



HAL
open science

ETUDES DES FILTRES A BANDES POUR LA DESHYDRATATION MECANIQUE DES BOUES RESIDUAIRES URBAINES

Jérémy Olivier

► **To cite this version:**

Jérémy Olivier. ETUDES DES FILTRES A BANDES POUR LA DESHYDRATATION MECANIQUE DES BOUES RESIDUAIRES URBAINES. Génie des procédés. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2003. Français. NNT: . tel-01294710

HAL Id: tel-01294710

<https://hal.science/tel-01294710>

Submitted on 29 Mar 2016

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

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

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR
ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES EXACTES ET DE LEURS APPLICATIONS

par

Jérémy OLIVIER

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

Spécialité :

ÉNERGÉTIQUE, TRANSFERT et SYSTÈMES DISPERSÉS

**ETUDES DES FILTRES A BANDES POUR LA DESHYDRATATION
MECANIQUE DES BOUES RESIDUAIRES URBAINES**

Soutenu le 24 septembre 2003

Devant la Commission d'examen formée de :

Monsieur J.R. PUIGGALI
Monsieur E. VOROBIEV

Professeur, Bordeaux I
Professeur, UTC Compiègne

Rapporteur
Rapporteur

Madame A. Premel
Monsieur F. Broto
Monsieur M. Roques
Monsieur J. Vaxelaire

Ingénieur E.M.O., Rennes
Professeur, LaTEP-ENSGTI, Pau
Professeur LaTEP-ENSGTI, Pau
Maître de Conférences, LaTEP-ENSGTI, Pau

Président
Directeur de Thèse

A Amélie, Cristelle et Marie

"L'univers baignait alors dans l'ignorance, et le savant le passait à la batée tel un prospecteur accroupi au-dessus d'une rivière de montagne, cherchant l'or de la connaissance parmi les graviers de la déraison, le sable de l'incertitude et les petits octopodes aquatiques poilus de la superstition."

Terry PRATCHETT, "Mécompte des fées" (traduction P. Couton)

Ce travail n'aurait pu aboutir sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes. Je tiens à remercier :

Michel ROQUES pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et pour avoir dirigé cette thèse.

Jean VAXELAIRE, co-directeur de cette thèse. Jean, il m'est difficile d'évaluer avec si peu de recul tout ce que tu m'as enseigné, mais je sais déjà que ton savoir être et ton savoir faire resteront pour moi des références. Encore merci pour ces trois années, en espérant de nouveau pouvoir travailler avec toi.

Christian HEMARD, Président Directeur Général de la Société EMO pour le financement de cette thèse et pour m'avoir permis de réaliser ce travail dans de très bonnes conditions.

Anne PREMEL, ingénieur de projets - chimiste chez EMO, pour le suivi continu de cette étude. Son aide, ses conseils avisés et ses connaissances m'ont été d'un grand secours.

Jean-Rodolphe PUIGGALI et Eugène VOROBIEV pour le temps qu'ils ont passé à examiner ce travail et pour leur observations pertinentes et constructives.

Fernand BROTO pour avoir présidé le jury de ma thèse.

Je remercie également l'ensemble du personnel de EMO et plus particulièrement Thierry MENAGER, responsable achats, bureau d'études, production et R&D.

C'est avec plaisir que je me remémore tous ces moments passés en compagnie des membres de l'ENSGTI. Merci à Jean-Marc LEGROS-ADRIAN qui a joué un rôle crucial dans la conception des pilotes de laboratoire et merci à François CONTAMINE pour ses encouragements.

Un petit clin d'œil à tout mon entourage et principalement à toi, Jean-Michel, pour toutes les valeurs que tu m'as transmises. Celles-ci m'ont permis de réaliser ce vieux souhait d'enfance et de conclure, aujourd'hui, idéalement ma vie d'étudiant. Eternelle reconnaissance.

Une pensée pour Serge, ardent partisan de la cause anti-scientifique qui a bien voulu relire cette étude pour en chasser les erreurs de frappes (ou d'orthographe ?). Peut-être qu'ainsi la lecture de ce manuscrit aura fait germer le doute dans ton esprit.

Une dernière pensée pour mon père, parti beaucoup trop tôt...

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	15
<hr/>	
I. CADRE GENERAL	17
<hr/>	
I.1. CONTEXTE GENERAL	19
I.1.1. Origine des boues activées urbaines	19
<i>I.1.1.1. Procédés d'assainissement des eaux urbaines</i>	19
<i>I.1.1.2. La filière de traitement des boues</i>	22
<i>I.1.1.3. Composition des boues</i>	24
I.1.2. Principales filières d'élimination des boues de stations d'épuration en France	25
<i>I.1.2.1. L'épandage des boues</i>	26
<i>I.1.2.2. L'incinération des boues</i>	29
I.2. DESHYDRATATION MECANIQUE DES BOUES URBAINES	31
I.2.1. Principaux appareils de déshydratation mécanique des boues urbaines	31
<i>I.2.1.1. Les filtres à bandes</i>	31
<i>I.2.1.2. Les décanteuses centrifugeuses</i>	33
<i>I.2.1.3. Les filtres à plateaux</i>	34
I.2.2. Choix d'une technique de déshydratation mécanique des boues urbaines	35
I.2.3. Paramètres caractéristiques des boues pouvant influencer leur déshydratation	36
<i>I.2.3.1. Influence du fonctionnement de la station d'épuration</i>	36
<i>I.2.3.2. Importance de la composition des boues</i>	38
I.3. CONCLUSION	39
I.4. BIBLIOGRAPHIE	41

II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE **45**

II.1. BREF HISTORIQUE DU FILTRE A BANDES **47****II.2. APPROCHE GLOBALE** **48**

II.2.1. Etudes réalisées sur des filtres à bandes industriels 49

II.2.2. Prédiction des performances d'un filtre à bandes à partir d'essais sur centrifugeuses 53

II.2.3. Prédiction des performances d'un filtre à bandes à partir d'essais en cellule de filtration compression 54

II.2.3.1. Mesure en cellule de filtration compression 54*II.2.3.2. Prédiction des performances des filtres à bandes avec la CFC* 55**II.3. ETUDE DES DIFFERENTES ZONES D'UN FILTRE A BANDES** **56**

II.3.1. Le conditionnement 57

II.3.2. Débit d'entrée des boues dans un filtre à bandes 58

II.3.3. La zone de drainage par gravité 59

II.3.3.1. Approche empirique 60*II.3.3.2. Approche basée sur l'équation de la filtration* 63*II.3.3.3. Conclusion* 70

II.3.4. Le premier rouleau 71

II.3.5. La zone en S 74

II.3.5.1. Tension de toile 74*II.3.5.2. Pression de filtration* 74*II.3.5.3. Le cisaillement* 76*II.3.5.4. Simulation de la zone de pressage en S grâce à des pilotes de laboratoire* 77*II.3.5.5. Perspectives de modélisation de la zone en S* 82*II.3.5.6. Conclusion* 83**II.4. CONCLUSION** **84****II.5. NOMENCLATURE** **86****II.6. BIBLIOGRAPHIE** **90**

III. ETUDE SUR PILOTES DE LABORATOIRE **95**

III.1. L'EGOUTTAGE **97**

III.1.1. Matériel et méthode 97

III.1.1.1. Les cellules d'égouttage 97*III.1.1.2. Le pilote de laboratoire et la table d'égouttage industrielle* 99*III.1.1.3. Les boues* 100

III.1.2. Répétabilité 100

III.1.3. Paramètres influant sur l'égouttage 101

III.1.3.1. Impact de la dose de polymère 101*III.1.3.2. Influence de la charge de la boue* 102*III.1.3.3. Impact de la dilution des boues* 103*III.1.3.4. Le labourage* 104*III.1.3.5. Influence de la toile* 106

III.1.4. Modélisation de l'égouttage des boues urbaines	106
<i>III.1.4.1. Choix du modèle</i>	106
<i>III.1.4.2. Développement du modèle empirique</i>	110
<i>III.1.4.3. Recherche de paramètres globaux</i>	113
III.1.5. Estimation des performances d'une table d'égouttage industrielle	115
<i>III.1.5.1. Passage de la cellule à la table d'égouttage</i>	115
<i>III.1.5.2. Comparaison entre la cellule de laboratoire et la table d'égouttage</i>	116
III.1.6. Conclusion	118
III.2. PRESSAGE SUR FILTRE A BANDES DE LABORATOIRE	119
III.2.1. Le pilote de laboratoire	119
<i>III.2.1.1. Introduction</i>	119
<i>III.2.1.2. Paramètres de fonctionnement du pilote</i>	121
<i>III.2.1.3. Exploitation des résultats</i>	126
III.2.2. Résultats des essais sur le pilote	129
<i>III.2.2.1. Influence de la charge</i>	129
<i>III.2.2.2. Influence de la concentration initiale des boues</i>	131
<i>III.2.2.3. Influence du type des toiles</i>	132
<i>III.2.2.4. Impact de l'enroulement de la toile autour du rouleau de pressage</i>	132
<i>III.2.2.5. Variation du diamètre du rouleau de pressage</i>	133
<i>III.2.2.6. Détermination du nombre de rouleaux efficaces</i>	135
<i>III.2.2.7. Importance du conditionnement</i>	137
<i>III.2.2.8. Influence de la tension de toile</i>	138
<i>III.2.2.9. Impact de la vitesse des toiles</i>	140
<i>III.2.2.10. Effet d'un laminage</i>	145
<i>III.2.2.11. Conclusion sur les essais</i>	148
III.2.3. Comparaison des performances du pilote de laboratoire avec celles d'un filtre à bandes industriel	149
III.3. VERS UN NOUVEAU FILTRE A BANDES	150
III.4. NOMENCLATURE	154
III.5. BIBLIOGRAPHIE	156
IV. DES ESSAIS EN CELLULE DE FILTRATION COMPRESSION AUX PERFORMANCES DES FILTRES A BANDES	158
<hr/>	
IV.1. PRESSION APPLIQUEE SUR LES BOUES DANS LES FILTRES A BANDES	160
IV.1.1. Mesure de la pression dans les filtres à bandes	160
IV.1.2. Mesure des pressions dans le pilote	163
IV.2. ESTIMATION DES PERFORMANCES DES FILTRES A BANDES GRACE A LA CELLULE DE FILTRATION COMPRESSION	166
IV.2.1. Présentation	166
<i>IV.2.1.1. La cellule de filtration compression</i>	166
<i>IV.2.1.2. Filtration compression des boues résiduares en CFC</i>	167
<i>IV.2.1.3. Compression des boues résiduares en CFC</i>	171
IV.2.2. Essais de filtration et de compression en CFC	171

<i>IV.2.2.1. Reproductibilité des essais de compression</i>	172
<i>IV.2.2.2. Influence de la charge surfacique</i>	172
<i>IV.2.2.3. Influence de la toile</i>	173
<i>IV.2.2.4. Influence de la pression appliquée instantanément sur les boues urbaines</i>	174
<i>IV.2.2.5. Influence de la vitesse de montée en pression</i>	176
<i>IV.2.2.6. Conclusion</i>	179
IV.2.3. Comparaison entre les performances de déshydratation de la CFC et du pilote	180
<i>IV.2.3.1. Application instantanée de la pression dans la CFC</i>	180
<i>IV.2.3.2. Montée progressive de la pression dans la CFC</i>	181
<i>IV.2.3.3. Limites de la procédure</i>	184
<i>IV.2.3.4. Conclusion</i>	185
IV.3. INFLUENCE DU CISAILLEMENT	185
IV.3.1. Description d'une cellule de filtration compression avec piston rotatif	185
IV.3.2. Impact du cisaillement	187
IV.3.3. Conclusion	189
IV.4. NOMENCLATURE	191
IV.5. BIBLIOGRAPHIE	193
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	196
GLOSSAIRE	198

INTRODUCTION

Au 1^{er} janvier 2006, afin de se conformer à la réglementation européenne sur la collecte et l'épuration des eaux usées, toutes les agglomérations de 2000 à 15000 habitants devront collecter et traiter leurs eaux usées avec un procédé incluant un traitement secondaire. Par conséquent, la production de boues activées urbaines devrait doubler, pour atteindre 1,5 millions de tonnes de matières sèches par an d'ici 2010. La gestion des boues devient dès à présent un problème environnemental et économique majeur.

Par ailleurs, en France, depuis le 1^{er} janvier 2002, seules deux filières d'élimination des boues sont légalement autorisées : l'épandage et l'incinération. Dans les deux cas, une étape de déshydratation mécanique est généralement préconisée. La bonne maîtrise de ces opérations mécaniques permet souvent d'améliorer, de manière significative, le traitement des boues en termes de coût et de qualité. Dans ce contexte, la société E.M.O. (Equipements et Machines de l'Ouest), P.M.E. spécialisée dans la conception et la vente d'équipements pour station d'épuration, a financé, dans le cadre d'une convention CIFRE, cette thèse qui vise à mieux comprendre et décrire la déshydratation par filtre à bandes appliquée aux boues activées.

Pour déshydrater ce type de matériau, trois techniques sont couramment utilisées : le filtre à bandes, la centrifugeuse et le filtre à plateaux. Si le filtre à bandes et le filtre à plateaux ne s'adressent généralement pas au même type de station d'épuration, les centrifugeuses, quant à elles, concurrencent fortement les filtres à bandes. L'objectif majeur de cette étude réalisée au Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédé (LaTEP) est de mettre en évidence et d'analyser les interactions qui existent entre les boues et les paramètres de fonctionnement des filtres à bandes dans le but d'améliorer leurs performances. L'objectif à plus long terme étant d'atteindre des siccités proches de celles obtenues par les centrifugeuses.

Le premier chapitre de ce document présente le contexte général de la gestion des boues résiduelles en décrivant globalement les procédés d'épuration des eaux usées générant les boues et les filières d'élimination en précisant la place des procédés de déshydratation mécanique et plus particulièrement celle du filtre à bandes.

Le deuxième chapitre dresse un bilan relativement exhaustif des études sur le filtre à bandes publiées dans la littérature scientifique et technique. Cette approche permet d'isoler chaque paramètre de fonctionnement des filtres à bandes et ainsi de connaître leur influence sur les performances du procédé.

Le troisième chapitre décrit les moyens et l'installation pilote mis en place pour analyser expérimentalement le comportement des unités de déshydratation par filtre à bandes en termes d'égouttage et de pressage. Les résultats de laboratoire obtenus sont comparés à des données industrielles et permettent de mieux orienter la conception et la mise en œuvre des installations en situation réelle.

Enfin, le quatrième chapitre présente une procédure dédiée à l'estimation des performances des filtres à bandes industriels à partir d'essais réalisés en laboratoire sur cellule de filtration compression. Cette partie aborde également l'impact d'un effet cisailant et décrit dans ce cadre la mise en place d'une cellule de filtration compression modifiée (avec piston rotatif).

CHAPITRE I

CADRE GENERAL

Dans ce chapitre, le contexte général de la gestion des boues résiduelles urbaines est présenté à travers la description rapide du procédé de traitement des eaux usées par boues activées et des filières d'élimination des boues produites. L'inventaire des procédés de déshydratation mécanique généralement utilisés dans les stations d'épuration urbaines permet de situer nos travaux dans le contexte industriel actuel.

I. CADRE GENERAL	17
<hr/>	
I.1. CONTEXTE GENERAL	19
I.1.1. Origine des boues activées urbaines	19
I.1.1.1. <i>Procédés d'assainissement des eaux urbaines</i>	19
I.1.1.2. <i>La filière de traitement des boues</i>	22
I.1.1.3. <i>Composition des boues</i>	24
I.1.2. Principales filières d'élimination des boues de station d'épuration en France	25
I.1.2.1. <i>L'épandage des boues</i>	26
I.1.2.2. <i>L'incinération des boues</i>	29
I.2. DESHYDRATATION MECANIQUE DES BOUES URBAINES	31
I.2.1. Principaux appareils de déshydratation mécanique des boues urbaines	31
I.2.1.1. <i>Les filtres à bandes</i>	31
I.2.1.2. <i>Les décanteuses centrifugeuses</i>	33
I.2.1.3. <i>Les filtres à plateaux</i>	34
I.2.2. Choix d'une technique de déshydratation mécanique des boues urbaines	35
I.2.3. Paramètres caractéristiques des boues pouvant influencer leur déshydratation	36
I.2.3.1. <i>Influence du fonctionnement de la station d'épuration</i>	36
I.2.3.2. <i>Importance de la composition des boues</i>	38
I.3. CONCLUSION	39
I.4. BIBLIOGRAPHIE	41

I.1. Contexte général

La problématique de la gestion des boues résiduaires urbaines repose d'un point de vue technique sur trois points essentiels : la nature complexe de ce type de matériau, sa forte variabilité et sa mauvaise aptitude à la déshydratation mécanique. Pour mieux appréhender ces aspects, il est important de considérer au préalable les filières de traitement des eaux usées qui génèrent ces boues.

I.1.1. Origine des boues activées urbaines

I.1.1.1. Procédés d'assainissement des eaux urbaines

Le procédé de traitement des eaux usées par boues activées reprend de façon industrielle l'effet « auto-épurateur » des rivières. Ce procédé, qui consiste à mettre en contact dans un réacteur biologique aéré les eaux chargées d'éléments polluants avec des floccs de micro-organismes en suspension, est actuellement le plus utilisé pour l'épuration des eaux usées urbaines. Il s'effectue dans des stations d'épuration (STEP) dont l'organisation est généralement schématisée de la façon suivante (figure I.1.).

Dans un premier temps, pour retenir les matières de tailles importantes (quelques centimètres) contenues dans l'eau un dégrillage ou un tamisage est effectué. Ensuite, les sables sont éliminés par décantation (dessablage) et les graisses par flottation et écrémage (dégraissage). L'ensemble de ces opérations constitue la phase de prétraitement. Les déchets générés par cette étape ne rejoignent généralement pas la filière de traitement des boues, exceptées les graisses qui peuvent, si la station est équipée d'un digesteur, être injectées dans ce dernier.

Les eaux usées arrivent ensuite dans le décanteur primaire où les particules de densité supérieure à celle de l'eau (qui n'ont pas sédimentées dans le dessableur) sont éliminées par décantation. Cette étape permet d'éliminer classiquement 70% des particules en suspension et permet de réduire, ainsi, significativement la pollution à l'entrée du bassin d'aération. Les boues récupérées sont usuellement appelées boues **primaires**. Elles sont riches en matières minérales et généralement très fermentescibles. Elles peuvent être dirigées vers un atelier de

déshydratation où elles sont souvent mélangées aux boues secondaires (digérées ou non) pour constituer les boues **mixtes**. Sur les installations possédant un digesteur, elles peuvent être stabilisées par voie anaérobie. Pour des raisons principalement financières, les petites stations d'épuration ne possèdent pas de décanteur primaire, les eaux usées subissent alors, après le prétraitement, l'épuration biologique dans le bassin secondaire. En entrée de la filière de déshydratation des boues, il y a, dans ce cas, uniquement des boues **secondaires**.

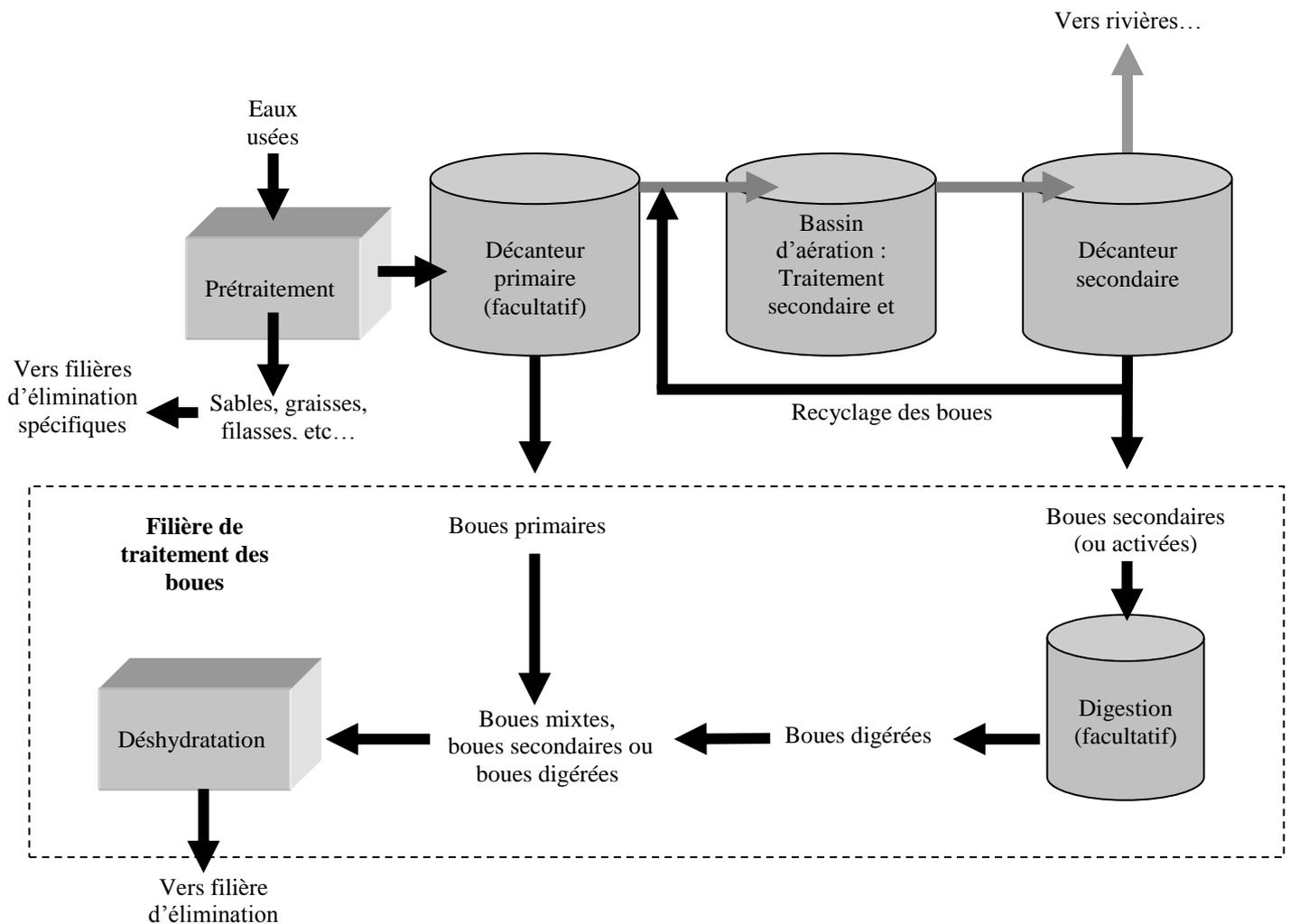


Figure I.1. : schéma simplifié d'une station d'épuration (STEP)

Le surnageant du décanteur primaire est ensuite envoyé dans le bassin d'aération. Dans ce réacteur biologique des micro-organismes (initialement introduits par ensemencement) s'agglomèrent sous forme de flocons et se développent en utilisant la pollution comme substrat nécessaire à la production d'énergie vitale et à la synthèse de nouvelles cellules vivantes. Une partie de ces éléments polluants, qui ne sont pas dégradés

biologiquement, peut être adsorbée et incorporée aux floccs des boues. La suspension réactionnelle est ensuite séparée dans un clarificateur (ou décanteur secondaire). Les boues (secondaires) prélevées au fond du clarificateur sont ensuite soumises à un traitement qui passe souvent par une étape de déshydratation.

Le surnageant du décanteur secondaire est rejeté généralement dans les rivières avec un abattement habituel de 95 % de la DBO₅. Cependant, si la pollution carbonée est considérablement réduite par rapport à l'entrée dans la station, il n'en est pas de même pour le phosphore et l'azote. Le traitement aérobie élimine environ 20% de la pollution azotée, ce n'est généralement pas suffisant pour répondre aux normes de rejet (tableaux I.1. et I.2.). Un traitement tertiaire est alors souvent nécessaire.

Taille de la commune ou de l'agglomération	Charge correspondante (en DBO ₅ .jour ⁻¹)	Concentration maximales (mg.l ⁻¹)			Rendement minimal (%)		
		DCO	DBO ₅	MES	DCO	DBO ₅	MES
<2 000 EH (arrêté du 21 juin 1996)	120 kg		35		60%	60%	
2 000-10 000 EH (arrêté du 22 décembre 1994)	120-600 kg	125	25	35	75%	70%	90%
>10 000 EH (arrêté du 22 décembre 1994)	>600 kg	125	25	35	75%	80%	90%

Tableau I.1. : performances épuratoires des stations imposées par la loi française (Miquel, 2003)

	Charge correspondante (en DBO ₅ .jour ⁻¹)	Concentration maximales (mg.l ⁻¹)	Rendement minimal (%)
Azote	>600	15	
	>6000	10	70%
Phosphore	>600	2	
	>6000	1	80%

Tableau I.2. : réglementation française sur l'épuration de l'azote et du phosphore en zone sensible (Miquel, 2003)

L'élimination de l'azote peut s'effectuer par voie biologique avec l'alternance d'une phase d'anoxie et d'une phase aérobie. La pollution est alors transformée en azote gazeux qui est évacué dans l'atmosphère. La pollution phosphorée peut être éliminée par voie biologique ou physico-chimique (ajout de sels de fer ou d'aluminium) qui provoquent la précipitation et la décantation des phosphates. Dans les deux cas, le phosphore se retrouve dans les boues

produites. Ce traitement tertiaire peut être réalisé en adaptant l'aération et le temps de séjour dans le bassin d'aération ou en ajoutant des bassins (anoxie et/ou anaérobie) dans la chaîne de traitement.

Dans le cas où le traitement doit être encore plus poussé, un traitement quaternaire peut être envisagé avec des procédés tels que l'ultra-filtration.

1.1.1.2. La filière de traitement des boues

Les boues extraites des décanteurs restent fortement hydratées (98-99% d'eau). Afin de réduire leur volume et éventuellement de les stabiliser, elles peuvent subir divers traitements spécifiques au cours de leur traitement (figure I.2.).

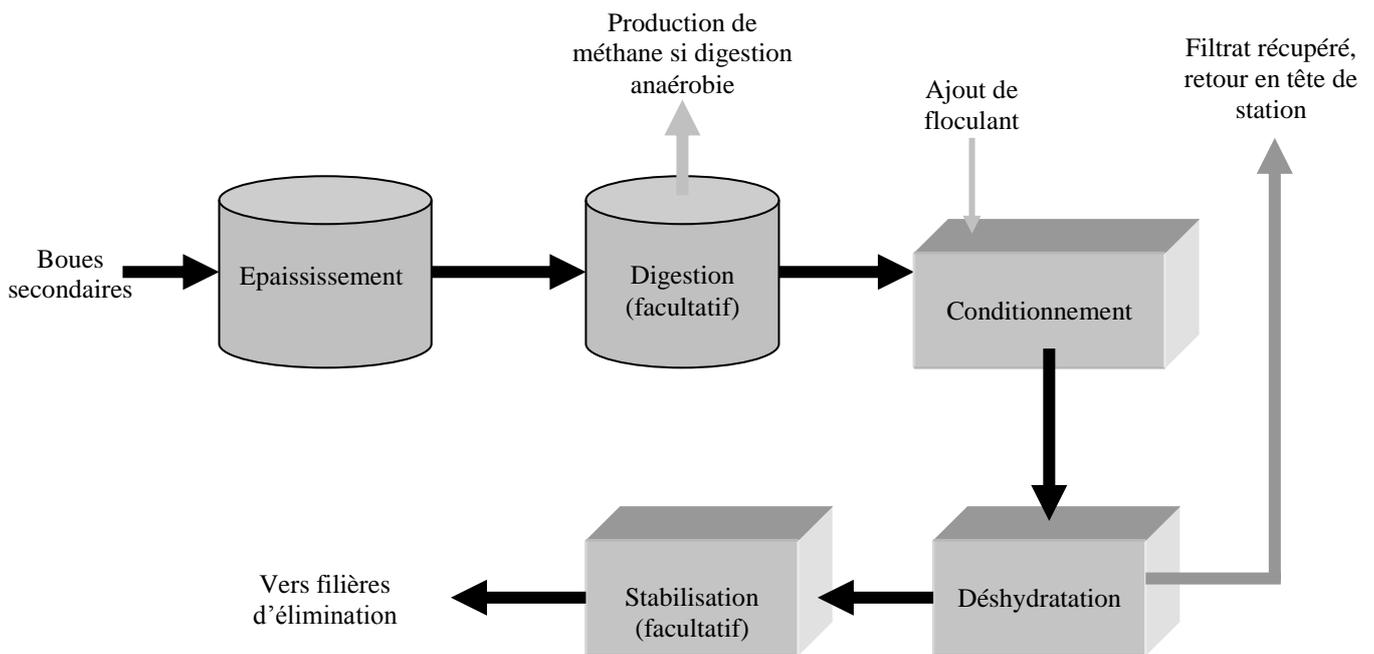


Figure I.2. : schéma simplifié de la filière de traitement des boues

Généralement, la première étape consiste à épaissir les boues. Cet épaississement peut être statique (décantation) ou dynamique (flottation, égouttage ou centrifugation après

conditionnement). On obtient, alors, une boue dite liquide dont la siccité est comprise entre 2 et 12%. Cette boue peut être dans certains cas épanchée en l'état (OTV, 1997).

Afin de limiter les risques de fermentation et de développement d'odeurs nauséabondes, une étape de stabilisation peut être mise en place. Plusieurs procédés existent : la stabilisation peut être biologique (on parle alors de digestion aérobie ou anaérobie), ou chimique (traitement au sel de nitrite). Dans le cas de la digestion anaérobie, le méthane est récupéré et peut servir d'apport énergétique au fonctionnement de la station. Les boues obtenues après digestion (boues **digérées**) sont généralement fortement minéralisées et possèdent alors des caractéristiques, pour la déshydratation mécanique, différentes de celles des boues secondaires, mixtes, ou primaires.

Préalablement à leur déshydratation mécanique, les boues doivent être conditionnées. L'ajout de flocculants minéraux ou organiques permet la formation de floccs qui facilitent significativement la séparation des matières solides avec la phase aqueuse. Le conditionnement peut dans certains cas être réalisé par voie thermique.

Les boues sont ensuite déshydratées mécaniquement dans un filtre à bandes, un filtre à plateaux ou bien une centrifugeuse. Le filtrat récupéré est généralement recyclé en tête de station afin d'être à nouveau épuré. Les boues issues de ces procédés de déshydratation sont soit pâteuses (14-25% de siccité), soit solides (plus de 25% de siccité dans le cas du filtre à plateaux).

L'étape de stabilisation (ou hygiénisation) peut aussi être réalisée sur ces boues déshydratées : par voie biologique (compostage), par voie chimique (chaulage), ou par séchage. Les boues chaulées (siccité >30%) représentent 30% de la matière sèche produite en France tandis que les boues compostées restent encore peu courantes (2% du tonnage) au même titre que les boues séchées (tableau I.3.).

Capacité (EH)	<10 000	>10 000 et < 50 000	>50 000 et < 100 000	>100 000	Total
Nombre de stations	147	90	51	36	224
Production de Matière sèche (tonne)	7 391	35 264	41 859	156 283	240 787*
Production (tonne boue)	160 998	255 512	219 424	478 335	1 114 269
Siccité moyenne (kg_{MS}.kg_{boue}⁻¹)	4,6%	13,8%	19%	32,7%	21,6%
Station sans stabilisation des boues	96,6%	65,5%	33,3%	5,5%	67,9%
Stabilisation par digestion	0%	5,6%	15,7%	38,9%	8,3%
Stabilisation par chaulage	3,4%	28,9%	43,1%	41,7%	21%
Stabilisation par séchage	0%	0%	0%	5,5%	0,6%
Stabilisation par compostage	0%	0%	4%	3%	2,2%

Tableau I.3. : place des différents types de filières de stabilisation en France, étude réalisée sur 324 stations d'épuration (Brunet et Martel, 1999). * France entière : 800 000 tonnes de MS

1.1.1.3. Composition des boues

Les boues produites lors du traitement des eaux usées par un procédé biologique classique sont constituées principalement d'eau, de matières minérales et de floccs microbiens. Ces floccs sont composés d'une multitude de micro-organismes différents tels que des bactéries, des champignons, des protozoaires. Les bactéries restent, cependant, les micro-organismes les plus impliqués dans le processus d'épuration. Elles produisent, lors de la dégradation des polluants, des polymères exocellulaires (ECP) fortement hydratés, constitués de polysaccharides, de protéines et de lipides. Ces polymères sont considérés comme responsable de la biofloculation des boues activées. Ils sont constitués d'une importante fraction organique (70 à 81% de la masse de leur matière sèche) et d'une fraction minérale constituée principalement de calcium (50 à 60% de la masse minérale), de phosphore (10 à 30%), et de traces de divers éléments comme l'aluminium, le cobalt, le manganèse, le nickel et le zinc (Houghton et col, 2000).

Du fait de cette composition très variée, les boues ont une distribution granulométrique relativement large. Karr et Keinath (1978) ont mesuré la taille des particules présentes dans les boues et les classent dans cinq catégories : la matière dissoute ($<0,001 \mu\text{m}$), les colloïdes ($0,001-1 \mu\text{m}$), les particules supracolloïdales ($1-100 \mu\text{m}$), les particules déformables qui décantent ($>100 \mu\text{m}$) et les particules "rigides" qui décantent ($>100 \mu\text{m}$). Ils observent, alors, que les boues primaires ont la plus grande concentration en particules rigides, et la plus faible concentration en particules déformables. C'est le contraire pour les boues secondaires qui possèdent, aussi, les plus faibles concentrations en matières dissoutes et en colloïdes. Les boues digérées en anaérobie possèdent, quant à elles, les plus fortes concentrations en matières dissoutes, en colloïdes et en particules supracolloïdales.

En fait, chaque boue est unique. Sa composition dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la nature de l'effluent, le type de traitement (élimination de l'azote, du phosphore), les paramètres de fonctionnement de la STEP (temps de séjour, aération, adjuvants chimiques éventuellement ajoutés lors du traitement de l'eau).

Par ailleurs, les boues, à l'entrée de l'étape de déshydratation, sont habituellement conditionnées. Lors de l'utilisation d'un filtre à bandes, un polymère cationique organique est généralement utilisé. Des floccs de grandes tailles sont alors créés par agglomération des petits floccs bactériens issus de la bioflocculation. Ces gros floccs sont donc constitués d'une multitude de longues chaînes de polymères qui rendent les boues particulièrement compressibles et qui piègent une partie de l'eau.

Il découle de ces remarques que seul un comportement général des boues peut être caractérisé. Les tendances peuvent être connues mais en aucun cas une généralisation ne doit être faite à partir des mesures réalisées sur une boue à un instant donné.

I.1.2. Principales filières d'élimination des boues de stations d'épuration en France

La directive européenne sur l'assainissement des agglomérations a imposé la collecte et le traitement des eaux usées pour toutes les agglomérations de plus de 15000 EH au 1^{er} janvier 2001 et l'imposera pour toutes les agglomérations comprises entre 2000 et 15000 EH

au 1^{er} janvier 2006 avec la présence d'un traitement secondaire et d'un traitement spécifique de l'azote et du phosphore dans les zones sensibles à l'eutrophisation. Par conséquent, à l'horizon 2005-2010, la production de boues devrait doubler en France pour atteindre 1500000 t_{MS}.an⁻¹ avec les conséquences économiques et environnementales que cela implique.

De plus, la directive européenne sur le traitement des déchets a interdit au 1^{er} janvier 2002 la mise en décharge de certains déchets dont les boues issues de l'épuration des eaux usées. Cette filière qui représentait environ 40% de l'élimination des boues en Europe et 25% en France doit donc être remplacée. Par conséquent, la gestion des boues et leur devenir devient un enjeu économique et technique majeur.

1.1.2.1. L'épandage des boues

La valorisation agricole est la principale filière d'élimination en France (60% des boues sont valorisées en agriculture) et du fait de l'interdiction de la mise en décharge, ce pourcentage devrait atteindre 70%. Tout son intérêt réside dans son faible coût (tableau I.4.), dans l'élimination des déchets par le sol, et dans l'utilisation des vertus fertilisantes des boues (tableau I.5.) faisant passer les boues de l'état de déchets à l'état de produits valorisables. Les boues peuvent être épandues quelle que soit leur siccité. Cependant, les boues liquides (qui ont un volume important du fait du large pourcentage d'eau) sont généralement utilisées dans un périmètre restreint autour de la station d'épuration en raison du coût lié au transport.

Filière d'élimination	Coût moyen (euro.tonne⁻¹.EH⁻¹)
Epandage	18,29
Mise en décharge	38,11
Incinération	106,7

Tableau I.4. : coût moyen des différentes filières d'élimination en France
(chiffres fournis par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 2001)

Composés fertilisants	Valeur fertilisante (g)
Azote réduit	173
Phosphore	118
Potassium	15
Magnésium	27
Calcium (chaux)	1074

Tableau I.5. : valeurs fertilisantes pour 4 kg de boues chaulées issues d'un bassin d'aération
(chiffres fournis par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 2001)

Cette filière présente de nombreux inconvénients liés aux risques possibles engendrés par cette pratique :

- contamination directe pour les intervenants par des agents pathogènes ;
- contamination directe (ou par assimilation) des toxiques pour la faune et la flore ;
- accumulation d'éléments traces métalliques (ETM) et de composés traces organiques (CTO) dans le sol ;
- dégradation de la qualité des cultures (fertilisant mal adapté) ;
- nuisances olfactives.

Tous ces facteurs engendrent une réticence de la part des agriculteurs quant à l'utilisation des boues urbaines comme fertilisants (seulement 1,7% des sous-produits valorisés en agriculture sont des boues urbaines (OTV, 1997)).

Afin de réduire les risques sanitaires et environnementaux, la loi française (arrêté du 8 décembre 1997) précise les conditions d'utilisation des boues lors de la valorisation agricole (tableau I.6.).

Capacité station d'épuration en EH	<10 000	>10 000	>50 000	>100 000	Teneur moyenne	Teneur limite dans les boues (*)	Teneur limite du sol (*)
		et <50 000	et >100 000				
Cadmium (Cd)	2,5	3,3	2,4	4,3	2,9	10 (en 2004)	2
Chrome (Cr)	42,5	78,5	62,4	70,6	58,8	1000	150
Cuivre (Cu)	314,5	290,5	300,2	338,2	309	1000	100
Mercure (Hg)	3,2	2,4	2,8	3,6	3	10	1
Nickel (Ni)	24,4	39,2	35,1	39,5	31,9	200	50
Plomb (Pb)	75	114,3	130,4	181,4	106,7	800	100
Zinc (Zn)	732,5	658,5	800,5	997,6	754,2	3000	300
Sélénium	4	2,8	3,8	4,1	3,6		
PCB					0,19	0,8	
Fluorenthène					0,53	5 (4 si prairies)	
Benzo(a)pyrène					0,39	2 (1,5 si prairies)	
Benzo(b) fluoranthène					0,31	2,5	

Tableau I.6. : teneur des principaux contaminants du sols présents dans les boues urbaines et limites fixées par la réglementation française ($\text{mg.kg}_{\text{MS}}^{-1}$) (à partir de Blanc et col., 1999 ; Brunet et Martel, 1999)

(*) décret du 8 décembre 1997

Dans un certain nombre de cas, les risques liés à l'épandage peuvent être relativisés. Ainsi quand les boues sont stabilisées et hygiénisées (digestion, chaulage, compostage, etc ...), le risque de création d'odeur nauséabonde lors de l'épandage est fortement diminué (Leboucher et col., 1999).

Par ailleurs, les études épidémiologiques montrent que la probabilité d'infection des utilisateurs est extrêmement faible (Brunet et Martel, 1999) et le risque sanitaire est fortement réduit en cas d'hygiénisation (tableau I.7.)

Nature de la boue	Lisier	Boues laiteries	Boues urbaines non hygiénisées	Boues urbaines hygiénisées
Germes aérobies	3,5.10 ⁶	6,2.10 ⁶	7,3.10 ⁷	3.10 ³
Staphylocoques	9,0.10 ⁴	8.10 ²	1.10 ³	<6
Coliformes	2,0.10 ⁵	2,9.10 ³	6,1.10 ³	<6
Streptocoques		5,3.10 ³	3,6.10 ³	<6
Salmonelles	Test positif	Test positif	Test positif	Test négatif

Tableau I.7. : quantité de germes pathogènes présents dans les différentes boues (Brunet et Martel, 1999)

Les observations menées sur les parcelles d'épandage montrent que la pollution générée par les boues est généralement basse devant les autres sources de contamination (tableau I.8.).

Polluants	Cd	Pb	Cu	Zn	PCB	HPA
Retombées atmosphériques/ pluies	3%	97%		2%	44%	44% (80% [*])
Engrais phosphatés	89%				1%	1% (0%)
Lisier de porc / fumures			6%	64%	17%	17% (6% [*])
Produits phytosanitaires			92%			
Boues	4%	1%	1%	14%	38%	38% (14% [*])
Compost	4%	1%	1%	15%		

Tableau I.8. : contribution des différentes sources de pollution à la contamination du sols (à partir de Nadeau 1999 ; Brunet et Martel, 1999) (* pour sols cultivés en zone urbaine)

Plusieurs études ont également montré que le déplacement de la pollution vers les cultures dépend de multiples paramètres. Les éléments traces ont une faible mobilité (Cr, Pb, Hg) et les plantes de grandes cultures telles que le maïs, l'orge et le blé sont peu sensibles à leur accumulation ce qui est moins vrai pour les cultures maraîchères telles que les carottes, les épinards ou les laitues (Brunet et Martel, 1999).

L'amélioration de la déshydratation mécanique des boues présente donc un intérêt certain en ce qui concerne l'épandage. D'une part, elle permet d'optimiser la stabilisation en préparant les boues à un éventuel compostage ou en réduisant leur masse avant le chaulage. D'autre part, elle engendre une réduction de la masse des boues et donc des coûts de transport jusqu'au lieu d'épandage.

1.1.2.2. L'incinération des boues

Du fait de la disparition de la mise en décharge, cette filière semble devoir, aussi, se développer en France. La mise en œuvre de ce procédé peut se faire grâce à deux techniques différentes : l'incinération spécifique (des boues seules) et la co-incinération des boues avec les ordures ménagères.

L'incinération spécifique

Le principal avantage de l'incinération est la très nette réduction du volume des boues, puisqu'il ne reste au final plus que des cendres (matière minérale). Ce volume de cendres représente 5 à 15% du volume des boues déshydratées mécaniquement.

Cependant, cette technique reste coûteuse tant en investissement qu'en fonctionnement. La combustion génère par ailleurs des fumées qui contiennent, dans le cas des boues, des poussières et des gaz toxiques qu'il faut éliminer par des procédés d'épuration annexes. Les risques d'émissions toxiques dans l'atmosphère entraînent également des réticences au niveau des municipalités. Les cendres générées par l'incinération représentent un déchet ultime qui peut être stocké en centre d'enfouissement technique de classe I

(augmentation du coût du traitement des boues) ou valorisées en cimenterie, en bâtiments et travaux publics.

Une boue urbaine contient encore 70 à 80% d'eau après la déshydratation mécanique et il peut être intéressant, dans ce cas, de procéder à un conditionnement thermique avant l'incinération. Un séchage préalable des boues permet de réduire les flux de vapeur générés par la suite dans le four. Par ailleurs, du fait de leur composition, les boues possèdent un pouvoir calorifique inférieur (PCI) important qui dépend de leur siccité et du taux de matière volatile qu'elles contiennent. Les matières volatiles représentent la quantité de matière organique combustible des boues. Le PCI est la limite à partir de laquelle une boue devient auto-combustible, c'est-à-dire la limite à partir de laquelle il n'est plus nécessaire d'ajouter un combustible (ou de la chaleur) pour la brûler. Il peut être estimé grâce aux équations suivantes :

$$PCI_{(kJ / kg_{boues\ humides})} = 20,7 \times FV \times Si - 2,2 \times (1 - Si) \quad (\text{eq. I.1.}) \quad (\text{Pardo, 1998})$$

$$PCI_{(kJ / kg_{MS})} = 0,1728 \times FV + 3,7512 \quad (\text{eq. I.2.}) \quad (\text{EMO, 2000})$$

avec Si la siccité de la boue et FV la fraction de matière volatile contenue dans la matière sèche.

