.1.5.4 Les séchoirs radiatifs.....	73
II.2 Comparaison des différentes classes de séchoirs indirects.....	74
II.2.1 Temps de séjour.....	75
II.2.2 Consommation spécifique.....	76

II.2.3 Capacité évaporatoire spécifique.....	79
II.3 Conclusion sur les technologies de séchage indirect.....	80
III. Les séchoirs directs.....	81
III.1 Les différentes technologies de séchage direct disponibles.....	81
III.1.1 Les séchoirs directs à tambour rotatif.....	83
III.1.3 Les séchoirs à bandes.....	85
III.1.2 Les séchoirs à transport pneumatique.....	87
III.1.3.1 Les séchoirs à lit fluidisé.....	88
III.1.3.1 Les séchoirs flash (ou atomiseurs).....	89
III.1.4 Autres types de séchoirs.....	90
III.1.4.1 Les séchoirs solaires.....	91
III.1.4.2 Les séchoirs convectifs batch ou continu.....	92
III.2 Comparaison des différentes classes de séchoirs directs.....	95
III.2.1 Temps de séjour.....	95
III.2.2 Consommation spécifique.....	96
III.3 Conclusion sur les technologies de séchage direct.....	98
IV. Les séchoirs mixtes.....	98
IV.1 Les séchoirs associant transferts de chaleur par rayonnement et par convection.....	99
IV.2 Les séchoirs associant transferts de chaleur par conduction et par convection.....	100
IV.2.1 Séchoirs s'apparentant à des lits fluidisés à échangeurs embarqués.....	100
IV.2.2 Séchoirs s'apparentant à séchoirs à palettes avec circulation d'air.....	101
V. Synthèse.....	103
V.1 Principaux avantages et inconvénients des séchoirs directs et indirects.....	103
V.2 L'avenir est-il aux procédés de séchage direct ou indirect ?.....	104
V.3 Coût du séchage par poste.....	105
<b>CHAPITRE 3 : Les activités de recherche.....</b>	<b>108</b>
I. Les recherches en cours sur les procédés de séchage direct appliqués aux boues.....	109
I.1 Activités du Laboratoire de Génie des Procédés de Pau sur le séchage des boues.....	110
I.2 Activités des Laboratoires de Génie Chimique de Liège sur le séchage des boues.....	112
I.3 Activités du CANMET sur le séchage des boues.....	115
I.3.1 Séchoir à lit à jet rapide.....	115
I.3.2 Séchoir à lit fluidisé pulsé.....	117
II. Les recherches en cours sur les procédés de séchage indirect appliqués aux boues.....	118
II.1 Le séchage en couche mince.....	119
II.2 Le séchage par contact avec agitation.....	121
III. Les recherches en cours sur les procédés dits "hybrides" appliqués aux boues.....	125
III.1 Travaux réalisés par l'Université de Karlsruhe.....	125
III.2 Travaux réalisés par l'Université de Dortmund.....	127
III.3 Travaux en cours à l'Institut Scientifique et Technique du Papier.....	128
III.4 Travaux en cours au niveau français.....	130
IV. Conclusion.....	132
<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>135</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>141</b>
<b>ANNEXE 1 : Liste des figures.....</b>	<b>148</b>
<b>ANNEXE 2 : Liste des tableaux.....</b>	<b>151</b>
<b>ANNEXE 3 : Liste des personnes contactées pour la production de boues.....</b>	<b>153</b>
<b>ANNEXE 4 : Liste des principaux constructeurs de séchoirs.....</b>	<b>154</b>
<b>ANNEXE 5: Questionnaire envoyé pour la présente enquête.....</b>	<b>160</b>
<b>ANNEXE 6 : Base de données.....</b>	<b>164</b>
Séchoirs indirects.....	165
Séchoirs directs.....	175
<b>ANNEXE 7 : Liste des équipes de recherche.....</b>	<b>183</b>

## INTRODUCTION

Les boues sont le résultat (déchet, sous-produit, co-produit ?) du traitement des eaux usées et des effluents liquides, qu'il faut éliminer ou si possible valoriser. La crise actuelle que traverse la filière "boue" est essentiellement liée aux volumes considérables engendrés par :

- ✓ des taux de collecte des eaux usées plus importants résultant de l'application de la directive européenne n°91/271 du 21 mai 1991 [AFN99];
- ✓ la fiabilité des stations d'épuration ;
- ✓ le développement de nouveaux traitements, comme la dénitrification et/ou la déphosphatation, rendus obligatoires pour les agglomérations de plus de 10 000 équivalent-habitants (E.H.) situées en zone sensible. On sait, par exemple, que la dénitrification génère à elle seule une augmentation de 15 à 20 % du volume des boues en matière sèche [PEI97].

La production française de boues de stations d'épuration urbaines est estimée actuellement à un million de tonnes de matières sèches par an et elle devrait augmenter d'environ 20 % à l'horizon 2005. Pour les boues industrielles, le tonnage est beaucoup plus difficile à évaluer, l'ADEME estimait en Mai 1994 à 1,8 millions de tonnes (boues brutes) la production française de boues à caractère " toxique " [NAD00].

A ce jour, la destination finale de ces boues est dans l'ordre décroissant d'importance :

- ✓ l'épandage agricole;
- ✓ l'incinération;
- ✓ la mise en décharge.

Le traitement des boues est un compromis entre ce qui est techniquement faisable, économiquement viable et socialement acceptable. Il est probable, et même certain, que les débouchés actuels seront amenés à évoluer dans les années à venir suite à de nouvelles exigences réglementaires principalement adoptées pour regagner la confiance du grand public. Dans ce contexte, le traitement amont des boues, dont l'objectif

principal est de conditionner les boues recueillies sous une forme compatible avec leur destination finale, devra aussi évoluer. Parmi les différentes techniques de conditionnement utilisables, le séchage thermique présente de nombreux avantages comme la diminution du volume, la réduction des odeurs, le blocage des processus biologiques etc... Mais le coût élevé ainsi que les problèmes technologiques liés à la mise en œuvre des procédés ou les problèmes de sécurité ont constitué des freins importants au développement de cette technique.

Dans ce contexte, la présente étude propose un état de l'art sur le séchage des boues urbaines et industrielles orienté selon deux axes :

- ✓ un axe technologique avec un inventaire des procédés de séchage utilisés pour traiter les boues de stations d'épuration et une estimation des performances de ces séchoirs. Cette étude vise à compléter les travaux réalisés en 1998 par GDF et cofinancés par l'ADEME, l'Agence de l'eau Seine Normandie et GDF [RES98].
- ✓ un axe scientifique faisant le point sur les recherches menées dans le domaine du séchage des boues résiduaires.

Après un recensement des différents types de boues et une estimation de la production française (la liste des personnes contactées étant jointe en Annexe 3), la première partie du présent rapport met en avant l'aspect réglementaire lié aux traitements des boues et aux débouchés. Différents textes sont ainsi examinés et commentés. L'évolution probable de la législation est également évoquée, en particulier la proposition du Parlement européen, en date du 15 mars 2000, sur l'incinération des déchets et l'avis de la commission sur cette proposition, en date du 7 juillet 2000. Ces considérations permettent de mettre en évidence l'intérêt d'une étape intermédiaire de séchage thermique dans le traitement des boues résiduaires.

La seconde partie présente les technologies disponibles pour sécher les boues résiduaires urbaines et industrielles. Les procédés disponibles sur le marché pour traiter les boues résiduaires ont été regroupés par catégories. Pour chaque catégorie de séchoirs, nous proposons une description du principe général de fonctionnement et nous mettons en évidence les principales différences entre les séchoirs. Une étude des performances de ces différents procédés est ensuite proposée. Une liste non exhaustive de constructeurs

de séchoir est proposée en Annexe 4. Le questionnaire envoyé, dans le cadre de cette enquête, aux constructeurs et à certains gestionnaires de stations d'épuration est joint en Annexe 5. Une base de données, répertoriant les caractéristiques spécifiques au séchoir, les performances en termes de siccité, de la consommation énergétique etc..., est disponible en Annexe 6.

La troisième partie est consacrée aux recherches en cours dans le domaine de la conception de nouveaux procédés de séchage ou de l'optimisation de procédés existants. Ce chapitre débute par l'identification des équipes travaillant dans ces domaines et se poursuit par la synthèse de leurs activités de recherche.

La dernière partie de ce rapport propose une conclusion sur les différentes techniques de séchage et sur les verrous scientifiques identifiés au cours de cette état de l'art.

## **CHAPITRE 1 : La place du séchage dans le traitement des boues**

Avant de nous intéresser spécifiquement au séchage des boues résiduaires, il paraît important de présenter la problématique générale du traitement des boues en France. Le mot boue est un terme générique qui englobe à la fois les résidus de l'épuration des eaux urbaines ou industrielles et les boues de process de fabrication. Dans cette étude, nous nous limiterons aux résidus de l'épuration des eaux.

Nous ne reviendrons pas sur les différentes étapes du traitement des eaux usées dans une station d'épuration, le lecteur intéressé trouvera à ce sujet des descriptions détaillées dans [DEG89] et [OTV97]. Mais, nous présenterons les principales classifications disponibles et leur intérêt par rapport à une étape de séchage.

A l'issue de cette revue des différentes classifications disponibles, nous ferons le point dans la seconde partie de ce chapitre sur la production française de boues urbaines et industrielles ainsi que sur les filières d'élimination principalement retenues.

Le contexte législatif conditionnant fortement le choix des filières d'élimination et devenant de plus en plus contraignant sous la pression notamment de l'opinion publique, nous reviendrons dans la troisième partie sur la réglementation actuelle. Successivement pour les boues urbaines puis pour les boues industrielles, nous rappellerons les principaux textes en vigueur, filière par filière, et nous évoquerons leurs évolutions probables. Nous verrons comment ces nouvelles législations sur le traitement des eaux usées et sur les filières d'élimination vont conduire à l'émergence de solutions techniques nouvelles et vont imposer dans un futur proche de s'orienter vers une logique de valorisation.

Dans ce contexte, le séchage thermique se positionne comme une étape intermédiaire dans la filière de traitement de la boue avant une valorisation énergétique ou matière ou avant un stockage. Les avantages du séchage par rapport à la problématique des boues ainsi que les contraintes techniques et pratiques liées aux attentes des différents acteurs du secteur seront présentées dans la dernière partie de ce chapitre.

## **I. Les boues résiduaires**

Selon l'approche choisie, plusieurs définitions peuvent être proposées :

- ✓ du point de vue de l'assainissement, les boues résiduaires correspondent au résidu issu de la séparation liquide – solide, à la sortie immédiate des unités de décantation et de clarification du traitement de l'eau ;
- ✓ du point de vue de la législation, au sens de l'article 1 de la loi n°75-633 du 15 Juillet 1975 [AFN99], "est un déchet tout résidu d'un processus de production, de transformation, d'utilisation que son détenteur destine à l'abandon". Ainsi, les sous produits du traitement de l'eau et de l'assainissement entrent dans le champ d'application de cette loi ;
- ✓ enfin, certaines boues pourraient être définies non plus comme des sous-produits ou des déchets mais comme des co-produits. Citons le cas du compost de Castelnaudary qui a reçu une homologation et qui peut être épandu sans aucune contrainte.

Bien qu'elle puisse avoir différents aspects (liquide, pâteux ...), la boue peut contenir jusqu'à 90% d'eau. De manière générale, on peut la considérer comme une suspension de particules solides en milieu aqueux.

## **II. Des classifications ...**

Il n'existe pas de classification unanimement reconnue pour les boues résiduaires. Outre la distinction communément utilisée entre boues urbaines et boues industrielles, il est possible de classer les boues résiduaires en fonction de la nature de la matière solide, de leur apparence physique, de la liaison eau / matrice solide ou du traitement mis en œuvre (cette dernière étant spécifique aux boues urbaines)... Nous ne décrivons dans la suite que brièvement ces diverses classifications.

## II.1 Classification en fonction de l'origine de l'effluent

Deux grandes familles de boues existent : les boues *urbaines*, issues de stations d'épuration de collectivités, et les boues *industrielles*, issues de stations d'épuration appartenant à des industriels.

Néanmoins, certains facteurs, comme le raccordement de petites industries, de commerçants, d'artisans etc... au réseau urbain ou l'absence d'un réseau de collecte séparatif pour les eaux de ruissellement, peuvent modifier les caractéristiques des eaux résiduaires urbaines, il convient donc de rester vigilant sur la dichotomie un peu simpliste "rejets domestiques-rejets industriels". Ainsi, sur le plan réglementaire, les stations d'épuration de collectivités qui traitent une part prépondérante d'effluents provenant d'installation(s) classée(s) sont considérées comme des installations classées au titre de la protection de l'environnement et dépendent de la DRIRE.

Dans la suite de ce rapport, et en particulier dans la partie consacrée à l'évaluation de la production de boues, il faudra garder à l'esprit qu'une part conséquente, mais encore mal évaluée, des effluents provenant de petites industries, de commerçants, etc..., raccordés au réseau urbain est traitée dans les stations d'épuration du réseau urbain et est donc comptabilisée dans la catégorie des boues urbaines.

Pour les boues industrielles, dix classes ont été répertoriées par les divers organismes impliqués dans la gestion et le contrôle des déchets (Ministère de l'Environnement, Agences de Bassin, ADEME, DRIRE ...) selon l'activité de l'entreprise qui la produit. Une partie de ces boues figurent sur la liste des déchets dangereux, publiées en Annexe II du décret n°97-517. Rappelons que l'annexe I de ce même décret définit les propriétés de danger des déchets. En particulier « est dangereuse pour l'environnement une substance ou une préparation qui présente ou peut présenter des risques immédiats ou différés pour une ou plusieurs composantes de l'environnement ». Ainsi, une boue provenant d'une industrie agroalimentaire ne présente généralement pas le même caractère de dangerosité qu'une boue de traitement de surface ou de rectification. Parmi la diversité des boues industrielles, certaines peuvent ainsi être assimilées aux boues urbaines.

## II.2 Classification en fonction de la nature de la matrice solide

Selon la nature des matières solides (organiques ou minérales) qui composent les boues et selon les affinités de ces matières solides avec l'eau qu'elles contiennent (hydrophiles ou hydrophobes), une première classification des boues résiduelles [DEG89] a été proposée. Cette classification est importante puisque la nature de la boue conditionne le choix des procédés à mettre en œuvre au cours du traitement de l'effluent ainsi que durant la phase de déshydratation.

Les différentes classes proposées sont :

- ✓ *Boues organiques hydrophiles* : c'est le type de boues le plus répandu. Ce sont principalement les boues d'industries agroalimentaires, d'industries de chimie organique, d'industries du textile et les boues urbaines. La difficulté à déshydrater ces boues provient de la présence de colloïdes, comme des hydroxydes et des hydrocarbures, très hydrophiles ;
- ✓ *Boues minérales hydrophiles* : ce sont des boues qui proviennent des industries de chimie minérale, de teinturerie, de tannerie et de traitement de surface. Ces boues contiennent principalement des hydroxydes métalliques formés lors de traitements physico-chimiques par précipitation d'ions métalliques présents dans l'eau à traiter ;
- ✓ *Boues minérales hydrophobes* : elles proviennent en grande majorité des industries sidérurgiques. Elles sont surtout composées de particules comme les sables, les limons, les sels cristallisés ... ;
- ✓ *Boues huileuses hydrophiles* : ce type de boues est produit dans les industries du raffinage ou dans les ateliers mécaniques. Ces boues sont caractérisées par la présence de faibles quantités d'huiles ou de graisses. Ces huiles sont en émulsion ou adsorbées aux particules contenues dans la boue ;
- ✓ *Boues huileuses hydrophobes* : ces boues proviennent des industries du laminage et sont caractérisées par des matières sèches denses et bien décantables (battitures et oxydes de fer, par exemple) et par la présence d'huiles et graisses minérales en forte proportion ;
- ✓ *Boues fibreuses* : ces boues sont généralement faciles à déshydrater. Elles sont issues des industries papetières, de la pâte à papier et des cartonneries.

### II.3 Classification en fonction de l'état physique de la boue

L'origine de l'effluent et le traitement suivi par celui-ci, qu'il soit biologique ou physico-chimique, ne sont pas suffisants pour caractériser une boue. Les propriétés mécaniques ou plus précisément leur consistance comptent aussi énormément pour sa manutention ultérieure [BOE99]. Un certain nombre de notions sont utilisables a priori pour décrire l'état physique de la boue et il existe des tests de caractérisation spécifiques permettant de classer une boue parmi les trois états conventionnels suivants :

- ✓ État liquide : la boue s'écoule simplement par gravité ;
- ✓ État plastique : la boue est alors collante ;
- ✓ État solide avec retrait : les boues peuvent être mises en tas sans s'affaisser.

L'état physique d'une boue dépend principalement de sa siccité, qui représente la teneur en matières sèches. Devant la diversité des boues produites, il est difficile de connaître avec exactitude les valeurs limites de siccité pour chaque état physique. Toute tentative de fixer des limites est arbitraire. Le Tableau 1 donne une idée approximative de l'évolution de la consistance de la boue en fonction de sa siccité.

Siccité (%)	< 10 %	10-25 %	25-50 %	> 50 %
État	Liquide	Pâteuse	Solide	Granulaire

Tableau 1 - Etat physique de la boue résiduaire en fonction de sa siccité [IFT95]

### II.4 Classification en fonction de la nature de la liaison eau/matrice solide

Nous venons de voir que la siccité de la boue a une influence sur sa consistance. La proportion d'eau dans la boue et, plus exactement, la manière dont cette eau est liée avec le système complexe, formé de matières organiques et/ou minérales, joue un rôle par rapport à la séparation liquide-solide. Le concept de liaison de l'eau à la matrice solide est encore mal défini et plusieurs classifications ont été proposées. Les plus simples distinguent l'eau libre de l'eau dite liée, puis divisent cette dernière catégorie en diverses sous classes selon l'intensité des forces d'interactions eau / particules solides. On trouve

ainsi (cf. [TSA90]) l'eau interstitielle, l'eau de surface et l'eau chimiquement liée, comme présenté sur la Figure 1.

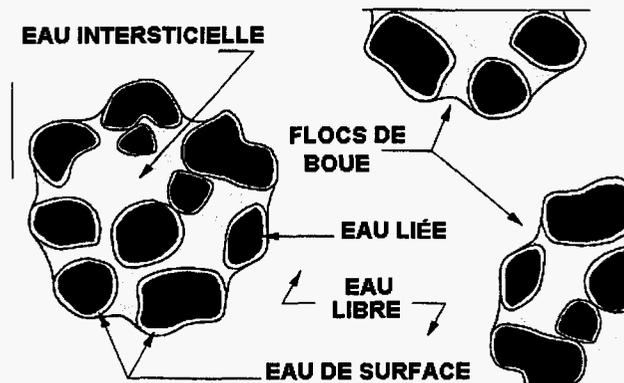


Figure 1 - Répartition de l'eau dans une boue [TSA90]

L'eau libre, qui représente la part la plus importante de l'eau dans la boue, se comporte thermodynamiquement comme de l'eau pure : sa tension de vapeur, par exemple, correspond pour chaque température à la saturation. L'eau interstitielle, qui correspond à l'eau fixée entre les flocons et dont la tension de vapeur est plus faible, peut aussi être considérée comme libre puisqu'elle est éliminée par déshydratation mécanique. L'eau de surface est absorbée ou fortement adsorbée sur les particules solides et peut être éliminée par électro-osmose ou par séchage thermique. Enfin, l'eau liée est chimiquement attachée par des liaisons très fortes aux bactéries et autres particules et ne peut être enlevée que par séchage thermique à des températures supérieures à 105°C.

Cette notion d'eau libre / eau liée ne sera pas développée de manière plus approfondie dans ce rapport. Signalons néanmoins qu'une abondante littérature est disponible sur la caractérisation de la nature de l'eau dans la boue et que cette notion permettra peut-être, dans un futur proche, de proposer une classification pour caractériser l'aptitude de la boue au séchage. A ce jour, on s'aperçoit ([ROB92] et [LEE95]) que la teneur en eau libre généralement rapportée est une grandeur qui dépend de la technique de mesure retenue. Les méthodes classiquement utilisées reposent sur des concepts physiques, comme, par exemple, des températures de congélation différentes selon la nature de l'eau pour la dilatométrie. Ces méthodes reviennent à imposer indirectement des seuils, différents selon la technique utilisée, au niveau de l'énergie de liaison entre la matrice solide et l'eau. Si l'eau a une énergie de liaison inférieure à ce seuil, elle est qualifiée de libre. C'est pourquoi de multiples classifications "discrètes" ont été proposées dans la

littérature. Chen et al. [CHE97] proposent d'utiliser l'énergie de liaison entre la matière solide et l'eau comme index pertinent physiquement pour établir une classification "continue" capable de donner une information globale sur la distribution de l'humidité dans la boue et d'expliquer les différentes teneurs en eau libre rapportées dans la littérature. Cette voie semble prometteuse.

## II.5 Classification en fonction du traitement utilisé pour l'épuration des eaux usées urbaines

La dernière classification proposée a été spécifiquement établie pour les boues urbaines [OTV97] et permet de relier la traitabilité des boues au traitement subi par les eaux usées. Les différentes classes de boues sont présentées dans le Tableau 2 :

<i>Classe A</i>	<i>Classe B1</i>	<i>Classe B2</i>	<i>Classe C</i>	<i>Classe D</i>
- Boues primaires - Boues primaires physico chimiques	- Boues biologiques en eau brute	- Boues biologiques en eau décantée	- Boues mixtes	- Boues stabilisées biologiquement
§ boues de forte et très forte charge	§ boues de faible charge ; boues d'aération prolongée	§ boues de faible et moyenne charge	§ boues regroupant les boues A et B2	§ boues de digestion et de stabilisation

Tableau 2 - Définition des différentes classes associées aux boues résiduaires urbaines [OTV97]

Bien traiter une boue nécessite de la concentrer et de séparer la phase solide de la phase liquide puis de la stabiliser, c'est-à-dire de la rendre peu fermentescible. La première étape met en jeu des processus physiques lors des opérations d'épaississement et de déshydratation, alors que la seconde étape met en œuvre des réactions chimiques, biologiques ou physiques (séchage). En fonction de ces différents éléments, il est ainsi possible de définir (cf. Tableau 3) si une boue peut être traitée facilement ou non.

<i>Paramètres</i>	<i>Classe A</i>	<i>Classe B1</i>	<i>Classe B2</i>	<i>Classe C</i>	<i>Classe D</i>
<b>Aptitude à la concentration</b>	Excellente	Moyenne	Faible	Moyenne à bonne	Moyenne à faible
<b>Aptitude à la stabilisation</b>	Excellente	Moyenne à faible	Moyenne à bonne	Moyenne à bonne	Stabilisation déjà réalisée
<b>Aptitude à ne pas fermenter spontanément</b>	Moyenne	Bonne à très bonne	Moyenne à bonne	Faible	Bonne
<b>Traitabilité</b>	Très bonne	Moyenne	Passable	Bonne	Bonne

Tableau 3 – La traitabilité des différentes classes de boues urbaines [OTV97]

A notre connaissance, il n'existe pas de classification équivalente pour les boues industrielles.

## II.6 Conclusions sur les classifications disponibles

Les professionnels français de l'épuration des eaux ont proposé deux classifications :

- ✓ l'une en fonction de la nature de la matrice solide, quelle que soit l'origine de l'effluent ;
- ✓ l'autre, spécialement dédiée aux boues urbaines, en fonction du traitement subi par l'effluent.

Ces deux classifications sont utiles pour prévoir le comportement de la boue lors d'une étape de déshydratation mécanique notamment, mais ne permettent pas de prédire son comportement lors d'une étape de séchage thermique.

La classification relative à l'aspect physique de la boue est importante pour le séchage, puisque l'aspect collant de la boue constitue le principal problème rencontré lors du séchage avec comme conséquence le colmatage possible du séchoir ou des problèmes de pompage et d'alimentation des installations. Néanmoins, cette classification est trop imprécise pour être applicable de manière générale.

Enfin, la dernière classification relative à la caractérisation de la nature de l'eau dans la boue n'a pas encore permis de dégager un classement par rapport à un comportement dans un procédé de séchage mais constitue certainement une voie à explorer.

### **III. La production française et les filières d'élimination**

Concernant la production de boues urbaines et industrielles, de nombreux chiffres circulent. Pour les boues urbaines, les agences de l'eau estimaient en 1998 la production française à 850 000 tMS/an [CHA98a], au niveau de l'Union Européenne la quantité s'élèverait à 7,7 millions de tonnes de matière sèche. Pour notre pays, le chiffre actuellement avancé est de 1 000 000 tMS/an [FAU00]. Pour les boues industrielles, le problème est beaucoup plus complexe, puisque :

- ✓ les sources de production sont plus diversifiées et dispersées géographiquement ;
- ✓ la quantité de boues produites dépend non seulement de la filière de traitement des eaux usées, mais aussi du secteur industriel et des techniques de production utilisées, ce qui nécessite de connaître avec précision la production de chaque établissement pour réaliser un bilan correct ;
- ✓ les organismes de contrôle (les DRIRE) connaissent les établissements producteurs, surtout pour ceux qui éliminent leurs boues en décharge, mais n'ont pas forcément de statistiques sur la production de boue.

Traditionnellement, le volume global de boues industrielles est jugé sensiblement équivalent à celui des boues résiduaire urbaines. Notons que ce chiffre est, certainement, largement sous estimé et, comme nous l'avons signalé précédemment, qu'une part conséquente des effluents industriels est collectée par les réseaux urbains.

#### **III.1 Production de boues urbaines : tonnage et filières d'élimination**

Dans le cadre de cette étude, les Agences de Bassin ont été contactées pour évaluer la production de boues urbaines, bassin par bassin, et pour connaître les filières d'élimination de ces boues. La liste des personnes contactées est jointe en Annexe 3. Les résultats de cette enquête sont reportés dans le Tableau 4.

<b>Bassin</b>	<b>tMS/an</b>	<b>Épandage (%)</b>	<b>Décharge (%)</b>	<b>Incinération (%)</b>	<b>Autre (%)</b>
<b>Adour Garonne</b>	71 000	63,8	16,3	6,5	13,4
<b>Artois Picardie</b>	88 446	90	10		
<b>Loire Bretagne</b>	210 000	75	15	8	2
<b>Rhin Meuse</b>	82 755	46,6	26	23,2	4,2
<b>Rhône Méditerranée Corse</b>	244 620	38,7	28,5	29,2	3,6
<b>Seine Normandie</b>	191 510	79,6	4,3	8,5	7,6
<b>TOTAL</b>	<b>888 331</b>	<b>65,6</b>	<b>16,7</b>	<b>12,6</b>	<b>5,1</b>

Tableau 4 – Répartition par bassin hydrographique de la production de boues urbaines et des filières d'élimination.

A l'exception des données fournies par le bassin Rhin Meuse, qui datent de 1997, les autres chiffres correspondent à la production de boues urbaines de l'année 1998. Pour établir ces bilans, les agences de l'eau disposent de deux sources d'informations : les exploitants de stations d'épuration et les services d'assistance technique des différents Conseils Généraux, qui apportent leur aide aux exploitants pour le fonctionnement des stations d'épuration. Néanmoins, ces chiffres doivent être considérés avec beaucoup de réserve : l'agence de l'eau Loire Bretagne rapporte, en effet, un écart de presque 50 % entre les deux sources d'information. Pourtant, les agences estiment que le bilan est de plus en plus précis chaque année. La remise en conformité des stations d'épuration inclut en particulier la mise en place de systèmes d'auto-surveillance et de pesée, ce qui permet de connaître la quantité réelle de boues brutes produites (les tonnages étant annoncés en matière sèche, il reste à connaître avec précision la siccité des boues, sinon des erreurs importantes peuvent être commises). A l'heure actuelle, la remise en conformité concerne principalement les grandes stations d'épuration et celles qui sont situées en zone sensible. Pour les autres stations, les tonnages énoncés ne sont que des estimations.

Si l'on s'intéresse aux différentes filières d'élimination de ces boues pour l'ensemble du pays, on constate que l'épandage agricole avec 65,6 % reste la filière principale d'élimination des boues urbaines, viennent ensuite la mise en décharge avec 16,7 % et

l'incinération 12,6 %. Les 5,1 % restants correspondent en grande partie à la filière compostage.

La filière épandage est privilégiée, à l'heure actuelle, par le gouvernement français en raison de la valeur fertilisante des boues d'épuration, de la simplicité de mise en œuvre des opérations et des coûts compétitifs qu'elle engendre, comme nous le verrons plus loin. Au préalable, il faut préciser que l'épandage doit avoir un intérêt agronomique. Pour juger de la valeur agronomique de la boue, il faut distinguer la valeur humique de la boue de la valeur fertilisante [APE00]. La première est représentée par le taux de matières organiques, la seconde par l'apport en azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium et certains oligo-éléments. Le rapport carbone / azote définit le potentiel de minéralisation. On peut distinguer trois cas limites en fonction de la valeur de ce rapport C/N :

- ✓ la teneur en azote est supérieure à 5 %, le rapport C/N est faible (<8) indiquant une minéralisation rapide ;
- ✓ la teneur en azote est comprise entre 2 et 5 %, le rapport C/N est stable (10 à 14) et la libération de l'azote est lente ;
- ✓ la teneur en azote est inférieure à 2 %, le rapport C/N devient alors supérieur à 15 et l'azote minéral est immobilisé dans le sol de manière prolongée (risque de carence).

Les boues sont généralement pauvres en potassium, mais cet élément est immédiatement disponible. En revanche, les boues sont souvent riches en calcium, de l'ordre de 5 à 10 % de la matière sèche. Outre l'apport direct d'éléments fertilisants et le stockage du CO<sub>2</sub> de la matière organique dans les sols sous forme humique, la valorisation agricole est la filière la mieux à même de satisfaire au critère de proximité. Précisons enfin que les boues ne représentent qu'environ 1,7 % des 291 millions de tonnes de sous produits épandus chaque année, le reste provenant de l'agroalimentaire (3,8 %) ou de l'agriculture avec les déjections animales (94,5 %) et que seuls les épandages de boues d'épuration sont contrôlés par une législation spécifique.

La terminologie relative à la seconde filière d'élimination par ordre d'importance est en constante évolution : on a parlé de décharge, puis de centre technique d'enfouissement et maintenant on utilise le terme centre de stockage. A travers cette évolution de

vocabulaire, c'est en fait la conception du site et de ses fonctions qui a progressé, notamment au niveau législatif. Rappelons qu'il existe trois types de décharges :

- ✓ les décharges de classe 1, réservées aux déchets dangereux référencés en annexe II du décret 97-517 517 du 15 mai 1997 relatif à la classification des déchets dangereux ;
- ✓ les décharges de classe 2, admettant les déchets non dangereux ;
- ✓ et enfin, les décharges de classe 3, n'acceptant que les déchets inertes (matériaux de construction, minerais, gravats ...).

Les boues ne peuvent être éliminées que dans les décharges de classe 1 ou de classe 2 selon les risques qu'elles présentent ou pourraient représenter. En particulier, les boues urbaines, qui sont classées sur la liste des déchets non dangereux, sont admises en classe 2. Certaines boues industrielles, comme certaines boues de l'agroalimentaire et les boues de papeteries, peuvent aussi être admises en classe 2.

Enfin, la dernière filière d'élimination des boues, l'incinération, se présente sous plusieurs facettes :

- ✓ l'incinération spécifique avec ou sans pré-séchage en amont du four. Dans le second cas, la siccité des boues ne permettant pas d'atteindre l'autothermicité, l'apport d'un comburant est nécessaire. Jusqu'à présent, cette solution était réservée aux très grandes stations de taille supérieure à 150 000 E.H., récemment des collectivités de moins de 100 000 E.H. viennent de s'équiper de cette technologie (St Chamond, Romans ...);
- ✓ la co-incinération avec les ordures ménagères de boues brutes à 20-30 % de siccité (pour peu que le flux co-incinéré ne dépasse pas 10 à 12 % de la charge en ordures ménagères dans le four), qui sont alors introduites directement dans le four, de boues partiellement séchées à 60 % de siccité ou totalement séchées, qui sont alors directement introduites dans la fosse de stockage des ordures ménagères. Cette solution est généralement mise en œuvre lorsque les stations d'épuration sont à proximité des centres d'incinération ;
- ✓ la co-incinération dans les fours de cimenteries, où la boue est utilisée soit comme un combustible organique de substitution (valorisation énergétique) soit comme un intrant minéral directement dans le cru (valorisation matière).

Faute de renseignements, nous n'avons pas pu introduire cette classification dans le Tableau 4, présenté précédemment, et dans le Tableau 5, qui suivra.

Il faut aussi noter que la moyenne nationale cache de grandes disparités, essentiellement liées au contexte économique local. Prenons l'exemple du bassin Rhône Méditerranée Corse. Les destinations des boues urbaines produites dans les régions Franche-Comté, Provence Alpes Côte d'Azur et Rhône-Alpes sont présentées sur la Figure 2. Dans ce bassin, les caractéristiques de l'agriculture, avec une présence limitée de grandes cultures, sont sans doute la cause de la part relativement faible de l'épandage agricole. En effet, si l'on examine les destinations en fonction du nombre de stations d'épurations (3800 environ dans ce bassin), la répartition est la suivante [CHA98b] :

- ✓ 67 % en agriculture
- ✓ 32 % en décharge
- ✓ 1 % en incinération

En réalité, le recyclage des boues en agriculture concerne donc les deux tiers des installations. Cette filière, dont le coût est modéré, constitue une solution réaliste pour les petites et moyennes stations d'épuration (d'où un taux de recyclage de 82 % en agriculture pour la Franche Comté). Cette remarque peut être généralisée au niveau national, puisque 85 % du parc français est composé de stations d'épuration de moins de 5000 E.H., implantées en milieu rural. L'incinération ne concerne qu'un nombre très limité de stations d'épuration de taille importante avec, par exemple, l'incinération in situ à Toulon Cap-Sicié, Grenoble ou encore à Pierre Bénite et Saint Fons pour l'agglomération lyonnaise ou la co-incinération avec les ordures ménagères à Nice, Annecy ou Chambéry. Les autres stations de taille importante, qui ne peuvent pas incinérer leurs boues, sont contraintes de les envoyer en décharge. Ainsi, la région PACA envoie 45 % de ses boues en décharge et en incinère 24 % tandis que la région Rhône-Alpes incinère 50 % de ses boues et n'en met que 18 % en décharge.

Il faut donc garder à l'esprit que la répartition des quantités de boues, comme présentée dans le Tableau 4, ne traduit qu'imparfaitement la réalité des situations sur le terrain.

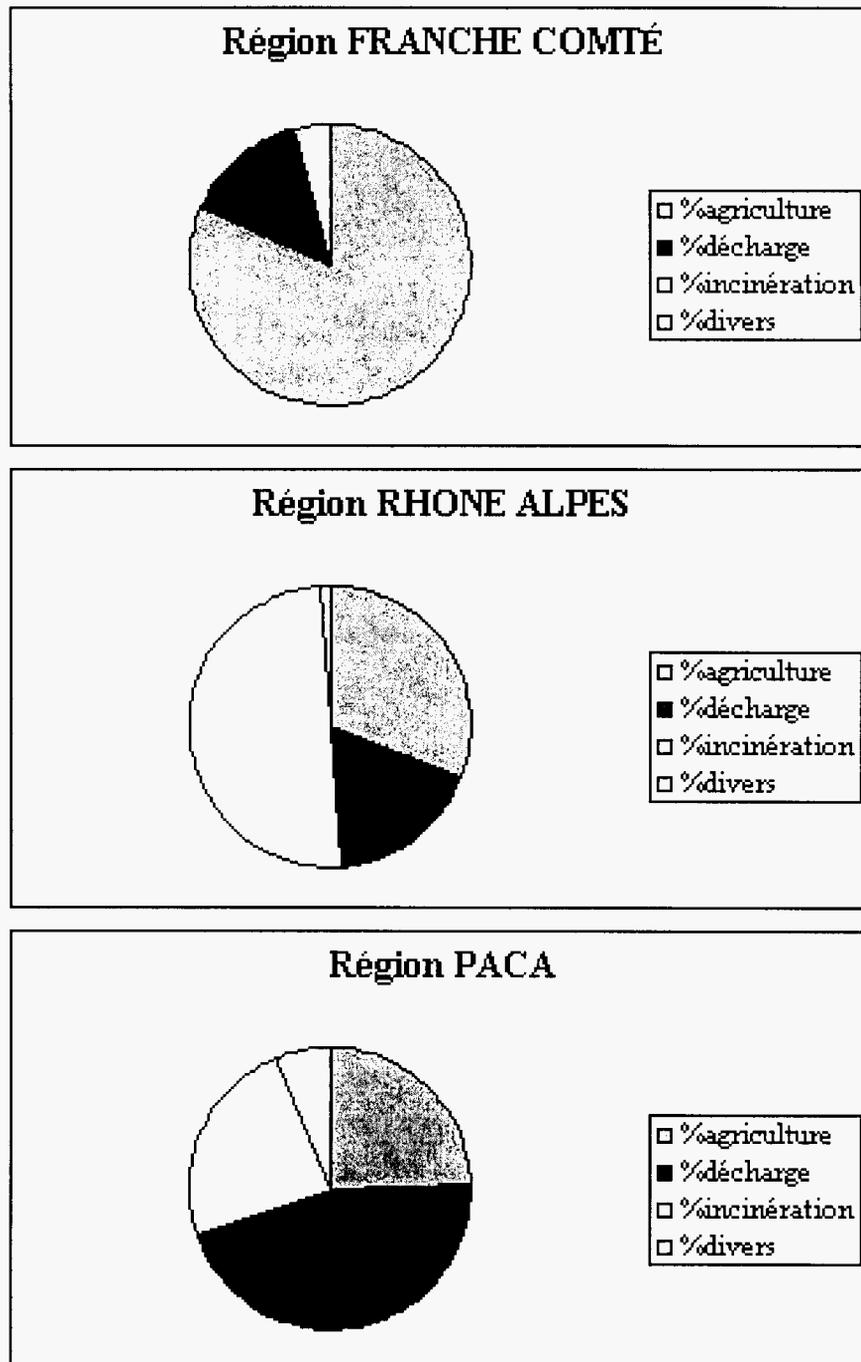


Figure 2 - Répartition des filières d'élimination des boues urbaines dans les régions Franche Comté, Rhône Alpes et Provence Alpes Côte d'Azur (source : Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse)

### III.2 Production de boues industrielles

A l'exception des agences de l'eau Rhin Meuse et Adour Garonne, les autres agences de l'eau ne communiquent pas de statistiques concernant la production de boues industrielles dans leurs bassins, ceci est généralement dû au fait qu'elles ne disposent que de données partielles. Les tonnages communiqués par les deux agences sont respectivement présentés dans le Tableau 5 et le Tableau 6.

<b>Secteur</b>	<b>t MS/an</b>	<b>Décharge (%)</b>	<b>Incinération (%)</b>	<b>Agriculture (%)</b>	<b>Autre (%)</b>
<b>I.A.A</b>	13 000			100	
<b>Papeterie</b>	119 350	2	23	52	23
<b>Textile</b>	2 150	11		89	
<b>Chimie</b>	11 200	39	31	1	29
<b>Sidérurgie et divers</b>	5 900	14	5	1	80
<b>TOTAL</b>	<b>151 600</b>				

Tableau 5 – Production de boues industrielles (hors industries de traitement de surface) et filières d'élimination en 1997 dans le bassin Rhin Meuse (source : Agence de l'eau Rhin Meuse)

<b>Secteur</b>	<b>t MS/an</b>	<b>Décharge (%)</b>	<b>Incinération (%)</b>	<b>Agriculture (%)</b>	<b>Autre (%)</b>
<b>IAA</b>	15 000			93,3	6,7
<b>Papeterie / Mégisserie</b>	20 000		5	90	5
<b>Chimie</b>	5 000			100	
<b>TOTAL</b>	<b>40 000</b>				

Tableau 6 - Production de boues industrielles et filières d'élimination en 1998 dans le bassin Adour Garonne (source : Agence de l'eau Adour Garonne, [FAU00])

Ces données ne pouvant être considérées comme représentatives de la production française de boues résiduelles industrielles, il nous est difficile de tirer des conclusions sur les quantités de boues industrielles produites.

Dans le cadre de cette étude, les Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement, qui ne disposent à notre connaissance que de données partielles, n'ont pas été contactées de manière systématique. La direction de l'eau du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement a été sollicitée. Elle nous a confirmé qu'aucune étude récente n'avait été entreprise pour estimer ces tonnages et nous a renvoyé à la référence [GUY00]. Ces tonnages sont rapportés dans le Tableau 7. Là encore, il ne s'agit que d'estimations et ces chiffres doivent être pris avec réserve.

<b>Industrie</b>	<b>Quantité</b>
<b>Alimentaire</b>	Malterie 720 tMS/an Boissons 2 500 tMS/an
<b>Textile</b> (Source ITF)	Ennoblement 65 000 à 70 000 t/an brut Peignage de laine 30 000 à 35 000 t brut
<b>Papeterie</b>	Production totale 600 000 tMS/an Boues d'épuration 440 000 tMS/an
<b>Tannerie / Mégisserie</b> (Source CTC)	Désencrage 160 000 tMS/an 50 000 t/an brut
<b>Traitement de surface</b>	13 500 tMS/an Boues d'hydroxydes 190 000 t/an
<b>Rectification (Source CETIM)</b>	50 000 t/an
<b>Peinture (Source CETIM)</b>	80 000 à 100 000 t/an
<b>Pétrole (Source CETIM)</b>	Boues de forage 10 000 à 20 000 tMS/an Boues de raffineries non évaluées
<b>Chimie</b>	Production non évaluée par la profession

Tableau 7 – Production de boues par secteurs industriels [GUY00]

Au mois d'avril 2000, d'autres chiffres ont été publiés dans un article de l'Environnement Magazine [NAD00], mais ces tonnages (cf. Tableau 8) font référence à une étude ADEME de 1994, qui commence à dater.

<b>Secteur</b>	<b>Tonnage (brut)</b>
<b>Sidérurgie - Cokerie</b>	656 406
<b>Transformation de l'acier</b>	15 624
<b>Minerais</b>	9 650
<b>Métallurgie des métaux non ferreux</b>	137 151
<b>Matériaux de construction</b>	41 103
<b>Verre</b>	5 981
<b>Chimie de base</b>	115 733
<b>Parachimie - Pharmacie</b>	10 857
<b>Fonderie</b>	56 125
<b>Travaux des métaux</b>	42 395
<b>Automobile</b>	60 376
<b>Mécanique</b>	50 636
<b>Industrie Agroalimentaire</b>	369 594
<b>Textile</b>	7 196
<b>Tannerie</b>	48 857
<b>Papier</b>	194 921
<b>Transformation des matières plastiques</b>	1 209
<b>Raffinage</b>	2 237
<b>TOTAL</b>	<b>1 823 814</b>

Tableau 8 – Déchets boueux à caractère « toxique » produits par secteur industriel [NAD00], source ADEME Mai 1994.

#### **IV. Les filières actuelles d'élimination : leurs réglementations et leurs coûts**

Comme nous venons de le voir, les quatre filières principales d'élimination des boues sont l'épandage agricole, la mise en décharge, l'incinération et le compostage. Le choix d'une de ces filières est souvent une affaire de circonstances, mais il convient évidemment pour adopter une filière de tenir compte d'impératifs technico-économiques

(économie d'énergie, fiabilité de l'organisation mise en œuvre, facilité et souplesse d'exploitation) sans négliger pour autant des raisons écologiques et psychologiques. En outre, ce choix doit être compatible avec la protection de l'environnement et avec la réglementation en vigueur. Cette législation relative à l'élimination des boues constitue un paysage complexe, puisqu'elle se situe à l'intersection de plusieurs domaines, comme la protection de la santé publique, de l'environnement, des sols agricoles et l'assainissement domestique, avec au cœur du débat le citoyen et de multiples acteurs. Cette législation devient de plus en plus sévère et a connu ces dernières années de fortes évolutions. Dans les paragraphes suivants, la législation existante ainsi que les évolutions probables à court terme sont présentées, par origine de l'effluent et filière par filière.

#### IV.1 Législation applicable aux boues urbaines

##### *IV.1.1 L'épandage*

La valorisation agricole est une pratique ancienne bénéficiant d'un savoir faire important et encadrée par une réglementation dense, qui a été révisée en 1998 [ROU99]. La France suit dans sa politique environnementale les directives de l'Union européenne. Le texte fondateur au niveau européen est la directive 86-278 du 18 juin 1986 relative à la protection de l'environnement, et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture. D'autres directives européennes concernent aussi les boues : il s'agit de la directive 91/271 sur les eaux usées résiduaires, qui interdit notamment le déversement de boues dans les milieux aquatiques et de la directive 75/442 relative aux déchets. Ces directives du Conseil sont transcrites en droit français et nous allons maintenant nous intéresser à la législation nationale.

##### IV.1.1.1 Les grandes lignes de l'ancienne législation

Jusqu'en 1997, le statut juridique de la boue était ambigu. En effet, en tant que matières fertilisantes, les boues obéissaient aux dispositions issues :

- ✓ de la loi du 13 juillet 1979 relative à l'organisation du contrôle des matières fertilisantes ;

- ✓ du décret 80-478 du 16 juin 1980 relatif à la répression des fraudes en ce qui concerne les matières fertilisantes ;
- ✓ de l'arrêté du 29 août 1988, rendant partiellement d'application obligatoire la norme "matières fertilisantes" NF U 44-041 pour l'importation, la vente, la mise en vente, la distribution à titre gratuit des boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines produites pour le marché national ou importées. Cette norme faisait office de retranscription en droit français de la directive européenne 86-278. L'arrêté du 29 août 1988 dispensait les boues d'une homologation ou d'une autorisation provisoire de vente si elles étaient conformes à la norme sous réserve de leur innocuité, jugée essentiellement par rapport à leur teneur en éléments traces métalliques.