On estime pour les boues que l'auto-combustibilité est atteinte vers $2\text{kJ.kg}_{\text{boues humides}}^{-1}$. Elle peut donc être atteinte vers 25% de siccité pour une boue secondaire et vers 35% pour une boue digérée. L'utilisation des boues en incinération est donc idéale si elles sont suffisamment déshydratées, ce qui nécessite généralement un séchage préalable. Or une étude (Bongiovanni., 1998) montre que quelle que soit la pression de compression appliquée en déshydratation mécanique, la cinétique de séchage des boues ne varie pas. Autrement dit, il est économiquement intéressant de presser au maximum les boues urbaines avant de les sécher. En effet, le coût énergétique de la déshydratation mécanique est d'environ 6 à 9 MJ par tonne d'eau extraite alors que celui du séchage thermique est d'environ 3500 à 4500 MJ. Cette différence est en partie due à la chaleur latente de l'eau (2257 kJ.kg^{-1}). L'amélioration des performances du filtre à bandes prend donc également tout son sens dans l'optique d'une élimination des boues par incinération.

La co-incinération

La co-incinération est certainement la filière d'élimination la plus intéressante économiquement puisque son coût de fonctionnement est plus faible que celui de l'épandage. Toutefois, cette technique nécessite la présence d'un four adapté à la co-incinération (investissement important). De plus, le flux de boues ne peut pas dépasser un certain pourcentage du flux total des déchets à incinérer (10% à 20%). Les boues peuvent être utilisées de deux manières :

- comme fluide de refroidissement si la siccité n'excède pas 30%. Ceci permet de contrôler la température du four et permet, ainsi, d'éviter une injection d'air supplémentaire (OTV, 1997) ;
- comme déchet supplémentaire. Dans ce cas, pour un fonctionnement optimal du four, le PCI des boues doit être proche de celui des ordures ménagères. Les boues doivent donc avoir une siccité de 60 à 65%. Un séchage préalable est alors indispensable.

I.2. Déshydratation mécanique des boues urbaines

I.2.1. Principaux appareils de déshydratation mécanique des boues urbaines

I.2.1.1. Les filtres à bandes

Le principe de ces appareils (figure I.3.) est de comprimer la boue à travers deux toiles filtrantes qui suivent un arrangement de rouleaux, au moyen desquels s'applique la pression. Ils offrent un procédé continu du traitement des boues avec un très bon taux de capture des matières en suspension. Les performances des presses à bandes peuvent être améliorées par l'utilisation en amont d'une table d'égouttage qui assure un épaissement préalable de la boue. Ils existent de très nombreuses configurations de filtres à bandes, qui diffèrent par le nombre de rouleaux de pressage (de 5 à plus d'une quinzaine), le diamètre des rouleaux, l'intervalle entre chaque rouleau, l'enroulement des toiles autour des rouleaux, et la largeur des bandes (0,5 à 3 mètres).

Les filtres à bandes utilisés dans les STEP sont classés en trois catégories (OTV, 1997) :

- les filtres basse pression BP (environ 3-4 bar) utilisés dans les petites stations (< 10000 EH) ;
- les filtres moyenne pression (5 bar environ) ;
- les filtres haute pression (environ 7 bar) ;

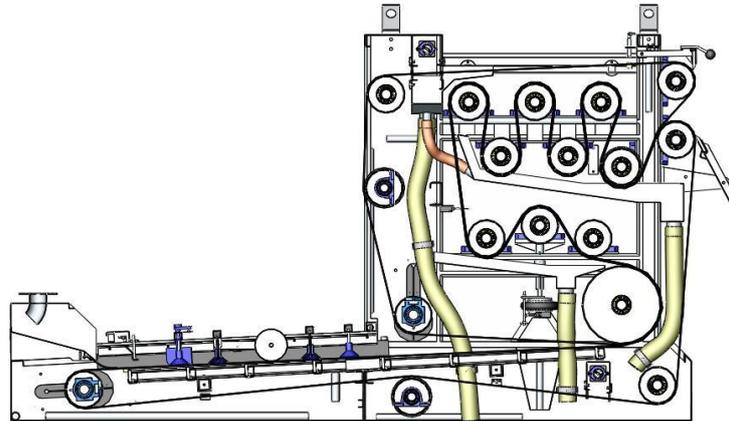


Figure I.3. : schéma d'un filtre à bandes

Les coûts raisonnables d'exploitation et d'investissement liés à cette technique de déshydratation des boues ainsi que sa facilité de mise en œuvre en font le procédé le plus utilisé depuis une vingtaine d'années.

Son principal inconvénient réside dans la limitation de la pression appliquée. En effet, au cours de sa compression, la boue peut, si la pression est trop élevée, s'échapper par le bord des toiles. Ce phénomène appelé fluage réduit les performances du procédé. De plus, le lavage des toiles entraîne un retour d'eau important en tête de station. Enfin, les siccités atteintes en sortie d'appareil (tableau I.9.) restent souvent inférieures à celles obtenues avec les autres techniques de déshydratation mécanique.

Types de boues	Consommation en flocculant cationique (kg.tms ⁻¹)	Siccité obtenue
Boues mixtes	3 à 5	23 à 27%
Boues digérées anaérobies mixtes	5 à 6	20 à 24%
Boues aération prolongée	6 à 8	14 à 18%

Tableau I.9. : performances des filtres à bandes (Mortgat, 1998)

1.2.1.2. Les décanteuses centrifugeuses

Dans ces appareils (figure I.4.), les boues conditionnées sont placées dans un bol en rotation à grande vitesse. L'accélération (3000 à 5000 g) que subit la boue dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la vitesse de rotation du bol et son rayon (de 15 à 50 cm). Les particules solides sont décantées puis comprimées sur les parois du bol tandis que la phase aqueuse reste à l'intérieur. Un principe de vis sans fin évacue la phase solide du côté opposé au liquide. Ce type de procédé permet une déshydratation en continu des boues, et nécessite en principe moins de surveillance que le filtre à bandes lors de son fonctionnement. Il est généralement admis que les centrifugeuses permettent d'atteindre des siccités de 2 à 3 points supérieures au filtre à bandes.

Par contre, les boues produites n'ont pas la même "tenue en tas" que celles produites par les filtres à bandes ce qui peut être une gêne lors de leur utilisation ultérieure. La grande sophistication de ces appareils rend plus délicat leur entretien et nécessite une main d'œuvre plus qualifiée en cas de dysfonctionnement. Les centrifugeuses sont aussi très sensibles à l'usure que peut entraîner la présence de sable et au bourrage qu'entraînent les filasses (Mortgat, 1998). Il est donc nécessaire de prétraiter les boues en amont. Enfin, les variations de la qualité de la boue en entrée pouvant faire chuter ses performances, le conditionnement doit donc être particulièrement précis et rigoureux.

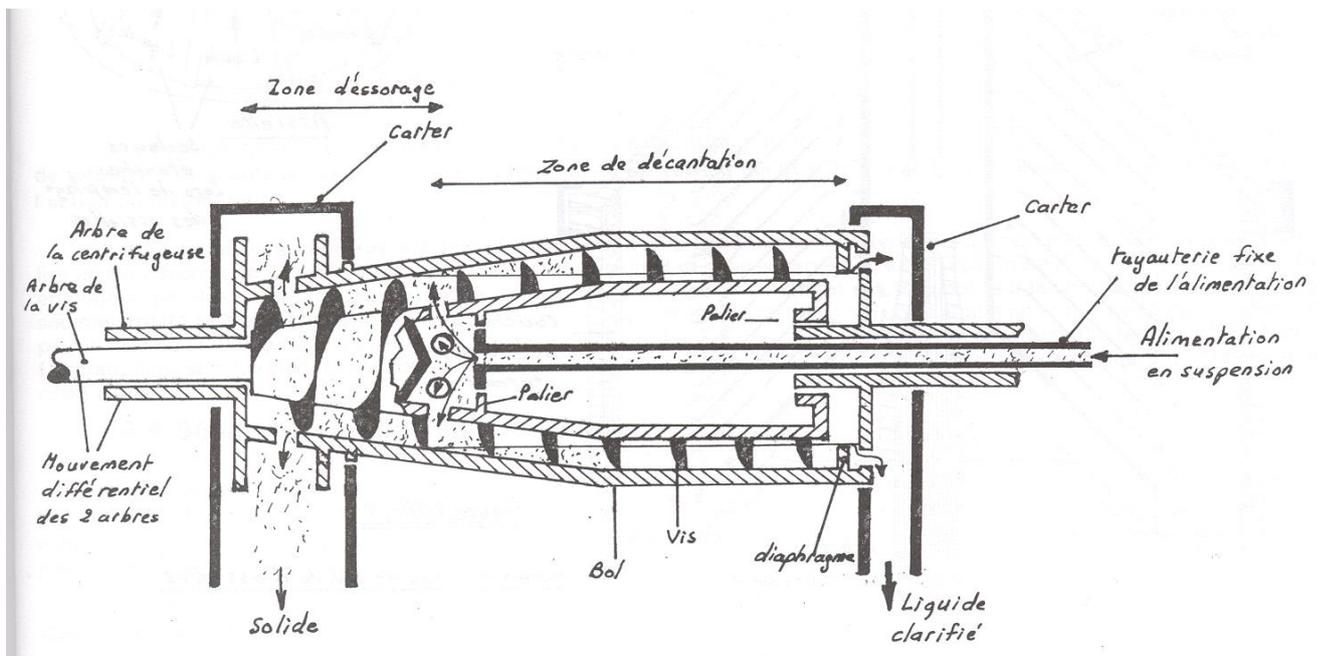


Figure I.4. : décanteuse centrifugeuse (Anglaret et Kazmierczak, 1989)

1.2.1.3. Les filtres à plateaux

Ces filtres sont constitués d'une succession de plateaux, recouverts sur leurs deux faces d'une toile filtrante, qui forment des chambres de filtration (figure I.5.). La boue conditionnée est introduite par l'intermédiaire d'une pompe sous pression (de 7 à 12 bar) dans les chambres de filtration. Les particules solides sont retenues par les toiles tandis que l'eau passe à travers et est récupérée au centre des plateaux. L'étanchéité de l'ensemble est assurée par de très fortes pressions appliquées par des vérins hydrauliques sur les cadres des plateaux. Quand le gâteau de boue déposé remplit la chambre, la filtration s'arrête. La pression des vérins est relâchée et les plateaux sont désunis. C'est la phase de débatissage au cours de laquelle les gâteaux de boues sont récupérés (25 à 35% de siccité). C'est donc un procédé discontinu (inconvenient majeur de cette technique qui propose, pour y remédier, de plus en plus de versions automatisées). Les surfaces filtrantes des plateaux peuvent être recouvertes d'une membrane gonflable. Ceci permet, en fin de filtration, de réduire le volume de la chambre et de réaliser une compression des boues ce qui tend à améliorer les performances du filtre. Les dimensions des plateaux varient de 0,3 à 1,5 mètres de côté et l'épaisseur des chambres de 20 à 30 millimètres. La durée d'un cycle complet (remplissage, filtration, débatissage, lavage) dure habituellement entre de 2 et 4 heures.

Avec cette technique, les boues sont généralement flocculées avec des réactifs minéraux (FeCl_3 + chaux) afin de former de petits floccs très résistants. L'usage de ces flocculants, qui augmentent la matière sèche de la boue de façon artificielle, reste problématique. En effet, l'ajout de matières minérales participe à l'augmentation de la teneur en polluants de la boue et l'augmentation de siccité résultante ne participe pas au PCI de la boue.

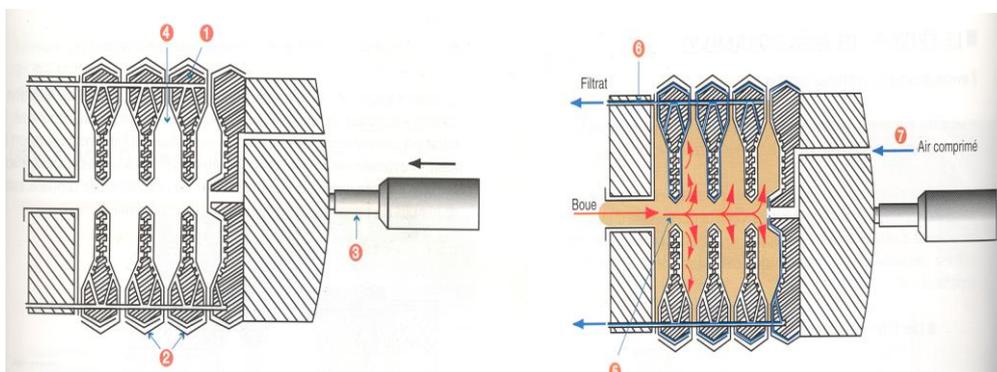


Figure I.5. : filtre à plateaux (OTV, 1997)

(1 plateau, 2 toiles, 3 vérin, 4 chambre de filtration, 5 gâteau, 6 filtrat, 7 air de purge)

I.2.2. Choix d'une technique de déshydratation mécanique des boues urbaines

Les filtres à bandes restent la solution la moins chère pour la déshydratation des boues (Jacobs et Silver, 1990 ; Andreasen et Nielsen, 1993, Ashbrook corp., 1999), et cela pour plusieurs raisons :

- ils consomment peu d'énergie (tableau I.10.) ;

Appareil	Puissance consommée (kwh.tms⁻¹)
Filtre à bandes	10-25
Filtre à plateaux	20-40
Centrifugeuse	30-60
Filtre sous vide	50-150

Tableau I.10.: consommation énergétique de divers appareils de déshydratation mécanique des boues (Degremont, 1992).

- la consommation de flocculant (qui représente pratiquement 50% du coût de fonctionnement des procédés de déshydratation mécanique en continu) est 2 à 3 fois plus élevée pour les centrifugeuses par rapport aux filtres à bandes ;
- l'investissement à l'achat de l'appareil est plus important pour les centrifugeuses et les filtres à plateaux.

Cependant les performances de déshydratation des filtres à bandes sont plus faibles que celles des centrifugeuses (2 à 3 points de moins (OTV,1997)) et des filtres à plateaux (10 à 20 points de moins avec apport de chaux).

D'après Mortgat (1998), tous ces facteurs font que sur le marché, le filtre à bandes reste la solution financière la plus adaptée aux petites stations d'épuration (débit de boues < 4 m³.h⁻¹). Pour les stations de tailles intermédiaires, il existe une concurrence réelle avec les centrifugeuses. Enfin dans les cas des stations plus importantes (> 8 m³.h⁻¹), les filtres à bandes sont mal adaptés et généralement seuls sont utilisés les filtres à plateaux et les centrifugeuses. Par conséquent, le filtre à bandes n'est pas en concurrence avec le filtre à plateaux puisqu'il ne s'adresse pas au même type de station.

A titre indicatif, ces règles de choix des matériels de déshydratation et notamment les données concernant les performances de chaque type d'appareils sont discutées dans un

article récent (Pan et col., 2003). Il montre notamment que les siccités obtenues à partir d'une boue floculée avec le même polymère (avec des doses optimales correspondant à chaque appareil) sont relativement proches (tableau I.11.). Pour les centrifugeuses, la siccité est légèrement supérieure mais les auteurs attribuent cela aux erreurs expérimentales.

Filtre à bandes	Filtre à plateaux	Centrifugeuse
13%	13,5%	14,5%

Tableau I.11.: siccités obtenues sur une boue activée (1% de siccité initiale) floculée avec le même polymère (Pan et col. 2003)

I.2.3. Paramètres caractéristiques des boues pouvant influencer leur déshydratation mécanique

Le comportement à la déshydratation mécanique des boues est généralement difficile à estimer au préalable du fait d'un nombre important de paramètres influents. Dans ce paragraphe nous allons décrire quelques tendances observées dans la littérature.

I.2.3.1. Influence du fonctionnement de la station d'épuration

Présence d'un décanteur primaire

Il est généralement admis que les boues mixtes qui contiennent une fraction minérale plus importante sont beaucoup plus faciles à déshydrater que les boues secondaires (Imhoff, 1972 ; Haworth, 1973). Gazbar (1993) remarque d'ailleurs que les boues très organiques (FV>75%) sont très difficiles à déshydrater sur filtre à bandes ou centrifugeuses.

Bassin d'aération

Barber et col. (1995) montrent que les conditions d'aération et l'évolution de la biomasse au cours du temps dans le bassin d'aération ont une grande influence sur la déshydratation de la boue et donc les performances des filtres à bandes. Wu et col. (1982) observent une diminution considérable de la résistance spécifique à la filtration (RSF) des boues activées avec l'augmentation de leur âge pour atteindre un minimum vers 15 jours. Passé ce délai, la RSF augmente de nouveau. Sürücü et Cetin (1989) indiquent que la résistance spécifique à la filtration augmente considérablement quand la température du

bassin d'aération passe de 15 à 30°C. De même, la RSF s'accroît avec l'élévation du pH du bassin d'aération (Karr et Keinath, 1978 ; Sürücü et Cetin, 1989)

Digestion aérobie

Katsiris et Kouzeli-Katsiri (1987) remarquent une augmentation de la RSF des boues activées avec l'augmentation du temps de séjour dans le digesteur aérobie pour atteindre un palier vers 16 jours.

Digestion anaérobie

Si Houghton et col. (2000) n'observent aucune relation entre la mesure du temps de succion capillaire (TSC) et le temps de rétention dans leur digesteur, Novak et col. (1988) mesurent des RSF plus importantes pour les boues digérées en anaérobie que pour les boues activées classiques. Lawler et col. (1986) remarquent une très légère augmentation de la RSF et du TSC avec l'augmentation du temps de séjour dans le digesteur. Ils montrent également une augmentation notable de la RSF aux basses températures, ou avec un apport en matières sèches trop important dans le digesteur. Ils en concluent que l'aptitude des boues à la déshydratation est plus sensible aux conditions de fonctionnement du digesteur qu'au processus de digestion lui-même.

Stockage des boues

L'impact d'une période anaérobie a été également discuté par Novak et col. (1988) et Baudez (2001) dans le cadre du stockage des boues. D'après ces auteurs, il entraîne une diminution de la quantité de filtrat récupéré par filtration ou compression.

Conclusion

De ces différentes études, il apparaît que le procédé d'épuration des eaux usées (présence d'un digesteur, d'un décanteur primaire etc...), ainsi que la conception des appareils et leurs conditions de fonctionnement influent sur la RSF et le TSC des boues. Une mauvaise déshydratation des boues peut souvent être corrigée par un "pilotage" différent de la STEP.

1.2.3.2. Importance de la composition des boues

Diverses études montrent que l'aptitude à la déshydratation (RSF ou TSC) des boues dépend de leur composition, c'est à dire de la distribution des tailles de particules, de la teneur en polymères exocellulaires, en lipides, protéines, carbohydrates et en sels minéraux, et même de la nature des bactéries présentes dans les flocs bactériens (Randall et col., 1971 ; Barber et Veenstra 1986 ; Lajoie et col., 2000). Il est assez difficile de déduire de la littérature des tendances claires et précises car la plupart de ces paramètres sont plus ou moins liés entre eux. Cependant, deux facteurs sont souvent mis en avant : la distribution de la taille des particules et la teneur en exopolymères (ECP).

Karr et Keinath (1978) mettent en évidence l'importance de la distribution de la taille des flocs sur les performances de déshydratation. Ils observent, que pour une même boue, un changement dans la distribution des tailles des flocs induit une nouvelle résistance spécifique à la filtration. De plus, ils mesurent avec une même distribution de taille pour deux boues différentes, une activée et l'autre digérée, une résistance spécifique identique. Une très forte corrélation montrant une augmentation de la RSF avec la teneur en particules supracolloïdales a également été observée par plusieurs auteurs (Karr et Keinath, 1978 ; Barber et Veenstra, 1986 ; Lotito et col. 1993).

En ce qui concerne l'action des exopolymères, Kang et col. (1989) montrent que l'ajout d'ECP à une boue digérée en anaérobie (après avoir extrait les ECP d'un autre échantillon de la même boue) entraîne une augmentation de la RSF. Dans une étude plus récente, Houghton et col. (2000) notent sur des boues digérées en anaérobie une forte relation (avec un coefficient de corrélation de 0,999) entre la teneur en ECP et le TSC des boues.

I.3. Conclusion

De part leur récent développement, les centrifugeuses concurrencent de plus en plus les filtres à bandes. Elles permettent, actuellement, d'obtenir une meilleure siccité finale (+2 points environ). La maîtrise de cette siccité finale devient un atout majeur, en raison des nouvelles réglementations sur le traitement des boues résiduaires. En effet, les boues ne pouvant plus être mises en décharge, il ne reste plus que deux voies quant à leur devenir : l'incinération et l'épandage agricole. En fait, d'autres voies d'élimination sont à l'étude comme l'oxydation par voie humide, qui a l'avantage de ne pas produire de NO_x, mais qui pose divers problèmes technologiques. La thermolyse des boues est également au stade de la recherche. Elle permet de produire un gaz dont le PCI est proche du gaz naturel, de plus le résidu minéral produit piège les métaux lourds qui ne sont plus lixiviables.

La siccité finale obtenue (17-20%) pour des boues résiduaires urbaines avec un filtre à bandes ne permet d'envisager essentiellement que la solution agricole qui est la plus économique et la plus simple. Or, depuis les récents scandales alimentaires les agriculteurs demandent de plus en plus de garanties quant à la stabilité et la non toxicité des boues.

Si pour des raisons d'économies d'énergie, l'ADEME encourage l'épandage, on peut se demander si la pression de l'opinion publique ne va pas nuire à cette solution au profit de l'incinération (15% actuellement).

Il semble donc nécessaire d'atteindre une siccité finale des boues après déshydratation mécanique qui permette aussi la voie de l'incinération. La tendance actuelle des industriels serait de combiner déshydratation et séchage pour obtenir des siccités plus élevées (35% de siccité étant la limite d'autocombustion moyenne des boues), atteindre une siccité de 40-45% par ce couplage permettrait d'envisager raisonnablement l'incinération ou l'épandage des boues (figure I.6.). Or, il a été montré qu'il était intéressant de déshydrater le plus possible la boue mécaniquement avant de la sécher (Bongiovanni, 1998). Il est donc nécessaire d'améliorer les performances des procédés de déshydratation mécanique.

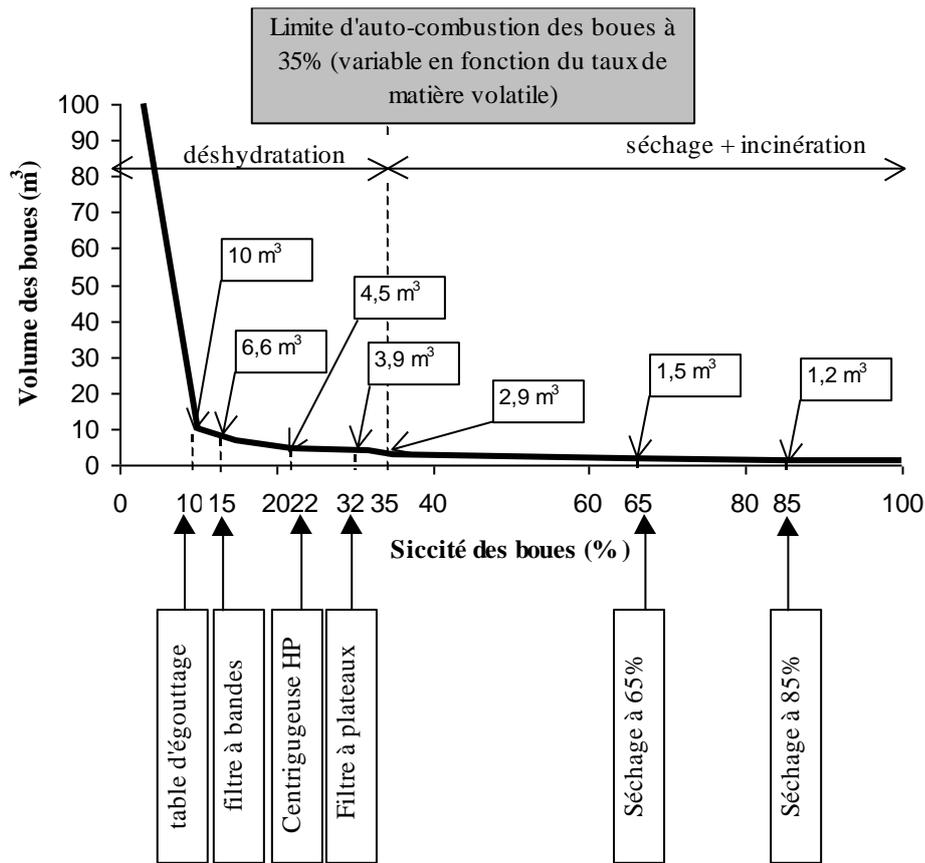


Figure I.6 : réduction du volume des boues au cours de la filière de traitement des boues

Ce travail s'inscrit dans un programme plus vaste dont l'objectif, à plus long terme, pourrait être de modifier la conception des filtres à bandes en y incluant éventuellement de l'énergie thermique afin d'obtenir un séchage partiel et donc une siccité plus élevée des boues déshydratées.

I.4. Bibliographie

Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2001, site internet : www.eau-rhin-meuse.fr/observatoire/.

Andreasen I., Nielsen B., 1993, "*A comparative study of full-scale sludge dewatering equipment*", Water Science Technology, **vol 28**, n°1, pp37-45.

Anglaret P., Kazmierczak S., 1989, "*Technologie génie chimique*", ed. CRDP Amiens.

Ashbrook Corp., 1999, "*Belt filter press still a cost-effective solution*", Water Engineering and Management, **vol 146**, n°5, pp21-25.

Barber J.B., Veenstra J.N., 1986, "*Evaluation of biological sludge properties influencing volume reduction*", Journal Water Pollution Control Federation, **vol 58**, n°2, pp149-156.

Barber J.B., Bullard C.M., Charles M.A., 1995, "*Activated sludge process control based on sludge dewatering potential*", WEFTEC'95, 68th Annual Conference and Exposition, october, Miami Beach.

Baudez J-C., 2001, "*Rhéologie et physico-chimie des boues résiduaires pâteuses pour l'étude du stockage et de l'épandage*", Thèse, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.

Blanc R., Coppin Y., Fiori E., Lesavre J., Maiolini J-L., Renner C., Savart C., Taniere F., 1999, "*Garantir la qualité des boues destinées au recyclage agricole par la maîtrise globale du système d'assainissement*", Techniques Sciences Méthodes, génie urbain, génie rural, n°5, pp50-58.

Bongiovanni J-M., 1998, "*Traitement des boues résiduaires par l'association en série d'une déshydratation mécanique et d'un séchage thermique*". Thèse, Université de Pau et des pays de l'Adour.

Brunet H., Martel J-L., 1999, "*Le recyclage agricole des boues : enjeux, contraintes et avenir*", Techniques Sciences Méthodes, génie urbain, génie rural, n°5, pp59-66.

Degremont, 1992, "*Mémento technique de l'eau*", Technique et documentation, Ed Lavoisier.

E.M.O., 2000, "*Présentation et approche stratégique de la R&D 11 sur la conception d'une nouvelle machine*", rapport interne.

Gazbar S., 1993, "*Evaluation et amélioration des performances des procédés de déshydratation mécanique des boues résiduaires*", Thèse, Institut Polytechnique de Lorraine.

Haworth P.J., 1973, "*The filterbelt press*", Effluent and Water Treatment Journal, **vol 13**, pp617-625.

Houghton J.I., Stephenson T., Quarmby J., 2000, "*The impact of digester retention time on microbial extracellular polymer production and sludge dewaterability*", Environmental Technology, **vol 21**, pp1157-1165.

Imhoff K.R., 1972, "*Sludge dewatering tests with a belt press*", Water Research, **vol 6**, n°4/5, pp515-516.

Jacobs A., Silver M., 1990, "*From ocean disposal to landfill cover*", Water Engineering and Management, **vol 137**, n°3, pp28-31.

Kang S-M., Kishimoto M., Shioya S., Yoshida T., Suga K-I., Taguchi H., 1989, "*Dewatering characteristics of activated sludges and effect of extracellular polymer*", Journal of Fermentation and Bioengineering, **vol 68**, n°2, pp117-122.

Karr P.R., Keinath T.M., 1978, "*Influence of particle size on sludge dewatering*", Journal Water Pollution Control Federation, **vol 50**, pp1911-1930.

Katsiris N., Kouzeli-Katsiri A., 1987, "*Bound Water content of biological sludges in relation to filtration and dewatering*", Water Research, **vol 21**, n°11, pp1319-1327.

Lajoie C.A., Layton A.C., Gregory I.R., Saylor G.S., Taylor D.E., Meyers A.J., 2000, "*Zoogleal clusters and sludge dewatering potential in an industrial activated-sludge wastewater treatment plant*", Water Environment Research, **vol 72**, n°1, pp56-64.

Lawler D.F., Chung Y.J., Hwang S-J., Hull B.A., 1986, "*Anaerobic digestion: effects on particle size and dewaterability*", Journal Water Pollution Control Federation, **vol 58**, n°12, pp1107-1117.

Leboucher G., Rabourg C., Guinamant J-L., Acobas F., Benanou D., Muller M-C., Clausse F., 1999, "*Maîtriser la qualité du produit "boue" : une chaîne de mesure à inventer*", Techniques Sciences Méthodes, génie urbain, génie rural, n°5, pp44-49.

Lotito V., Mininni G., Spinosa L., Lore F., 1993, "*Developments in laboratory evaluation of sewage sludges dewaterability*", Water Science and Technology, **vol 28**, n°1, pp103-108.

Miquel G., 2003, Rapport sur "*la qualité de l'eau et de l'assainissement en France*" par Gérard Miquel, Sénateur, Tome II - annexes, office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, en format pdf sur le site : www.senat.fr/opecest/index.html.

Mortgat B., 1998, "*Déshydratation des boues d'épuration*", Environnement et Technique, n°173, pp26-29.

Nadeau I., 1999, "*Quel avenir pour le compostage des déchets ?*", Environnement Magazine, n°1575, Mars, pp42-48.

Novak J.T., Goodman G.L., Pariroo A., Huang J-C., 1988, "*The blinding of sludges during filtration*", Journal Water Pollution Control Federation, **vol 60**, pp206-214.

OTV, 1997, "*Traiter et valoriser les boues*", collection OTV.

Pan J.R., Huang C., Cherng M., Li K-C., Lin C-F., 2003, "*Correlation between dewatering index and dewatering performance of three mechanical dewatering devices*", Advances in Environmental Research, vol 7, n°3, pp599-602.

Pardo P-E., 1998, "*séchage thermique des boues de stations d'épuration. Utilité et perspectives*", dans "Boues et déchets (Thématique 1998)", ed. Lavoisier.

Randall C.W., Turpin J.K., King P.H., 1971, "*Activated sludge dewatering: factors affecting drainability*", J. Water Pollution Control Federation, **vol 43**, pp102-122.

Sürücü G., Cetin F.D., 1989, "*Effect of temperature, pH and DO concentration on filterability and compressibility of activated sludge*", Water Research, **vol 23**, n° 11, pp1389-1395.

Wu Y.C., Smith Ed D., Novak R., 1982, "*Filterability of activated sludge in response to growth conditions*", Journal Water Pollution Control Federation, **vol 54**, n°5, pp444-456.

CHAPITRE II

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre recense les résultats donnés par la littérature concernant la déshydratation des boues résiduaires urbaines sur filtre à bandes. Il permet donc de récapituler les connaissances acquises afin de définir les axes de recherche. Dans une première partie, les résultats globaux obtenus sur des filtres à bandes sont présentés. Dans un deuxième temps, les travaux réalisés sur les zones spécifiques du filtre à bandes sont reportés.

II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE		45
II.1. BREF HISTORIQUE DU FILTRE A BANDES		47
II.2. APPROCHE GLOBALE		48
II.2.1. Etudes réalisées sur des filtres à bandes industriels		49
II.2.2. Prédiction des performances d'un filtre à bandes à partir d'essais sur centrifugeuses		53
II.2.3. Prédiction des performances d'un filtre à bandes à partir d'essais en cellule de filtration compression		54
<i>II.2.3.1. Mesure en cellule de filtration compression</i>		54
<i>II.2.3.2. Prédiction des performances des filtres à bandes avec la CFC</i>		55
II.3. Etude des différentes zones d'un filtre a bandes		56
II.3.1. Le conditionnement		57
II.3.2. Débit d'entrée des boues dans un filtre à bandes		58
II.3.3. La zone de drainage par gravité		59
<i>II.3.3.1. Approche empirique</i>		60
<i>II.3.3.2. Approche basée sur l'équation de la filtration</i>		63
<i>II.3.3.3. Conclusion</i>		70
II.3.4. Le premier rouleau		71
II.3.5. La zone en S		74
<i>II.3.5.1. Tension de toile</i>		74
<i>II.3.5.2. Pression de filtration</i>		74
<i>II.3.5.3. Le cisaillement</i>		76
<i>II.3.5.4. Simulation de la zone de pressage en S grâce à des pilotes de laboratoire</i>		77
<i>II.3.5.5. Perspectives de modélisation de la zone en S</i>		82
<i>II.3.5.6. Conclusion</i>		83
II.4. CONCLUSION		84
II.5. NOMENCLATURE		86
II.6. BIBLIOGRAPHIE		90

II.1. Bref historique du filtre à bandes

Le filtre à bandes fût, à l'origine, développé par les allemands pour le séchage de la pâte à papier dans les années 50 (Deutsch, 1987). Une société ouest allemande eut, quelques années plus tard, l'idée de l'utiliser pour la déshydratation des boues urbaines. Dès lors, au cours des années 60 et 70, le filtre à bandes fût utilisé dans les stations d'épuration européennes, puis plus tardivement aux Etats-Unis.

Le filtre à bandes a rapidement séduit les professionnels puisqu'il permet un traitement en continu des boues en consommant peu d'énergie (Dembitz, 1978 ; Lecey et Pietila, 1983 ; Deutsch, 1987). Grâce au développement des polymères synthétiques, le filtre à bandes permit d'obtenir des siccités comprises entre 16 et 25% pour la plupart des boues municipales. Il remplaça, donc, dans les stations d'épuration, les filtres sous vide moins performants et plus grands consommateurs d'énergie (Green et Heisler, 1992).

Au cours des années, la conception des filtres à bandes s'est modifiée en jouant principalement sur le nombre de rouleaux, leur disposition et l'angle d'enroulement des toiles autour de ces rouleaux (Haworth et Roberts, 1975).

Afin d'augmenter les performances, les constructeurs ont également opté pour une technique avec deux toiles filtrantes (figure II.1.).

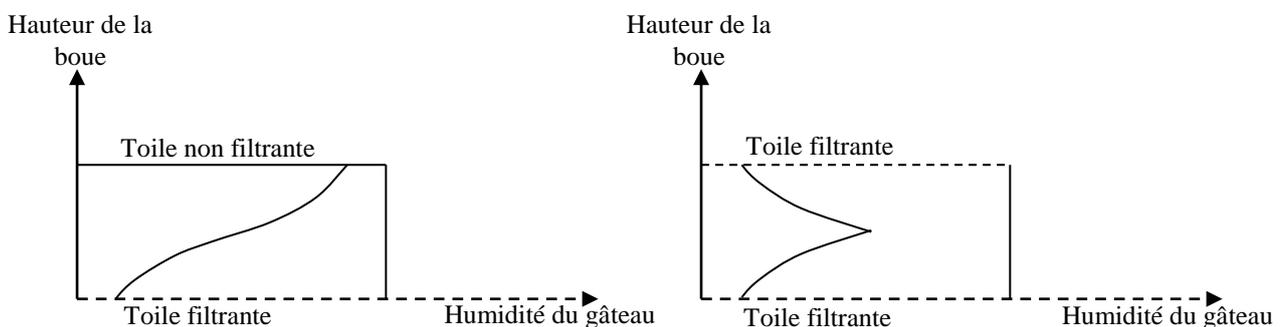


Figure II.1. : distribution de l'humidité dans le gâteau pressé entre une toile filtrante et une toile imperméable et entre deux toiles filtrantes (Halde, 1980)

Dans les années 80, la conception des filtres à bandes s'est simplifiée, notamment en diminuant le nombre de rouleaux. Pour Lecey et Pietila (1983), 6 rouleaux ayant un diamètre diminuant de 61 cm à 25,4 cm assurent une déshydratation maximale. Ils considèrent que l'augmentation du nombre de rouleaux ou la diminution de leur diamètre n'améliorent pas la siccité finale et augmentent les risques de dysfonctionnement. En fait, la littérature ne révèle pas de règle de conception. En effet, certains filtres ont des rouleaux ayant tous le même diamètre, à l'exception du premier (qui est généralement plus gros). Plusieurs constructeurs pensent que des rouleaux de grands diamètres sont aussi, voire plus efficaces, que les petits rouleaux car ils assurent un temps de pressage plus long. D'autres pensent que c'est surtout l'enroulement autour des rouleaux qui est important ; plus il serait grand, meilleures seraient les performances (Deutsch, 1987). Certains équipementiers préconisent d'améliorer la distribution des pressions en ajoutant de petits rouleaux de laminage en sortie de filtre, et en jouant sur la qualité des toiles. Les bandes sont généralement en Nylon ou en polyesters car ces matières résistent aux pressions appliquées par les rouleaux et facilitent la capture du solide, la décharge du gâteau par des grattoirs et le lavage. L'épaisseur des toiles est choisie en essayant d'optimiser le coût et l'usure. Enfin, un tissage serré (perméabilité faible) doit améliorer la qualité du filtrat mais risque de dégrader la siccité finale et réciproquement (Lecey et Pietila, 1983).

De nos jours, le filtre à bandes s'applique, aussi, à des boues résiduelles d'origines industrielles (Miner, 1980 ; Minyuan, 1991 ; Williams et col., 1990 ; Nicholson et Goldbach, 1991 ; Gruzitskii, 1992 ; Johnson et col., 1992). On le rencontre dans l'industrie agro-alimentaire (pressage des tomates, de la pulpe d'orange, du gel d'agar...) et des essais ont montré son efficacité pour déshydrater les lisiers.

II.2. Approche globale

Le dimensionnement des filtres à bandes est essentiellement basé sur des lois empiriques validées expérimentalement sur des pilotes de laboratoire, ou grâce à des essais sur sites industriels (Searle et Bennett, 1987).

Ainsi, d'après un assez large éventail de résultats, on peut dégager des tendances quant à la faculté des boues résiduaire urbaines à être déshydratées mais en aucun cas une règle générale ne peut être établie du fait de la forte variabilité de ces suspensions.

D'après une enquête menée par l'ASCE (1988), la siccité finale du gâteau (S_{if}) peut être corrélée avec la siccité d'entrée des boues (S_{i0}) ce qui permet d'estimer un ordre de grandeur de la performance d'un filtre pour une boue donnée (tableau II.1.)

Proportion de boues primaires (%)	Corrélation obtenue permettant de calculer la siccité en sortie S_{if}	Nombre de données	Coefficient de corrélation R
0-10	$S_{if}=S_{i0}/(0,044+4,26S_{i0})$	30	0,89
10-40	$S_{if}=S_{i0}/(0,0297+4,02S_{i0})$	7	0,90
40-60	$S_{if}=S_{i0}/(0,059+3,07S_{i0})$	35	0,84
60-80	$S_{if}=S_{i0}/(0,062+3,06S_{i0})$	17	0,82
80-100	$S_{if}=S_{i0}/(0,071+2,66S_{i0})$	12	0,87

Tableau II.1. : corrélations donnant la siccité finale des boues en fonction de la siccité initiale pour diverses boues mixtes (ASCE, 1988, enquête réalisée sur une centaine de stations d'épuration aux Etats-Unis).

Corrélations établies pour une siccité initiale des boues S_{i0} comprise entre 1 et 8%.

L'utilisation de ce type de corrélations empiriques sur des matériaux aussi variables que les boues de STEP reste cependant limitée et approximative. En effet, si l'on applique les corrélations de l'ASCE aux résultats proposés par Haworth (1973), l'erreur obtenue se situe entre 12 et 20%.

II.2.1. Etudes réalisées sur des filtres à bandes industriels

Plusieurs auteurs ont utilisé une approche "boite noire" pour étudier les filtres à bandes. Pour cela, ils ont mesuré, dans plusieurs stations d'épuration, différents paramètres

sur des boues en entrée de machine qu'ils ont corrélés à des mesures faites sur les flux sortants (gâteau de boue, filtrat, eaux de lavage).

Ainsi, Hashimoto et Hiraoka (1990) ont utilisé 24 boues (boues mixtes ou digérées en anaérobie) pour évaluer l'impact d'un grand nombre de paramètres physico-chimiques (33 au total) sur les performances d'un filtre à bandes. Ils observent que la zone de drainage par gravité est affectée principalement par la concentration en matière sèche de la boue à l'entrée du filtre alors que la siccité finale du gâteau dépend principalement de la viscosité de la boue. Ils obtiennent comme corrélation :

$$1 - Si_f = 85,4\mu_b + 0,501 \quad (R=0,923) \quad (\text{eq. II.1.})$$

Avec μ_b (Pa.s) la viscosité de la boue mesurée dans un viscosimètre tournant à 30 rpm et à 20°C avec un taux de matière en suspension de 4%. Cette corrélation très globale est obtenue pour une pression maximale dans le filtre de 0,50 bar et un débit de boue entrant de 100 kg_{MES}.h⁻¹.m_{largeurtoile}⁻¹, avec une viscosité comprise entre 0,001 et 0,003 Pa.s.

Ces auteurs ont ensuite essayé de préciser l'évolution de la viscosité de la boue en fonction d'un certain nombre de paramètres tels que la quantité de matières sèches volatiles et la quantité de fibres. Ceci leur a permis de conclure que la siccité finale du gâteau dépend significativement du taux de matières solides organiques dans la boue, de la densité de charge des particules et de la teneur en fibres.

De leur côté, Lotito et col. (1986) ont pu proposer, à partir d'essais réalisés avec deux boues mixtes urbaines, des corrélations pour relier les performances des filtres à bandes (débit de filtrat, siccité finale, taux de capture) avec la vitesse de la toile s_b (m.h⁻¹), le débit et la concentration de la suspension de boue floculée à l'entrée du filtre, respectivement $Q_{\text{susp}0}$ (m³.h⁻¹) et $C_{\text{susp}0}$ (kg.m⁻³). Ils estiment ainsi :

➤ le débit de filtrat recueilli dans la zone de filtration gravitaire (égouttage) Q_{fegout} (m³.h⁻¹) :

$$Q_{\text{fegout}} = 1,839Q_{\text{susp}0}^{0,911}C_{\text{susp}0}^{-0,299} \quad (R=0,989) \quad (\text{eq. II.2.})$$

➤ le débit de filtrat recueilli dans la totalité du filtre à bandes (hormis la zone d'égouttage) Q_f (m³.h⁻¹) :

$$Q_f = 0,016Q_{\text{susp}0}^{1,135}C_{\text{susp}0}^{0,646}s_b^{0,108} \quad (R=0,975) \quad (\text{eq. II.3.})$$

- la siccité finale du gâteau S_{if} (%) :

$$S_{if}=0,08798C_{susp0}^{0,279}Q_{susp0}^{-0,093}S_b^{-0,006} \quad (R=0,880) \quad (\text{eq. II.4.})$$

- le taux de capture du solide $E_{capture}$ (%) (masse de solide récupéré en sortie sur la masse de solide entrant dans le filtre):

$$E_{capture}=0,6872Q_{susp0}^{0,443}C_{susp0}^{0,414}S_b^{-0,298} \quad (R=0,915) \quad (\text{eq. II.5.})$$

- le rapport de la largeur de la toile l_t sur la largeur du gâteau l_g :

$$l_g/l_t=3,928Q_{susp0}^{0,706}S_b^{-0,381} \quad (R=0,908) \quad (\text{eq. II.6.})$$

Les limites d'applications de ces corrélations empiriques se situent entre :

- 1,03 et 3,00 $m^3 \cdot h^{-1}$ pour le débit d'entrée des boues ;
- 3 et 12 $m \cdot \text{min}^{-1}$ pour la vitesse des toiles ;
- 28,1 et 33,8 $kg \cdot m^{-3}$ pour la concentration de la boue mixte constituée d'un mélange de boue primaire et de boue activée urbaine ;
- 13 et 20,4 $kg \cdot m^{-3}$ pour la concentration de la boue mixte constituée d'un mélange de boue primaire stabilisée et de boue activée urbaine.

D'après ces résultats, la siccité en sortie de filtre (eq. II.4.) n'est pratiquement pas influencée par la vitesse des toiles tandis qu'elle est dégradée par l'augmentation du débit d'entrée des boues.

Afin de lever en partie l'empirisme de ce type d'approche, Lotito et col. (1986) ont essayé de rapprocher leurs résultats de l'équation de la filtration telle qu'elle est proposée par Ruth (1935) :

$$\frac{dV_f}{dt} = \frac{P\Omega^2}{\mu\alpha W V_f + \mu R_s \Omega} \quad (\text{eq. II.7})$$

Pour cela, ils négligent la résistance du filtre devant celle du gâteau et peuvent ainsi intégrer l'équation II.7. à pression constante pour la mettre sous la forme:

$$V_f^2 = \frac{2P\Omega^2 t}{\mu\alpha W} \quad (\text{eq. II.8.})$$

Ensuite, ils supposent que le filtre contient N rouleaux de même diamètre, que les deux toiles participent à la filtration et qu'elles couvrent la moitié de chaque rouleau. Ils estiment alors le débit de filtrat, la surface de filtration et le temps de pressage par les relations suivantes :

$$Q_f = V_f/t \quad (\text{eq. II.9.})$$

$$\Omega = \pi N D l_g \quad (\text{eq. II.10.})$$

$$t_p = \pi N D / 2 s_b \quad (\text{eq. II.11.})$$

Ainsi, avec une suspension et un gâteau homogènes, la masse de solide déposée par unité de volume de filtrat recueilli peut être estimée, en négligeant les pertes de solide dans le filtrat, par :

$$W = C_{susp0} (Q_{susp0} - Q_{fegout}) / Q_f \quad (\text{eq. II.12.})$$

Dans le cas de gâteaux compressibles (cas des boues résiduaire urbaines), il est courant d'estimer la variation de la résistance spécifique par une équation du type :

$$\alpha = \alpha_0 P^{n_0} \quad (\text{eq. II.13.})$$

Avec ces diverses considérations, l'équation II.8. peut se formuler de la façon suivante:

$$Q_f = \frac{4\pi N D l_g^2 s_b P^{1-n_0}}{\mu \alpha_0 (Q_{susp0} - Q_{fegout}) C_{susp0}} \quad (\text{eq. II.14.})$$

Dans cette équation, le calcul du débit de filtrat ne peut être effectué qu'en déterminant, auparavant, la largeur du gâteau l_g et le débit de filtrat recueilli dans la zone d'égouttage. Or il n'existe dans la littérature que des expressions empiriques pour déterminer ces deux grandeurs, il n'est donc pas possible de déterminer le débit de filtrat d'un filtre à bandes de façon complètement théorique.

Cependant, dans le cas où les corrélations II.6. et II.2. sont applicables, elles peuvent être introduites dans l'équation II.14. afin de donner l'évolution du débit de filtrat en fonction de trois uniques paramètres de fonctionnement Q_{susp0} , C_{susp0} et s_b . L'équation II.14. prend alors la forme suivante :

$$Q_f = cste \times \frac{Q_{susp0}^{0,501} s_b^{0,238} C_{susp0}^{-0,701}}{Q_{susp0}^{0,089} C_{susp0}^{0,299} - 1,839} \quad (\text{eq. II.15.})$$

La corrélation II.3. permet aussi de relier Q_f à Q_{susp0} , C_{susp0} et s_b . Ces deux expressions peuvent donc être comparées. Les valeurs des exposants sont en fait différentes pour les deux équations, l'évolution de Q_f avec C_{susp0} étant de sens opposé selon que l'on considère la

relation II.15. ou II.3. A partir de ce type de raisonnement, Lotito et col. (1986), qui supposent la corrélation empirique II.3. valable, concluent que l'équation de Ruth ne semble pas applicable aux filtres à bandes.

Enfin, Inujima et col. (1986) se sont intéressés à l'influence de quelques paramètres de fonctionnement des filtres à bandes sur la siccité du gâteau. En augmentant la tension des toiles ou en diminuant leur vitesse de défilement, ils remarquent que la siccité du gâteau en sortie de filtre à bandes augmente considérablement. Ils mesurent, alors, un gain de 6,7 points de siccité pour des boues mixtes en passant de 2 m.min⁻¹ à 0,35 m.min⁻¹.

II.2.2. Prédiction des performances d'un filtre à bandes à partir d'essais sur centrifugeuses

Bullard et Barber (1996) ont essayé de prévoir les performances d'un filtre à bandes en mesurant la siccité finale des boues après centrifugation en laboratoire. En comparant la siccité obtenue sous centrifugation à 45100 g pendant 10 minutes, avec la siccité en sortie du filtre à bandes (Si_f), ils proposent la corrélation suivante :

$$Si_f = 0,807 * Si_{45100g} + 0,033 \quad (R=0,902) \quad (\text{eq. II.16.})$$

Avec Si_{45100g} la siccité de la boue après centrifugation (%).

Hashimoto et Hiraoka. (1990) montrent pour leur part qu'il est possible de corréler la siccité en sortie de filtre à bandes avec celle obtenue par centrifugation sous 2190g en laboratoire. Ils relient, ainsi, la viscosité des boues à la siccité obtenue après centrifugation par les expressions suivantes :

$$\text{pour les boues mixtes} \quad 1 - Si_{2190g} = 59\mu_b + 0,747 \quad (R=0,895) \quad (\text{eq. II.17.})$$

$$\text{pour les boues digérées en anaérobie} \quad 1 - S_{2190g} = 57,8\mu_b + 0,749 \quad (R=0,889) \quad (\text{eq. II.18.})$$

Ces résultats semblent pouvoir relier la siccité des boues en sortie de filtre à bandes avec la siccité obtenue en fin de centrifugation en utilisant la corrélation II.1. En introduisant l'équation II.17. ou II.18. dans l'équation II.1., il vient :

$$\text{pour les boues mixtes} \quad Si_f = 1,417 * Si_{2190g} + 1,135 \quad (\text{eq. II.19.})$$

pour les boues digérées en anaérobie $S_{if} = 1,478 * S_{i2190g} + 1,130$ (eq. II.20.)

II.2.3. Prédiction des performances du filtre à bandes à partir d'essais en cellule de filtration compression

II.2.3.1. Mesure en cellule de filtration compression

Pour mieux appréhender les mécanismes de la filtration, de nombreux chercheurs utilisent une cellule de filtration-compression (CFC). Dans ce type d'appareil, un piston exerce une force de pression sur une suspension de boue qui se dépose sur un filtre. Sous l'effet de la pression, la suspension est filtrée puis compressée. Si la pression est maintenue jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de filtrat recueilli, on obtient, après mesure de la matière sèche dans le gâteau, la **siccité limite** de la boue. Cette valeur représente, en principe, la siccité maximale qu'il est possible d'obtenir avec un filtre, à P donnée, au bout d'un temps infini de filtration.

En suivant l'évolution du volume de filtrat recueilli au cours du temps ainsi que l'évolution de la hauteur du piston, deux phases apparaissent. La première correspond à l'étape de filtration proprement dite : le piston appuie sur la suspension, les particules solides sont stoppées par le filtre et s'accumulent en formant un gâteau et l'eau passe à travers le filtre et le gâteau en formation. Alors que la hauteur du gâteau augmente, le piston descend progressivement dans la cellule jusqu'à atteindre la surface de ce gâteau. On entre alors dans le régime de compression. Le piston comprime le gâteau en expulsant une partie de l'eau qui n'a pas été éliminée durant la filtration (figure II.2.).

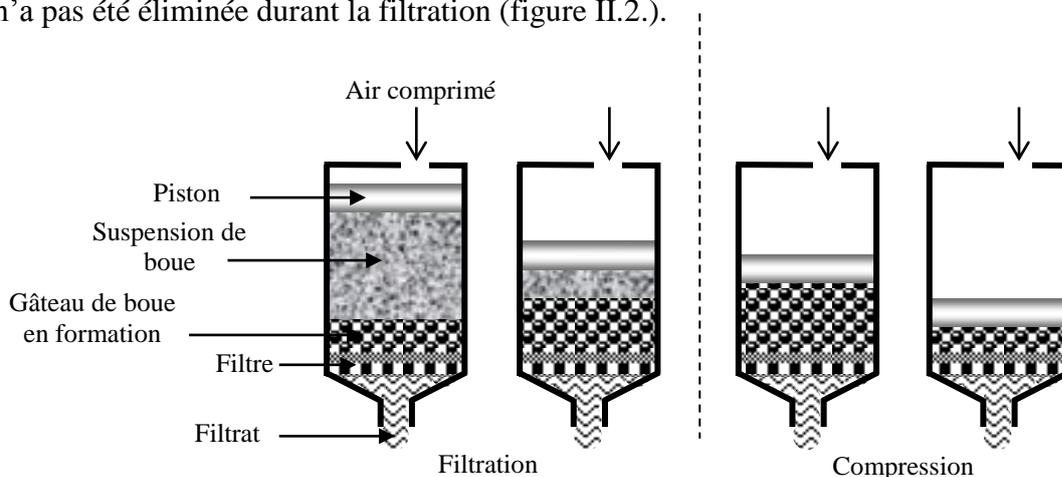


Figure II.2. : déshydratation en cellule de filtration compression

II.2.3.2. Prédiction des performances des filtres à bandes avec la CFC

Afin d'estimer la siccité en sortie d'un filtre à bandes, des études préalables de faisabilité sont généralement menées en se basant sur des essais de siccités limites réalisés à pression donnée (norme expérimentale AFNOR T 97-001). Gazbar (1993) propose la corrélation suivante pour estimer la siccité en sortie des filtres à bandes en fonction d'essais réalisés en CFC :

$$Si_f = 0,54 * Si_{limite4bar} + 6,5 \quad (R=0,80) \quad (\text{eq. II.21.})$$

Cependant, le coefficient de corrélation est médiocre, cette technique reste donc peu recommandable.

Baskerville et col. (1978) indiquent qu'en appliquant dans la CFC le même temps de séjour que celui effectif dans la zone de pressage du filtre à bandes (2 min dans leur cas) les siccités sont comparables (tableau II.2.).

Type de boue	Siccité initiale (%)	Siccité finale obtenue avec la cellule, P=0,70 bar, 2mn	Siccité finale obtenue avec la cellule, P=7 bar, 2mn	Siccité finale en sortie d'un filtre à bandes basse pression	Siccité finale en sortie d'un filtre à bandes haute pression
Boue primaire 1	10,0		35		27-31
Boue primaire 2	4,4	22	36	22-25	
Boue activée	2,0	8,2	11	9-13	
Boue digérée en anaérobie	2,7	15	26	13-20	

Tableau II.2. : comparaison des siccités obtenues en CFC et en sortie de filtres à bandes (Baskerville et col., 1978)

Pour les filtres basse pression, ces essais en cellule de filtration-compression donnent des résultats relativement corrects. Les différences observées peuvent être expliquées par les deux points suivants :

- dans la cellule, la filtration de la boue s'effectue uniquement d'un côté alors que dans la plupart des filtres à bandes les deux toiles sont filtrantes ;
- la cellule n'intègre pas le cisaillement dû au glissement des toiles au niveau des rouleaux.

Une étude plus récente (Rhemat et col., 1997), réalisée sur des boues activées de papeteries confirme ces résultats. Les auteurs montrent notamment qu'en pressant les boues à

0,91 bar pendant 2 minutes en CFC, ils obtiennent les mêmes siccités qu'en sortie de filtre à bandes.

II.3. Etude des différentes zones d'un filtre à bandes

Le filtre à bandes se compose habituellement de six parties (figure II.3.) : un bac de conditionnement, une zone d'égouttage, une zone de coincement, une zone de pressage en S, une sortie des boues et une zone de lavage des toiles. Dans cette étude, les étapes suivantes seront essentiellement détaillées :

- l'égouttage ;
- le 1^{er} rouleau (zone de coincement) ;
- la zone de pressage en S.

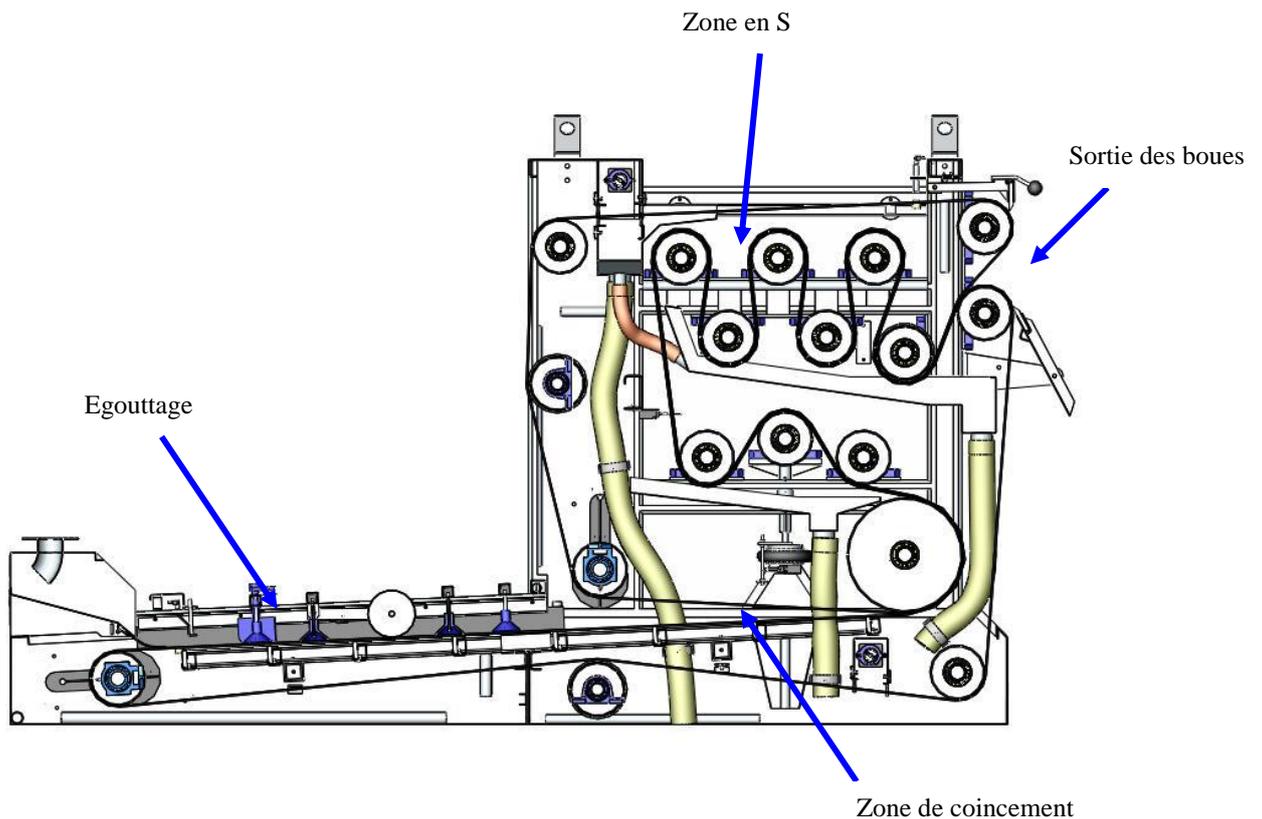


Figure II.3. : localisation des différentes zones dans un filtre à bandes

II.3.1. Le conditionnement

La filtrabilité des boues est grandement améliorée grâce à l'ajout d'agent flocculant. Dans le cas des boues résiduaires urbaines, des polymères organiques synthétiques, le plus souvent cationiques, sont préconisés. Le mélange de ces réactifs à la boue permet de former des floccs de tailles importantes (de l'ordre de quelques mm) et de faciliter ainsi la séparation solide/liquide.

Le rôle du conditionnement est essentiel pour les performances des procédés de déshydratation mécanique et notamment celles des filtres à bandes. Un conditionnement optimal doit être recherché. Si la dose de polymère n'est pas assez importante (ou mal mise en contact avec la boue), les floccs sont trop petits et colmatent les toiles. Si la dose de polymère est trop importante, la boue devient pâteuse et collante et le polymère en excès peut colmater les bandes. Dans ce deuxième cas les floccs formés sont plus fragiles et ils risquent de se rompre sous l'effet de la pression et/ou du cisaillement. Par ailleurs, l'aspect du coût du polymère doit être également pris en compte lors de l'étape de dosage (tableau II.3.).

Coût dû à la maintenance	9%
Coût dû au fonctionnement (surveillance,....)	8%
Coût dû au polymère	29%
Coût dû à l'énergie consommée	7%
Capitaux	48%

Tableau II.3. : répartition du coût de fonctionnement du filtre à bandes (Van der Roest et col., 1993).

Si la filtration s'effectue d'abord sous basse pression comme c'est le cas dans la zone de coincement des filtres à bandes, la demande en polymère n'augmente pas quand le pressage s'effectue ensuite sous pression plus élevée (zone de pressage en S, Novak et col., 1993). Par conséquent l'optimum de dosage pour l'égouttage des boues résiduaires urbaines semble être aussi l'optimum pour le pressage dans le filtre à bandes (Reitz, 1988). Cette règle reste cependant discutable si on se réfère aux travaux de Williams et col. (1990) sur des boues de charbon qui montrent une différence entre les dosages optimaux à appliquer pour réaliser au mieux chacune des étapes.

D'autre part, le protocole selon lequel le polymère est mélangé à la boue (type d'agitation, vitesse d'agitation, mode d'addition du polymère, temps de mélange, ...) est également déterminant. En effet, la taille des flocs peut être modifiée avec la variation du taux de turbulence et de cisaillement dans le bac de floculation. En règle général, le mélange doit être, dans un premier temps, assez puissant afin de bien disperser le polymère et permettre ainsi un bon contact avec la boue. Ensuite, il doit être suffisamment doux pour permettre une bonne croissance des flocs formés (sans les briser). Par conséquent, l'unité idéale de conditionnement doit fonctionner avec un taux de turbulence évoluant avec les caractéristiques des boues (Deutsch, 1987).

L'impact du mélange sur la déshydratation peut être estimé par l'intermédiaire du produit du temps de mélange t_{mel} (s) et du gradient de vitesse du mélange G_{mel} (s^{-1}). Si G_{mel} ou t_{mel} sont trop faibles ou trop importants la floculation sera mauvaise. Pour une dose de polymère donnée, le produit $G_{mel} \times t_{mel}$ optimum est généralement déterminé par des mesures de TSC. Si ce paramètre augmente, la dose de polymère doit être plus importante pour obtenir une floculation entraînant des performances identiques de déshydratation. Il est calculé pour chaque module d'agitation par l'équation suivante :

$$G_{mel} \times t_{mel} = \sqrt{\frac{2\pi \times N_{agi} C_{agi}}{V_b \mu_b}} \times t_{mel} \quad (\text{eq. II.22.})$$

Reitz (1988) préconise pour les filtres à bandes un produit $G_{mel} \times t_{mel}$ compris entre 30000 et 90000.

II.3.2. Débit d'entrée des boues dans un filtre à bandes

D'après des résultats recensés aux Etats-Unis (ASCE, 1988) sur une centaine de stations d'épuration, une corrélation donnant le débit massique des boues (L_E) à l'entrée des filtres à bandes en fonction de la siccité initiale (Si_0) des boues a pu être établie.

$$L_E = 0,03256 + 8,27 \times Si_0 \quad (R=0,719) \quad (\text{eq. II.23.})$$

avec L_E le débit massique de matières sèches déposées sur la toile ramené à la largeur de la toile ($t_{MS}.h^{-1}.m^{-1}$).

Du fait d'un coefficient de corrélation médiocre ($R=0,719$) et d'une erreur relative standard estimée à 14%, cette corrélation reste un moyen de prévision assez grossier. Cependant, elle montre nettement l'importance de la siccité initiale lors du dimensionnement des filtres à bandes.

II.3.3. La zone de drainage par gravité

La plupart des filtres à bandes possèdent avant la zone de mise en pression une zone de drainage gravitaire. Dans cette zone, l'eau de la suspension préalablement conditionnée passe à travers la toile sous l'action de la gravité, et la pression de filtration n'excède pas la hauteur d'eau de la suspension (0,5 à 2 cm). Pour de nombreux fabricants, la quantité d'eau drainée, lors de cette étape, est cruciale pour les performances du filtre à bandes. Dans le cas où la toile sur laquelle s'effectue le drainage est indépendante du filtre, on parle de table d'égouttage. Dans cette configuration il est possible d'utiliser deux vitesses de toiles différentes. Il résulte de la combinaison "table d'égouttage / filtre à bandes" une augmentation de la capacité de traitement du filtre à bandes de 30% environ et un gain de siccité de l'ordre de deux points (OTV, 1997).

Cette étape d'égouttage permet de diminuer le volume des boues jusqu'à 80% en quelques secondes. En effet, la plupart des auteurs affirment que la plus grande partie de l'eau est drainée dans les 30 à 50 premières secondes (Haworth, 1973 ; Baskerville et col., 1978 ; Poduska et col., 1980 ; Lecey et Pietila, 1983). Par conséquent, ce procédé, très simple et très économique, permet d'épaissir la boue jusqu'à 8% de siccité, voire 10 à 12% en présence d'un ou deux rouleaux de pressage en fin de table.

Des améliorations ont été apportées au cours des années sur cette étape gravitaire afin d'en améliorer les performances. En fin d'égouttage, le drainage est souvent fortement ralenti et des gouttes d'eau restent accrochées à la toile sous l'action des forces capillaires. Pour limiter cet effet, certains constructeurs utilisent une grille qui supportent la toile et qui, par frottement, facilite le décrochement de ces gouttes d'eau. D'autres fabricants préfèrent utiliser

des petits rouleaux qui provoquent moins de frottements sur la toile (Deutsch, 1987). Par ailleurs, pour améliorer la circulation de l'eau dans le gâteau en formation, les équipementiers inclinent légèrement la toile et/ou utilisent différents mécanismes pour retourner doucement la boue en formant des sillons (labourage).

En parallèle à ces avancées technologiques, plusieurs études scientifiques ont essayé de décrire le fonctionnement de cette zone en se basant sur des expériences relativement simples qui consistent à déposer de la boue sur une toile filtrante pour mesurer le volume de filtrat recueilli au cours du temps et la siccité du gâteau en fin d'égouttage (Baskerville, 1978 ; Poduska et Collins, 1980 ; Reitz, 1988, Novak et col., 1993 ; Severin et Collins, 1992 ; Wells et Savage, 1998 ; Severin et col., 1996 et 1999).

II.3.3.1. Approche empirique

Pour relier les essais réalisés en laboratoire avec une situation industrielle (fonctionnement continu), il est nécessaire de trouver une correspondance entre le débit entrant dans la zone d'égouttage Q_{susp0} et le volume de boue V_{susp0} placé sur la toile dans le dispositif de laboratoire. Dans ce but, Severin et Collins (1992) utilisent la relation suivante:

$$\frac{V_{susp0}}{\Omega} = \frac{Q_{susp0}}{l_g s_b} \quad (\text{eq. II.24.})$$

En mesurant le volume de filtrat V_f récupéré au cours du temps, ils tracent les courbes décrivant le débit de filtrat obtenu par égouttage Q_{fegout} en fonction du temps. Ainsi en posant $V_{g\infty}$ le volume de gâteau récupéré au bout d'un temps infini, ils estiment, d'après leurs mesures, une évolution caractérisée par l'équation empirique suivante :

$$\frac{d(V_{susp0} - V_f)}{dt} = -\lambda_v (V_{susp0} - V_f - V_{g\infty})^2 \quad (\text{eq. II.25.})$$

dont la forme intégrée est :

$$V_f = V_{susp0} - V_{g\infty} - \left(\lambda_v t + \left(\frac{1}{V_{susp0} - V_{g\infty}} \right) \right)^{-1} \quad (\text{eq. II.26.})$$

Ce qui en terme de hauteur de boue (h) sur la toile s'écrit :

$$h = h_{g\infty} + \left(\Omega \lambda_v t + \frac{1}{h_{susp0} - h_{g\infty}} \right) \quad (\text{eq. II.27.})$$

Avec h_{susp0} la hauteur de la suspension au-dessus du filtre à $t=0$ et $h_{g\infty}$ la hauteur du gâteau au bout d'un temps infini d'égouttage.

L'évolution du paramètre λ_v est estimée empiriquement par :

$$\lambda_v = d_1 \left(\frac{1}{V_{susp0}} + \frac{1}{V_{g\infty}} \right) + d_2 \quad (\text{eq. II.28.})$$

λ_v est donc indépendant de la concentration en boue initiale.

Il est ensuite possible de transposer ces relations obtenues au laboratoire aux machines industrielles en effectuant un bilan de matière dans lequel le filtrat est exempt de solide :

$$C_{susp0} V_{susp0} = C_{g\infty} V_{g\infty} \quad (\text{eq. II.29.})$$

En divisant cette équation par la surface du filtre, il s'écrit :

$$h_{g\infty} = h_{susp0} \times \frac{C_{susp0}}{C_{g\infty}} \quad (\text{eq. II.30.})$$

En supposant que le comportement de la boue est identique sur la zone d'égouttage et dans la cellule d'égouttage de laboratoire, il vient :

$$h_{g\infty \text{ table}} = h_{susp0 \text{ table}} \times \frac{C_{susp0 \text{ table}}}{C_{g\infty \text{ table}}} \quad (\text{eq. II.31.})$$

La concentration des boues à l'entrée de la zone d'égouttage pouvant varier, il est nécessaire de réaliser un test pour chaque modification de C_{susp0} . Cela étant difficilement envisageable, Severin et col. (1992) font l'hypothèse que $C_{g\infty}$ est constante pour de faibles variations de C_{susp0} . Cela leur permet d'estimer les performances de la table d'égouttage étudiée à partir d'une seule série d'essais réalisés en laboratoire (en modifiant seulement V_{susp0}). Ainsi, les charges surfaciques déposées dans la cellule de laboratoire et sur la zone

d'égouttage (eq. II.24.) étant identiques, ils supposent que $C_{g^\infty \text{ test}} = C_{g^\infty \text{ table}}$. Ils calculent, alors :

$$h_{g^\infty \text{ table}} = h_{\text{susp0 table}} \times \frac{C_{\text{susp0 table}}}{C_{g^\infty \text{ test}}} \quad (\text{eq. II.32.})$$

Avec

$$h_{\text{susp0 table}} = \frac{Q_{\text{susp0}}}{s_b l_g} \quad (\text{eq. II.33.})$$

$C_{g^\infty \text{ test}}$ peut être déterminée en considérant l'équation II.29. Il vient, par conséquent :

$$h_{g^\infty \text{ table}} = h_{\text{susp0 table}} \left(\frac{V_{g^\infty}}{V_{\text{susp0}}} \right)_{\text{test}} \frac{C_{\text{susp0 table}}}{C_{\text{susp0 test}}} \quad (\text{eq. II.34.})$$

En reprenant l'équation II.27. pour la table d'égouttage, en y introduisant les équations II.28., II.34. et II.24. et en remplaçant le temps par $t=L_t/s_b$ (L_t étant la longueur de la table d'égouttage), la hauteur de boue en sortie de la table d'égouttage (ou de la zone d'égouttage) h_{fin} s'écrit :

$$h_{\text{fin}} = \frac{C_{\text{susp0 table}}}{C_{\text{susp0 test}}} \frac{V_{g^\infty \text{ test}}}{\Omega} + \left(\Omega \frac{L_t}{s_b} \left(d_1 \left(\frac{l_g s_b}{Q_{\text{susp0}} \Omega} + \frac{1}{V_{g^\infty \text{ test}}} \right) + d_2 \right) + \frac{1}{\frac{Q_{\text{susp0}}}{l_g s_b} - \frac{C_{\text{susp0 table}}}{C_{\text{susp0 test}}} \frac{V_{g^\infty \text{ test}}}{\Omega}} \right)^{-1} \quad (\text{eq. II.35.})$$

Cette équation permet donc d'estimer la hauteur de la boue en fin de zone d'égouttage à partir de la connaissance du débit volumique des boues déposées sur la toile (Q_{susp0}), de la vitesse de la toile (s_b), de la largeur du gâteau l_g (qui peut être considérée en première approximation égale à la largeur des bandes l_t), de la longueur de la zone d'égouttage (L_t) et de la concentration initiale des boues en matière sèche (C_{susp0}). Les paramètres empiriques de ce modèle d_1 , d_2 , V_{g^∞} peuvent être déterminés en cellule d'égouttage par une série d'essais, pour lesquels l'évolution de la masse de filtrat récupéré est suivie pour différents volumes de boues à égoutter. Accessoirement, par conservation du volume, la siccité en fin de table d'égouttage peut être calculée grâce à la connaissance de h_{fin} .

II.3.3.2. Approche basée sur l'équation de la filtration

Afin de lever en partie l'empirisme de l'approche précédente, Severin et Grethlein (1996) appliquent la loi de Darcy à l'étape d'égouttage en écrivant, pour deux résistances en série d'épaisseur h_g (du gâteau) et e_{toile} (toile):

$$\frac{1}{\Omega} \frac{dV_f}{dt} = \frac{P}{\alpha_g \mu h_g + r_S \mu e_{toile}} \quad (\text{eq. II.36.})$$

Durant cette phase gravitaire, la pression de filtration dépend de la hauteur de la boue (figure II.4.) :

$$P = \rho g h_{susp} = \rho g (h - h_g) \quad (\text{eq. II.37.})$$

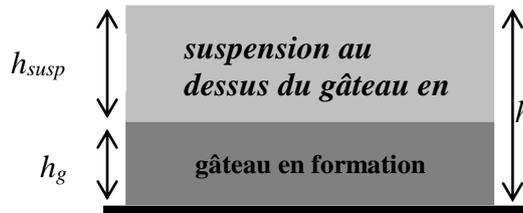


Figure II.4. :principe de l'égouttage des boues

Par ailleurs, la hauteur de la boue diminue au cours du temps et peut être décrite par le bilan suivant :

$$h_{susp} = (V_{susp0} - V_f - V_g) / \Omega \quad (\text{eq. II.38.})$$

En supposant que les volumes se conservent (la phase liquide et la phase solide étant incompressibles) et en supposant que la suspension de boue est homogène (c'est à dire que pour une même quantité de gâteau déposé sur le filtre, une même quantité de filtrat est récupérée), soit $S = \frac{V_{g\infty}}{V_{f\infty}} = \frac{V_g}{V_f}$, Severin et Grethlein écrivent à partir de l'équation II.36. :

$$\frac{dV_f}{dt} = \frac{\Omega \left(\rho g \frac{V_{susp0} - V_f - V_g}{\Omega} \right)}{\alpha_g \mu h_g + r_S \mu e_{toile}} \quad (\text{eq. II.39.})$$

puis,

$$\frac{dV_f}{dt} = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \frac{(V_{susp0} - V_f - SV_f)}{\frac{\alpha_g SV_f}{\Omega} + r_S e_{toile}} \quad (\text{eq. II.40.})$$

soit,

$$\frac{dV_f}{dt} = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \frac{V_b - (1+S)V_f}{\left(\frac{S\alpha_g V_f}{\Omega} \right) + r_S e_{toile}} \quad (\text{eq. II.41.})$$

En intégrant sur t, l'équation II.41. prend la forme :

$$K\Omega \left(\frac{V_{f\infty} + V_{g\infty}}{V_{f\infty} V_{g\infty}} \right) t = -\frac{V_f}{V_{f\infty}} - \ln \left(1 - \frac{V_f}{V_{f\infty}} \right) - \gamma \ln \left(1 - \frac{V_f}{V_{f\infty}} \right) \quad (\text{eq. II.42.})$$

avec $K = \frac{\rho g}{\mu \alpha_g}$, $\gamma = \frac{K\Omega e_{toile}}{V_{g\infty} k}$ ($k = \frac{\rho g}{\mu r_S}$).

Cette équation donne donc l'évolution du volume de filtrat recueilli au cours du temps pendant la phase d'égouttage en laboratoire. La connaissance du volume de filtrat permet de calculer l'évolution de la siccité de la boue pour un filtrat exempt de matière sèche selon l'équation suivante :

$$Si(t) = \frac{Si_0 M_{susp0}}{M_{susp0} - \rho_e V_f} \quad (\text{eq. II.43.})$$

En supposant que le comportement de la boue est identique en cellule de laboratoire et sur la table d'égouttage industrielle, ils peuvent alors déterminer la siccité en sortie de table, en remplaçant t par L_t/s_b dans l'équation II.42. puis en utilisant l'équation II.43.

L'utilisation de l'équation II.42. nécessite cependant l'estimation des paramètres $K\Omega$, γ et $\frac{V_{g\infty} + V_{f\infty}}{V_{f\infty} V_{g\infty}}$. Celle-ci s'effectue de façon empirique en déterminant, dans un premier temps, $\frac{k}{e_{toile}}$ pour la toile (grâce à un test annexe de mesure de la perméabilité), afin de calculer le coefficient γ . Puis, en suivant expérimentalement l'évolution du débit de filtrat

avec le temps dans la cellule d'égouttage pour une série d'essais, $K\Omega$ et $\frac{V_{g\infty} + V_{f\infty}}{V_{f\infty}V_{g\infty}}$ peuvent être évalués pour la boue étudiée. Par conséquent, bien que Severin et Grethlein soient partis d'une base théorique, l'équation II.42. fait intervenir des paramètres qu'il n'est possible de connaître que par une méthode empirique.

De plus cette approche néglige la diminution de la perméabilité du gâteau au cours de l'égouttage. Dès lors, le passage de l'eau sous la seule action de la gravité est limité. Une nappe d'eau peut se former alors au-dessus du gâteau. Pour intégrer ce phénomène au modèle précédent, Severin et col. (1999) font l'hypothèse qu'une mince couche de boue se dépose instantanément sur la toile, au début de la filtration, et augmente fortement la résistance à la filtration de l'ensemble.

Ainsi, en appelant V_B le volume de ce film de boue et en supposant que la suspension de boue au-dessus du gâteau en formation reste homogène, soit $\frac{V_{g\infty} - V_B}{V_{f\infty}} = \frac{V_g - V_B}{V_f}$, ils déduisent

l'évolution du volume de gâteau au cours de l'égouttage par la relation suivante :

$$V_g = V_B + (V_g - V_B) = V_B + (V_{g\infty} - V_B) \frac{V_f}{V_{f\infty}} \quad (\text{eq. II.44.})$$

Ainsi,

$$h_g = \frac{V_B}{\Omega} + \frac{(V_{g\infty} - V_B) V_f}{\Omega V_{f\infty}} \quad (\text{eq. II.45.})$$

Ils écrivent alors en intégrant ces deux dernières expressions dans l'équation II.39. que :

$$\frac{dV_f}{dt} = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \frac{\left(V_{susp0} - V_B - (V_{g\infty} - V_B) \frac{V_f}{V_{f\infty}} - V_f \right)}{\left(\frac{\alpha_g (V_{g\infty} - V_B)}{\Omega} \left(\frac{V_f}{V_{f\infty}} \right) + \frac{\alpha_g V_B}{\Omega} + r_S e_{toile} \right)} \quad (\text{eq. II.46.})$$

En remarquant que $V_{susp0} = V_{g\infty} + V_{f\infty}$ (conservation des volumes), il vient :

$$\frac{dV_f}{dt} = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \frac{\left(V_{g\infty} + V_{f\infty} - V_B - (V_{g\infty} - V_B) \frac{V_f}{V_{f\infty}} - V_f \right)}{\left(\frac{\alpha_g (V_{g\infty} - V_B)}{\Omega} \left(\frac{V_f}{V_{f\infty}} \right) + \frac{\alpha_g V_B}{\Omega} + r_{Se\text{toile}} \right)} \quad (\text{eq. II.47.})$$

Soit sous forme intégrée :

$$-\frac{V_f}{V_{f\infty}} \left(1 - \frac{V_B}{V_{g\infty}} \right) - (1 + \gamma) \ln \left(1 - \frac{V_f}{V_{f\infty}} \right) = K\Omega t \left(\frac{V_{g\infty} - V_B + V_{f\infty}}{V_{f\infty} V_{g\infty}} \right) \quad (\text{eq. II.48.})$$

Deux cas limites sont alors discutés:

- $V_B=0$, c'est à dire que la nappe n'apparaît pas et ils retiennent alors l'équation II.42.
- $V_B=V_{g\infty}$, toute la boue se dépose instantanément et l'équation II.48. peut se simplifier sous la forme :

$$-(1 + \gamma) \ln \left(1 - \frac{V_f}{V_{f\infty}} \right) = K\Omega t \left(\frac{V_{g\infty} + V_{f\infty}}{V_{f\infty} V_{g\infty}} - \frac{1}{V_{f\infty}} \right) \quad (\text{eq. II.49.})$$

L'équation II.48. (ou dans certains cas particuliers l'équation II.49.) permet donc de caractériser la zone d'égouttage en calculant le volume de filtrat en fonction du temps dans le cas où une nappe d'eau apparaît en fin d'égouttage au-dessus du gâteau. La connaissance du volume de filtrat permet de connaître la siccité en fin d'égouttage (eq. II.43.) et donc de déterminer la performance de déshydratation de l'étape d'égouttage.

Pour ce faire, $K\Omega$ est déterminé au laboratoire dans les conditions où la nappe n'apparaît pas ($V_B=0$). Les courbes théoriques données par l'équation II.48. sont ensuite tracées pour différents taux $\frac{V_B}{V_{g\infty}}$, avec le paramètre $K\Omega$ calculé précédemment. En

augmentant $V_{\text{susp}0}$ lors des différents tests en laboratoire, Severin et col. (1999) font apparaître la nappe d'eau au-dessus du gâteau en fin d'égouttage. Ils tracent, dans ces conditions, la courbe expérimentale obtenue donnant l'évolution du volume de filtrat recueilli en fonction du temps. Cette courbe est alors comparée aux courbes théoriques précédentes afin de

déterminer le paramètre $\frac{V_B}{V_{g\infty}}$. Cependant, il est à noter que certaines courbes expérimentales ont la forme décrite par l'équation II.48. sans que la nappe n'apparaisse visuellement.

Une troisième voie pour la modélisation de la phase d'égouttage est proposée par Wells et Savage (1998). Elle s'appuie sur la loi de Darcy en négligeant la résistance de la toile, en considérant que la pression appliquée sur le gâteau n'est due qu'à la hauteur d'eau au-dessus du gâteau soit $\Delta P = \rho g h_{susp}$ et en considérant que $\frac{dV_f}{dt} = -\Omega \frac{dh_{susp}(t)}{dt}$ (conservation des volumes). Ainsi, il vient :

$$-\Omega \frac{dh_{susp}}{dt} = \frac{\beta \Omega \Delta P}{\mu h_g} \quad (\text{eq. II.50.})$$

La hauteur du gâteau peut être évaluée par la conservation de la masse de solide contenue dans la suspension de boue initiale ; une partie se retrouvant dans le gâteau, l'autre restant dans la suspension au-dessus du gâteau, les pertes de solides dans le filtrat étant, quant à elles, négligées :

$$h_{susp0} \Omega C_{susp0} = h_{susp} C_{susp} \Omega + h_g C_g \Omega \quad (\text{eq. II.51.})$$

En supposant que la suspension est homogène, que sa concentration ne varie pas dans le temps ($C_{susp} = C_{susp0}$), la hauteur du gâteau peut s'exprimer sous la forme :

$$h_g = \frac{C_{susp0}}{C_g} (h_{susp0} - h_{susp}) \quad (\text{eq. II.52.})$$

et la loi de Darcy s'écrit alors :

$$\frac{dh_{susp}}{dt} = - \frac{\beta \rho g h_{susp}}{\mu \frac{C_{susp0}}{C_g} (h_{susp0} - h_{susp})} \quad (\text{eq. II.53.})$$

soit encore :

$$\frac{(h_{susp0} - h_{susp}) dh_{susp}}{h_{susp}} = \Phi dt \quad (\text{eq. II.54}) \quad \text{avec} \quad \Phi = \frac{-\beta}{\mu} \frac{\rho g}{\frac{C_{susp0}}{C_g}} \quad (\text{eq. II.55.})$$

Afin d'obtenir dans un premier temps un modèle assez simple, Wells et Savage considèrent que β et C_g sont indépendants du temps. Ainsi la forme intégrée de l'équation II.54. peut s'écrire selon l'équation suivante :

$$h_{susp} e^{\left(-\frac{h_{susp}}{h_{susp0}}\right)} = h_{susp0} e^{\left(\frac{\Phi t}{h_{susp0}} - 1\right)} \quad (\text{eq. II.56.})$$

Soit encore :

$$t = \frac{\ln\left(\frac{h_{susp}}{h_{susp0}}\right) - \frac{h_{susp}}{h_{susp0}} + 1}{\frac{\Phi}{h_{susp0}}} \quad (\text{eq. II.57.})$$

Ces deux équations permettent donc de caractériser l'égouttage en donnant l'évolution de la hauteur de suspension au-dessus du gâteau en formation en fonction du temps. Toutefois, elles nécessitent la connaissance de deux paramètres obtenus de façon empirique : la perméabilité β du gâteau et C_g . Ces deux paramètres sont alors déterminés en réalisant des essais en cellule d'égouttage et en traçant l'évolution de h_{susp} avec le temps.

Comme il est difficile de mesurer l'évolution de h_{susp} en fonction du temps en raison de la rapidité de l'égouttage des boues, le suivi de l'évolution de volume de filtrat avec le temps est préconisé. En effet $h = h_g + h_{susp}$ et d'après l'équation II.51., il vient :

$$h_g = h_{susp0} \frac{C_{susp0}}{C_g} - h_{susp} \frac{C_{susp0}}{C_g} \quad (\text{eq. II.58.})$$

Par conséquent :

$$h = h_{susp0} \frac{C_{susp0}}{C_g} + h_{susp} \left(1 - \frac{C_{susp0}}{C_g}\right) \quad (\text{eq. II.59.})$$

soit :

$$h = h_{susp0} \left(\frac{C_{susp0}}{C_g} + \left(1 - \frac{C_{susp0}}{C_g}\right) e^{\left(\frac{\Phi t}{h_{susp0}} - 1\right)} \right) \quad (\text{eq. II.60.})$$

Or $h_{susp0} - h(t) = \frac{1}{\Omega} V_f(t)$, donc

$$V_f = V_{susp0} \left(1 - \left(\frac{C_{susp0}}{C_g} + \left(1 - \frac{C_{susp0}}{C_g} \right) e^{\left(\frac{\Phi \Omega t}{V_{susp0}} - 1 \right)} \right) \right) \quad (\text{eq. II.61.})$$

Cette équation permet donc de caractériser l'égouttage en suivant le volume de filtrat recueilli au cours du temps.

En supposant que la boue se comporte de façon identique dans la cellule de laboratoire et sur la zone d'égouttage, la siccité en fin d'égouttage peut être connue grâce à V_f en utilisant l'équation II.43. et en remplaçant le temps par L_t/s_b dans l'équation II.61.

Une approche plus réaliste du phénomène consiste cependant à considérer la variation de β et C_g avec le temps. Pour cela, Wells et Savage (1998) introduisent la compressibilité volumique du gâteau χ définie par $\chi = -\frac{\partial \varepsilon_g}{\partial P} = \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial P_s}$, avec $P_s = \Delta P - P_1$ la tension effective sur le gâteau ("pression sur le solide") et P_1 la pression hydraulique de l'eau. Par ailleurs, ils choisissent de décrire le comportement de β et χ selon les lois empiriques suivantes :

$$\beta = m_1 \exp(m_2 \varepsilon_g) \quad (\text{eq. II.62.}) \quad \text{et} \quad \chi = m_3 \exp(m_4 \varepsilon_g) \quad (\text{eq. II.63.})$$

et il vient, alors :

$$\frac{d\varepsilon_g}{m_3 \exp(m_4 \varepsilon_g)} = -dP = -\rho g dh_{susp} \quad (\text{eq. II.64.})$$

d'où :

$$\varepsilon_g = -\frac{1}{m_4} \ln \left(-m_3 m_4 \rho g (h_{susp} - h_{susp0}) + \exp(-m_4 \varepsilon_{susp0}) \right) \quad (\text{eq. II.65.})$$

car à $t=0$ $\varepsilon_g = \varepsilon_{susp0}$ la porosité de la boue. Ainsi, en reprenant l'équation II.53. et en posant $C_{susp0} = \rho_s(1-\varepsilon_{susp0})$, ils obtiennent :

$$\frac{dh_{susp}}{dt} = \frac{-m_1 \rho g h_{susp} \rho_s \exp(m_2 \varepsilon_g) (1 - \varepsilon_g)}{\mu C_{susp0} (h_{susp} - h_{susp0})} \quad (\text{eq. II.66.})$$

qui s'écrit aussi :

$$\frac{dh_{susp}}{dt} = -m_1 \rho h_{susp} g \left[\exp \left(-\frac{m_2}{m_4} \ln \left(-m_4 m_3 \rho g (h_{susp} - h_{susp0}) + \exp(-m_4 \varepsilon_{susp0}) \right) \right) \right]$$

$$\times \frac{\left[1 + \frac{1}{m_4} \ln \left(-m_4 m_3 \rho g (h_{susp} - h_{susp0}) + \exp(-m_4 \varepsilon_{susp0}) \right) \right]}{\mu \rho_S (1 - \varepsilon_{susp0}) (h_{susp0} - h_{susp})}$$

(eq. II.67.)