Mais compte tenu de leur nature originelle et de la variabilité de leur composition, les boues étaient aussi soumises aux lois environnementales. La législation prévoyait un contrôle local sur la base de :

- ✓ la législation "santé publique" (règlements sanitaires départementaux, articles 159 et suivants), qui prévoient des interdictions d'épandage dans certaines zones et à certaines périodes ;
- ✓ la législation "eau" à travers le régime d'autorisation et de déclaration institué par l'article 10 de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992, et les décrets associés du 29 mars 1993 ;
- ✓ la réglementation sur l'assainissement des communes issue du décret 94-469 du 3 juin 1994, et des arrêtés du 22 décembre 1994, du 6 mai 1996 et du 21 juin 1996. Cette réglementation prévoyait une étude préalable avant épandage pour les boues provenant de stations d'épuration recevant plus de 120 kg par jour de DBO<sub>5</sub>.

Par ailleurs, la législation sur les installations classées du 19 juillet 1976, dans la mesure où le libellé de l'article n°322-B-2° pouvait inclure les stockages de boues avec un régime d'autorisation, et celle sur les déchets, par le biais du règlement CEE n°259/93 qui mentionne les boues dans sa liste orange, pouvaient aussi interférer avec la législation "matière fertilisante" ou "sous produit de l'assainissement".

#### IV.1.1.2 Les limites de l'ancienne législation

Les principaux problèmes posés par l'ancienne réglementation étaient les suivants :

- ✓ la norme NF U 44-041 était en fait une norme "déchet" comme le prouve le fait que les tolérances maximales sur les variations des teneurs en éléments fertilisants des boues prévues par l'article 3 de l'arrêté du 29 août 1988 n'aient jamais été fixées. Le double statut, matière fertilisante et déchet, rendait difficile la compréhension et l'application des nombreux textes réglementaires ;
- ✓ le champ couvert par la réglementation française était en outre jugé plus restrictif par les autorités de Bruxelles que celui de la directive 86/278, puisque la directive ne vise pas que les boues urbaines, l'obligation de tenue d'un registre n'apparaissait pas formellement, les modalités de surveillance n'étaient traduites que par circulaire ... ;
- ✓ aucun lien évident n'existait entre les différents corps de législation, notamment entre les lois environnementales et les lois matières fertilisantes. Cette complexité et ce manque de lisibilité sont à l'origine d'applications très hétérogènes de la réglementation dans les différents départements français et de nombreux contentieux, notamment en Alsace avec l'importation de boues allemandes, dont la libre circulation était assurée par la conformité à la norme NF U 44-041 ;
- ✓ l'application pratique des régimes d'autorisation et de déclaration au titre de la loi sur l'eau était ambiguë ;
- ✓ d'un point de vue technique, elle n'offrait pas de garanties suffisantes vis-à-vis du problème des odeurs et des micropolluants organiques ;
- ✓ son champ d'application ignorait les épandages en forêt et l'utilisation des boues en revégétalisation.

#### IV.1.1.3 La nouvelle législation

La nouvelle réglementation est instituée au titre de la directive européenne 86/278 déjà citée, de la loi n°92-3 sur l'eau et de la loi n°75-633 sur les déchets et du code de la santé publique. Les grandes lignes de la réglementation sont les suivantes :

- ✓ le producteur de boues est responsable de la filière épandage et de son suivi. Ceci est la principale conséquence du classement des boues en tant que déchet (cf. article 1 de la loi n°75-633), plutôt qu'en tant que matière fertilisante. L'arrêté portant

application obligatoire de la norme NF U 44-41 est donc abrogé depuis le 2 février 1998. Pour être exclus du champ d'application de la nouvelle réglementation et ainsi passer du statut déchet au statut produit, les produits intégrant comme matière première des boues devront soit être homologués soit répondre à une norme rendue d'application obligatoire (cf. paragraphe IV.1.4);

- ✓ la filière d'épandage est organisée et encadrée, sous la responsabilité du producteur de boues, grâce au décret n°97-1133 du 8 décembre 1997. Ce décret et son arrêté d'application du 8 janvier 1998, fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur sols agricoles, imposent une étude préalable systématique précisant les caractéristiques de la boue, les contraintes liées aux milieux récepteurs, les caractéristiques des sols et des systèmes de culture, les conditions d'épandage et les parcelles réceptrices. Pour les stations d'épuration de plus de 2 000 E.H., ce décret rend aussi obligatoire, avant chaque campagne d'épandage, un programme prévisionnel annuel et un bilan annuel de ce programme d'épandage. Dans tous les cas, le producteur doit assurer une auto-surveillance sur la qualité des boues produites, sur celle des sols ayant reçu des boues et enfin sur les traitements mis en œuvre (les paramètres à surveiller ainsi que les fréquences sont précisées dans l'arrêté). Cette surveillance peut être confiée aux chambres d'agriculture via les Missions de Valorisation des Déchets Agricoles. Enfin, une solution alternative à l'épandage doit être prévue dès le dossier initial ;
- ✓ la filière est réglementée et contrôlée par l'État, en la personne des préfets de département. Les épandages sont soumis à déclaration au titre de la loi sur l'eau dès que la quantité de boues produites par une station et destinée à être épandue dépasse 200 E.H. (soit 0,15 t d'azote/an ou 3 tMS/an) ; la procédure de déclaration est déclenchée au dessus de 50 000 E.H. (soit environ 40 t d'azote/an ou 800 tMS/an). Le préfet est en outre destinataire des programmes prévisionnels annuels d'épandage et des bilans annuels, ainsi que d'une synthèse de chaque registre d'épandage (cf. 5<sup>ème</sup> point). Le préfet est chargé de la validation de l'auto-surveillance et du contrôle du respect de la réglementation ;
- ✓ la qualité des boues doit assurer leur innocuité. Suivant les recommandations du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, les anciennes teneurs limites de la norme NF U 44-041 ont été divisées par deux. De plus, des flux limites contraignants dans les boues (cf. Tableau 9) ont été introduits : par exemple, une

boue atteignant les nouvelles valeurs limites ne pourra être épandue qu'à des doses de 15 tMS/ha tous les 10 ans ; pour une boue deux fois moins chargée, les doses seront de 30 tMS/ha tous les 10 ans, ce qui correspond au plafond autorisé. Ces flux sont environ 6 à 10 fois plus sévères que ceux imposés par la directive européenne de 1986 et sont proches des valeurs de la réglementation allemande. Des teneurs et des flux limites (cf. Tableau 10) ont aussi été introduits pour les micropolluants organiques les plus persistants dans l'environnement comme les HAP et les PCB. Enfin, il existe aussi des concentrations maximales et des flux cumulés maxima en éléments traces métalliques par les boues sur 10 ans dans les pâturages et sols de pH inférieur à 6 (cf. Tableau 11). Des dérogations peuvent néanmoins être accordées par le préfet sur la base d'une étude démontrant que ces éléments traces ne sont ni mobiles ni biodisponibles. De plus, les boues doivent être traitées de manière à réduire leur pouvoir fermentescible et les risques sanitaires. Seules les boues provenant de stations de moins de 2 000 E.H. peuvent être épandues non traitées sous réserve d'un enfouissement immédiat. Les limitations d'usage, telles que les distances à respecter vis à vis des habitations, des points d'eau ... et les délais avant culture et pâturage, sont assouplies lorsque les boues ont fait l'objet d'une hygiénisation abattant à un niveau non détectable les germes potentiellement pathogènes ;

- ✓ la traçabilité des opérations doit être assurée. L'ensemble des dispositions précédentes vise à assurer l'innocuité des boues pour l'environnement, néanmoins, en cas d'accidents ponctuels, les producteurs doivent tenir à jour des registres permettant de connaître avec précision la destination de chaque lot, sa date et ses caractéristiques. De plus, pour ne pas gêner cette traçabilité, les mélanges de boues sont interdits. Le préfet peut déroger à cette interdiction dans le cas de regroupement de petites unités de production en vue d'un meilleur traitement des boues, mais il se doit alors de désigner qui est responsable de l'application des textes ;
- ✓ enfin, les ouvrages d'entreposage ou de stockage sont réglementés au titre de la procédure eau. A ce titre, ils doivent retenir les lixiviats et minimiser les odeurs olfactives.

<b>Élément trace</b>	<b>Concentration (mg/kg de MS)</b>	<b>Flux cumulé (mg/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Cadmium</b>	20	0,03
	15 à compter du 1/1/2001 10 à compter du 1/1/2004	0,015 à compter du 1/1/2001
<b>Chrome</b>	1 000	1,5
<b>Cuivre</b>	1 000	1,5
<b>Mercure</b>	10	0,015
<b>Nickel</b>	200	0,3
<b>Plomb</b>	800	1,5
<b>Zinc</b>	3 000	4,5
<b>Chrome+Cuivre +Nickel+Zinc</b>	4 000	6

Tableau 9 – Concentrations et flux cumulés en éléments-traces dans les boues résiduaires urbaines (source : arrêté du 8/1/98, [FAU00])

<b>Composés organiques</b>	<b>Cas général</b>		<b>Épandage sur pâturages</b>	
	<b>Concentration (mg/kg de MS)</b>	<b>Flux cumulé (mg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Concentration (mg/kg de MS)</b>	<b>Flux cumulé (mg/m<sup>2</sup>)</b>
<b>PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180</b>	0,8	1,2	0,8	1,2
<b>Fluoranthène</b>	5	7,5	4	6
<b>Benzo(b)fluoranthène</b>	2,5	4	2,5	4
<b>Benzo(a)pyrène</b>	2	3	1,5	2

Tableau 10 – Concentrations et flux cumulés en composés organiques dans les boues résiduaires urbaines (source : arrêté du 8/1/98, [FAU00])

<b>Élément trace</b>	<b>Cadmium</b>	<b>Chrome</b>	<b>Cuivre</b>	<b>Mercuré</b>	<b>Nickel</b>	<b>Plomb</b>	<b>Zinc</b>
<b>Concentration (mg/ kg MS)</b>	2	150	100	1	50	100	300
<b>Flux cumulé (g/m<sup>2</sup>)</b>	0.015	1.2	1.2	0.012	0.3	0.9	3

Tableau 11 – Concentrations maximales et flux maxima en éléments traces métalliques apportés par les boues sur 10 ans dans les pâturages et sols de pH<6 (source : arrêté du 8/1/98)

#### IV.1.1.4 Les délais et l'évolution probable de cette réglementation

Pour la mise en conformité par rapport à cette nouvelle législation, certains délais ont été spécifiés :

- ✓ un délai de 3 ans a été accordé pour l'obligation de traitement, la réalisation de l'étude préalable, des programmes prévisionnels d'épandage et des bilans annuels, ainsi que la mise en conformité des installations de stockage;
- ✓ concernant les nouvelles teneurs limites en micropolluants dans les boues, ces seuils étaient applicables immédiatement, mais des dépassements temporaires ne pouvant excéder 50 % de la valeur limite étaient tolérés jusqu'au 31-12-1999.

Il faut surtout noter que la directive européenne 86/278 est en cours de révision. Parmi les évolutions probables de la législation, ce sont très certainement les valeurs limites admissibles qui vont le plus changer.

Dans le cadre d'une étude ADEME [ADE98], les concentrations moyennes en éléments traces métalliques des boues résiduaires domestiques françaises ont été comparées aux valeurs limites imposées par la législation. On constate que, d'après les données disponibles, il est exceptionnel que les teneurs des échantillons testés se rapprochent des valeurs limites. Ce constat est important puisque le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) demande « qu'un réexamen de ces valeurs limites intervienne si nécessaire, en fonction des résultats de recherche à venir dans un délai maximum de quatre années après la publication du présent avis », c'est-à-dire d'ici 2002.

D'autre part, la Commission Européenne a entamé une réflexion sur les boues qui pourrait à terme rendre la réglementation plus sévère notamment pour le cadmium et le mercure. Pour les micropolluants organiques, des valeurs limites ont été imposées pour certains hydrocarbures aromatiques polycycliques, mais pas pour d'autres molécules. Là encore, le CSHPF s'est donné un délai de quatre années pour réexaminer cette position en fonction de l'évolution des connaissances.

#### *IV.1.2 La mise en décharge*

##### IV.1.2.1 La législation en vigueur

La loi n°92-646 du 13 juillet 1992, relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement, transpose la directive européenne 91/689 du 18 mars 1991 et modifie la loi n°75-633 du 15 juillet 1975, relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux. L'article 2.1 de cette loi stipule, qu'à compter du 1<sup>er</sup> juillet 2002, les installations d'élimination des déchets par stockage ne seront autorisées qu'à accueillir des déchets dit ultimes. "Est ultime, au sens de la loi, un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux". Cela signifierait que les boues contenant de la matière organique résiduelle ne pourraient plus être admises en décharge.

Depuis 1997, le classement déchet dangereux, déchet non dangereux et déchet inerte, détermine le niveau de précautions à prendre (avec respectivement admissions en décharges de classe 1, 2 ou 3) et le niveau des contrôles à effectuer. Ainsi, l'article 4 de l'arrêté du 9 septembre 1997, relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installations de stockage des déchets ménagers et assimilés, fixe les conditions d'admission dans une installation de stockage de déchets ménagers et assimilés. Les boues de stations d'épurations urbaines, dont la siccité est supérieure à 30 %, peuvent y être admises. En sont exclus les déchets dangereux.

#### IV.1.2.2 L'évolution probable de cette réglementation

Suite à la directive n°99/31/CE du Conseil en date du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets, la législation nationale va probablement évoluer dans un futur proche. En effet, cette directive prévoit une réduction progressive des déchets biodégradables mis en décharge. Les États membres sont invités à définir une stratégie nationale sur cinq, huit et quinze ans, afin de mettre en œuvre cette réduction au plus tard deux ans après la date d'entrée en vigueur de cette directive.

#### *IV.1.3 L'incinération*

Cette filière permet l'élimination de la totalité de l'eau présente dans la boue ainsi que la combustion des matières organiques, ce qui entraîne une forte réduction de volume mais aussi de la toxicité. Ces deux points en font une voie d'élimination très intéressante. Elle génère deux types de sous-produits, des cendres et des fumées, pour les incinérateurs et un seul sous produit pour les cimenteries, les fumées (les cendres étant intégrées dans la matière en cours de cuisson). La législation en matière d'incinération va naturellement les concerner.

##### IV.1.3.1 La législation en vigueur

Il n'existe pas de réglementation spécifique en matière d'incinération de boues. Par défaut, la législation, qui s'applique pour les boues urbaines, est celle qui porte sur les résidus urbains, à savoir :

- ✓ la directive européenne 89/369 du 8 juin 1989, concernant la prévention de la pollution atmosphérique en provenance des installations nouvelles d'incinération des déchets municipaux ;
- ✓ la directive européenne 89/429 du 21 juin 1989, concernant la réduction de la pollution atmosphérique en provenance des installations existantes d'incinération des déchets municipaux ;
- ✓ l'arrêté du 25 janvier 1991, relatif aux installations d'incinération de résidus urbains. Cet arrêté correspond à la transcription française des deux directives précédemment citées. Il fixe notamment les valeurs limites d'émissions en fonction de la capacité

nominale de l'installation et les conditions d'incinération des résidus urbains, qui se doivent de garantir l'incinération des déchets et l'oxydation des gaz de combustion, avec un minimum de 850 °C pendant au moins 2 secondes en présence d'au moins 6 % d'oxygène mesuré dans les conditions réelles. Enfin, l'article 14 stipule les orientations préliminaires pour l'élimination des sous produits de l'incinération : les mâchefers peuvent être valorisés en travaux publics ou stockés dans des installations autorisées au titre de la loi du 19 juillet 1976 et les résidus d'épuration des fumées (y compris les cendres volantes issues d'incinérateurs à lits fluidisés jusqu'en 1996) doivent être éliminés en centre de stockage de classe 1 ou après prétraitement en centre de stockage de classe 2 ;

- ✓ la circulaire n°94-IV-1 du 9 mai 1994 relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains. Cette circulaire introduit trois catégories de mâchefers : ceux à faible fraction lixiviable, aussi notés "V" comme valorisation, les mâchefers intermédiaires, aussi notés "M" comme maturation, et ceux à forte fraction lixiviable, aussi notés "S" comme stockage. Cette circulaire fixe ainsi les règles d'élimination des mâchefers en fonction de leur potentiel polluant ;
- ✓ la circulaire du 10 janvier 1996 relative aux résidus de l'incinération des déchets ménagers et assimilés dans les fours à lits fluidisés. La vocation de cette circulaire est de prendre en considération la nature particulière des résidus provenant d'incinérateurs à lits fluidisés et de proposer ainsi des règles provisoires de classification et d'élimination de ces résidus. Ainsi en fonction des résultats des tests de lixiviation et des mesures des teneurs en Zn, Pb, Hg, Cd, As et Cr, les cendres sous chaudières et les cendres sous cyclone peuvent être assimilées à des mâchefers de catégories V, M ou S et ainsi selon le cas être valorisées ou stockées ;
- ✓ la circulaire du 30 mai 1997 relative aux dioxines et furanes. Elle concerne les installations d'incinération des résidus urbains et assimilés dont la capacité est supérieure à 6 t/h. Les dioxines sont rajoutées à la liste des polluants et une mesure annuelle des émissions de ces polluants doit être prescrite par arrêté selon les dispositions prévues à l'article 18 du décret du 21 septembre 1977.

Signalons que la circulaire du 24 février 1997, relative aux plans départementaux d'élimination des déchets ménagers et assimilés, va dans le sens d'une harmonisation entre la législation relative aux déchets ménagers et celle relative aux déchets dangereux.

Elle précise, en effet, que, par cohérence, les installations nouvelles d'incinération des déchets ménagers doivent être soumises aux normes de rejets fixées à l'article 11 de l'arrêté du 10 octobre 1996, que nous verrons au paragraphe IV.2.3.

#### IV.1.3.2 L'évolution probable de cette réglementation

Les directives européennes concernant l'incinération des déchets sont actuellement en révision. Le parlement européen et le conseil ont arrêté, en deuxième lecture le 15 mars 2000, une position commune en vue de l'adoption de la directive 2000/.../CE sur l'incinération des déchets (1998/0289(COD)-PE2). La commission a ensuite donné son avis le 6 juillet 2000. Les objectifs de cette révision sont de réduire sensiblement les émissions de plusieurs substances polluantes clés dans l'air (sont visés en particulier les dioxines et furanes), de réduire les rejets en métaux lourds.

Seront a priori exclus du champ d'application de la nouvelle directive les déchets végétaux agricoles et forestiers, les déchets végétaux fibreux provenant de l'industrie de la pulpe et du papier et ceux provenant du secteur de la transformation alimentaire dans la mesure où ils seront co-incinérés sur le lieu de production et où la chaleur produite sera valorisée.

L'amendement 10 de la commission spécifie que, sur la base de justifications scientifiques, le niveau d'incinération à atteindre devra être tel que la teneur en carbone total, carbone élémentaire non compris, des cendres et des mâchefers soit inférieure à 3 % du poids sec de ces matériaux ou que leur perte au feu soit inférieure à 5 % de ce poids sec.

Selon l'amendement 11, les déchets ayant une teneur en substances organiques halogénées, exprimées en chlore, supérieure à 1% devront être soumis à une température de 1100 °C pendant au moins 2 secondes. Cette durée n'était pas spécifiée dans l'ancienne législation. La commission a rejeté la première partie de cet amendement qui visait à relever à 1100 °C la température de combustion des déchets non dangereux, la température actuelle de 850 °C étant suffisante pour détruire tous les polluants organiques et les précurseurs de la dioxine.

Enfin, la seconde partie de l'amendement 25 ajoute une nouvelle valeur limite d'émission de Nox égale à 500 mg pour les nouveaux fours à ciment dans lesquels sont co-incinérés des déchets, pour les fours existants, cette valeur limite reste fixée à 800 mg. Par contre, la commission rejette la première partie de cet amendement qui prévoyait une réduction d'un an de la période de transition supplémentaire prévue à l'annexe II pour certains fours de cimenterie.

#### *IV.1.4 Le compostage*

Parmi les filières alternatives à l'épandage, la mise en décharge et l'incinération, le compostage est celle qui a le plus de succès. Néanmoins, il faut savoir qu'il n'existe pas pour l'épandage de compost fabriqué à base de boues une homologation de portée générale. Cette homologation se fait au cas par cas, selon une procédure définie dans le décret du 21 décembre 1998. A notre connaissance, seul le compost de Castelnaudary a été homologué ; dans ce cas, il n'existe plus de contrainte d'épandage. Lorsque le compost n'est pas homologué, le ministère a précisé dans un avis paru le 6 janvier 1999 que les produits composés même en partie de boues ne répondaient pas aux normes sur les amendements organiques (NF U 44-051) ou les supports de culture (44-551). L'épandage doit par conséquent respecter les prescriptions du décret du 8 décembre 1997 et de l'arrêté du 8 janvier 1998.

#### *IV.1.5 Coûts des filières d'élimination des boues urbaines*

Comme pour l'estimation de la production de boues, il est assez difficile d'évaluer le coût d'une filière d'élimination. La plupart du temps, le prix est fixé au cas par cas, en fonction du contexte économique local, de la quantité et de la régularité de la production, ou encore de l'intérêt que peut présenter la boue pour le process lorsqu'il s'agit d'une valorisation. Néanmoins, plusieurs analyses comparatives des filières concernant les boues urbaines ont été publiées récemment. Dans cette partie, nous ne présenterons que les études réalisées par le Syndicat National des Industries du Traitement des Eaux Résiduaires (SNITER) [BIN98] et par le cabinet Arthur ANDERSEN Environnement pour le compte des Agences de l'Eau [AGE99]. A titre d'information, citons la référence [SAS99] qui présente une analyse comparative des filières d'oxydation des boues

urbaines pour une station d'épuration allemande d'une capacité de traitement de l'ordre de 200 000 E.H. Les coûts énoncés étant systématiquement beaucoup plus élevés que ceux traditionnellement rapportés en France, nous ne présenterons pas les résultats de cette étude.

Les constructeurs d'usines d'épuration, membres du SNITER, ont réalisé une étude de l'incidence sur le coût de l'eau de trois filières utilisées par les moyennes et grandes stations d'épuration. Le cahier des charges était le suivant :

- ✓ une boue issue d'un traitement de l'eau de type "boue activée faible charge", avec une siccité de 18 % et un taux de matière volatile de 70 % ;
- ✓ deux tailles d'usines à comparer : 50 000 E.H. et 300 000 E.H. ;
- ✓ quatre destinations à comparer : l'épandage rendu racine *de boues chaulées*, y compris un stockage de six mois, l'incinération *spécifique* sur le site de la station, y compris le traitement des fumées et la valorisation en remblais ou le stockage des cendres, la *co-incinération de boues pâteuses* avec les ordures ménagères dans une installation située à moins de 50 km de la station, et enfin *la mise en décharge* .

Les prix énoncés incluent les coûts d'équipement et de génie civil, d'énergie, le coût de l'investissement ramené à un coût annuel sur la base d'un amortissement d'emprunt sur 15 ans au taux de 6 %, des réactifs utilisés, de la main d'œuvre, du transport, de l'épandage ou de la mise en décharge.

Les résultats, exprimés en Francs par tonne de matière sèche, sont présentés par filière et par taille d'usine dans le Tableau 12 :

	50 000 E.H.	300 000 E.H.
<b>Épandage de boues chaulées</b>	1690 à 1940	1470 à 1700
<b>Décharge</b>	1370 à 2890	1300 à 2830
<b>Incinération spécifique</b>	3310 à 3550	1510 à 1980
<b>Co-incinération avec ordures ménagères</b>	1450 à 2070	1270 à 1310

Tableau 12 – Coût en F/tMS des différentes filières d'élimination des boues biologiques en fonction de la taille de la station d'épuration [BIN98]

La solution épandage agricole, qui tient compte des coûts de suivi et d'analyse imposés par la législation, est la solution la plus économique, sauf dans le cas d'une possibilité de co-incinération avec les ordures ménagères dans un incinérateur existant situé à moins de 50 km de la station et disposant d'une surcapacité de traitement. Les écarts au niveau de l'évaluation des coûts de mise en décharge sont extrêmement importants, mais il semble que la mise en décharge devienne une solution tout juste compétitive. A l'exception des stations de grande taille, l'incinération spécifique reste encore très chère.

Le cabinet Arthur ANDERSEN Environnement a effectué un audit des différentes filières d'élimination pour le compte des Agences de l'Eau. Le cahier des charges était le suivant :

- ✓ une boue urbaine ou agro-alimentaire, de siccité de référence 20 % ;
- ✓ trois tailles d'installations : 3 000 E.H., 50 000 E.H. et 300 000 E.H. Nous ne présenterons les résultats que pour les deux plus grandes capacités ;
- ✓ les filières d'éliminations retenues ainsi que les principales hypothèses nécessaires à la réalisation de cet audit sont rapportées dans le Tableau 13.

La méthodologie a consisté à déterminer des prix de marché théoriques qui servent de base à la comparaison des systèmes homogènes, ce qui permet de s'abstraire de situations locales particulières. La comparaison est présentée sur une base indicielle (cf. Figure 3 pour les stations de capacité 50 000 E.H. et cf. Figure 4 pour les stations de capacité 300 000 E.H.), ce qui permet de rappeler qu'il ne s'agit en aucun cas de présenter des coûts de traitement absolus mais une comparaison de systèmes donnés.

N°	Taille (E.H.)	Traitement et hypothèses pour le calcul des coûts
1	50 000	<i>Mise en décharge de boues chaulées de siccité 30 %</i> ; coût comprenant un transport sur 50 km, le financement des investissements basé sur une durée de 8 ans à un taux de 6 % et le renouvellement des installations tous les 8 ans
2	50 000	<i>Épandage de boues de siccité 20 % non chaulées</i> ; coût comprenant un stockage de 9 mois, un transport sur 20 km et le financement des investissements basé sur une durée de 15 ans à un taux de 6 %
3	50 000	<i>Épandage de boues chaulées de siccité 30 %</i> ; coût comprenant un stockage de 9 mois, un transport sur 20 km et le financement des investissements basé sur une durée de 15 ans à un taux de 6 % pour le stockage et les études et sur une durée de 8 ans et 6 % pour les installations de chaulage
4	300 000	<i>Épandage de boues compostées de siccité 50 % non homologuées</i> ; coût comprenant un stockage de 9 mois, un transport sur 50 km, le financement des investissements basé sur une durée de 15 ans à un taux de 6 % pour le stockage et les études et sur une durée de 8 ans et 6 % pour l'autre partie de l'unité considérée comme de l'équipement
5	300 000	<i>Épandage de boues chaulées de siccité 30 %</i> ; coût comprenant un stockage couvert de 9 mois, le transport sur 50 km, le financement des investissements basé sur une durée de 15 ans à un taux de 6 % pour une grande partie du stockage et les études et sur une durée de 8 ans et 6 % pour l'autre partie du stockage à hauteur de 4 000 kF
6	300 000	<i>Épandage de boues sèches de siccité 90 %</i> ; coût comprenant un stockage de 9 mois, un transport sur 50 km, le financement des investissements basé sur une durée de 15 ans à un taux de 6 % pour le stockage et les études et 20 % du sécheur et sur une durée de 8 ans et 6 % pour 80 % du sécheur
7	300 000	Incinération spécifique de boues de siccité 20 % ; coût comprenant l'élimination des résidus en remblais routiers, le financement des investissements basé sur une durée de 15 ans à un taux de 6 % pour le génie civil et 30 % des équipements et sur une durée de 8 ans et 6 % pour 70 % des équipements
8	300 000	<i>Co-incinération de boues sèches de siccité 60 %</i> ; coût comprenant le transport, l'évacuation des sous produits, et le financement des investissements basé sur une durée de 15 ans à un taux de 6 % le génie civil et sur une durée de 8 ans et 6 % pour les équipements
9	50 000	<i>Co-incinération de boues de siccité 20 %</i> ; coût comprenant le transport, les coûts d'exploitation, l'évacuation des sous-produits et le financement des investissements basé sur une durée de 15 ans à un taux de 6 % pour le génie civil et sur une durée de 8 ans et 6% pour les équipements

Tableau 13 – Systèmes homogènes retenus pour l'analyse économique par [AGE99]

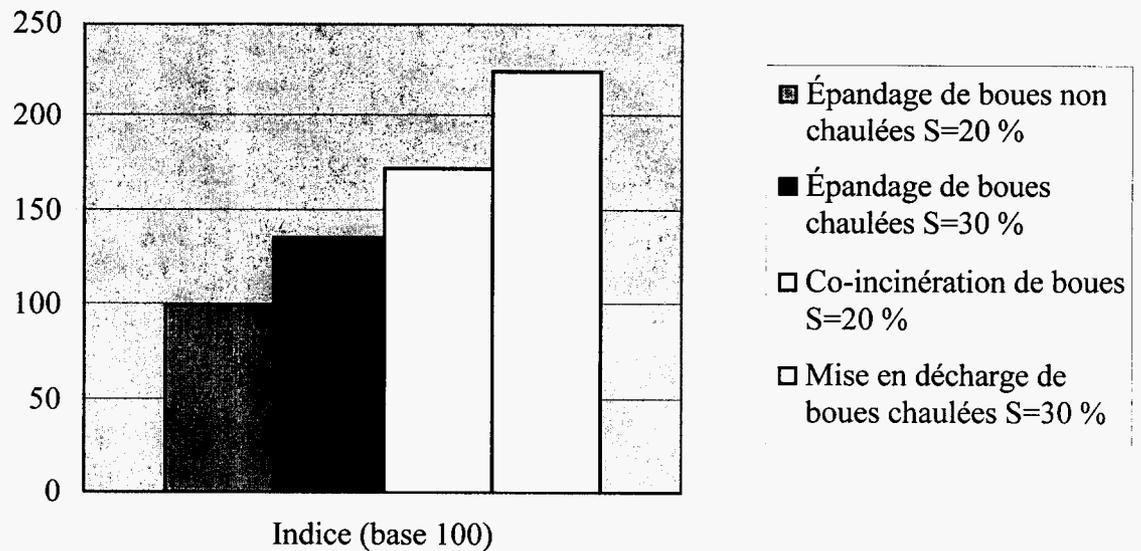


Figure 3 - Comparaison des bases indicielles correspondant aux systèmes homogènes définis pour les stations de capacités 50 000 E.H.

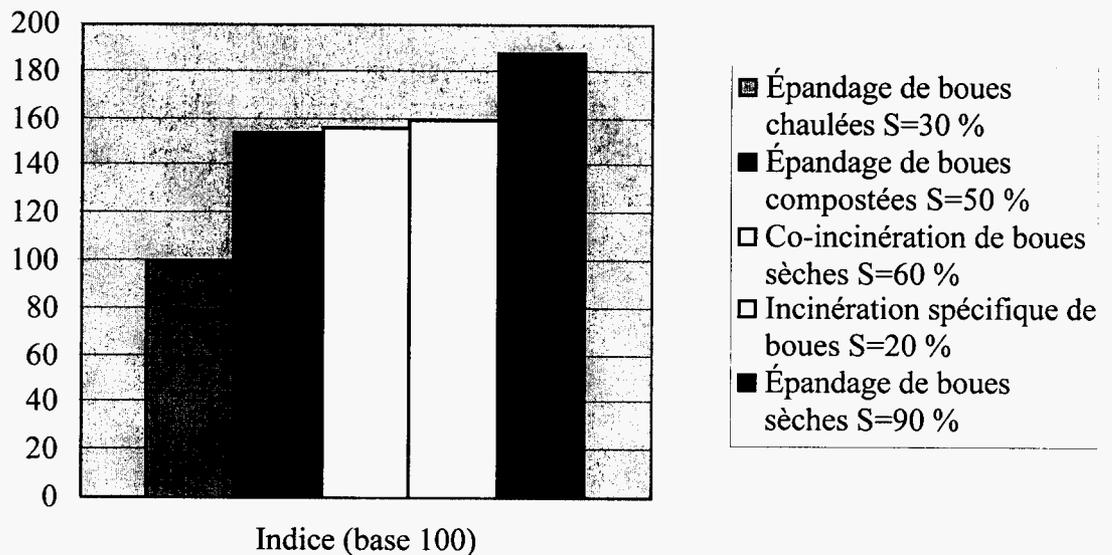


Figure 4 - Comparaison des bases indicielles correspondant aux systèmes homogènes définis pour les stations de capacités 300 000 E.H.

Les conclusions de cette enquête, qui, rappelons-le, concerne les boues urbaines et les boues agroalimentaires, sont :

- ✓ pour les stations de capacité 50 000 E.H., les écarts entre chaque système sont relativement importants, ce qui permet de hiérarchiser distinctement chaque filière, et

que la solution la plus avantageuse économiquement est l'épandage de boues non chaulées de siccité 20 % ;

- ✓ pour les stations de capacité 300 000 E.H., deux types d'épandage présentent des différences importantes en termes de coût : l'épandage de boues chaulées de siccité 30 % est économiquement le système le plus avantageux, l'épandage de boues sèches de siccité 90 % est économiquement le plus défavorable. Les trois autres systèmes retenus pour l'étude, comme l'épandage de boues compostées de siccité 50 %, l'incinération spécifique de boues de siccité 20 % et la co-incinération de boues sèches de siccité 60 %, présentent des caractéristiques économiques très proches.

Les résultats de cette étude sont donc assez défavorables au séchage poussé de la boue en vue d'un épandage agricole. Néanmoins, il semblerait que les chiffres énoncés dans cette étude pour le séchage soient 2 à 3 fois plus élevés que ceux annoncés aux Etats Unis, en Hongrie ...

Si l'on essaie maintenant de comparer les deux enquêtes en se ramenant à des ratios entre les coûts des filières identiques retenues, on s'aperçoit que les écarts entre les deux études sont assez conséquents quelle que soit la capacité de la station. Pour une capacité de 300 000 E.H., la filière la plus avantageuse économiquement (cf. Tableau 14) est bien l'épandage de boues chaulées de siccité 30 %, mais le ratio entre l'incinération spécifique de boues de siccité 20 % et cette filière est proche de 1 pour l'étude réalisée par le SNITER alors qu'il vaut 1,6 pour celle réalisée par le cabinet ANDERSEN.

	<b>SNITER [BIN98]</b>	<b>ANDERSEN [AGE99]</b>
<b>Épandage de boues chaulées de siccité 30 %</b>	1	1
<b>Incinération spécifique de boues de siccité 20 %</b>	1,1	1,6

Tableau 14 – Comparaison du coût de l'incinération spécifique par rapport au coût de l'épandage de boues chaulées pour une station de capacité 300 000 E.H.

Le constat est identique (cf. Tableau 15) pour les stations de capacité 50 000 E.H., la filière "épandage de boues chaulées de siccité 30 %" est la plus rentable économiquement

pour le cabinet ANDERSEN, loin devant la co-incinération de boues de siccité 20 % et la mise en décharge de boues chaulées de siccité 30 %, alors que si l'on considère les résultats obtenus par le SNITER (sur la base de coût moyen par filière), on s'aperçoit que les écarts entre ces trois filières sont beaucoup moins importants.

	SNITER [BIN98]	ANDERSEN [AGE99]
<b>Épandage de boues chaulées de siccité 30 %</b>	1	1
<b>Co-incinération de boues de siccité 20 %</b>	0,97	1,29
<b>Mise en décharge de boues chaulées de siccité 30 %</b>	1,17	1,67

Tableau 15 - Comparaison du coût de la co-incinération et de la mise en décharge par rapport au coût de l'épandage de boues chaulées pour une STEP de capacité 50 000 E.H.

#### IV.2 Législation applicable aux boues industrielles

Comme précédemment, nous allons évoquer, filière par filière, la législation applicable aux boues industrielles et son évolution probable.

##### IV.2.1 L'épandage

Pour les boues issues des installations classées, la réglementation applicable est l'arrêté du 17 août 1998 qui modifie l'arrêté du 2 février 1998 relatif aux émissions des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement. Ses dispositions sont identiques à celles de l'arrêté du 8 janvier 1998 applicable aux boues urbaines : étude préalable, bilan annuel, filière alternative, valeurs et flux limites pour les éléments traces dans les déchets (cf. Tableau 9) et dans les sols (cf. Tableau 11). Le pH des effluents à épandre doit être compris entre 6,5 et 8,5. Des valeurs différentes peuvent être retenues sous réserve de conclusions favorables de l'étude préalable.

Lorsque les déchets contiennent des éléments, des substances indésirables ou des agents pathogènes autres que ceux visés habituellement (à savoir : cadmium, chrome, cuivre,

mercure, nickel, plomb et zinc), le dossier d'étude préalable doit permettre d'apprécier l'innocuité du déchet dans les conditions d'emploi prévues. C'est l'arrêté d'autorisation qui fixe alors la concentration et le flux maximum de l'élément apporté au sol.

#### IV.2.2 La mise en décharge

##### IV.2.2.1 Législation en vigueur

L'admission des déchets dangereux dans les centres de stockage de classe 1 est subordonnée au respect des critères fixés dans l'arrêté du 18 décembre 1992, modifié par l'arrêté du 18 décembre 1994. Un déchet est considéré comme stabilisé, au sens de l'arrêté, quand sa perméabilité à l'eau et sa fraction lixiviable ont été réduites sous les seuils limites imposés, et quand sa tenue mécanique a été améliorée de façon que ses caractéristiques satisfassent à certains critères d'acceptation des déchets stabilisés. Les boues doivent ainsi avoir une siccité minimale, fixée à 35 % depuis le 30 mars 2000, et satisfaire à des valeurs limites sur lixiviats (cf. Tableau 16). Les tests sur lixiviats doivent être effectués selon la norme AFNOR XP X 31-210. En cas de non-conformité aux critères imposés, les boues doivent faire l'objet de traitement de stabilisation.

Paramètres	Valeurs limites (arrêté du 18/12/92)
<b>ANALYSE SUR LE DÉCHET BRUT</b>	
Siccité (%)	> 35 % au delà du 30/3/2000
<b>ANALYSE SUR LIXIVIAT</b>	
pH	4-13
Fraction soluble (%)	10
DCO (ou COT) (mg/kg de déchet brut)	2 000 (ou 700)
Phénol (mg/ kg de déchet brut)	100
Cr VI (mg/ kg de déchet brut)	5
Cr (mg/ kg de déchet brut)	50
Pb (mg/ kg de déchet brut)	50
Zn (mg/ kg de déchet brut)	250
Cd (mg/ kg de déchet brut)	25
CN (mg/ kg de déchet brut)	5
Ni (mg/ kg de déchet brut)	50
As (mg/ kg de déchet brut)	10
Hg (mg/ kg de déchet brut)	5

Tableau 16 – Valeurs limites pour l'admission dans les installations de stockage de déchets dangereux.

#### IV.2.2.2 Evolution probable de la législation

Suite à la directive n°99/31/CE du Conseil en date du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets, les États membres doivent aussi prendre des mesures pour que les décharges destinées aux déchets non dangereux puissent être utilisées pour les déchets stables et non réactifs (par exemple solidifiés ou vitrifiés) dont le comportement en matière de production de lixiviats est équivalent à celui des déchets non dangereux conformément à l'annexe II.

Il faut aussi signaler que l'arrêté du 18 décembre 1992, relatif au stockage de déchets dangereux et autres déchets pouvant être admis en décharge de classe 1 fait l'objet d'un projet de révision, prévoyant selon [RIB00] : « afin de démontrer le caractère ultime de son déchet, le producteur devra procéder ou faire procéder à une analyse de COT (carbone organique total) sur solide avant traitement de solidification. Le résultat devra être inférieur à 50 000 mg/kg de MS du déchet brut pour être admis dans l'installation de solidification et de stockage ».

#### *IV.2.3 L'incinération*

Concernant les boues industrielles, la législation qui s'applique est celle des déchets dangereux, avec notamment :

- ✓ au niveau européen, la directive 94/67 du 16 décembre 1994, concernant l'incinération des déchets dangereux ;
- ✓ l'arrêté du 10 octobre 1996 relatif aux installations spécialisées d'incinération et aux installations de co-incinération de certains déchets dangereux, qui transpose en droit national la directive précédemment citée. Cet arrêté prévoit des teneurs limites en éléments métalliques à ne pas dépasser pour les déchets admissibles dans ces installations, en carbone organique total dans les mâchefers et des seuils très bas en composés organiques volatils, composés chlorés, dioxines et furanes dans les rejets en sortie de cheminée. Par exemple, les déchets, acceptés en cimenterie et incorporés dans le cru, ne doivent pas dépasser une teneur limite de 5 000 mg/kg d'hydrocarbures. Pour chaque installation en fonctionnement, les teneurs limites à considérer sont précisées dans l'arrêté d'autorisation.

### IV.3 Synthèse

Le statut "déchet" de la boue, lié à la loi sur l'élimination des déchets, a pour conséquences :

- ✓ la responsabilité du producteur de déchet jusqu'à la destination finale;
- ✓ l'obligation d'organiser localement les filières d'élimination.

La complexité de la législation traduit les négligences du passé en matière d'environnement et l'objectif de la nouvelle réglementation, qui se met en place peu à peu, est de regagner la confiance du public.

La filière épandage est la plus ancienne et la plus répandue. Comme nous venons de le voir, elle reste encore aujourd'hui largement rentable économiquement. Néanmoins, cette filière est de plus en plus réglementée et le nombre important de contraintes qu'elle présente, comme la stabilisation et l'hygiénisation de la boue, le stockage, le transport et la connaissance du sol destinataire et des cultures, l'obligation de prévoir une solution alternative, fait qu'elle devient de plus en plus difficile à mettre en œuvre. De plus, les agriculteurs sont soumis à des pressions fortes de la part des grands distributeurs de l'agroalimentaire, qui veulent se refaire une image qualité. C'est pourquoi certains acteurs mettent en doute la pérennité de cette filière et proposent de s'orienter vers d'autres filières de valorisation.

La filière mise en décharge est elle aussi extrêmement réglementée avec notamment des contraintes d'admission en termes de siccité et la date butoir du 1<sup>er</sup> juillet 2002 associée à la notion de déchet ultime. A plus ou moins court terme, cette solution n'est donc pas pérenne.

La filière qui semble promise au développement est l'incinération. A l'heure actuelle, il n'y a aucune réglementation spécifique aux boues résiduaires. Les principales contraintes pour cette filière sont, comme pour l'épandage, le stockage et le transport, auxquelles il faut ajouter la nécessité d'atteindre l'autothermicité et d'avoir un PCI élevé. L'incinération spécifique est, a priori, réservée aux grandes stations, même si de nouvelles solutions moins onéreuses apparaissent sur le marché et seront donc plus

abordables pour les stations de capacité moyenne. La co-incinération est intéressante quelle que soit la taille de la station, mais elle reste tributaire de la présence à proximité d'un incinérateur de capacité suffisante. Néanmoins, dans le contexte actuel de rénovation du parc français d'incinération de déchets ménagers et assimilés, cette solution présente des possibilités de développement pour les boues urbaines et assimilées. Pour les boues industrielles, la filière cimentière semble aussi très prometteuse même si les contraintes réglementaires au niveau des rejets risquent de faire augmenter les coûts et si d'autres déchets, comme les farines animales, sont appelés à y être brûlés.

## **VI. Le séchage des boues**

On peut définir le séchage comme étant l'opération unitaire qui consiste à éliminer tout ou partie d'un solvant (en général de l'eau) contenu dans un produit humide, le plus souvent solide ou pâteux. C'est un procédé coûteux en énergie car il nécessite de fournir au minimum, par kilogramme d'eau extraite, l'équivalent de la chaleur latente de vaporisation, soit environ 2500 kJ/kg.

Du point de vue de l'ingénieur, l'analyse des phénomènes physiques du séchage montre la multiplicité des disciplines qui s'y rattachent : chimie, biochimie, physique des interfaces, thermodynamique, thermique, mécanique. A ceci, il faut associer la multiplicité des produits (l'hétérogénéité, l'anisotropie, la déformation, l'hystérésis ...) et la multiplicité des phénomènes (la capillarité, la diffusion, la sorption ...) On conçoit ainsi qu'il reste beaucoup à faire avant de disposer d'une théorie unifiée du séchage.

Les boues se distinguent des produits habituellement séchés dans l'industrie : elles sont rarement homogènes, de nature variable, elles sont sujettes à des variations ponctuelles d'humidité difficilement maîtrisables et contiennent souvent des matières qui, par échauffement, se distillent et produisent des odeurs nauséabondes. Enfin, en atteignant une plage de siccité voisine de 50 % (cf. Chapitre II), la plupart des boues deviennent collantes, provoquant la chute des coefficients d'échange thermique et des difficultés de transport à l'intérieur du séchoir, d'où risques de stagnation et d'élévations locales de température.

L'ensemble de ces raisons a très certainement freiné le développement du séchage dans le domaine du traitement des boues. Pourtant, rappelons que le séchage des boues a fait ses premières apparitions au début du siècle au niveau des boues industrielles au Japon, aux États-Unis et en Europe [LOW95]. Son apparition au niveau des boues urbaines est beaucoup plus récente. Néanmoins, il est probable qu'il va se développer dans les années à venir, puisqu'il offre un créneau d'application multi-filières [LES98], comme nous le verrons dans le paragraphe suivant. Il y a une dizaine d'années, le séchage correspondait à une option proposée par les industriels aux clients ; depuis peu, le séchage fait partie de la demande de base du client [MAD00], puisque, devant les incertitudes qui pèsent sur les filières aval, ce traitement intermédiaire préserve l'ensemble des possibilités d'élimination dans les principales filières actuelles.

Avant de présenter les différentes manières de sécher une boue, nous allons présenter les avantages qu'offre le séchage des boues et les principales contraintes qui y sont associées.