Par conséquent, le suivi de h_{susp} en fonction du temps permet de déterminer les constantes a_1, a_2, a_3, a_4 et donc β et ε_g . Le suivi de h_{susp} peut être remplacé par celui du volume de filtrat afin de faciliter les mesures mais l'introduction de V_f dans l'équation II.67. complique considérablement son expression.

II.3.3.3. Conclusion

Le modèle proposé par Wells et Savage (1998) bien qu'ayant le plus large fondement théorique présente plusieurs inconvénients :

- il ne prend pas en compte la perméabilité des toiles ;
- les lois de comportement de χ et β choisies ne sont pas celles habituellement utilisées pour les suspensions fortement compressibles ;
- il est difficile de connaître C_{susp} pour la suspension au-dessus du gâteau, car une fois la boue conditionnée, la suspension n'est plus homogène et lors de la filtration il est peu probable que $C_{susp0} = C_{susp}$. Par ailleurs, ce modèle nécessite de déterminer expérimentalement un grand nombre de paramètres. A l'opposé, le modèle proposé par Severin et col. (1999) semble plus facile à utiliser : il ne fait pas intervenir la concentration au-dessus du gâteau et il permet la détermination de "seulement" trois paramètres $V_{g\infty}, V_B, K$ caractérisant le couple boue-toile. La connaissance de ces trois paramètres doit permettre d'estimer S_{if}, V_f et h_{fin} en sortie de la zone d'égouttage quels que soient les paramètres de fonctionnement (s_b, Q_E, L_t et l_g).

II.3.4. Le premier rouleau

A l'entrée de la zone de pressage la boue égouttée est amenée vers un rouleau qui entraîne une deuxième bande filtrante. La boue est alors comprimée entre ces deux toiles. Plusieurs fabricants pensent que cette zone joue un rôle non négligeable sur les performances du filtre et que plus cette zone est longue, meilleure est la déshydratation (Deutsch, 1987). Selon eux, la majeure partie de l'eau restant dans le gâteau après égouttage est éliminée dans cette zone. D'ailleurs, Galla (1996) a observé que l'épaisseur de la boue ne variait quasiment plus après ce rouleau. Il est généralement recommandé que le diamètre de ce premier rouleau soit important afin de limiter la pression appliquée sur la boue et d'éviter ainsi le débordement de la boue par les côtés des toiles.

Dans le but de reproduire en laboratoire le comportement de la boue dans cette zone, Reitz (1988) et Novak et col. (1993) ont modifié une CFC classique afin de pouvoir filtrer la boue par le bas et par le haut. Ils ont observé qu'une étape d'égouttage gravitaire d'une minute suivie d'une étape de filtration sous pression (à 0,7 bar) de deux minutes permet de retrouver les performances des filtres à bandes qu'ils étudiaient. Toutefois, ces études ne donnent pas de règle "universelle" pour transposer les résultats obtenus en laboratoire avec les différents paramètres de fonctionnement d'un filtre à bandes industriel.

Pour remédier à cela, Severin et col. (1998) ont déterminé le temps de séjour (t_{coinc}) de la boue dans cette zone, où la boue passe d'une pression nulle (zone d'égouttage) au pressage imposé par le 1^{er} rouleau (figure II.5.).

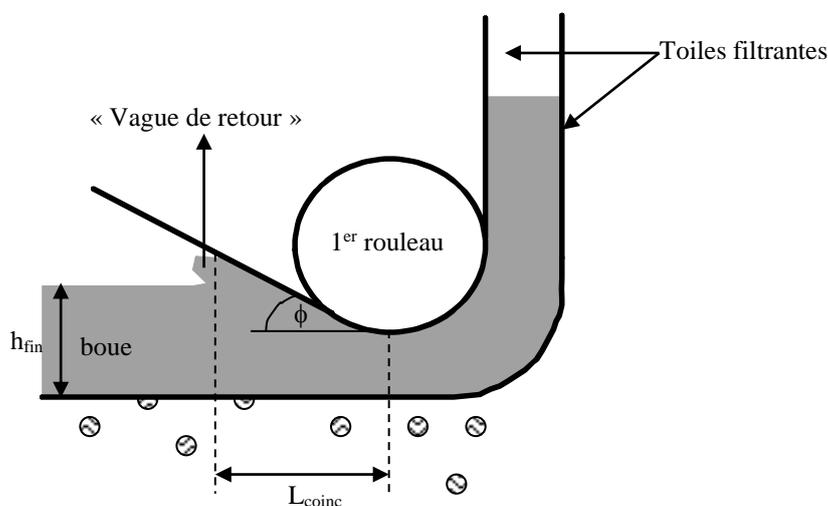


Figure II.5. : schéma du premier rouleau

D'après la figure II.5., t_{coinc} s'écrit :

$$t_{coinc} = \frac{L_{coinc}}{s_b} \quad (\text{eq. II.68.})$$

avec:

$$L_{coinc} = \frac{h_{fin}}{\tan(\phi)} \quad (\text{eq. II.69.})$$

En posant $h_{g\infty}$, la hauteur du gâteau après un temps infini de drainage par gravité, la hauteur du gâteau obtenue après une durée d'égouttage t peut s'écrire $h_{fin} = h_{g\infty} +$ la hauteur d'eau restant dans le gâteau (h_L). Ainsi :

$$h_L = \frac{\text{Volume d'eau éliminable dans le gâteau au temps } t}{\text{Aire de la surface filtrante}} = \frac{V_{f\infty} - V_f}{\text{Aire de la surface filtrante}} \quad (\text{eq. II.70.})$$

En considérant le paramètre théorique h_{f0} (hauteur de filtrat dans le volume initiale de boue), ils écrivent :

$$\text{Aire de la surface filtrante} = \frac{V_{f\infty}}{h_{f0}} \quad (\text{eq. II.71.})$$

Dès lors la hauteur de boue à l'entrée du 1^{er} rouleau peut s'exprimer sous la forme :

$$h_{fin} = h_{g\infty} + \frac{V_{f\infty} - V_f}{V_{f\infty}} h_{f0} = h_{g\infty} + \left(1 - \frac{V_f}{V_{f\infty}}\right) h_{f0} \quad (\text{eq. II.72.})$$

Severin et col. (1998) cherchent à exprimer cette hauteur en fonction du débit d'entrée des

boues Q_{susp0} . Pour cela, ils introduisent $S = \frac{V_{g\infty}}{V_{f\infty}}$, et écrivent alors, $S = \frac{V_{g\infty}}{V_{f\infty}} = \frac{Q_{g\infty}}{Q_{f\infty}} = \frac{h_{g\infty}}{h_{f0}}$

(soit $1 + S = \frac{h_{f0} + h_{g\infty}}{h_{f0}}$). Ainsi par conservation des débits volumiques ($Q_{susp0} = Q_{g\infty} + Q_{f\infty}$),

ils obtiennent :

$$\frac{Q_{susp0}}{l_g s_b} = h_{f0} + h_{g\infty} \quad (\text{eq. II.73.})$$

où $l_g s_b$ représente la surface de toile réellement impliquée dans l'égouttage durant le temps t .

h_{fin} peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$h_{fin} = (h_{f0} + h_{g\infty}) \left(\frac{h_{g\infty}}{h_{f0} + h_{g\infty}} + \frac{\left(1 - \frac{V_f}{V_{f\infty}}\right) h_{f0}}{h_{f0} + h_{g\infty}} \right) = \frac{Q_{susp0}}{l_g s_b} \left(\frac{S}{1+S} + \frac{1 - \frac{V_f}{V_{f\infty}}}{1+S} \right) = \frac{Q_{susp0}}{l_g s_b} \left(\frac{1+S - \frac{V_f}{V_{f\infty}}}{1+S} \right)$$

(eq. II.74.)

En reprenant l'équation II.69. puis l'équation II.68., le temps de séjour dans la zone de coincement (t_{coinc}) peut s'exprimer en fonction du débit entrant dans le filtre à bandes (entrant, en fait, dans la zone d'égouttage du filtre à bandes) par :

$$t_{coinc} = \left(\frac{1+S - \frac{V_f}{V_{f\infty}}}{1+S} \right) \frac{Q_{susp0}}{l_g s_b \tan(\phi)} \quad (\text{eq. II.75.})$$

Un test de filtration par gravité, facilement réalisable en laboratoire donne accès à $V_{f\infty}$, S et V_f recueilli au temps t (t correspondant à la longueur de la zone d'égouttage soit L_t/s_b) et permet alors l'estimation de t_{coinc} . Cependant ce temps, ainsi calculé, ne prend pas en compte le phénomène de "vague de retour" caractérisant le retour en arrière de la boue dû à la différence de pression appliquée sur la boue entre la zone d'égouttage et la zone de coincement. De plus cette dernière équation suppose implicitement que l_g reste constant en entrant dans la zone de coincement ce qui n'est généralement pas le cas dans cette partie du filtre à bandes où on observe couramment un étalement de la boue sur les côtés des toiles (étalement couramment appelé fluage).

Généralement t_{coinc} est de l'ordre de quelques secondes, mais son calcul reste intéressant dans une perspective de modélisation des filtres à bandes puisque cette zone joue un rôle essentiel dans la structuration et l'étalement du gâteau.

II.3.5. La zone en S

II.3.5.1. Tension de toile

Les toiles des filtres à bandes sont généralement tendues par des ressorts ou des vérins (pneumatiques ou hydrauliques). Dans le cas des vérins, il est possible de calculer la force fournie à la toile F :

$$F = 2 * P_{\text{vérin}} * S_{\text{vérin}} \quad (\text{eq. II.76.})$$

Le facteur 2 prend en compte le fait qu'il y a généralement deux vérins. Un bilan de force (figure II.6.) montre alors que la tension de la toile (T_{toile}) est égale à $F/2$.

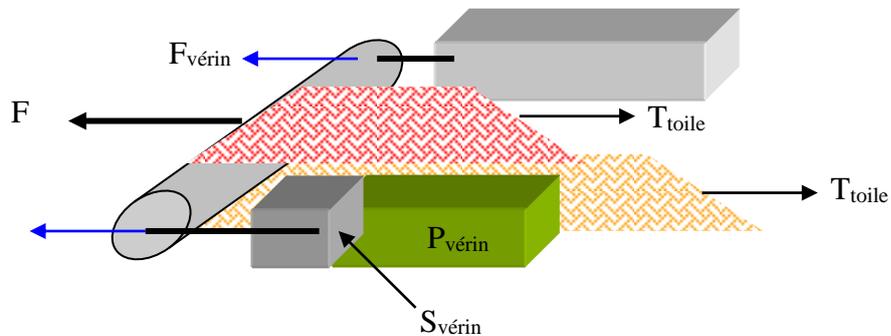


Figure II.6. : bilan de force sur la toile

Pour des raisons évidentes de sécurité, la tension fournie aux toiles est, généralement, 8 à 40 fois inférieure à la tension de rupture donnée par les constructeurs (environ 200 kg.cm^{-1}), soit environ 5 à 40 kg.cm^{-1} (Austin, 1978).

II.3.5.2. Pression de filtration

La plupart des travaux réalisés sur les filtres à bandes estiment que la pression appliquée sur la boue au contact d'un rouleau par :

$$P = \frac{2 \sum F}{D l_t} \quad (\text{eq. II.77.})$$

avec l_t la largeur de la toile, D le diamètre du rouleau et ΣF la somme des forces normales au rouleau (tension de la toile, tension élastique de la toile, couple dû au frottement de la toile sur le rouleau entraînant sa rotation). En négligeant l'élasticité de la toile et faisant l'hypothèse que le rouleau est fixe dans le filtre à bandes (ce qui n'est pas exactement vrai), la notion de tension de toile est classiquement introduite. Ainsi en posant $T_{\text{toile}} = \Sigma F$, il vient :

$$P = \frac{2T_{\text{toile}}}{Dl_t} \quad (\text{eq. II.78.})$$

(Prinssen, 1982 ; Tokunaga et col., 1983 ; Galla, 1996)

D'après cette équation, la pression sur la boue augmente si le diamètre du rouleau de pressage diminue et si la pression appliquée dans les vérins augmente.

Sur la plupart des machines, le diamètre des rouleaux est compris entre 10 et 40 cm. Ainsi pour un rouleau de 10 cm de diamètre et une tension de toile de 10 kg.cm^{-1} , la pression calculée (appliquée sur les boues) est égale à 0,2 bar. Cette valeur est très éloignée des pressions habituellement considérées dans les filtres à bandes (voir chapitre I). En raison d'une forte incertitude sur ΣT , Halde (1980) pense que l'utilisation de l'équation II.78. sous-estime la pression de 13% à 50% par rapport à la valeur réelle. De plus, les mesures de pression de Badgular et Chiang (1989) réalisées sur un filtre à bandes en présence de boue, avec deux techniques différentes (un mini capteur de pression et un film sensible à la pression), montrent que la pression mesurée est 8 à 10 fois supérieure à la pression calculée par l'équation II.78. Ils proposent alors la corrélation suivante pour calculer la pression P (en bar) appliquée sur les boues :

$$P = 3,59 + 0,39 P_{\text{vérin}} \quad (\text{eq. II.79.})$$

De plus, Badgular et Chiang (1989) montrent que la pression n'est pas uniforme sur le rouleau. Ils observent aussi que la pression mesurée sur un rouleau de grand diamètre peut être plus importante que celle mesurée sur un rouleau de diamètre inférieur contrairement à ce que suggère l'équation II.75. Il semble, en effet, que la valeur de la pression appliquée sur les boues au niveau d'un rouleau dépende de sa position dans le filtre à bandes.

II.3.5.3. Le cisaillement

Très souvent, les équipementiers parlent du cisaillement des boues dans les filtres à bandes. En effet, en considérant que les deux toiles du filtre ont la même vitesse, le point A doit parcourir un chemin plus court que le point B pour sortir de la zone non linéaire (figure II.7.), ce qui entraîne une déformation de la boue.

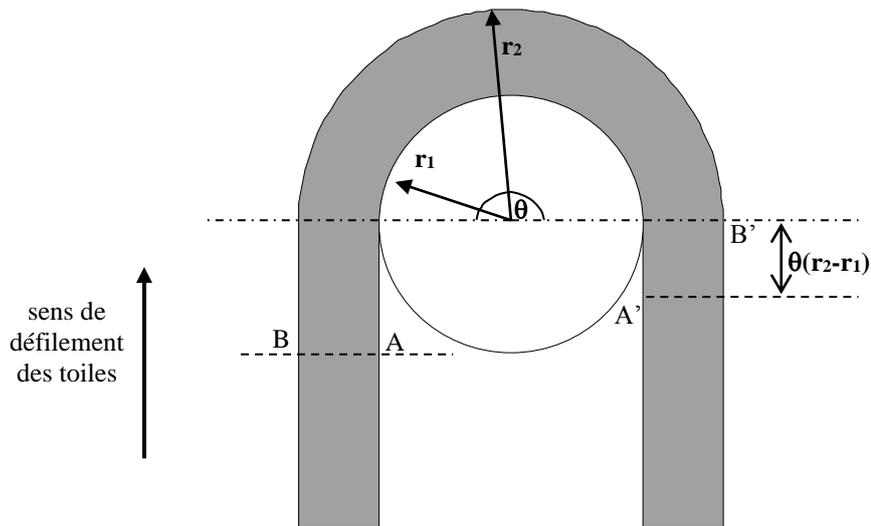


Figure II.7. : principe du cisaillement

Au rouleau suivant, les rôles sont inversés, B va plus vite que A, on parle, donc, de cisaillement alterné. D'après certains fabricants, ce phénomène améliorerait la compression.

En vue d'étudier (au laboratoire) l'impact de cet effet de cisaillement, plusieurs auteurs ont modifié la cellule de filtration compression en permettant la rotation du piston. Ainsi, Halde (1980) et Liebhart et Koenders (2000) ont observé que la rotation d'un piston rugueux provoque une nette amélioration de la filtration sur des boues résiduelles urbaines (Halde, 1980) et sur des suspensions de mica, de kaolin et d'oxyde de titane (Liebhart et Koenders, 2000). Les vitesses de rotation préconisées pour ces études sont lentes (4-16 rpm) de façon à réarranger les particules sans éroder le gâteau (Wakeman et col., 2000).

La porosité du gâteau après sa compression diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation du piston pour des suspensions de kaolin et de TiO_2 . Par ailleurs, à même vitesse de rotation, la siccité du gâteau diminue avec une augmentation de la concentration de la

suspension alors que sans rotation du piston, l'augmentation de la concentration n'a quasiment pas d'effet sur la porosité (Wakeman et col., 2000).

Ces différentes études ne donnent que des résultats préliminaires sur l'impact du cisaillement durant le pressage. Il semble nécessaire d'approfondir cette démarche en étudiant le cas particulier des boues de station d'épuration et en réalisant une large campagne expérimentale afin de quantifier le rôle du cisaillement à différentes périodes du pressage. Ceci devrait permettre de mieux définir les stratégies de conception ou d'utilisation des filtres à bandes.

II.3.5.4. Simulation de la zone de pressage en S grâce à des pilotes de laboratoire

Peu d'études se sont attachées à décrire et à simuler cette partie complexe des filtres à bandes. Les quelques travaux réalisés dans ce domaine se sont concentrés sur l'impact de la floculation des boues sur le pressage. Ainsi Reitz (1988) a recherché les optimums de dosage en fonction des différentes zones du filtre à bandes (égouttage, zone du 1^{er} rouleau et zone en S). Pour cela, un pilote, simulant la zone en S a été mis au point (figure II.8.).

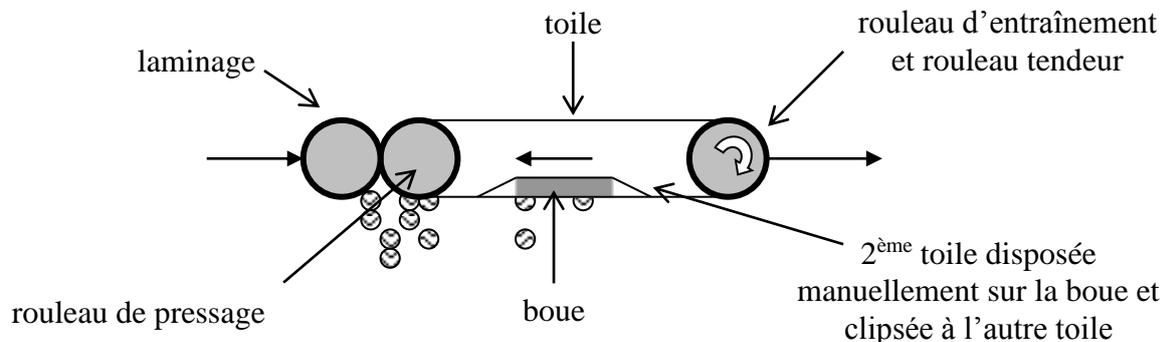


Figure II.8. : schéma simplifié du pilote de Reitz (1988)

L'ensemble des essais réalisés sur ce pilote indique un gain de siccité de 2 à 3 points entre le premier passage et le quatrième passage de la boue au niveau du rouleau de presse. Les passages supplémentaires n'ayant pas d'effet significatif sur la siccité finale, il semblerait

que 4 rouleaux de pressage soient suffisants pour déshydrater les boues résiduaire urbaine dans un filtre à bande (Novak, 2001).

Toujours dans l'optique de relier la floculation aux performances dans la zone de pressage, d'autres auteurs (Severin et col., 1992 ; Emery, 1994 ; Galla, 1996) ont mis au point un appareil de laboratoire assez différent de celui proposé par Reitz (figure II.9.). Ce dispositif nommé "Crown Press" est constitué d'un châssis supportant un demi-cylindre perforé permettant de drainer l'eau. La boue est déposée entre deux toiles fixées à ce cylindre. Seule la toile inférieure est filtrante. La pression est appliquée sur la boue en tirant la toile supérieure contre le cylindre, assurant ainsi le pressage de la boue. Lors de la mise en tension de la toile supérieure un léger cisaillement est produit au niveau de la boue.

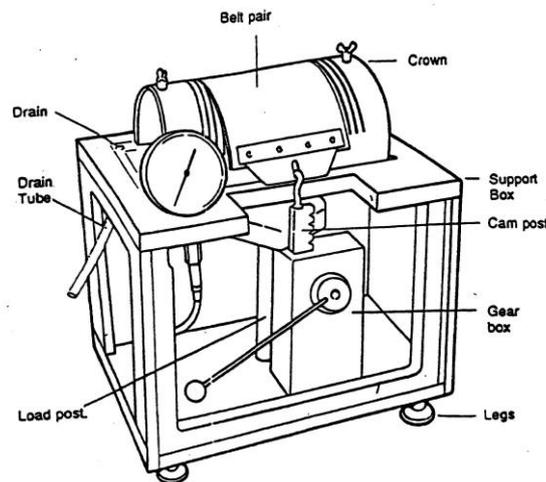


Figure II.9. : schéma du dispositif nommé "Crown Press" (Severin et col., 1998)

En négligeant l'élasticité de la toile et en faisant l'hypothèse que le rouleau est fixe dans le filtre à bande, Galla (1996) et Severin et col. (1998) utilisent l'équation II.78. pour relier la pression appliquée sur la "Crown Press" à celle des filtres industriels :

$$\frac{T_{toile\ crown}}{D_{crown} l_{t\ crown}} = \frac{T_{toile\ filtre\ à\ bande}}{D_{filtre\ à\ bande} l_{t\ filtre\ à\ bande}} \quad (\text{eq. II.80.})$$

Galla et col. (1996, 1997) proposent notamment d'utiliser la "Crown Press" pour prévoir le fonctionnement d'installations industrielles. Ils extrapolent pour cela leurs résultats

obtenus en laboratoire à la zone de pressage en considérant une pression $P = \frac{2T_{toile}}{l_t D}$

(pression maximum estimée 0,2 bar) appliquée pendant un temps $t_p = \frac{D\theta}{2s_b}$ au niveau de

chaque rouleau (avec θ l'angle d'enroulement de la toile autour du rouleau en radian et s_b la vitesse des toiles). Ils considèrent, par ailleurs, qu'aucune pression n'est appliquée sur la distance de toile séparant deux rouleaux. Leurs études réalisées sur plusieurs filtres à bandes fonctionnant avec des boues différentes, montrent que la "Crown Press" donne des siccités finales très proches de celles obtenues sur les matériels industriels testés (tableau II.4.).

Lieu	Type de boue	Type de filtre	Siccité initiale de la boue (%)	Nombre de tests	Siccité finale (%)	Déviatoin standard
Tennessee Eastman Company	Boue activée d'industrie chimique	Carter Press	2,11-2,53	3	13,6	0,2
		Crown Press	2,11-2,53	13	14,0	,3
Lansing, Michigan	Boue urbaine primaire	Envirex 3700	2,6-3,2	3	24,8	0,3
		Crown Press	2,6-3,2	4	24,2	0,4
Elmhurst, Illinois	Boue urbaine digérée en anaérobie	Envirex 2700	1,7-2,2	5	15,6	0,2
		Crown Press	1,7-2,2	4	15,9	0,3
N.E. Urbana, Illinois	Boue urbaine digérée en anaérobie	Carter Press	3-4	7	13,7	1,01
		Crown Press	3-4	7	13,1	0,88

Tableau II.4. : comparaison des performances entre des filtres à bandes et la "Crown Press" (Severin et col., 1998)

De plus, le suivi de la siccité de la boue, rouleau après rouleau dans les installations testées révèle la "Crown Press" comme un bon outil de laboratoire pour l'études des filtres à bandes (figure II.10.). Cependant les mesures du profil de siccité le long du filtre à bandes industriel et sur la "Crown Press" n'ayant pas été réalisées en parallèle (le même jour), un doute subsiste quant à l'extrapolation de ces résultats.

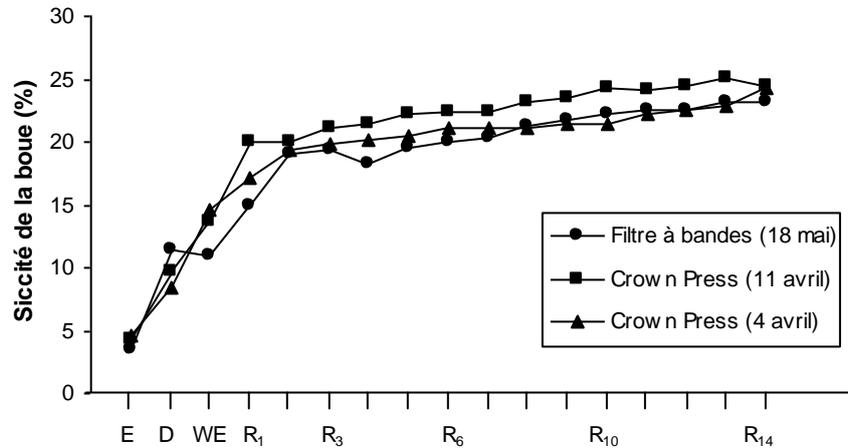


Figure II.10. : comparaison des performances entre un filtre à bandes (14 roller Envirex press) et la "Crown Press" pour une boue digérée en anaérobie, zone par zone dans le filtre (Galla, 1996)
 (E entrée du filtre, D : zone de drainage par gravité, WE : «zone du 1^{er} rouleau », R₁ : après 1^{er} rouleau, R₁₄ : 14^{ème} et dernier rouleau)

Par ailleurs, un test a été mis au point par Galla (1996) afin de prédire la siccité obtenue par un filtre à bandes en fonction de sa toile, de la boue et de son conditionnement. La boue conditionnée est pressée très rapidement dans la "Crown Press" en augmentant la pression jusqu'à atteindre la pression limite définie par un état d'encrassement donné de la toile. Cette pression limite est considérée comme la pression maximale de fonctionnement. Une série d'essais réalisés à différentes pressions et pendant différentes durées Δt permet d'observer l'évolution de la siccité du gâteau en fonction de la pression et du temps de pressage. Les résultats obtenus par Galla et col. (1996, 1997) montrent que la siccité finale de la boue varie linéairement avec $\ln(P \cdot \Delta t)$ (figure II.11.). La droite obtenue est caractéristique du conditionnement étudié.

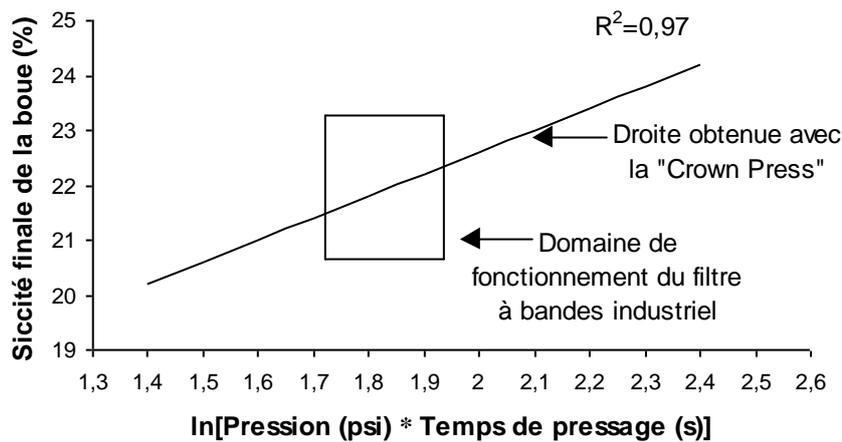


Figure II.11. : résultats du test proposé par Galla (1996)

Un domaine de fonctionnement limite peut être tracé pour chaque filtre à bandes étudié :

- les abscisses limites du domaine ($\ln(P*\Delta t)$ limites) sont obtenues en fonction des caractéristiques de fonctionnement du filtre (diamètres des rouleaux, vitesses des toiles minimale et maximale utilisées pendant la période d'étude) ;
- les ordonnées limites du domaine (siccités limites) sont obtenues en mesurant pendant la période d'étude, les siccités en sortie du filtre.

Pour chaque type de conditionnement (variation de la dose de polymère, type de polymère etc...), la droite donnant la siccité en fonction de $\ln(P*\Delta t)$ peut être déterminée dans la "Crown Press". Si cette droite (caractéristique d'un conditionnement) se situe au dessus du domaine de fonctionnement du filtre considéré, le conditionnement testé avec la "Crown Press" doit permettre d'améliorer les performances du filtre à bandes industriel (modification de l'emplacement du domaine de fonctionnement sur le graphe) et peut donc être proposé à l'exploitant (Galla, 1996 ; Graham et col., 1998).

Par ailleurs, la "Crown Press" peut également être utilisée pour évaluer la migration du gâteau vers les côtés des toiles (fluage). Ainsi Severin et col. (1998) observent que le déplacement latéral de la boue varie linéairement avec la hauteur initiale de la boue. Hashimoto et Hiraoka (1990) observent que le fluage dépend aussi de la densité de charge et de la masse en matières sèches volatiles des boues.

II.3.5.5. Perspectives de modélisation de la zone en S

En partant des équations de la filtration d'un milieu continu diphasique (Willis et Tosun, 1980 ; Willis et col., 1983), Wells et Sivakumaran (1990) proposent un modèle en 2D pour décrire le comportement des filtres à bandes. En considérant l'axe des abscisses (Ox) dans le sens de défilement des toiles et l'axe des ordonnées (Oy) dans le sens de la largeur de la toile, ils font l'hypothèse que tous les paramètres sont indépendants de x, que les vitesses de la phase solide sont négligeables devant celles de la phase liquide et ils négligent la contrainte de cisaillement dans le sens Oy. Ils établissent, alors, le système d'équations suivant :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\varepsilon v_{ly})}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon v_{lz}}{\partial z} &= 0 \\
 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= 0 \\
 \beta_y \frac{dP}{dy} &= -\mu v_{ly} \\
 \beta_z \frac{dP}{dz} &= -\varepsilon v_{lz} \\
 \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + (1 - \varepsilon) \frac{dP}{dy} &= \left(\frac{\mu \varepsilon^2}{\beta_y} \right) v_{ly} \\
 \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + (1 - \varepsilon) \frac{dP}{dz} &= \left(\frac{\mu \varepsilon^2}{\beta_z} \right) v_{lz}
 \end{aligned}
 \tag{eq. II.81.}$$

Avec P la pression appliquée dans le filtre, σ_y et σ_z les contraintes appliquées sur la phase solide, v_{ly} et v_{lz} les vitesses de la phase liquide, ε la porosité, β_y et β_z la perméabilité du gâteau dans les directions z (épaisseur du gâteau) et y (largeur des toiles), μ la viscosité de la phase liquide et t le temps.

Un tel système d'équations doit permettre de calculer l'épaisseur du gâteau en sortie de filtre, ainsi que le profil de siccité dans la boue selon y et z. Cependant, le fait de ne pas considérer les variations selon x (sens de défilement des toiles) revient à négliger le cisaillement discuté précédemment. De plus, ce modèle suppose que \square ne varie pas avec le temps, autrement dit, que la siccité globale du gâteau en sortie est connue. Ce modèle ne

permet donc pas d'estimer cette siccité, il permet seulement de calculer les variations de la siccité selon y et z . Par ailleurs, dans un filtre à bandes, la déshydratation se fait essentiellement par compression, dès lors l'hypothèse qui consiste à négliger les vitesses de la phase solide devant celle du liquide devient discutable, notamment dans la direction y (largeur des toiles), où négliger la vitesse de la phase solide revient à nier le phénomène de fluage.

II.3.5.6. Conclusion

Ces différentes études montrent toute la difficulté de la modélisation de la zone de pressage d'un filtre à bandes :

- des doutes subsistent quant à la pression effectivement appliquée sur les boues dans les filtres à bandes ;
- les effets du phénomène de cisaillement n'ayant pas été quantifiés sur les boues résiduelles urbaines, il n'est pas possible de savoir s'il peut être négligé ou non. Dans le cas d'un effet notable, sa prise en compte ajoute la direction Ox dans le modèle proposé par Wells et Sivakumaran (1990) ;
- l'impact du nombre de rouleau reste aussi sujet de désaccord puisque les résultats de Reitz (1988) montrent un arrêt de la déshydratation après 4 rouleaux alors que l'observation de la figure II.10. montre une augmentation de la siccité d'environ 2 points entre le 9ème et le 14ème rouleau ;
- enfin, les différents essais montrent le rôle important du conditionnement sur les performances des filtres à bandes. Ainsi la modélisation des filtres à bandes passe d'abord par la détermination des propriétés rhéologiques et physico-chimiques des boues pour chaque conditionnement. D'ailleurs, le système d'équations proposé par Wells et Sivakumaran (1990) implique la connaissance de modèles rhéologiques donnant les lois de variations des contraintes appliquées sur la phase solide des boues et les lois de variations de la perméabilité du gâteau en fonction de sa porosité. De plus, la vitesse de la phase solide ne pouvant pas être négligée en compression, le système d'équations se complique considérablement et nécessite l'introduction d'inconnues supplémentaires.

II. 4. Conclusion

La littérature scientifique sur le filtre à bandes est peu abondante et se base essentiellement sur des approches empiriques quant au dimensionnement de ces appareils. Les quelques études concernant l'impact des paramètres de fonctionnement sur les performances (tableau II.5.) des filtres à bandes nécessitent d'être confirmées dans le cas des boues secondaires activées.

De plus, il est nécessaire de hiérarchiser avec clarté l'influence de tous ces paramètres afin d'identifier les améliorations à apporter aux filtres à bandes. Pour cela, le pilote utilisé par Reitz (1988) pose quelques problèmes de manipulation puisque l'expérimentateur doit constituer manuellement le gâteau à placer entre les deux toiles (l'une des toiles est attachée manuellement à l'autre) ce qui perturbe la zone de coincement, zone essentielle à la structuration du gâteau. La "Crown Press" se limite, quant à elle, à une étude statique (puisque les toiles sont fixes) et ne peut donc prétendre décrire correctement tous les phénomènes rencontrés dans les filtres à bandes. De plus, la taille de son rouleau ne pouvant pas être modifiée, l'impact de ce paramètre ne peut pas être étudié.

D'après cette analyse bibliographique, il semble utile de mettre en place un pilote de laboratoire de dimension raisonnable, bien instrumenté, possédant les propriétés des filtres à bandes industriels et permettant d'étudier l'influence de chaque paramètre indépendamment. Cette mise en œuvre et les résultats auxquels elle a abouti font l'objet du chapitre suivant. Par ailleurs, la procédure d'estimation de la siccité du gâteau en sortie des filtres à bandes grâce à des essais en cellule de filtration compression nécessite d'être précisée et améliorée. Les essais de pressage des boues en CFC font l'objet du chapitre IV.

Paramètre	Variation	Siccité en sortie	Taux de capture des MS	Fluage	Nature des boues	Référence
Vitesse des toiles	augmente	-			boues mixtes	Haworth (1973) Tokunaga et col. (1983) Inujima et col. (1986)
		-			boues digérées	Haworth (1973)
		-			boues d'industrie du cuir	Minyuan (1991)
		0				Lecey et Pietila (1983)
		0	-	+	boues mixtes	Lotito et col. (1986)
Tension des toiles	augmente	+			boues mixtes	Haworth (1973) Tokunaga et col. (1983) Inujima et col. (1986)
		+			boues digérées	Haworth (1973)
		+	-/0			Lecey et Pietila (1983)
		+			boues d'alun	Johnson et col. (1992)
			-/0		boues activée	Graham et col. (1998)
Débit d'entrée des boues	augmente	-	+	+	boues mixtes	Lotito et col. (1986)
Siccité initiale des boues	augmente	+			boues mixtes	Tokunaga et col. (1983)
		+	+	+	boues mixtes	Lotito et col. (1986)
		+				Lecey et Pietila (1983)
		+			boues d'industrie du cuir	Minyuan (1991)
Nombre de rouleaux	>6	0				Lecey et Pietila (1983), Novak (2001)
	augmente	+			boues digérées	Galla (1996)
Diamètre des rouleaux	diminue	+				Lecey et Pietila (1983)
Perméabilité des toiles	augmente	+	-			Lecey et Pietila (1983)
Pression de l'eau de lavage	augmente	0	0			Lecey et Pietila (1983)
		+				Land (1992)

Tableau II.5. : impact des paramètres de fonctionnement des filtres à bandes sur leurs performances

II.5. Nomenclature

C_{agit}	Couple subi par le module d'agitation lors de la floculation des boues (N.m)
C_g	Concentration du gâteau d'égouttage en matières sèches ($g_{MS}.l^{-1}$)
$C_{g\infty}$	Concentration du gâteau de filtration en matières sèches après un temps infini d'égouttage ($g_{MS}.l^{-1}$)
C_{susp}	Concentration de la suspension au dessus du gâteau lors de l'égouttage ($g_{MS}.l^{-1}$)
C_{susp0}	Concentration de la boue floculée en matières sèches avant égouttage (à $t = 0$) ($g_{MS}.l^{-1}$)
D	Diamètre d'un rouleau (m)
e_{toile}	Epaisseur de la toile (m)
$E_{capture}$	Pourcentage de capture de solide du filtre ($kg_{MSgâteau} \text{ sortie filtre} \cdot kg_{MS} \text{ boue entrée filtre}^{-1}$)
F	Force totale fournie à la toile (N)
$F_{v\acute{e}rin}$	Force fournie à la toile par un vérin (N)
g	Accélération de la pesanteur ($= 9,81 \text{ m}.s^{-2}$)
$G_{m\acute{e}l}$	Gradient de vitesse du mélange lors de la floculation (s^{-1})
h	Hauteur totale de la boue au dessus du média filtrant à l'instant t (m)
h_{fin}	Hauteur de boue en sortie de la zone d'égouttage (m)
h_{f0}	Hauteur du filtrat dans le volume initial de boue (m)
h_g	Hauteur du gâteau en formation au cours de l'égouttage (m)
$h_{g\infty}$	Hauteur du gâteau de filtration après un temps infini d'égouttage (m)
h_L	Hauteur d'eau éliminable restant dans la boue au cours de l'égouttage (m)
h_{susp}	Hauteur de suspension située au dessus du gâteau lors de l'égouttage (m)
h_{susp0}	Hauteur de la suspension à $t = 0$ au dessus de la toile d'égouttage (juste avant le début de l'égouttage) (m)
$k = \frac{\rho g}{\mu r_s}$	Facteur de perméabilité du média filtrant ($m}.s^{-1}$) selon Severin et Grethlein (1996)
$K = \frac{\rho g}{\mu \alpha_g}$	Facteur de perméabilité du gâteau ($m}.s^{-1}$) selon Severin et Grethlein (1996)
l_g	Largeur du gâteau de boue répandue sur la toile (m) (c'est donc la largeur filtrante effective de la toile)
l_t	Largeur de la toile filtrante (m)

L_E	Débit massique de matières sèches déposées sur la toile en entrée du filtre ramené à la largeur des bandes ($t_{MS}.h^{-1}.m^{-1}$)
L_t	Longueur de la zone d'égouttage (m)
L_{coinc}	Longueur de la zone de coincement (entrée du 1 ^{er} rouleau) (m)
MS	Matières sèches (kg)
M_{susp0}	Masse de boue floculée initiale déposée sur la toile d'égouttage (à $t = 0$)
n_0	Facteur de compressibilité
N	Nombre de rouleaux d'un filtre à bandes
N_{agi}	Vitesse de rotation du mobile d'agitation lors de la floculation des boues (tour. s^{-1})
P	Pression (Pa)
P_l	Pression appliquée sur la phase liquide (Pa)
P_s	Pression appliquée sur la phase solide (Pa)
$P_{vérin}$	Pression dans les vérins qui tendent les toiles (Pa)
Q_f	Débit volumique de filtrat recueilli pendant l'égouttage ($m^3.s^{-1}$)
Q_{fegout}	Débit volumique de filtrat recueilli dans la zone de d'égouttage ($m^3.s^{-1}$)
$Q_{f\infty}$	Débit volumique de filtrat obtenu après un temps infini d'égouttage ($m^3.s^{-1}$)
$Q_{g\infty}$	Débit volumique de gâteau obtenu après un temps infini d'égouttage ($m^3.s^{-1}$)
Q_{susp0}	Débit volumique de boue floculée déposée sur la toile à l'entrée de la zone d'égouttage ($m^3.s^{-1}$)
r_s	Résistance du média filtrant par unité d'épaisseur (m^{-2})
R_S	Résistance du média filtrant (m^{-1})
r_1	Rayon d'un rouleau (m)
r_2	$r_1 +$ épaisseur de la boue (m)
$S = \frac{V_g}{V_f}$	Coefficient de séparation selon Severin et Grethlein (1996)
s_b	Vitesse linéaire des toiles du filtre à bandes ($m.s^{-1}$)
S_i	Siccité exprimée en % ($kg_{MS}.kg_{boue}^{-1}$)
S_{if}	Siccité du gâteau recueilli en sortie du filtre à bandes (%)
$S_{i\limite4bar}$	Siccité d'un gâteau obtenu après filtration compression de la boue à 4 bar pendant un temps infini de filtration compression (%)
S_{i0}	Siccité de la boue floculée déposée à l'entrée du filtre à bandes (%)
$S_{i45100g}$	Siccité d'un gâteau obtenu après 10 minutes de centrifugation à 45100g (%)
S_{i2190g}	Siccité d'un gâteau obtenu après centrifugation à 2190g (%)

$S_{\text{vérin}}$	Section des vérins qui tendent les toiles (m^2)
t	Temps (s)
t_{coinc}	Temps de séjour dans la zone de coincement (entrée du 1 ^{er} rouleau) (s)
t_{mel}	Temps d'agitation dans le bac de floculation (s)
t_p	Temps de pressage au niveau d'un rouleau du filtre à bandes (s)
T_{toile}	Tension des toiles (N)
v_{ly}	Vitesse de la phase liquide dans la direction Oy (m.s^{-1})
v_{lz}	Vitesse de la phase liquide dans la direction Oz (m.s^{-1})
V_b	Volume de boue dans le bac de floculation (m^3)
V_B	Volume de gâteau qui se dépose instantanément sur la toile au démarrage de l'égouttage (m^3)
V_f	Volume de filtrat recueilli lors d'une étape de filtration au temps t (m^3)
$V_{f\infty}$	Volume de filtrat recueilli au bout d'un temps infini d'égouttage (m^3)
V_g	Volume de gâteau qui se dépose sur la toile au cours de l'égouttage (m^3)
$V_{g\infty}$	Volume de gâteau recueilli après un temps infini d'égouttage (m^3)
$V_{\text{susp}0}$	Volume initial de boue floculée déposée sur la toile d'égouttage (à $t=0$) (m^3)
W	Masse de gâteau recueilli par unité de volume de filtrat récupéré (kg.m^{-3})
x	Cordonnée (direction du défilement des toiles)
y	Cordonnée (direction de la largeur des toiles)
z	Coordonnée (direction de l'épaisseur du gâteau)
α	Résistance spécifique du gâteau de filtration (m.kg^{-1})
α_g	Résistance du gâteau par unité d'épaisseur (m^{-2})
α_0	Résistance spécifique du gâteau de filtration à pression nulle (m.kg^{-1})
β	Perméabilité du gâteau (m^2)
β_y	Perméabilité du gâteau dans la direction y (m^2)
β_z	Perméabilité du gâteau dans la direction z (m^2)
ΔP	Différence de pression appliquée sur la suspension (Pa)
Δt	Durée de pressage (s)
$\gamma = \frac{K\Omega e}{V_\infty k}$	Taux de résistance média filtrant/gâteau de filtration selon Severin et Grethlein (1996)
ε	Porosité de la boue

- ε_g Porosité du gâteau d'égouttage
- $\varepsilon_{\text{susp}0}$ Porosité initiale de la boue floclée (à $t = 0$)
- θ Angle de recouvrement des toiles sur un rouleau (rad)
- λ_v Coefficient spécifique du test de drainage ($\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
- μ Viscosité du filtrat (Pa.s)
- μ_b Viscosité de la boue (Pa.s)
- ρ Masse volumique de la suspension au dessus du gâteau en formation ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- ρ_e Masse volumique de l'eau ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- ρ_s Masse volumique de la phase solide de la boue ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- σ_y Contrainte appliquée sur la phase solide dans la direction y (Pa)
- σ_z Contrainte appliquée sur la phase solide dans la direction z gâteau (Pa)
- ϕ Angle d'approche des deux toiles filtrantes dans la zone du premier rouleau (rad)
- $\Phi = \frac{-\beta \rho g}{\mu \frac{C_0}{C_g}}$ Paramètre du modèle d'égouttage de Wells et Savage (1998)
- $\chi = \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial P_s}$ Compressibilité volumique du gâteau (Pa^{-1}) définie par Wells et Savage (1998)
- Ω Section du média filtrant (m^2)

II.6. Bibliographie

ASCE (Task Committee on Belt Filter Presses), 1988, "*Belt filter press dewatering of wastewater sludge*", Journal of Environmental Engineering, **vol 114**, n°5, pp991-1006.