#### VI.1 Faut-il sécher les boues ?

Le séchage a longtemps été présenté comme un pré-traitement avant une incinération. En pratique, c'est loin d'être le cas, puisqu'il est souvent techniquement inutile de sécher une boue avant incinération, l'autothermicité étant atteinte dès une siccité de 40 %. Le séchage a certainement plus vocation à favoriser le stockage avant épandage, le transport avant épandage ou incinération ou à augmenter le pouvoir calorifique de la boue avant incinération. Ainsi, il est important de détailler l'ensemble des atouts du séchage pour les différentes filières d'élimination :

- ✓ la réduction de poids et de volume. En concentrant la matière sèche, un séchage poussé de la boue, jusqu'à des siccités de 90 %, permettra de réduire la masse de 75 à 80 %. Ceci aura des répercussions sur le stockage de la boue et son transport ;
- ✓ la stabilisation. L'augmentation de la siccité va réduire le pouvoir fermentescible de la boue et ainsi diminuer les nuisances olfactives ;
- ✓ l'hygiénisation. Les températures généralement élevées et les temps de séjours assez longs vont réduire à des niveaux non détectables les agents pathogènes présents dans

les boues (cf. les connaissances acquises dans le domaine de l'agroalimentaire [BIG20] et [BAL57]) ;

- ✓ la mise en forme du produit final. Le séchage a généralement comme conséquence l'obtention d'un résidu sous forme granulaire, ce qui facilite d'une part la manutention et le transport et d'autre part améliore l'acceptabilité du produit par le grand public, puisque l'aspect physique de la boue sèche est équivalent à celui des fertilisants utilisés par le monde agricole ;
- ✓ la conservation des propriétés fertilisantes de la boue, ceci est important pour la filière agricole ;
- ✓ l'atteinte de minima légaux en vue d'une mise en décharge, par exemple. Comme nous l'avons vu, la mise en décharge impose des seuils d'admission de 30 % à 35 % de siccité selon la nature de la boue. A l'issue d'une déshydratation mécanique, la siccité est la plupart du temps bien inférieure à ces seuils réglementaires ; seul le séchage permet d'un point de vue technique d'atteindre ces valeurs ;
- ✓ l'atteinte de minima technique en vue de l'incinération par exemple. Eliminer de l'eau permet de réduire le déficit énergétique au niveau de l'incinérateur, d'atteindre l'autothermicité de la boue et d'augmenter son pouvoir calorifique.

Ainsi, le séchage, qu'il soit partiel (entre 30 et 45 % de siccité), poussé (de 60 à 90 % de siccité) ou total (au-delà de 90 % de siccité), se positionne comme un procédé intermédiaire dans la chaîne de traitement de la boue et commun à l'ensemble des filières. Au cas par cas, il permet d'adopter l'une ou l'autre des filières d'élimination, en ajustant au mieux la valeur de la siccité finale de la boue.

Le séchage présente néanmoins un certain nombre de contraintes, qu'il faut garder à l'esprit :

- ✓ la sécurité de l'installation. Quelques phénomènes d'auto-inflammations, d'autant plus importants que le solide est divisé, et d'explosions ont été observés. En effet, les poussières en suspension ou les matières organiques contenues dans la boue, qui se pyrolysent à basse température, peuvent présenter (dans certaines conditions de fonctionnement) un caractère explosif ;
- ✓ la qualité des rejets gazeux. Il faut éviter la formation de poussières (appelées fines) pour ne pas rendre trop complexe le traitement des buées. Le séchoir doit aussi

comporter un dispositif de lavage des buées efficace tant pour la captation des poussières que des matières incondensables ;

- ✓ la qualité du produit final. Celui-ci doit avoir un aspect engageant et être de manutention aisée. L'intérêt est de produire des granulés, plutôt que des poudres ou des poussières. Une installation de post-agglomération est alors superflue ;
- ✓ la souplesse, robustesse et adaptabilité. La technologie doit pouvoir s'adapter à des fluctuations importantes de la nature des boues, qui peuvent se manifester par des changements de structure, de siccité ou de teneur en filasse ;
- ✓ l'adéquation entre la structure de la boue et les traitements futurs. Par exemple, pour une valorisation en agriculture, la structure de la boue doit être suffisamment friable pour assurer la biodisponibilité des éléments fertilisants. Pour l'incinération, il peut être utile de se contenter d'une siccité de 40 %, pour laquelle on aura une structure permettant de pomper les boues vers le four ;
- ✓ le coût. Le coût du séchage doit rester modéré ; l'automatisation et la simplicité du séchoir doivent permettre à l'exploitant de ne pas avoir de personnel gérant le séchoir. L'utilisation de biogaz, produit par digestion anaérobie (qui réduit en sus d'un tiers le poids de boue produite), peut être intéressante au niveau de la consommation énergétique. L'économie est de l'ordre de 400 F/tMS [WIA96].

## VI.2 Comment sécher les boues ?

Un grand nombre de constructeurs proposent des procédés pour sécher les boues résiduelles, comme nous le verrons au prochain chapitre, mais les procédés reposent tous sur le même principe physique :

- ✓ un apport énergétique nécessaire pour fournir l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau. Cet apport peut être de type *conductif* lorsque l'énergie nécessaire au séchage du produit est apportée par une surface chaude sur laquelle est déposé le produit, *convectif* lorsque le produit à sécher est en contact direct avec un gaz vecteur chaud et sec ou *radiatif* lorsque l'énergie est apportée par une onde électromagnétique. Les procédés de séchage font ainsi appel à pratiquement toutes les combinaisons possibles de ces modes de transfert.;
- ✓ une évacuation de l'humidité, qui se fait en règle générale sous forme de vapeur d'eau et qui peut être par entraînement ou par vaporisation.

## **VII. Conclusion**

Comme nous l'avons vu, la problématique des boues est un sujet d'actualité qui concerne à la fois la protection de l'homme et de son environnement. Ce sujet sensible pose des problèmes juridiques, scientifiques et technologiques, dont les solutions devront être trouvées à court terme. La production française devrait connaître une forte croissance dans les années à venir principalement du fait d'une réglementation toujours plus sévère. De plus cette augmentation se verra couplée à la restriction des filières d'élimination. Il sera alors nécessaire de s'orienter vers une logique de valorisation de la boue.

Dans ce contexte, le séchage thermique devrait définitivement trouver sa place comme procédé intermédiaire. Une question reste posée : quel procédé choisir pour sécher la boue ? Cette question, loin d'avoir une réponse évidente, puisqu'il n'existe pas de classification disponible permettant de prédire son comportement dans un procédé donné, guidera les chapitres qui vont suivre.

## **CHAPITRE 2 : Les procédés de séchage des boues**

Le second chapitre de ce rapport est consacré à un état de l'art des procédés disponibles sur le marché pour sécher les boues résiduelles. Pour réaliser cette étude, nous avons sollicité les constructeurs par l'intermédiaire d'un questionnaire puis d'entretiens téléphoniques. Nous avons ainsi pu recueillir un certain nombre d'informations sur les procédés et leurs fonctionnements ainsi que sur les installations existantes. Après avoir présenté les éléments qui composent une installation de séchage et quelques définitions utiles pour la suite, nous recentrerons ce travail sur les séchoirs. Pour des questions de lisibilité du rapport, nous avons introduit la classification technologique habituellement utilisée par la profession, à savoir séchoir direct, indirect ou mixte. Ainsi, pour chaque catégorie de séchoirs, nous présenterons les différents procédés disponibles et nous essaierons de les "comparer" sur la base de leur consommation énergétique. Précisons dès cette introduction qu'il n'a pas été possible de proposer une classification basée :

- ✓ sur la capacité de traitement du séchoir, les capacités de traitement des séchoirs commercialisés par les différents constructeurs étant relativement étendues ;
- ✓ ni sur le type de boues traitées, le nombre d'applications recensées étant restreint. De plus, la plupart des acteurs soulignent le fait que le marché des boues urbaines est relativement fermé ; c'est pourquoi, à l'heure actuelle, ils concentrent leurs efforts sur le marché des boues industrielles. Néanmoins, ils possèdent encore peu de références dans ce domaine.

Nous terminerons ce second chapitre par une synthèse dont la vocation est de rappeler les principaux avantages et inconvénients du séchage direct et indirect par rapport au domaine des boues résiduelles et de dégager des tendances pour l'avenir.

### **I. L'installation de séchage des boues**

#### **I.1 La place du séchage dans la filière boue**

Dans la filière actuelle de traitement des boues, le séchage thermique est le dernier maillon de la chaîne de séparation de l'eau de la fraction solide. Il fait généralement suite à une étape d'épaississement, par décantation gravitaire ou par flottation, puis de

déshydratation mécanique, au cours de laquelle l'eau est extraite de la boue sous forme liquide, à l'aide de centrifugeuses, de filtres-presses, de filtres à bandes ou de presses à vis. Cette étape de déshydratation peu consommatrice d'énergie est présente dans la plupart des installations.

La Figure 5 illustre la réduction de masse qui s'opère lors du traitement de la boue. Une déshydratation mécanique jusqu'à 35 % de matières sèches, ce qui est déjà très élevé pour cette opération unitaire, permet d'éliminer 90 % de la masse initiale d'eau présente dans la boue. Si l'on procède ensuite à un séchage poussé jusqu'à 90 % de matières sèches, il ne reste plus que 0,5 % de l'eau initialement contenue dans la boue. Seule une étape d'incinération permettra d'éliminer la totalité de l'eau résiduelle ainsi que l'ensemble des matières organiques.

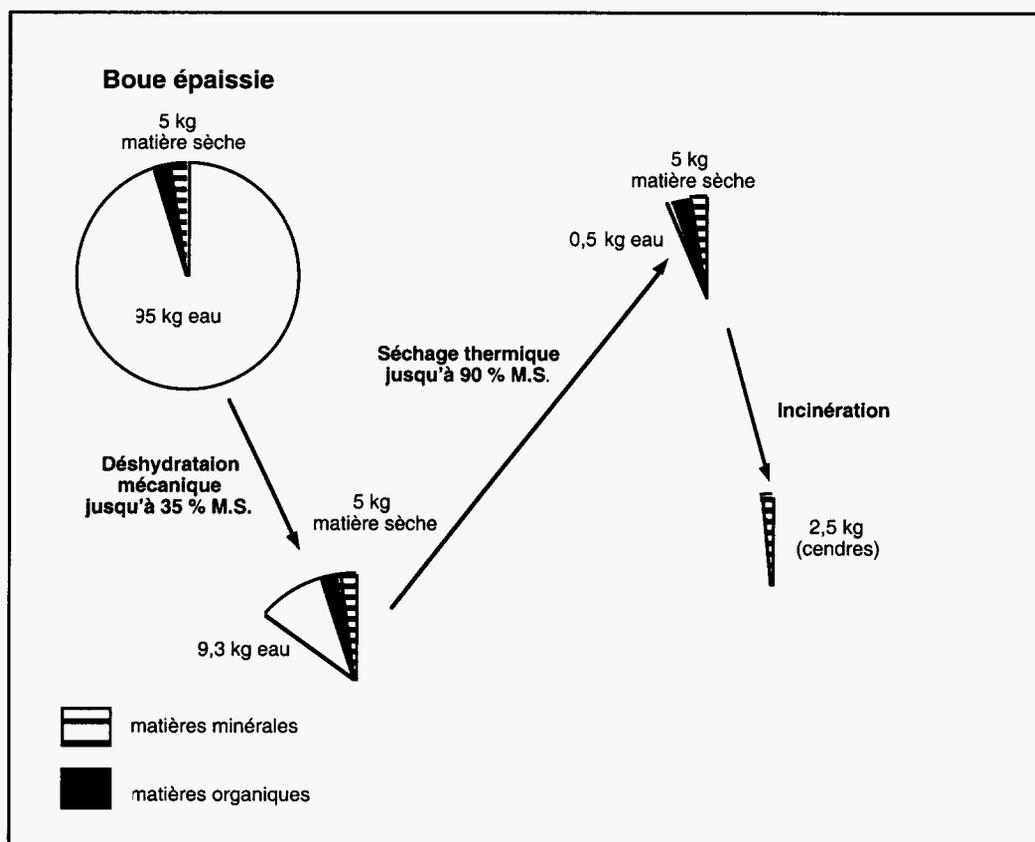


Figure 5 - Réduction de masse au cours du traitement des boues

Si l'on considère les ordres de grandeurs d'énergie nécessaire pour séparer un m<sup>3</sup> d'eau d'une boue humide (cf. Tableau 17), on s'aperçoit qu'il est indispensable de profiter au maximum de l'épaississement et de la déshydratation. Sinon, le séchage thermique étant

très gourmand en énergie, le rendement global de la filière boue sera considérablement réduit. La consommation théorique pour évaporer un m<sup>3</sup> d'eau est de l'ordre de 700 kWh, mais, en pratique, la consommation énergétique est plus élevée puisqu'il faut compenser les pertes de l'appareil et vaincre les forces de liaison entre l'eau et la matière solide. Comme nous le verrons par la suite, le chiffre annoncé de 1000 kWh/m<sup>3</sup> d'eau évaporée correspond à la consommation énergétique moyenne des séchoirs à boues.

Ordre de grandeur de l'énergie nécessaire pour séparer l'eau de la boue (kWh / m <sup>3</sup> d'eau séparée)	
<b>Épaississement</b>	0,001 – 0,01
<b>Déshydratation mécanique</b>	1 – 10
<b>Séchage thermique</b>	≈1000

Tableau 17 - Ordre de grandeur des énergies nécessaires pour séparer l'eau de la boue au cours des différentes étapes du traitement [MOL90]

## I.2 Éléments principaux d'un poste de séchage

Le séchoir ne constitue pas le seul élément d'un poste de déshydratation thermique. Outre le séchoir, on distingue essentiellement (cf. Figure 6) :

- ✓ les dispositifs d'alimentation et d'évacuation des boues, qui peuvent comprendre des trémies de stockage, des dispositifs de mise en forme (émottage, mélangeur, granulateur ...) et des équipements de transport (transporteur à bandes, pompe gaveuse volumétrique ...);
- ✓ une source de chaleur extérieure à l'unité, si une source de chaleur est disponible à proximité de l'installation de séchage, ou intérieure ;
- ✓ un dispositif de ventilation véhiculant le gaz vecteur nécessaire à l'évacuation de la vapeur d'eau avec un ou plusieurs points d'introduction. Le chauffage de matière organique induit l'émission de composés volatils [DUP00]. La plupart de ces substances provenant des boues sont malodorantes et peuvent produire des nuisances importantes. Afin de limiter les émissions d'odeur dans l'environnement du séchoir, les équipements en contact avec l'air vicié sont souvent mis en dépression ;

- ✓ un dispositif de traitement des buées. Dans les séchoirs, les substances volatiles et des poussières, qui se forment à la fin du séchage, sont entraînées dans les buées. Ces buées doivent être dépoussiérées, par l'intermédiaire de cyclones et de tours de lavage, puis sont condensées. Les condensats sont en général réintroduits en tête de la station d'épuration. Afin d'éviter des nuisances d'odeurs, il est nécessaire de traiter les incondensables en aval de la condensation. Ils sont soit incinérés dans le brûleur de la chaudière, soit désodorisés dans un biofiltre ;
- ✓ et un dispositif de régulation de l'unité (températures, débit de boues, pression ...).

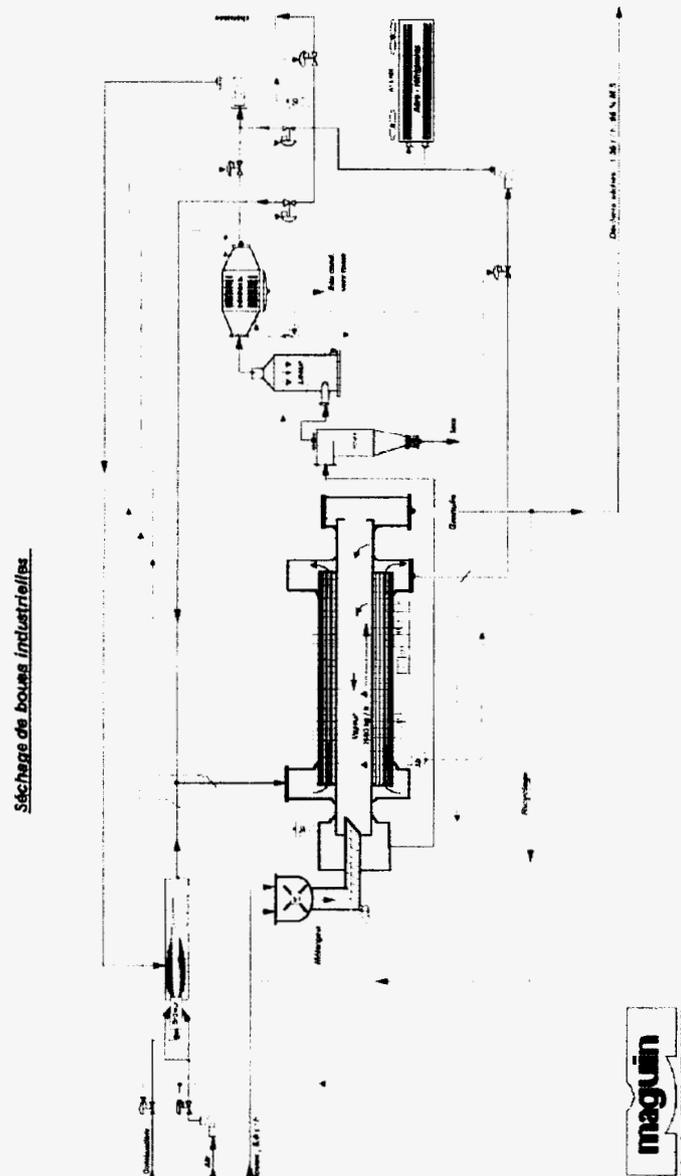


Figure 6 - Installation de séchage de boues (source : Maguin)

Pour amortir le coût du séchage, il est possible de récupérer une partie de l'énergie contenue dans les buées, plusieurs possibilités existent :

- ✓ la condensation avec de la boue liquide qui est chauffée. Ainsi conditionnée thermiquement (on parle de thermocoagulation), la boue est plus apte à la déshydratation mécanique, ce qui génère des économies de flocculant ;
- ✓ le chauffage du digesteur, ce qui augmente la production de biogaz qui sera ensuite brûlé dans la chaudière ;
- ✓ la production d'eau chaude pour un process ou pour le chauffage des bâtiments.

De cette manière, il est possible de récupérer facilement 75 % de la chaleur contenue dans les buées [MAR91].

### I.3 Quelques définitions

Il est important à ce stade de revenir sur quelques définitions de termes techniques liés au séchage.

Il est courant de faire une distinction (cf. Figure 7) entre *séchage direct* et *séchage indirect* :

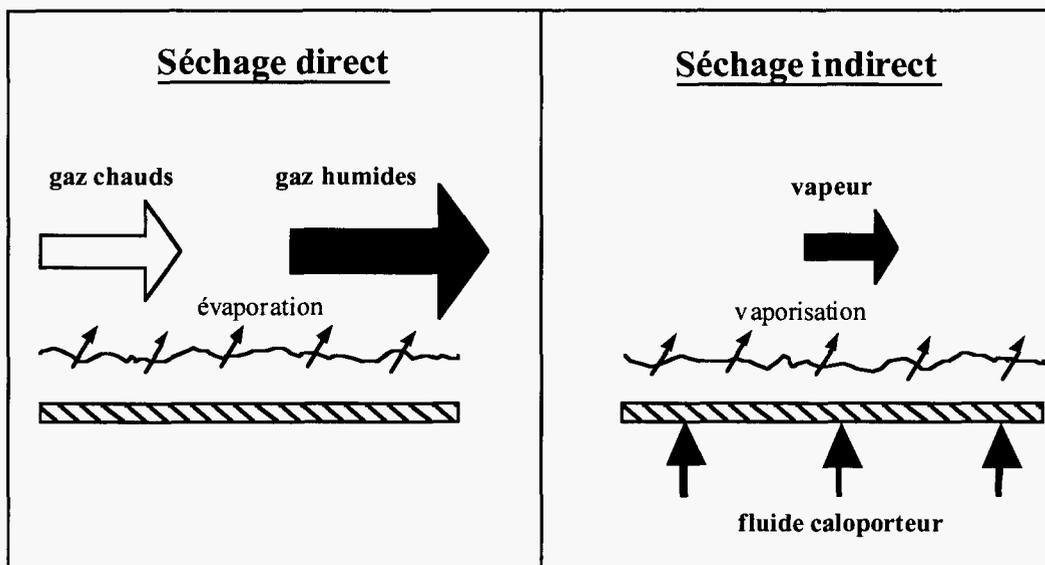


Figure 7 - Séchage direct et séchage indirect

- ✓ le *séchage direct* consiste à mettre en contact un gaz en mouvement avec le produit à sécher. Il s'établit spontanément un écart de température et de pression partielle d'eau tel qu'un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit (sous l'effet de

la différence de température) et qu'un transfert d'eau s'effectue en sens inverse (sous l'effet d'une différence de concentration en eau dans l'air) ;

- ✓ pour le *séchage indirect*, il n'y a aucun contact direct entre l'agent séchant et le produit à sécher. L'énergie thermique nécessaire au séchage peut être apportée, comme schématisé sur la Figure 7, par une paroi chaude sur laquelle est déposé le produit. Les vapeurs libérées par le séchage sont aspirées ou entraînées par un gaz de balayage, dont le débit est toujours faible en comparaison du débit requis pour un séchage convectif.

Cette classification technologique est habituellement utilisée par la profession. Le terme "séchoirs mixtes" fera référence aux séchoirs qui utilisent les deux modes de séchage.

La grandeur physique la plus employée pour déterminer le séchage d'un produit est la **teneur en eau base sèche**, notée X, qui est définie comme le rapport entre la masse d'eau contenue dans un volume du produit et la masse anhydre (la matière sèche) du produit dans le même volume.

$$X = \frac{m - m_{\text{anhydre}}}{m_{\text{anhydre}}} = \frac{m_{\text{eau}}}{m_{\text{anhydre}}} \quad (1)$$

La variation de la teneur en eau est proportionnelle à la masse d'eau évaporée pendant cette opération. Les unités utilisées sont soit des kg/kg matière sèche ou des pourcentages.

Dans le domaine de séchage des boues, une autre grandeur est particulièrement utilisée, il s'agit de la **siccité**, notée S. Elle donne le rapport de la masse anhydre à la masse humide (la masse totale) du produit.

$$S = \frac{m_{\text{anhydre}}}{m_{\text{anhydre}} + m_{\text{eau}}} = \frac{m_{\text{anhydre}}}{m} \quad (2)$$

Contrairement à la teneur en eau base sèche, une variation de la siccité n'est pas proportionnelle à la masse d'eau évaporée pendant cette opération, parce que la siccité est fonction de la masse totale, qui diminue au cours de séchage.

La siccité s'exprime en pourcentage. Notons que la siccité est reliée à la teneur en eau par la formule suivante :

$$S = \frac{1}{X + 1} \quad (3)$$

De même que la distinction entre séchage direct et indirect est primordiale, il faut aussi noter la différence entre *séchage partiel* et *séchage poussé* (ou total). La base de cette distinction est la siccité finale obtenue après séchage :

- ✓ *Le séchage partiel* est destiné à remonter la siccité de la boue à une valeur suffisante (de 30 à 55 % M.S.), ce qui, par exemple, permet d'atteindre l'autothermicité ;
- ✓ *Le séchage poussé* a pour objectif de réduire le volume au minimum en atteignant des siccités proches de 90 % pour faciliter le transport, le stockage et la valorisation comme combustible complémentaire.

Pour évaluer les performances respectives des différents séchoirs, nous allons maintenant introduire un critère thermodynamique : **la consommation spécifique**. Cette grandeur s'exprime en kWh/kg d'eau évaporée et représente la quantité de chaleur fournie pour évaporer un kilogramme d'eau en une heure.

Dans la suite de ce rapport, nous ne nous intéresserons qu'aux séchoirs à proprement parler ; seront ainsi exclus de nos considérations l'ensemble des dispositifs annexes de traitement des buées et de mise en forme du produit sec. Nous allons maintenant présenter les différentes technologies disponibles pour sécher les boues.

## II. Les séchoirs indirects

Comme nous l'avons vu précédemment, la chaleur est apportée par l'intermédiaire d'une surface chaude dans le cas d'un séchage indirect. Ce contact entre une paroi chaude et la boue va poser des problèmes technologiques pour le séchage. En effet, la boue humide va s'assécher au contact de la paroi chaude, créant ainsi un gradient d'humidité dans le produit, former une résistance aux transferts de chaleur (la conductivité thermique de la boue sèche à 90 % de M.S. étant de l'ordre de 0,12 W/mK [COU99], soit à peine 5 fois

la conductivité thermique de l'air) et donc ralentir le séchage. Au niveau du procédé, deux voies peuvent être envisagées pour pallier à ce problème :

- ✓ le séchage en couche mince avec des temps de séjours dans le séchoir très courts. Dans ce cas, il n'y a pas de formation de gradient d'humidité dans le produit ;
- ✓ ou le séchage avec mélange avec des temps de séjours plus longs. L'agitation a pour objectif de renouveler la surface d'échange entre la paroi et le produit.

La mise en oeuvre de cette seconde option, majoritairement retenue dans les procédés de séchage indirect appliqués aux boues, pose problème. Cette difficulté est liée à la viscosité de la boue et en particulier à ce que l'on nomme couramment la "phase plastique" de la boue. Cette phase correspond à un changement de structure du milieu vers une siccité de 60 %, qui se traduit par une forte augmentation du couple du dispositif d'entraînement, de mélange et de cisaillement [FER00] (cf. Figure 8). Après un état liquide et pâteux (cf. Tableau 1, chapitre 1), la boue devient très collante et visqueuse au cours du séchage, ce qui peut entraîner des défaillances au niveau des séchoirs : colmatage, fortes tensions mécaniques et croulage. De plus, la viscosité élevée empêche un mélange correct causant une baisse des transferts de chaleur et par conséquent un ralentissement du séchage.

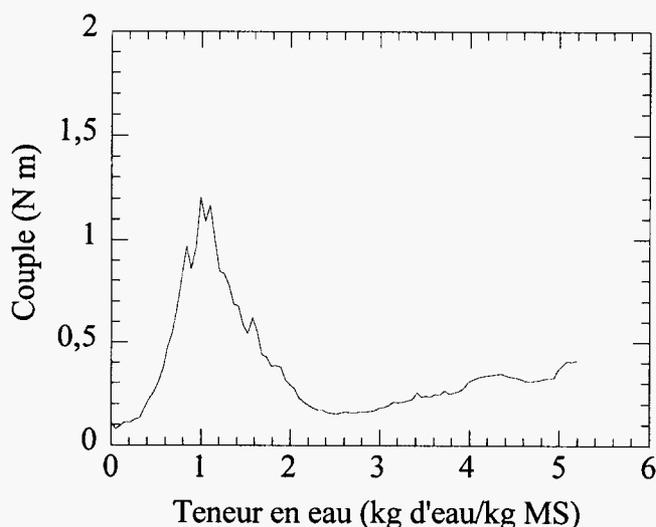


Figure 8 – Évolution du couple du dispositif d'agitation au cours du séchage indirect avec agitation d'une boue urbaine [FER00]

La solution technique (cf. Figure 9) est alors de s'arrêter avant cette phase plastique et ainsi de procéder uniquement à un séchage partiel ou de procéder à une recirculation du produit sec avec un mélange en entrée du séchoir pour obtenir une siccité proche de 60 %.

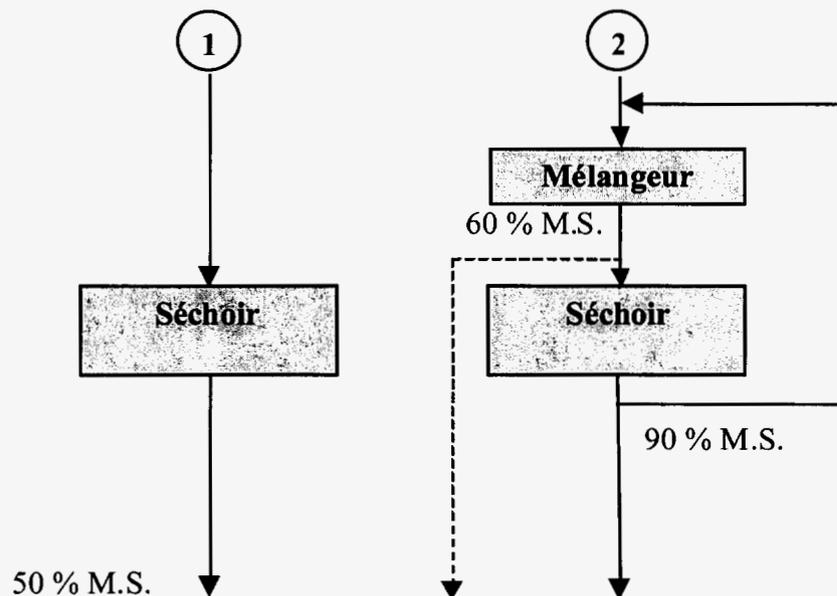


Figure 9 - Séchage des boues et phase plastique

## II.1 Les différentes technologies de séchage indirect disponibles

Les informations présentées dans cette partie descriptive sont issues essentiellement des plaquettes et des informations additionnelles des constructeurs. Les autres sources d'information sont les articles techniques, publiés notamment par les fabricants de séchoirs et les exploitants d'installations existantes, et deux études réalisées par l'École des Mines d'Albi Carmaux [CAR99] et [HOF96].

La plupart des séchoirs à contact pour les boues ont été conçus et développés pour l'industrie chimique ou agro-alimentaire, où ils sont employés pour le séchage des produits pâteux et collants. Les séchoirs sont souvent utilisés pour les boues urbaines sans grandes modifications. Ils peuvent être classés en 5 catégories différentes, qui sont :

- ✓ les séchoirs à disques ;
- ✓ les séchoirs à palettes ou séchoirs malaxeurs ;

- ✓ les séchoirs à couche mince ;
- ✓ les séchoirs à tambour rotatif ;
- ✓ les autres types de séchoirs, dont la plupart combinent une déshydratation mécanique à un séchage thermique.

La Figure 10 dresse une liste non exhaustive des principaux fabricants pour les différentes catégories citées ci-dessus. Cette liste ne prétend pas recenser tous les constructeurs de séchoirs, mais uniquement ceux qui proposent des séchoirs à boues. En particulier, une société comme Comessa commercialise différents types de séchoirs (à palette, à tablier, à lit fluidisé, à tambour, mixte), mais dans le domaine des boues, elle recommande l'utilisation des séchoirs mixtes ou à tambour. D'autres sociétés comme Deutsche Babcock et Wehrle Werk AG, qui ont par le passé eu des installations de séchage de boues, ont cessé leur activité, au moins pour ce qui est du domaine des boues résiduaires.

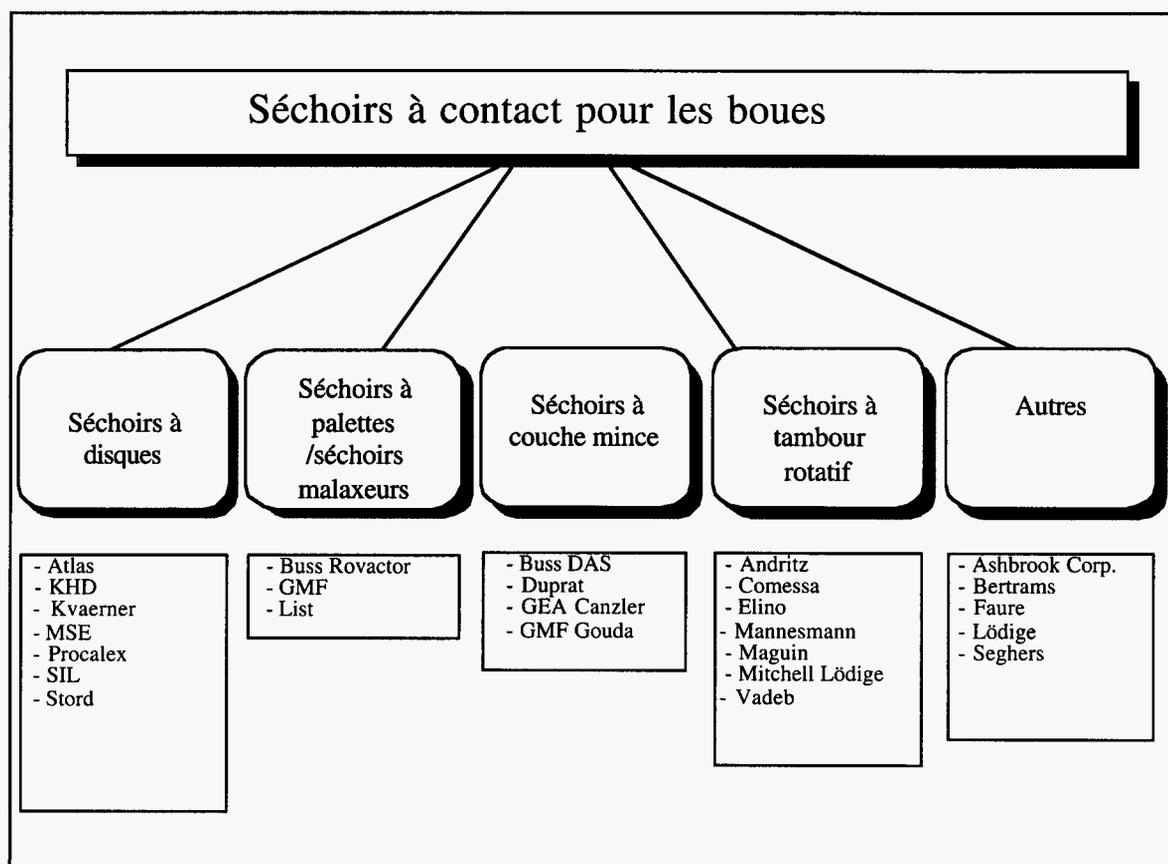


Figure 10 - Classification des séchoirs indirects pour les boues résiduaires avec les principaux fabricants

Dans ce qui suit, les principes de fonctionnement de chaque groupe de séchoirs seront décrits et les particularités de certains séchoirs seront mentionnées.

### II.1.1 Les séchoirs à disques

Ce sont les séchoirs indirects les plus répandus pour le traitement des boues. Ils sont constitués (cf. Figure 11) de deux éléments coaxiaux : un cylindre extérieur immobile (le stator), visible sur la photographie de droite, et un cylindre intérieur en mouvement (le rotor), visible sur la photographie de gauche, entraîné par un moteur électrique. Des disques creux sont habituellement disposés perpendiculairement à l'axe du rotor. L'ensemble "rotor et disques" est chauffé par un fluide caloporteur, en général de la vapeur d'eau surchauffée.

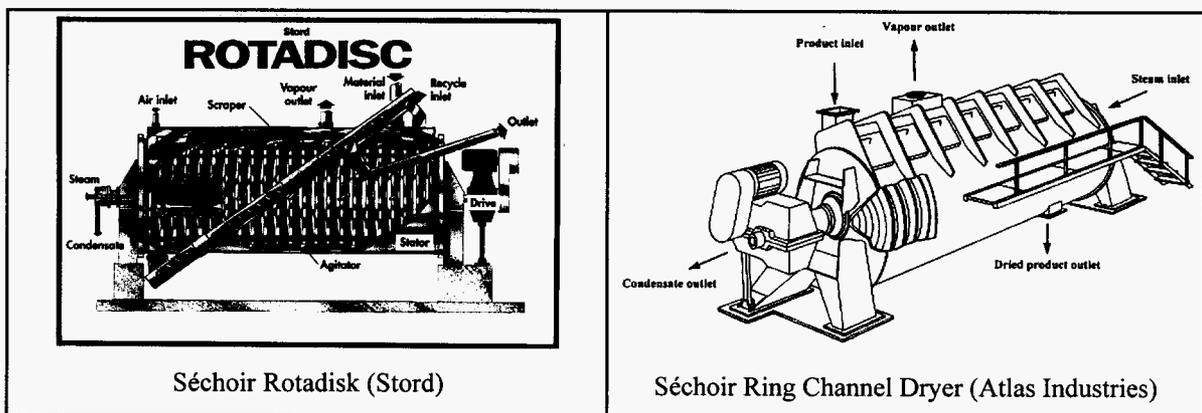


Figure 11 - Exemples de séchoirs à disques

Des variantes existent dans la conception des disques. Dans le séchoir Ring Channel Dryer proposé par Atlas, les disques sont parcourus, comme le montre la photographie de gauche sur la Figure 12, par des canaux concentriques, dans lesquels circule le fluide caloporteur. Ce design évite aux condensats de rester bloquer à l'intérieur de la paroi. Pour le séchoir Multicoil commercialisé par Kvaerner et celui proposé par MSE, on ne peut plus guère parler de disques. La forme se rapproche du Ring Channel Dryer, mais seuls les anneaux tubulaires sont conservés comme le montre la photographie de droite sur la Figure 12. Ainsi, ces deux derniers séchoirs possèdent une surface d'échange spécifique légèrement supérieure à celle des séchoirs à disques conventionnels.

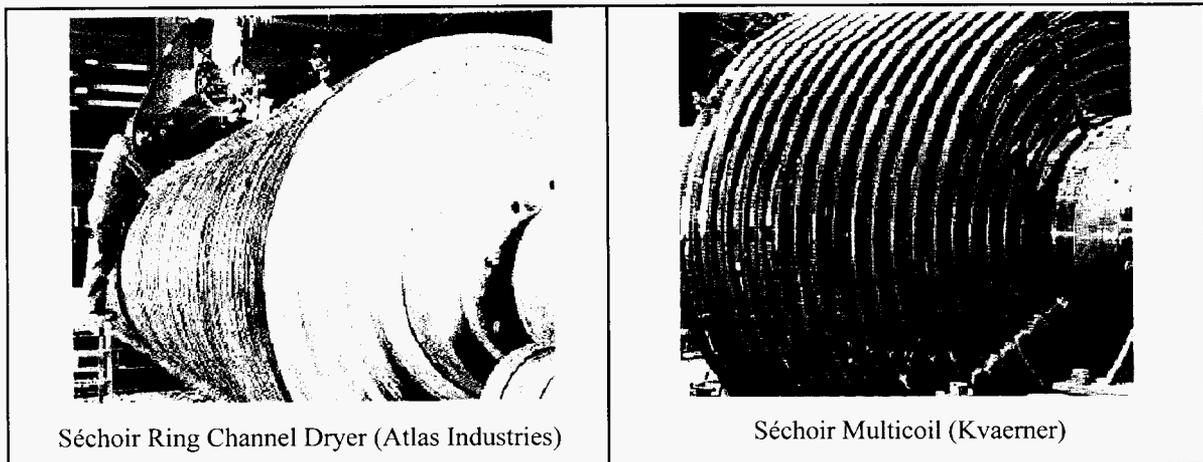


Figure 12 - Design particulier de disques

L'espace entre le rotor et l'enveloppe, de l'ordre d'une dizaine de centimètres, est occupé par le matériau à sécher, de sorte que les disques sont en contact permanent avec le produit. Celui-ci est introduit par un côté et est transporté dans le séchoir à l'aide de sabots ou de palettes orientables situées aux extrémités des disques. Dans le séchoir System Umag proposé par KHD Humboldt Wedag (cf. Figure 13), les disques sont tous tronqués de la même manière et leur arrangement génère une spirale qui permet d'assurer le transport de la boue dans le séchoir.

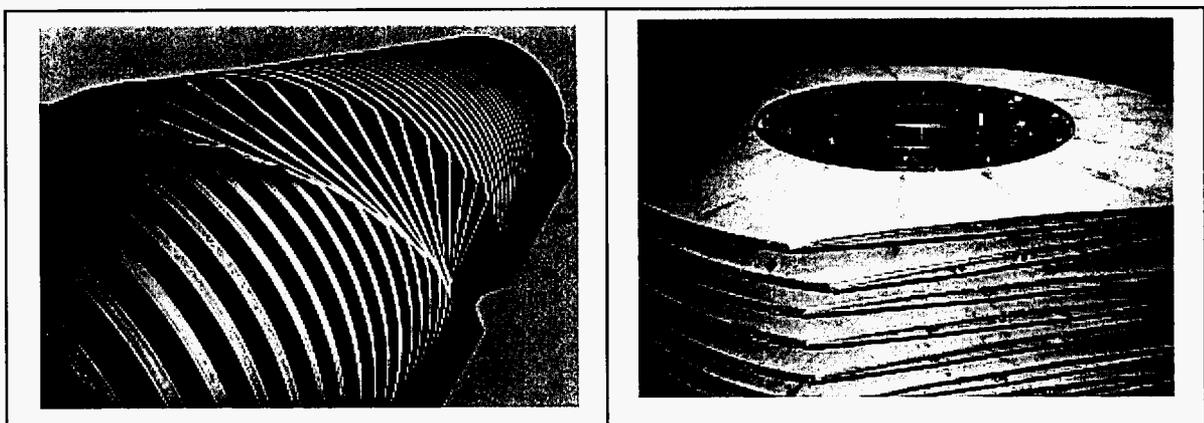


Figure 13 - Rotor du séchoir System Umag (KHD Humboldt Wedag)

Dans le cas du séchoir Discofluid développé par Procalex, deux rotors équipés de disques creux sont situés dans une cuve en U et c'est une vis placée entre les disques dans la partie inférieure de la cuve, comme le montre la Figure 14, qui permet l'avancement uniforme du produit à sécher.

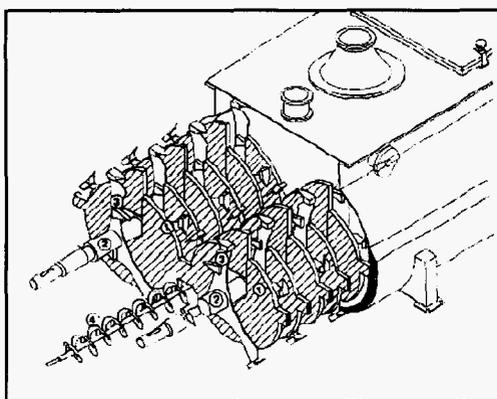


Figure 14 - Dispositif d'avancement du produit dans le séchoir Discofluid (Procalex)

Afin d'éviter tout colmatage, des racleurs fixés au stator raclent la boue collée sur les disques ; ils contribuent également au transport du produit. Mais ce système de raclage peut s'avérer insuffisant devant l'aspect fortement collant de certaines boues. Ainsi, ces séchoirs nécessitent généralement un pré-mélange de la boue humide avec du produit sec pour dépasser la phase collante (aux alentours de 60 % de siccité). Cette recirculation peut atteindre 90 à 120 %, ce qui réduit fortement le débit de boue traitée.

Les buées produites sont récupérées dans la partie supérieure du stator et sont ensuite traitées. La mise en dépression du séchoir permet d'éliminer les problèmes d'odeurs à proximité de l'installation de séchage. Dans la majorité des cas, l'enveloppe est calorifugée de manière à minimiser les pertes de chaleur vers l'extérieur et la condensation des buées produites sur les parois internes du séchoir. Certains constructeurs, comme Stord, équipent également leurs appareils avec une enveloppe chauffée, qui augmente la surface d'échange du séchoir.

Le Tableau 18 recense le nombre de références nationales et internationales, à notre connaissance, des différents constructeurs dans le domaine des boues.

<i>Atlas</i>	<i>KHD</i>	<i>Kvaerner</i>	<i>MSE</i>	<i>Procalex</i>	<i>SIL</i>	<i>Stord</i>
1	2 (courant 1996)	8 (début 1996)	pas d'info	1 essai	plusieurs (sur les lisiers)	+ de 70

Tableau 18 - Nombre de références dans le domaine des boues pour les différents constructeurs de séchoirs à disques

### Données caractéristiques des séchoirs à disques

Le Tableau 19 donne les caractéristiques moyennes des séchoirs à disques, ces grandeurs sont en général assez proches d'un constructeur à l'autre. Au niveau de la surface de chauffe, nous avons indiqué les valeurs limites inférieures et supérieures disponibles sur le marché.

<i>Caractéristiques</i>	<i>Unités</i>	<i>Valeur</i>
Vitesse de rotation	(tr/min)	4 - 12
Temps de séjour	(min)	60
Température du fluide caloporteur	(°C)	160 - 220
Surface d'échange	(m <sup>2</sup> )	25 - 500

Tableau 19 - Caractéristiques moyennes des séchoirs à disques

#### II.1.2 Les séchoirs à palettes, les séchoirs malaxeurs

Les séchoirs à palettes ressemblent aux séchoirs à disques au niveau de leur conception : ils disposent aussi d'une double enveloppe extérieure immobile et d'un ou plusieurs rotors sur lesquels sont fixées les palettes (cf. Figure 15).

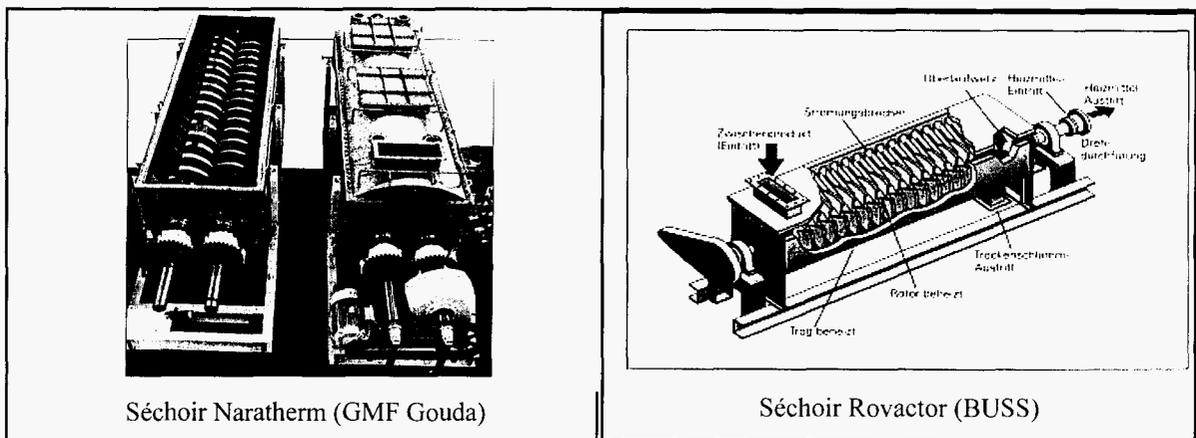


Figure 15 - Différents séchoirs à palettes

Le fluide caloporteur circule dans la double enveloppe ainsi que dans les rotors et palettes. Néanmoins, le cisaillement de la boue et le malaxage sont beaucoup plus importants que dans les séchoirs à disques. En effet, sur l'enveloppe sont fixés des

racleurs formés de façon à interagir avec les palettes. Le produit à sécher est ainsi intensivement brassé, émotté et raclé. Après avoir traversé le séchoir, les boues sortent par un trop plein réglable, ce qui permet de faire varier le taux de remplissage et le temps de séjour du produit dans l'installation.