Austin E.P., 1978, "*The filter belt press – Application and design*", Filtration and Separation, **vol 15**, july/august, pp320-330.

Badgujar M.N., Chiang S-H., 1989, "*An analysis of belt filter press dewatering mechanism*", Filtration and Separation, **vol 26**, sept/oct, pp364-367.

Baskerville R.C., Bruce A.M., Day M.C., 1978, "*Laboratory techniques for predicting and evaluating the performance of a filterbelt press*", Filtration and Separation, **vol 15**, Sept/Oct, pp445-454.

Bullard C.M., Barber J., 1996, "*A factor in belt filter press performance*", Water Environment and Technology, **vol 8**, n°12, pp67-70.

Dembitz A.E., 1978, "*Belt filter presses : a new solution to dewatering ?*", Water Engineering and Management, **vol 15**, pp36,38,40,42,70.

Deutsch N.D., 1987, "*Options in belt filter press*", Water Engineering and Management, **vol 134**, n°9, pp34-37.

Emery B.P., 1994, "*Predicting belt filter press performance using laboratory techniques*", Rapport de Master, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Galla C.A., 1996, "*Laboratory prediction of belt filter press dewatering dynamics*", Rapport de Master, University of Illinois, U.C., Department of Civil and Environmental Engineering.

Galla C.A., Freedman D.L., Severin B.F., Kim B.J., 1996, "*Laboratory prediction of belt filter press dewatering dynamics*", WEFTEC'96, 69th Annual Conference and Exposition of the Water Environment Federation, October 5-9, 1996, in Dallas, Texas, 13 pages.

Galla C.A., Freedman D.L., Severin B.F., Kim B.J., 1997, "*Pressing Solids*", Water Environment Laboratory Solutions, June/July, pp8-10.

Gazbar S., 1993, "*Evaluation et amélioration des performances des procédés de déshydratation mécanique des boues résiduaires*", Thèse, Institut Polytechnique de Lorraine.

Graham T.M., Freedman D.L., Horlbeck P., 1998, "*Laboratory predictions of waste activated sludge dewatering by belt filter presses*", Proceedings WEFTEC'98, 71st annual Conference and Exposition of the Water Environment Federation, Orlando, october 3-7, pp387-398.

Green T.S., Heisler G.L., 1992, "*Belt filter press brings big savings*", Public Works, **vol 123**, pp 38-39.

Gruzitskii A.É., 1992, "*LMN15-2G-01 belt filter-press for filtering coal sludge*", Chemical and Petroleum Engineering, **vol 28**, n°11/12, pp637-639.

Halde R.E., 1980, "*Filterbelt pressing of sludge - a laboratory simulation*", Journal Water Pollution Control Federation, **vol 52**, n°2, pp310-316.

Hashimoto M., Hiraoka M., 1990, "*Characteristics of sewage sludge affecting dewatering by belt press filter*", Water Science and Technology, **vol 22**, n°12, pp143-152.

Haworth P.J., 1973, "*The filterbelt press*", Effluent and Water Treatment Journal, **vol 13**, pp617-625.

Haworth P.J., Roberts K., 1975, "*Development and application of filterbelt presses*", Filtration and Separation, **vol 15**, nov/dec, pp572-576.

Inujima K., Tokunaga K., Okahashi H., Arima Y., Ishimi T., Fujinami S., 1986, "*Belt press filter – Dewatering principle and application of its new technologies*", 4th World Filtration Congress, Ostende, Belgium, **vol 1-4**, pp12.27-12.35.

Johnson G., Buchanan G.G., Newkirk D.D., 1992, "*Optimizing belt filter press dewatering at the Skinner filtration plant*", Journal-American Water Works Association, **vol 84**, n°11, pp47-52.

Land G., 1992, "*Restoring filter belt drainage rates*", Water Engineering and Management, November, pp22-24.

Lecey R.W., Pietila K.A., 1983, "*Improving belt-filter-press performance*", Chemical Engineering, **Vol 28**, November, pp69-72.

Liebhart E., Koenders M.A., 2000, "*Dead-end filtration under torsional shear: experimental findings and theoretical considerations*", VIIIth World Filtration Congress, Brighton, England, 2000, pp303-306.

Lotito V., Spinosa L., Santori M., 1986, "*Analysis of sewage sludge dewatering operation by beltpress*", 4th World Filtration Congress, Ostende, Belgium, pp4.43-4.47.

Miner R., 1980, "*Experience with belt filter presses in the pulp and paper industry*", Journal Water Pollution Control Federation, **vol 52**, n°9, pp2389-2395.

Minyuan G., 1991, "*Developing an efficient belt press for the leather-making industry*", Filtration and Separation, **vol 28**, n°1, pp10.

Nicholson J., Goldbach J-C., 1991, "*Belt press dewatering of alum sludge proves effective*", Water Engineering and Management, **vol 138**, pp28-31.

Novak J., Knocke W., Burgos W., Schuler P., 1993, "*Predicting the dewatering performance of belt filter presses*", Water Science and Technology, **vol 28**, n°1, pp11-19.

Novak J.T., 2001, "*Dewatering*", In "Sludge into Biosolids. Processing, Disposal and Utilization", edited by L. Spinoza and P.A. Vesilind, IWA publishing, ISBN 1 900222 08 6, pp339-362.

OTV, 1997, "*Traiter et valoriser les boues*", collection OTV.

Poduska R.A., Collins B.H., 1980, "*A simple laboratory technique for determining belt-filter press operation*", *Environmental Technology Letters*, **vol 1**, pp547-556.

Prinssen A.A.J.A., 1982, "*Horizontal vacuum beltfilters, type RT, in a totally enclosed configuration and the pannevis pressbelt device*", *World Filtration Congress*, September, Downingtown, pp262-269.

Reitz, 1988, "*Municipal sludge dewatering using a belt filter press*", *Rapport de Master*, Virginia Polytechnic Institute and State University », 81 pages.

Rhemat T., Branion R., Duff S., Groves M., 1997, "*A laboratory sludge press for characterizing sludge dewatering*", *Water Science and Technology*, **vol 35**, n°2-3, pp189-196.

Ruth B.F., 1935, "*Studies in Filtration : III. Derivation of general equations*", *Industrial and Engineering Chemistry*, **vol 27**, n°6, pp708-723.

Searle T.G., Bennett M.C., 1987, "*Belt filter press dewatering of alum sludge*", *Environmental Engineering Proceeding*, July, Orlando, pp269-275.

Severin B.F., Collins B.H., 1992, "*Advances in predicting belt press performance from lab data*", *Water Environment Federation*, 65th Annual Conference and Exposition, New Orleans, Louisiana, September 20-24, 1992, pp205-216.

Severin B.F., Grethlein H.E., 1996, "*Laboratory simulation of belt press dewatering: Application of the Darcy equation to gravity drainage*", *Water Environment Research*, **vol 68**, n°3, pp359-369.

Severin B.F., Nye J.V., Kim B.J., 1999, "*Model and analysis of belt drainage thickening*", *Journal of Environmental Engineering*, **vol 125**, n°9, pp807-815.

Severin B.F., Prindle G., Traynor G., 1998, "*Belt press dewatering: Laboratory simulation of the pressure rollers*", *Environmental Technology*, **vol 19**, n°7, pp697-708.

Tokunaga K., Fujinami S., Ishimi T., Okahashi H., Nakano I., 1983, "*High pressure filtration and/or squeezing of sewage sludges*", *Filtration and Separation*, nov/dec, pp 450-456.

Van der Roest H.F., Salomé A.A., Koornneef E., 1993, "*New generation beltpresses and decanters for sludge dewatering*", *Water Science Technology*, **vol 28**, n°1, pp21-28.

Wakeman R.J., Zhang G.M., Koenders M.A., 2000, "*Effects of rotational flow induced in a rotary piston press on the formation and properties of filter cakes*", VIIIth World Filtration Congress, Brighton, England, 2000, pp1121-1124.

Wells A.E., Savage G.K., 1998, "*Sedimentation effects prior to gravity drainage*", In *Advances in Filtration and Separation Technology*, ed by G.Chase,R. Herrera and K. Rubow, American Filtrations and Separations Society, **vol 12**, pp646-653.

Wells A.E., Sivakumaran K., 1990, "*Two-dimensional modeling of dewatering in a belt filter press*", *Environmental Engineering Proceedings of the 1990 Specialty Conference*, Arlington, July 8-11, pp132-139.

Williams K.P., Fletcher R.M., Strydom P.J., 1990, "*Pilot Scale belt press filtration of coal refuse – The effect of polymeric flocculants*", *Mine and Quarry*, **vol 19**, n°6, pp26-29.

Willis M.S., Collins R.M., Bridges W.G., 1983, "*Complete analysis of non-parabolic filtration behaviour*", *Chemical Engineering Research Des.*, **vol 61**, march, pp96-108.

Willis M.S., Tosun I., 1980, "*A rigorous cake filtration theory*", *Chemical Engineering Science*, **vol 35**, pp2427-2438.

CHAPITRE III

ETUDE SUR PILOTES DE LABORATOIRE

Ce chapitre aborde l'ensemble des essais réalisés, sur des boues résiduelles, afin d'étudier l'influence des paramètres de fonctionnement des filtres à bandes sur les performances de déshydratation. Dans un premier temps, nous aborderons l'égouttage et nous verrons comment les tables d'égouttage peuvent être caractérisées à partir d'essais en laboratoire. Dans un deuxième temps, nous aborderons le fonctionnement du filtre à bandes à travers des séries d'essais réalisées au laboratoire. Enfin, nous verrons dans une dernière partie, comment ces résultats peuvent s'appliquer pour la conduite des appareils existants et pour le dimensionnement de nouveaux filtres à bandes.

III.1. L'ÉGOUTTAGE	97
III.1.1. Matériel et méthode	97
III.1.1.1. <i>Les cellules d'égouttage</i>	97
III.1.1.2. <i>Le pilote de laboratoire et la table d'égouttage industrielle</i>	99
III.1.1.3. <i>Les boues</i>	100
III.1.2. Répétabilité	100
III.1.3. Paramètres influant sur l'égouttage	101
III.1.3.1. <i>Impact de la dose de polymère</i>	101
III.1.3.2. <i>Influence de la charge de la boue</i>	102
III.1.3.3. <i>Impact de la dilution des boues</i>	103
III.1.3.4. <i>Le labourage</i>	104
III.1.3.5. <i>Influence de la toile</i>	106
III.1.4. Modélisation de l'égouttage des boues urbaines	106
III.1.4.1. <i>Choix du modèle</i>	106
III.1.4.2. <i>Développement du modèle empirique</i>	110
III.1.4.3. <i>Recherche de paramètres globaux</i>	113
III.1.5. Estimation des performances d'une table d'égouttage industrielle	115
III.1.5.1. <i>Passage de la cellule à la table d'égouttage</i>	115
III.1.5.2. <i>Comparaison entre la cellule de laboratoire et la table d'égouttage</i>	116
III.1.6. Conclusion	118
III.2. PRESSAGE SUR FILTRE A BANDES DE LABORATOIRE	119
III.2.1. Le pilote de laboratoire	119
III.2.1.1. <i>Introduction</i>	119
III.2.1.2. <i>Paramètres de fonctionnement du pilote</i>	121
III.2.1.3. <i>Exploitation des résultats</i>	126
III.2.2. Résultats des essais sur le pilote	129
III.2.2.1. <i>Influence de la charge</i>	129
III.2.2.2. <i>Influence de la concentration initiale des boues</i>	131
III.2.2.3. <i>Influence du type des toiles</i>	132
III.2.2.4. <i>Impact de l'enroulement de la toile autour du rouleau de pressage</i>	132
III.2.2.5. <i>Variation du diamètre du rouleau de pressage</i>	133
III.2.2.6. <i>Détermination du nombre de rouleaux efficaces</i>	135
III.2.2.7. <i>Importance du conditionnement</i>	137
III.2.2.8. <i>Influence de la tension de toile</i>	138
III.2.2.9. <i>Impact de la vitesse des toiles</i>	140
III.2.2.10. <i>Effet d'un laminage</i>	145
III.2.2.11. <i>Conclusion sur les essais</i>	148
III.2.3. Comparaison des performances du pilote de laboratoire avec celles d'un filtre à bandes industriel	149
III.3. VERS UN NOUVEAU FILTRE A BANDES	150
III.4. NOMENCLATURE	154
III.5. BIBLIOGRAPHIE	156

III.1. L'égouttage

Afin d'optimiser la déshydratation des boues, les filtres à bandes sont souvent combinés à des tables d'égouttage. Parmi les procédés de déshydratation, l'égouttage permet de retirer une quantité importante d'eau avec une mise en œuvre simple et économique.

En dépit (ou du fait) de son apparente simplicité, ce procédé est peu décrit dans la littérature scientifique. Le dimensionnement et la conception des tables restent essentiellement empiriques. Seuls quelques articles scientifiques et techniques traitent spécifiquement de l'égouttage des boues. D'autres publications décrivent, quant à elles, l'utilisation de cellules d'égouttage comme méthode d'estimation des performances des filtres à bandes (voir chapitre II). Dans tous les cas, des interrogations subsistent quant à l'extrapolation des résultats, obtenus lors d'égouttages menés en laboratoire, aux tables industrielles (Dentel, 2001).

Dans cette partie, l'impact de quelques paramètres de fonctionnement sur les performances d'égouttage est discuté. Une modélisation simple, permettant d'estimer les performances des tables d'égouttage en fonction d'essais réalisés en laboratoire, est également présentée.

III.1.1. Matériel et méthode

Les essais ont été réalisés à différentes échelles :

- en cellules de laboratoire
- sur pilote de laboratoire
- sur machine industrielle

III.1.1.1. Les cellules d'égouttage

La cellule de laboratoire est constituée d'une toile ("9 tricot" fabriquée par Rai-tillères, ouverture théorique 579 μm) fixée entre deux cylindres de Plexiglas (figure III.1.). La suspension de boue floculée est placée sur la surface du filtre où elle s'égoutte. Une balance reliée à un micro-ordinateur enregistre la masse de filtrat recueilli au cours du temps. La siccité de la boue peut alors être calculée au cours du temps de la manière suivante :

$$Si = \frac{(M_b \times Si_b)}{M_b + M_p - M_f} = \frac{M_{susp0} \times Si_0}{M_{susp0} - M_f} \quad (\text{eq. III.1.})$$

où $Si_0 = \frac{M_b \times Si_b}{M_b + M_p}$ est la siccité initiale de la suspension conditionnée, Si_b est la siccité de la boue non floculée, M_b est la masse de boue non conditionnée déposée initialement dans la cellule et M_p est la masse de polymère ajouté à la boue. Cependant, il est souvent supposé que l'ajout de polymère n'augmente pas significativement la quantité de matières sèches.



Figure III.1. : cellule d'égouttage

Les essais ont été réalisés dans quatre cellules de diamètres différents (54 mm, 81 mm, 100 mm, 152 mm). Pour une masse surfacique de boue déposée constante (M_{susp0}/Ω) des courbes d'égouttages identiques ont été observées (figure III.2.) et les effets de parois peuvent donc être négligés dans les quatre situations. La cellule de 10 cm de diamètre a arbitrairement été retenue pour les expérimentations.

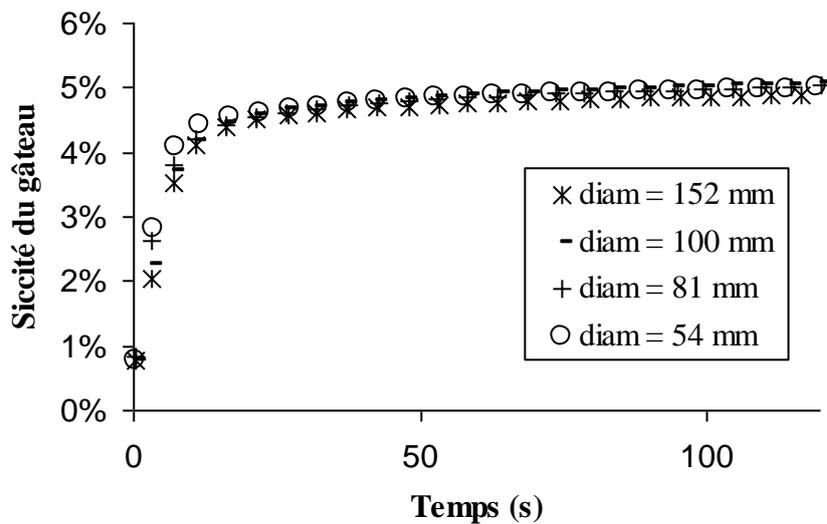


Figure III.2.: égouttage de boues secondaires urbaines dans des cellules de diamètres différents pour une charge surfacique de boue égouttée identique ($M_{susp0}/\Omega=10,7 \text{ g.cm}^{-2}$)

III.1.1.2. Le pilote de laboratoire et la table d'égouttage industrielle

Le pilote de laboratoire (décrit plus en détail dans le paragraphe III.2.) est un "mini filtre à bandes" de 50 cm de largeur, 2 m de longueur, 1,5 m de hauteur et constitué d'un seul rouleau de pressage. La toile utilisée ("16-6 chevron" de Rai-tillère, ouverture théorique 360 μm) mesure 30 cm de large. Des pistons pneumatiques permettent de tendre la toile. Comme tout filtre à bandes, la première zone de notre pilote (30 cm de large par 40 cm de long) correspond à une zone d'égouttage horizontale.

La table d'égouttage industrielle utilisée dans le cadre de cette étude est un appareil de la société EMO (Omega 10/30 NG) installé sur la station d'épuration de Saint-Pierre-de-Gobert (à proximité d'Agen) dans le département du Lot-et-Garonne (47). Sa zone d'égouttage, qui correspond à une surface de 1 m de largeur sur 3 m de longueur, est constituée d'une toile "6 uni" (Rai-tillère, ouverture théorique 1322 μm). Cette table peut être équipée de 8 herses sur lesquelles sont fixés des "bodidraïns" qui labourent la boue. En fin de table, un rouleau de pressage peut également être installé.

III.1.1.3. Les boues

Des boues issues de 6 stations d'épurations (STEP) différentes ont été utilisées (tableau III.1.) afin de ne pas négliger le fait que la nature des boues résiduares et leur aptitude à la déshydratation sont largement dépendantes du fonctionnement des STEP dont elles proviennent.

Origine des boues	Taille de la STEP (EH)	Type de traitement	MS (gms.l ⁻¹)	Siccité (gms/gboues ⁻¹)	FV (%)	I _{molhman} (ml.gms ⁻¹)
Rennes (Ille-et-Vilaine)	≈ 360 000	aération prolongée, déphosphoration par voie anoxique (+FeCl ₃)	7,6 à 8,33	0,7 à 0,8%	63 à 71%	140
Lescar (Pyrénées-Atlantiques)	≈ 100 000	Moyenne charge	9 à 20	0,9 à 1,9%	77 à 88%	160 à 210
Saint-Pierre-de-Gobert (Lot-et-Garonne)	≈ 30 000	Aération prolongée, déphosphoration par voie anaérobie, silo épaisseur	27	2,7%	63%	125
Betton (Ille-et-Vilaine)	≈ 19 000	Aération prolongée (+ FeCl ₃), silo épaisseur	24	2,5%	67%	125
Saint-Erblon (Ille-et-Vilaine)	≈ 2 000	Moyenne charge	7	0,7%	60%	131
Bréal-sous-Monfort (Ille-et-Vilaine)	≈ 4 000	aération prolongée	20	2%	68%	156

Tableau III.1.: description des différentes boues urbaines utilisées pour les essais d'égouttage en laboratoire

III.1.2. Répétabilité

Dans tous les essais réalisés durant cette étude, les boues ont été conditionnées selon une procédure fixée :

- utilisation d'un polymère cationique (EM 840 TRM fourni par SNF (Floerger)) de haut poids moléculaire, réticulé et ayant une charge surfacique de 80% ;
- injection de la solution de polymère (2,15g.l⁻¹) à l'échantillon de boue avec une seringue ;
- agitation pendant 30 s du mélange à vitesse constante grâce à un agitateur mécanique.

Afin d'estimer la marge d'erreur relative aux essais effectués en cellule, plusieurs mesures ont été réalisées dans des conditions identiques (dose de polymère, toile utilisée, masse de

polymère déposée, etc...). La figure III.3. montre que les résultats obtenus sont relativement proches (erreur relative inférieure à 5% pour la masse de filtrat récupéré et la siccité des boues). La technique de mesure offre une bonne reproductibilité.

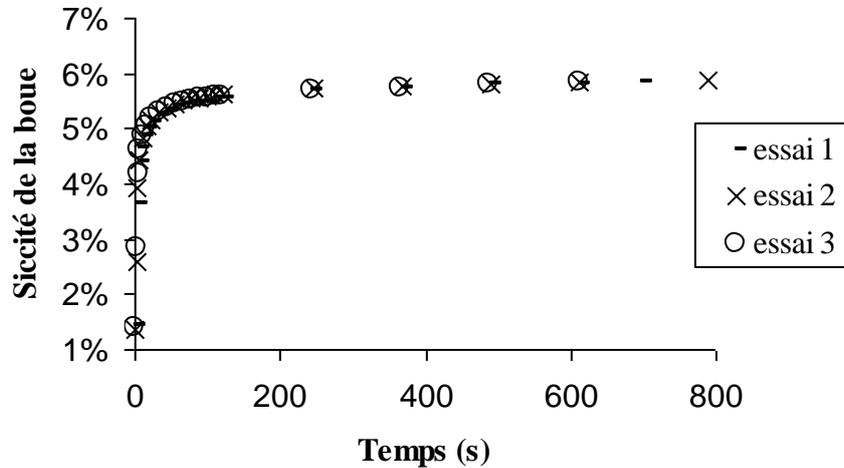


Figure III.3. : reproductibilité de l'égouttage des boues urbaines en cellule d'égouttage

90% du filtrat est récupéré dans les premières 30 secondes de l'égouttage tandis que la siccité se stabilise au bout de 40 à 50 secondes. *Par conséquent, dans le dimensionnement des tables d'égouttage, il semble important de prévoir un temps de filtration d'au moins 40 secondes.*

III.1.3. Paramètres influant sur l'égouttage

III.1.3.1. Impact de la dose de polymère

Pour toutes les étapes de déshydratation mécanique des boues et notamment pour l'égouttage, le conditionnement est une étape essentielle. C'est une part importante du coût de fonctionnement des tables d'égouttage en raison des prix relativement élevés des polymères. Le choix du polymère ainsi que la quantité de polymère à ajouter sont donc essentiels. En effet, si la boue est sous ou sur-dosée, les performances de déshydratation sont mauvaises. Dans le premier cas, les floccs sont trop petits, une certaine quantité est alors récupérée dans le filtrat tandis qu'une autre colmate la toile mettant fin prématurément à l'égouttage (figure

III.4.). Dans le second cas, l'égouttage est fortement ralenti en raison, notamment, du colmatage de la toile par le polymère lui-même.

Cependant, les expériences réalisées en cellule d'égouttage montrent que, contrairement à ce qui est parfois indiqué, il n'existe pas une dose de flocculant optimale mais plutôt une plage sur laquelle les performances sont identiques en terme de siccité (figure III.4.).

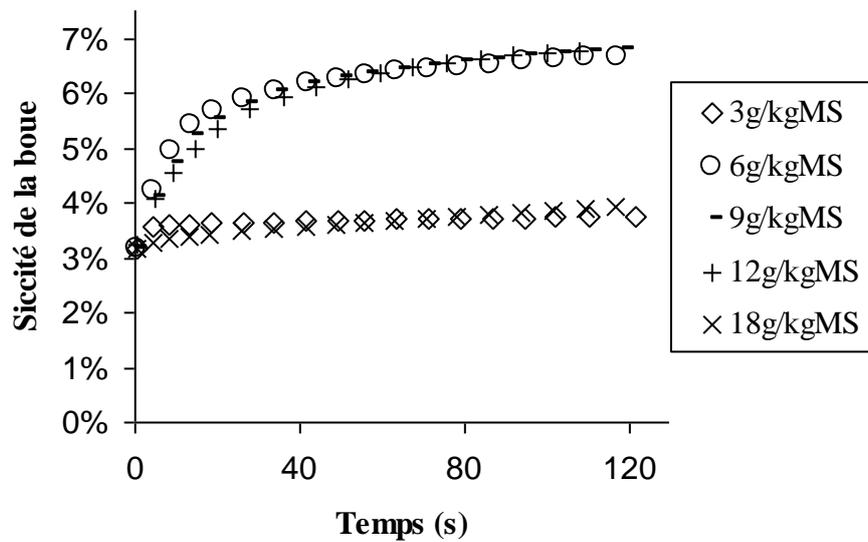


Figure III.4. : influence de la dose de polymère sur l'égouttage de boues urbaines

Ainsi, l'exploitant d'une table industrielle a tout intérêt à utiliser une dose de polymère légèrement supérieure à la limite basse de la plage de bon conditionnement afin de pouvoir remédier aux variations de concentration de la boue en entrée de l'atelier de traitement.

III.1.3.2. Influence de la charge de la boue

Des mesures réalisées dans la cellule d'égouttage avec différentes masses initiales de suspensions montrent une légère incidence de ce paramètre sur la siccité finale du gâteau. En effet, l'égouttage est amélioré avec l'augmentation de la charge (figure III.5.).

L'accroissement de la couche de boue déposée sur le filtre entraîne un gain de pression hydraulique qui profite au drainage.

De plus, des expériences menées sur la table industrielle indiquent que la qualité du filtrat se dégrade si l'épaisseur de boue n'est pas assez importante. Ce phénomène semble pouvoir s'expliquer par un taux de capture des fines plus important quand la couche de boue sur la toile est plus épaisse. Enfin, à partir d'un certain débit d'alimentation en boue, les floccs de la suspension pourraient se rompre à leur arrivée sur la table en entraînant une séparation solide/liquide plus difficile.

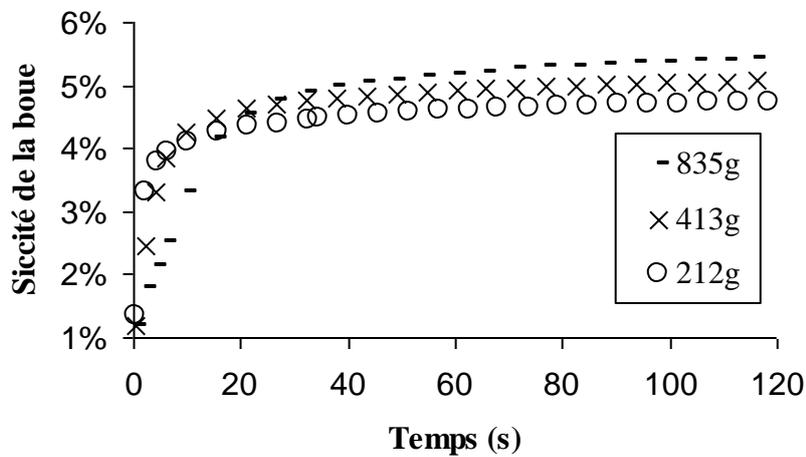


Figure III.5. : effet de la masse de boue déposée sur le filtre lors de l'égouttage en cellule (conditionnement : 13 g.kg_{MS}⁻¹)

Au niveau industriel, il existe un débit optimal d'alimentation en boue permettant d'obtenir une bonne siccité finale tout en garantissant un filtrat relativement clair. L'augmentation de la charge peut entraîner une amélioration des performances tant que les floccs ne se brisent pas. Cependant, l'augmentation du débit reste limitée par l'étalement des boues sur la toile et par les risques de colmatage dans le cas d'un rouleau final de pressage.

III.1.3.3. Impact de la dilution des boues

Des essais complémentaires ont été réalisés dans la cellule de laboratoire dans le but d'estimer l'influence de la siccité initiale des boues sur l'égouttage. La boue a donc été

préalablement diluée afin de diminuer sa concentration en matière sèche. Les résultats montrent que plus la dilution est importante, plus la siccité finale est faible. Néanmoins le gain de siccité (siccité finale moins siccité initiale) semble constant quel que soit le taux de dilution (figure III.6.).

Deux conclusions peuvent donc être tirées de ces observations :

- *la boue en entrée de table doit être la plus concentrée possible sachant qu'elle peut être, alors, plus difficile à conditionner ;*
- *l'ajout de flocculant doit se faire avec une solution la plus concentrée possible pour limiter le phénomène de dilution des boues. Cependant, la dispersion de solutions concentrées en polymère dans les suspensions fortement chargées en boues reste souvent un problème du fait d'une forte viscosité des deux fluides à mélanger.*

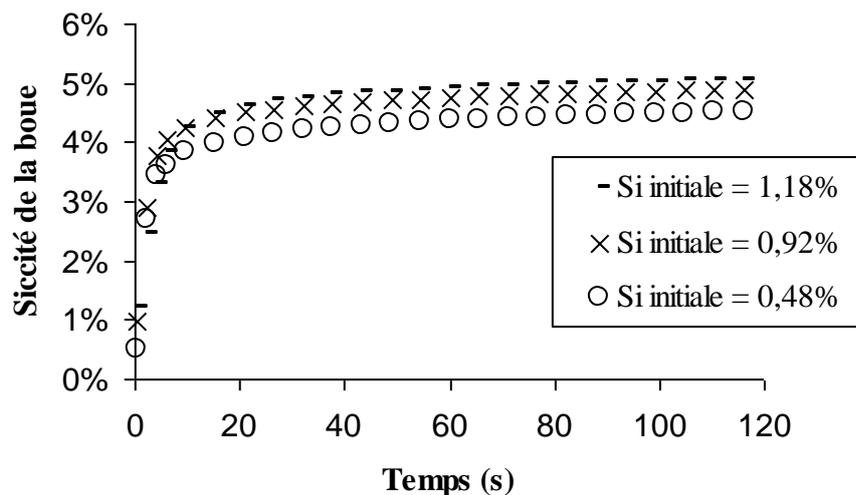


Figure III.6. : impact de la dilution sur le drainage gravitaire des boues urbaines ($M_{\text{susp}0} = 400 \text{ g}$, conditionnement = $13 \text{ g.kg}_{\text{MS}}^{-1}$)

III.1.3.4. Le labourage

Afin de simuler l'action des "herse de labourage", un retournement manuel de la boue est effectué en fin d'égouttage lors d'essais réalisés dans la cellule. Cette action de retournement de la boue permet d'augmenter la siccité de 0,5 à 1,5 points (figure III.7.).

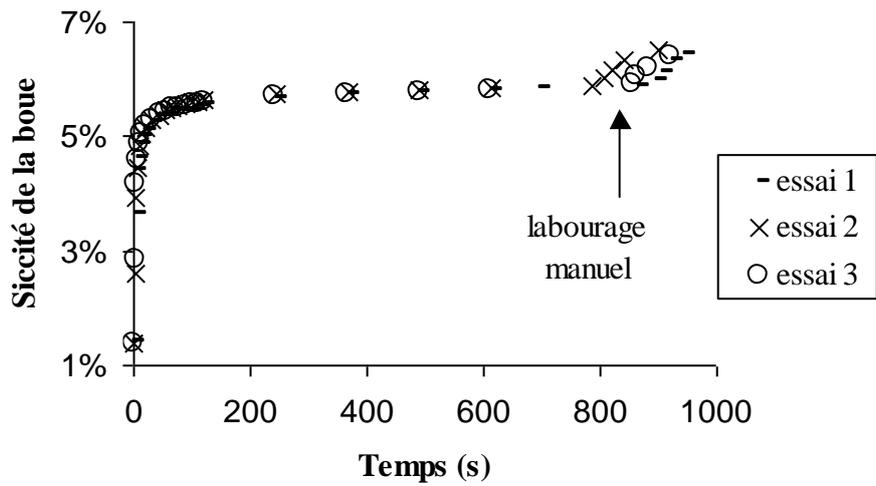


Figure III.7. : impact du retournement des boues urbaines dans la cellule d'égouttage ($M_{\text{susp}0} = 400 \text{ g}$, conditionnement = 13 g.kgMS^{-1})

L'observation des résultats obtenus (en collaboration avec l'Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives (IFTS)) lors de plusieurs essais sur la table industrielle confirme l'importance de la présence des herse (figure III.8.). Toutefois, si la qualité du filtrat reste constante, une dégradation des eaux de lavage a été observée en présence de labourage.

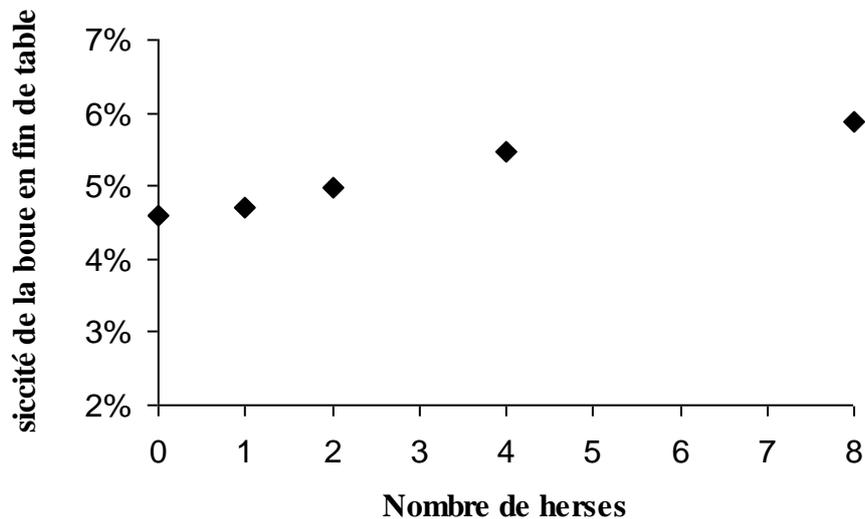


Figure III.8. : influence du labourage lors de l'égouttage des boues

III.1.3.5. Influence de la toile

Afin d'évaluer l'importance du type de toile, des essais ont été réalisés dans la cellule d'égouttage avec trois toiles différentes. Deux toiles sont utilisées habituellement sur les tables d'égouttage (6 tricot et 9 tricot), la troisième est généralement montée sur les filtres à bandes (16-6 chevron, toile plus fermée). La figure III.9. montre que le type de toile n'a pas d'incidence significative sur la siccité après égouttage. Toutefois, il semble que la qualité du filtrat se dégrade avec l'utilisation des toiles plus ouvertes.

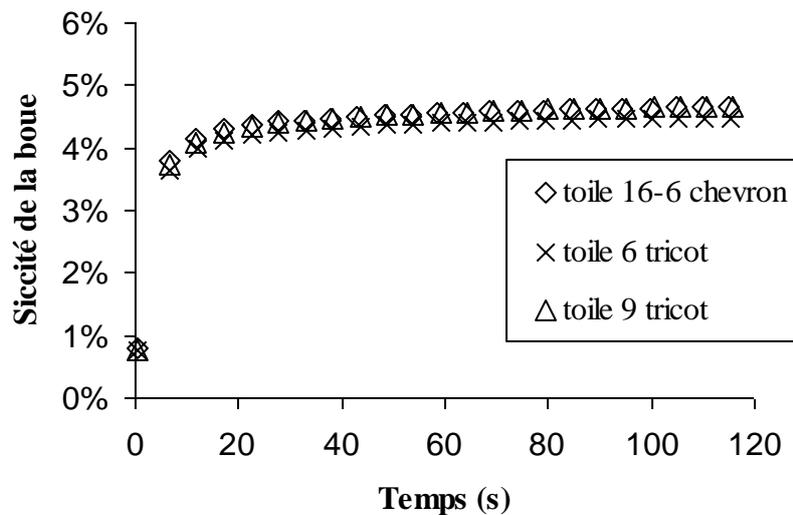


Figure III.9. : influence du type de la toile d'égouttage

Ces résultats semblent confirmer que la résistance des toiles est négligeable devant celle du gâteau de boue lors de l'égouttage.

III.1.4. Modélisation de l'égouttage des boues urbaines

III.1.4.1. Choix du modèle

Comme on l'a vu dans le chapitre II, la littérature décrit essentiellement quatre modèles pour caractériser l'égouttage.

Le modèle empirique de Severin et Collins (1992)

Il décrit empiriquement l'évolution de la quantité de filtrat récupéré au cours du temps lors de l'égouttage des boues en cellule. Il s'écrit (à partir de l'équation II.25) :

$$\frac{d(V_{susp0} - V_f)}{dt} = -\lambda_v \left((V_{susp0} - V_f) - (V_{susp0} - V_{f\infty}) \right)^2 \quad (\text{eq. III.2.})$$

et le coefficient cinétique λ_v est calculé à partir de l'équation suivante :

$$\lambda_v = d_1 \left(\frac{1}{V_{susp0}} + \frac{1}{V_{susp0} - V_{f\infty}} \right) + d_2 \quad (\text{eq. III.3.})$$

En supposant que la masse volumique initiale de la boue (ρ_b) est égale à celle de l'eau (ρ_e) (ce qui est réaliste) les équations III.2. et III.3. s'écrivent:

$$\frac{d(M_{susp0} - M_f)}{dt} = -\lambda \left((M_{susp0} - M_f) - (M_{susp0} - M_{f\infty}) \right)^2 \quad (\text{eq. III.4.})$$

avec

$$\lambda = b_1 \left(\frac{1}{M_{susp0}} + \frac{1}{M_{susp0} - M_{f\infty}} \right) + b_2 \quad (\text{eq. III.5.})$$

L'intégration de l'équation III.4. donne l'évolution de la masse de filtrat avec le temps :

$$M_f = M_{f\infty} - \left(\lambda * t + \frac{1}{M_{f\infty}} \right)^{-1} \quad (\text{eq. III.6.})$$

Le modèle de Severin et col. (1999) basé sur la loi de Darcy

Basé sur la loi de Darcy, il décrit l'évolution du volume de filtrat recueilli en fonction du temps lors de l'égouttage. Il prend la forme suivante (à partir de l'équation II.48.) :

$$\frac{-V_f}{V_{f\infty}} \left(1 - \frac{V_B}{V_{g\infty}} \right) - (1 + \gamma) \ln \left(1 - \frac{V_f}{V_{f\infty}} \right) = K\Omega t \left(\frac{V_{g\infty} - V_B + V_{f\infty}}{V_{f\infty} V_{g\infty}} \right) \quad (\text{eq. III.7.})$$

En supposant que $V_B=0$ (puisque lors des essais aucune nappe d'eau n'a été observée au dessus de la boue déposée sur la toile, voir chapitre II) et en négligeant la résistance de la toile ($\gamma=0$, puisque l'égouttage en cellule sur des toiles différentes donne des résultats identiques), l'équation III.7. devient :

$$K\Omega t \left(\frac{V_{g\infty} + V_{f\infty}}{V_{f\infty} V_{g\infty}} \right) = -\frac{V_f}{V_{f\infty}} - \ln \left(1 - \frac{V_f}{V_{f\infty}} \right) \quad (\text{eq. III.8.})$$

L'hypothèse que la masse volumique initiale de la boue (ρ_b) est égale à celle de l'eau permet d'écrire :

$$K'\Omega t \left(\frac{M_{g\infty} + M_{f\infty}}{M_{g\infty} M_{f\infty}} \right) = -\frac{M_f}{M_{f\infty}} - \ln \left(1 - \frac{M_f}{M_{f\infty}} \right) \quad (\text{eq. III.9.})$$

où $K' = \rho_e K$, et $M_{g\infty} = M_{\text{susp}0} - M_{f\infty}$, la masse de gâteau récupéré sur le filtre après un temps infini d'égouttage.

Le modèle de Wells et Savage (1998) à perméabilité constante

Basé sur la loi de Darcy, il décrit l'évolution du volume de filtrat récupéré en fonction du temps. Il s'écrit (à partir de l'équation II.61.) :

$$V_f = V_{\text{susp}0} \left(1 - \left(\frac{C_{\text{susp}0}}{C_g} + \left(1 - \frac{C_{\text{susp}0}}{C_g} \right) e^{\left(\frac{\Phi \Omega t}{V_{\text{susp}0}} - 1 \right)} \right) \right) \quad (\text{eq. III.10.})$$

L'hypothèse que la masse volumique initiale de la boue (ρ_b) est égale à celle de l'eau permet d'écrire :

$$M_f = M_{\text{susp}0} \left(1 - \left(\frac{C_{\text{susp}0}}{C_g} + \left(1 - \frac{C_{\text{susp}0}}{C_g} \right) e^{\left(\frac{\rho_b \Phi \Omega t}{M_{\text{susp}0}} - 1 \right)} \right) \right) \quad (\text{eq. III.11.})$$

Le modèle de Wells et Savage (1998) à perméabilité non constante

Il permet de décrire l'évolution au cours du temps de la hauteur de suspension située au dessus du gâteau en formation lors de l'égouttage et l'évolution de la porosité du gâteau avec le temps. Il s'écrit (à partir des équations II.65. et II.66.) :

$$\varepsilon_g = -\frac{1}{m_4} \ln \left[-m_3 m_4 \rho g (h_{susp} - h_{susp0}) + \exp(-m_4 \varepsilon_{susp0}) \right] \quad (\text{eq. III.12.})$$

$$\frac{dh_{susp}}{dt} = \frac{-m_1 \exp(m_2 \varepsilon_g) \rho g h_{susp} (1 - \varepsilon_g) \rho_S}{\mu C_{susp0} (h_{susp0} - h_{susp})} \quad (\text{eq. III.13.})$$

Choix du modèle

Le modèle de Wells et Savage (eq. III.12. et III.13.) bien que reposant sur le fondement le plus théorique, fait apparaître quatre paramètres empiriques difficiles à mesurer. Par ailleurs, il ne peut pas être utilisé simplement pour le dimensionnement des tables d'égouttage en raison de la complexité de sa résolution. Il n'a donc pas été considéré dans la suite de ce travail.

Ainsi, seuls les deux modèles de Severin et col. et le modèle de Wells et Savage à perméabilité constante ont été comparés avec les expériences réalisées dans la cellule de laboratoire (figure III.10.).

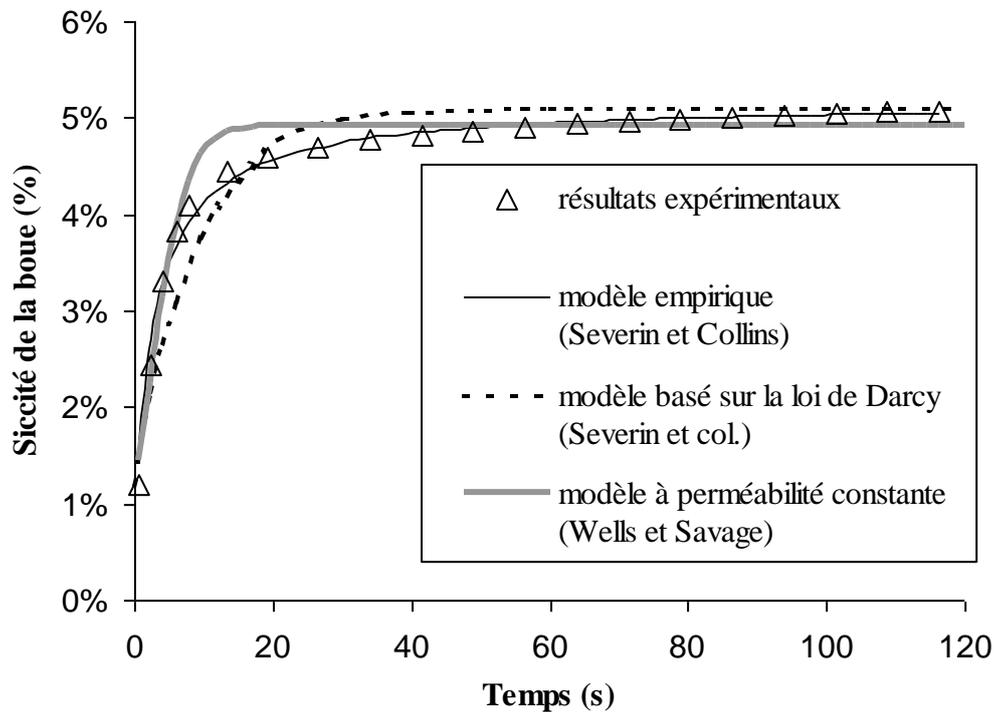


Figure III.10. : comparaison entre les résultats d'égouttage obtenus expérimentalement en cellule et les modèles proposés dans la littérature (eq. III.6., III.9. et III.11.)

D'après le graphe ci-dessus, les relations établies à partir de la loi de Darcy décrivent moins bien l'expérience (si V_B et γ ne sont pas négligés dans le cas du modèle de Severin et col., l'écart s'accroît). D'autre part, le modèle de Severin et col. nécessite l'utilisation de trois paramètres empiriques (V_B , $V_{f\infty}$ et K') soit un de plus que le modèle empirique. Ce dernier modèle a donc été choisi pour sa simplicité d'utilisation pour le dimensionnement des tables d'égouttages.