Ces séchoirs ont été développés pour sécher des produits à haute viscosité, ce qui leur permet généralement de passer la phase plastique sans problème, et donc de travailler sans recirculation du produit sec en tête de l'installation. C'est le cas des séchoirs Naratherm et Discotherm respectivement commercialisés par GMF Gouda et List. Par contre, le séchoir Rovactor développé par Buss ne possède pas cette propriété puisqu'il ne peut sécher des boues qu'à partir de 60 % de siccité, donc après la phase plastique. Dans les installations existantes, ce séchoir est utilisé au cours d'une seconde étape de séchage pour réaliser un séchage poussé de la boue.

Le design des palettes peut être différent d'un constructeurs à l'autre (cf. Figure 16). Dans le cas du Naratherm, les palettes forment des demi-disques, à épaisseurs variables, équipés de racleurs. Pour le Discotherm, ce sont des ailettes et des barres malaxeuses, disposées de façon identique le long du rotor, alors que dans le cas du Rovactor, les palettes, composées uniquement d'ailettes, sont décalées de 90 degrés par rapport à la paire suivante sur l'axe du rotor.

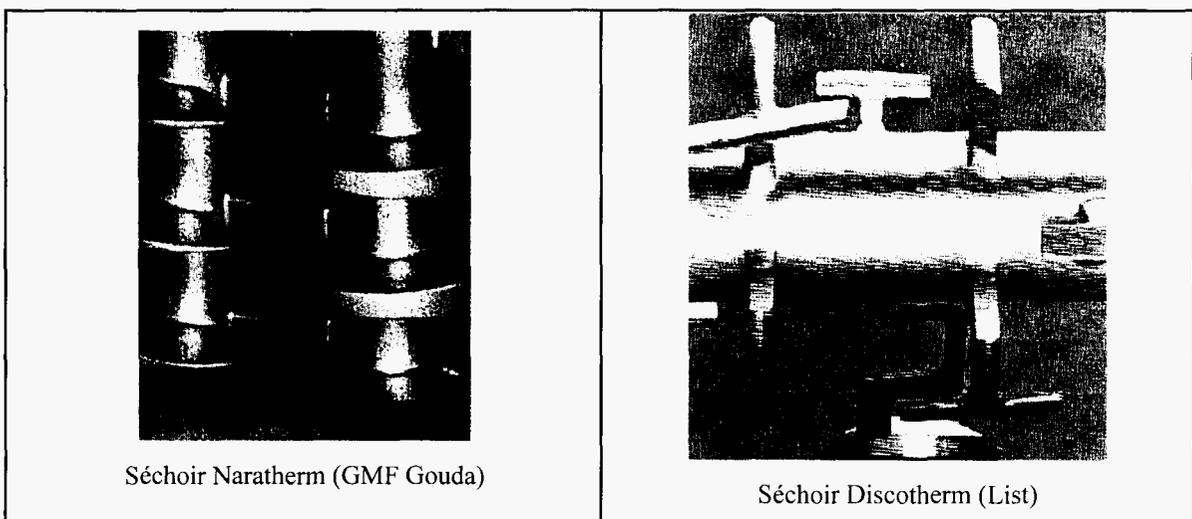


Figure 16 - Design des palettes

Le Tableau 20 recense le nombre de références nationales et internationales, à notre connaissance, des différents constructeurs dans le domaine des boues.

<i>Buss</i>	<i>GMF Gouda</i>	<i>List</i>
23	31	pas d'info
dont 3 en France	dont 4 en France	

Tableau 20 - Nombre de références dans le domaine des boues pour les différents constructeurs de séchoirs à palettes

### *Données caractéristiques des séchoirs à palettes/séchoirs malaxeurs*

Les caractéristiques des trois séchoirs décrits précédemment sont assez proches. Le Tableau 21 donne les caractéristiques moyennes des séchoirs à palettes.

<i>Caractéristiques</i>	<i>Unités</i>	<i>Valeur</i>
Vitesse de rotation	(tr/min)	6 - 40
Temps de séjour	(min)	60 - 180
Température du fluide caloporteur	(°C)	160 - 240
Surface d'échange	(m <sup>2</sup> )	130

Tableau 21 - Caractéristiques moyennes des séchoirs à palettes

### *II.1.3 Les séchoirs à couche mince*

Les séchoirs à couche mince sont des procédés de séparation utilisés depuis longtemps dans l'industrie pour le séchage de produits difficiles. Le principe de ces séchoirs consiste à déposer une fine couche de produit sur une paroi chaude. Au contact de cette paroi, l'eau contenue dans le produit se vaporise. Deux types de séchoirs à couche mince sont commercialisés.

Dans les procédés développés par Gea Canzler et Buss, présentés sur la Figure 17, la boue est projetée par des pâles pendulaires, fixées sur un rotor tournant à grande vitesse, contre l'enveloppe cylindrique externe chauffée.

L'épaisseur de boue encollée est de l'ordre de 5 à 10 millimètres, ce qui permet d'atteindre des coefficients d'échange très élevés entre la paroi et la boue et réduit donc le temps de séjour de la boue dans le séchoir. Les pâles assurent aussi le raclage de la boue sèche et le déplacement du produit.

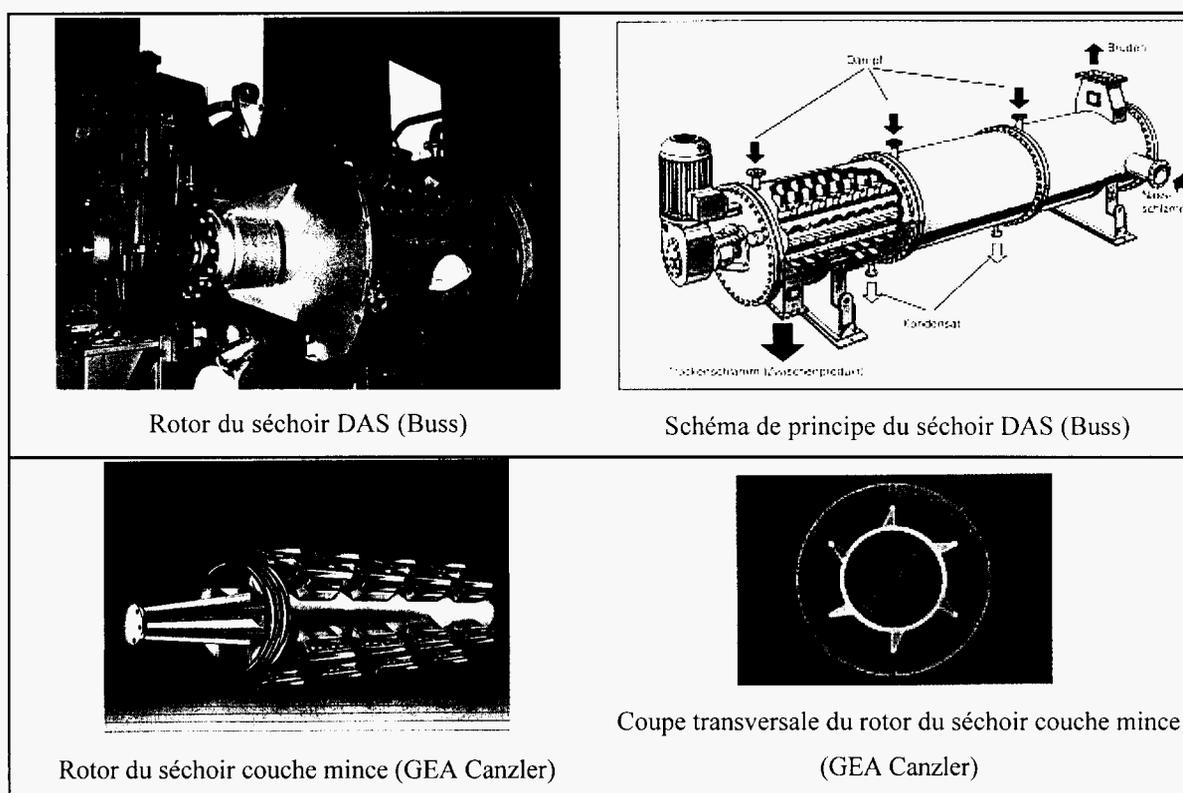


Figure 17 - Deux exemples de séchoirs à couche mince

Dans le cas du séchoir commercialisé par la société Duprat (cf. Figure 18), la boue est enduite à l'aide de cannes d'enduction sur la surface extérieure d'un cylindre, en rotation et chauffé intérieurement. La couche de boue enduite est beaucoup plus fine que précédemment, de l'ordre de 2 à 3 millimètres. Elle est raclée par un couteau en fin de rotation.

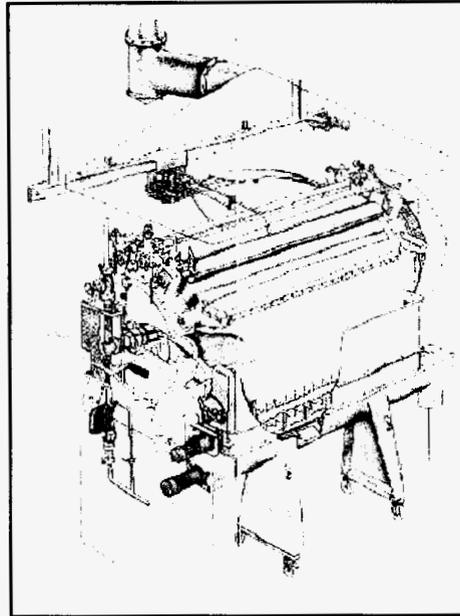


Figure 18 - Séchoir à couche mince commercialisé par Duprat

Les procédés développés par Gea Canzler et Duprat sont utilisés pour sécher les boues jusqu'à des siccités élevées alors que le séchoir Das commercialisé par Buss ne sert qu'au pré séchage de la boue. Lorsqu'un séchage complet est recherché, Buss associe en série le séchoir à palettes de type Rovactor.

L'absence de malaxage de la boue permet d'éviter la recirculation du produit sec. De plus, il faut noter que les temps d'arrêt et de démarrage de l'installation sont assez courts et que la taille des installations est relativement faible.

Le Tableau 22 recense le nombre d'applications, à notre connaissance, au niveau national et international de ces séchoirs dans le domaine des boues.

<i>Gea Canzler</i>	<i>Buss</i>	<i>Duprat</i>
10	48 dont 5 en France	plus d'installation

Tableau 22 - Nombre de références pour les séchoirs à couche mince

Notons que la société Duprat a vendu par le passé une installation pour sécher des boues organiques issues d'une entreprise d'abattage de volaille [GUI99]. Cette

installation n'est plus, à notre connaissance, en fonctionnement, mais la société Duprat continue à s'intéresser au domaine des boues.

### *Données caractéristiques des séchoirs à couche mince*

Le Tableau 23 donne les caractéristiques moyennes des séchoirs à couche mince dont la technologie est proche de celle du Das (Buss).

<i>Caractéristiques</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeur</i>
Vitesse de rotation	(tr/min)	50 - 750
Temps de séjour	(min)	5 - 10
Température de chauffe	(°C)	135 - 180
Surface d'échange	(m <sup>2</sup> )	20 - 110

Tableau 23 - Caractéristiques moyennes des séchoirs à couche mince de type Das

#### *II.1.4 Les séchoirs indirects à tambour rotatif*

Le séchoir rotatif, présenté sur la Figure 19, est constitué d'un cylindre tournant dont l'axe est légèrement incliné par rapport à l'horizontale pour favoriser l'avancée du produit. Ce cylindre est généralement supporté par deux anneaux de roulement. La rotation lente du tambour partiellement rempli assure le renouvellement du produit sur la surface d'échange.

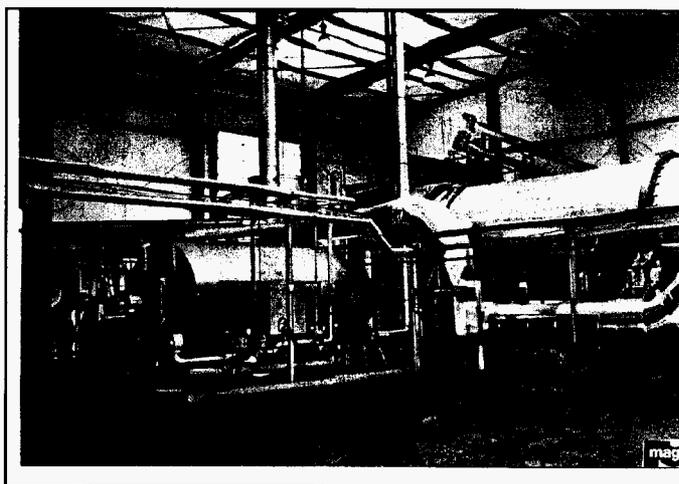


Figure 19 - Exemple de séchoirs à tambour rotatif

L'apport de chaleur peut se faire directement à la paroi du cylindre, comme le propose parfois Comessa, ou par l'intermédiaire d'un faisceau tubulaire parallèle à l'axe du tambour chauffé intérieurement par la circulation de vapeur surchauffée, d'huile thermique, de gaz ou de fumées ... Ce dernier type de séchoir est le plus répandu (Andritz, Comessa, Elino, Maguin, Mitchell, Mannesman, Vadeb). La Figure 20 présente deux vues de l'intérieur de séchoirs à tambour rotatif à chauffage indirect, l'une (à gauche) dans le cas d'un apport de chaleur à la paroi sur laquelle on distingue les organes divers assurant le brassage et l'avancement du produit, l'autre (à droite) dans le cas d'un apport de chaleur à l'aide de faisceau tubulaire.

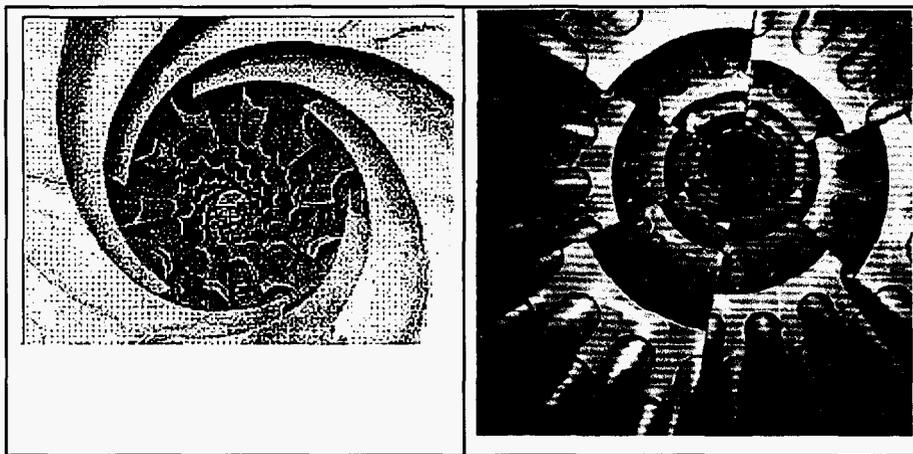


Figure 20 - Vues de l'intérieur de séchoirs à tambour rotatif

Suivant les constructeurs, on peut noter de légères différences sur le matériau utilisé pour la construction du tambour, sa conception et donc le temps de séjour, la quantité de gaz utilisée, le type de malaxeur... Précisons que, à l'exception de la société Élino, les autres marques procèdent à une recirculation de la matière en tête du séchoir. Enfin, Vadeb et Maguin recommandent une surveillance au moins partielle du séchoir lors de son fonctionnement.

Le Tableau 24 recense le nombre d'applications, à notre connaissance, au niveau national et international de ces séchoirs dans le domaine des boues.

<i>Andritz</i>	<i>Comessa</i>	<i>Elino</i>	<i>Mitchell- Lodge</i>	<i>Maguin</i>	<i>Mannesman</i>	<i>Vadab</i>
8	3	1	3	3	pas d'info	20 (direct+ indirect)

Tableau 24 - Nombre de références pour les séchoirs à tambour avec chauffage indirect

Pour la société Vadab, nous n'avons obtenu que des informations globales sur le nombre de leurs références dans le monde. Il ne nous est donc pas possible de distinguer le nombre d'installations avec des tambours rotatifs à chauffage indirect.

### *Données caractéristiques des séchoirs indirects à tambour*

Le Tableau 25 donne les caractéristiques moyennes des séchoirs à tambour indirects.

<i>Caractéristiques</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeur</i>
Vitesse de rotation	(tr/min)	0.5 - 2
Temps de séjour	(min)	20 - 120
Température de chauffe	(°C)	120 - 240

Tableau 25 - Caractéristiques moyennes des séchoirs indirects à tambour

#### *II.1.5 Autres séchoirs indirects*

Dans ce paragraphe, nous avons regroupé les séchoirs qui ne rentrent pas dans les catégories précédentes. Il est cependant possible d'introduire une sous-section qui concerne les séchoirs couplant déshydratation mécanique et séchage indirect. Nous allons les décrire brièvement. Nous terminerons cette partie consacrée à la description des technologies de séchoirs indirects par la présentation d'un séchoir à plateaux, d'un séchoir indirect fonctionnant sous vide et d'un séchoir radiatif.

### II.1.5.1 Les procédés couplant la déshydratation mécanique et le séchage indirect

On retrouve deux des procédés les plus utilisés pour déshydrater mécaniquement la boue : les filtres à bandes et les filtres presse.

La société Bertrams propose un filtre presse séchant, appelé séchoir Rollfit (cf. Figure 21). Le séchage est effectué sous vide, après la phase de filtration, et la chaleur est apportée par les plaques filtrantes chauffées par circulation de vapeur surchauffée ainsi que par rayonnement. Ce procédé est discontinu mais en fonction des caractéristiques de la boue, deux cycles peuvent être effectués en 24h. Il permet d'obtenir des siccités finales de l'ordre de 95 %.

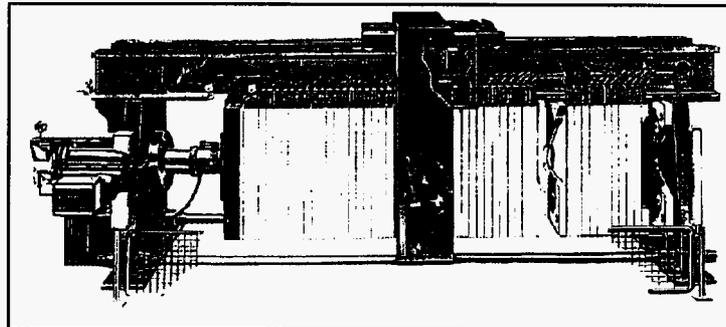


Figure 21 - Photographie du procédé Bertrams

On trouve également dans la littérature un séchoir impulsif dont un prototype (cf. Figure 22) a été construit par Ashbrook Corporation et qui a été testé sur des boues de papeterie [BEC99]. Nous ne présentons ici que le principe de fonctionnement de ce séchoir. Nous reviendrons dans le chapitre suivant sur ce procédé en présentant un résumé des activités de recherches réalisées par l'Institut Technique et Scientifique du Papier aux États Unis depuis plus de cinq ans maintenant, qui ont conduit au développement de ce procédé.

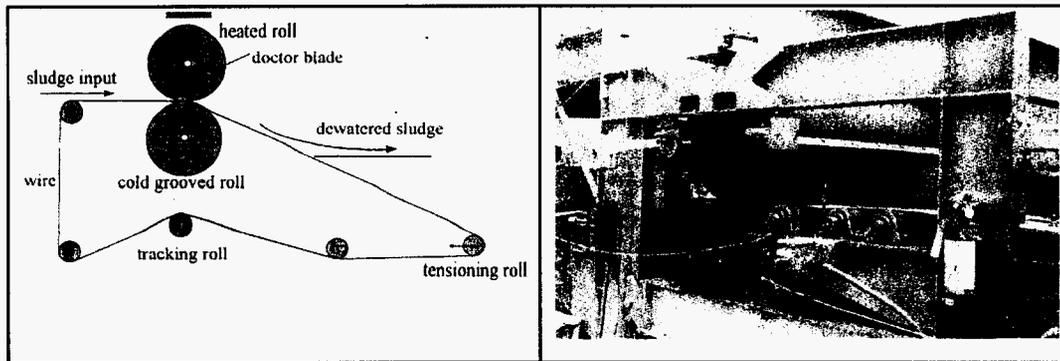


Figure 22 - Schéma de principe du procédé développé par l'institut technique et scientifique du papier à Atlanta (à gauche) et photographie du prototype construit par Ashbrook Corporation (à droite)

Ce procédé s'apparente à un filtre à bandes. La boue est déposée sur un tapis avançant à une vitesse proche de 2 m/s et passe sous un rouleau chauffé par induction qui comprime la boue en imposant une pression de l'ordre de 14 bars et une température à l'interface boue/presse de l'ordre de 300°C. Au contact de la paroi chaude, l'eau contenue dans la boue se vaporise, ce qui crée une surpression qui va expulser le reste d'eau contenue dans le gâteau sous forme liquide. L'élimination de l'eau sous forme liquide plutôt que sous forme vapeur, comme dans les autres procédés, devrait réduire considérablement la consommation énergétique de ce procédé.

Selon le type de boues, ce procédé peut donner des résultats très intéressants avec des gains de siccité (par rapport à la déshydratation à température ambiante) compris entre 9.6 et 17 % sur des boues provenant d'une papeterie mais aussi d'industries produisant des huiles ou encore de la station d'épuration urbaine. Néanmoins, sur d'autres boues contenant, en particulier, plus de fibres mais moins de matières minérales, le gain en siccité n'a été que de 4.5 à 8 %. Les essais se poursuivent pour essayer de déterminer les conditions optimales de fonctionnement et les boues susceptibles d'être traitées par ce procédé.

#### II.1.5.2 Les séchoirs à plateaux

Pour les applications aux boues, la société Seghers propose un séchoir, présenté sur la Figure 23, multi étages à plateaux horizontaux, chauffés intérieurement par circulation d'huile thermique à 260°C. La boue est introduite dans ce séchoir vertical par la partie

supérieure. Une fine couche de boue entre en contact avec un plateau horizontal chaud ; un bras mécanique la fait ensuite passer sur le plateau situé à l'étage inférieur, et ainsi de suite jusqu'à la sortie du séchoir. Ce séchoir produit des granulés durs et sans poussières, les granulés de petite taille sont recirculés en tête. Le temps de séjour est de l'ordre d'une vingtaine de minutes. Le constructeur annonce six références dans le monde, dont une à Anvers en Belgique et deux, à Barcelone et Sabadell, en Espagne.

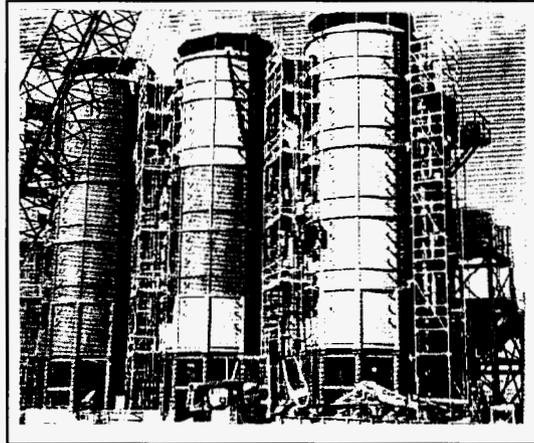


Figure 23 - Séchoir multi étages à plateaux horizontaux (Seghers)

#### II.1.5.3 Les séchoirs sous vide

La société Lödige a développé un procédé de séchage sous vide avec mélange intensif pour le séchage de produits pharmaceutiques, chimiques et pour certains types de boues. Ce procédé batch est présenté sur la Figure 24. Il est composé d'une cuve cylindrique horizontale chauffée dans laquelle est inséré un agitateur muni de pâles. Sur la paroi interne de la cuve sont fixés des disperseurs. Les vitesses élevées de rotation de l'agitateur et des disperseurs assurent un contact fréquent entre le produit à sécher et l'enveloppe externe. Il ne nous a pas été possible de recenser le nombre d'applications de ce séchoir dans le domaine des boues.

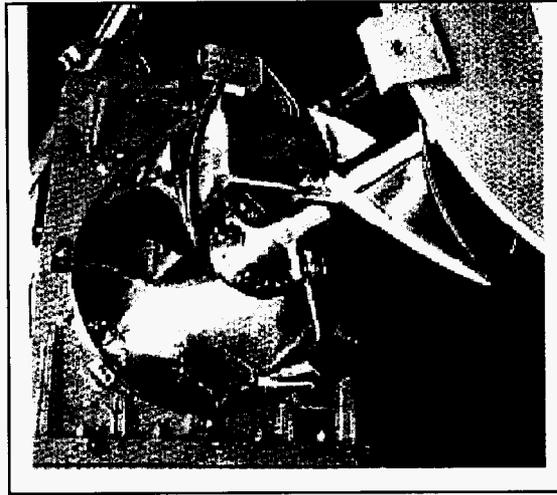


Figure 24 - Séchoir sous vide commercialisé par la société Lödige

#### II.1.5.4 Les séchoirs radiatifs

Enfin, le dernier procédé indirect recensé au cours de cette étude est celui commercialisé par la société Hytec. Ce procédé est présenté sur la Figure 25.

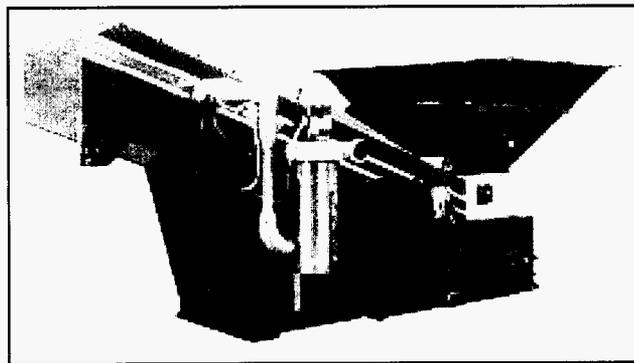


Figure 25 - Séchoir radiatif commercialisé par la société Hytec

Ce séchoir se compose d'une trémie de réception des boues, équipée d'un dispositif d'extrusion, et d'un convoyeur de séchage dirigeant les boues sous un ensemble d'émetteurs infrarouges gaz ou électrique. Les performances de ce procédé ont été évaluées pour des boues d'hydroxydes métalliques, les résultats publiés [STE97] sont disponibles en Annexe 6.

## II.2 Comparaison des différentes classes de séchoirs indirects

Pour comparer les différents séchoirs disponibles pour traiter les boues résiduaires, nous avons contacté les différents constructeurs (cf. Annexe 4) en leur envoyant le questionnaire joint en Annexe 5 et en les sollicitant par téléphone. Le questionnaire comprend des questions sur les types de séchoirs disponibles, les tonnages traités, le mode de chauffage utilisé, les retours d'expérience et les dispositifs annexes nécessaires pour traiter les boues ou pour mettre en forme le produit. La dernière partie est consacrée à leurs références dans le domaine des boues et, pour ceux qui ont déjà des installations, nous leur avons demandé de bien vouloir remplir le tableau, ce qui nous a permis par la suite d'établir des bilans. Précisons dès à présent que les chiffres qui seront annoncés dans la suite de ce rapport sont valables pour une installation donnée (c'est-à-dire traitant une boue donnée dans des conditions données) et qu'ils ne doivent pas être extrapolés, par exemple, à un autre type de boue ou à un autre tonnage.

Nous avons obtenu des réponses à ce questionnaire, mais la plupart de ces réponses étaient incomplètes, c'est-à-dire qu'elles ne nous ont pas toujours permis de déterminer le critère défini au paragraphe I.3. D'autres constructeurs n'ont pas pu nous communiquer certaines données, qui n'étaient pas en leur possession. Enfin, certains n'ont pas souhaité répondre à nos sollicitations.

Pour établir ce comparatif, nous nous sommes donc servis des données mises à disposition par les constructeurs ayant répondu au questionnaire ainsi que de données obtenues par d'autres sources d'informations (discussions avec les exploitants, informations publiées par les constructeurs ou les exploitants, rapports de stage [HOF96] et [GUI99]). Les résultats de cette enquête sont présentés sous forme de tableaux en Annexe 6, nous avons précisé, dans les différents tableaux, la façon dont nous avons obtenu ces informations (constructeur ou autre) et le type de boues séchées.

Nous allons à présent évaluer les performances des différents séchoirs indirects recensés lors de cette étude. Pour cela, nous allons utiliser le critère thermodynamique, défini au paragraphe I.3 de ce chapitre, et nous introduirons deux autres critères, qui sont le temps

de séjour et la capacité évaporatoire spécifique, et pour lesquels nous ne donnerons que des ordres de grandeurs.

### II.2.1 Temps de séjour

Le temps de séjour moyen de la boue dans un séchoir est défini comme le rapport entre le volume de produit contenu dans le séchoir et le débit volumique de produit à sécher. A titre indicatif, le Tableau 26 donne l'ordre de grandeur des temps de séjour moyens pour les quatre classes de séchoirs définies lors de cette étude.

Les temps de séjour dans les séchoirs à couche mince sont très courts, du fait des valeurs élevées des coefficients d'échange obtenus à la paroi [CAR99]. Mais ceci peut devenir un inconvénient majeur lorsque l'hygiénisation de la boue est recherchée au cours de l'opération de séchage.

<i>Type de séchoirs</i>	<i>Temps de séjour moyen (min)</i>
Couche mince	5
Disques	60 - 90
Palettes	90 - 120
	sauf Rovactor (Bus) : 20
Tambour	20 - 60

Tableau 26 - Ordre de grandeur du temps de séjour moyen pour les quatre classes de séchoirs indirects

Pour les autres séchoirs, le problème de l'hygiénisation de la boue est réglé par des temps de séjour relativement longs. Par contre, ces longs temps de séjour imposent des séchoirs de volume plus conséquents et, en particulier, au moment de l'arrêt ou du redémarrage de l'installation, le volume important de boues présentes dans le séchoir peut poser des problèmes.

## II.2.2 Consommation spécifique

Ce critère thermodynamique, exprimé en kWh/kg d'eau évaporée, est généralement utilisé pour comparer les séchoirs. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que les chiffres annoncés dans ce paragraphe ont été obtenus sur des installations données ; les constructeurs nous ont demandé de signaler que ces chiffres ne peuvent pas être extrapolés à d'autres installations. Les tableaux suivants recensent les valeurs obtenues pour les différents séchoirs lors de l'étude réalisée par S. Ressent [RES98] (cf. Tableau 27) et lors de cette étude (cf. Tableau 28).

<i>Constructeur</i>	<i>Type de séchoir</i>	<i>Consommation spécifique (kWh/kg EE)</i>
Buss (Das)	couche mince	0.929
Gea Canzler	couche mince	0.932
List (Discotherm)	palettes	0.847
GMF Gouda (Naratherm)	palettes	0.885
Kvaerner	disques	0.955
Stord	disques	0.885
Procalex	disques	0.895

Tableau 27 - Consommations spécifiques par constructeurs rapportées par [RES98]

<i>Constructeur</i>	<i>Type de séchoir</i>	<i>Consommation spécifique (kWh/kg EE)</i>
EliNo	tambour indirect	0.850
Maguin	tambour indirect	0.987
Buss (Das)	couche mince	0.830
Buss (Das)	couche mince	0.814
Buss (Das)	couche mince	0.779
Duprat	couche mince	0.655
GMF Gouda (Naratherm)	palettes	0.870
List (Discotherm)	palettes	0.860
Buss (Rovactor)	disques	0.767
Buss (Rovactor)	disques	0.814
KHD	disques	0.950
Procalex	disques	0.806
Stord	disques	1.031
Stord	disques	0.786

Tableau 28 - Ordre de grandeur des consommations spécifiques des différents séchoirs indirects obtenues lors de cette étude

Ces résultats sont aussi représentés graphiquement par classes de séchoirs sur la Figure 26.

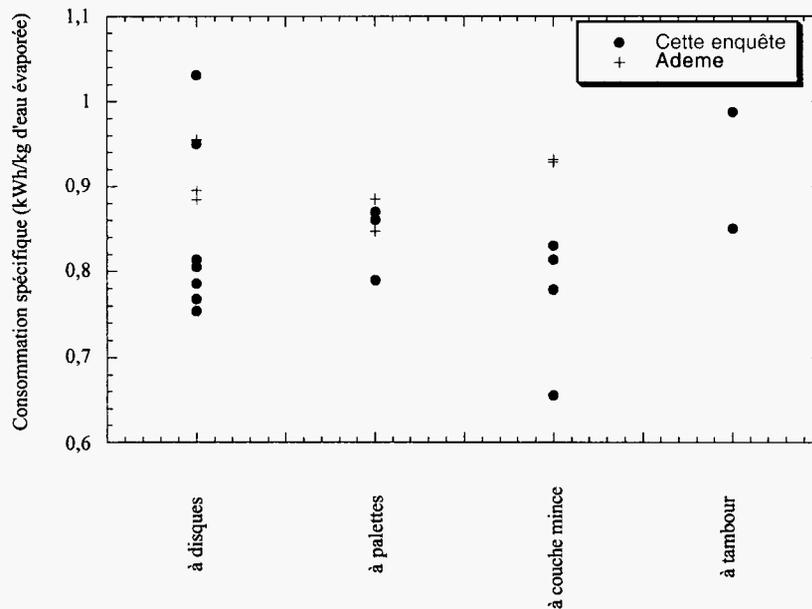


Figure 26 - Consommation spécifique pour les différentes classes de séchoirs indirects

On s'aperçoit ainsi que quelle que soit la technologie utilisée, les séchoirs ont des consommations spécifiques relativement proches. La valeur moyenne sur l'ensemble des séchoirs est de 0.88 kWh/kg d'eau évaporée. Les valeurs moyennes par classes de séchoirs sont reportées dans le Tableau 29.

Type de séchoirs	Consommation spécifique (kWh/kg d'eau évaporée)
Couche mince	0.87 (hors séchoir type Duprat)
Disques	0.88
Palettes	0.85
Tambour	0.99 avec recirculation 0.85 sans recirculation

Tableau 29 - Ordre de grandeur de la consommation spécifique pour les quatre classes de séchoirs indirects

Pour les trois premières catégories de séchoirs, les résultats obtenus sont assez proches. Mais les séchoirs à palettes ont, a priori, la consommation spécifique la plus basse.

Pour les séchoirs à couche mince, nous n'avons pas pris en compte dans la moyenne la consommation spécifique du séchoir commercialisé par la société Duprat, dont la technologie est très différente de celles proposées par Buss et GEA Canzler. En effet, cette consommation est beaucoup plus faible (de l'ordre de 0.655 kWh/kg d'eau évaporée), cette différence est probablement due à l'épaisseur plus faible de boues enduites sur la paroi chaude.

Pour les séchoirs à tambour, nous ne disposons que de deux références (aucune donnée de comparaison dans l'étude publiée par l'ADEME [RES98]). Les résultats obtenus lors de cette étude sont en outre très différents. Nous avons attribué cette différence à la recirculation qui est utilisée uniquement dans un des deux procédés.

Pour les séchoirs à disques, il faut noter une assez grande dispersion des résultats avec des consommations spécifiques comprises entre 0.76 et 1.03 kWh/kg d'eau évaporée. De plus, pour un même procédé, par exemple le séchoir commercialisé par Stord, on peut obtenir selon l'installation et les conditions de fonctionnement du séchoir (7 bars et un débit de boues à traiter de 3650 kg/h pour la première installation contre 12 bars et un débit de 9090 kg/h pour la seconde installation) des résultats très variables, à savoir une consommation spécifique de 0.81 contre 1.03 kWh/kg d'eau évaporée.

Enfin si l'on compare les résultats obtenus au cours de cette étude avec ceux qui sont rapportés par S. Ressant [RES98] pour les mêmes séchoirs, on constate que, à l'exception de deux procédés, les valeurs sont très proches. Dans le cas du séchoir proposé par la société Procalex, il ne s'agit pas de la même installation : dans l'étude ADEME, le séchoir traitait des boues issues d'une industrie textile (laine) alors que, dans cette étude, les résultats annoncés ont été obtenus sur une installation traitant de boues urbaines. Pour le procédé Das développé par Buss, nos données sont issues de la littérature [MAR91] et ont été obtenues sur l'installation de Nancy ; pour les données publiées dans l'étude ADEME, le lieu, où ces données ont été recueillies, n'a pas été précisé. Dans ce contexte, nous ne pouvons pas expliquer les différences observées.

### II.2.3 Capacité évaporatoire spécifique

La capacité évaporatoire est un critère thermique qu'il peut aussi être intéressant d'introduire pour évaluer les performances des séchoirs. Ce critère est défini comme le rapport entre le débit d'eau évaporée et la surface de chauffe. Il s'exprime en kg d'eau évaporée / m<sup>2</sup> h. Il est lié au flux évaporatoire par l'intermédiaire de la chaleur latente de vaporisation. Le Tableau 30 donne l'ordre de grandeur des capacités évaporatoires spécifiques pour les différentes classes de séchoirs.

Type de séchoirs	Capacité évaporatoire spécifique (kg d'eau évaporée/m <sup>2</sup> h)
Couche mince	25 à 40
Disques	7 à 12
Palettes	15 à 20
Tambour	pas d'info

Tableau 30 - Ordre de grandeur de la capacité évaporatoire spécifique pour les quatre classes de séchoirs indirects

Pour les séchoirs à tambour, il ne nous est pas possible de donner l'ordre de grandeur de ce critère puisque nous ne connaissons pas les surfaces de chauffe.

Les séchoirs à disques ont la capacité évaporatoire spécifique la plus faible, du fait d'une recirculation du produit importante nécessaire pour dépasser la phase plastique. Le séchage a, par conséquent, lieu entre des siccités de 60 et 95 % et dans cette gamme, les vitesses de séchage sont relativement faibles, d'où ce résultat.

Les séchoirs à palettes/séchoirs malaxeurs sont plus performants. Le séchage débute à des siccités inférieures à celles de la phase plastique (sauf dans le cas du séchoir Rovactor), pour lesquelles les vitesses de séchage sont assez rapides. Enfin, le cisaillement intense dû au design des palettes permet d'améliorer les transferts par rapport aux séchoirs à disques.

Les séchoirs à couche mince donnent les résultats les plus performants avec des valeurs comprises entre 20 et 40 kg/ m<sup>2</sup> h. Ceci est dû à la technologie de vaporisation en couche mince qui donne lieu à une ébullition intense sur la paroi et ainsi permet d'obtenir des transferts de chaleur très élevés, comme nous l'avons déjà signalé [CAR99].

### II.3 Conclusion sur les technologies de séchage indirect

Cette étude avait pour objectifs de recenser les différentes technologies de séchoirs indirects pour traiter les boues et de les comparer. Nous avons ainsi identifié quatre technologies principales ainsi que les principaux constructeurs.

La première partie de cette section a été consacrée à une description de ces séchoirs, en particulier, pour chaque catégorie, nous nous sommes attachés à souligner les différences fondamentales entre les séchoirs disponibles. Nous avons aussi essayé de recenser le nombre de références pour les différents fabricants. A notre connaissance, il semble que, parmi les séchoirs indirect, les séchoirs à disques aient encore le plus de références loin devant les séchoirs à palettes et à couche mince. Le nombre de références pour les séchoirs à tambour avec chauffage indirect semble plus réduit.

Une classification sur la base d'une consommation spécifique ne permet pas d'introduire une hiérarchie au niveau des différents procédés disponibles. En effet, quelle que soit la technologie retenue, les séchoirs ont une consommation spécifique proche, de l'ordre de 0.88 kWh/kg d'eau évaporée.

Pour essayer d'évaluer les performances des procédés étudiés, nous avons alors introduit deux autres critères : le temps de séjour et la capacité évaporatoire spécifique. Ceci nous a permis de mettre en évidence l'intérêt des séchoirs à couche mince qui présentent des capacités évaporatoires spécifiques élevées avec des temps de séjour extrêmement courts. Néanmoins, ceci peut poser des problèmes au niveau de l'hygiénisation de la boue. Leur second inconvénient est lié à leur compacité, qui est relativement faible. Les séchoirs à disques et à palettes ont des performances relativement proches, avec cependant un léger avantage aux séchoirs à palettes qui présentent des capacités évaporatoires légèrement plus grandes et une consommation spécifique plus faible. Pour

les séchoirs à tambour à chauffage indirect, il est difficile de conclure : peu de données étaient disponibles pour cette étude, mais il semble que le nombre de références soit en augmentation. A leur avantage, signalons des temps de séjour relativement faibles, de l'ordre de trente minutes, et des consommations spécifiques raisonnables surtout en absence de recirculation du produit sec.

### **III. Les séchoirs directs**

Comme nous l'avons déjà vu, dans le cas du séchage convectif (ou direct), le produit à sécher se trouve directement en contact avec le gaz vecteur. Les problèmes technologiques liés à l'apparition de la phase plastique ne se posent généralement plus dans ce cas, ils sont remplacés par les problèmes liés aux traitements des buées (teneur en oxygène, séparation des boues sèches et des poussières, désodorisation...). En pratique, la technologie du séchoir direct est relativement simple, mais les équipements périphériques sont souvent sophistiqués (donc coûteux) et volumineux, compte tenu des débits gazeux importants.

Le gaz vecteur peut être :

- ✓ de l'air (ou de la vapeur) chauffé indirectement par les fumées de combustion propres au sécheur ou par tout autre fluide caloporteur en passant dans un échangeur;
- ✓ ou des fumées provenant d'un incinérateur ou d'une chaudière de production de vapeur existant sur le site.

#### **III.1 Les différentes technologies de séchage direct disponibles**

Comme précédemment, avant d'aborder la description des séchoirs directs utilisés pour traiter les boues, nous allons introduire une première classification des technologies disponibles. Il existe ainsi cinq catégories différentes qui sont :

- ✓ les séchoirs à tambour rotatif ;
- ✓ les séchoirs à bandes ;
- ✓ les séchoirs à transport pneumatique (lit fluidisé ou flash) ;
- ✓ les autres types de séchoirs, qui ne peuvent être classés dans les trois catégories précédentes.

La Figure 27 dresse une liste non exhaustive des principaux fabricants pour les différentes catégories citées ci-dessus. Cette liste ne prétend toujours pas recenser tous les constructeurs proposant des séchoirs directs, mais seulement ceux qui ont des références dans le domaine des boues.

Dans cette liste, n'apparaissent pas les sociétés Promill et Niro. Le département séchage de la société Promill a été racheté en 1998 par Maguin ; son activité principale concerne le séchage direct de produits légers (de densité inférieure à 1), les boues en sont donc exclues. La société Niro a procédé à un recentrage de sa technologie dans des domaines n'incluant pas les boues.

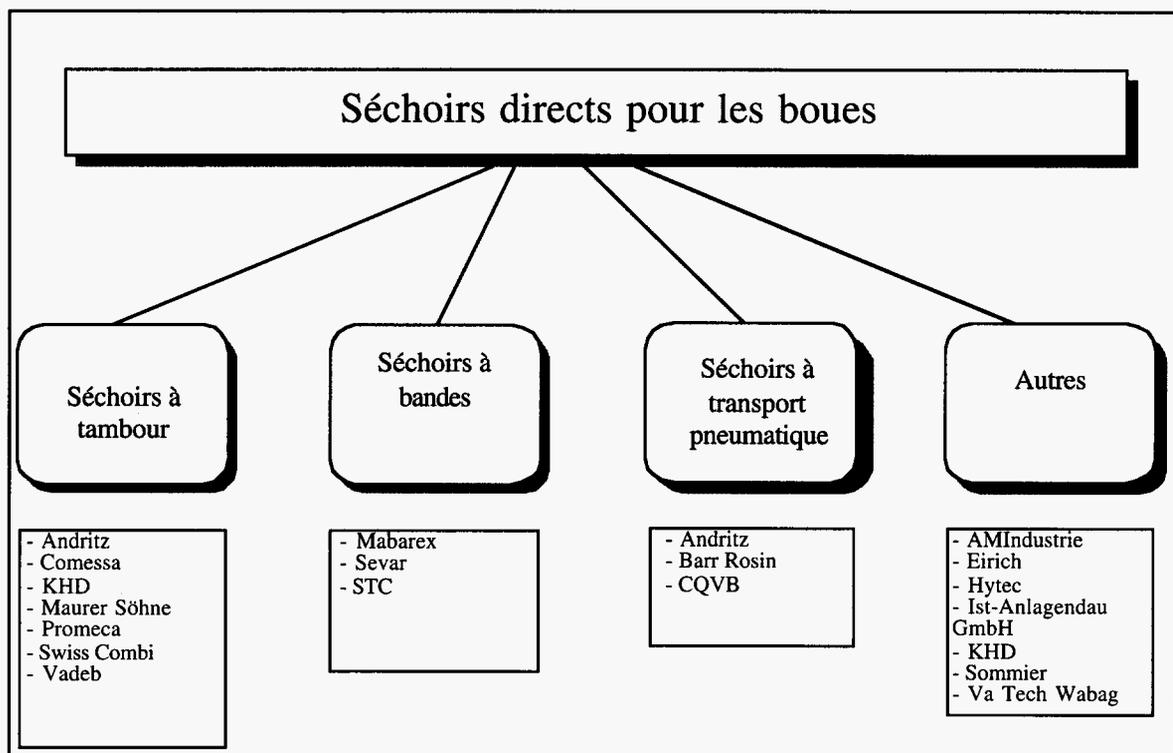


Figure 27 - Classification des séchoirs directs pour les boues résiduaires avec les principaux fabricants

Dans ce qui suit, les principes de fonctionnement de chaque groupe de séchoirs seront décrits et les particularités de certains séchoirs seront mises en évidence.

### III.1.1 Les séchoirs directs à tambour rotatif

C'est la technique la plus ancienne et la plus répandue dans l'histoire du séchage. Comme pour les tambours indirects, le séchoir est constitué d'un cylindre tournant (de 1 à 2,5 m de diamètre et d'une dizaine de mètres de longueur) légèrement incliné sur l'axe horizontal et supporté par deux anneaux de roulement montés sur couronnes et galets. Deux exemples d'unités de séchage utilisant des tambours rotatifs sont proposés sur la Figure 28.

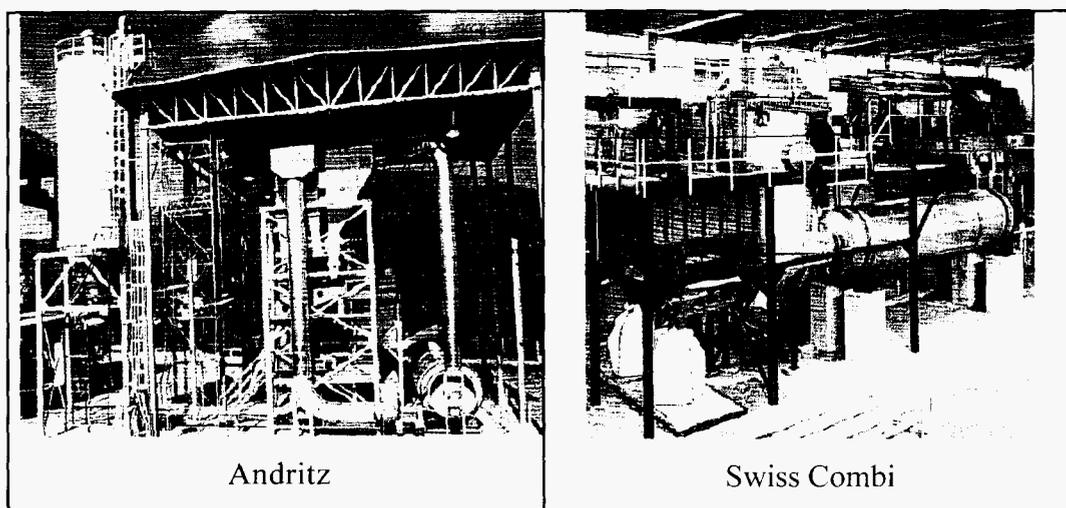


Figure 28 - Deux exemples d'unités de séchage utilisant des tambours rotatifs directs

Le brassage et le transport lent du produit à sécher s'effectuent par divers organes à l'intérieur du cylindre. Ce dernier peut être divisé en séries de compartiments par des chicanes obligeant un parcours en quinconce. Dans d'autres cas, comme pour le procédé développé par Andritz, le corps du séchoir est en fait composé de trois cylindres coaxiaux, la boue est ainsi séchée en passant du cylindre intérieur vers le cylindre extérieur (cf. Figure 29).

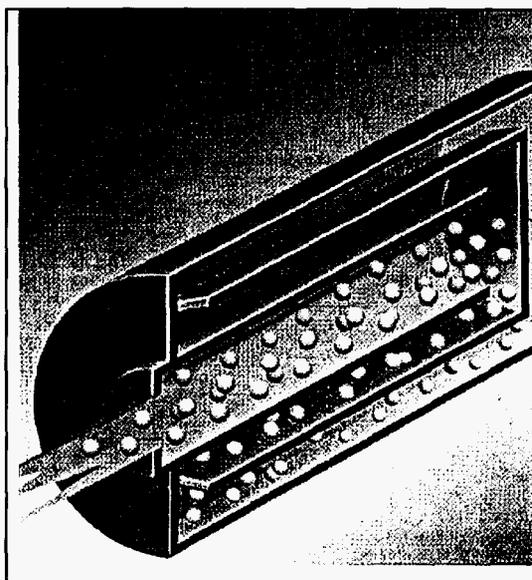


Figure 29 - Détail du cylindre à triple passage utilisé dans le procédé DDS (Andritz)

Dans le séchoir, les gaz chauds (400°C en entrée et de 120 à 200°C en sortie) peuvent circuler à contre-courant des boues ou dans le même sens. Les risques d'inflammation et d'explosion ne sont pas négligeables et certains constructeurs, comme Vadeb, propose une recirculation du gaz vecteur pour diminuer la teneur en oxygène. Face à ces risques, une surveillance du procédé est recommandée.

Ces procédés produisent dans la plupart des cas des boues sèches bien granulées. Certains (comme Comessa et Swiss Combi) utilisent la recirculation des boues sèches pour éviter le colmatage du séchoir et favoriser la granulation.

Le Tableau 31 recense le nombre d'applications au niveau mondial de ces séchoirs dans le domaine des boues.

<i>Andritz</i>	<i>Comessa</i>	<i>KHD</i>	<i>Promeca</i>	<i>Swiss Combi</i>	<i>Vadeb</i>
27	2	+ de 200	3	6 aux Canada et USA	20
				3 en France	(direct
					+
					indirect)

Tableau 31 - Nombre de références pour les séchoirs à tambour avec chauffage direct

Pour la société Vadeb, nous rappelons ici que nous n'avons obtenu que des informations globales sur le nombre de leurs références dans le monde. Il ne nous est donc pas possible de distinguer le nombre d'installations avec des tambours rotatifs à chauffage direct.

### *III.1.3 Les séchoirs à bandes*

Avant d'entrer dans le séchoir, le produit à sécher est mis en forme (cf. Figure 30) le plus souvent dans une extrudeuse ou dans un granulateur, l'objectif étant d'augmenter la surface d'échange entre la boue et le gaz vecteur utilisé pour le séchage. Cette opération nécessite une consistance minimale de la boue : STC recommande, par exemple, une siccité minimale de 25 % en entrée du séchoir.

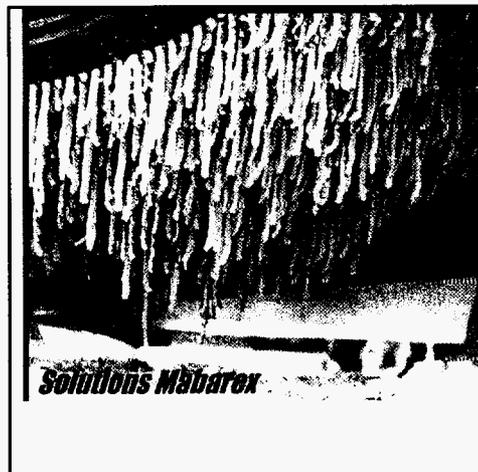


Figure 30 - Aspect de la boue après mise en forme (doc. Mabarex)

Le principe de ces séchoirs est relativement simple : après mise en forme, la boue est déposée de façon homogène sur des bandes transporteuses (cf. Figure 31), où elle est soumise à un courant d'air.

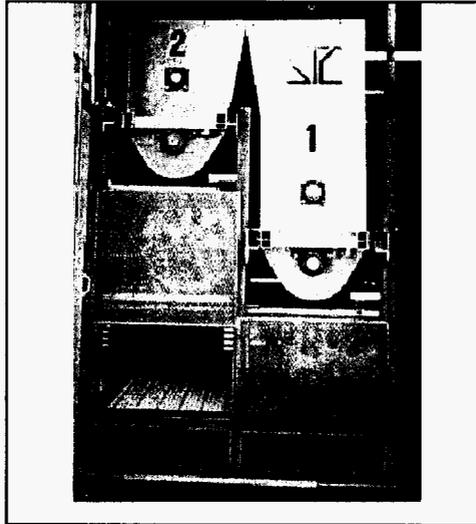


Figure 31 - Détail des bandes transporteuses utilisées dans le procédé commercialisé par la société STC

Les principales différences entre les procédés commercialisés proviennent de la température de l'air utilisée, on trouve plusieurs gammes de fonctionnement :

- ✓ à température ambiante (17 °C) pour le procédé Mabarex ;
- ✓ à basse température (65 °C) pour le procédé STC ;
- ✓ et enfin à température proche de 120 à 150 °C pour le procédé Sevar.

Pour la circulation d'air, deux technologies sont utilisées : on trouve soit un écoulement d'air perpendiculaire au sens de déplacement des bandes transporteuses comme dans le cas des procédés commercialisés par Sevar (cf. photographie de gauche sur la Figure 32) et STC, soit un écoulement d'air parallèle au sens de déplacement de la boue comme dans le procédé Mabarex. Dans ce dernier cas, l'air est aspiré par de gros ventilateurs et circule à grande vitesse au-dessus de la boue alternativement à co-courant et à contre-courant. L'installation, présentée sur la photographie de droite sur la Figure 32, est de taille conséquente et les débits d'air très importants.

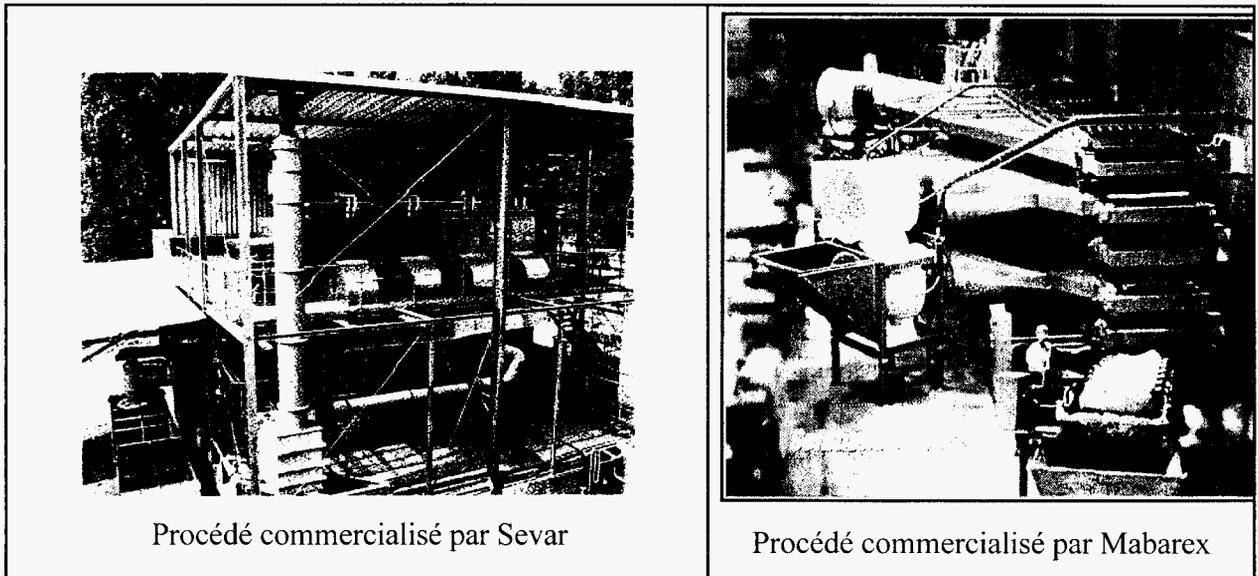


Figure 32 – Exemples de séchoirs à bandes

Le Tableau 32 recense le nombre d'applications, à notre connaissance, au niveau national et international de ces séchoirs dans le domaine des boues.

<i>Mabarex</i>	<i>Sevar</i>	<i>STC</i>
20 au Canada	15	Au moins 1 en
1 en Pologne	aucune en	Espagne
1 essai sur	France	
STEP en France		

Tableau 32 - Nombre de références pour les séchoirs à bandes

### III.1.2 Les séchoirs à transport pneumatique

Sous cette dénomination, nous avons regroupé deux types de séchoirs : les séchoirs à lit fluidisé et les séchoirs flash (aussi appelés atomiseurs). Le nombre de constructeurs proposant des séchoirs à lit fluidisé ou des atomiseurs pour le traitement des boues s'est considérablement réduit ces dernières années. Au terme de cette enquête, nous n'avons pu en recenser que trois. Nous avons déjà signalé que la société Niro a recentré ses activités dans des domaines n'incluant pas les boues résiduaires. La société CT Environnement, qui commercialisait un séchoir à lit fluidisé avec échangeurs embarqués, a été rachetée par Babcock et a recentré ses activités sur le traitement de l'air. Nous

n'avons pu obtenir aucune information sur le devenir de la société Krebs, aucun contact n'ayant pu être établi. Nous allons à présent décrire les différents procédés encore sur le marché.

### III.1.3.1 Les séchoirs à lit fluidisé

Les séchoirs sont généralement composés d'un caisson étanche à deux compartiments séparés par une sole de fluidisation, sur laquelle est déposé le produit à sécher. L'air ou la vapeur surchauffée sont injectés par le bas, ce qui permet simultanément de fragmenter le produit et de le fluidiser. La fluidisation augmente considérablement la surface de contact entre l'air chaud et le produit à sécher, les temps de séjour dans les séchoirs à lit fluidisé sont ainsi relativement courts (de l'ordre d'une trentaine de minutes). Les particules sèches entraînées dans les buées passent dans un cyclone, dans lequel les deux phases solide et gazeuse sont séparées. Les particules sèches sont généralement recirculées dans l'installation pour éviter l'apparition de la phase collante.

Le seul constructeur proposant encore un séchoir à lit fluidisé pour le traitement des boues que nous avons pu recenser est la société Andritz, qui commercialise le procédé CDS. Il n'a cependant que quatre références, à notre connaissance, dans le monde. Un schéma de ce procédé est présenté sur la Figure 33.

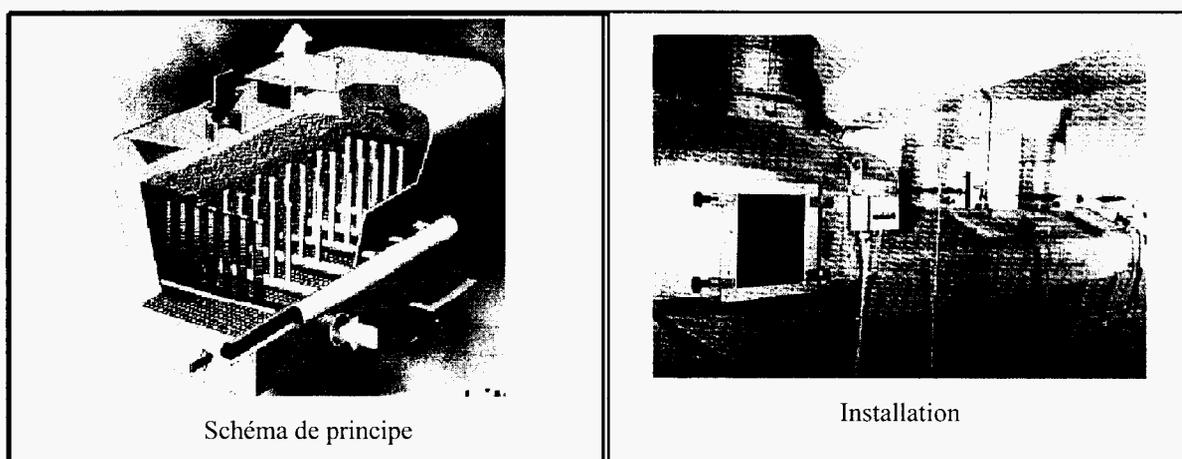


Figure 33 - Procédé CDS commercialisé par la société Andritz

Ce procédé, relativement compact, fonctionne généralement avec de l'air à basse température, mais ses performances seront d'autant plus compétitives par rapport aux

autres procédés du marché si de la vapeur basse pression est disponible sur le lieu de l'installation. Le temps de séjour du produit dans l'installation peut être réglé en jouant sur l'épaisseur de la couche.

La technologie des séchoirs à lit fluidisé est souvent complexe et la mise au point longue et coûteuse. Les vitesses de circulation de l'air dans le séchoir étant élevées, les phénomènes d'abrasion sont amplifiés. Ces raisons sont probablement la cause de la quasi-disparition de ce type de séchoir au niveau du traitement des boues résiduaire.

### III.1.3.1 Les séchoirs flash (ou atomiseurs)

Le séchage par atomisation est un procédé spécifique de déshydratation des suspensions colloïdales. Le principe de ces séchoirs est illustré sur la Figure 34.

La matière à sécher est transportée dans une colonne verticale jusqu'à l'entrée du séchoir, où elle est dispersée dans le réacteur par un injecteur spécial. La suspension est ainsi transformée en fines particules de granulométrie homogène comprise entre 10 et 500  $\mu\text{m}$ . Ces particules sont ensuite transportées par le courant d'air chaud. Les échanges de chaleur entre la phase solide et gazeuse sont intenses, ce qui conduit à des temps de séjour du produit dans le séchoir extrêmement courts. Enfin, le produit sec et les buées sont séparés.

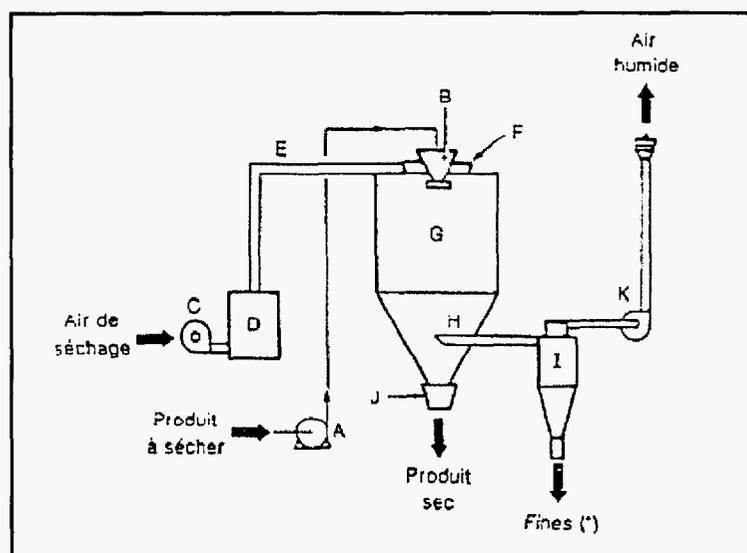


Figure 34 - Schéma de principe d'une installation de séchage flash (source : Neu Industrie)

Au cours de cette étude, nous avons recensé deux procédés de séchage flash : le Ring Dryer commercialisé par Barr & Rosin et le Lit à Jet commercialisé par le Centre Québécois de Valorisation des Biotechnologies, organisme privé à but non lucratif dont l'activité concerne la liaison et le transfert de technologies entre la recherche et l'industrie.

Dans le procédé commercialisé CQVB, l'air arrive tangentiellement à la direction du produit, ce qui crée une turbulence cyclonique dans la cuve de séchage et favorise les échanges de chaleur. L'air de séchage circule verticalement dans l'installation et le produit sec est évacué latéralement, par surplus. Un clarificateur empêche les particules de grandes tailles de passer dans le circuit de traitement des buées et les renvoie dans la cuve de séchage.

Dans le cas du Ring Dryer, les grosses particules de boue sèche recueillies en sortie du séchoir sont recirculées en tête d'installation et mélangée au produit humide, cette mise en forme dans un mélangeur bi-axe a été particulièrement étudiée par la société. En sortie de l'installation, la granulométrie des particules est comprise entre 1 et 3 millimètres.

Le Tableau 33 recense le nombre d'applications, à notre connaissance, au niveau mondial de ces séchoirs dans le domaine des boues.

<i>Andritz</i>	<i>Barr &amp; Rosin</i>	<i>CQVB</i>
4 en Europe	Plusieurs	pas d'info

Tableau 33 - Nombre de références pour les séchoirs à lit fluidisé et les séchoirs flash

Notons que, dans le cas de la société Barr & Rosin, nous nous sommes servis dans cette étude des informations publiées dans la revue canadienne Pulp&Paper [MAR96]. Enfin, nous n'avons pas obtenu d'informations sur la commercialisation du Lit à Jet (CQVB).

#### *III.1.4 Autres types de séchoirs*

Nous avons regroupé en deux classes les séchoirs qui n'ont pu être classifiés dans les trois catégories définies précédemment :

- ✓ les séchoirs utilisant l'énergie solaire ;

✓ les séchoirs convectifs batch ou continu.

Nous allons décrire brièvement ces différents procédés.

#### III.1.4.1 Les séchoirs solaires

Deux sociétés ont été recensées au cours de cette étude : une société allemande Ist Anlagendau, créée en 1994, et une société française AMÉcoIndustries, créée en 1996. Ces deux sociétés ont déjà un certain nombre de références (cf. Tableau 34) dans le domaine des boues urbaines et industrielles.

<i>Ist Anlagendau</i>	<i>AMÉcoIndustries</i>
5	5

Tableau 34 - Nombre de références pour les séchoirs solaires

Deux de leurs installations sont présentées sur la Figure 35.

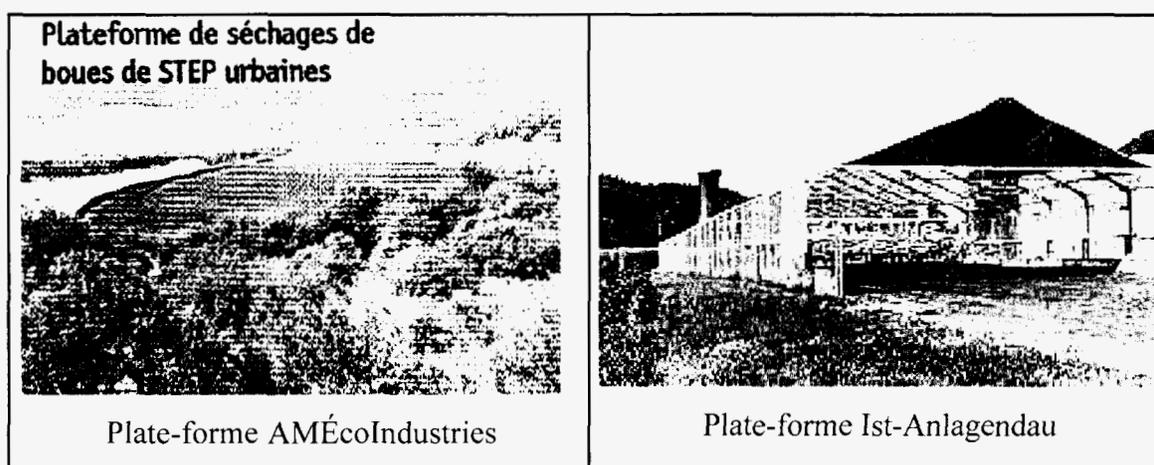


Figure 35 - Installations de séchage solaire pour les boues résiduaires

Le principe de fonctionnement de ces installations est identique : la boue à sécher est épanchée sur une plate-forme étanche sur une épaisseur d'environ trente centimètres. Il faut donc que cette boue ait une consistance minimale (tenue en tas), ce qui correspond généralement à une siccité de 20 %. Cette boue doit être régulièrement mélangée, jusqu'à dix fois par jour en été d'après les informations recueillies auprès d'Ist Anlagendau. Ce mélange assure aussi la mise en forme du produit final en favorisant la granulation de la boue. La différence entre les deux sociétés provient de la couverture de l'installation.

Comme l'on peut le voir sur la Figure 35, les plates-formes de la société allemande sont couvertes, ce qui favorise l'effet de serre et protège de la pluie, et de petites installations photovoltaïques peuvent être ajoutées. Dans cette configuration, les temps de séchage pour sécher une boue de siccité initiale 20 % jusqu'à 90 % sont de l'ordre d'une semaine en été. En hiver, seul un séchage partiel de la boue peut être attendu. Ce procédé a été développé en 1992/93 en collaboration avec l'université de Munich. La capacité de séchage de ces installations est comprise entre 500 et 3600 tonnes de boues par an.

Pour l'ensemble des installations réalisées jusqu'à ce jour par la société AMÉcoIndustries, les plates-formes sont découvertes. Les temps de séchage rapportés pour une installation dans le Sud de la France pour obtenir une siccité de 85 % sont de l'ordre de quinze jours en été. Les capacités de traitement peuvent aller jusqu'à 60 000 tonnes de boues par an. Si l'installation traite une production annuelle inférieure à 5 000 tonnes, elle ne fonctionne que durant la saison estivale et le reste de l'année, la plate-forme est utilisée pour stocker les boues. Si la production est supérieure à 5 000 tonnes par an, l'installation fonctionne toute l'année. Enfin, il faut noter que cette société s'équipe d'un centre de traitement (plate-forme couverte), qui devrait ouvrir en avril 2001 et qui sera destiné à traiter des boues urbaines ou assimilées.

#### III.1.4.2 Les séchoirs convectifs batch ou continu

Nous avons recensé trois constructeurs qui proposent des procédés convectifs discontinus ; il s'agit des sociétés Eirich, Hytec et Sommier. Deux de ces procédés sont présentés sur la Figure 36.

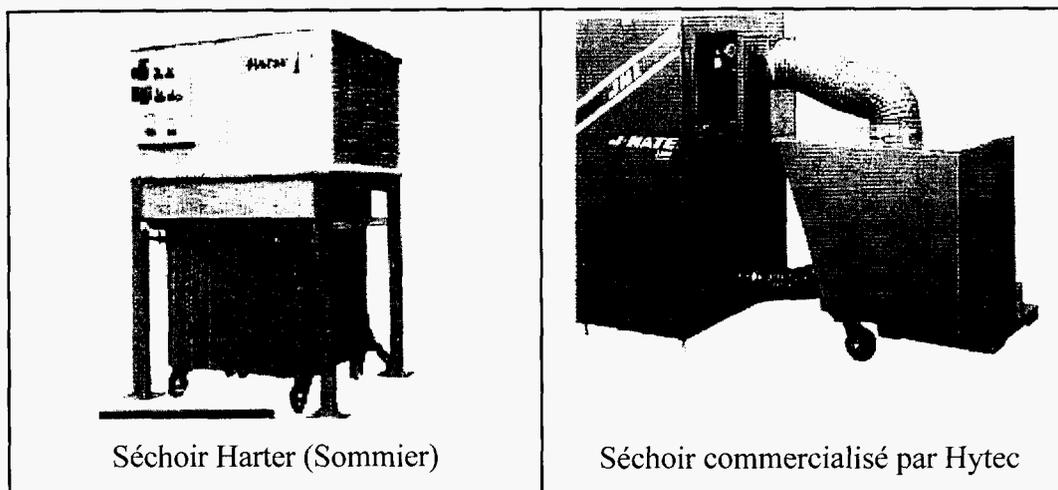


Figure 36 - Procédés de séchage convectif batch

Les procédés commercialisés par Hytec et Sommier sont relativement semblables. Il s'agit d'une benne ou d'une trémie dans laquelle est déposée la boue à sécher. Le gaz de séchage est directement injecté dans la boue. Le procédé proposé par Hytec utilise une pompe à chaleur pour récupérer l'énergie des buées et réchauffer l'air entrant dans le séchoir. Dans le cas du séchoir Harter de la société Sommier, le gaz vecteur utilisé pour le séchage est de l'air comprimé à basse température.

La technologie utilisée par la société Eirich est différente : le séchoir est un réacteur mélangeur en dépression. Il est composé d'une cuve de mélange rotative, d'un dispositif de mélange rotatif excentré pénétrant dans la cuve par le haut et d'un racleur en fond de cuve pour nettoyer la paroi. Le gaz vecteur utilisé pour le séchage est la vapeur d'eau surchauffée à 450 °C.

Le Tableau 35 recense le nombre d'applications, à notre connaissance, des procédés batch que nous venons de présenter.

<i>Eirich</i>	<i>Hytec</i>	<i>Sommier</i>
5	au moins 1	1 en cours

Tableau 35 - Nombre de références pour les séchoirs convectifs batch

Le procédé Eirich est utilisé sur 5 installations pour sécher des boues d'hydroxyde métallique, de peinture ou des boues de galvanisation. Cette entreprise n'a que

partiellement répondu au questionnaire, ainsi nous ne présenterons pas de résultats concernant ce procédé.

Enfin, il existe sur le marché un dernier procédé de séchage convectif fonctionnant en continu. Ce procédé, présenté sur la Figure 37, est construit par la société KHD et est commercialisé en France par la société Degremont. Un des avantages de ce procédé est qu'il regroupe dans un même appareil la phase de déshydratation avec une centrifugeuse et la phase de séchage. La déshydratation mécanique est réalisée dans une centrifugeuse haute performance. En sortie, la boue déshydratée est éclatée en petites particules aptes à un séchage rapide. Un courant d'air chaud turbulent assure leur séchage en quelques secondes. Un cyclone sépare le produit sec de l'effluent gazeux.

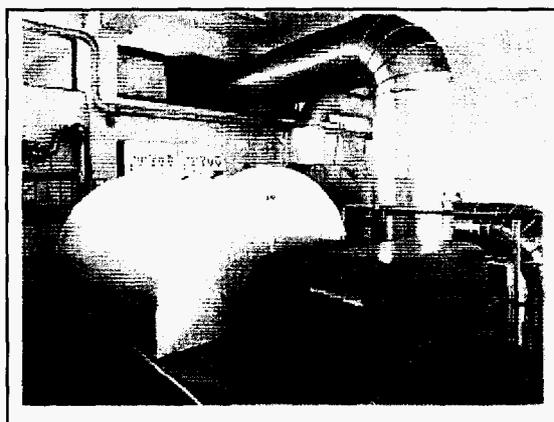


Figure 37 - Procédé Centridry commercialisé par Degremont

Le Tableau 36 recense le nombre d'applications, à notre connaissance, du procédé Centridry.

<i>Installations en France</i>	<i>Installations dans le monde</i>
4	12 en urbain 1 en industriel

Tableau 36 - Nombre de références pour le procédé Centridry

### III.2 Comparaison des différentes classes de séchoirs directs

Comme précédemment dans le cas des séchoirs indirects, nous nous sommes servis pour établir ce comparatif des réponses au questionnaire, auquel quelques constructeurs ont bien voulu répondre, et d'informations publiées dans la littérature. Il faut signaler que les données disponibles dans la littérature sont beaucoup moins nombreuses que pour les séchoirs indirects. Les résultats de l'enquête sont présentés sous forme de tableaux en Annexe 6, nous avons précisé la façon dont ces informations ont été obtenues (constructeur ou littérature) ainsi que la nature de la boue séchée. Pour évaluer les performances des séchoirs directs, nous allons à nouveau utiliser le critère thermodynamique défini au paragraphe I.3 et le temps de séjour, pour lequel nous ne donnerons qu'un ordre de grandeur.

#### III.2.1 Temps de séjour

Le temps de séjour a été défini au paragraphe II.2.1 comme le rapport entre le volume de produit contenu dans le séchoir et le débit volumique de produit à sécher. A titre indicatif, le Tableau 37 donne l'ordre de grandeur des temps de séjour moyens pour les différentes classes de séchoirs définies précédemment.

Du fait des énergies considérables mises en jeu, le temps de séchage dans un séchoir flash est extrêmement court. Ainsi, comme pour les séchoirs à couche mince, l'inconvénient principal de ce type de séchoir sera probablement lié à l'absence d'hygiénisation de la boue.

Type de séchoirs	Temps de séjour moyen
Tambour direct	10 à 20 min
Bandes	30 à 45 min
Lit fluidisé	quelques minutes
Flash	quelques secondes
Solaire	1 à 2 semaines

Tableau 37 - Ordre de grandeur des temps de séjour moyens dans les séchoirs directs

Pour les séchoirs solaires, leur intérêt ne réside pas dans le temps de séchage mais plutôt dans l'utilisation d'une énergie naturelle (soleil et vent). Le choix d'un séchage solaire impose que l'on dispose de temps et d'espace. Pour les autres séchoirs à l'exception des séchoirs à bandes fonctionnant à basses températures, des temps de séjour relativement longs associés à des températures élevées permettent d'assurer l'hygiénisation de la boue.

### III.2.2 Consommation spécifique

Les consommations spécifiques obtenues à la suite de cette enquête sont présentées dans le Tableau 38. Comme précédemment, nous avons aussi reporté dans le Tableau 39 les données obtenues lors de l'étude réalisée par S. Ressent [RES98].

<i>Constructeur</i>	<i>Types de séchoir</i>	<i>Consommation spécifique (kWh/kg EE)</i>
Barr&Rosin	Flash	1.5
Promeca	Tambour direct	1.15
Sevar	Bandes	0.92
Eirich	Convectif Batch	0.97
Hytec	Convectif Batch	0.56
Sommier	Convectif Batch	0.4

Tableau 38 - Ordre de grandeur des consommations spécifiques obtenues lors de cette étude pour différents types de séchoirs directs

<i>Constructeur</i>	<i>Types de séchoir</i>	<i>Consommation spécifique (kWh/kg EE)</i>
Andritz	Tambour direct	1.070
Sevar	Bandes	1.138
Niro	Flash	0.884
Niro + CMV <sup>1</sup>	Flash	0.130
Degrémont (KHD)	Centridry	0.830

Tableau 39 - Ordre de grandeur des consommations spécifiques obtenues par S. Ressent [RES98] pour différents types de séchoirs directs

Si l'on considère les séchoirs à tambour directs, nous obtenons au cours de cette étude une consommation spécifique proche de celle rapportée par S. Ressent. L'ordre de grandeur de cette consommation pour les séchoirs à tambour directs est donc voisin de

1100 kWh par tonne d'eau évaporée, si l'on excepte les procédés commercialisés par Sommier et Hytec, qui utilisent respectivement de l'air comprimé à basse température et une pompe à chaleur.

Pour les séchoirs à bandes, nous ne pouvons pas comparer les données puisqu'il ne s'agit pas de la même installation. Néanmoins, les deux chiffres obtenus lors de cette étude et lors de l'étude antérieure sont relativement proches. Dans ce tableau, nous n'avons pas fait figurer la consommation spécifique du procédé Dry Rex commercialisé par Mabarex. Cette consommation est de l'ordre de 0.1 kWh/kg d'eau évaporée, puisque celui-ci sèche à température ambiante ou à très basse température (inférieure à 50 °C), si une source de chaleur est disponible sur le lieu de l'installation. Par contre, la consommation électrique de ce procédé est plus élevée que celle des autres types de séchoirs.

Pour le procédé commercialisé par Barr&Rosin, nous obtenons, comme il était attendu, une consommation spécifique extrêmement élevée. En effet, l'énergie mise en jeu dans un procédé flash est considérable, c'est ce qui permet d'obtenir des temps de séjour courts. Nous ne comparerons pas cette donnée avec celle publiée dans la littérature par Niro, après des essais réalisés en partenariat avec EDF [BER95], et rapportée par S. Ressant. La technologie est a priori différente puisque la compression mécanique de la vapeur était utilisée ; de plus, Niro a arrêté le séchage de boue.

Pour les séchoirs batch commercialisés par Eirich, Hytec et Sommier, on trouve une grande disparité au niveau des consommations spécifiques rapportées. Mais le procédé Eirich fonctionne avec de la vapeur d'eau surchauffée à 450 °C alors que le procédé Hytec utilise une pompe à chaleur pour récupérer l'énergie des buées, ce qui réduit considérablement la consommation énergétique, et que le procédé Harter fonctionne à basse température réalise un séchage partiel (jusqu'à une siccité de 70 %).

Enfin, la société Degremont nous a transmis les informations dont elle disposait pour le procédé Centridry, mais nous n'avons pas eu connaissance des températures d'entrée et de sortie du gaz, ni du débit utilisé. Il ne nous a ainsi pas été possible de déterminer la

---

<sup>1</sup> CMV signifie compression mécanique de la vapeur

consommation spécifique de ce procédé. Signalons que la valeur rapportée dans l'étude publiée par l'ADEME est relative à l'installation de Coin de Bar, dont les conditions de fonctionnement sont présentées en Annexe 6.

### III.3 Conclusion sur les technologies de séchage direct

Nous avons identifié au cours de ce travail cinq classes de séchoirs directs : les séchoirs à tambour, les séchoirs à bandes, les séchoirs à lit fluidisé et flash, les séchoirs solaires et enfin les procédés batch. Pour chacune de ces classes, nous avons tenté de recenser le plus précisément possible les fabricants et le nombre de leurs références.

La première partie de cette section a été consacrée à une description des principes de fonctionnement des différents procédés. Nous nous sommes en particulier attachés, pour chaque classe de séchoirs, à mettre en évidence les principales différences. A l'issue de ce travail, il semble que, parmi les procédés de séchage direct, les séchoirs à tambour aient le plus grand nombre de références tandis que les séchoirs à lit fluidisé ont presque disparu du marché. Cette disparition est probablement liée aux problèmes d'abrasion fréquemment rapportés ainsi qu'aux difficultés de mise en œuvre du procédé.

Nous n'avons obtenu que peu d'informations concernant les consommations spécifiques des séchoirs directs. Il semblerait que les résultats obtenus pour la technologie du séchoir à tambour soient cohérents avec les résultats publiés dans la littérature. Pour les autres procédés, aucune comparaison ne peut être réalisée faute de données. Il semble néanmoins qu'une récupération de l'énergie contenue dans les fumées réduit considérablement la consommation énergétique.

## IV. Les séchoirs mixtes

Les séchoirs mixtes utilisent au moins deux modes différents d'apport de chaleur. Nous avons recensé quatre constructeurs de séchoirs mixtes (cf. Figure 38). L'un des procédés commercialisés, le séchoir Blue Tec de Nesa, associe le transfert de chaleur par rayonnement au transfert par convection. Les trois autres procédés allient les transferts conductifs et convectifs. Ce découpage va être conservé dans la suite de cette section.

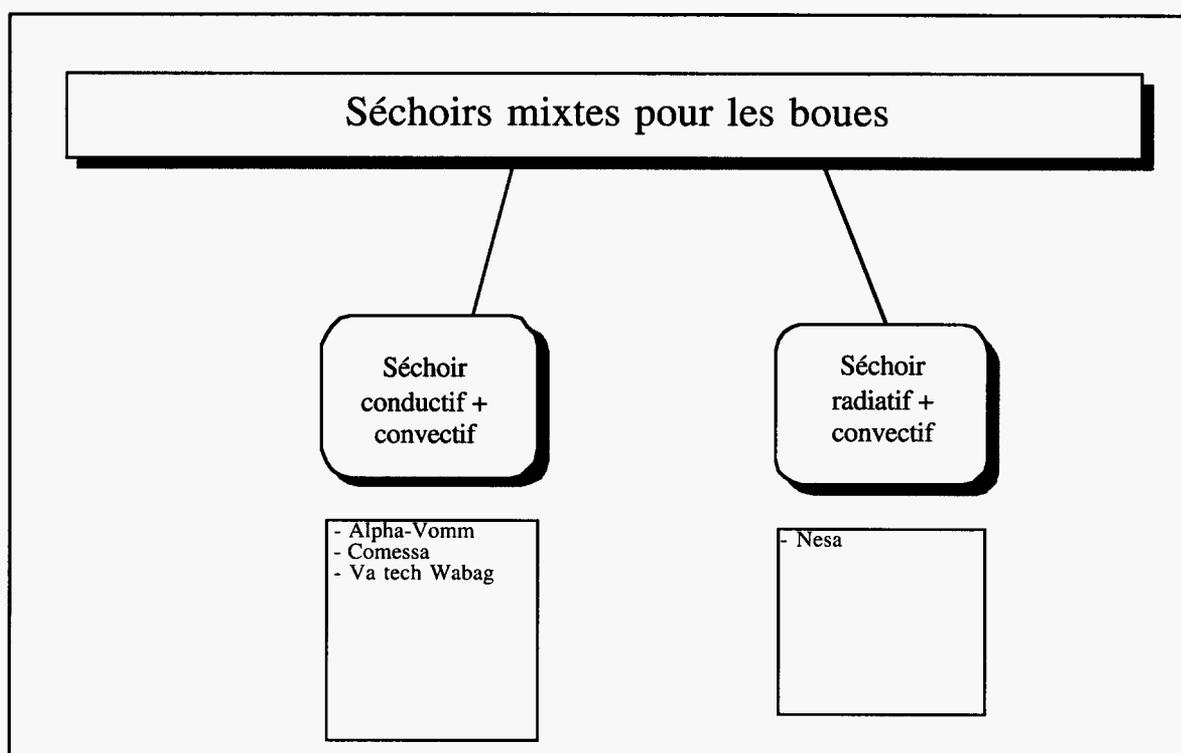


Figure 38 - Classification des séchoirs mixtes pour les boues résiduaires avec les principaux fabricants

#### IV.1 Les séchoirs associant transferts de chaleur par rayonnement et par convection

Comme nous venons de le dire, le seul séchoir de cette catégorie recensé au cours de cette étude est le procédé Blue Tec commercialisé par Nesa. Il s'apparente à un filtre à bandes. Les boues déshydratées mécaniquement et extrudées sont déposées sur une bande transporteuse. Elles reçoivent de la chaleur par rayonnement de la paroi positionnée en vis à vis de ce tapis roulant et chauffée par des gaz de combustion. Pour améliorer le séchage de la boue, une circulation d'air de balayage est imposée dans la chambre d'évaporation. Le temps de séchage et la siccité finale de la boue sont réglables par l'intermédiaire de la vitesse du convoyeur. Le temps de séchage est généralement de l'ordre de 10 à 15 minutes. Nous n'avons pas connaissance du nombre de références de ce procédé pour le traitement des boues.

## IV.2 Les séchoirs associant transferts de chaleur par conduction et par convection

Parmi les différents procédés mixtes de cette catégorie, nous pouvons introduire deux groupes de séchoirs :

- ✓ les procédés s'apparentant à des lits fluidisés à échangeurs embarqués, comme le séchoir Turbofluid commercialisé par Comessa et celui commercialisé par Va tech Wabag, qui a racheté la division environnementale de Sulzer Chemtech Group ;
- ✓ les procédés s'apparentant à des séchoirs à palettes avec circulation d'air, comme les turbo-sécheurs commercialisés par la société Alpha-Vomm.

### *IV.2.1 Séchoirs s'apparentant à des lits fluidisés à échangeurs embarqués*

La société Va tech Wabag commercialise un procédé assez semblable au séchoir CDS commercialisé par Andritz avec des échangeurs horizontaux embarqués au niveau de la sole de fluidisation. Ce procédé est présenté sur la Figure 39. Jusqu'à la fin des années 80, le problème de la phase plastique était résolu par une recirculation du produit sec. Maintenant, dans la plupart des installations, la recirculation a été abandonnée au profit d'une injection directe (dispersion) de la boue dans le séchoir. Précisons aussi que cette société a une vingtaine de références au niveau européen, dont une en France, à l'usine d'incinération des ordures ménagères de Nice, qui fonctionne depuis 1987.

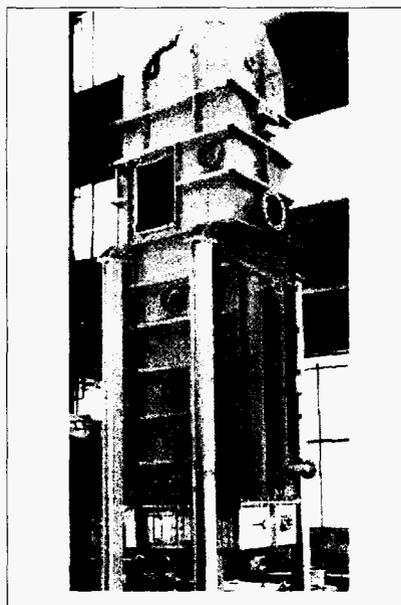


Figure 39 – Photographie du procédé commercialisé par Va tech Wabag

Le séchoir Turbofluid commercialisé par Comessa, présenté sur la Figure 40, est composé d'une cuve cylindrique horizontale à l'intérieure de laquelle tourne un arbre muni de bras. A l'extrémité de ce bras, sont fixées des pelles qui assurent un mélange du produit et un raclage des parois. La double enveloppe de la cuve est chauffée, ce qui permet de transférer par contact de la chaleur au produit à sécher. Enfin, de l'air à une température proche de 600 °C est soufflé au sein de la couche de produit. Globalement, ce procédé s'apparente à un lit fluidisé. D'après son constructeur, ce séchoir possède une référence dans le traitement des boues : il est utilisé pour sécher des boues de pigment de peinture. Nous n'avons pas pu obtenir de renseignements plus précis sur cette installation.

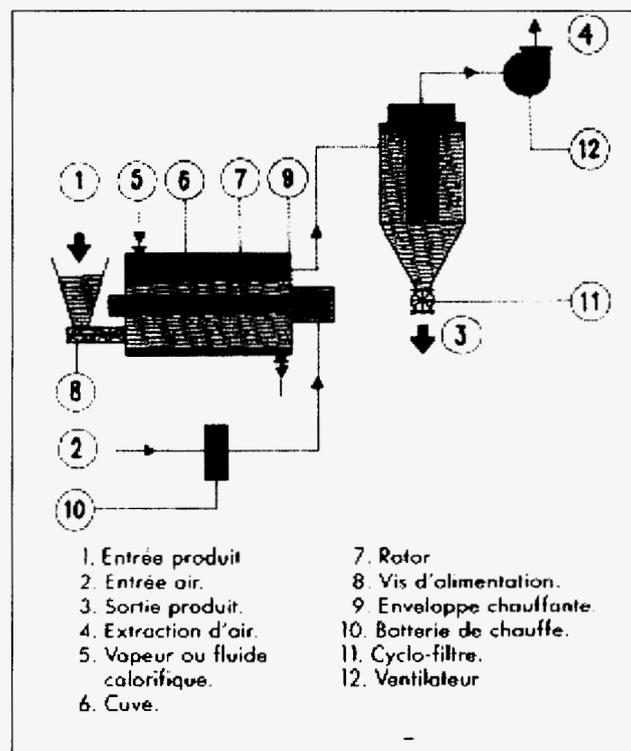


Figure 40 – Principe du procédé Turbofluid commercialisé par Comessa

#### IV.2.2 Séchoirs s'apparentant à séchoirs à palettes avec circulation d'air

Ces séchoirs s'apparentent à des cylindres (cf. Figure 41 pour le procédé Turbo-sécheur développé par Alpha-Vomm) dont la double enveloppe est chauffée. A l'intérieur de cette cuve est inséré un dispositif de mélange formé par un arbre tournant à vitesse élevée avec des palettes de forme spéciale. La force centrifuge plaque le produit à sécher

en fines couches contre les parois chaudes de la cuve cylindrique. Dans le même temps, un courant d'air chaud traverse axialement l'intérieur du cylindre.

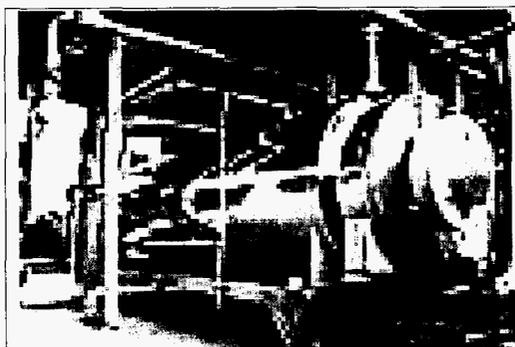


Figure 41 - Procédé Turbo-sécheur commercialisé par Alpha-Vomm

Le turbo-sécheur a déjà un nombre important de références (cf. [BRU99]) en Italie à la fois sur des boues urbaines et industrielles. Précisons aussi que cette société réalise des essais en France sur des boues de tanneries à Pont Audemer (source : Centre Technique du Cuir).

Les consommations spécifiques du Turbo-sécheur obtenues au cours de cette enquête et trouvée dans l'étude publiée par l'ADEME sont présentées dans le Tableau 40.