III.1.4.2. Développement du modèle empirique

Dans le but de prévoir les performances d'une table d'égouttage à partir des données obtenues en laboratoire, Severin et Collins (1992) considèrent que la concentration en matières sèches du gâteau obtenu après un temps infini d'égouttage ($C_{g\infty}$) est constante pour de faibles variations de la siccité initiale des boues (Si_0), c'est à dire que la masse de gâteau

recupéré après un temps infini d'égouttage ($M_{g\infty}$) est proportionnelle à la quantité totale de boue initialement déposée dans la cellule (M_{susp0}).

Or les courbes présentées précédemment (figures III.5. et III.6.) montrent une influence significative de la siccité initiale Si_0 (impact de la dilution) ainsi que de la masse de suspension initiale (M_{susp0}). Ces deux paramètres peuvent être combinés en introduisant la quantité totale de matières sèches (MS) contenue dans l'échantillon de boue ($MS=M_{susp0}*Si_0$). Ainsi, l'impact de MS sur $M_{g\infty}$ ($= M_{susp0} - M_{f\infty}$) et λ peut être mesuré à partir des essais précédents (figure III.11.).

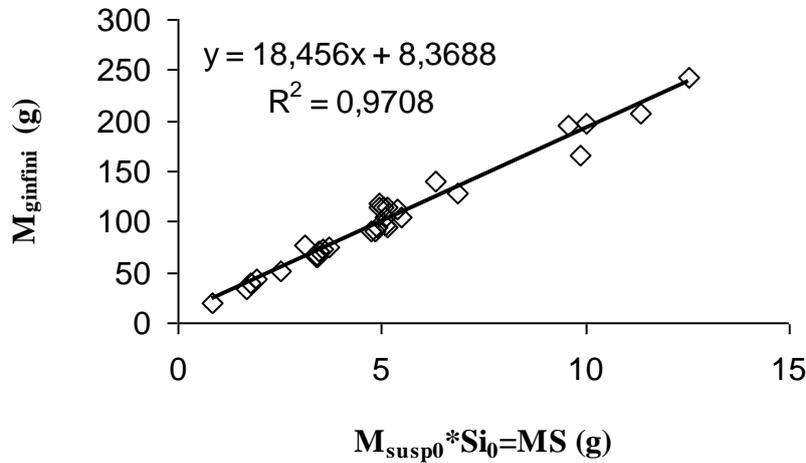


Figure III.11. : évolution de $M_{g\infty}$ avec MS pour les boues secondaires provenant de Lescar

D'après ce graphe, une relation linéaire peut être proposée pour exprimer $M_{g\infty}$ en fonction de $M_{susp0} * Si_0$:

$$M_{g\infty} = a_1(M_{susp0} \times Si_0) + a_2 \quad (\text{eq. III.14.})$$

Ainsi en introduisant cette équation III.14. dans les équations III.5 et III.6., il vient :

$$M_f = \left(M_{susp0} - (a_1 M_{susp0} \times Si_0 + a_2) \right) - \left(\lambda * t + \frac{1}{M_{susp0} - (a_1 M_{susp0} \times Si_0 + a_2)} \right)^{-1}$$

(eq. III.15.)

$$\lambda = b_1 \left(\frac{1}{M_{susp0}} + \frac{1}{a_1 M_{susp0} \times Si_0 + a_2} \right) + b_2 \quad (\text{eq. III.16.})$$

L'évolution linéaire décrite par l'équation III.16 peut être vérifiée expérimentalement (figure III.12.).

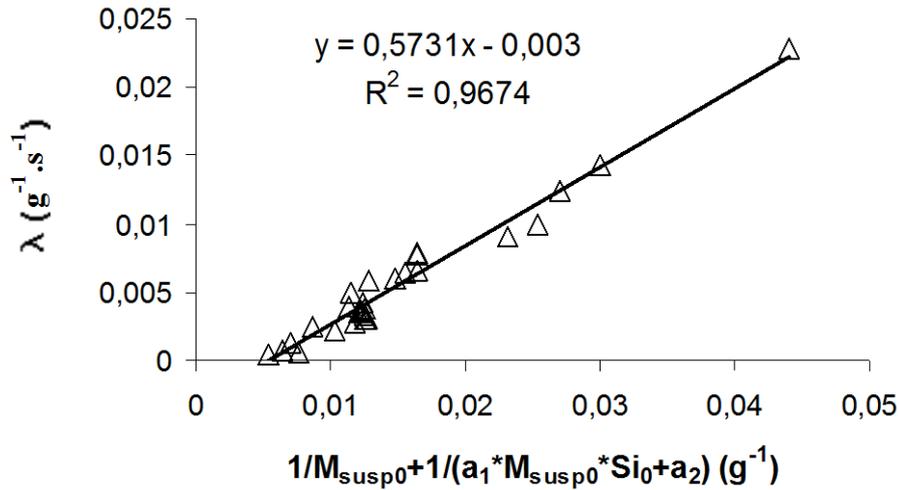


Figure III.12. : évolution de λ pour la boue provenant de Lescar

Une valeur négative est donc obtenue pour b_2 , ce qui entraîne pour une charge initiale (M_{susp0}) importante, un coefficient cinétique (λ) négatif (ce qui n'a aucun sens physique). L'utilisation de cette corrélation est donc limitée aux faibles charges initiales déposées sur la toile. Afin de contourner ce problème, une autre corrélation a été établie entre λ et MS (figure III.13.) :

$$\lambda = c_1 \exp(c_2 M_{susp0} \times Si_0) \quad (\text{eq. III.17.})$$

Quelles que soient les valeurs de M_{susp0} et Si_0 , le calcul de λ donne, alors, un résultat positif. Néanmoins, la valeur de λ est plus approximative pour les faibles charges et les boues très peu concentrées (cas rares dans la filière de traitement des boues).

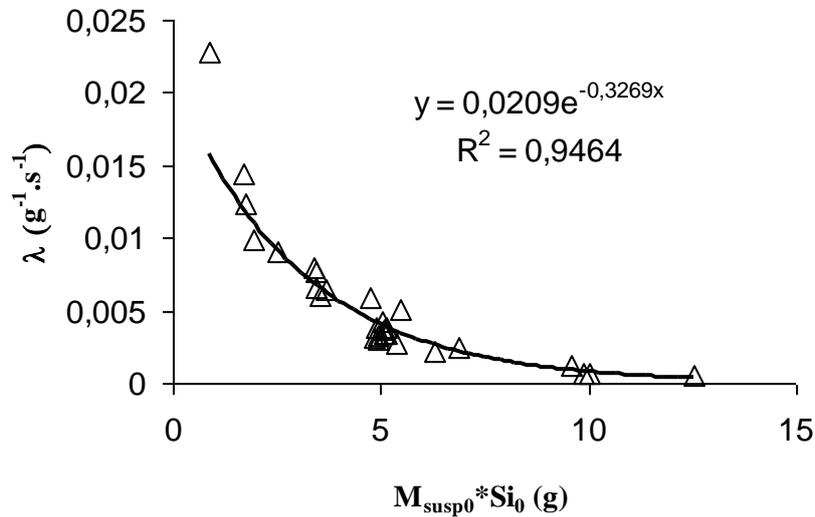


Figure III.13. : évolution de λ avec MS pour la boue provenant de Lescar

III.1.4.3. Recherche de paramètres globaux

Afin d'évaluer la variabilité des paramètres empiriques a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 avec la provenance des boues, plusieurs essais ont été menés sur les six boues activées présentées dans le tableau III.1. L'ensemble des essais montre que les paramètres ne sont pas réellement liés à l'origine de la boue mais qu'ils dépendent significativement de la concentration initiale de la boue (Si_b) (figure III.14.). Deux cas peuvent alors être distingués :

- les boues dont $Si_b < 2\%$;
- les boues dont $Si_b > 2\%$.

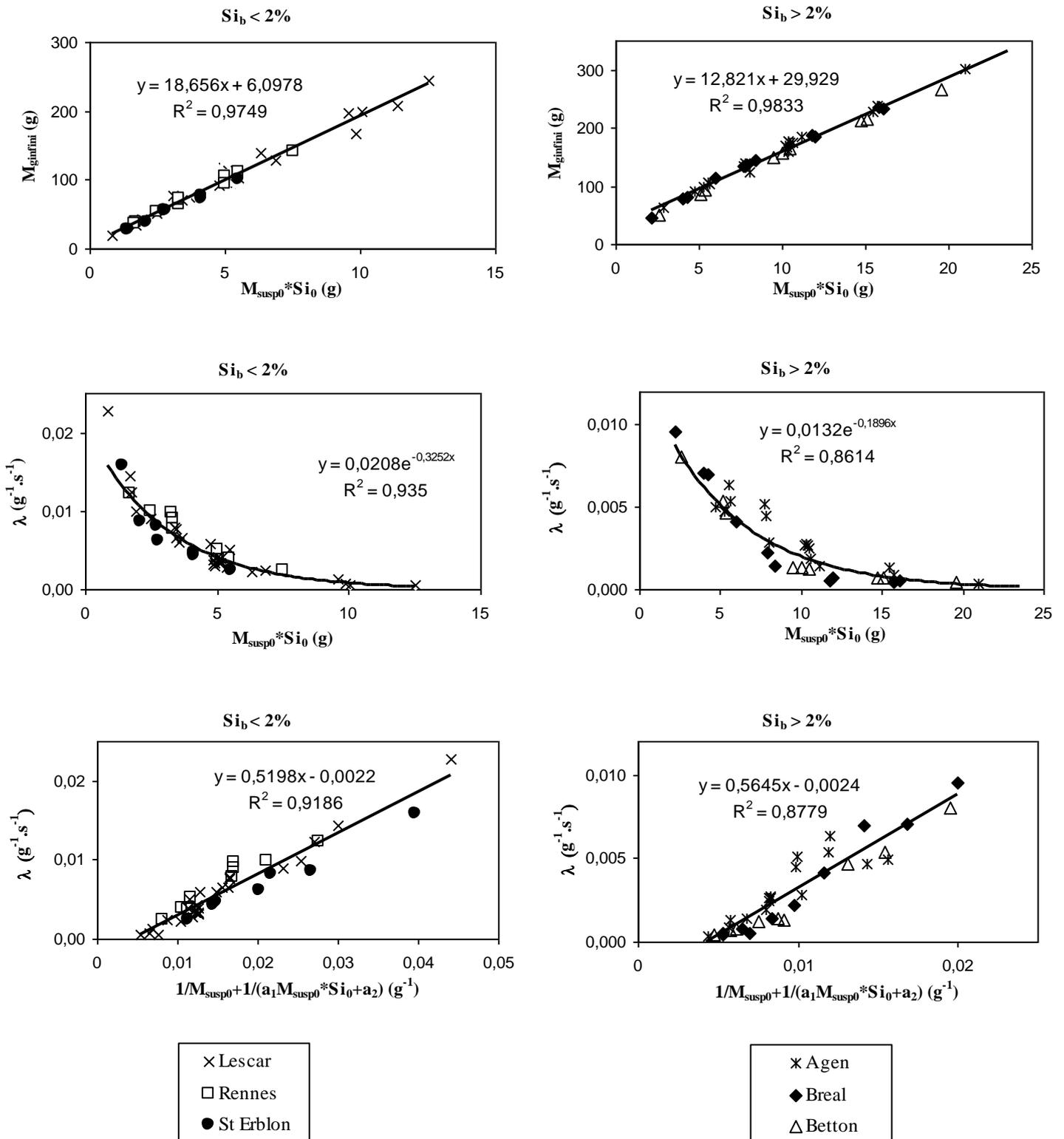


Figure III.14. : détermination des paramètres du modèle empirique pour les boues activées

Ainsi deux séries de paramètres ont été obtenues empiriquement pour caractériser l'égouttage dans chacune de ces situations (tableau III.2.).

Coefficients globaux du modèle empirique	Si_b < 2%	Si_b > 2%
a₁ (g)	18,656	12,821
a₂ (g)	6,0978	29,929
b₁ (s⁻¹)	0,5198	0,5645
b₂ (g⁻¹.s⁻¹)	-0,0022	-0,0024
c₁ (g⁻¹.s⁻¹)	0,0208	0,0132
c₂ (g⁻¹)	-0,3252	-0,1896

Tableau III.2. : valeurs des paramètres du modèle empirique modifié pour des boues activées égouttées dans une cellule de laboratoire de 10 cm de diamètre.

Ces paramètres globaux ont un réel intérêt dans le dimensionnement des tables d'égouttage puisqu'ils ne dépendent pas de la provenance des boues. Leur valeur semble indépendante de la boue activée traitée. Quand Si_b<2%, les résultats des essais en cellule peuvent être estimés avec une erreur relative inférieure à 7% en terme de masse de filtrat et inférieure à 15% en terme de siccité. Quand Si_b>2%, ces erreurs relatives sont respectivement évaluées à 10% et 15%.

III.1.5. Estimation des performances d'une table d'égouttage industrielle

III.1.5.1. Passage de la cellule à la table d'égouttage

Afin de pouvoir comparer le comportement des boues en cellule de laboratoire et sur une table d'industrielle, il faut utiliser la même charge surfacique (M_{susp0}/Ω). En effet, les résultats de la figure III.2. montrent que pour une même charge surfacique le drainage gravitaire est identique dans des cellules de sections différentes. Par conséquent, sur une table industrielle, la charge surfacique équivalant à celle déposée dans la cellule de laboratoire et le temps d'égouttage peuvent être calculés de la manière suivante :

$$\frac{M_{susp0}}{\Omega} = \left(\frac{Q_{susp0}}{l_t \times s_b} \right) \quad (\text{eq. III.18.}) \quad \text{et} \quad t = \frac{L_t}{s_b} \quad (\text{eq. III.19.})$$

Il résulte de ceci que les coefficients MS/Ω et M_{susp0}/Ω doivent apparaître dans l'écriture du modèle empirique:

$$\frac{M_f}{\Omega} = \left(\frac{M_{susp0}}{\Omega} - \left(a_1 MS' + \frac{a_2}{\Omega} \right) \right) - \left(\lambda' t + \frac{1}{\frac{M_{susp0}}{\Omega} - \left(a_1 MS' + \frac{a_2}{\Omega} \right)} \right)^{-1} \quad (\text{eq. III.20.})$$

avec

$$\lambda' = b_1 \Omega \left(\frac{1}{M_{susp0}} + \frac{1}{a_1 M_{susp0} \times Si_0 + a_2} \right) + \Omega b_2 = b_1 \left(\frac{1}{\frac{M_{susp0}}{\Omega}} + \frac{1}{a_1 MS' + \frac{a_2}{\Omega}} \right) + b_2 \quad (\text{eq. III.21.})$$

où

$$\lambda' = \Omega c_1 \exp\left(\frac{MS}{\Omega} c_2\right) = c_1' \exp(c_2' MS') \quad (\text{eq. III.22.})$$

De la même façon, la masse de gâteau à l'infini ($M_{g\infty}$) doit être estimée par unité de surface :

$$M_{g\infty}' = \frac{M_{g\infty}}{\Omega} = a_1 MS' + \frac{a_2}{\Omega} = a_1 MS' + a_2' \quad (\text{eq. III.23.})$$

Cette formulation modifiée du modèle empirique proposé initialement par Severin et Collins (1992) semble être une approche intéressante pour définir a priori le comportement des tables d'égouttage. Pour vérifier cela, il est nécessaire d'essayer d'extrapoler les résultats obtenus sur la cellule aux tables d'égouttage industrielles.

III.1.5.2. Comparaison entre la cellule de laboratoire et la table d'égouttage

Les essais comparant les performances de la cellule de laboratoire avec celles du pilote, ou avec celles de la table d'égouttage industrielle, à partir de la même masse surfacique de boue déposée sur chacun des trois appareils, mettent en évidence le fait que la cellule est un outil très intéressant pour évaluer les performances d'une table d'égouttage industrielle (figures III.15. et III.16.).

Dans chaque essai mené en parallèle entre la cellule et le pilote d'une part, et la cellule et la table d'autre part, la boue est conditionnée avec la même dose de polymère (dans la plage de l'optimum de conditionnement) et la même toile a été utilisée. Cependant, les paramètres du modèle utilisés pour établir les courbes de prévision des performances sont ceux du tableau III.2 (obtenus en utilisant le polymère EM 840 TRM, flocculant utilisé pour tous les essais au laboratoire) alors que la boue de la station de Saint-Pierre-de-Gobert égouttée sur la table industrielle et sur la cellule est conditionnée avec du 4490 SH (Floerger).

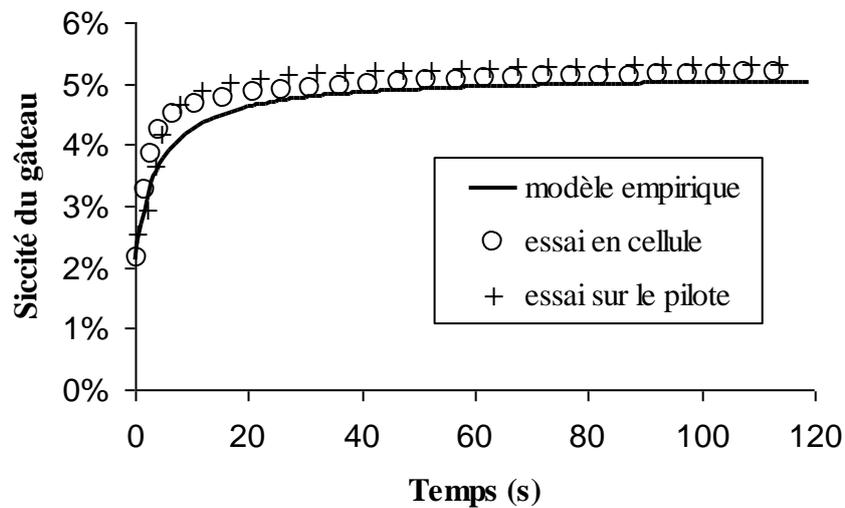


Figure III.15. : comparaison entre les performances sur la zone d'égouttage du pilote, dans la cellule de laboratoire et le modèle empirique global.

Les résultats obtenus entre la cellule et le pilote sont quasiment similaires (figure III.15.). Une légère erreur apparaît (inférieure à 5% après 10 secondes d'égouttage). En dépit de la différence observée (inférieure à 10% pour la siccité), l'erreur relative avec le modèle empirique reste inférieure au domaine d'erreur défini précédemment.

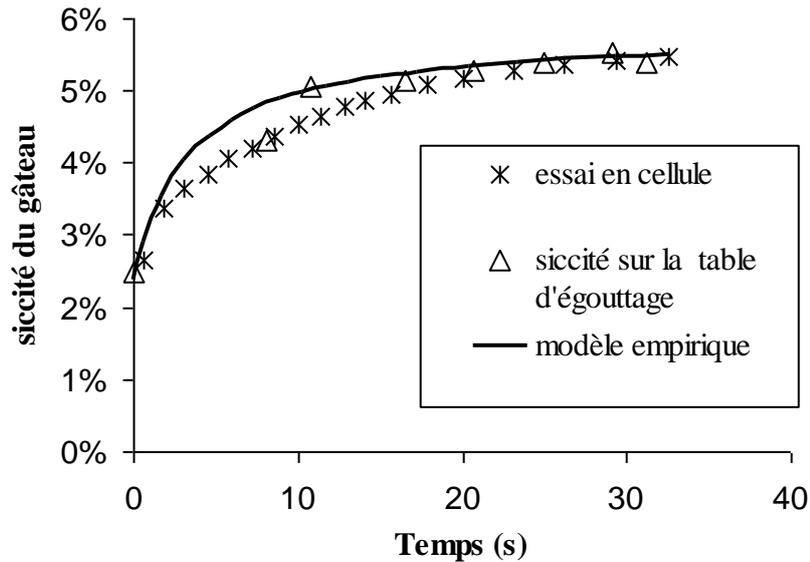


Figure III.16. : comparaison entre les performances de l'égouttage en cellule, sur la table industrielle et le modèle empirique global.

Des résultats similaires sont observés entre la cellule de laboratoire et la table d'égouttage industrielle (figure III.16.). La comparaison des résultats avec le modèle empirique montre à nouveau un bon accord entre les données, bien que le polymère utilisé avec la table et la cellule diffère de celui ayant permis d'obtenir les paramètres du modèle. En dépit de ces différences, l'erreur relative (<10% pour la siccité) reste dans le domaine d'erreur du modèle.

III.1.6. Conclusion

Ce travail a été entrepris afin d'améliorer le dimensionnement des tables d'égouttage grâce à des expériences de laboratoire. Des boues activées provenant de six stations d'épuration différentes ont été testées en cellule de laboratoire. Ces expérimentations ont permis d'évaluer l'importance des principaux paramètres de fonctionnement des tables d'égouttage sur la siccité en sortie. De ces résultats, un modèle empirique initialement développé par Severin et Collins (1992) a pu être modifié. Il permet, dès lors, de prévoir l'évolution de la siccité de la boue à partir de deux paramètres, seulement, de fonctionnement : la quantité de matières sèches de la boue (MS) et la charge de la boue déposée sur la toile ($M_{\text{susp}0}$). Deux séries de paramètres de calage du modèle ont donc été établies en fonction de la concentration initiale de la boue ($Si_b < 2\%$ ou $Si_b > 2\%$). Enfin, une comparaison a été réalisée entre l'évolution de la siccité en cellule de laboratoire, l'évolution de la siccité sur la

zone d'égouttage du pilote et l'évolution de la siccité sur une table d'égouttage industrielle. Les résultats montrent, d'une part, que la cellule de laboratoire permet de décrire ce qui se passe à plus grande échelle et, d'autre part, que le modèle empirique est un outil intéressant pour simuler le comportement des boues lors de cette déshydratation gravitaire.

III.2. Pressage sur filtre à bandes de laboratoire

III.2.1. Le pilote de laboratoire

III.2.1.1. Introduction

Afin d'étudier l'influence des paramètres de fonctionnement des filtres à bandes, un pilote instrumenté et modulable a été réalisé au laboratoire. Etant donné que les pilotes déjà utilisés et décrits dans la littérature ("Crown Press" et pilote de Reitz (1988), voir paragraphe II.3.5.4.) semblent poser quelques difficultés quant à l'extrapolation de leurs performances aux cas industriels, nous avons décidé de construire un filtre à bandes de petite taille possédant un seul rouleau de pressage (figure III.17.) et permettant d'étudier la compression au niveau du rouleau de pressage.



Figure III.17. : filtre à bandes pilote

Cet appareil expérimental permet de faire varier un large éventail de paramètres tels que la vitesse et la tension des toiles, le diamètre et la position du rouleau de pressage...

Un moteur relié au rouleau 9 (figure III.18.) permet d'entraîner la toile supérieure. Ce rouleau est entouré d'une gaine de caoutchouc afin d'améliorer l'adhérence. La toile inférieure est, quant à elle, entraînée par contact avec la toile supérieure. Le passage des toiles sous le rouleau de pressage (rouleau 3) permet une bonne évacuation du filtrat. Ce dernier est recueilli dans plusieurs bacs en évitant au maximum qu'il ne coule le long des toiles. Afin de ne pas perturber la boue avant son passage au niveau du rouleau 3, la toile supérieure peut être positionnée grâce au rouleau 12. Ceci permet de créer une zone de coincement juste en amont du rouleau de pressage. Par ailleurs, la tension des toiles s'effectue grâce à des vérins pneumatiques fixés au châssis et aux rouleaux 1 et 11. Le couplage d'un variateur mécanique et d'un variateur de fréquence au niveau du moteur permet d'obtenir une vitesse de défilement des toiles relativement importante (de 0 à 5,9 m/min). Un rouleau de laminage (rouleau 13) peut être occasionnellement installé pour des mesures spécifiques. Il est également relié à deux vérins pneumatiques qui permettent de fixer la pression de laminage.

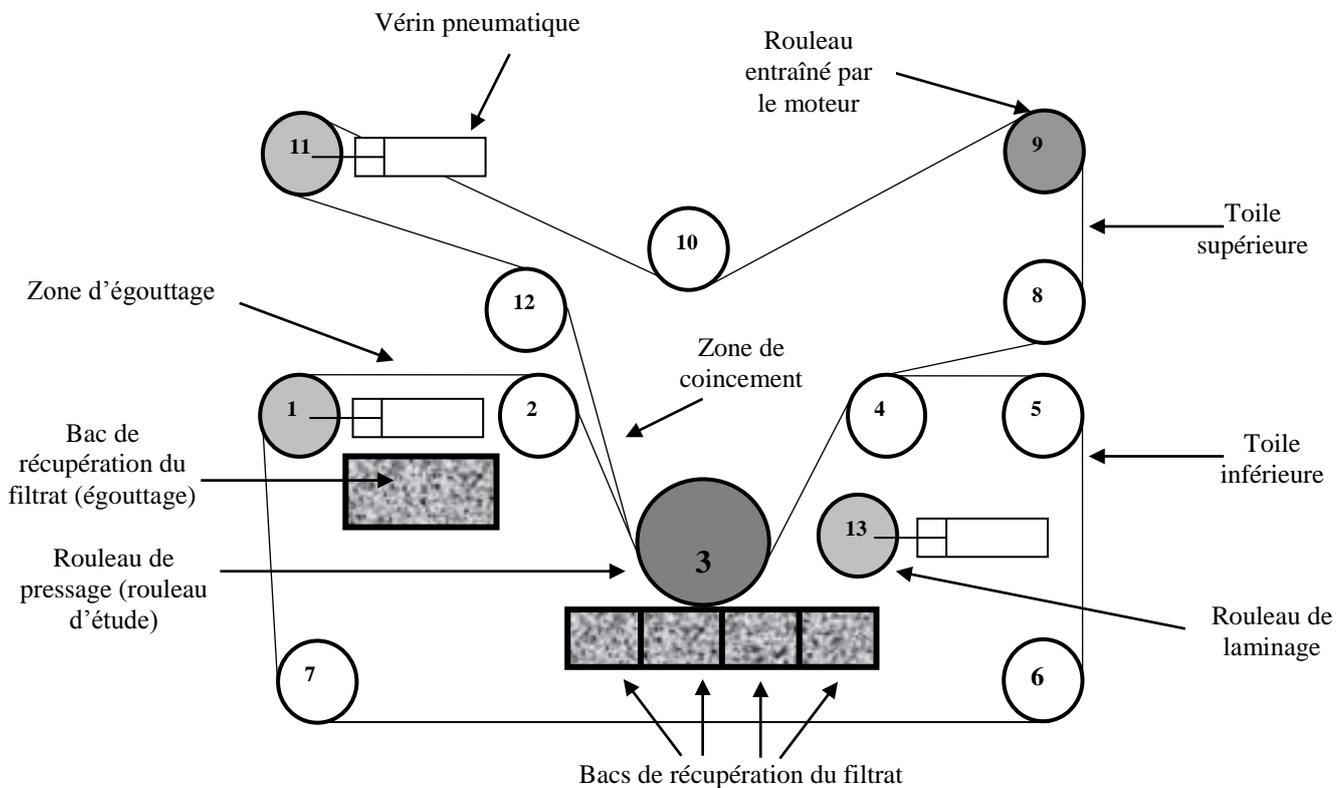


Figure III.18. : schéma simplifié du pilote

Tous les rouleaux peuvent être déplacés afin de modifier la configuration du pilote et notamment les zones de coincement, d'égouttage et de pressage. Cet aspect est également important lors de la modification du diamètre du rouleau de pressage (qui entraîne une modification de la longueur du parcours des toiles). Pour des raisons de sécurité, notamment lors du lavage des toiles au jet d'eau (sous 7 bar), l'armoire électrique est dissociée du bâti. Elle regroupe les actionneurs permettant de commander la tension, la vitesse et le sens de rotation du moteur.

Ce pilote a une longueur totale d'environ 2 m, une largeur de 50 cm (sans compter le moteur) et une hauteur de 1,50 m. Les toiles ont une largeur de 30 cm, une longueur de 5,35 m et 4,55 m pour la toile inférieure et supérieure respectivement. Les vérins ont un diamètre de 80 mm et une course de 100 mm. Les rouleaux possèdent tous un diamètre de 90 mm à l'exception du rouleau de pressage qui peut être installé sous sa version 90 mm, 170 mm, 270 mm et 400 mm.

III.2.1.2. Paramètres de fonctionnement du pilote

La tension des toiles

Par l'intermédiaire des vérins pneumatiques, les deux toiles peuvent être tendues indépendamment. Dans la configuration utilisée durant ce travail, c'est la toile inférieure qui presse la boue contre le rouleau de pressage. Par conséquent, c'est la tension de cette toile qui nous intéresse plus particulièrement.

La tension des toiles a été mesurée (figure III.19.) grâce à des dynamomètres (installés pour l'occasion au niveau des fermetures des bandes). Cette tension est supposée constante en tout point de la toile.

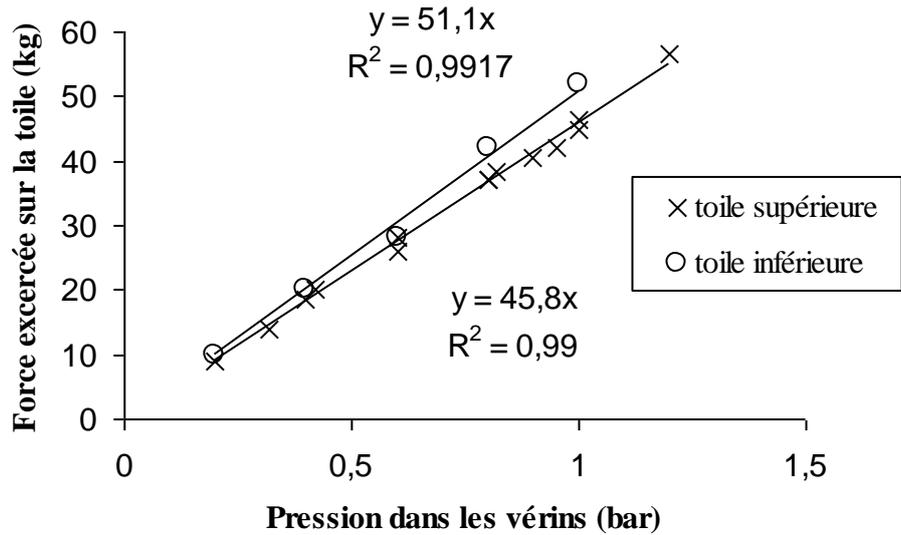


Figure III.19. : mesure de la tension des toiles (précision des mesures +/- 1 kg)

Ces résultats peuvent être retrouvés par le calcul en écrivant un bilan de force (figure III.20.) :

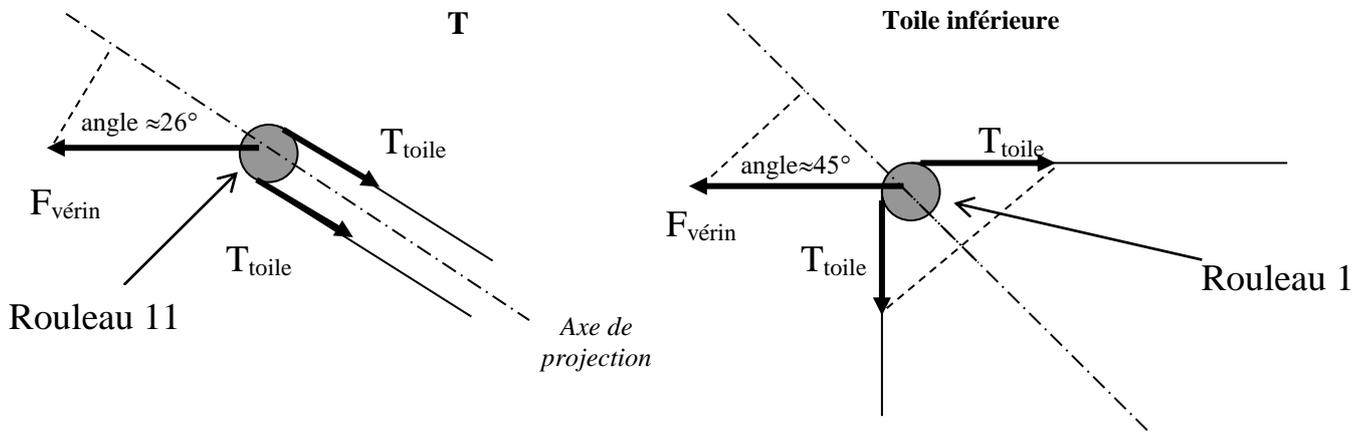


Figure III.20. : bilan de forces sur les toiles

(configuration obtenue avec les rouleaux de pressage de diamètre 90 mm, 170 mm et 270 mm)

Pour la toile inférieure, l'équilibre des forces sur l'axe de projection s'écrit :

$$F_{\text{vérins}} \times \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = 2 \times T_{\text{toile}} \times \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \quad (\text{eq. III.24.})$$

Par ailleurs, la force résultante de l'action des vérins dépend de la pression appliquée dans la chambre de ces derniers :

$$F_{\text{vérins}} = 2 \times P_{\text{vérin}}(\text{bar}) \cdot 10^5 \times S_{\text{vérin}} \quad (\text{eq. III.25.})$$

Le facteur 2 apparaît car le rouleau est relié à deux vérins. De plus la surface des vérins est égale à 0,05 m², la force induite par les vérins se calcule de la façon suivante :

$$F_{\text{vérins}}(\text{kg}) = 2 \times P_{\text{vérin}}(\text{bar}) \cdot 10^5 \times \frac{0,05}{9,81} = 2 \times 51,21 \times P_{\text{vérin}}(\text{bar}) \quad (\text{eq. III.26.})$$

D'où, à l'équilibre des forces

$$T_{\text{toile}}(\text{kg}) = 51,21 \times P_{\text{vérin}}(\text{bar}) \quad (\text{eq. III.27.})$$

On retrouve, à l'erreur de mesure près, le coefficient mesuré grâce au dynamomètre.

Un calcul similaire sur la bande supérieure permet d'écrire :

$$F_{\text{vérins}} \times \cos(26^\circ) = 2 \times T_{\text{toile}} \quad (\text{eq. III.28.})$$

Soit encore :

$$T_{\text{toile}}(\text{kg}) = 45,6 \times P_{\text{vérin}}(\text{bar}) \quad (\text{eq. III.29.})$$

On retrouve, une nouvelle fois, le coefficient mesuré.

La pression dans les vérins pouvant varier sur une plage de 0 à 7 bar, la tension de toile, qui peut être installée sur le pilote, est comprise entre 0 et 11,9 kg.cm⁻¹ pour la toile inférieure. Afin que le châssis du pilote ne subisse pas trop de contraintes, nous nous sommes limités à une pression maximale de 3 bar, c'est à dire à une tension de toile de 5,1 kg.cm⁻¹. Les tensions de toiles du pilote restent ainsi du même ordre de grandeur que celles appliquées dans les filtres à bandes industriels.

La vitesse de défilement des toiles

Les vitesses des toiles habituellement appliquées dans les filtres à bandes industriels varient entre 1 à 4 m.min⁻¹. Le choix du moteur et du variateur mécanique a été effectué en considérant cette gamme comme référence. Ainsi, sur le pilote, la vitesse de défilement des toiles peut varier entre 0,1 et 5,9 m.min⁻¹.

La vitesse des toiles peut être mesurée grâce à un tachymètre portable (Photo/Contact tachometer FI 2236 commercialisé par la Française d'Instrumentation). Les mesures de vitesses révèlent une variation de 0,1 m.min⁻¹ pour des vitesses supérieures à 1 m.min⁻¹ en raison notamment de certains petits défauts de fabrication (par exemple, les rouleaux ne sont pas parfaitement circulaires). De plus, ces mesures de la vitesse montrent qu'il n'y a pas de glissement notable entre les deux toiles : elles défilent à la même vitesse.

Les toiles

Deux types de toiles tissées par Rai-tillères (tableau III.3.) ont été testés sur le pilote (16-6 chevron et 24-7 chevron). La toile 16-6 chevron a été utilisée pour la majeure partie des essais : c'est la toile couramment utilisée par E.M.O. sur ces filtres à bandes. La toile 24-7 chevron n'a été utilisée que pour évaluer l'impact du type de toile sur les performances de déshydratation.

Nom de la toile	Diamètre de chaîne (mm)	Diamètre de trame (mm)	Epaisseur (mm)	Ouverture théorique (µm)
16-6 chevron	0,65	0,80	1,80	360
24-7 chevron	0,50	0,80	1,60	260

Tableau III.3. : caractéristiques des toiles testées sur le pilote

Autres paramètres de fonctionnement

Quatre rouleaux de pressage de diamètres différents (90, 170, 270, et 400 mm) ont été utilisés durant les différents essais. Ils couvrent la gamme des diamètres de rouleau généralement rencontrés sur les filtres à bandes industriels.

Le nombre de rouleaux de pressage dans un filtre à bandes est un paramètre qui peut également être étudié sur le pilote. Pour cela, il suffit de multiplier les passages de la boue au niveau du rouleau de pressage en alternant le sens de défilement des toiles. Après chaque passage, le filtrat est recueilli dans des bacs, ce qui permet de connaître l'évolution de la quantité de filtrat récupéré grâce à chaque pressage successif.

L'enroulement des toiles ainsi que la géométrie de la zone de coincement peuvent être légèrement modifiés en changeant la position des rouleaux 2, 3 et 4 sur le châssis.

L'impact de la variation du débit d'entrée des boues peut aussi être étudié en déposant sur une surface de toile définie (18 * 15 cm durant toute l'étude), des quantités différentes de boue. De plus, afin d'être dans des conditions proches du fonctionnement industriel, la masse de boue nécessaire pour chaque essai est évaluée de façon à obtenir des gâteaux d'une épaisseur proche du centimètre.

Paramètres intrinsèques des boues

Ce pilote permet également d'étudier l'influence des paramètres propres aux boues comme leur nature (mixte, activée, digérée, etc...), leur conditionnement (type et dose de polymères utilisés, mode d'agitation, etc....) et leur concentration initiale sur leurs performances en déshydratation mécanique.

Le conditionnement des boues n'étant pas le sujet essentiel de cette étude, nous n'avons pas étudié l'impact de la floculation sur les performances du pilote.

L'objectif étant d'étudier le pressage des boues dans le pilote, les essais ont été réalisés à partir de boue conditionnée déjà égouttée 8 à 10 minutes sur la zone d'égouttage du pilote. Une fois égouttée, l'échantillon de boue est pesée (la toile est alors séchée avec du papier absorbant) et déposée à nouveau sur la bande inférieure (ce qui entraîne une nouvelle récupération de filtrat par égouttage représentant environ 3 à 7% de la masse de l'échantillon).

Trois boues différentes ont été utilisées :

- les boues mixtes de la station d'épuration de Pau-Lescar (100 000 EH environ), prélevées directement à l'entrée du filtre à bandes de la station. Le conditionnement de la boue, ainsi que le pourcentage en boues primaires (variant entre 10 et 50%) ne sont pas connus dans ce cas ;
- les boues activées de la station d'épuration d'Idron (banlieue de Pau, 10 000 EH), prélevées dans le silo épaisseur, ont été floculées avec un polymère cationique de haut poids moléculaire fourni par Floerger (EM 840 TRM) à $7 \text{ g.kg}_{\text{MS}}^{-1}$ avec un agitateur mécanique pendant 30 s. La concentration en matières sèches de ces boues varie selon les prélèvements de 13 à 28 g.l^{-1} . Elles contiennent environ 78% de matières organiques et leur indice de Molhman (mesuré au laboratoire) évolue autour de $115 \text{ ml.g}_{\text{MS}}^{-1}$;
- les boues activées de la station d'épuration de Vic-en-Bigorre (Hautes-Pyrénées, 7500 EH) utilisées pour quelques essais seulement ont été :
 - soit prélevées à l'entrée du bac de floculation puis floculées de la même manière que les boues d'Idron ;
 - soit prélevées, déjà conditionnées, à l'entrée du filtre à bandes opérant sur le site.
 La concentration en matières sèches de ces boues se situe environ à 14 g.l^{-1} . Elles contiennent environ 87% de matières organiques et leur indice de Molhman (mesuré au laboratoire) évolue autour de $176 \text{ ml.g}_{\text{MS}}^{-1}$.

III.2.1.3. Exploitation des résultats.

Afin de pouvoir comparer les diverses expériences réalisées sur le pilote, il a fallu définir une méthodologie pour l'exploitation des résultats. Le fluage du gâteau entre les deux toiles doit entraîner une hétérogénéité dans les trois directions que sont la largeur, la longueur et l'épaisseur du gâteau. Pour quantifier cette hétérogénéité, des mesures locales de siccités ont été réalisées. Les figures III.21. et III.22. donnent un exemple de la répartition de l'humidité dans des gâteaux pressés.

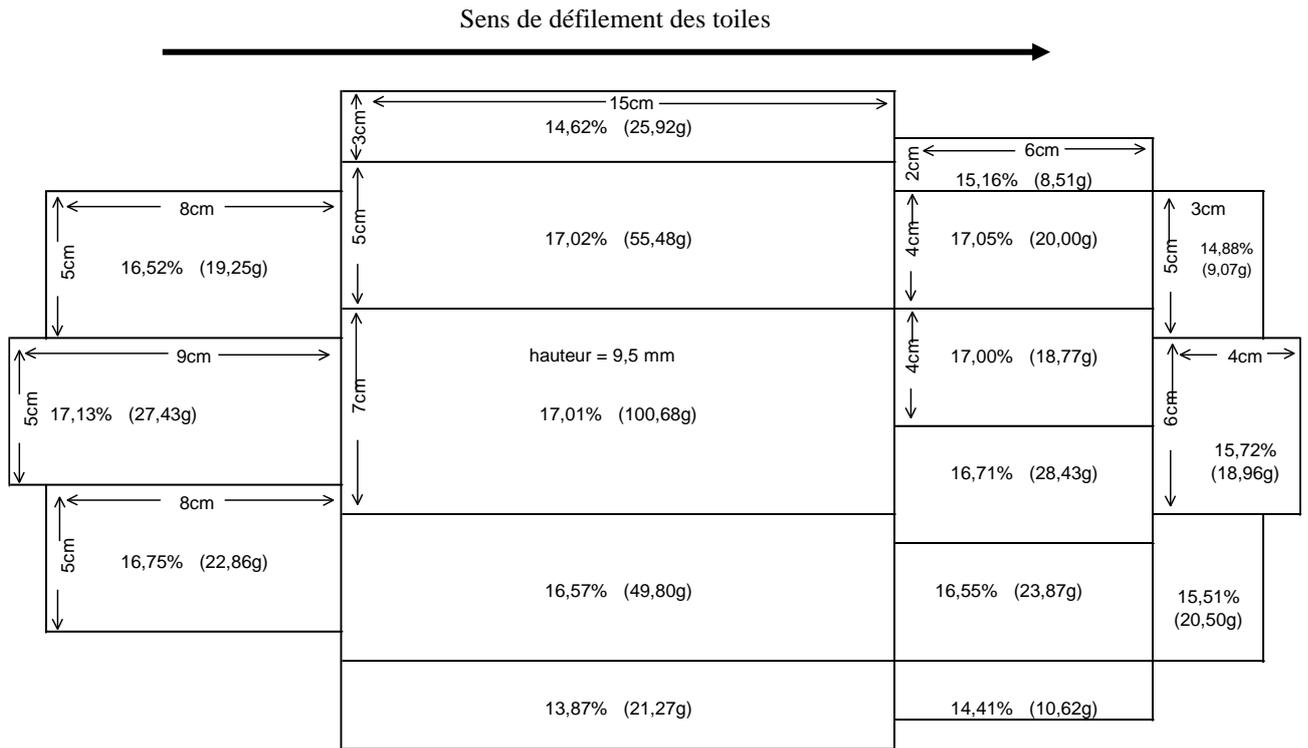


Figure III.21. : exemple de distribution de siccité dans un gâteau de boues mixtes obtenu après 1 passage dans le pilote

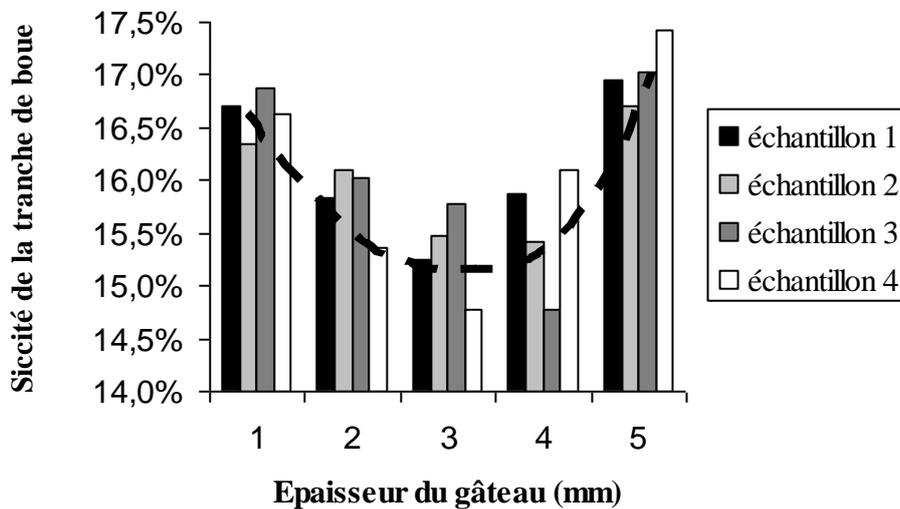


Figure III.22. : distribution de siccité dans l'épaisseur du gâteau de boues secondaires obtenue après 5 pressage successifs (après avoir découpé à l'emporte-pièce plusieurs tranches de boues de 1 mm)

La figure III.21. fait apparaître une différence notable entre le pilote et un filtre à bandes industriel. En effet, sur le pilote, la boue ne rencontre aucune "résistance" vers

l'arrière, ni vers l'avant lors du pressage, la boue peut ainsi s'étaler dans ces deux directions en faisant apparaître un profil de siccité dans le sens de défilement des toiles. Dans les filtres industriels, les zones en aval et en amont des rouleaux de pressage contiennent de la boue (du fait d'un fonctionnement en continu) ce qui limite cet étalement. Par ailleurs, on retrouve sur la figure III.22. le phénomène déjà signalé par Halde (1980) qui montre que la siccité est maximale au niveau des couches de boue en contact avec les toiles, notamment, dans notre cas, au niveau de la toile supérieure (l'eau étant expulsée vers la bande inférieure).