<i>Source</i>	<i>Consommation spécifique (kWh/kg ee)</i>
Constructeur	0.9 à 1.2
Étude publiée par l'ADEME [RES98]	0.77

Tableau 40 - Consommation spécifique pour le procédé Turbo-sécheur

Il semble qu'il y ait une grosse différence entre les valeurs annoncées par le constructeur et la valeur issue de l'étude publiée par l'ADEME. Dans la pratique, la consommation spécifique obtenue lors des essais sur les boues de tanneries semblerait être légèrement plus élevée que celle annoncée par le constructeur.

Compte tenu des informations disponibles sur les séchoirs mixtes, il ne nous est pas possible de proposer une étude comparative plus approfondie de ces séchoirs.

## V. Synthèse

Pour conclure ce chapitre sur les procédés de séchage disponibles pour traiter les boues résiduelles, nous allons récapituler rapidement les principaux avantages et inconvénients des séchoirs directs et indirects. Nous rappellerons ensuite les principaux résultats obtenus lors des études comparatives réalisées dans le cadre de ce travail. Enfin, nous terminerons cette partie en présentant le coût du séchage par poste, ce qui permettra de rappeler que la consommation énergétique ne représente qu'une fraction du coût total du séchage, fraction comprise entre 40 et 50 % selon le type de procédé utilisé [RES98]. Il n'est pas possible, dans ce type d'étude, de donner des informations concernant les coûts d'investissement des différentes technologies répertoriées, ceci dépendant fortement du lieu d'implantation de l'installation (avec éventuellement des sources d'énergie disponibles), de la nature et du débit de boues à traiter etc...

### V.1 Principaux avantages et inconvénients des séchoirs directs et indirects

Dans le Tableau 41, nous avons répertorié les principaux avantages et inconvénients des séchoirs directs et indirects [CAR99].

<i>Les séchoirs directs</i>	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>• Conception simple</li><li>• Robustesse</li><li>• Peu de pièces en mouvement</li><li>• Aucune incidence sur le procédé d'une variation de la siccité initiale</li><li>• Capacité de traitement élevée</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Grandes quantités de gaz à traiter</li><li>• Nécessité d'installations de grande taille pour le dépoussiérage, le lavage et la désodorisation des buées</li><li>• Encombrement de l'installation globale important</li><li>• Risque d'inflammation et d'explosion</li><li>• Moins rentable pour des installations de petites tailles</li></ul>

<i>Les séchoirs indirects</i>	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confinement des buées et des odeurs</li> <li>• Possibilité d'opérer sous atmosphère inerte, sous vide ou en pression</li> <li>• Faibles risques d'auto-inflammation et d'explosion</li> <li>• Faible quantité de gaz à épurer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plus difficile à concevoir et à fabriquer.</li> <li>• Problème de colmatage et d'usures des pièces mécaniques en mouvement</li> <li>• Travaux de maintenance fréquents</li> <li>• Plutôt pour des installations de petites tailles</li> </ul>

Tableau 41 - Comparatif des principaux avantages et inconvénients des séchoirs directs et indirects

Par rapport aux procédés directs, les séchoirs par contact présentent deux points forts du point de vue de l'environnement et de la sécurité : la production de buées, la plupart du temps malodorantes, est relativement faible et la faible teneur en oxygène de ces buées réduit considérablement les risques de prise au feu.

## V.2 L'avenir est-il aux procédés de séchage direct ou indirect ?

Cette étude nous a permis de constater qu'au cours des dernières années l'offre disponible sur le marché s'est considérablement réduite. Un certain nombre de constructeurs ont choisi de ne plus s'attaquer au marché des boues résiduaire. Les raisons de ce choix sont multiples : elles sont essentiellement techniques, certains procédés initialement développés pour sécher d'autres types de produits ne pouvaient pas s'adapter aussi facilement aux boues résiduaire, mais aussi économiques. Beaucoup de constructeurs nous ont fait remarquer au cours d'entretiens téléphoniques que le marché des boues résiduaire était pratiquement verrouillé par quelques "gros" constructeurs, comme notamment Buss, Swiss Combi et Degrémont (GMF Gouda)... Le marché des boues industrielles semble beaucoup plus ouvert et accessible aux petits équipementiers.

Le séchage des boues semble connaître depuis quelques mois un regain d'intérêt, probablement lié aux nouvelles réglementations qui se dessinent à l'horizon. Néanmoins, il est difficile de prévoir quel type de procédé sera majoritairement utilisé dans le futur.

Pour les séchoirs indirects, nous avons vu que les consommations spécifiques sont relativement proches quelle que soit la technologie utilisée. Les séchoirs à disques et à palettes ont déjà un grand nombre de références, ce qui laisse à penser qu'ils sont déjà extrêmement fiables. Mais le nombre de séchoirs indirects à tambour en activité s'est sensiblement accru ces dernières années, malgré une consommation spécifique légèrement plus élevée que les séchoirs cités précédemment. Ceci est certainement dû à la conception relativement simple de ces séchoirs, qui réduit les interventions de maintenance des installations.

Pour les séchoirs directs, une sélection s'est déjà effectuée parmi les différentes technologies disponibles pour sécher les boues résiduaires : les séchoirs à lit fluidisé ont pratiquement disparu du marché. Le plus grand nombre de références est à mettre à l'actif des séchoirs à tambour. Mais si on compare leurs performances à celles des séchoirs indirects, leur consommation spécifique semble être légèrement supérieure et la taille des installations est beaucoup plus importante.

Ainsi, il est probable que les deux types de séchage continuent de coexister sur le marché du séchage des boues résiduaires même si le séchage par contact semble être plus intéressant du point de vue énergétique, environnemental et de la sécurité.

### V.3 Coût du séchage par poste

Dans le cadre de cette étude, il n'était pas prévu de faire une évaluation du coût du séchage par poste ; nous nous référerons donc à des données de la littérature pour illustrer nos propos [RES98]. Précisons tout d'abord, que peu d'informations concernant ces coûts sont transmises et exploitables. Les données économiques présentées sont généralement extraites de publications ou de contacts avec les constructeurs. Il conviendrait de pouvoir procéder à des expérimentations in situ pour réellement évaluer les coûts du séchage. On peut à ce sujet citer une étude économique

prévisionnelle assez complète provenant des exploitants de la station d'épuration Nancy [MAR86], complétée après installation de l'unité de séchage [MAR91].

Bien que l'énergie à apporter pour le séchage thermique soit très importante, elle ne représente que 1/3 à 1/2 du coût total du procédé de séchage. S. Ressent [RES98] a réalisé un bilan économique sur les séchoirs équipant des stations d'épuration. Les coûts par poste ont été homogénéisés en moyennant sur l'ensemble des procédés étudiés pour pouvoir effectuer des comparaisons "viabiles". Ainsi, quel que soit le type de séchoirs, le coût d'exploitation moyen est de l'ordre de 855 Francs par tonne de matières sèches. La répartition moyenne des coûts par poste est sensiblement différente selon le type de séchoirs étudiés (cf. Figure 42 pour les séchoirs indirects et Figure 43 pour les séchoirs directs).

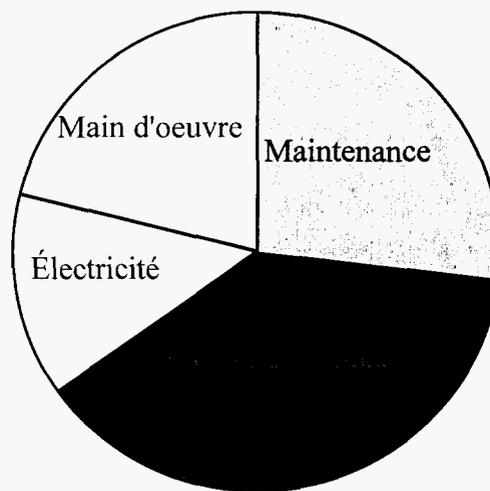


Figure 42 - Coût moyen par poste pour les séchoirs indirects

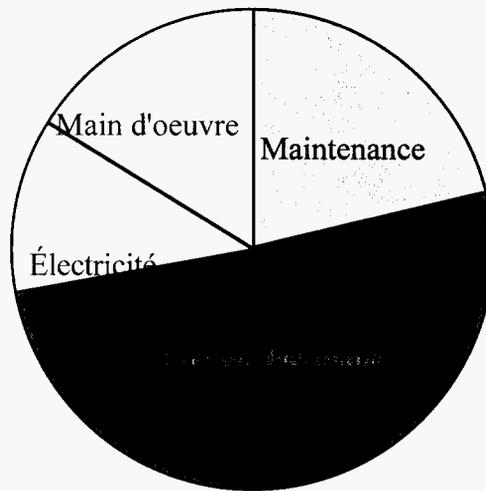


Figure 43 - Coût moyen par poste pour les séchoirs directs

Il peut cependant exister des écarts importants entre ces coûts moyens par catégories de séchoirs et certaines technologies. Par exemple, pour les séchoirs indirects, l'auteur note que le pourcentage correspondant au coût de la main d'œuvre est supérieur à 27 % pour les procédés à couche mince de marque Buss ou GEA Ganzler, tandis que, pour le procédé commercialisé par Va tech Wabag, c'est la part de l'énergie thermique qui est plus importante que pour ses concurrents. Pour les séchoirs directs, on note une part plus importante du poste "énergie thermique" par rapport aux séchoirs indirects.

Ces informations sont à considérer avec précautions, puisqu'elles dépendent de paramètres liés à la conduite de l'installation et à sa conception, comme la récupération de l'énergie, la production d'énergie à proximité de l'installation, le recyclage des boues etc., et qui sont donc très variables d'un site à l'autre.

### **CHAPITRE 3 : Les activités de recherche**

La dernière partie de ce travail concerne l'identification des équipes de recherche travaillant sur l'optimisation ou le développement de procédés de séchage des boues résiduaires ainsi qu'une synthèse de leurs activités de recherche.

Contrairement au chapitre précédent, l'identification des différents acteurs s'est avérée relativement facile, puisque leur nombre est restreint. En effet, nous avons identifié, au plan international, moins d'une dizaine de laboratoires de recherche qui travaillent sur les procédés de séchage appliqués aux boues résiduaires. Leurs coordonnées sont disponibles en Annexe 7.

La démarche classique du génie des procédés consiste à caractériser le produit, son comportement dans le procédé et ensuite à faire le lien entre les caractéristiques et le comportement observé. Comme nous le verrons dans la suite de ce chapitre, la plupart des équipes de recherche identifiées travaillent sur ces différents points. Mais à l'heure actuelle, faire le lien entre les caractéristiques de la boue et son comportement dans le procédé de séchage représente encore un challenge ambitieux. Ce n'est pourtant qu'à ce prix qu'une typologie de la boue en vue du procédé, ou d'un groupe de procédés, ne pourra être établie.

Comme lors de l'étude technologique, nous allons retrouver les trois grandes catégories de séchoirs (directs, indirects et mixtes). Le nombre d'équipes étant réduit et les travaux réalisés étant extrêmement ciblés, il n'a pas été possible de réaliser une classification autre que par technologie de séchage (cf. Figure 44). Dans la suite de ce chapitre, les différents travaux de recherche en cours seront présentés par équipe de recherche sous l'angle technologique.

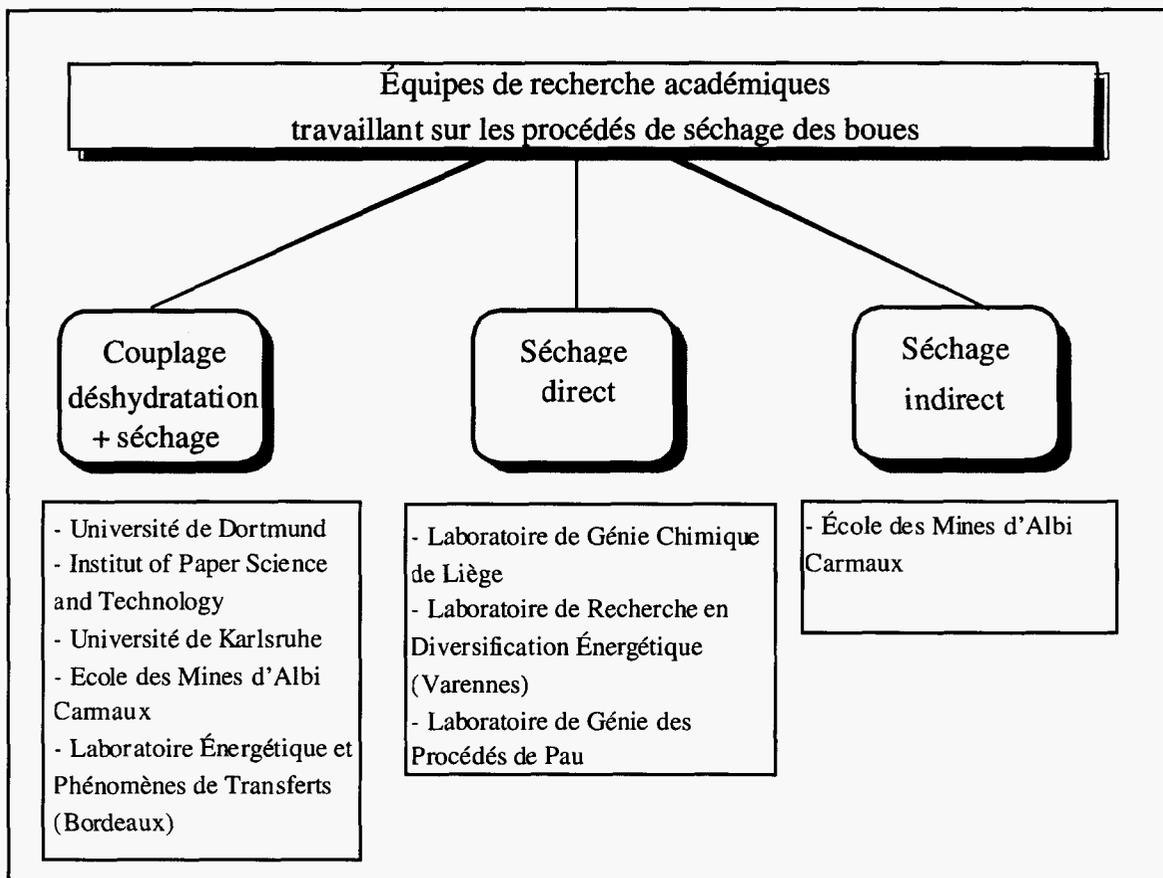


Figure 44 – Liste des laboratoires de recherche travaillant sur les procédés de séchage des boues résiduelles

### **I. Les recherches en cours sur les procédés de séchage direct appliqués aux boues**

Au cours de cette étude, nous avons identifié trois laboratoires de recherche travaillant sur les procédés de séchage direct. Parmi ces laboratoires, deux travaillent sur l'optimisation de procédés : le Laboratoire de Génie des Procédés de Pau et le Laboratoire de Génie Chimique de l'Université de Liège en Belgique. Ce dernier travaille en collaboration avec la société Sevar, déjà citée dans ce rapport. Quant au Laboratoire de Recherche en Diversification Énergétique du CANMET au Québec, il développe de nouveaux procédés de séchage à lit fluidisé pulsé ou à lit à jet rapide.

Nous allons, dans la suite de ce paragraphe, successivement décrire les sujets de recherche de ces équipes et les principaux résultats obtenus.

## I.1 Activités du Laboratoire de Génie des Procédés de Pau sur le séchage des boues

Les travaux initiés dans ce laboratoire en 1995 concernent la déshydratation des boues résiduaires par association en série d'une opération de pressage puis d'une étape de séchage convectif. L'objectif de ce travail était de dimensionner la chaîne de traitement des boues résiduaires, ce qui peut être résumé par la question suivante : "jusqu'à quel point faut-il presser pour bien sécher?". Ces recherches se sont concrétisées par la soutenance de thèse de Jean-Marc Bongiovanni en 1998 [BON98].

Les expériences de déshydratation mécanique sont réalisées dans une cellule de filtration compression instrumentée alors que celles de séchage sont réalisées dans une boucle de séchage convectif sous air humide. Au cours du séchage, la perte de masse de l'échantillon est enregistrée, ce qui permet de calculer la cinétique de séchage. D'importants problèmes de reproductibilité des résultats ont été rencontrés en travaillant sur les boues "réelles", qu'elles soient urbaines ou industrielles. C'est pourquoi une partie de leurs travaux a porté sur des boues "synthétiques" composées de chlorure de polyvinyle. Les tendances mises en évidence sur ces boues synthétiques ont ensuite été confirmées par des expérimentations sur des boues réelles activées ou purement minérales.

La Figure 45, qui représente l'évolution de la densité de flux de matière transférée lors de l'étape de séchage en fonction de la teneur en eau pour différentes pressions appliquées lors de l'étape de déshydratation, montre que, quelle que soit la pression appliquée lors de la phase de déshydratation mécanique, la cinétique de séchage reste inchangée. Ce résultat obtenu pour des boues synthétiques a été retrouvé avec les boues réelles. Ainsi, les modifications de structure lors de la phase de compression n'altèrent pas la réponse du matériau lors de l'étape de séchage et ces deux opérations unitaires de séparation peuvent être étudiées de façon indépendante sans conséquence sur les cinétiques de séchage mesurées, l'étape de déshydratation étant préalable à celle de séchage.

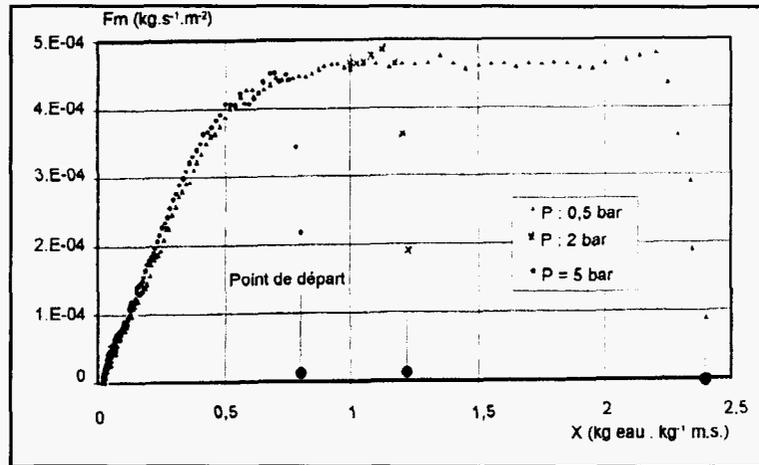


Figure 45 - Évolution de la densité de flux de matière transférée lors du séchage de boues synthétiques en fonction de la teneur en eau pour différentes pressions appliquées lors de l'étape de déshydratation [BON98]

En ce qui concerne l'opération de séchage, les deux phases de séchage, classiquement observées en séchage convectif, ont aussi été retrouvées pour les boues résiduelles :

- ✓ une phase isenthalpe à vitesse de séchage constante pour les boues synthétiques et minérales (palier horizontal observé sur la Figure 45) et à vitesse de séchage légèrement décroissance pour les boues activées (cf. Figure 46)
- ✓ une phase de ralentissement, au cours de laquelle les propriétés intrinsèques du matériau gouvernent le processus d'élimination de l'eau.

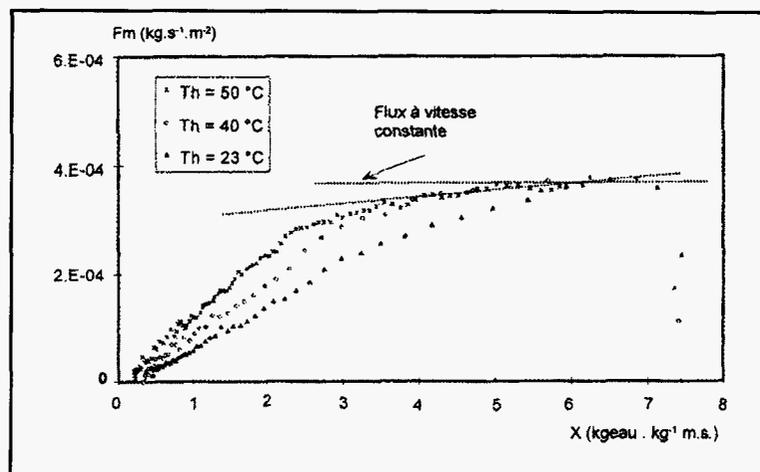


Figure 46 - Évolution de la densité de flux de matière transférée lors du séchage de boues activées en fonction de la teneur en eau [BON98]

Dans le cas des boues activées, un phénomène de « croutage », probablement dû à la présence de graisse, a été mis en évidence [VAX00]. Il existe un fort gradient d'humidité

à l'intérieur de la boue, qui reste humide, tandis que la surface s'assèche rapidement, ce qui ralentit le séchage. Pour ce type particulier de boues, c'est donc la migration de l'eau dans le produit qui conditionne le séchage.

Parallèlement à l'aspect procédé, cette équipe de recherche a travaillé sur la caractérisation des boues résiduaires en vue de la déshydratation mécanique et du séchage thermique. Ils se sont en particulier intéressés à la granulométrie des boues, à la caractérisation de l'eau libre et de l'eau liée dans la boue (notions présentées dans ce rapport au chapitre I, paragraphe II.4), ainsi qu'à la caractérisation du comportement thermique de la boue (mesure de la diffusivité thermique et de la capacité calorifique). Pour la caractérisation de la taille des particules, l'analyse d'images s'est avérée très complémentaire à l'analyse granulométrique : elle donne en effet des informations sur la structure floculée des différentes boues étudiées (flocs filamenteux, flocs compacts ...). Pour la caractérisation de la transition eau libre/eau liée, il a été montré que la dilatométrie, méthode de mesure qui repose sur le principe que l'eau libre et l'eau liée ont des températures de congélation différentes, donne des résultats qui s'écartent fortement de ceux donnés par les autres méthodes habituellement utilisées (calorimétrie différentielle, thermogravimétrie, méthode des bocaux ...).

Ainsi, outre le découplage de ces deux étapes unitaires, l'un des enseignements principaux à retenir de ces recherches concerne l'analyse granulométrique : il semblerait que la granulométrie des particules soit un paramètre pertinent pour classer et prédire les comportements en séchage des boues non biologiques.

## I.2 Activités des Laboratoires de Génie Chimique de Liège sur le séchage des boues

Le groupe Environnement des Laboratoires de Génie Chimique de Liège travaille depuis plusieurs années sur différents problèmes, comme la logique floue appliquée au contrôle de la chaîne de traitement des boues activées ou encore le séchage convectif de boues résiduaires, travaux que nous allons brièvement résumer.

L'objectif de ces travaux [LEO00] est d'acquérir une meilleure connaissance des mécanismes de transferts gouvernant le séchage. Pour cela, un pilote de séchage

convectif, reproduisant les conditions opératoires d'un séchoir à bandes (procédé SEVAR) mais fonctionnant en batch, a été conçu (cf. Figure 47). L'air de séchage, porté à une température proche de 130°C, traverse un lit de boues extrudées sous forme de pellets cylindriques. L'épaisseur de ce lit est comme dans le procédé continu de sept centimètres. Les expériences sont réalisées sur des boues primaires et secondaires digérées.

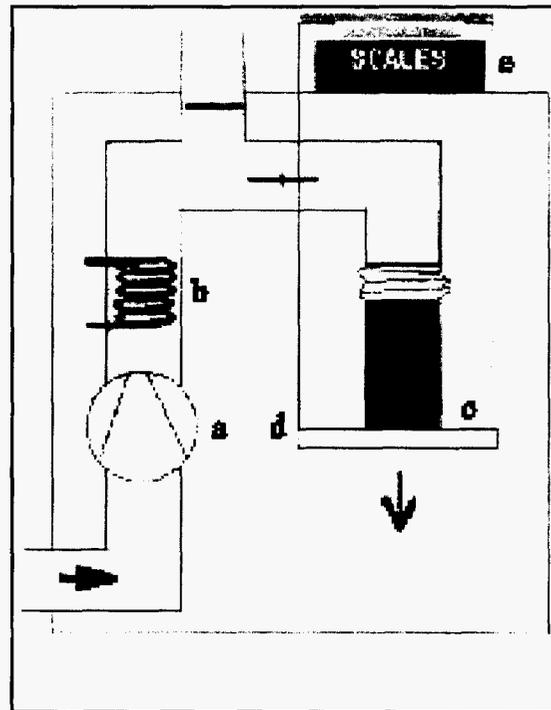


Figure 47 – Schéma du pilote de séchage convectif fonctionnant en batch [LEO00]  
 (Légende : (a) ventilateur, (b) résistances chauffantes, (c) échantillon,  
 (d) support perforé, (e) balance)

Lors du séchage, une forte diminution de volume (on parle généralement de retrait) est observée ; l'évolution de ce retrait volumique (cf. Figure 48, courbe de gauche) est déterminée en prélevant des échantillons de boues à différentes teneurs en eau et en mesurant leurs tailles. Ce résultat est ensuite utilisé pour modéliser les cinétiques de séchage, déterminées par pesée.

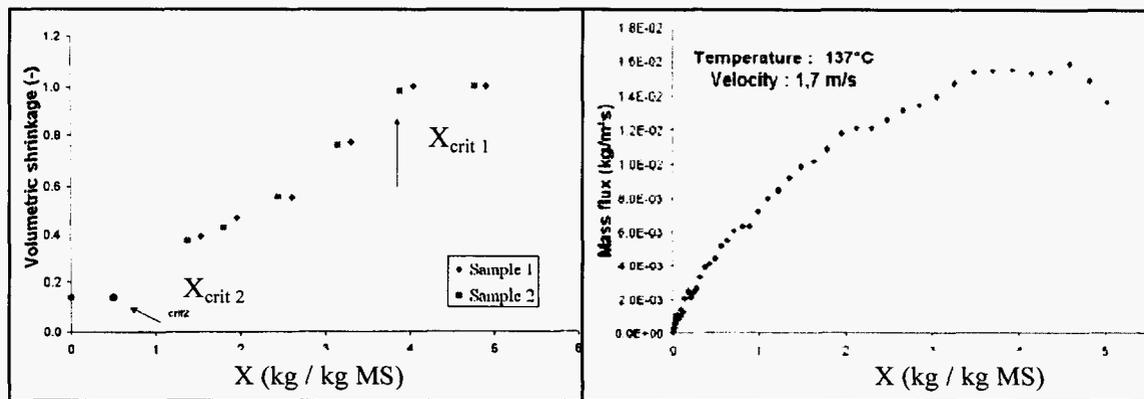


Figure 48 – Évolution du ratio « volume de boue / volume initial » en fonction de la teneur en eau (à gauche) et cinétique de séchage (à droite) lors d'une expérience de séchage avec de l'air à 130°C s'écoulant à une vitesse de 1.5 m/s [LEO00].

Sur les cinétiques de séchage, présentées à droite sur la Figure 48, trois phases sont ainsi identifiées :

- ✓ une première phase où la teneur en eau est supérieure à une première valeur critique  $X_{crit1}$  ; on retrouve la phase isenthalpe déjà mise en évidence pour les boues résiduaire par J.M. Bongiovanni. Seuls les transferts externes gouvernent le séchage ;
- ✓ une phase de ralentissement pour une teneur en eau comprise entre les deux valeurs critiques  $X_{crit1}$  et  $X_{crit2}$  ; la décroissance est proportionnelle à la puissance  $2/3$  du volume de boue. Dans cette phase de ralentissement, ce sont toujours les transferts externes qui limitent le séchage, le ralentissement observé de la vitesse de séchage étant attribué à la diminution de la surface d'échange (elle-même due au retrait de la boue) ;
- ✓ une second phase de ralentissement, pour une teneur en eau inférieure à  $X_{crit2}$ , pour laquelle les transferts internes dans le produit deviennent limitants et gouvernent le séchage.

Le modèle développé dans le cadre de ce travail représente un pas important vers la compréhension des mécanismes gouvernant le séchage convectif des boues résiduaire, bien que, pour atteindre l'objectif final, il reste à relier le retrait volumique aux propriétés mécaniques des boues et à leur histoire.

### I.3 Activités du CANMET sur le séchage des boues

Le groupe « Système de Transfert et de Stockage de la Chaleur » du Laboratoire de Recherche en Diversification Énergétique a pour mission de développer et d'améliorer les technologies de transfert et de stockage de la chaleur et d'accroître l'efficacité énergétique et la productivité dans les procédés industriels. Le séchage, qui représente une opération très répandue dans le milieu industriel et très énergivore, les intéresse tout particulièrement. Ils travaillent sur deux procédés susceptibles d'être appliqués aux boues, qui seront successivement décrits dans la suite de ce chapitre.

#### *1.3.1 Séchoir à lit à jet rapide*

Parmi les deux procédés développés par le CANMET, le séchage à lit à jet rapide est destiné à sécher des boues liquides dont la teneur en eau est comprise entre 90 et 98 %. En particulier, le mode de séchage proposé peut contribuer à la transformation de boues industrielles en produits de valeur ajoutée, mis sous forme de granulés secs. Pour réaliser ces études, le laboratoire dispose d'un pilote de laboratoire, dont la capacité de traitement est de 50 kg/h, et d'une unité de démonstration industrielle, dont la capacité est de 350 kg/h.

Le principe de ce séchoir est présenté sur la Figure 49. Le jet d'air chaud ascendant pénètre le lit de particules inertes (cubes de Téflon) en créant une giclée centrale dans le séchoir. La boue est introduite sous forme de fines gouttes au moyen d'un atomiseur bi-phasique placé dans l'axe du séchoir et enveloppe ces particules inertes. Ces agglomérats sont entraînés dans le séchoir par le courant d'air chaud. Le séchage se produit par conduction/convection entre la boue et les particules inertes et par convection entre la boue et le courant d'air chaud. Dans la zone de séparation située en partie supérieure du séchoir, la boue séchée devient friable et se détache de la surface des particules inertes à cause des collisions particules-particules et du choc avec la paroi supérieure perforée du séchoir. La boue sèche est entraînée par l'air chaud, pour être récupérée à travers un dispositif de séparation gaz-solide, tandis que les particules inertes, au contact de la paroi perforée, perdent une partie de leur quantité de mouvement et retombent dans la

zone annulaire. La vitesse de l'air est très élevée, ce qui induit des temps de séjour extrêmement courts.

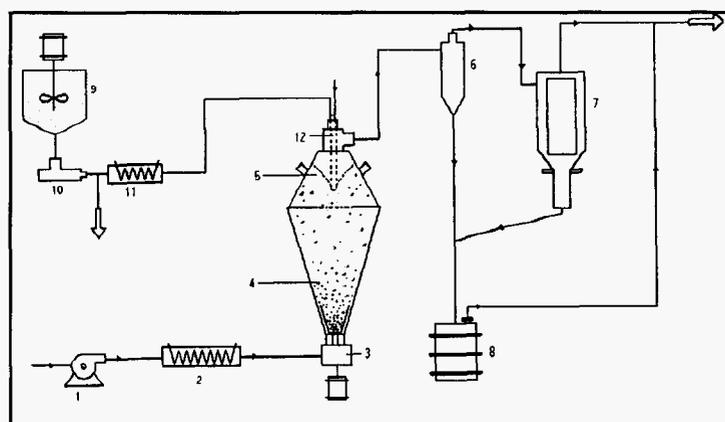


Figure 49 – Montage expérimental du séchoir à lit à jet rapide [AMA99]

Ce procédé a été testé avec des boues secondaires de l'industrie des pâtes et papiers et des boues d'abattoirs [AMA99]. Selon le type de boues, la température de séchage doit être ajustée. En effet, la présence de protéines dans les boues d'abattoirs nécessite une température de séchage plus basse (65°C contre 110°C pour les boues de papeterie), pour éviter une dénaturation et une perte d'activité biologique. De plus, des problèmes d'adhérence aux parois internes du séchoir et du collecteur, dus à la présence d'une enveloppe de graisse adsorbée, ont été rencontrés pour ces mêmes boues.

Ce travail s'est poursuivi cette année [AMA00] par l'étude de l'effet d'additifs sur le séchage des boues d'abattoirs, l'objectif étant de supprimer les problèmes d'adhérence aux parois pour améliorer les performances du séchoir. Les forces d'adhésion et de cohésion dépendant non seulement de la tension superficielle mais aussi de la porosité et de la taille des agglomérats, ils se sont naturellement intéressés au comportement rhéologique de la boue en déterminant la viscosité apparente du produit avec ou sans additif, ainsi qu'à l'évolution de sa tension superficielle. Au terme de ce travail, l'additif le plus efficace est le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). Ainsi, son ajout permet :

- ✓ d'augmenter la viscosité apparente de la boue, ce qui facilite le mélange et augmente le temps de contact avec les particules inertes ;
- ✓ d'augmenter la tension superficielle, ce qui se traduit au niveau du procédé par une diminution des effet de collage ;

- ✓ de diminuer la taille des agglomérats, comme le montre les microstructures obtenues au microscope électronique et présentées sur la Figure 50.

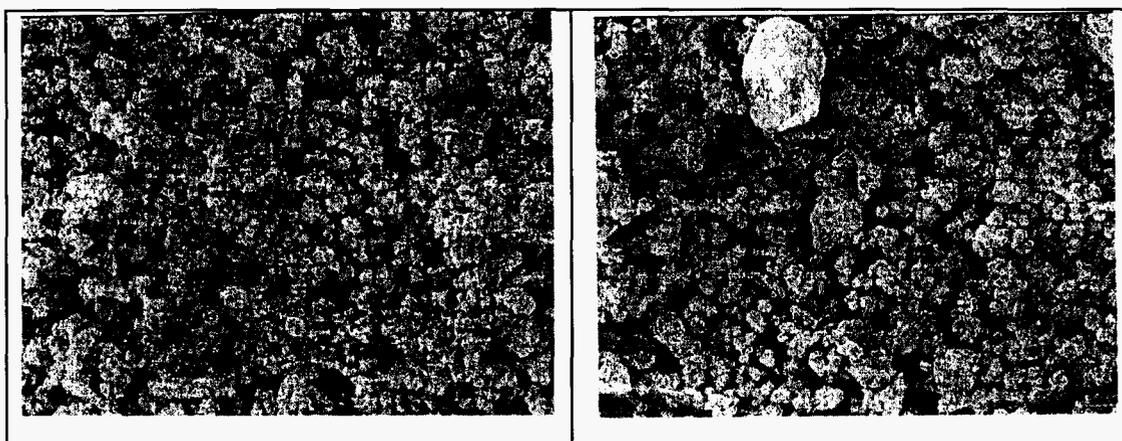


Figure 50 – Microstructures observées [AMA00] sur de la boue d'abattoirs avec (à gauche) et sans (à droite) addition de  $\text{CaCO}_3$ .

Cette caractérisation de la porosité et de la taille des agglomérats se poursuit. Les résultats attendus et la poursuite des expérimentations dans le séchoir devraient permettre de proposer un modèle de séchage sur des supports solides.

### *1.3.2 Séchoir à lit fluidisé pulsé*

Le second procédé, développé depuis 1997, est un séchoir à lit fluidisé pulsé fonctionnant à haute température [POI99]. Ce séchoir possède plusieurs avantages par rapport aux lits fluidisés conventionnels comme la fluidisation de matériaux de formes irrégulières et de granulométries larges... Deux séchoirs à lit fluidisé pulsé industriels fonctionnant à basse température sont utilisés en Pologne pour le séchage et le refroidissement du sucre depuis le milieu des années 80. Le premier prototype du type séchoir à lit fluidisé pulsé conçu pour fonctionner à haute température a été construit en 1997 par le CANMET en collaboration avec la société Barr Rosin Inc., déjà citée dans ce rapport. Cet appareil a notamment été utilisé pour sécher des boues primaires des usines de pâtes et papiers, mais les résultats de ces travaux n'ont, à notre connaissance, pas été publiés.

Dans la suite de ce paragraphe, nous nous limiterons donc à une description du principe de ce séchoir. La conception (cf. Figure 51) repose essentiellement sur celle des séchoirs à lit fluidisé conventionnels. Mais la boîte à vent est divisée en plusieurs compartiments par des cloisons verticales. L'air chaud arrive par les deux côtés de la boîte à vent et est dirigé séquentiellement, par une vanne rotative, dans chacun des compartiments. En théorie, la zone du lit de particules cessant d'être alimentée en air devrait devenir stagnante, mais en pratique, la vitesse de rotation de la vanne, de l'ordre de 650 tours par minute, permet à l'ensemble du lit de demeurer en mouvement durant l'opération de séchage. La vitesse de l'air à la grille dans ce séchoir est 0.6 à 0.9 fois celle utilisée dans les séchoirs à lit fluidisé conventionnels. De plus, une grille possédant un pourcentage de surface ouverte plus élevé (de l'ordre de 7 à 30 % contre 3 à 4 % pour les séchoirs à lit fluidisé conventionnels) peut être utilisée, ce qui réduit considérablement la perte de charge et les coûts d'opération.

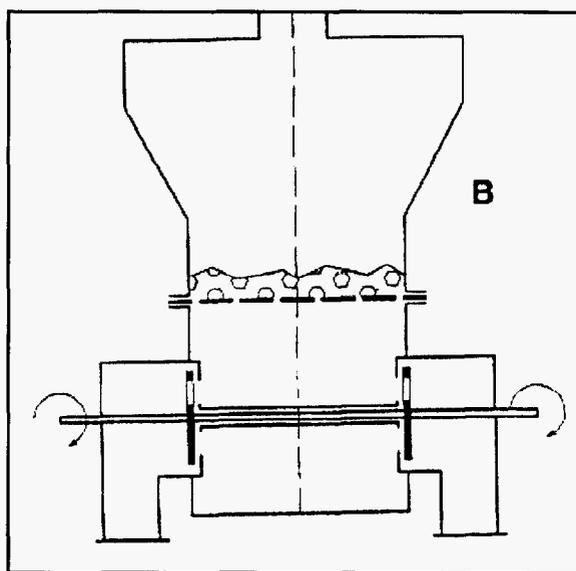


Figure 51 – Schéma du séchoir à lit fluidisé pulsé [POI99]

## II. Les recherches en cours sur les procédés de séchage indirect appliqués aux boues

Au cours de cette étude, nous avons identifié un seul laboratoire de recherche travaillant sur l'optimisation de procédés indirects de séchage. Il s'agit du Centre Énergétique Environnement de l'École des Mines d'Albi Carmaux. Par le passé, d'autres groupes, en

particulier les départements de Recherche et Développement des grands groupes japonais ou allemands, se sont intéressés à ce sujet. Citons, par exemple, les travaux déjà anciens de Yamahata et al. ([YAM85]) en 1985 sur l'optimisation énergétique des séchoirs à palette et ceux de Bäuerle et al. ([BAU88]) en 1988 sur les séchoirs à disques. Enfin, des travaux plus récents sur le séchage dans le procédé LIST, déjà cité dans l'étude technologique, ont été publiés récemment par Dittler et al. [DIT97] mais ils concernent le séchage d'une argile.

Dans ce rapport, nous nous limiterons à la description des travaux entrepris à l'École des Mines d'Albi Carmaux. Depuis maintenant cinq ans, le Centre Énergétique et Environnement a initié des actions allant de la caractérisation du produit à l'échelle du laboratoire jusqu'à des expérimentations in situ, dans l'objectif de réduire les volumes des boues avec un minimum de dépenses énergétiques et simultanément d'optimiser les procédés en augmentant les échanges thermiques et en réduisant les émissions de polluants. Deux voies de recherche ont été suivies, elles vont être successivement décrites.

## II.1 Le séchage en couche mince

Deux technologies différentes de séchage en couche mince existent sur le marché (cf. Chapitre 2, paragraphe II.1.3.). Les travaux entrepris en 1995 ont concerné le cylindre sécheur et se sont concrétisés en 1999 par la soutenance de thèse de C. Carrère-Gée [CAR99]. Dans les procédés de séchage indirect en couche mince, l'énergie transférée à l'interface solide/boue est extrêmement élevée pendant un temps très court en raison de l'ébullition de l'eau dans le produit, le reste du séchage se faisant par évaporation.

Dans les procédés, les transferts internes dans le cylindre et les transferts externes, incluant les phénomènes à l'interface paroi/boue et les transferts dans la boue, sont extrêmement couplés. Pour améliorer la conception et le dimensionnement de ces séchoirs, il est nécessaire de déterminer le phénomène de transfert limitant. C'est pourquoi une méthodologie particulière a été développée. Elle consiste à découpler les

transferts internes au cylindre des transferts externes dans la boue et à déterminer les cinétiques intrinsèques à la boue.

Dans un premier temps, un dispositif permettant de stocker l'énergie nécessaire au séchage complet de la boue et de transférer très rapidement, par diffusion, cette énergie vers la surface en contact avec le produit a été construit. La connaissance de la température de paroi et du flux pariétal, estimés à l'aide de la mesure de la température dans le bloc de cuivre grâce à un thermocouple à contact séparé, permet de déterminer à l'aide d'un bilan énergétique les cinétiques de séchage intrinsèque à la boue étudiée et une résistance thermique externe (inverse d'un coefficient d'échange). Cette résistance dépend de la température de paroi, de la teneur en eau de la boue et de la charge enduite lorsque la couche enduite sur la paroi est supérieure à 1 mm (cf. Figure 52) et indépendante de cette grandeur dans le cas contraire. Une corrélation a pu être déterminée.

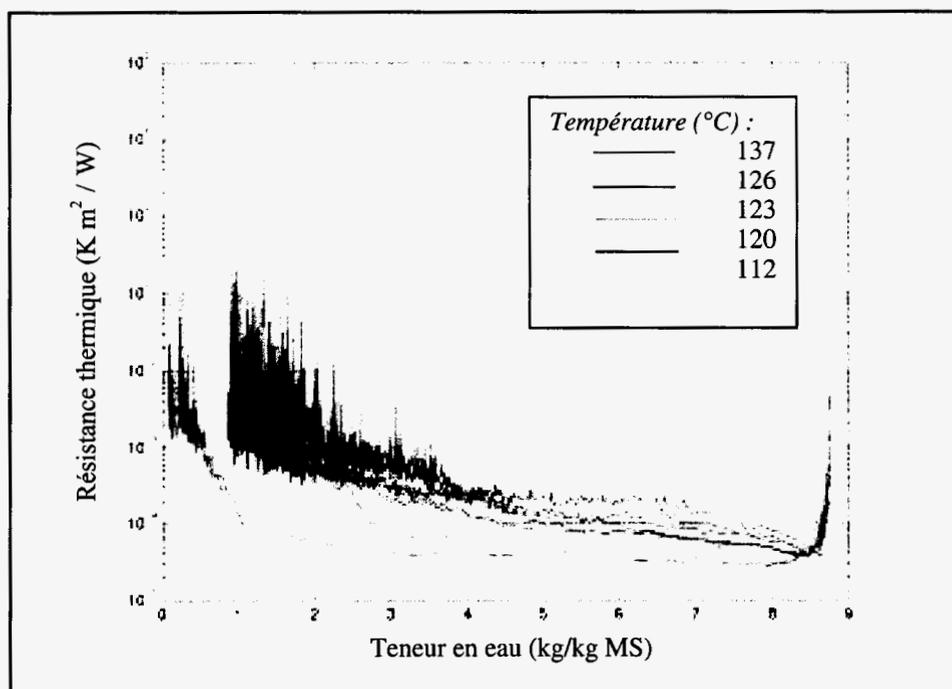


Figure 52 – Evolution de la résistance thermique entre la paroi métallique et une boue d'hydroxyde d'aluminium en fonction de la teneur en eau pour différentes températures initiales et une épaisseur de boue supérieure à 1mm [CAR99].

Dans un second temps, le séchage de boues d'hydroxyde d'aluminium sur un cylindre sécheur de laboratoire, chauffé électriquement, a été étudié. L'aptitude de la boue à

s'enduire sur le cylindre est liée à des effets thermiques. Les cinétiques de séchage sont obtenues par prélèvements sur le cylindre (cf. Figure 53). Elles ont été comparées, par ailleurs, à celles obtenues par le 1<sup>er</sup> montage expérimental : les allures sont identiques bien que le temps de séchage soit beaucoup plus long sur le cylindre, de l'ordre d'une quarantaine de secondes sur le cylindre contre une dizaine sur le premier montage.

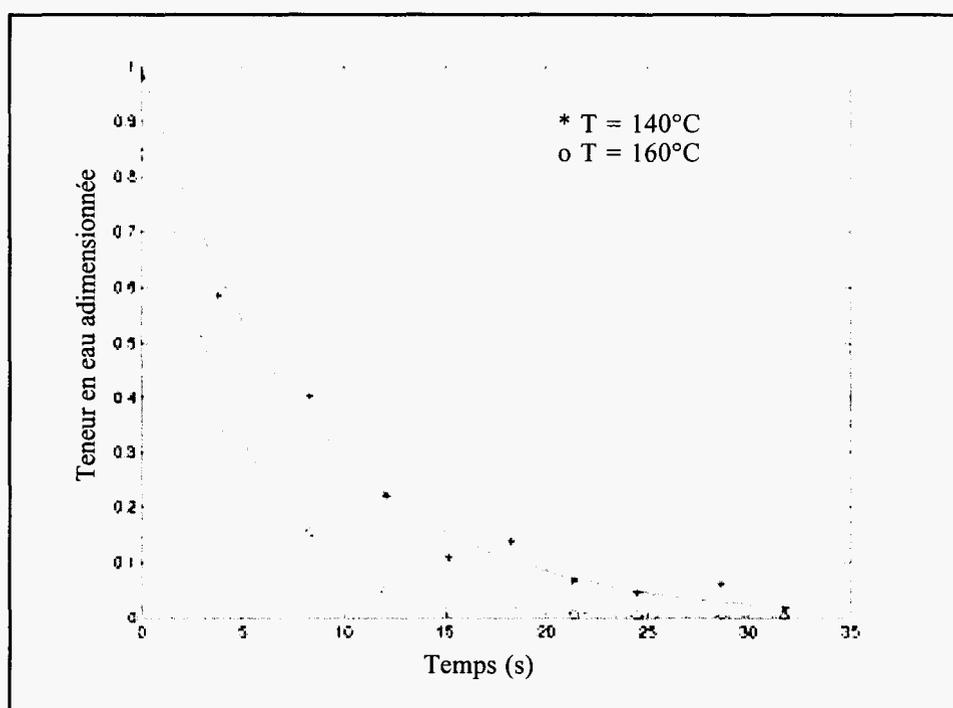


Figure 53 – Influence de la température de régulation sur les cinétiques de séchage de la boue d'hydroxydes d'aluminium [CAR99]

Enfin, un modèle simple du cylindre sécheur a été développé en prenant compte des effets conjugués des transferts internes et externes, par l'intermédiaire de la corrélation déterminée pour la résistance externe. Dans ce cas, l'importance des transferts internes, qui conditionnent la durée de séchage, a été mise en évidence pour le pilote de laboratoire étudié.

## II.2 Le séchage par contact avec agitation

Le second axe de recherche du Centre Énergétique Environnement concerne les procédés de séchage par contact avec agitation, du type séchoirs à disques ou séchoirs à palettes. Ces travaux, entamés en 1996, se sont concrétisés, l'an dernier, par la soutenance de thèse de J.H. Ferrasse [FER00]. Cette action de recherche se poursuit, l'objectif final

étant d'établir une typologie des boues en fonction de leur aptitude à sécher dans ce type de procédés. Durant les trois premières années, des outils pour la caractérisation et la compréhension du comportement des boues dans un procédé de séchage conductif avec agitation ont été développés.

Une revue bibliographique a montré :

- ✓ que les techniques de caractérisation de la nature de l'eau dans un produit humide étaient mal adaptées à un produit aussi évolutif qu'une boue ;
- ✓ que les coefficients d'échange à la paroi dans un procédé de séchage conductif n'étaient connus que pour les milieux granulaires ; or cette information est nécessaire sur toute la durée du séchage, et notamment lors de la phase fluide, pour le dimensionnement énergétique du procédé ;
- ✓ que le dimensionnement mécanique posait d'énorme problème, puisqu'une phase « plastique » apparaît pour une siccité de l'ordre de 50%, comme il a déjà été souligné dans ce rapport.

Sur le plan de la caractérisation, des méthodologies ont été développées pour déterminer les propriétés thermophysiques de la boue, comme la diffusivité, la chaleur volumique, la capacité calorifique... Mais la partie la plus originale de ce travail de caractérisation concerne la méthodologie développée pour la mesure rapide et simultanée des isothermes de sorption et de chaleurs nettes de désorption. Cette mesure se fait par couplage entre une thermobalance et un analyseur calorimétrique différentiel. Grâce à cette méthodologie, il a ainsi été mis en évidence qu'une grande partie de l'eau présente dans les boues mécaniquement déshydratées était de l'eau libre thermodynamiquement. Néanmoins, cette eau n'est pas disponible mécaniquement. La chaleur nette de désorption, c'est-à-dire la quantité d'énergie qu'il faut apporter en plus de la chaleur latente de vaporisation pour vaporiser l'eau, ne devient importante qu'en fin de séchage pour de très basses teneurs en eau (cf. Figure 54).

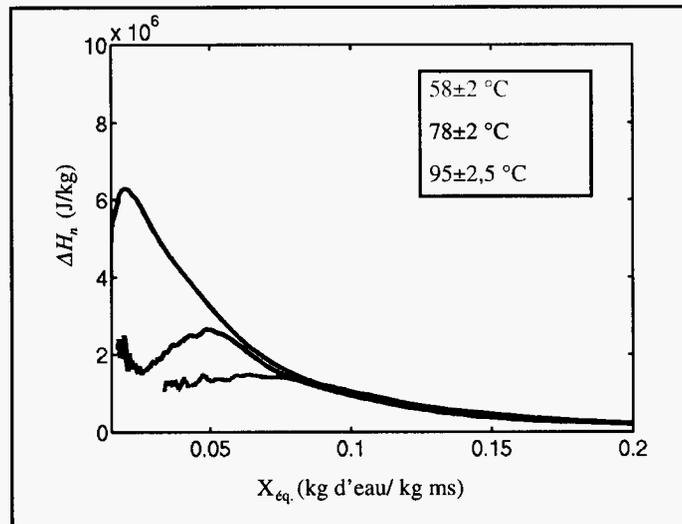


Figure 54 – Évolution de la chaleur nette de désorption en fonction de la teneur en eau de la boue (Expérience réalisée sur la boue de la ville d'Albi) [FER00].

Parallèlement à ce travail, un pilote de séchage conductif avec agitation a été construit pour comprendre le comportement de la boue dans ce procédé, déterminer les cinétiques de séchage, mesurer les coefficients d'échange à la paroi et le couple développé par le moteur pour maintenir une vitesse d'agitation constante. Ce pilote a permis de mettre en évidence que, durant le séchage, la boue passe d'un état fluide caractérisé par des coefficients d'échange élevés, à un état collant donnant des coefficients d'échange à la paroi médiocres et enfin à un état granulaire. Les valeurs mesurées pour les coefficients d'échange sont en accord avec celles rapportées par [YAM85]. Une étude paramétrique, en fonction de la température, a permis de montrer que, en termes de conduite de procédé, il serait intéressant d'ajuster la valeur de la température de paroi (cf. Figure 55) en fonction de la teneur en eau pour raccourcir la durée de la phase collante, qui est à la fois la plus longue (ce qui ne se voit pas sur les cinétiques) et la plus défavorable au séchage.

Du point de vue mécanique, la transition entre l'état collant et l'état granulaire se matérialise par une forte augmentation du couple associé au dispositif d'agitation (cf. Figure 9). L'intensité du pic varie fortement en fonction de la nature de la boue séchée et de l'agitateur utilisé. Dans l'état actuel de nos connaissances, il devient donc nécessaire de s'intéresser au comportement rhéologique de la boue en développant une méthode de mesure des lois de comportement de la boue (viscosité, module de perte et de rigidité dynamique) à diverses teneurs en eau et températures, puisque très peu de travaux ont

été consacrés à la caractérisation du comportement rhéologique de produits pâteux et hétérogènes.

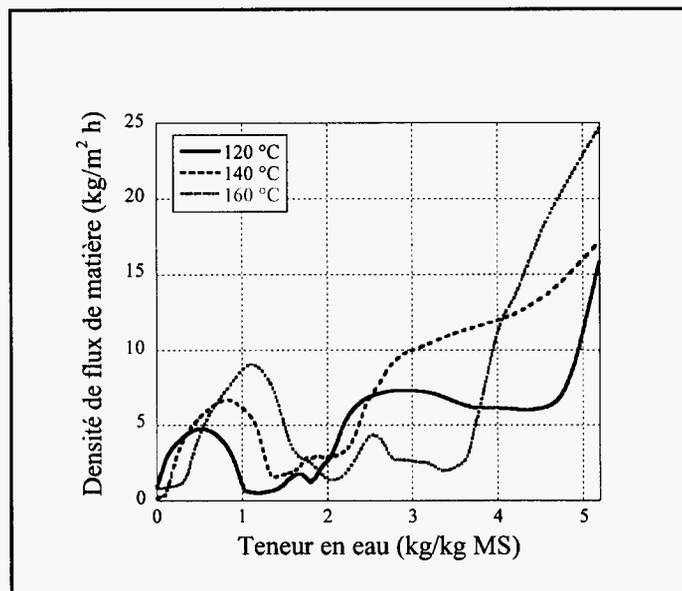


Figure 55 – Cinétiques de séchage pour différentes températures de paroi [FER00]

Enfin, une des nouvelles actions entreprises en relation directe avec le séchage des boues concerne la caractérisation des effluents gazeux, potentiellement polluants, émis lors d'un traitement thermique. Un couplage entre une thermobalance et un analyseur infrarouge à transformée de Fourier permet d'acquérir les spectres infrarouges des composés gazeux en fonction de la température appliquée. La difficulté rencontrée concerne l'identification des composés, en effet, les bibliothèques de spectres sont quasiment inopérantes puisque plusieurs espèces sont désorbées simultanément, ce qui complique l'interprétation. L'Analyse en Composantes Principales est une méthode de description et d'interprétation des données, qui offre une aide précieuse comme l'indiquent les résultats préliminaires ([DUP00]). Ce travail de caractérisation des buées émises se fait en collaboration avec le Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman de Villeneuve d'Asq.

### **III. Les recherches en cours sur les procédés dits "hybrides" appliqués aux boues**

Les autres recherches en cours sur les procédés de séparation liquide/solide appliquées aux boues résiduaires concernent toutes l'intégration de techniques de séchage dans un matériel de séparation mécanique. On retrouve dans la littérature plusieurs termes pour exprimer cette idée : on parle de déshydratation à haute température, de séchage impulsif ou encore de filtration thermiquement assistée. Même si les mécanismes physiques impliqués sont encore mal connus (modifications de la viscosité, de la tension superficielle, de la perméabilité, surpression due à l'ébullition ...), un apport thermique favorise la séparation solide/liquide. Au niveau procédé, l'association dans une même opération du séchage et de la déshydratation présente de nombreux avantages : réduction des coûts d'investissement, gain de place (un seul appareil au lieu de deux), gain de quelques points de siccité, consommation énergétique réduite...

Historiquement, deux équipes allemandes ont publié sur ce sujet vers le milieu des années 90 mais il semblerait qu'il n'y ait pas eu de suite probante à ces travaux. L'équipe la plus avancée à ce jour est américaine, il s'agit de l'Institut Scientifique et Technique du Papier. Le séchage impulsif étant largement répandu dans l'industrie papetière, cette équipe a, dès la fin 1996, démontré le potentiel de ce procédé pour la déshydratation des boues résiduaires. Depuis maintenant deux ans, deux équipes françaises s'intéressent à ce sujet : il s'agit du Laboratoire Énergétique et Phénomènes de Transferts à Bordeaux et le Centre Énergétique et Environnement de l'École des Mines d'Albi Carmaux. Dans la suite de ce paragraphe, nous allons revenir sur les différents travaux réalisés.

#### **III.1 Travaux réalisés par l'Université de Karlsruhe**

Sous l'impulsion de E.U. Schlünder, plusieurs approches concernant la déshydratation assistée thermiquement ont été développées dans ce laboratoire. Aucune des études réalisées n'a été appliquée à des boues résiduaires. Néanmoins, l'une d'elles est succinctement présentée dans la suite de ce rapport, puisqu'elle constitue, à notre sens, l'un des travaux de base dans le domaine.

Les premiers travaux ont concerné le couplage entre le séchage et la déshydratation sur filtre à bandes [LIN95]. L'idée directrice de ce travail était de gagner quelques points de siccité lors de la déshydratation mécanique du papier, en l'assistant thermiquement, avant de passer à l'étape de séchage.

Pour réaliser cette étude, un dispositif simple de laboratoire a été conçu (cf. Figure 56). La cinétique de la déshydratation sur filtre à bandes peut se décomposer en quatre phases distinctes, ce dispositif permet de les reproduire. La boue, placée sur l'enclume, est sollicitée mécaniquement par le marteau et, sous l'effet de la pression, une partie de l'eau libre qu'elle contient est éliminée. La paroi du marteau peut être chauffée électriquement.

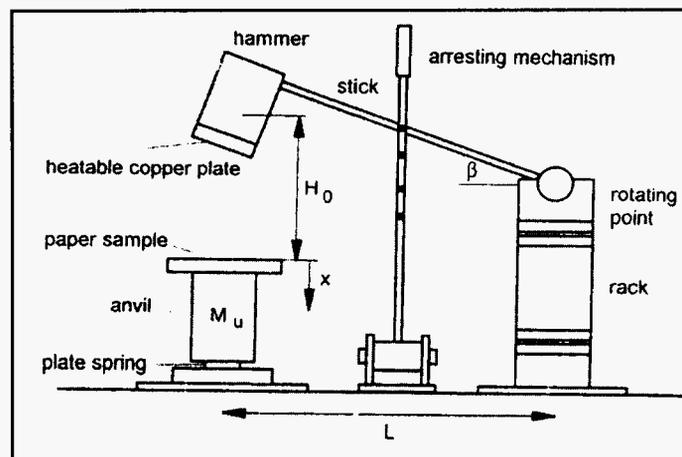


Figure 56 - Schéma du principe du dispositif expérimental conçu pour modéliser un procédé de déshydratation sur filtre à bandes [LIN95]

Une partie des expérimentations réalisées a concerné l'étude du couplage, le reste de l'étude s'est concentrée sur l'optimisation du procédé, avec en particulier un travail sur le choix du filtre inséré entre la boue et l'enclume. Les résultats ont montré pour deux filtres différents, comme l'indique la Figure 57, qu'une température élevée favorise la déshydratation.

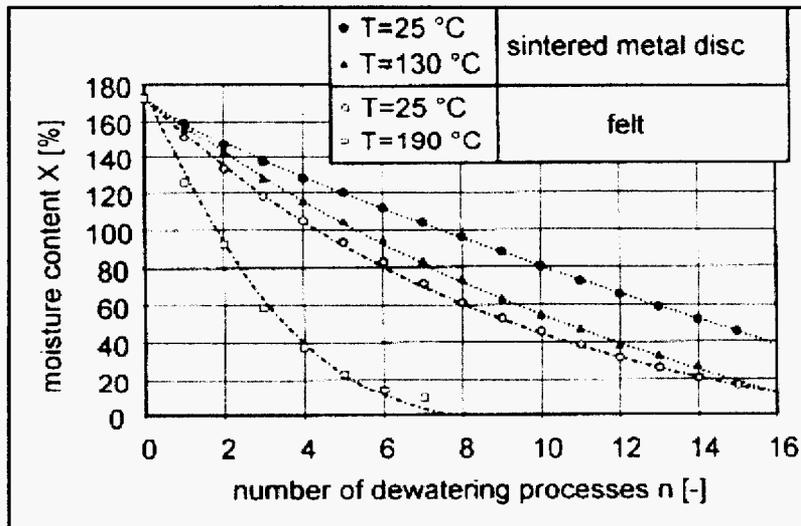


Figure 57 - Influence du nombre de cycles de déshydratation sur la teneur en eau du produit pour différentes températures de la plaque de cuivre et pour différents filtres [LIN95]

Même si les mécanismes physiques favorisant la déshydratation restent encore obscurs (diminution de la viscosité de l'eau sous l'effet de la température, ébullition de l'eau créant une surpression...), cette étude constitue la base des travaux qui ont été publiés par la suite.

### III.2 Travaux réalisés par l'Université de Dortmund

Le procédé développé initialement pour la déshydratation de matières d'origine végétale, tels que la lignite et la tourbe, permettrait, selon les auteurs, la déshydratation des boues et des matières « en vrac » humides. Néanmoins, seuls les résultats obtenus sur la lignite et sur des boues de galvanisation ont, à notre connaissance, été publiés [BER98].

Le principe de ce procédé fonctionnant en batch est le suivant :

- ✓ préchauffage du produit à sécher à l'aide de l'eau « chaude » issue du test précédent ;
- ✓ injection de vapeur saturée pour élever la température ;
- ✓ déshydratation par application d'une pression d'environ 60 bars et récupération de l'eau « chaude » dans un réservoir (pour le test suivant) ;
- ✓ réduction brutale de la pression, ce qui produit une brusque évaporation au sein du matériau à sécher. La surpression ainsi générée favorise la formation de fractures

dans le matériau, ce qui diminue l'énergie nécessaire, par la suite, pour le broyage du produit.

L'humidité finale atteinte est de l'ordre de 10 à 30 % quel que soit le matériau testé à l'échelle du laboratoire. Outre la diminution de la teneur en eau du produit, l'augmentation de la température permet de réduire la durée de la phase de déshydratation. Par exemple, à 25 °C, il faut vingt minutes pour obtenir une boue de teneur en eau de 25%, alors qu'à 200 °C, une teneur en eau de 17% est obtenue après seulement une minute de déshydratation mécanique.

D'après les auteurs, une économie d'énergie de l'ordre de 70 % est réalisée avec ce procédé par rapport aux séchoirs traditionnels.

### III.3 Travaux en cours à l'Institut Scientifique et Technique du Papier

Les recherches les plus abouties à ce jour sont assurément celles de l'Institut Scientifique et Technique du Papier à Atlanta aux États-Unis. Des travaux fondamentaux sur l'ébullition dans un milieu fibreux ont été initiés dès 1991 en relation avec la compréhension des mécanismes physiques intervenant lors du séchage impulsif du papier. Mais, c'est en 1998 que cette équipe ([BAN98]) a mis en évidence, à l'échelle du laboratoire, le potentiel de ce procédé pour le séchage des boues résiduelles. Des gains de 20 % de siccité ont été obtenus sur des boues de papeterie et de 10 % sur des boues urbaines.

Le schéma de la maquette de laboratoire utilisée lors de ces expérimentations est présenté sur la Figure 58. La partie supérieure de cette presse hydraulique peut être chauffée, jusqu'à des températures de l'ordre de 350 °C. La pression et le temps de pressage sont réglables.

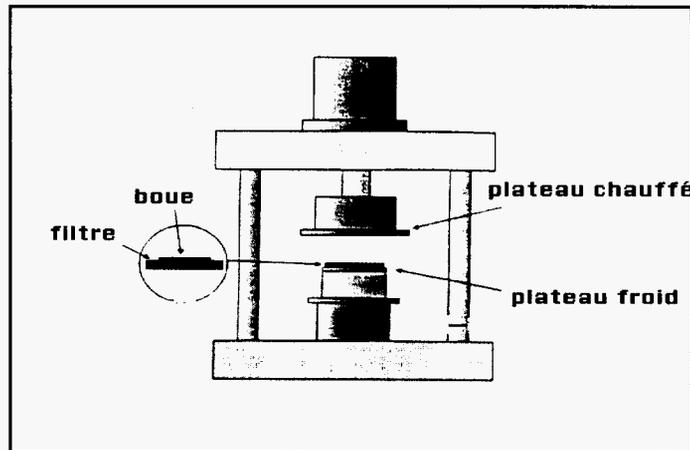


Figure 58 – Schéma de principe de la maquette de laboratoire de séchage impulsif [BAN98]

Outre le gain de siccité par rapport à une déshydratation à température ambiante (cf. Figure 59), ces premiers travaux ont montré que plus la boue a une teneur en eau initiale faible, moins le gain de siccité par séchage impulsif est important. Ainsi, le procédé sera d'autant plus efficace que l'eau sera disponible près de la surface chaude.

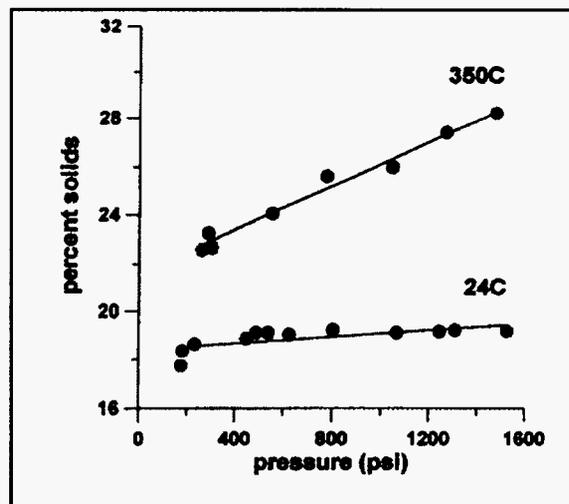


Figure 59 – Évolution de la siccité d'une boue urbaine activée en fonction de la pression appliquée pour deux températures différentes [BAN98]

Ces travaux à l'échelle du laboratoire ont été poursuivis, ce qui a permis le développement d'un prototype industriel fonctionnant en continu [MAH98]. Ce prototype a déjà été présenté sur la photographie de gauche de la Figure 22. Il s'apparente à un filtre à bandes, dans lequel le rouleau en contact avec le produit à déshydrater est chauffé par induction jusqu'à des températures de l'ordre de 300 °C. Ce

niveau de température est imposé par des phénomènes de collage, qui apparaissent lorsque la température de paroi est inférieure à 200 °C. Le temps de séjour de la boue au contact de la presse est de l'ordre de 500 à 3000 millisecondes et la pression appliquée comprise entre 17 et 97 bars.

Les gains de siccité mis en évidence sur la maquette de laboratoire ont été retrouvés, voire même dépassés, sur ce prototype industriel. Un bilan énergétique a permis d'estimer que seulement 5 % de l'eau éliminée lors de cette opération unitaire l'est sous forme vapeur, le reste (soit 95 %) est éliminé en phase liquide. Ainsi, la consommation énergétique de ce procédé pour déshydrater une boue de siccité initiale de 30 % jusqu'à une siccité de 53 % a été estimée à 60 kWh par tonne de matière sèche.

Les récents travaux publiés sur ce procédé ([MAH99]) concernent l'effet de la présence de polymères sur les performances du procédé. Il semble que la déshydratation est d'autant plus efficace que la concentration en polymère est basse. Mais ce résultat doit être confirmé ou infirmé puisque, lors des expérimentations, l'épaisseur du gâteau de boue n'était pas constante.

Les travaux sur l'optimisation de ce prototype industriel se poursuivent, mais la gamme d'application est encore difficilement évaluable : sur 25 boues testées, la technologie s'applique à 90 % des boues. La viabilité du procédé a été confirmée : sa consommation énergétique est de l'ordre de 2700 kJ par kilogramme d'eau évaporée.

#### III.4 Travaux en cours au niveau français

Suite aux travaux précédents, deux équipes françaises ont entrepris des recherches dans le domaine de la déshydratation thermiquement assistée.

Au début de l'année 1999, un stage de DEA ([DAV99]) réalisé au Centre Énergétique Environnement de l'École des Mines d'Albi Carmaux a permis de retrouver les tendances observées par nos collègues américains. Les expériences, réalisées sur des boues de papeteries avec le dispositif expérimental présenté sur la Figure 60, ont permis

d'obtenir des siccités élevées voisines de 80% en fin de manipulation selon le niveau de température utilisé.

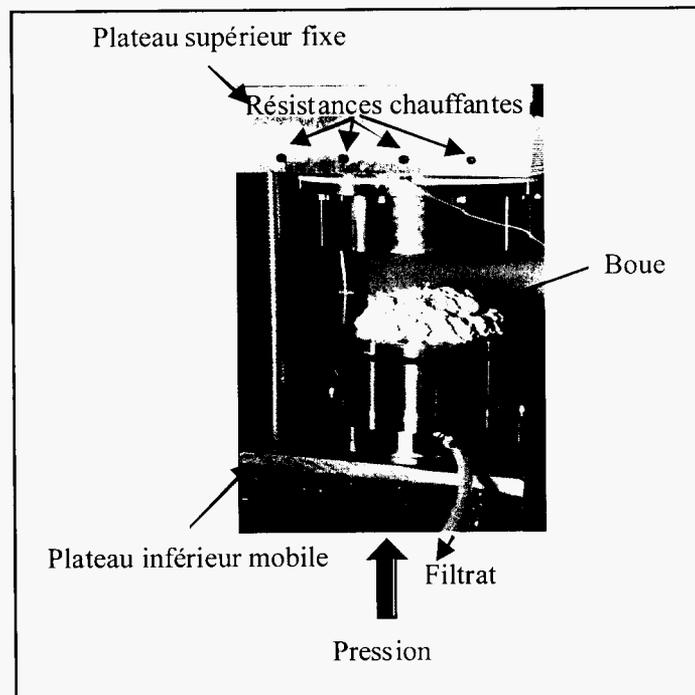


Figure 60 – Dispositif expérimental utilisé à l'École des Mines d'Albi Carmaux [DAV99]

L'apport du séchage par rapport à la déshydratation à température ambiante a été nettement mis en évidence : un gain de 16 % en siccité est obtenu en moyenne, comme le montre la Figure 61.

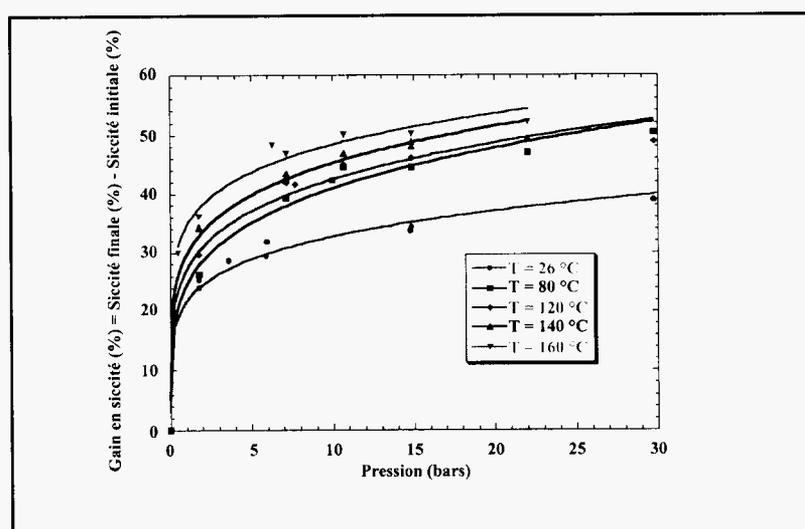


Figure 61 – Gain de siccité en fonction de la pression appliquée et de la température de chauffe [DAV99]

La même année, une thèse a démarré au Laboratoire Énergétique et Phénomènes de Transferts à Bordeaux sur l'étude de la filtration thermiquement assistée. Ce projet de recherche vise à améliorer la compréhension des phénomènes liés aux techniques de séparation liquide/solide, en particulier lorsqu'une étape de séchage est intégrée dans un procédé de séparation mécanique. Pour étudier les mécanismes qui contribuent à améliorer la filtration, une cellule de filtration semblable à celles conçues dans les laboratoires partenaires du LEPT, comme le Laboratoire de Génie des Procédés de Pau, déjà cité, ou encore à l'Institut Français des Techniques Séparatives à Agen, doit être développée. En parallèle à cette étude expérimentale, une modélisation de la filtration/compression assistée thermiquement doit être proposée dans le cadre de cette thèse. A ce jour et à notre connaissance, aucun résultat n'a encore été publié dans la littérature.

#### **IV. Conclusion**

Cet état de l'art sur les recherches en cours dans le domaine du séchage des boues a permis de constater que très peu d'équipes ont osé s'attaquer à ce problème. Le séchage des boues est un sujet complexe puisqu'en plus de toutes les difficultés inhérentes à l'opération de séchage, la boue reste un produit mal connu. Nous avons déjà signalé les particularités de ce produit par rapport aux produits généralement séchés dans l'industrie : leur nature variable, l'inhomogénéité, les variations ponctuelles d'humidité, les odeurs nauséabondes, un comportement rhéologique complexe... Ainsi, parallèlement à la connaissance du procédé et à son optimisation lors de son application aux boues résiduaires, il est nécessaire de caractériser le produit. Cette démarche est classique en génie des procédés, mais, là encore, force est de constater que très peu de méthodes classiques de caractérisation s'appliquent pour ce produit complexe et, qui plus est, évolutif dans le temps. En conséquence, les chercheurs sont dans l'obligation de développer de nouvelles méthodes de caractérisation adaptées à ce produit ou d'adapter les techniques classiques aux particularités de ce produit.

A ce jour, un travail colossal reste à faire pour proposer une typologie des boues en vue du séchage. Les travaux actuels restent très appliqués. En particulier, une grande partie

des travaux publiés concernent la détermination des cinétiques de séchage dans un certain nombre de procédés et l'étude de l'influence des conditions opératoires sur ces cinétiques. En fonction des besoins, des travaux de caractérisation sont entrepris pour aider à la compréhension des mécanismes intervenant lors du séchage de la boue dans un procédé donné. Il est probable que ces travaux vont conduire à moyen terme à la détermination des paramètres pertinents pour le séchage dans le procédé étudié. Mais réaliser une typologie des boues en vue du séchage, sur le modèle de celle qui existe pour la déshydratation mécanique, reste, en l'état de nos connaissances, un challenge ambitieux.

Enfin, parallèlement à ces travaux sur l'optimisation de procédés existants, un second axe de recherche a vu le jour. Il concerne l'intégration de techniques de séchage dans un matériel de séparation mécanique comme les filtres à bandes ou les filtres presse. On retrouve dans la littérature plusieurs termes pour exprimer cette idée : on parle de déshydratation à haute température, de séchage impulsif ou encore de filtration thermiquement assistée. Le principe repose sur le chauffage de la boue simultanément à la déshydratation mécanique. Pour des raisons encore mal connues, la séparation liquide/solide est favorisée. Dans la plupart des recherches en cours sur ces procédés hybrides, la paroi métallique est portée à une température très élevée, ce qui induit probablement un phénomène de vaporisation de l'eau dans la boue située à proximité de cet élément. Mais une petite partie seulement de cette eau est éliminée sous forme de vapeur, le reste est extrait sous forme liquide, ce qui réduit considérablement la consommation énergétique. Ce type de procédé pourrait être utilisé dans la filière de traitement des boues résiduaires à la place des procédés classiques de déshydratation mécanique (filtres presses, filtres à bandes...) et permettrait de gagner quelques points de siccité et d'éviter ainsi une étape de séchage poussé pour la plupart des filières de valorisation, qui nécessite souvent un investissement en matériel considérable en plus du coût de fonctionnement.

Enfin, pour terminer cette partie consacrée aux recherches en cours, il faut constater que la démarche actuellement adoptée par rapport à ce produit particulier, et notamment en France, va à l'encontre de ce qui se fait généralement en séchage. En effet, le Professeur J. Andrieu constatait en ce début d'année, dans l'éditorial de l'AFSIA, que les

contributions scientifiques françaises au dernier congrès international de séchage, qui s'est tenu à la fin du mois d'août dernier, concernaient principalement des recherches fondamentales plutôt que des communications de type R&D sur l'étude et l'optimisation des équipements. Pour le domaine des boues résiduaires, l'état de l'art révèle une situation totalement inverse. Ce constat est probablement à relier au contexte historique : le séchage des boues a été par le passé et reste encore majoritairement un problème de transfert de technologies existantes dans le domaine de l'agroalimentaire et de la chimie. Néanmoins, on s'aperçoit que l'adaptation de technologies existantes ne se fait pas si simplement, ce qui a conduit certains constructeurs à se retirer du marché comme nous l'avons vu au chapitre 2. Ainsi, il paraît nécessaire de revenir à une démarche plus traditionnelle et d'engager des recherches plus fondamentales sur les propriétés de la boue et la compréhension des mécanismes physiques qui interviendront lors du séchage de la boue. Ce constat a par ailleurs déjà été réalisé dès 1996 par une équipe japonaise et une réflexion dans ce sens est proposée dans [KAS96].

## CONCLUSIONS

Cette étude avait comme premier objectif de réaliser un inventaire des différentes technologies disponibles sur le marché pour sécher les boues résiduares, qu'elles soient urbaines ou industrielles, et d'estimer les performances de ces séchoirs. Le second objectif était de réaliser un état de l'art des recherches en cours dans le domaine du séchage des boues, cette synthèse bibliographique pouvant mettre en évidence le développement de nouvelles solutions spécialement développées pour les boues résiduares ou au contraire mettre en évidence les verrous scientifiques et les manques à combler.

La première particularité du séchage des boues résiduares est liée au fait que la boue ait juridiquement un statut de déchet. Devant une production inévitable et en augmentation constante, il est nécessaire de trouver des solutions pour réduire les volumes mais aussi pour valoriser ce déchet. Le séchage est une opération qui permet de réduire de façon considérable le volume de la boue mais aussi de préserver l'ensemble des possibilités d'élimination dans les principales filières actuelles. Néanmoins, le paradoxe repose dans le fait d'appliquer une technique coûteuse et technologiquement assez sophistiquée à un déchet. C'est pourquoi, dans le premier chapitre de ce rapport, nous nous sommes attachés à mettre en évidence l'intérêt d'une étape de séchage thermique dans la filière de traitement de la boue.

La législation relative à l'élimination des boues constitue un paysage complexe, puisqu'elle se situe à l'intersection de plusieurs domaines, comme la protection de la santé publique, de l'environnement, des sols agricoles et l'assainissement domestique, avec au cœur du débat le citoyen et de multiples acteurs. Cette législation devient de plus en plus sévère, comme l'a montré un examen des différents textes en vigueur dans le premier chapitre de ce rapport. La forte évolution constatée ces dernières années traduit les négligences du passé en matière d'environnement et le besoin actuel de regagner la confiance du public. Dans ce contexte, le séchage de la boue présente un certain nombre d'avantages, il permet :

- ✓ comme nous l'avons déjà souligné, de réduire de façon conséquente le volume de la boue ;
- ✓ la plupart du temps, d'hygiéniser la boue grâce à des températures élevées et des temps de séjour suffisamment longs, (la stabilisation étant systématiquement réalisée) ;
- ✓ d'atteindre les minima légaux en vue d'une mise en décharge par exemple ou des minima techniques avant une incinération ;
- ✓ d'une part, de conserver les propriétés fertilisantes de la boue et, d'autre part, d'améliorer l'acceptabilité du produit par le grand public, puisque l'aspect physique d'une boue granulée et sèche est équivalent à celui des fertilisants utilisés par le monde agricole

Ainsi, le séchage se positionne comme un procédé intermédiaire commun à l'ensemble des filières. Néanmoins, il présente un certain nombre de contraintes, qu'il est important de garder à l'esprit. Technologiquement, cette opération reste difficile à réaliser :

- ✓ des problèmes de sécurité (incendies, explosions) peuvent apparaître dans la conduite de l'installation ;
- ✓ la qualité du produit final (aspect et/ou consistance) reste encore difficilement maîtrisable, ce point étant primordial pour la manutention ultérieure de la boue ;
- ✓ les installations doivent être robustes et surtout doivent pouvoir s'adapter à de brusques modifications de la composition de la boue ou de sa structure ;
- ✓ enfin, le coût de cette opération doit rester modéré. En particulier, un minimum de main d'œuvre doit être nécessaire pour faire fonctionner l'installation. Il faut aussi penser à toutes les possibilités de récupération de l'énergie (utilisation de biogaz ...)

Devant les incertitudes qui pèsent sur les filières aval, le séchage thermique, qu'il soit partiel (entre 30 et 45 % de siccité), poussé (de 60 à 90 % de siccité) ou total (au-delà de 90 % de siccité), doit pouvoir trouver définitivement sa place dans la chaîne de traitement de la boue. La question, qui se pose ensuite, concerne le choix du procédé le mieux adapté pour sécher la boue. Cette question, loin d'avoir une réponse évidente, puisqu'il n'existe pas de classification disponible permettant de prédire son comportement dans un procédé donné, a guidé nos réflexions dans les deux derniers chapitres de ce rapport.

Le second chapitre est consacré à l'inventaire des technologies de séchoirs disponibles sur le marché. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés uniquement aux différents séchoirs commercialisés. Néanmoins, il convient de garder à l'esprit que le séchoir ne constitue pas le seul élément d'un poste de déshydratation thermique : en particulier, selon la technologie retenue, le dispositif de traitement des buées peut représenter une opération primordiale.

Pour réaliser cet inventaire, nous avons sollicité les constructeurs par l'intermédiaire d'un questionnaire puis d'entretiens téléphoniques. Nous avons ainsi pu recueillir un certain nombre d'informations sur les procédés et leurs fonctionnements ainsi que sur les installations existantes.

Pour présenter l'ensemble des résultats obtenus, une classification technologique habituellement utilisée par la profession a été introduite. Nous avons ainsi distingué :

- ✓ les séchoirs directs, pour lesquels l'agent séchant est directement en contact avec le produit à sécher ;
- ✓ les séchoirs indirects, pour lesquels il n'y a aucun contact direct entre l'agent séchant et le produit à sécher (l'apport de chaleur se faisant par l'intermédiaire d'une paroi) ;
- ✓ et les séchoirs mixtes, dans lesquels on retrouve les deux modes de transferts de chaleur.

Pour chaque catégorie identifiée de séchoirs, nous avons présenté les différents procédés disponibles sur le marché en soulignant les différences fondamentales entre ces séchoirs. Nous avons aussi essayé de recenser le nombre de références pour les différents fabricants. Enfin, nous avons tenté de les "comparer" sur la base du temps de séjour de la boue dans le séchoir et de leur consommation énergétique.

Jusqu'à un passé récent, le séchage de boues a été un problème de transfert de technologies existantes, appliquées dans le domaine de l'agroalimentaire ou de la chimie. Ceci explique que l'on retrouve la plupart des procédés classiques de séchage. Parmi les problèmes les plus fréquemment rencontrés, on retrouve les problèmes de collage, qui apparaissent dans les procédés indirects avec agitation du type séchoirs à disques ou à palettes, mais aussi dans les séchoirs convectifs du type lit fluidisé. Ces problèmes de

collage sont à associer aux problèmes d'abrasion qui peuvent apparaître lorsque la boue ou des pièces métalliques sont en mouvement. Devant ces problèmes technologiques et devant la difficulté de conquérir une place sur le marché des boues urbaines, l'offre disponible s'est considérablement réduite au cours de ces deux dernières années (par exemple, la technologie des séchoirs à lit fluidisé est presque abandonnée dans son application aux boues résiduaire) et une grande partie des constructeurs restants s'attaquent de façon préférentielle au marché des boues industrielles.

Nous avons identifié quatre classes principales de séchoirs indirects : les séchoirs à disques, à palettes, à couche mince et à tambour. Il semble que les séchoirs à disques aient encore le plus de références, loin devant les séchoirs à palettes et à couche mince. Le nombre de références pour les séchoirs à tambour avec chauffage indirect est plus réduit même s'il semble rencontrer ces derniers temps un succès croissant, probablement dû à une conception beaucoup plus simple que les autres séchoirs indirects. Une classification sur la base d'une consommation spécifique ne permet pas d'introduire une hiérarchie au niveau des différents procédés disponibles. En effet, quelle que soit la technologie retenue, les séchoirs ont une consommation spécifique proche, de l'ordre de 0.88 kWh/kg d'eau évaporée. Nous avons aussi introduit deux autres critères : le temps de séjour et la capacité évaporatoire spécifique. Ceci a permis de mettre en évidence l'intérêt des séchoirs à couche mince qui présentent des capacités évaporatoires spécifiques élevées avec des temps de séjour extrêmement courts. Néanmoins, ces courtes durées de séchage peuvent poser des problèmes au niveau de l'hygiénisation de la boue. Les séchoirs à disques et à palettes ont des performances relativement proches, avec cependant un léger avantage aux séchoirs à palettes qui présentent des capacités évaporatoires légèrement plus grandes et une consommation spécifique plus faible. Pour les séchoirs à tambour à chauffage indirect, il est difficile de conclure : peu de données étaient disponibles pour cette étude. A leur avantage, signalons des temps de séjour relativement faibles, de l'ordre de trente minutes, et des consommations spécifiques raisonnables surtout en absence de recirculation du produit sec.

Parmi les séchoirs directs, nous avons introduit quatre catégories de procédés : les séchoirs à tambour directs, les séchoirs à bandes, les séchoirs à transport pneumatique et les autres types de séchoirs, catégorie regroupant les procédés batch, les installations de

séchage solaire... Les séchoirs à tambour directs présentent de façon très nette le plus grand nombre de références, loin devant les séchoirs à bandes. Nous n'avons obtenu que peu d'informations concernant les consommations spécifiques des séchoirs directs (une par catégories de séchoirs). Néanmoins, il semble que la consommation moyenne des séchoirs fonctionnant en continu soit un peu plus élevée que celles des séchoirs indirects, de l'ordre de 1.1 kWh/kg d'eau évaporée. Pour les procédés batch, nous avons obtenu des consommations beaucoup plus faibles puisque ces procédés réalisent un séchage partiel de la boue et qu'une récupération d'énergie est proposée de manière systématique. D'une manière générale, les temps de séjours moyens dans un séchoir direct sont beaucoup plus courts que dans le cas des procédés indirects. C'est pourquoi ces installations sont généralement utilisées pour sécher de gros tonnages.

Enfin, concernant les procédés mixtes, nous n'avons pu identifier qu'un petit nombre de technologies disponibles sur le marché avec un nombre réduit de réalisations. Ceci ne nous a pas permis de proposer une comparaison significative.

La troisième et dernière partie de ce travail concerne les recherches en cours dans le domaine du séchage des boues résiduaires. Après avoir identifié les équipes de recherche, nous avons proposé un état de l'art des travaux publiés dans la littérature. Signalons que ceci ne reflète que partiellement la réalité des recherches menées, et qu'une grande partie des recherches académiques co-financées par des industriels reste confidentielle. La première conclusion de cette partie est liée au nombre restreint d'équipes travaillant dans cette thématique (8).

Les travaux de recherche restent très appliqués. Comme nous l'avons signalé, le séchage des boues a longtemps été perçu comme un transfert de technologie : c'est pourquoi la majorité des travaux actuels se concentrent sur la détermination des cinétiques de séchage dans un procédé donné et sur l'étude de l'influence des conditions opératoires. En fonction des circonstances, des travaux de caractérisation des propriétés de la boue ont été entrepris. Mais, les méthodes classiques étant généralement pas adaptées à ce type de produits, il est souvent nécessaire de développer de nouvelles méthodes de mesures, avant de caractériser le produit.

Au fur et à mesure, on s'aperçoit que l'adaptation de technologies existantes ne se fait pas si simplement, ce qui a conduit certains constructeurs à se retirer du marché, comme nous l'avons vu au chapitre 2. Ainsi, il paraît nécessaire de revenir à une démarche plus traditionnelle et d'engager des recherches plus fondamentales sur les propriétés de la boue et la compréhension des mécanismes physiques qui interviendront lors du séchage de la boue. Réaliser une typologie des boues en vue du procédé de séchage, sur le modèle de celle qui existe pour la déshydratation mécanique, reste, en l'état de nos connaissances, un challenge ambitieux.

Parallèlement à ces travaux sur l'optimisation des procédés, d'autres actions de recherche concernent l'intégration de techniques de séchage dans un matériel de séparation mécanique. Pour des raisons encore mal connues, la séparation liquide/solide est favorisée lorsque la déshydratation est thermiquement assistée. Ce type de procédé permettrait de gagner quelques points de siccité et d'éviter ainsi une étape de séchage poussé, qui n'est pas toujours utile.

Enfin, il faut enfin noter qu'aucune des recherches actuelles ne concerne le séchage bas niveau comme le séchage solaire, qui peut présenter beaucoup d'intérêt lorsque l'on dispose de temps et d'espace, ou le séchage convectif à des températures modérées.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [ADE98] **ADEME**, 1998, "Connaissance et maîtrise des aspects sanitaires d'épandage des boues d'épuration des collectivités locales", FNDAE, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 74 pages.
- [AFN99] **AFNOR** , 1999, "La filière des boues, Normes et réglementation", Référence X33NR.
- [AGE99] **Agences de l'eau**, 1999, "Audit environnemental et économique des filières d'élimination des boues d'épuration urbaines", Les études des Agences de l'Eau, n°70.
- [AMA99] **Amazouz M., Benali M. et Kudra T.**, 1999, "Séchage des boues industrielles dans un lit à jet rapide", IV<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois, Montréal, 25-27 Mai, pp. 107 – 110.
- [AMA00] **Amazouz M., Benali M.**, 2000, "Thermal processing of meat rendering sludge in a jet spouted bed of inert particles : effect of additives", Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Drying Symposium, Elsevier Science, Amsterdam, paper n°418.
- [APE00] **Apesa**, 2000, "Valoriser les boues", Conférence « Les Boues - Quels enjeux ? Quelles solutions ? », 23-24 Février, Pau, pp. 26-27.
- [BAL57] **Ball C.O. et Olson F.C.W.**, 1957, "Sterilization in food technology", Mac Graw-Hill Book Co., New York.
- [BAN98] **Banerjee S., Mahmood T., Phelan P.M., et Foulke R.W.**, 1998, "Impulse drying sludge", Wat. Res., Vol. 32, n°1, pp. 258-260.

- [BAU88] **Baüerle H.G., Obers H., Wischniewski M.**, 1988, "Contact drying of municipal sewage sludge", *Aufbereitungs-Technik*, n°5, pp. 243-251.
- [BEC99] **Beckley J. et Banerjee S.**, 1999, "Operational issues with impulse drying sludge", *Wat. Sci. Tech*, Vol. 40, n°11-12, pp. 163 - 168.
- [BER95] **Berail J.F., Gottlieb N et Valerio P.**, 1995, "Le séchage en vapeur d'eau surchauffée avec compression mécanique de vapeur : essais de séchage de boues sur une plate-forme mobile", *Récents progrès en génie des procédés, "Boues industrielles : traitement et valorisation"*, Vol. 9.
- [BER98] **Bergins Ch., Berger S. et Strauß K.**, 1998, "Process technology for mechanical/thermal dewatering", *Aufbereitungs-Technik*, Vol. 39, n°2, pp. 58 - 70.
- [BIG20] **Bigelow W.D. et Esty J.R.**, 1920, "The thermal death point in relation to time of typical thermophilic organisms", *J. Insect. Dis.*, Vol. 27, pp. 602 - 617.
- [BIN98] **Binot P.**, 1998, "Incidence des filières d'épandage, de co-incinération et d'incinération sur le prix de l'eau", *Conférence « Les boues de stations d'épuration biologiques »*, Pollutec 98, Lyon.
- [BOE99] **Boeglin J.C.**, 1999, "Traitement et destinations finales des boues résiduaire", *Techniques de l'ingénieur*, J 3 944, *Traité Génie des Procédés*.
- [BON98] **Bongiovanni J.M.**, 1998, "Traitement des boues résiduaire par l'association en série d'une déshydratation mécanique et d'un séchage thermique", *Thèse de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour*.
- [BRU99] **Brun-Mayer M.J.**, 1999, "Tannery Sludge : ways for drying and increasing value", *Industrie du cuir*, n°1, pp 48 - 50.

- [CAR99] **Carrère Gée C.**, 1999, "Étude du séchage indirect d'une fine couche de boue d'hydroxyde d'aluminium en ébullition – Application au cylindre sécheur", Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse III.
- [CHA98a] **Chassande C.**, 1998, "La nouvelle réglementation relative à l'épandage des boues de stations d'épuration urbaines en agriculture", Conférence « Les boues de stations d'épuration biologiques », Pollutec 98, Lyon.
- [CHA98b] **Chantepy N.**, 1998, "Enjeux de la gestion des boues d'épuration urbaines et politique des agences de l'eau", Conférence « Les boues de stations d'épuration biologiques », Pollutec 98, Lyon.
- [CHE97] **Chen G.W., Hung W.T., Chang I.L., Lee S.F. et Lee D.J.**, 1997, "Continuous classification of moisture content in waste activated sludges", Journal of Environmental Engineering, Vol. 123, pp 253-258.
- [COU99] **Coutouly C.**, 1999, "Etude de l'influence de teneur en eau sur la conductivité thermique de la boue d'hydroxyde d'aluminium", Rapport de maîtrise, Université Paul Sabatier de Toulouse 3.
- [DAV99] **David C.**, 1999, "Étude d'un procédé couplant déshydratation mécanique et séchage par contact, appliqué à des boues de papeterie", DEA Energétique et Transferts, Université Paul Sabatier de Toulouse 3.
- [DEG89] **Degrémont**, 1989, "Mémento technique de l'eau", Ed. Lavoisier, 9<sup>ème</sup> édition, Tome 1, pp 121-123.
- [DIT97] **Dittler A., Bamberger T., Gehrman D. et Schlünder E.U.**, 1997, "Measurement and simulation of the vacuum contact drying of pastes in a LIST-type kneader drier", Chemical Engineering and Processing, Vol. 36, pp. 301-308.