Du fait de cette non uniformité du gâteau, nous avons choisi pour mener à bien notre étude de prendre la mesure de la siccité globale du gâteau obtenu en fin d'expérience comme indicateur de la performance du pilote.

Dans les essais effectués sur le pilote, l'étalement de la boue a été mesuré en comparant les surfaces occupées par la boue en fin et en début d'essais.

Reproductibilité

Afin de déterminer leur répétabilité, plusieurs essais ont été réalisés dans les mêmes conditions de floculation et de fonctionnement sur les différentes boues, avec divers rouleaux de pressage. Un découpage (en neuf parties) du gâteau obtenu après un passage au niveau du rouleau de pressage permet de tester le caractère reproductif des essais menés sur le pilote (figure III.23.) et d'estimer l'erreur relative inhérente à la procédure de mesure.

16,47%	(21,74g)	16,76%	(66,24g)	16,73%	(40,1g)
17,94%	(37,24g)	17,95%	(59,44g)	17,24%	(52,97g)
17,02%	(17,22g)	16,82%	(47,99g)	15,63%	(36,73g)

17,19%	(20,65g)	16,94%	(65,83g)	16,34%	(49,94g)
17,68%	(19,34g)	17,93%	(72,91g)	17,24%	(54,76g)
16,78%	(15,2g)	16,83%	(60,43g)	16,49%	(47,05g)

16,48%	(20,57g)	16,62%	(73,46g)	16,77%	(31,66g)
17,71%	(29,93g)	17,74%	(70,33g)	17,10%	(49,71g)
16,64%	(14,72g)	16,71%	(65,7g)	15,95%	(32,61g)

17,15%	(16,5g)	16,99%	(40,15g)	15,83%	(41,87g)
18,19%	(27,66g)	17,98%	(63,96g)	17,00%	(62,06g)
16,78%	(16,21g)	16,84%	(52,62g)	16,06%	(48,14g)

Figure III.23. : distribution de la siccité dans des gâteaux (découpés en 9) obtenus après 1 passage dans le pilote dans des conditions identiques de fonctionnement

Cette erreur relative est inférieure à 3% pour la siccité globale quels que soient la boue, le diamètre du rouleau de pressage, la vitesse de défilement des toiles et la pression appliquée.

De plus pour garantir une certaine cohérence des résultats expérimentaux et palier au caractère évolutif des boues, chaque série d'essais a été réalisée dans une même journée avec de la boue issue d'un même prélèvement.

Enfin, aucune technique de mesure de la qualité du filtrat n'a été mise en œuvre, car l'objet de notre étude était principalement l'amélioration de la siccité du gâteau. Cependant quelques observations visuelles ont pu être faites au cours des différents essais.

III.2.2. Résultats des essais sur le pilote

III.2.2.1. Influence de la charge

L'un des paramètres les plus importants quant au fonctionnement des filtres à bandes est le débit de boue entrant. Actuellement, la principale exigence des exploitants est d'assurer le traitement d'un débit important de suspension. Or, la siccité des boues déshydratées devenant une contrainte économique importante, il semble indispensable d'évaluer l'impact du débit sur la siccité après déshydratation. Au niveau du pilote, cette étude peut être réalisée en modifiant la masse de boue déposée sur une surface de toile donnée (figure III.24.).

La figure III.24. montre une faible incidence de la charge sur la siccité en sortie de pressage (très près des limites de reproductibilité). Cependant, on observe généralement que plus la couche de boue est mince, meilleure est la déshydratation.

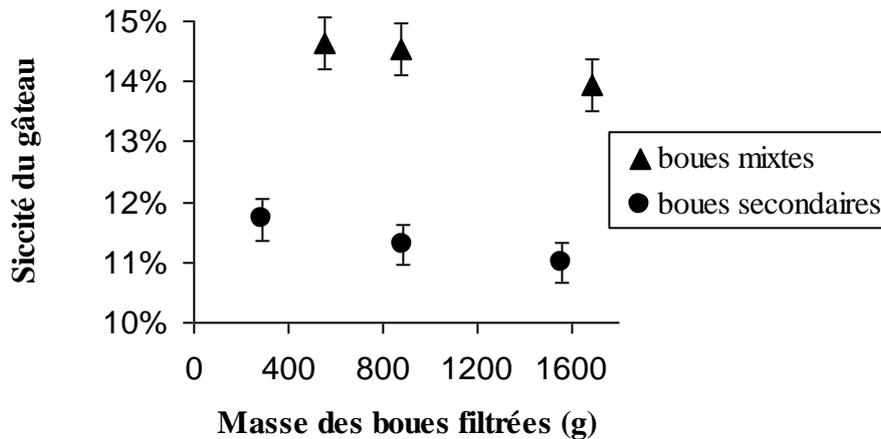


Figure III.24. : influence de la charge déposée sur une surface de toile donnée
Conditions des essais :

- boues mixtes de Lescar, $D = 270$ mm, $s_b = 2$ m.min⁻¹, $T_{\text{toile}} = 1,67$ kg.cm⁻¹, $N = 1$
- boues secondaires d'Idron, $D = 400$ mm, $s_b = 2$ m.min⁻¹, $T_{\text{toile}} = 1,67$ kg.cm⁻¹, $N = 1$

Les essais menés sur le filtre à bandes du site de Saint-Pierre-de-Gobert par l'Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives (IFTS) corroborent nos résultats (l'augmentation du débit de 6,6 à 9,9 m³.h⁻¹ entraîne une dégradation de 0,5 point de la siccité du gâteau). L'ensemble de nos observations confortent celles obtenues par Lotito et col. (1986) sur des boues mixtes.

Cette évolution de la siccité en sortie avec les variations du débit de suspension va dans le sens contraire de l'égouttage. Lors de l'utilisation d'un combiné (table d'égouttage / filtre à bandes), un optimum est à rechercher. Des essais menés sur le site de Saint-Pierre-de-Gobert par l'IFTS, où une table d'égouttage est installée avant le passage des boues dans le filtre à bandes confirme la présence de cet optimum avec l'utilisation du combiné.

Par ailleurs, le fluage est bien évidemment plus important lors de l'introduction d'une masse élevée de boue dans le pilote (à titre d'exemple, la surface occupée par le gâteau est 4 fois plus importante pour une masse de boue initiale de 1600 g que pour une masse de 800 g).

III.2.2.2. Influence de la concentration initiale des boues

Plusieurs auteurs (Tokunaga et col., 1983 ; Lecey et Pietila, 1983 ; Lotito et col., 1986) ont observé que l'augmentation de la concentration initiale de la boue à l'entrée du filtre à bandes permettait d'améliorer la déshydratation de cette dernière. Afin de vérifier cela, trois essais ont été réalisés à partir d'échantillons de boues de concentrations différentes. Pour obtenir des boues de siccités initiales différentes, un essai a été réalisé en laissant s'égoutter la boue deux minutes, un autre huit minutes et un dernier, en égouttant la boue 8 min avec labourage du gâteau.

Les résultats obtenus sont très proches des limites de reproductibilité (figure III.25.), il est donc difficile de conclure. Il semblerait, en effet, que plus la siccité initiale est importante, meilleure est la déshydratation, mais l'écart entre les siccités initiales et les siccités finales diminue. Par exemple entre le premier et le dernier essai, la différence entre les siccités initiales est de 1,8 point tandis que l'écart entre les siccités finales n'est plus que de 0,8 point. En fait, l'amélioration de la déshydratation reste limitée puisque l'eau qui n'est pas éliminée lors de l'égouttage est très facile à extraire.

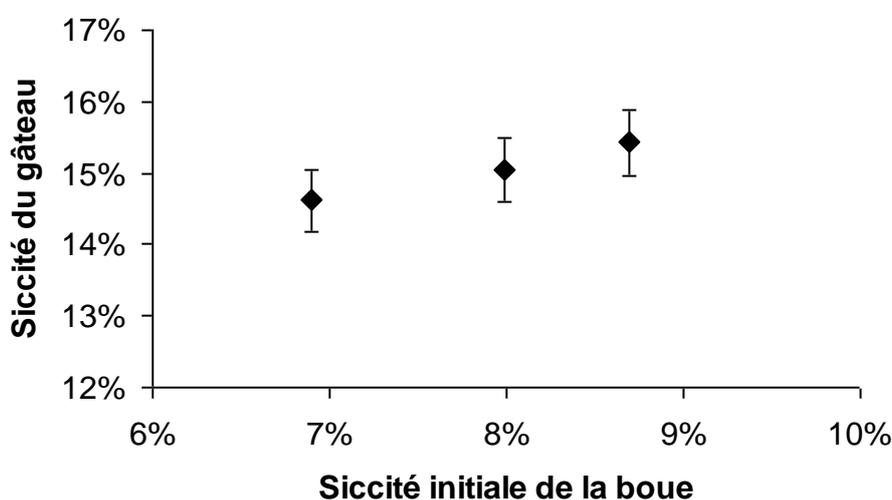


Figure III.25. : influence de la siccité initiale des boues

Conditions des essais :

- boues mixtes de Lescar, $D = 270$ mm, $s_b = 2$ m.min⁻¹, $T_{\text{toile}} = 1,67$ kg.cm⁻¹, $N = 1$

III.2.2.3. Influence du type des toiles

Lors de la filtration des boues, un grand nombre d'auteurs considère que la résistance du filtre est négligeable. Cela doit être d'autant mieux vérifié que la toile est ouverte (cas des toiles des filtres à bandes). Autrement dit les toiles ne devraient, a priori, pas avoir d'influence notable sur les performances de déshydratation. En revanche, la qualité du filtrat et des eaux de lavage peut être significativement altérée avec l'utilisation de toiles trop ouvertes.

Les essais réalisés sur le pilote confirment bien les remarques précédentes en termes de siccité (figure III.26.), par contre aucune conclusion ne peut être tirée sur la qualité du filtrat.

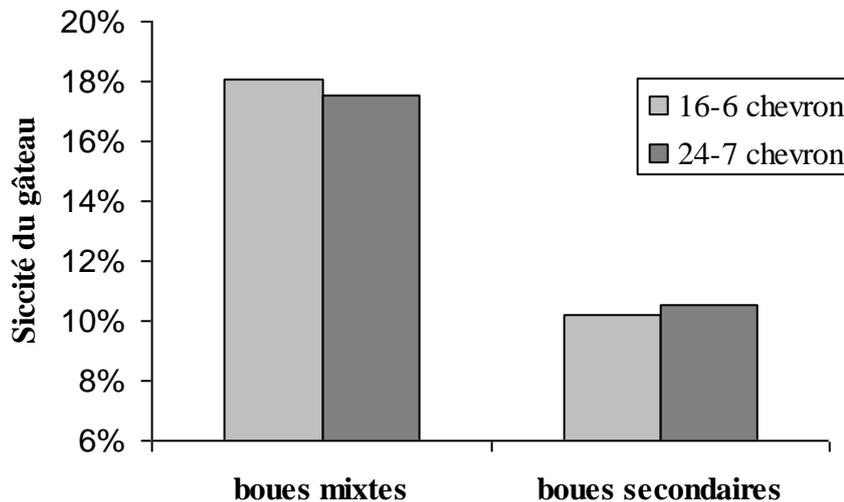


Figure III.26. : influence de la toile sur la siccité du gâteau de boues

Conditions des essais :

- boues mixtes de lescar, $D = 270$ mm, $s_b = 2$ m.min⁻¹, $T_{\text{toile}} = 1,67$ kg.cm⁻¹, $N = 1$
- boues secondaires d'Idron, $D = 400$ mm, $s_b = 2$ m.min⁻¹, $T_{\text{toile}} = 1,67$ kg.cm⁻¹, $N = 1$

III.2.2.4. Impact de l'enroulement de la toile autour du rouleau de pressage

La plupart des auteurs recommandent que l'enroulement autour des rouleaux de pressage soit maximal (c'est à dire égale ou supérieur à 180°) afin d'avoir un temps plus long de pressage. Le déplacement des différents rouleaux sur le châssis du pilote permet de modifier légèrement l'enroulement. Les essais réalisés pour différentes configurations sont reportés sur la figure III.27.

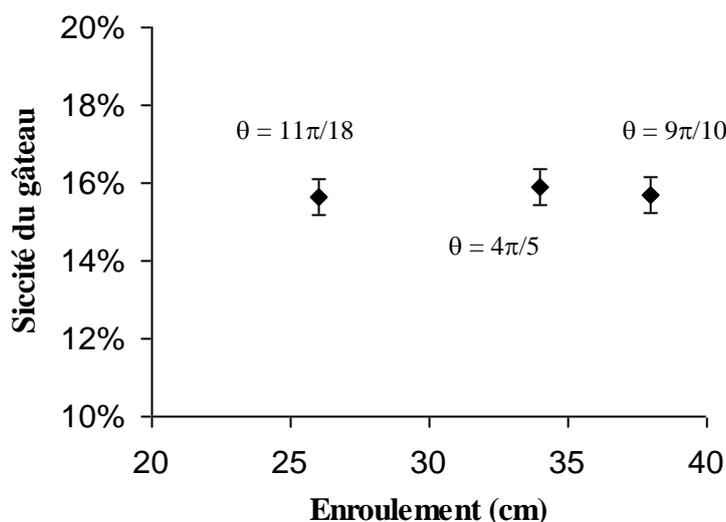


Figure III.27. : impact de l'enroulement sur la siccité du gâteau

Conditions des essais :

- boues mixtes de Lescar, $D = 270$ mm, $s_b = 2$ m.min⁻¹, $t_{\text{toile}} = 1,67$ kg.cm⁻¹, $N = 1$
 enroulements correspondants à des angles θ de $\frac{11\pi}{18}$, $\frac{4\pi}{5}$, et $\frac{9\pi}{10}$ environ

Les résultats de ces mesures ne montrent pas d'évolution significative de la siccité des gâteaux pressés. Toutefois la gamme d'enroulement étudiée reste relativement limitée, ceci peut expliquer en partie ce résultat.

III.2.2.5. Variation du diamètre du rouleau de pressage

De nombreuses controverses subsistent dans la littérature scientifique et technique au niveau de l'impact de la taille des rouleaux de pressage sur les performances de déshydratation. Selon Deutsch (1987), certains auteurs recommandent l'utilisation d'un diamètre important afin d'augmenter le temps de pressage (et de diminuer le fluage) alors que d'autres préconisent des petits rouleaux ou la diminution du diamètre le long du filtre à bandes afin d'augmenter la force de pressage (Lecey et Pietila, 1983).

Pour essayer d'éclaircir ce point, plusieurs essais ont été réalisés avec des rouleaux de diamètres différents (figure III.28).

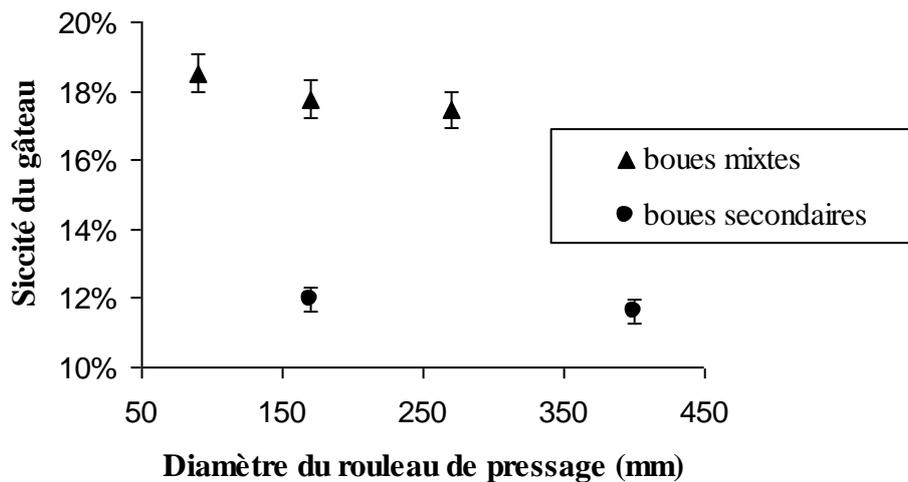


Figure III.28. : impact du diamètre du rouleau de pressage

Conditions des essais :

- boues mixtes de Lescar, $s_b = 2 \text{ m.min}^{-1}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg.cm}^{-1}$, $N = 1$
- boues secondaires d'Idron, $s_b = 2 \text{ m.min}^{-1}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg.cm}^{-1}$, $N = 1$

L'examen de cette figure montre que le diamètre n'a qu'une influence limitée sur la siccité. La diminution du diamètre (qui correspond également à une diminution du temps de pressage) entraîne une légère augmentation de la siccité après un pressage. Pour vérifier que l'augmentation de la pression (due à la diminution du diamètre) joue un rôle plus important que la diminution du temps de pressage, une autre série d'essais a été réalisée en pressant la boue plusieurs fois, avec des rouleaux de diamètres différents, afin d'augmenter la différence entre les temps de pressage respectifs de ces essais (figure III.29.).

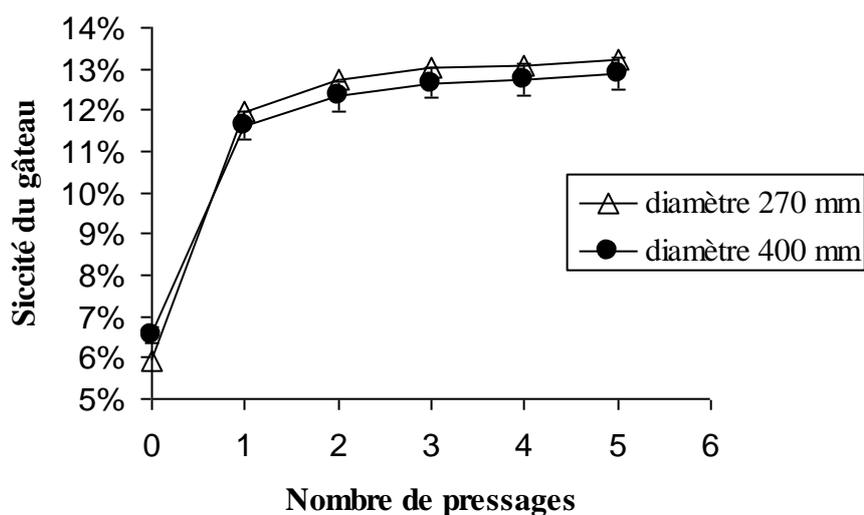


Figure III.29 : impact du diamètre du rouleau de pressage

Conditions des essais :

- boues secondaires d'Idron, $s_b = 2 \text{ m.min}^{-1}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg.cm}^{-1}$

D'après ce nouveau graphe, la diminution du diamètre entraîne bien une légère amélioration de la siccité dès le premier pressage, gain qui se conserve lors des pressages supplémentaires.

Par ailleurs, le fluage est plus important avec l'utilisation de petits rouleaux et la qualité du filtrat semble nettement dégradée (filtrat plus trouble).

En conclusion, il est préférable d'utiliser un rouleau de diamètre important en début de pressage afin de limiter le fluage et de diminuer progressivement la taille des rouleaux suivant pour augmenter la déshydratation. Les essais permettant de vérifier cet aspect en diminuant la taille du rouleau de pressage entre chaque passage n'ont pas été réalisés en raison de la durée nécessaire au montage et au démontage d'un rouleau (1 h environ). Les résultats auraient sûrement été faussés (ou difficilement exploitables) en raison du séchage de la boue par l'air ambiant entre chaque passage.

III.2.2.6. Détermination du nombre de rouleaux efficaces

Il est possible de faire passer la boue plusieurs fois au niveau du rouleau de pressage en alternant le sens de rotation du moteur. Ceci permet de simuler l'enchaînement des rouleaux dans les filtres à bandes industriels. Après chaque passage, le filtrat est récupéré et pesé. L'évolution de la siccité du gâteau en fonction du nombre de passages est déterminée grâce à l'équation suivante :

$$Si_{n-1} = \frac{Si_n \times M_{\text{gâteau après } n^{\text{ième}} \text{ passage}}}{M_{\text{gâteau après } n^{\text{ième}} \text{ passage}} + M_{\text{eau récupérée au } n^{\text{ième}} \text{ passage}}} \quad (\text{eq. III.30.})$$

La siccité du gâteau après le dernier passage est mesurée. La masse de filtrat récupérée est, quant à elle, pesée entre chaque passage. Ainsi, il est possible de calculer la siccité des boues après chaque pressage.

Pour vérifier que ce mode de calcul permet bien d'évaluer l'évolution réelle de la siccité, la série d'essais suivante a été réalisée :

- 1 pressage unique de la boue avec mesure de la siccité finale du gâteau (essai 1) ;
- 3 pressages successifs de la boue avec mesure des quantités de filtrat et de la siccité finale (essai 2). L'évolution de la siccité peut être calculée pour les deux premiers passages tandis que la siccité au troisième pressage est réellement mesurée ;
- 5 pressages successifs de la boue avec mesure des quantités de filtrat et de la siccité finale (essai 3). L'évolution de la siccité peut être calculée pour les quatre premiers passages tandis que la siccité au cinquième pressage est réellement mesurée ;
- 7 pressages successifs de la boue avec mesure des quantités de filtrat et de la siccité finale (essai 4). L'évolution de la siccité peut être calculée pour les six premiers passages tandis que la siccité au septième pressage est réellement mesurée.

Grâce à ces expériences, les siccités calculées après un pressage (essais 2, 3 et 4), après 3 pressages (essais 3 et 4) et après 5 pressages (essai 4) peuvent être comparées respectivement aux siccités effectivement mesurées après un passage (essai 1), après trois passages (essai 2) et après cinq passages (essai 3) (figure III.30.).

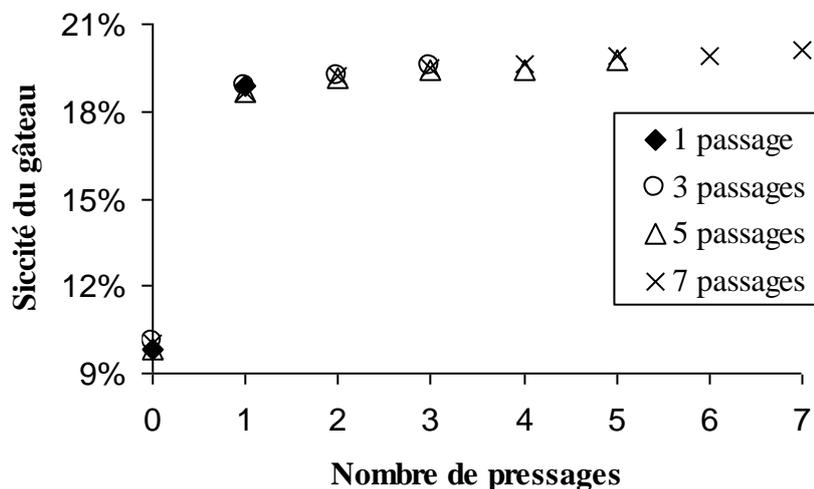


Figure III.30. : évolution de la siccité du gâteau avec le nombre de rouleaux

Conditions des essais :

- boues mixtes de Lescar, $D = 270 \text{ mm}$, $s_b = 2 \text{ m.min}^{-1}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg.cm}^{-1}$

L'analyse de cette figure révèle que les siccités calculées sont très proches des siccités effectivement mesurées et valide le mode de calcul.

Sur l'ensemble des essais réalisés sur les boues mixtes de Lescar (essais réalisés avec les rouleaux de pressage de 270 mm et 400 mm de diamètre, avec des tensions de toiles de 1,67 et 3,76 kg.cm⁻¹ et des vitesses de toiles de 2 et 3,5 m.min⁻¹), un gain de siccité de 0,8 à 1,7 points est observé grâce au 2^{ème} et au 3^{ème} rouleau, puis de 0,5 point grâce aux 4 rouleaux suivants. Un essai a également été réalisé en pressant la boue 15 fois mais n'a pas été présenté sur la figure ci-dessus pour des raisons de lisibilité. Cet essai montre un gain de siccité de 0,25 point grâce aux 8 rouleaux suivant le 7^{ème}.

Pour les boues secondaires d'Idron, l'évolution est du même ordre de grandeur avec un gain de 1 point pour les 2^{ème} et 3^{ème} rouleaux réunis, de 0,5 point pour les 4 suivants réunis et de 0,15 point pour les 8 rouleaux suivants réunis (essais réalisés avec des rouleaux de 170, 270 et 400 mm de diamètre, des tensions de 0,68, 1,67 et 2,73 kg.cm⁻¹, des vitesses de 1,5 et 2 m.min⁻¹).

De plus quels que soient la vitesse et la tension des toiles, le diamètre du rouleau de pressage et la nature de la boue filtrée, 90 à 96 % du filtrat est récupéré au niveau du 1^{er} rouleau (et de la zone de coincement). Les 2^{ème} et 3^{ème} rouleaux permettent de récupérer 3 à 7 % du filtrat, tandis que les rouleaux suivants ne récupèrent plus que 1 à 3% du filtrat.

Il semble donc que les 3 ou 4 premiers rouleaux uniquement soient réellement efficaces. Les rouleaux suivants ne permettent d'augmenter la siccité que de 0 à 0,2 point par rouleau. Ces résultats confirment l'observation faite par Novak (2001) à partir des essais réalisés par Reitz (1988).

III.2.2.7. Importance du conditionnement

Bien que la floculation ne soit pas l'objet de notre étude, il nous est apparu important de réaliser quelques essais avec des boues conditionnées différemment pour évaluer les potentialités de notre installation pilote pour une étude ultérieure sur les stratégies optimales de conditionnement des boues. Ainsi la figure III.31. présente une série d'essais effectuée sur

les boues de Vic-en-Bigorre flocculées d'une part sur le site par l'exploitant et d'autre part au laboratoire avec le EM 840 TRM à $7\text{g.kg}_{\text{MS}}^{-1}$.

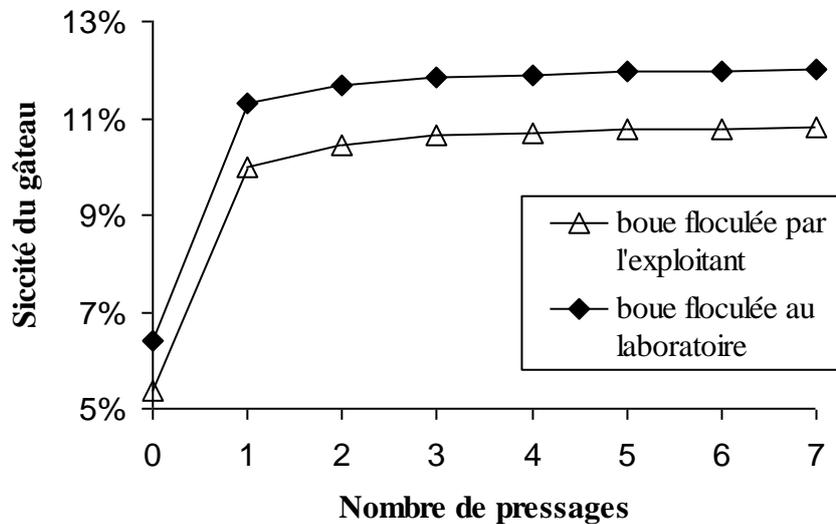


Figure III.31. : importance de la flocculation

Conditions des essais :

- boues secondaires de Vic-en-Bigorre : $D = 400\text{ mm}$, $s_b = 2\text{ m.min}^{-1}$, $T_{\text{toile}} = 1,67\text{ kg.cm}^{-1}$

Ces mesures montrent l'importance de l'étape de flocculation. Le pilote pourrait permettre dans ce cadre d'évaluer s'il existe un conditionnement optimal (type de dose de polymère, mode de mélange) ou si chaque étape (égouttage, coincement, pressage) possède son propre optimum.

Dans le cas présenté sur la figure III.31., on remarque que le conditionnement a surtout permis d'améliorer l'égouttage de la boue avec un gain de 0,8 point en siccité.

III.2.2.8. Influence de la tension de toile

La pression de filtration appliquée sur les boues dépend de la tension de toile, ainsi l'accroissement de cette tension provoque une augmentation de la siccité des boues (figure III.32.). Cette augmentation est, toutefois, limitée pour les boues secondaires (+ 0,6 à 1 point de siccité en passant de $1,66$ à $3,33\text{ kg.cm}^{-1}$) du fait du phénomène de fluage qui augmente

considérablement avec la tension. Ces résultats confirment ceux obtenus précédemment par Inujima et col. (1986) sur des boues mixtes.

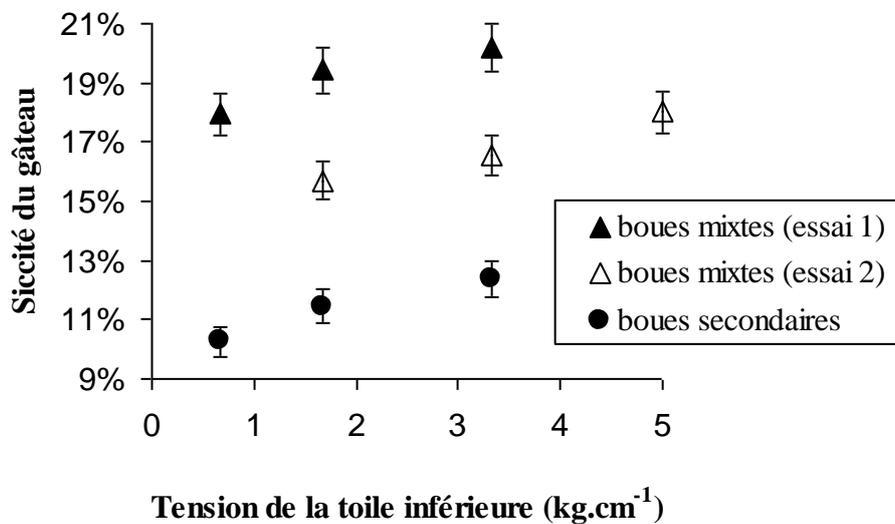


Figure III.32. : incidence de la tension des toiles sur la déshydratation des boues
 ➤ essai 1 : boues mixtes de Lescar, D = 170 mm, $s_b = 2 \text{ m.min}^{-1}$, N = 1
 ➤ essai 2 : boues mixtes de Lescar, D = 270 mm, $s_b = 2 \text{ m.min}^{-1}$, N = 1
 ➤ boues secondaires d'Idron, D = 400 mm, $s_b = 2 \text{ m.min}^{-1}$, N = 1

Par ailleurs, la qualité du filtrat se dégrade fortement avec l'augmentation de la tension. La pression appliquée au niveau du premier passage (quand la boue se structure) devient trop importante et entraîne un passage important de fines dans le filtrat.

De plus, après le premier rouleau, l'écart de siccité observé se conserve de rouleau en rouleau (figure III.33.).

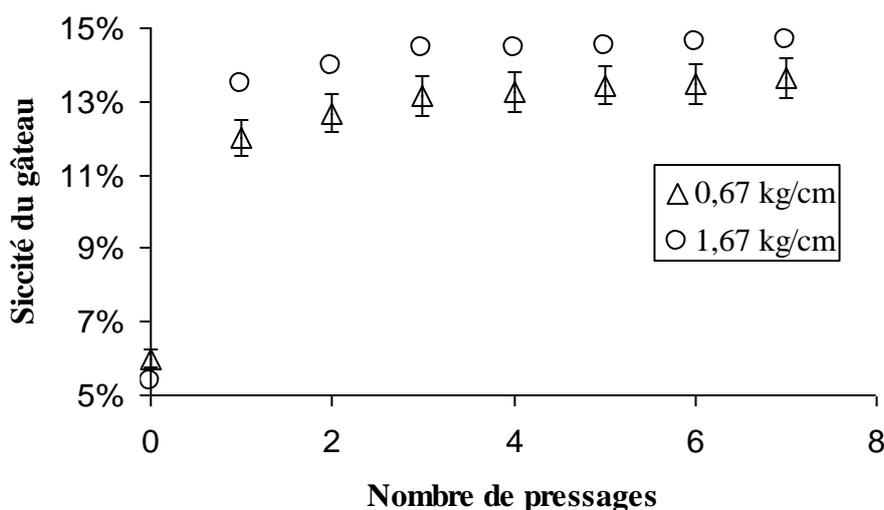


Figure III.33. : influence de la tension des toiles sur la déshydratation des boues
 Conditions des essais :
 ➤ boues secondaires d'Idron, D = 170 mm, $s_b = 1,5 \text{ m.min}^{-1}$

Au paragraphe III.2.2.5., il a été observé que la diminution du diamètre des rouleaux entraîne une légère augmentation de la siccité du gâteau certainement liée à l'augmentation de pression. Il semble donc intéressant de diminuer la taille des rouleaux le long du filtre savoir si la boue, une fois structurée après le 1^{er} pressage, reste encore sensible à la pression. Pour vérifier cela, des essais ont été réalisés en modifiant la tension des toiles entre deux pressages. Les résultats reportés sur la figure III.34. montrent un gain de siccité induit par cette action. Ce comportement vient renforcer l'idée de la nécessité de diminuer la taille des rouleaux dans les filtres et pose la question de l'intérêt éventuel d'un laminage de la boue en sortie de la zone de pressage.

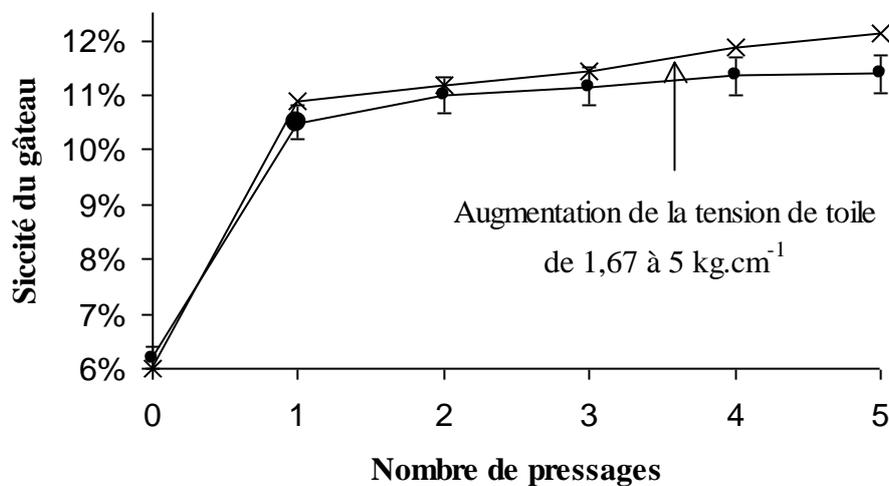


Figure III.34. : variation de la pression de filtration dans le pilote
 Conditions des essais :
 ➤ boues secondaires d'Idron, $D = 400 \text{ mm}$, $s_b = 2 \text{ m.min}^{-1}$

III.2.2.9. Impact de la vitesse des toiles

La réduction de la vitesse de défilement des toiles entraîne une augmentation du temps de pressage des boues. Pourtant Lotito et col. (1986) montrent que l'influence de la vitesse sur la siccité en sortie de filtre à bandes, dans une plage de variation de 3 à 10 m.min^{-1} , reste très faible. A l'inverse, Injumina et col. (1986) observent un gain de siccité important pour une réduction de la vitesse de défilement des toiles de 2 à 0,3 m.min^{-1} . Les résultats obtenus, dans ce domaine, sur notre pilote (figure III.35.) confirment les conclusions de Injumina et col. (1986). Ainsi, en faisant varier la vitesse de 2 à 0,1 m.min^{-1} , le temps de pressage est multiplié par 20 en passant de quelques secondes à plusieurs minutes.

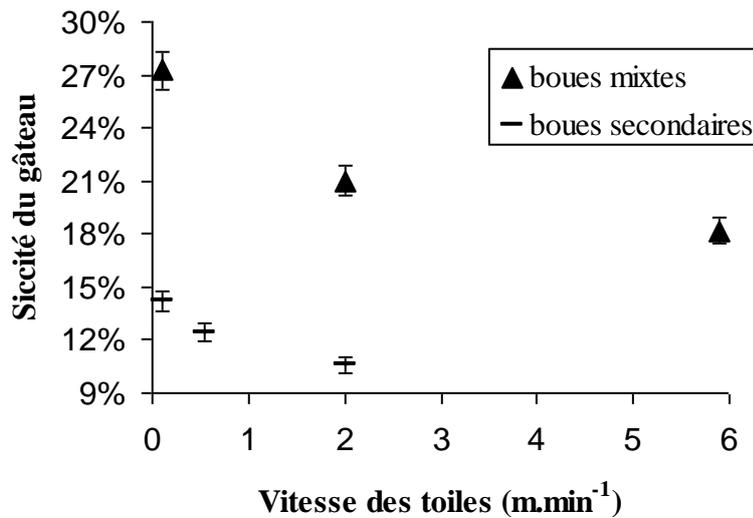


Figure III.35. : impact de la vitesse des toiles sur la déshydratation des boues
Conditions des essais :

- boues mixtes de Lescar, $D = 170 \text{ mm}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg.cm}^{-1}$, $N = 1$
- boues secondaires d'Idron, $D = 400 \text{ mm}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg.cm}^{-1}$, $N = 1$

Le gain de siccité sur le gâteau formé après un pressage est seulement de 2,8 points entre 6 et 2 m.min⁻¹. Il atteint une valeur de 6,3 points entre 2 et 0,1 m.min⁻¹ pour les boues mixtes et de 3,6 points pour les boues secondaires (+2 points entre 0,55 et 2m.min⁻¹). Ce fonctionnement, à très faible vitesse de défilement des toiles, permet d'atteindre des performances proches des centrifugeuses.

De plus, la diminution de la vitesse réduit très nettement le fluage, augmente la clarté du filtrat (visible à l'œil nu) et permet la production d'un gâteau très compact qui ne colle pas aux toiles (eau de lavage de meilleure qualité).

Cependant le temps de pressage n'est peut-être pas le seul facteur responsable du gain de siccité. En effet, il ne joue par exemple aucun rôle dans la réduction du fluage des boues. Une série d'essais a donc été réalisée sur chaque type de boues pour essayer d'éclaircir ce point. Le temps de pressage dans le pilote peut être fixé en pressant par exemple, un échantillon de boue 15 fois avec une vitesse de toile de 1,5 m.min⁻¹ ou une seule fois à 0,1 m.min⁻¹. En observant les résultats obtenus dans les deux situations, il apparaît que pour un même temps de pressage, les siccités du gâteau final ne sont pas identiques : elles sont plus importantes aux très faibles vitesses (figures III.36 et III.37.).

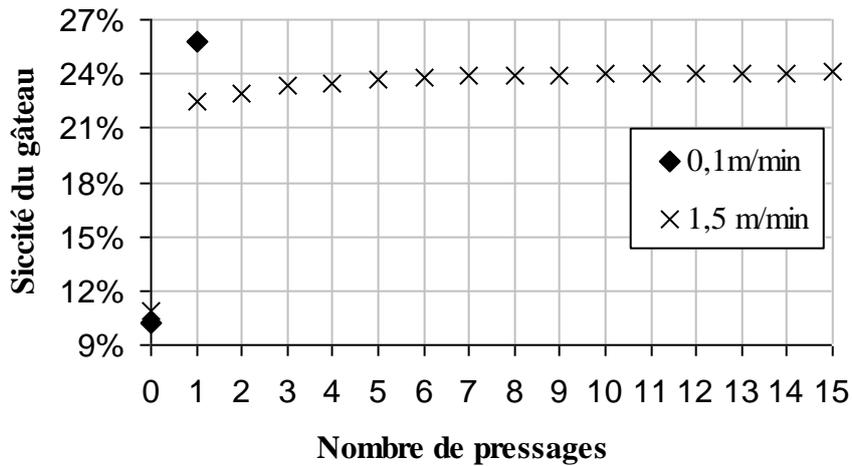


Figure III.36. : effet de la vitesse des toiles sur la siccité des boues pour un temps de pressage identique

Conditions des essais :

- boues mixtes de Lescar, $D = 400 \text{ mm}$, $T_{\text{toile}} = 3,33 \text{ kg.cm}^{-1}$

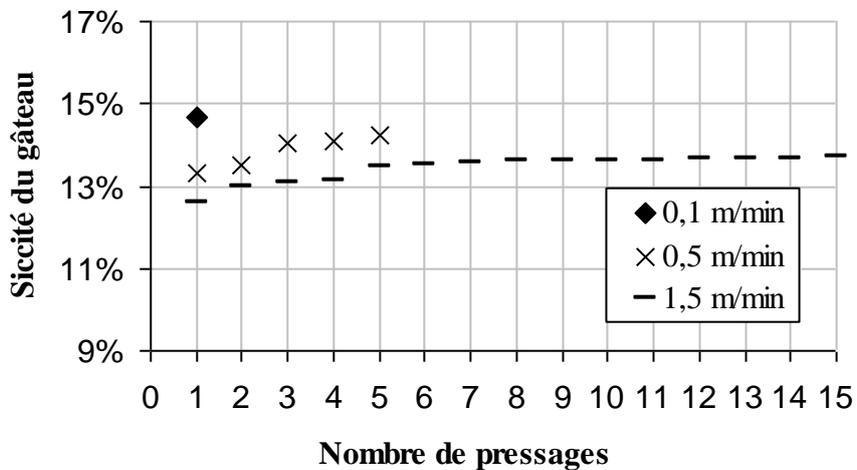


Figure III.37. : effet de la vitesse des toiles sur la siccité des boues pour un temps de pressage identique

Conditions des essais :

- boues secondaires d'Idron, $D = 400 \text{ mm}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg.cm}^{-1}$

Ainsi, pour un temps de compression identique, la siccité du gâteau est meilleure si les toiles défilent à $0,1 \text{ m.min}^{-1}$ plutôt qu'à $1,5 \text{ m.min}^{-1}$ (+1,6 points pour les boues mixtes et +1 point pour les boues secondaires). Par conséquent, la vitesse à laquelle la pression est

appliquée sur les boues dans le filtre à bandes joue un rôle primordial. A très petite vitesse, l'eau peut s'évacuer sans entraîner les particules solides (réduction du fluage et amélioration de la qualité du filtrat). Les particules s'organisent différemment par rapport aux vitesses supérieures. Le gâteau obtenu est plus épais et plus sec.

Le gain de siccité peut encore être amélioré (+1 point environ) en multipliant le nombre de passages sous le rouleau de pressage à $0,1 \text{ m.min}^{-1}$ (figure III.38.). Ainsi, sur une machine industrielle qui possède généralement plus de 4 rouleaux, il devrait être possible d'améliorer la siccité d'environ 3 points.