- [DUP00] **Dupuy N. et Ferrasse J.H.**, 2000, "Analysis of municipal sludge by coupled TGA-FTIR. Chemometrics analysis of infrared spectra and aid to the interpretation of kinetics", CAC 2000, Anvers, 16-20 octobre.
- [FAU00] **Faures G.**, 2000, "Règlementation", Conférence « Les Boues - Quels enjeux ? Quelles solutions ? », 23-24 Février, Pau.
- [FER00] **Ferrasse J.H.**, 2000, "Développements d'outils expérimentaux pour le dimensionnement de procédés de séchage conductif avec agitation : Application à des boues de stations d'épuration urbaines", Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse III.
- [GUY00] **Guyard C.**, 2000, "Boues industrielles, réduire les volumes produits", L'Eau, l'industrie, les nuisances, n°225, pp 37-42.
- [HOF96] **Hofmockel J.**, 1996, "Séchage par contact de boues d'épuration", Rapport de stage, Ecole des Mines d'Albi Carmaux et de Saint Etienne.
- [IFT95] **Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives**, 1995, "Déshydratation des boues résiduelles industrielles et urbaines – Synthèse et perspectives".
- [KAS96] **Kasakura Y.**, 1996, "R&D needs – Drying of sludges", Drying Technology, Vol. 14, n°6, pp 1389-1401.
- [LEE95] **Lee D.J. et Hsu Y.H.**, 1995, "Measurement of bound water in sludges : a comparative study", Water Envir. Res., Vol. 67, pp 310-317.
- [LEO00] **Léonard A. et Crine M.**, 2000, "Relation between convective drying kinetics and shrinkage of wastewater treatment sludges", Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Drying Symposium, Elsevier Science, Amsterdam, paper n°131.

- [LES98] **Lesoille M.**, 1998, "Le séchage thermique : quelle place dans les filières boues", L'eau, l'industrie, les nuisances, n°180, pp 38-40.
- [LIN95] **Link K., Wettermann M. et Schlünder E.U.**, 1995, "Improvement of thermal and mechanical dewatering of paper in a hot press nip simulator", Chemical Engineering and Processing, Vol 34, pp. 213-218.
- [LOW95] **Lowe P.**, 1995, "Developments in the thermal drying of sewage sludge", J. CIWEM, n°9, pp 306-316.
- [MAD00] **Madoui L.**, 2000, "Boues : quelles alternatives à la valorisation agricole ?", Décision Environnement, n°85, pp 42-45.
- [MAH98] **Mahmood T., Zawadzki M. et Banerjee S.**, 1998, "Pilot study of impulse drying industrial sludge", Environ. Sci. Technol., Vol. 32, pp. 1813 – 1816.
- [MAH99] **Mahmood T., Foulke R.W. et Banerjee S.**, 1999, "Effect of initial solids and polymer dosage on the efficiency of impulse drying sludge", Tappi, n°1, pp. 419 – 423.
- [MAR86] **Marchand A., Coquelet G., Vignoles C. et Bouchala Y.**, 1986, "Le séchage thermique des boues urbaines et de brasseries dans les nouvelles installations de traitement de la station d'épuration du District Urbain de Nancy", TSM-L'eau, n°12, pp 607-618.
- [MAR91] **Marchand A., De Ciaves E. et Pozzoli B.**, 1991, "Bilan du séchage thermique des boues – Station d'épuration du District Urbain de Nancy", TSM, pp 597-604.
- [MAR96] **Marchildon L., Svonja G. et Brousseau J.M.**, 1996, "The ring dryer : a new approach to waste reduction", Pulp&Paper Canada, 97:6, pp 75-78.

- [MOL90] **Möller U.**, 1990, "Klärschlammbehandlung – verwertung und Entsorgung auf weiter gesteigertm Niveau unte Einsatz von Klärschlamm-trocknung", *Abwassertechnik, Abfalltechnik&Recycling*, 41, pp 16-22.
- [NAD00] **Nadeau I.**, 2000, "Comment traiter les boues industrielles", *L'environnement magazine*, n°1586, pp 32-36.
- [OTV97] **OTV**, 1997, "Traiter et valoriser les boues", Collection OTV
- [PEI97] **Peignen-Séraline P.**, 1997, "Comment venir à bout des boues? ", *L'environnement magazine*, n°1556, pp 45 –52.
- [POI99] **Poirier M.G. et Kudra T.**, 1999, "Séchoir à lit fluidisé pulsé : fonctionnement et applications", IV<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois, Montréal, 25-27 Mai, pp. 77 – 80.
- [RES98] **Ressent S.**, 1998, "Etat de l'art sur le séchage thermique des boues urbaines et industrielles", Editeur ADEME.
- [RIB00] **Ribeyron J.**, 2000, "Les boues d'usinage – Filières de valorisation et d'élimination", Conférence « Les Boues - Quels enjeux ? Quelles solutions ? », 23-24 Février, Pau.
- [ROB92] **Robinson J. et Knocke W.R.**, 1992, "Use of dilatometric and drying techniques for assessing dewatering characteristics", *Water Envir. Res.*, Vol. 64, pp 60-68.
- [ROU99] **Roussel P. et Chassande C.**, 1999, "La nouvelle réglementation relative à l'épandage des boues de stations d'épuration urbaines en agriculture", *TSM*, n°5, pp 14-17.

- [SAS99] **Sasse H., Karl U., Lonjaret J.P., Zundel T. et Rentz O.**, 1999, "Analyse comparative des filières d'oxydation des boues de stations d'épuration urbaines", *Déchets*, n°13, pp 10-14.
- [STE97] **Stemmelen D.**, 1997, "Techniques disponibles pour réduire le volume des boues", *Les entretiens du SITS'97*.
- [TSA90] **Tsang K.R. et Velisind P.A.**, 1990, "Moisture distribution in sludges", *Water Science and Technology*, Vol. 22, n°12, pp 135-142.
- [VAX00] **Vaxelaire J., Bongiovanni J.M., Mousques P. et Puiggali J.R.**, 2000, "Thermal drying of residual sludge", *Wat. Res.*, Vol. 34, n°17, pp. 4318-4323.
- [YAM85] **Yamahata Y. et Izawa H.**, 1985, "Experimental study on application of paddle dryers for sludge cake drying", *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Drying Symposium, IDS'84, Kyoto*, pp. 719-724.
- [WIA96] **Wiert J. et Peuchot C.**, 1996, "Séchage et incinération des boues urbaines et industrielles", *Energie Plus*, supplément au n°172.

## **ANNEXE 1 : Liste des figures**

- Figure 1 - Répartition de l'eau dans une boue [TSA90].
- Figure 2 - Répartition des filières d'élimination des boues urbaines dans les régions Franche Comté, Rhône Alpes et Provence Alpes Côte d'Azur (source : Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse).
- Figure 3 - Comparaison des bases indicielles correspondant aux systèmes homogènes définis pour les stations de capacités 50 000 E.H.
- Figure 4 - Comparaison des bases indicielles correspondant aux systèmes homogènes définis pour les stations de capacités 300 000 E.H.
- Figure 5 - Réduction de masse au cours du traitement des boues.
- Figure 6 - Installation de séchage des boues (source : Maguin).
- Figure 7 - Séchage direct et séchage indirect.
- Figure 8 - Évolution du couple du dispositif d'agitation au cours du séchage indirect avec agitation d'une boue urbaine [FER00].
- Figure 9 - Séchage des boues et phase plastique.
- Figure 10 - Classification des séchoirs indirects pour les boues résiduaire avec les principaux constructeurs.
- Figure 11 - Exemples de séchoirs à disques.
- Figure 12 - Design particulier de disques.
- Figure 13 - Rotor du séchoir System Umag (KHD Humboldt Wedag).
- Figure 14 - Dispositif d'avancement du produit dans le séchoir Discofluid (Procalex)
- Figure 15 - Différents séchoirs à palettes.
- Figure 16 - Design des palettes.
- Figure 17 - Deux exemples de séchoirs à couche mince.
- Figure 18 - Séchoir à couche mince commercialisé par Duprat.
- Figure 19 - Exemples de séchoirs à tambour rotatif.
- Figure 20 - Vues de l'intérieur de séchoirs à tambour rotatif.
- Figure 21 - Photographie du procédé Bertrams.
- Figure 22 - Schéma de principe du procédé développé par l'Institut Technique et Scientifique du Papier à Atlanta (à gauche) et photographie du prototype construit par Ashbrook Corporation (à droite).

Figure 23 - Séchoir multi étages à plateaux horizontaux (Seghers).

Figure 24 - Séchoir sous vide commercialisé par la société Lödige.

Figure 25 - Séchoir radiatif commercialisé par la société Hytec.

Figure 26 - Consommation spécifique pour différentes classes de séchoirs indirects.

Figure 27 - Classification des séchoirs directs pour les boues résiduaire avec les principaux constructeurs

Figure 28 - Deux exemples d'unités de séchage utilisant des tambours rotatifs directs.

Figure 29 - Détail du cylindre à triple passage utilisé dans le procédé DDS (Andritz)

Figure 30 - Aspect de la boue après mise en forme (doc. Mabarex).

Figure 31 - Détail des bandes transporteuses utilisées dans le procédé commercialisé par STC

Figure 32 - Exemples de séchoirs à bandes.

Figure 33 - Procédé CDS commercialisé par la société Andritz.

Figure 34 - Schéma de principe d'une installation de séchage flash (source : Neu Industrie).

Figure 35 - Installations de séchage solaire pour les boues résiduaire.

Figure 36 - Procédés de séchage convectif batch.

Figure 37 - Procédé Centridry commercialisé par Degremont.

Figure 38 - Classification des séchoirs mixtes pour les boues résiduaire avec les principaux constructeurs.

Figure 39 - Photographie du procédé commercialisé par Va Tech Wabag.

Figure 40 - Principe du procédé Turbofluid commercialisé par Comessa.

Figure 41 - Procédé Turbo-sécheur commercialisé par Alpha-Vomm.

Figure 42 - Coût moyen par poste pour les séchoirs indirects.

Figure 43 - Coût moyen par poste pour les séchoirs directs.

Figure 44 - Liste des laboratoires de recherche travaillant sur les procédés de séchage des boues résiduaire.

Figure 45 - Évolution de la densité de flux de matière transférée lors du séchage de boues synthétiques en fonction de la teneur en eau pour différentes pressions appliquées lors de l'étape de déshydratation [BON98].

Figure 46 - Évolution de la densité de flux de matière transférée lors du séchage de boues activées en fonction de la teneur en eau [BON98].

Figure 47 - Schéma du pilote de séchage convectif fonctionnant en batch [LEO00].

Figure 48 - Évolution du ratio « volume de boue/volume initial » en fonction de la teneur en eau (à gauche) et cinétique de séchage (à droite) lors d'une expérience de séchage avec de l'air à 130°C s'écoulant à une vitesse de 1.5 m/s [LEO00].

Figure 49 - Montage expérimental du séchoir à lit à jet rapide [AMA99].

Figure 50 - Microstructures observées [AMA00] sur de la boue d'abattoirs avec (à gauche) et sans (à droite) addition de  $\text{CaCO}_3$ .

Figure 51 - Schéma du séchoir à lit fluidisé pulsé [POI99].

Figure 52 - Évolution de la résistance thermique entre la paroi métallique et une boue d'hydroxyde d'aluminium en fonction de la teneur en eau pour différentes températures initiales et une épaisseur de boue supérieure à 1 mm [CAR99].

Figure 53 - Influence de la température de régulation sur les cinétiques de séchage de la boue d'hydroxydes d'aluminium [CAR99].

Figure 54 - Évolution de la chaleur nette de désorption en fonction de la teneur en eau de la boue [FER00].

Figure 55 - Cinétiques de séchage pour différentes températures de paroi [FER00].

Figure 56 - Schéma de principe du dispositif expérimental conçu pour modéliser un procédé de déshydratation sur filtre à bandes [LIN95].

Figure 57 - Influence du nombre de cycles de déshydratation sur la teneur en eau du produit pour différentes températures de la plaque de cuivre et pour différents filtre [LIN95].

Figure 58 - Schéma de principe de la maquette de laboratoire de séchage impulsif [BAN98].

Figure 59 - Évolution de la siccité d'une boue urbaine activée en fonction de la pression appliquée pour deux températures différentes [BAN98].

Figure 60 - Dispositif expérimental utilisé à l'École des Mines d'Albi Carmaux [DAV99].

Figure 61 - Gain de siccité en fonction de la pression appliquée et de la température de chauffe [DAV99].

## ANNEXE 2 : Liste des tableaux

- Tableau 1 – État physique de la boue résiduaire en fonction de la siccité [IFT95].
- Tableau 2 – Définition des différentes classes associées aux boues urbaines [OTV97].
- Tableau 3 – La traitabilité des différentes classes de boues urbaines [OTV97].
- Tableau 4 – Répartition par bassin hydrographique de la production de boues urbaines et des filières d'élimination.
- Tableau 5 – Production de boues industrielles (hors industries de traitement de surfaces) et filières d'élimination en 1997 dans le bassin Rhin Meuse (source : Agence de l'eau).
- Tableau 6 – Production de boues industrielles) et filières d'élimination en 1998 dans le bassin Adour Garonne (source : Agence de l'eau Adour Garonne).
- Tableau 7 – Production de boues par secteurs industriels [GUY00].
- Tableau 8 – Déchets boueux à caractère « toxique » produits par secteur industriel [NAD00], source ADEME Mai 1994.
- Tableau 9 – Concentrations et flux cumulés en éléments traces dans les boues résiduaires urbaines (source : arrêté du 8/1/98, [FAU00]).
- Tableau 10 – Concentrations et flux cumulés en composés organiques dans les boues résiduaires urbaines (source : arrêté du 8/1/98, [FAU00]).
- Tableau 11 – Concentrations maximales et flux maxima en éléments traces métalliques apportés par les boues sur 10 ans dans les pâturages et sols de pH<6 (source : arrêté du 8/1/98).
- Tableau 12 – Coût en F/tMS des différentes filières d'élimination des boues biologiques en fonction de la taille de la station d'épuration [BIN98].
- Tableau 13 – Systèmes homogènes retenus pour l'analyse économique par [AGE99].
- Tableau 14 – Comparaison des coûts de l'incinération spécifique par rapport au coût de l'épandage de boues chaulées pour une station de capacité 300 000 E.H.
- Tableau 15 – Comparaison du coût de la co-incinération et de la mise en décharge par rapport au coût de l'épandage de boues chaulées pour une STEP de capacité 50 000 E.H.
- Tableau 16 – Valeurs limites pour l'admission dans les installations de stockage de déchets dangereux.
- Tableau 17 – Ordre de grandeur des énergies nécessaires pour séparer l'eau de la boue au cours des différentes étapes du traitement [MOL90].

Tableau 18 – Nombre de références dans le domaine des boues pour les différents constructeurs de séchoirs à disques.

Tableau 19 – Caractéristiques moyennes des séchoirs à disques.

Tableau 20 – Nombre de références dans le domaine des boues pour les différents constructeurs de séchoirs à palettes.

Tableau 21 – Caractéristiques moyennes des séchoirs à palettes.

Tableau 22 – Nombre de références pour les séchoirs à couche mince.

Tableau 23 – Caractéristiques moyennes des séchoirs à couche mince de type DAS.

Tableau 24 – Nombre de références pour les séchoirs à tambour avec chauffage indirect.

Tableau 25 – Caractéristiques moyennes des séchoirs indirects à tambour.

Tableau 26 – Ordre de grandeur du temps de séjour moyen pour les quatre classes de séchoirs indirects.

Tableau 27 – Consommations spécifiques par constructeurs rapportées par [RES98].

Tableau 28 – Ordre de grandeur des consommations spécifiques des différents séchoirs indirects obtenues lors de cette étude.

Tableau 29 – Ordre de grandeur de la consommation spécifique pour les quatre classes de séchoirs indirects.

Tableau 30 – Ordre de grandeur de la capacité évaporatoire spécifique pour les quatre classes de séchoirs indirects.

Tableau 31 – Nombre de références pour les séchoirs à tambour avec chauffage direct.

Tableau 32 – Nombre de références pour les séchoirs à bandes.

Tableau 33 – Nombre de références pour les séchoirs à lit fluidisé et les séchoirs flash.

Tableau 34 – Nombre de références pour les séchoirs solaires.

Tableau 35 – Nombre de références pour les séchoirs convectifs batch.

Tableau 36 – Nombre de références pour le procédé Centridry.

Tableau 37 – Ordre de grandeur des temps de séjour moyens dans les séchoirs directs.

Tableau 38 – Ordre de grandeur des consommations spécifiques obtenues lors de cette étude pour les différents types de séchoirs directs.

Tableau 39 – Ordre de grandeur des consommations spécifiques obtenues par S. Ressent [RES98] pour différents types de séchoirs directs.

Tableau 40 – Consommation spécifique pour le procédé Turbo-sécheur.

Tableau 41- Comparatif des principaux avantages et inconvénients des séchoirs directs et indirects.

### **ANNEXE 3 : Liste des personnes contactées pour la production de boues**

#### Agence de l'eau Adour Garonne

- ✓ Boues industrielles : Mr Scharffe 05 61 36 37 68
- ✓ Boues urbaines : Mr Lassalle 05 61 36 37 38

#### Agence de l'eau Artois Picardie

- ✓ Boues urbaines et industrielles : Mr Perdrix 03 27 99 90 00

#### Agence de l'eau Loire Bretagne

- ✓ Boues industrielles : Mr Morabito 02 38 51 74 71
- ✓ Boues urbaines : Mr Senelier 02 38 51 74 84

#### Agence de l'eau Rhin Meuse

- ✓ Boues urbaines et industrielles : Mr Flutsch 03 87 34 47 57

#### Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse

- ✓ Boues industrielles : Mr Clape 04 72 71 28 22
- ✓ Boues urbaines : Mme Bour 04 72 71 26 00

#### Agence de l'eau Seine Normandie

- ✓ Boues urbaines et industrielles : Mr Borges 01 41 20 16 00

#### ANNEXE 4 : Liste des principaux constructeurs de séchoirs

Société	Coordonnées téléphoniques	Contact
Alpha Vomm Schloß Straße 15 CH – 2560 Nidau Schweiz	Tél : 41 32 331 5454 Fax : 41 32 331 2337	
AMEcoIndustries 275 rue André Boulle 30318 Ales cedex	Tél : 04 66 54 22 90 Fax : 04 66 30 58 14	M <sup>r</sup> Gomez Responsable commercial
Andritz 12 Av Claude Guillemin 45071 Orléans	Tél : 02 38 51 57 38 Fax : 02 38 63 15 65	M <sup>r</sup> J.J. Pillet Directeur Ventes et Marketing
Ashbrook Corp. 11600 East Hardy Houston TX 77093		M <sup>r</sup> J. Beckley
Atlas Industries AS Baltorpvej 160 DK-2750 Ballerup	Tél : 45 44 89 02 00 Fax : 45 44 89 04 00	
Barr Rosin 92 Prevost Blvd Boisbriand (Quebec) Canada, J7G 2S2	Tél : 450 437 5252 Fax : 450 437 6740	
Bertrams Eptingerstraße 41 CH – 4132 Muttenz	Tél : 41 61 467 5353 Fax : 41 61 467 5300	
Buss SMS - GmbH Holenraistraße 10 CH – 4133 Pratteln	Tél : 41 61 82 56 869 Fax : 41 61 82 56 766	M <sup>r</sup> Bolaños

CQVB Edifice Le Delta II 2875, Blvd. Laurier Bureau 620 Sainte Foy (Québec) Canada G1V 2M2	Tél : 418 657 3853 Fax : 418657 7934	
Comessa 101 rue du Rhin Napoléon 67100 Strasbourg	Tél : 03 88 79 41 41 Fax : 03 88 79 02 04	M <sup>r</sup> D. Martinez Ingénieur d'affaires
Duprat 20 Avenue d'Aubières ZI – BP 153 63804 Courmon cedex	Tél : 04 73 69 92 40 Fax : 04 73 84 69 24	M <sup>r</sup> Touron
Eliho Zum Mühlengraben 16-18 Postfach 10 05 53 D – 52305 Düren	Tél : 49 2421 69020 Fax : 49 2421 62979	
Eirich Walldürner Straße 50 D – 74736 Hardheim	Tél : 49 6283 51 380 Fax : 49 6283 51 400	Mr H.M. Dürr Directeur Technique Mr S. Gerl
Faure ZI de Magré - BP 52 21 rue Santos Dumont 87002 Limoges cedex	Tél : 05 55 30 12 60 Fax : 05 55 06 16 03	M <sup>r</sup> Castillon Président Directeur Général
Gea Ganzler GmbH & Co Postfach 10 03 53 Kölner Landstraße 332 D – 5160 Düren	Tél : 49 24 21 70 51 Fax : 49 24 21 70 52 80	

GMF Gouda BP 375 N - 2740 AJ Waddinxveen	Tél : 31 182 62 37 23 Fax : 31 182 61 92 17	
Commercialisé par : Degrémont 183 Avenue du 18 juin 1940 92508 Rueil Malmaison	Tél : 01 46 25 60 69 Fax : 01 46 25 68 51	M <sup>F</sup> B. Courtois Ingénieur Commercial
IstAnlagendau GmbH Ritterweg 1 D – 79400 Kaudern	Tél : 49 76 26 91 54 0 Fax : 49 76 26 91 54 30	
KHD Humboldt Wedag D – 51057 Köln	Tél : 49 2 21 822 65 30 Fax : 49 2 21 822 61 69	
Kvaerner Eureka S.A. PO Box 38 N – 3401 Lier	Tél : 473 285 90 00 Fax : 473 285 94 40	
List AG CH – 4422 Arisdorf	Tél : 41 61 811 30 00 Fax : 41 61 811 35 55	
Lödige Elsener Straße 7-9 D – 33050 Paderborn	Tél : 49 52 51 30 9 0 Fax : 49 52 51 30 9 123	
Mabarex 2021 Halpern Saint Laurent (Québec) Canada H4S 1S3	Tél : 514 334 67 21 Fax : 514 332 17 75	M <sup>F</sup> Louis Barré Président Directeur Général
Commercialisé par : EMO S.A. 40 rue de Bignon Z.I. Sud Est CS 37404 35574 Chantepie	Tél : 02 99 86 02 03 Fax : 02 99 86 02 04	M <sup>F</sup> Saulnier Directeur Commercial

Maguin S.A. 2 rue Pierre Sépard 02800 Charmes	Tél : 03 23 56 63 00 Fax : 03 23 56 63 15	M <sup>r</sup> B. Portales Directeur Technique
Mannesmann Demag AG Energie und Umwelttechnik Theodorstraße 90 D – 40472 Düsseldorf	Tél : 49 211 904 70 17	
Maurer Söhne Frankfurter Ring 193 D – 80807 München	Tél : 49 89 323 940 Fax : 49 89 323 94234	
MSE Am Eisengraben 3 D – 75196 Remchingen	Tél : 49 72 323 650 0	
NESA Rue du Bosquet 8 B – 1348 Louvain La Neuve	Tél : 32 10 45 18 82 Fax : 32 10 45 04 05	
Procalex 49 Avenue Hector Otto MC 98000 Monaco	Tél : 377 93 50 75 65 Fax : 377 93 50 71 58	
Promeca Z.I. 43700 Brives Charensac	Tél : 04 71 09 46 38 Fax : 04 71 05 53 34	M <sup>r</sup> Gaillard Directeur Technique
Seghers Hoofd 1 B – 2830 Willebroek	Tél : 32 03 880 77 00 Fax : 32 03 880 77 99	

<p>Sevar HardecktraÙe 3 D – 76185 Karlsruhe</p> <p>Commercialisé par : Recyclal 65A Boulevard des Alpes 38240 Meylan</p>	<p>Tél : 49 721 50 01 0 Fax : 49 721 50 01 368</p> <p>Tél : 04 76 18 24 31 Fax : 04 76 18 23 96</p>	<p>M<sup>r</sup> S. Sage Responsable commercial</p>
<p>SIL 17 rue Henri Estrier 56100 Lorient</p>	<p>Tél : 02 97 37 10 44 Fax : 02 97 37 34 43</p>	<p>M<sup>r</sup> J.L. Smets Directeur Général</p>
<p>Sommier BP 121 ZI La Sarretie 19104 Brive</p>	<p>Tél : 05 55 86 90 05 Fax : 05 55 86 05 83</p>	<p>M<sup>r</sup> B. Bretelle Chargé d'affaire</p>
<p>STC Avd Hermanos Bou s/n Apdo 1157 S - 12080 Castillon</p> <p>Commercialisé par : Agence Broker Noyau 50 Route de Labège 31400 Toulouse</p>	<p>Tél : 34 964 26 11 83 Fax : 34 964 26 01 57</p> <p>Tél : 05 62 16 28 22</p>	<p>M<sup>me</sup> D. Permuy Vila Ingénieur R&amp;D</p>
<p>Stord International S.A. PO Box 9 Sandslimarka 251 N – 5049 Sandsli</p>	<p>Tél : 47 55 22 36 00 Fax : 47 5522 36 01</p>	
<p>Swiss Combi W. Kunz AG CH – 5606 Dintikon</p>	<p>Tél : 41 57 26 11 81 Fax : 41 57 24 10 31</p>	

Vadeb Nijendal 30 NL – 3972 KC Driebergen	Tél : 31 343 53 09 30 Fax : 31 343 51 37 54	M <sup>r</sup> R.A. Ponsen
Va Tech Wabag Escher Wyss Straße 25 D – 88212 Ravensburg	Tél : 49 751 83 03 Fax : 49751 83 3033	Mr G. Bauer

## ANNEXE 5: Questionnaire envoyé pour la présente enquête

### 1 - FICHE SIGNALÉTIQUE

Nom du séchoir : .....

Nom du constructeur .....

Brevet déposé par : .....

Distributeur en France : .....

### 2 - REFERENCES

Nombres d'unités équipées avec ce procédé pour traiter les boues (précisez le lieu et le type de boues) :

en France : .....

autres : .....

Retour d'expérience (remarques concernant la conduite du séchoir et la sécurité) :

.....

.....

### 3 - LE SECHOIR :

➤ **Type de séchage** (cochez la case correspondante) :

Direct (convectif)

Indirect (conductif)

Mixte

➤ **Type de séchoir** (cochez la case correspondante) :

à tambour

à bande

à lit fluidisé

flash

- à disques
- à palettes
- à couche mince
- à plateaux
- à vis
- à faisceaux tubulaires
- radiant
- autres (précisez) : .....

**➤ Taille du séchoir :**

- Longueur : .....
- Largeur / diamètre : .....
- Volume : .....
- Surface d'échange : .....

Si le séchoir est équipé d'un dispositif d'agitation, précisez la vitesse d'agitation :

.....

**➤ Le séchage des boues :**

Débit de boues traitées (précisez l'unité) : .....

Débit de boues séchées (précisez l'unité) : .....

Siccité ou teneur en eau de la boue (précisez l'unité) :

en entrée : .....

en sortie : .....

Recyclage de la boue sèche en entrée :

non

oui

si oui, précisez le taux de recyclage : .....

Temps de séjour de la boue : .....

Température du produit en sortie : .....

Aspect de la boue en sortie du séchoir :

granulé

poudre

autre (précisez) : .....

**➤ Dispositifs supplémentaires :**

de mise en forme du produit sec :

non

oui

si oui, précisez s'il est intégré au séchoir ou en annexe (rayer la mention inutile), la taille de l'installation ..... et le type d'opération.....

de traitement des gaz :

non

oui

si oui, précisez s'il est intégré au séchoir ou en annexe (rayer la mention inutile)

la taille de l'installation .....

et le volume des gaz à traiter .....

autres dispositifs annexes (précisez) : .....

.....

.....

**➤ Coût de fonctionnement (précisez les unités):**

Capacité évaporatoire : .....

Energie volumique apportée à la boue : .....

Consommation thermique massique : .....

Puissance thermique consommée : .....

Puissance électrique consommée (expliquez la provenance) : .....

.....  
.....  
.....

Frais de main d'oeuvre lors du fonctionnement :

non

oui

Autres frais de fonctionnement (précisez) :

.....  
.....

**4 - DIVERS :**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

## **ANNEXE 6 : Base de données**

## **Séchoirs indirects**

Société	<b>Buss</b>	<b>Buss</b>
Séchoir	<b>DAS</b>	<b>DAS</b>
Type de séchoir	couche mince	couche mince
Source info	[MAR91]	[MAR91]
Lieu	Nancy	Nancy
Date de mise en service	1986	1987
Type de boues	urbaine	brasserie
Traitement	digérées	digérées
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	1343,0	1312,9
Siccité initiale des boues (%)	25,0	18,7
Débit de matière sèche (kg MS /h)	335,8	245,5
Siccité en sortie (%)	45,0	48,0
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	746,1	511,5
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	596,9	801,4
Taux de recyclage (%)	0,0	0,0
Temps de séjour (min)	3,0	3,0
Température des boues en sortie (°C)		
Volume (m <sup>3</sup> )		
Surface d'échange (m <sup>2</sup> )	24,0	20,0
Fluide caloporteur	vapeur	vapeur
Température fluide caloporteur (°C)	480,0	620,0
Débit fluide caloporteur (kg/h)		
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	2929,9	2804,3
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	0,81	0,78
Capacité évaporatoire spécifique (kg eau évaporée /m <sup>2</sup> h)	24,9	40,1
Surface d'échange spécifique (m <sup>-1</sup> )		

Société	Buss	Buss
Séchoir	Rovactor	Rovactor
Type de séchoir	disques	disques
Source info	[MAR91]	[MAR91]
Lieu	Nancy	Nancy
Date de mise en service	1986	1987
Type de boues	urbaine	brasserie
Traitement	digérées	digérées
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	746,1	511,5
Siccité initiale des boues (%)	45,0	48,0
Débit de matière sèche (kg MS /h)	335,8	245,5
Siccité en sortie (%)	97,0	98,0
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	346,1	250,5
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	400,0	261,0
Taux de recyclage (%)	0,0	0,0
Temps de séjour (min)	20,0	20,0
Température des boues en sortie (°C)		
Volume (m <sup>3</sup> )		
Surface d'échange (m <sup>2</sup> )	38,0	26,5
Fluide caloporteur	vapeur	vapeur
Température fluide caloporteur (°C)	305,0	211,0
Débit fluide caloporteur (kg/h)		
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	2762,4	2929,9
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	0,77	0,81
Capacité évaporatoire spécifique (kg eau évaporée/m <sup>2</sup> h)	10,5	9,8
Surface d'échange spécifique (m <sup>-1</sup> )		

Société	Degrémont (GMF Gouda)	Degrémont (GMF Gouda)	Degrémont (GMF Gouda)
Séchoir	Naratherm	Naratherm	Naratherm
Type de séchoir	palettes	palettes	palettes
Source info	constructeur	constructeur	constructeur
Lieu	Saint Briec	Lavelanet	SITPA
Date de mise en service	1995	1998	1998
Type de boues	urbain	textile	industrielle
Traitement	mixte digérées	Bio. flottées	biologiques
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	2500,0	620,0	850,0
Siccité initiale des boues (%)	20,0	21,0	15,0
Débit de matière sèche (kg MS /h)	500,0	130,2	127,5
Siccité en sortie (%)	90,0	95,0	65,0
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	555,6	137,1	196,2
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	1944,4	482,9	653,8
Taux de recyclage (%)	160,0		
Temps de séjour (min)	120,0	120,0	120,0
Température des boues en sortie (°C)	117,0		
Volume (m <sup>3</sup> )	52,9	9,5	9,5
Surface d'échange (m <sup>2</sup> )	120,0	32,2	32,2
Fluide caloporteur	vapeur	vapeur	vapeur
Température fluide caloporteur (°C)			
Débit du fluide caloporteur (kg/h)			
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	3132,0	3132,0	3132,0
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	0,87	0,87	0,87
Capacité évaporatoire spécifique (kg eau évaporée/m <sup>2</sup> h)	16,2	15,0	20,3
Surface d'échange spécifique (m <sup>-1</sup> )	2,3	3,4	3,4

Société	<b>Duprat</b>
Séchoir	
Type de séchoir	couche mince
Source info	[GUI99]
Lieu	BSAD(Guiscriff)
Date de mise en service	1995
Type de boues	agroalimentaire
Traitement	bio. activées
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	403,9
Siccité initiale des boues (%)	12,0
Débit de matière sèche (kg MS /h)	27,5
Siccité en sortie (%)	95,0
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	28,9
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	375,0
Taux de recyclage (%)	0,0
Temps de séjour (min)	
Température des boues en sortie (°C)	
Volume (m <sup>3</sup> )	
Surface d'échange (m <sup>2</sup> )	
Fluide caloporteur	vapeur
Température fluide caloporteur (°C)	150
Débit fluide caloporteur (kg/h)	
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	0,66
Capacité évaporatoire spécifique (kg eau évaporée/m <sup>2</sup> h)	
Surface d'échange spécifique (m <sup>-1</sup> )	

Société	<b>Hytec</b>
Séchoir	<b>JWI</b>
Type de séchoir	bandes
Source info	[STE97]
Lieu	non spécifié
Date de mise en service	
Type de boues	Hydrox. Métall.
Traitement	
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	125,0
Siccité initiale des boues (%)	32,0
Débit de matière sèche (kg MS /h)	40,0
Siccité en sortie (%)	73,8
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	54,2
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	70,8
Taux de recyclage (%)	0,0
Temps de séjour (min)	
Température des boues en sortie (°C)	
Volume (m <sup>3</sup> )	
Surface d'échange (m <sup>2</sup> )	
Fluide caloporteur	gaz de ville
Température fluide caloporteur (°C)	
Débit fluide caloporteur (kg/h)	
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	1,47
Capacité évaporatoire spécifique (kg eau évaporée/m <sup>2</sup> h)	
Surface d'échange spécifique (m <sup>-1</sup> )	

Société	<b>Lödige Mitchell</b>
Séchoir	
Type de séchoir	tambour ind.
Source info	constructeur
Lieu	Gent (B)
Date de mise en service	
Type de boues	urbain
Traitement	
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	8250,0
Siccité initiale des boues (%)	18,0
Débit de matière sèche (kg MS /h)	
Siccité en sortie (%)	90,0
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	1650,0
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	6600,0
Taux de recyclage (%)	
Temps de séjour (min)	
Température des boues en sortie (°C)	
Volume (m <sup>3</sup> )	
Surface d'échange (m <sup>2</sup> )	
Fluide caloporteur	vapeur
Température fluide caloporteur (°C)	180
Débit fluide caloporteur (kg/h)	
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	
Capacité évaporatoire spécifique (kg eau évaporée/m <sup>2</sup> h)	
Surface d'échange spécifique (m <sup>-1</sup> )	

Société	Maguin	Maguin	Maguin
Séchoir			
Type de séchoir	tambour ind.	tambour ind.	tambour ind.
Source info	constructeur	constructeur	constructeur
Lieu	Hem (59)	Vic/Aisne (02)	Roeselare(B)
Date de mise en service	1993	1996	1997
Type de boues	teinturerie	industrielle	urb/indust
Traitement			
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	2200,0	2250	5000
Siccité initiale des boues (%)	2,5	10	20
Débit de matière sèche (kg MS /h)	55,0	225,0	1000,0
Siccité en sortie (%)	97,5	89	95
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	56,4	252,8	1052,6
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	2143,6	1997,2	3947,4
Taux de recyclage (%)	450,0	200	250
Temps de séjour (min)		20	20
Température des boues en sortie (°C)	80	80	80
Volume (m <sup>3</sup> )			
Surface d'échange (m <sup>2</sup> )			
Fluide caloporteur	gaz naturel	gaz naturel	gaz naturel
Température fluide caloporteur (°C)	750,0	700	500
Débit fluide caloporteur (kg/h)			
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	3553,0	3553,0	3553,0
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	0,99	0,99	0,99
Capacité évaporatoire spécifique (kg eau évaporée/m <sup>2</sup> h)			
Surface d'échange spécifique (m <sup>-1</sup> )			

Société	<b>Procalex</b>
Séchoir	
Type de séchoir	disques
Source info	constructeur
Lieu	essais
Date de mise en service	2000
Type de boues	urbain
Traitement	brute et digérées
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	257,1
Siccité initiale des boues (%)	20,0
Débit de matière sèche (kg MS /h)	51,4
Siccité en sortie (%)	90,0
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	57,1
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	200,0
Taux de recyclage (%)	90 à 120
Temps de séjour (min)	90
Température des boues en sortie (°C)	115
Volume (m <sup>3</sup> )	
Surface d'échange (m <sup>2</sup> )	
Fluide caloporteur	huile
Température fluide caloporteur (°C)	180
Débit fluide caloporteur (kg/h)	
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	2900
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	0,81
Capacité évaporatoire spécifique (kg eau évaporée/m <sup>2</sup> h)	
Surface d'échange spécifique (m <sup>-1</sup> )	

Société	<b>Stord</b>	<b>Stord</b>
Séchoir	<b>Rotadisc</b>	<b>Rotadisc</b>
Type de séchoir	disques	disques
Source info	Vivendi	Vivendi
Lieu	Rennes	Munich
Date de mise en service	1997	
Type de boues	urbaines	urbaine
Traitement		
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	3650	9090
Siccité initiale des boues (%)	19	22
Débit de matière sèche (kg MS /h)	693,5	2000
Siccité en sortie (%)	90	95
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	1070	2105
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	2879,4	6985,6
Taux de recyclage (%)	90	170
Temps de séjour (min)		
Température des boues en sortie (°C)	107	
Volume (m <sup>3</sup> )		
Surface d'échange (m <sup>2</sup> )	405	550
Fluide caloporteur	vapeur	vapeur
Température fluide caloporteur (°C)	165	188
Débit fluide caloporteur (kg/h)	5160	9540
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	3712	2828,8
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	1,03	0,79
Capacité évaporatoire spécifique (kg eau évaporée/m <sup>2</sup> h)	7,1	12,7
Surface d'échange spécifique (m <sup>-1</sup> )		

## **Séchoirs directs**

Société	<b>Barr &amp; Rosin</b>
Séchoir	Ring Dryer
Type de séchoir	flash
Source info	[MAR96]
Lieu	
Date de mise en service	
Type de boues	désencrage
Traitement	
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	4480
Siccité initiale des boues (%)	50
Débit de matière sèche (kg MS /h)	2240
Siccité en sortie (%)	80
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	2800
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	1700
Taux de recyclage (%)	
Temps de séjour (min)	
Température des boues en sortie (°C)	
Fluide caloporteur	
Température entrée fluide caloporteur (°C)	540 à 650
Température sortie fluide caloporteur (°C)	71 à 82
Débit fluide caloporteur (kg/h)	13636
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	5400
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	1,50

Société	Degrémont	Degrémont	Degrémont	Degrémont
Séchoir	Centridry	Centridry	Centridry	Centridry
Type de séchoir	Convectif	Convectif	Convectif	Convectif
Source info	constructeur	constructeur	constructeur	constructeur
Lieu	Limoges	Sarrebourg	Megève	Coin de bar
Date de mise en service	2000	2000	1999	1997
Type de boues	Urbain + hydrocarbures	urbain	urbain	urbain
Traitement	biol. digérées	aération prolongée	physico+biol+hydrox	aérot prol+hydrox flot
Débit de boues en entrée (kg/h)	3069,2	857,7	846,7	1073,3
Siccité initiale des boues (%)	20,5	23,3	26,0	21,4
Débit de matière sèche (kg MS /h)	630,0	200,0	220,0	230,0
Siccité en sortie (%)	65,0	65,0	60,0	60,0
Débit de boues en sortie (kg/h)	969,2	307,7	366,7	383,3
Débit d'eau évaporée (kg/h)	2100,0	550,0	480,0	690,0
Taux de recyclage (%)	0,0	0,0	0,0	0,0
Temps de séjour (min)				
Température boues en sortie (°C)				
Fluide caloporteur	gaz	gaz	gaz	gaz
Température entrée fluide caloporteur (°C)	200,0	200,0	200,0	200,0
Débit fluide caloporteur (kg/h)				
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)				
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)				

Société	<b>Hytec</b>
Séchoir	JWI
Type de séchoir	batch + pompe à chaleur
Source info	[STE97]
Lieu	non spécifié
Date de mise en service	
Type de boues	hydrox métall
Traitement	
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	750,0
Siccité initiale des boues (%)	34,0
Débit de matière sèche (kg MS /h)	255,0
Siccité en sortie (%)	79,7
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	320,0
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	430,0
Taux de recyclage (%)	0,0
Temps de séjour (min)	
Température des boues en sortie (°C)	
Fluide caloporteur	air
Température entrée fluide caloporteur (°C)	40,0
Température sortie fluide caloporteur (°C)	
Débit fluide caloporteur (kg/h)	
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	2029,1
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	0,56

Société	Promeca	Promeca	Promeca
Séchoir			
Type de séchoir	tambour direct	tambour direct	tambour direct
Source info	constructeur	constructeur	constructeur
Lieu	Apt	Brives Charensou (43)	Sianges S/R (43)
Date de mise en service	1998	1995	1998
Type de boues	Ocres	Tanneries	Traitement des métaux
Traitement			
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	2000,0	150,0	412,0
Siccité initiale des boues (%)	50,0	25,0	24,5
Débit de matière sèche (kg MS /h)			
Siccité en sortie (%)	98,0	85,0	84,3
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	1020,0	44,0	119,4
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	980,0	106,0	292,6
Taux de recyclage (%)	0,0	0,0	0,0
Temps de séjour (min)	5 à 10 min	5 à 10 min	5 à 10 min
Température des boues en sortie (°C)			
Fluide caloporteur	air	air	air
Température entrée fluide caloporteur (°C)			100,0
Température sortie fluide caloporteur (°C)			
Débit fluide caloporteur (kg/h)			3490,0
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)			4158,0
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)			1,15

Société	<b>Sevar</b>
Séchoir	SevarEco+
Type de séchoir	à bandes
Source info	constructeur
Lieu	Weinheim
Date de mise en service	1991
Type de boues	urbain
Traitement	biol. digérées
Débit de boues en entrée (kg/h)	2200
Siccité initiale des boues (%)	22
Débit de matière sèche (kg MS /h)	485,0
Siccité en sortie (%)	85,0
Débit de boues en sortie (kg/h)	570
Débit d'eau évaporée (kg/h)	1630,0
Taux de recyclage (%)	0,0
Temps de séjour (min)	30 - 40
Température boues en sortie (°C)	
Fluide caloporteur	Gaz de digestion/fuel
Température entrée fluide caloporteur (°C)	
Débit fluide caloporteur (kg/h)	
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	3310
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	0,92

Société	Sommier
Séchoir	Harter
Type de séchoir	batch
Source info	constructeur
Lieu	SNECMA
Date de mise en service	
Type de boues	
Traitement	hydroxydes
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	900 kg sur 8h
Siccité initiale des boues (%)	35,0
Débit de matière sèche (kg MS /h)	315,0
Siccité en sortie (%)	70,0
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	450,0
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	450,0
Taux de recyclage (%)	0,0
Temps de séjour (min)	
Température des boues en sortie (°C)	< 50°C
Fluide caloporteur	air
Température entrée fluide caloporteur (°C)	55 °C
Température sortie fluide caloporteur (°C)	
Débit fluide caloporteur (kg/h)	
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	1440,0
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	0,40

Société	<b>Swiss Combi</b>
Séchoir	
Type de séchoir	tambour
Source info	Vivendi
Lieu	Quimper
Date de mise en service	1996
Type de boues	urbaine
Traitement	
Débit de boues humides en entrée (kg/h)	2200
Siccité initiale des boues (%)	24,5
Débit de matière sèche (kg MS /h)	539,0
Siccité en sortie (%)	98
Débit de boues humides en sortie (kg/h)	540
Débit d'eau évaporée (kg eau évaporée /h)	1650,0
Taux de recyclage (%)	>0
Temps de séjour (min)	45
Température des boues en sortie (°C)	90
Fluide caloporteur	
Température entrée fluide caloporteur (°C)	
Température sortie fluide caloporteur (°C)	
Débit fluide caloporteur (kg/h)	
Consommation thermique massique (kJ/kg eau évaporée)	
Consommation par capacité évaporatoire (kWh/kg eau évaporée)	

## ANNEXE 7 : Liste des équipes de recherche

Adresse	Contact
Département de Techniques des Processus Énergétiques et de Mécanique des Fluides Université de Dortmund	M <sup>r</sup> K. Strauß
École des Mines d'Albi Carmaux Centre Énergétique et Environnement Rte de Teillet 81013 Albi CT Cedex 09	M <sup>me</sup> P. Arlabosse
Institut für Thermische Verfahrenstechnik Universität Karlsruhe (TH) D – 76128 Karlsruhe	M <sup>r</sup> E.U. Schlünder
Institut of Paper Science&Technology 500 Tenth Street N.W. Atlanta, GA 30318	M <sup>r</sup> S. Banerjee
Laboratoire Énergétique et Phénomènes de Transferts Esplanade des arts et métiers 33405 Talence	M <sup>r</sup> J.R. Puiggali
Laboratoire de Génie Chimique Université de Liège - Bâtiment B6a Sart-Tilman 4000 Liège, Belgique	M <sup>elle</sup> A. Léonard Doctorante M <sup>r</sup> M. Crine
Laboratoire de Génie des Procédés de Pau ENSGTI Rue Jules Ferry 64000 Pau	M <sup>r</sup> J. Vaxelaire M <sup>r</sup> M. Roques
Laboratoire de Recherche en Diversification	M <sup>r</sup> M. Amazouz

Énergétique Ressources Naturelles – CANMET 1615, Bd Lionel Boulet CP 4800 Varennes (Québec) J3X 1S6	M <sup>r</sup> G. Poirier M <sup>r</sup> T. Kudra
--	--