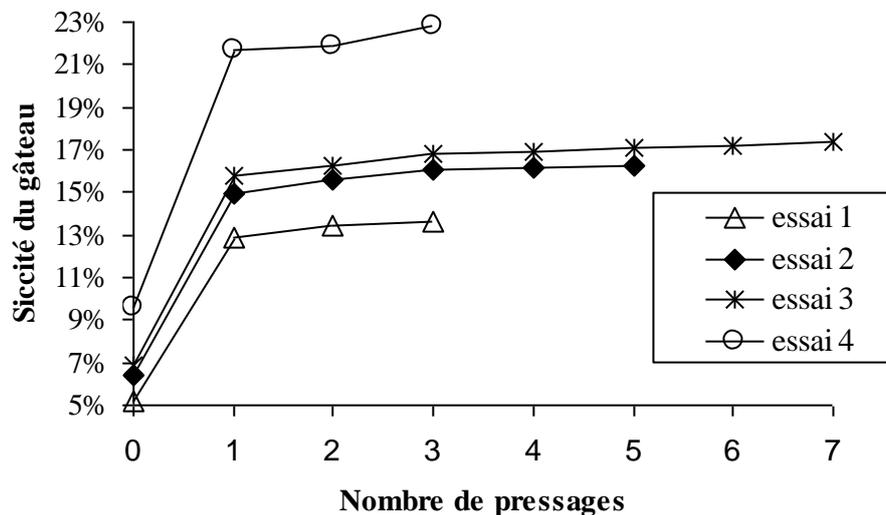


Figure III.38. : évolution de la siccité dans le pilote pour un fonctionnement à $0,1 \text{ m.min}^{-1}$
Conditions des essais :

- essai 1 : boues secondaires de Vic-en-Bigorre, $D = 400 \text{ mm}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg.cm}^{-1}$
 - essai 2 : boues secondaires d'Idron, $D = 400 \text{ mm}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg.cm}^{-1}$
 - essai 3 : boues secondaires d'Idron, $D = 170 \text{ mm}$, $T_{\text{toile}} = 0,67 \text{ kg.cm}^{-1}$
 - essai 4 : boues mixtes de Lescar, $D = 400 \text{ mm}$, $T_{\text{toile}} = 3,33 \text{ kg.cm}^{-1}$

Ces résultats de laboratoire ont ensuite été confrontés à des mesures réalisées sur des filtres à bandes industriels. Ces essais sur site confirment l'amélioration de la déshydratation (+2,6 points de siccité en passant de $1,7$ à $0,55 \text{ m.min}^{-1}$, figure III.39.).

Néanmoins, la réduction de la vitesse de défilement des toiles pose un problème majeur : la réduction du débit de boue traité. En effet, la charge surfacique maximale du filtre

à bandes est principalement dépendante du phénomène de fluage de la boue. Pour une charge surfacique ($\text{kg}_{\text{boues}} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{toile}}$) et une largeur de boue à l'entrée du filtre (l_{ge}) fixées, la diminution de la vitesse doit entraîner une réduction dans les mêmes proportions du débit d'entrée des boues selon le principe suivant :

$$Q_{\text{susp}0}' = \text{Charge surfacique} * S_b * l_{ge} \quad (\text{eq. III.31.})$$

La largeur de la couche de boue en entrée du filtre à bandes (l_{ge}) est déterminée par les constructeurs en fonction du fluage de telle sorte que la boue lors de son passage dans la zone de pressage ne déborde pas sur les côtés.

Or, la réduction importante du fluage engendrée par la diminution de la vitesse doit permettre d'augmenter l_{ge} , donc de compenser en partie la réduction du débit d'entrée. Le débit d'entrée est alors réduit d'un facteur moins important que celui de la vitesse. Les essais sur site montrent qu'effectivement pour une diminution de la vitesse par 3,35 (de 1,71 à 0,51 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$), le débit ($Q_{\text{susp}0}$) n'a été réduit que d'un facteur 2,35. Par ailleurs, lors de ces essais, ce débit maximal n'est plus limité par le fluage des boues mais par la formation d'un gâteau d'une épaisseur telle qu'elle entraîne un blocage du moteur.

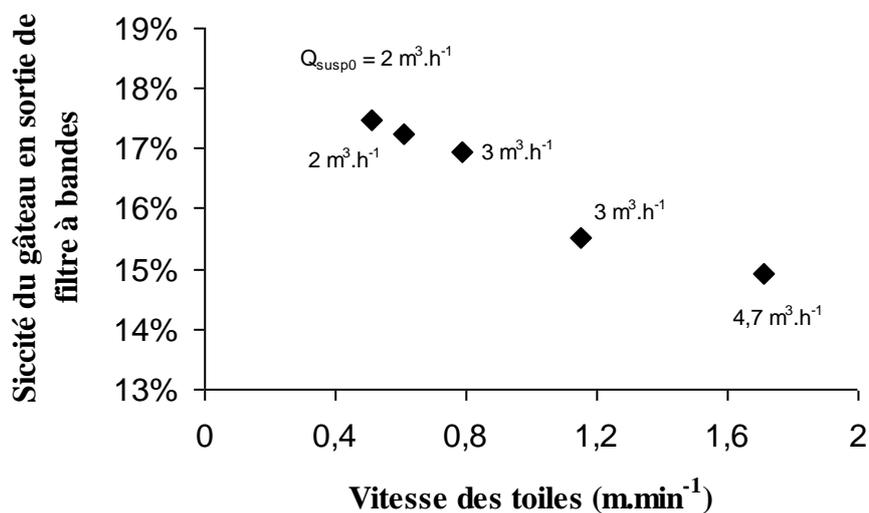


Figure III.39. : évolution de la siccité du gâteau avec la vitesse de défilement des toiles d'un filtre à bandes installé dans une STEP

La réduction du débit de boues pouvant être problématique pour répondre aux besoins de l'exploitant, l'installation de deux filtres à bandes en série fonctionnant à des vitesses différentes pourrait être une solution à envisager pour améliorer la siccité des boues déshydratées. Le premier filtre pourrait alors fonctionner à $1,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ et servirait à réduire considérablement le volume des boues, donc la charge surfacique en entrée du deuxième filtre qui, lui, fonctionnerait à $0,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. La figure III.40. montre comment la mise en place d'un deuxième filtre peut améliorer la siccité du gâteau déjà structuré par le passage dans le premier appareil, tout en permettant de déshydrater des débits conséquents de boues.

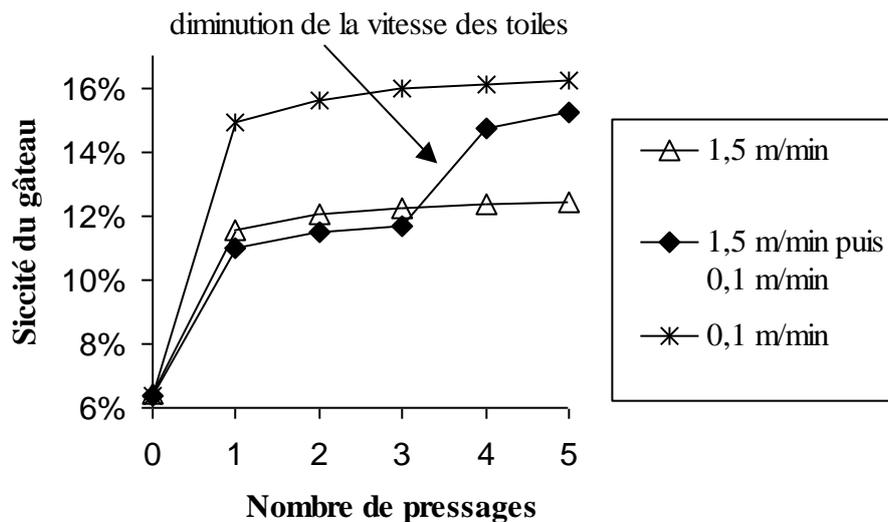


Figure III.40. : impact de la vitesse des toiles sur la siccité des boues
 ➤ boues secondaires d'Idron, $D = 400 \text{ mm}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-1}$

III.2.2.10. Effet d'un laminage

L'installation d'un rouleau de laminage en sortie de zone de pressage est une modification classique sur les filtres à bandes. Elle consiste à écraser entre deux rouleaux l'ensemble constitué du gâteau pressé et des deux toiles. Elle sert en théorie à augmenter la force de pressage (figure III.41.).

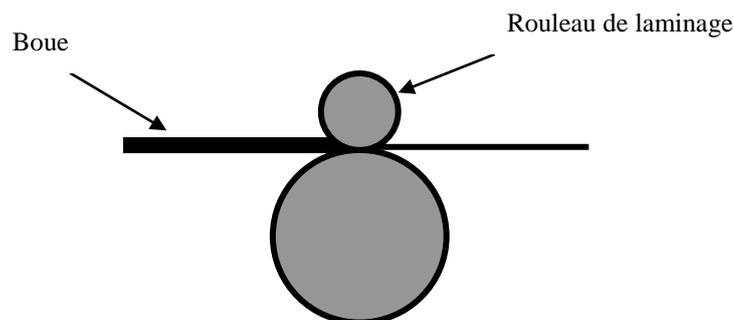


Figure III.41. : principe du laminage

Les différents essais réalisés sur le pilote indiquent que le laminage entraîne un gain d'environ 1,3 points à 2 m.min⁻¹ et de 1 point à 0,1 m.min⁻¹ (figure III.42.). Ces résultats ont pu être, par la suite, validés par des essais menés sur site industriel.

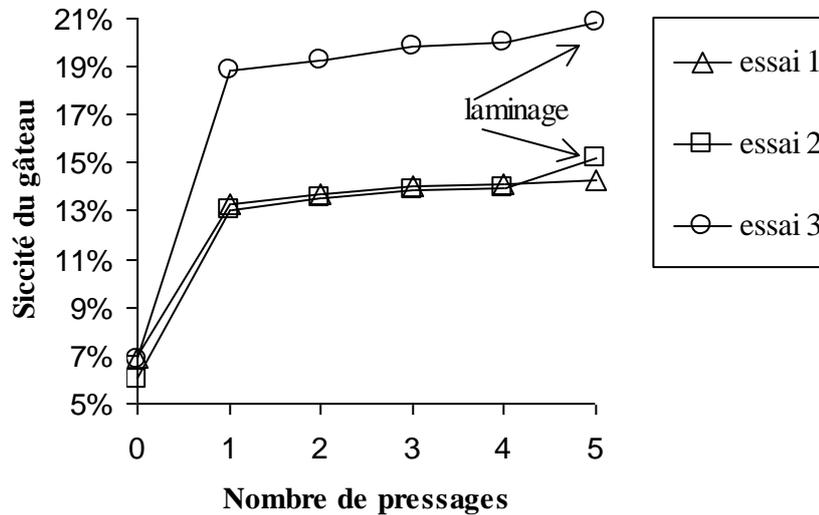


Figure III.42. : effet du laminage sur la déshydratation des boues secondaires, $D = 270 \text{ mm}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg.cm}^{-1}$

Conditions des essais :

- essai 1 : pas de laminage, $s_b = 2 \text{ m.min}^{-1}$
- essai 2 : laminage au 5^{ème} passage, $P_{\text{vérin laminage}} = 0,4 \text{ bar}$, $s_b = 2 \text{ m.min}^{-1}$
- essai 3 : laminage au 5^{ème} passage, $P_{\text{vérin laminage}} = 0,6 \text{ bar}$, $s_b = 0,1 \text{ m.min}^{-1}$

Par ailleurs, la pression appliquée dans les vérins fixés au rouleau de laminage (rouleau 13 sur la figure III.18.) est une nouvelle variable du problème. Nos essais montrent qu'à partir de 0,8 bar, la boue commence à traverser la toile et qu'en dessous de cette limite, la valeur de cette pression n'a pas d'influence sur la siccité obtenue (figure III.43.).

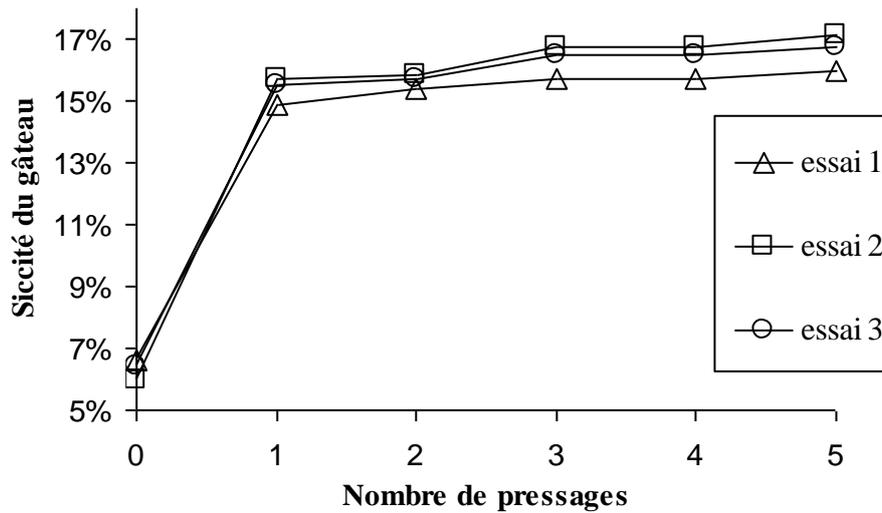


Figure III.43. : impact de la variation de la pression de laminage sur la déshydratation des boues secondaires
 $D = 270 \text{ mm}$, $T_{\text{toile}} = 2,67 \text{ kg.cm}^{-1}$, $s_b = 1,5 \text{ m.min}^{-1}$

Conditions des essais :

- essai 1, pas de laminage
- essai 2, laminage 1^{er}, 3^{ème} et 5^{ème} passages aux ($P_{\text{vérin laminage}} = 0,4 \text{ bar}$)
- essai 3, laminage au 1^{er} passage (0,4 bar), au 3^{ème} passage (0,6 bar) et au 5^{ème} passage (0,8 bar)

Enfin, la figure III.44. montre que l'évolution de la siccité du gâteau reste inchangée si l'on effectue deux ou trois actions de laminage successives. Autrement dit, une, voire deux actions de laminage permettent d'atteindre le gain maximal de siccité en employant ce type de procédure.

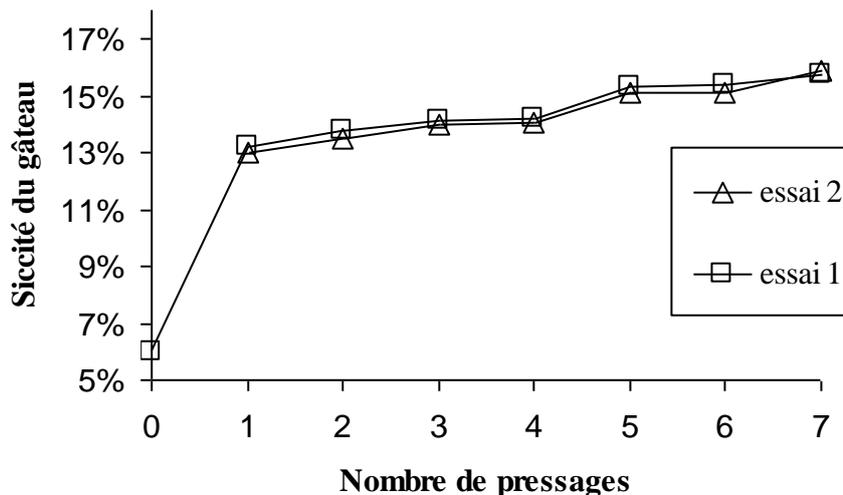


Figure III.44. : incidence du nombre de laminage sur la déshydratation des boues secondaires

Conditions des essais :

- essai 1 : $D = 270 \text{ mm}$, $s_b = 2 \text{ m.min}^{-1}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg.cm}^{-1}$, laminage aux 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} passages (0,6 bar)
- essai 2 : $D = 270 \text{ mm}$, $s_b = 1,5 \text{ m.min}^{-1}$, $T_{\text{toile}} = 1,67 \text{ kg.cm}^{-1}$, laminage aux 5^{ème} et 7^{ème} passages (0,4 bar)

Le laminage ne semble pas avoir de réel impact sur le fluage des boues (déjà structurées après 4 pressages). Par contre, il provoque, s'il est appliqué sur le premier rouleau, les mêmes inconvénients que ceux induits par l'augmentation de la tension des toiles, à savoir l'accroissement du fluage et la dégradation de la qualité du filtrat.

Finalement, grâce au laminage, il est possible d'augmenter la siccité de 1 à 1,5 points même pour de très faibles vitesses de défilement des toiles (par exemple à $0,1 \text{ m.min}^{-1}$). Ainsi, le gain de siccité envisageable pour un filtre à bandes fonctionnant à $0,1 \text{ m.min}^{-1}$ avec 5 rouleaux de pressage, dont les 2 derniers seraient associés à un rouleau de laminage, serait de $3+1,5 = 4,5$ points de siccité. Ce gain supplémentaire permettrait de rattraper, voire de dépasser, les performances des centrifugeuses.

III.2.3.11. Conclusion sur les essais

Les paramètres de fonctionnement des filtres à bandes ayant le plus fort impact sur la siccité du gâteau formé sont par ordre décroissant :

1. la diminution de la vitesse de défilement des toiles (s_b). Elle influe également sur le taux de capture des boues en réduisant le fluage, le colmatage des toiles et en augmentant la qualité du filtrat et des eaux de lavage. Cependant elle impose une réduction du débit d'entrée des boues afin de respecter les contraintes de fonctionnement de la machine ;
2. l'augmentation de la tension des toiles (T_{toile}). Elle dégrade, cependant, significativement le taux de capture et augmente les contraintes subies par le châssis de l'appareil ;
3. la diminution du diamètre des rouleaux (D). Elle augmente, quant à elle, le fluage mais reste une alternative à l'augmentation de la tension des toiles ;
4. la diminution du débit d'entrée des boues ($Q_{\text{susp}0}$). Ce paramètre, cependant, réduit fortement les capacités de traitement de la machine.
5. L'augmentation de la concentration initiale des boues (S_{i0}). Elle entraîne une très légère augmentation de la siccité du gâteau. Cependant, ce paramètre est difficile à ajuster. Il dépend fortement du fonctionnement de la station d'épuration.

L'ensemble des résultats est résumé dans le tableau III.4. :

Paramètre	Variation	Siccité en sortie	Taux de capture	fluage	Nature des boues
s_b	diminue	++++	++	--	boues mixtes, boues secondaires
T_{toile}	augmente	+++	--	++	boues mixtes, boues secondaires
D	diminue	++	--	++	boues mixtes, boues secondaires
Q_{susp0}	diminue	+		++	boues mixtes, boues secondaires
S_{io}	augmente	+/0			boues mixtes
Laminage	présent	++	-	+	boues secondaires
N	> 4	+			boues mixtes, boues secondaires
ouverture de la toile	augmente	0	--		boues mixtes

Tableau III.4. : impact des paramètres de fonctionnement sur la déshydratation mécanique des boues résiduaires urbaines (évalué sur le pilote)

III.2.3. Comparaison des performances du pilote de laboratoire avec celles d'un filtre à bandes industriel

Afin de vérifier que les performances obtenues avec le pilote de laboratoire peuvent être extrapolées aux filtres à bandes industriels, des échantillons d'une même boue floculée ont été déshydratés dans la même journée sur les deux types d'appareils. Le nombre de passages au niveau du rouleau de pressage a été fixé dans le pilote en fonction du nombre de rouleaux utilisés dans la machine industrielle. La vitesse de défilement et la tension des toiles ont également été fixées à des valeurs similaires dans les deux situations. Les principales différences de fonctionnement entre le pilote et le filtre à bandes sont donc le diamètre des rouleaux et le type des toiles.

Dans ces conditions de fonctionnement, le pilote donne une siccité de 0,6 point inférieure à la siccité du gâteau en sortie du filtre à bandes industriel (soit une erreur relative inférieure à 5%), (figure III.45.). Cet écart peut provenir en partie du mode de détermination de la siccité. Les échantillons issus du filtre à bandes industriel (siccité égale à 18,3% +/-0,1) ont été prélevés au centre du gâteau de filtration, c'est à dire à l'endroit où la siccité est maximale. L'évolution de la siccité dans le pilote a été établie en considérant l'ensemble du gâteau de boue et, non pas en prenant la siccité du centre du gâteau. Ainsi, pour une meilleure

comparaison, il faut tenir compte de la siccité au centre du gâteau obtenu avec le pilote (siccité égale à 18% après 8 passages) soit un écart, entre le pilote et le filtre à bandes industriel, de 0,3 point seulement. Ce petit écart peut être expliqué par la différence des toiles employées mais surtout par la différence des diamètres des rouleaux.

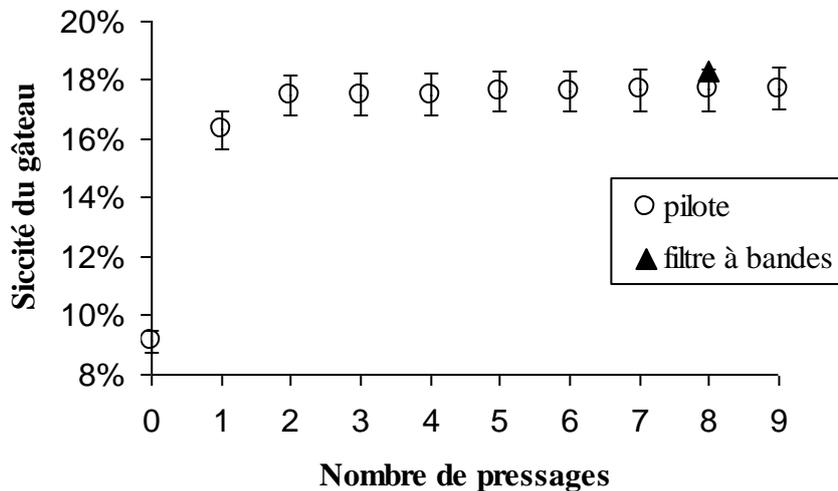


Figure III.45. : comparaison entre les performances du pilote et d'un filtre industriel

Le pilote apparaît donc être bon outil de laboratoire pour étudier les performances des filtres à bandes industriels. Les résultats obtenus sur le pilote sont donc transposables aux appareils industriels.

III.3. Vers un nouveau filtre à bandes

La diminution de la vitesse des toiles engendre un gain relativement important de la siccité du gâteau en sortie des filtres à bandes (+2 à 4 points de siccité pour une vitesse de toile variant de $1,5 \text{ m.min}^{-1}$ à $0,1 \text{ m.min}^{-1}$, tableau III.5.) tout en améliorant nettement le taux de capture des matières en suspension. C'est à dire que pour 100 kg de boues produites à 14% de siccité, un gain de siccité de 3 points représente une réduction de la masse de boue produite de 17,6 kg (soit 17,64%), ce qui est loin d'être négligeable.

De plus, l'utilisation d'une faible vitesse engendre une consommation électrique et une usure des toiles moins importantes. C'est donc le paramètre prioritaire sur lequel l'exploitant doit intervenir pour améliorer la siccité des filtres à bandes.

Origine de la boue	Siccité en sortie du filtre à bandes sur site	Siccité en sortie du pilote fonctionnant à 0,1 m/min
Boues mixtes de Lescar ($S_b > 1,5 \text{ m.min}^{-1}$)	18,3%	21,7% (1 passage) 22,8% (3 passages)
Boues secondaires de Vic en Bigorre ($S_b = 1,5 \text{ m.min}^{-1}$)	11,5 %	13,65% (3 passages)

Tableau III.5. : comparaison des performances entre le pilote et des filtres à bandes industriel (en appliquant sur le pilote les mêmes tensions de toiles que sur les filtres et en obtenant une épaisseur du gâteau identique à celle observée en sortie des filtres)

Toutefois, la diminution de la vitesse doit s'accompagner d'une réduction du débit d'entrée des boues pour respecter la capacité massique de l'appareil (voir paragraphe III.2.2.9.), réduction très contraignante pour l'exploitant. Ainsi, pour un filtre à bandes fonctionnant à $1,6 \text{ m.min}^{-1}$, une réduction de la vitesse jusqu'à $0,2 \text{ m.min}^{-1}$ entraîne une réduction du débit d'entrée d'un facteur 8. Cependant, comme l'a montré l'essai sur site industriel, pour une réduction de la vitesse par 3,35 (de $1,71$ à $0,51 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$), la diminution du débit a pu être limitée à une réduction de seulement 2,35 (de $4,7$ à $2 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$). En effectuant une règle de trois à partir de ces résultats, la diminution de la vitesse d'un facteur 8 devrait entraîner une réduction limitée du débit d'entrée des boues d'un facteur 6 environ. Afin d'augmenter la capacité du filtre, le doublement de la largeur des toiles est une solution simple pour les petits filtres à bandes (de 1-1,5 m à 2-3 m). La capacité du filtre sera donc doublée, le débit d'entrée ne sera alors plus que divisé par un facteur 3. Or les filtres à bandes ne fonctionnent généralement que 8 h dans une journée, la fabrication d'un matériel très fiable permettant son utilisation 24h/24 sans présence humaine permettrait de traiter la quantité initiale de boues tout en améliorant la siccité.

Prenons pour exemple le filtre à bandes BP Omega 100150 commercialisé par E.M.O. Sa charge hydraulique acceptable est de $8 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ pour des vitesses classiques de fonctionnement (soit $1,5$ - $1,6 \text{ m.min}^{-1}$). Afin d'améliorer la déshydratation mécanique des boues, ce filtre pourrait fonctionner à $0,2 \text{ m.min}^{-1}$. En doublant la largeur des toiles de cet appareil (soit 3 m de largeur), la diminution de la vitesse (par un facteur 8 dans ce cas) engendre donc une réduction du débit d'entrée par un facteur estimé à 3 (comme nous l'avons

précisé ci-dessus). Ainsi, la charge hydraulique acceptable du filtre à bandes est réduite à $2,66 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ du fait de la diminution de la vitesse.

D'après une enquête menée sur 71 stations d'épurations représentatives des différents procédés de traitement des eaux usées en France, une corrélation donnant la production des boues en fonction de la taille de la station a été établie (Ferry et Wiart, 2000) :

$$T_{\text{MS/an}} = 0,004 * \text{EH}^{1,1111} \quad (\text{eq. III.32.})$$

Autrement dit pour une station de 25 000 EH dont les boues ne seraient traitées que 250 jours.an⁻¹ (semaine de 5 jours + 10 jours fériés), le débit de boue produit est de $51,3 \text{ kg}_{\text{MS}} \cdot \text{h}^{-1}$. Si l'on considère qu'en entrée de table d'égouttage, la boue est à 2% de siccité, alors le débit à l'entrée du combiné est de $2515 \text{ kg}_{\text{boues}} \cdot \text{h}^{-1}$. En faisant l'hypothèse que la densité des boues (2% de siccité) est à peu près égale à celle de l'eau, le débit en entrée du combiné est alors approximativement de $2,52 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Le filtre BP Oméga 100150 modifié fonctionnant 24h/24 pourrait ainsi traiter les boues de stations d'épuration d'une capacité de 25000 EH. De plus, si l'on considère que l'utilisation du combiné table d'égouttage / filtre à bandes permet d'augmenter de 30% la capacité hydraulique du filtre, le débit de boues liquides pouvant être traité devient égal à $3,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, ce qui correspond globalement à une station de 33000 EH.

Cette nouvelle stratégie de pilotage des filtres à bandes semble donc une solution intéressante pour les petites et moyennes stations d'épuration.

Si le filtre à bandes ne peut fonctionner que 8 h par jour, il faut envisager la mise en série de deux filtres à bandes fonctionnant à des vitesses différentes : le premier à $1,6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, le deuxième à $0,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Dans ce cas, une station d'épuration de 25000 EH fournit en entrée de filtre à bandes un débit hydraulique, pendant 8 h, égale à $2,52 * 3$ soit $7,56 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Le filtre à bandes Oméga 100150 est adapté pour ce débit. En supposant que les boues en sortie de cet appareil ont une siccité de 15%, le débit volumique de gâteau récupéré est alors de $0,87 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. L'installation à la sortie de ce premier appareil, d'un autre filtre à bandes Omega 100150 fonctionnant à $0,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (de capacité massique maximale d'environ $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ dans de telles conditions) serait alors envisageable et permettrait d'améliorer la siccité du gâteau de 2 à 3 points.

Par ailleurs, dans de nombreuses petites stations, les boues ne sont pas déshydratées sur place mais sont souvent transportées jusqu'à une station de plus grande taille pour y être traitées. On peut envisager, dans le cas de ces stations, l'installation de petits filtres à bandes fonctionnant à $0,1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ qui permettrait de réduire considérablement la masse des boues à transporter et limiterait les coûts.

Les performances de déshydratation peuvent être également améliorées en diminuant progressivement la taille des rouleaux entre l'entrée et la sortie des filtres. Cette amélioration peut être amplifiée par une action de laminage au niveau des 2 derniers rouleaux de pressage. Ce type de configuration devrait entraîner pour des boues secondaires un gain supplémentaire de 1 à 2 points de siccité.

Enfin le nombre de rouleaux utiles au pressage se situe autour de 3 ou 4. Ce nombre semble suffisant à installer pour un filtre à bandes fonctionnant sans laminage. La configuration d'un filtre à bandes intégrant la majeure partie de ces remarques est schématisée sur la figure III.46.

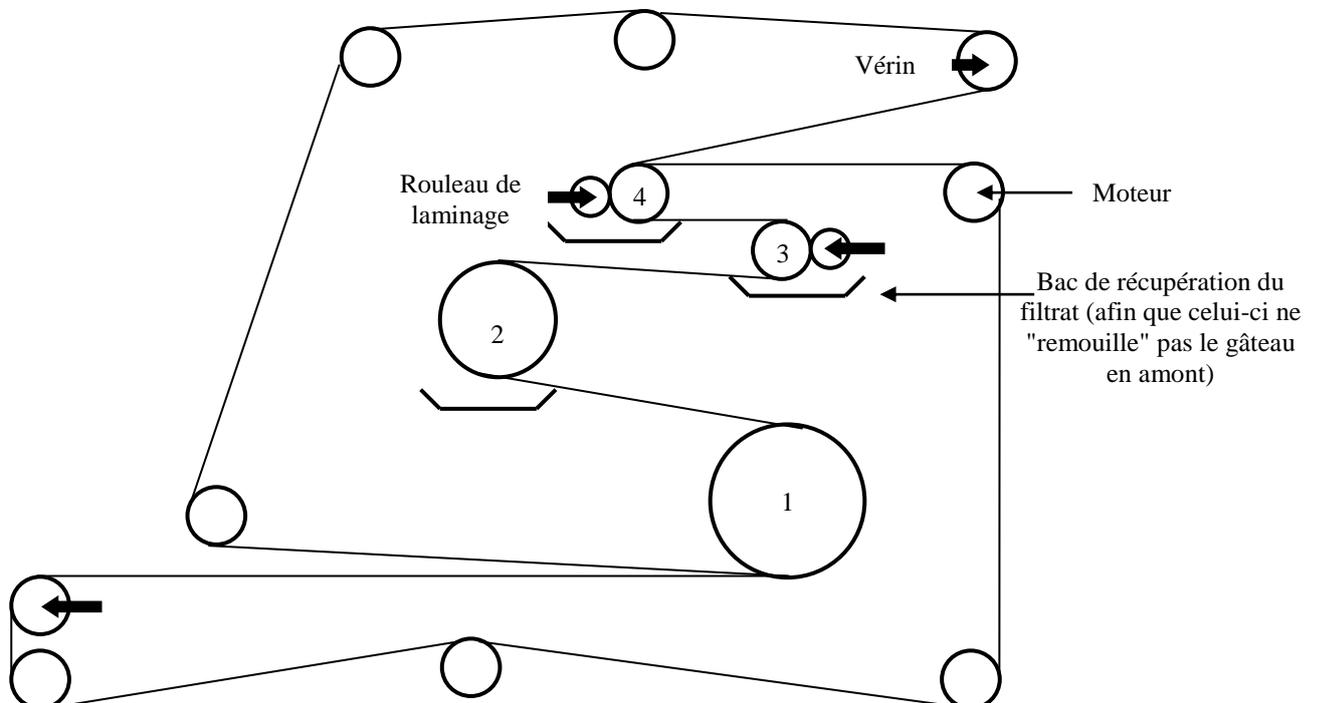


Figure III.46 : schéma possible d'un nouveau filtre à bandes

III.4. Nomenclature

C_g	Concentration du gâteau d'égouttage en matières sèches ($g_{MS}.l^{-1}$)
C_{susp0}	Concentration de la boue floclée en matières sèches avant l'égouttage($t=0$) ($g_{MS}.l^{-1}$)
D	Diamètre d'un rouleau (m)
EH	Equivalent habitant
$F_{vérins}$	Force fournie par les vérins à la toile (N)
g	Accélération de la pesanteur ($=9,81 m.s^{-2}$)
h_{susp}	Hauteur de la suspension située au-dessus du gâteau en formation lors de la filtration (m)
h_{susp0}	Hauteur de la suspension à $t=0$ (juste avant que ne débute la filtration) (m)
K	Facteur de perméabilité du gâteau ($m.s^{-1}$) selon Severin et Grethlein (1996)
$K'=\rho_e K$	Facteur de perméabilité massique du gâteau ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) selon Severin et Grethlein (1996)
l_{ge}	Largeur de la boue en entrée de filtre à bandes (m)
l_t	Largeur de la toile filtrante (m)
L_t	Longueur de la zone d'égouttage (m)
M_b	Masse de boue brute (kg)
M_f	Masse de filtrat recueillie au temps t (kg)
$M_{f\infty}$	Masse de filtrat récupérée au bout d'un temps infini d'égouttage (kg)
$M_{g\infty}$	Masse de gâteau récupérée au bout d'un temps infini d'égouttage (kg)
$M_{g\infty}'$	Masse de gâteau récupérée au bout d'un temps infini d'égouttage par unité de surface filtrante ($kg.m^{-2}$)
M_p	Masse de flocculant ajoutée à la boue lors du conditionnement (kg)
MS	Masse de matières sèches (kg)
MS'	Masse de matières sèches par unité de surface filtrante ($kg.m^{-2}$)
M_{susp0}	Masse de boue floclée déposée initialement dans la cellule d'égouttage (kg)
N	Nombre de rouleaux d'un filtre à bandes (équivalent au nombre de pressage dans le pilote de laboratoire)
$P_{vérin}$	Pression dans les vérins qui tendent les toiles (Pa)
Q_{susp0}'	Débit massique de boue conditionnée à l'entrée du filtre à bandes ou de la zone d'égouttage ($m^3.s^{-1}$)
s_b	Vitesse linéaire des toiles du filtre à bandes ($m.s^{-1}$)

S_i	Siccité exprimée en % ($\text{kg}_{\text{MS}}.\text{kg}_{\text{boue}}^{-1}$)
S_{i_b}	Siccité de la boue avant sa floculation (%)
S_{i_0}	Siccité de la boue floculée avant l'égouttage (%)
$S_{\text{vérin}}$	Section des vérins qui tendent les toiles (m^2)
t	Temps (s)
T_{toile}	Tension des toiles (N)
$T_{\text{MS/an}}$	Quantité de matières sèches produites en tonne par an par une STEP.
V_B	Volume de gâteau qui se dépose instantanément sur la toile au démarrage de l'égouttage (m^3)
V_f	Volume de filtrat recueilli lors d'une étape d'égouttage (m^3)
$V_{f\infty}$	Volume de filtrat recueilli au bout d'un temps infini d'égouttage (m^3)
$V_{g\infty}$	Volume de gâteau recueilli après un temps infini d'égouttage (m^3)
$V_{\text{susp}0}$	Volume initial de boue floculée déposée dans la cellule d'égouttage (m^3)
γ	Taux de résistance média filtrant/gâteau de filtration selon Severin et Grethlein (1996)
ε_g	Porosité du gâteau d'égouttage
$\varepsilon_{0\text{susp}}$	Porosité de la boue à $t=0$
θ	Angle de recouvrement des toiles sur un rouleau (rad)
$\lambda=\lambda_v/\rho_e$	Coefficient massique spécifique du test de drainage ($\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$) défini par Severin et Collins (1992)
$\lambda'=\Omega\lambda$	Coefficient surfacique spécifique du test de drainage ($\text{m}^2.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$) défini par Severin et Collins (1992)
λ_v	Coefficient spécifique du test de drainage ($\text{m}^{-3}.\text{s}^{-1}$) défini par Severin et Collins (1992)
ρ	Masse volumique de la suspension au-dessus du gâteau en formation ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$)
ρ_b	Masse volumique de la boue avant son égouttage ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$)
ρ_e	Masse volumique de l'eau ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$)
ρ_s	Masse volumique de la phase solide de la boue ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$)
Φ	Paramètre du modèle d'égouttage de Wells et Savage (1998)
Ω	Section du média filtrant (m^2)

III.5. Bibliographie

Dentel S.K., 2001, "*Conditioning, thickening and dewatering: research update/research needs*", Water Science and Technology, **vol 44**, n°10, pp9-18.

Deutsch N.D., 1987, "*Options in belt filter press*", Water Engineering and Management, **vol 134**, n°9, pp34-37.

Ferry M., Wiart J., 2000, "*Les coûts de traitement et de recyclage agricole des boues d'épuration urbaines*", Techniques Sciences Méthodes, génie urbain, génie rural, n°9, pp117-135.

Halde R.E., 1980, "*Filterbelt pressing of sludge - a laboratory simulation*", Journal of Water Pollution and Control Federation, **vol 52**, n°2, pp310-316.

Inujima K., Tokunaga K., Okahashi H., Arima Y., Ishimi T., Fujinami S., 1986, "*Belt press filter – Dewatering principle and application of its new technologies*", 4th World Filtration Congress, Ostende, Belgium, **vol 1-4**, pp12.27-12.35.

Lecey R.W., Pietila K.A., 1983, "*Improving belt-filter-press performance*", Chemical Engineering, **Vol 28**, November, pp69-72.

Lotito V., Spinosa L., Santori M., 1986, "*Analysis of sewage sludge dewatering operation by beltpress*", 4th World Filtration Congress, Ostende, Belgium, pp4.43-4.47.

Novak J.T., 2001, "*Dewatering*", In "Sludge into Biosolids. Processing, Disposal and Utilization", edited by L. Spinoza and P.A. Vesilind, IWA publishing, ISBN 1 900222 08 6, pp339-362.

Reitz, 1988, "*Municipal sludge dewatering using a belt filter press*", Rapport de Master, Virginia Polytechnic Institute and State University, 81 pages.

Severin B.F., Collins B.H.Jr, 1992, "*Advances in predicting belt press performance from lab data*", Water Environment Federation, 65th Annual Conference and Exposition, New Orleans, Louisiana, September 20-24, 1992, pp205-216.

Severin B.F., Grethlein H.E., 1996, "*Laboratory simulation of belt press dewatering: Application of the Darcy equation to gravity drainage*", Water Environment Research, **vol 68**, n°3, pp359-369.

Severin B.F., Nye J.V., Kim B.J., 1999, "*Model and analysis of belt drainage thickening*", Journal of Environmental Engineering, **vol 125**, n°9, pp807-815.

Tokunaga K., Fujinami S., Ishimi T., Okahashi H., Nakano I., 1983, "*High pressure filtration and/or squeezing of sewage sludges*", Filtration and Separation, nov/dec, pp 450-456.

Wells A.E., Savage G.K., 1998, "*Sedimentation effects prior to gravity drainage*", In *Advances in Filtration and Separation Technology*, ed by G.Chase,R. Herrera and K. Rubow, American Filtrations and Separations Society, **vol 12**, pp646-653.

CHAPITRE IV

DES ESSAIS EN CELLULE DE FILTRATION COMPRESSION AUX PERFORMANCES DES FILTRES A BANDES

Ce chapitre est consacré au problème de l'estimation des performances des filtres à bandes à partir d'essais menés en laboratoire en cellule de filtration compression. Dans une première partie, la mesure de la pression au niveau du rouleau de pressage est discutée. Le comportement des boues secondaires lors de la compression en CFC sera analysé afin de déterminer une procédure adéquate pour comparer les essais entre eux. Ensuite, l'impact du temps de compression sur la détermination des performances des filtres à bandes sera évalué. L'influence d'un effet cisailant sur la compression des boues sera, finalement, abordée dans une dernière partie.

IV. DES ESSAIS EN CELLULE DE FILTRATION COMPRESSION AUX PERFORMANCES DES FILTRES A BANDES	158
<hr/>	
IV.1. PRESSION APPLIQUEE SUR LES BOUES DANS LES FILTRES A BANDES	160
IV.1.1. Mesure de la pression dans les filtres à bandes	160
IV.1.2. Mesure des pressions dans le pilote	163
IV.2. ESTIMATION DES PERFORMANCES DES FILTRES A BANDES GRACE A LA CELLULE DE FILTRATION COMPRESSION	166
IV.2.1. Présentation	166
IV.2.1.1. <i>La cellule de filtration compression</i>	166
IV.2.1.2. <i>Filtration compression des boues résiduaires en CFC</i>	167
IV.2.1.3. <i>Compression des boues résiduaires en CFC</i>	171
IV.2.2. Essais de filtration et de compression en CFC	171
IV.2.2.1. <i>Reproductibilité des essais de compression</i>	172
IV.2.2.2. <i>Influence de la charge surfacique</i>	172
IV.2.2.3. <i>Influence de la toile</i>	173
IV.2.2.4. <i>Influence de la pression appliquée instantanément sur les boues urbaines</i>	174
IV.2.2.5. <i>Influence de la vitesse de montée en pression</i>	176
IV.2.2.6. <i>Conclusion</i>	179
IV.2.3. Comparaison entre les performances de déshydratation de la CFC et du pilote	180
IV.2.3.1. <i>Application instantanée de la pression dans la CFC</i>	180
IV.2.3.2. <i>Montée progressive de la pression dans la CFC</i>	181
IV.2.3.3. <i>Limites de la procédure</i>	184
IV.2.3.4. <i>Conclusion</i>	185
IV.3. INFLUENCE DU CISAILLEMENT	185
IV.3.1. Description d'une cellule de filtration compression avec piston rotatif	185
IV.3.2. Impact du cisaillement	187
IV.3.3. Conclusion	189
IV.4. NOMENCLATURE	191
IV.5. BIBLIOGRAPHIE	193

IV.1. Pression appliquée sur les boues dans les filtres à bandes

IV.1.1. Mesure de la pression dans les filtres à bandes

Pour mettre au point une technique d'estimation des performances des filtres à bandes, il semble important de connaître les pressions appliquées sur la boue dans ce type d'appareils. Plusieurs auteurs (Prinssen, 1982 ; Tokunaga et col., 1983 ; Galla, 1996) considèrent que la pression appliquée au niveau des rouleaux se calcule de la manière suivante :

$$P = \frac{2T_{toile}}{Dl_t} \quad (\text{eq. IV.1.})$$

En effet si l'élasticité de la toile et les frottements sur le rouleau sont négligés, un bilan de force à l'équilibre sur un élément de surface de la toile $dS=(D/2)l_t d\theta$ (figure IV.1.) permet d'écrire l'équation suivante (la contre réaction \vec{R} du rouleau sur la toile étant égale à la force de pression normale résultante de l'action de la toile) :

$$-2T_{toile} \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) + P_{\theta} \frac{D}{2} l_t d\theta = 0 \quad (\text{eq. IV.2.})$$

avec $F_{\text{pression}}=P_{\theta}(D/2)l_t d\theta$, la force normale appliquée sur la toile.

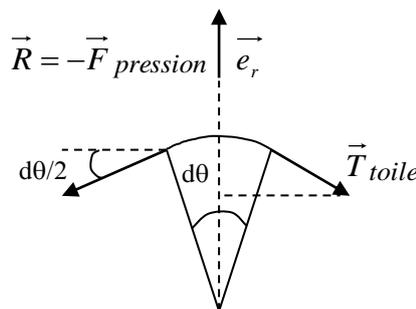


Figure IV.I : bilan de force sur un élément de toile dS

Comme $d\theta$ est très petit, l'équation IV.2. se simplifie pour donner l'équation IV.1. qui indique que la pression est uniforme sur tout le rouleau.

Cependant l'utilisation de cette formule est remise en cause par certains auteurs (Halde, 1980 ; Badgujar et Chiang, 1989) qui considèrent qu'on ne peut pas négliger les frottements et l'élasticité de la toile. De plus, en mode dynamique, il faut prendre en compte le couple fourni par le moteur ainsi que les résistances des rouleaux dues aux déplacements des toiles. Les mesures de pressions réalisées par Badgujar et Chiang (1989) sur des filtres à bandes indiquent que la pression mesurée est 8 à 10 fois supérieure à la pression calculée par l'équation IV.1. Par ailleurs, comme le montre la figure IV.2., la pression sur les rouleaux n'est pas uniforme et dépend plus de la position dans le filtre que du diamètre des rouleaux. Ainsi la pression mesurée sur le rouleau 5 de la figure IV.2. est supérieure à la pression mesurée sur les rouleaux 2, 3 et 4 qui ont pourtant un diamètre inférieur.

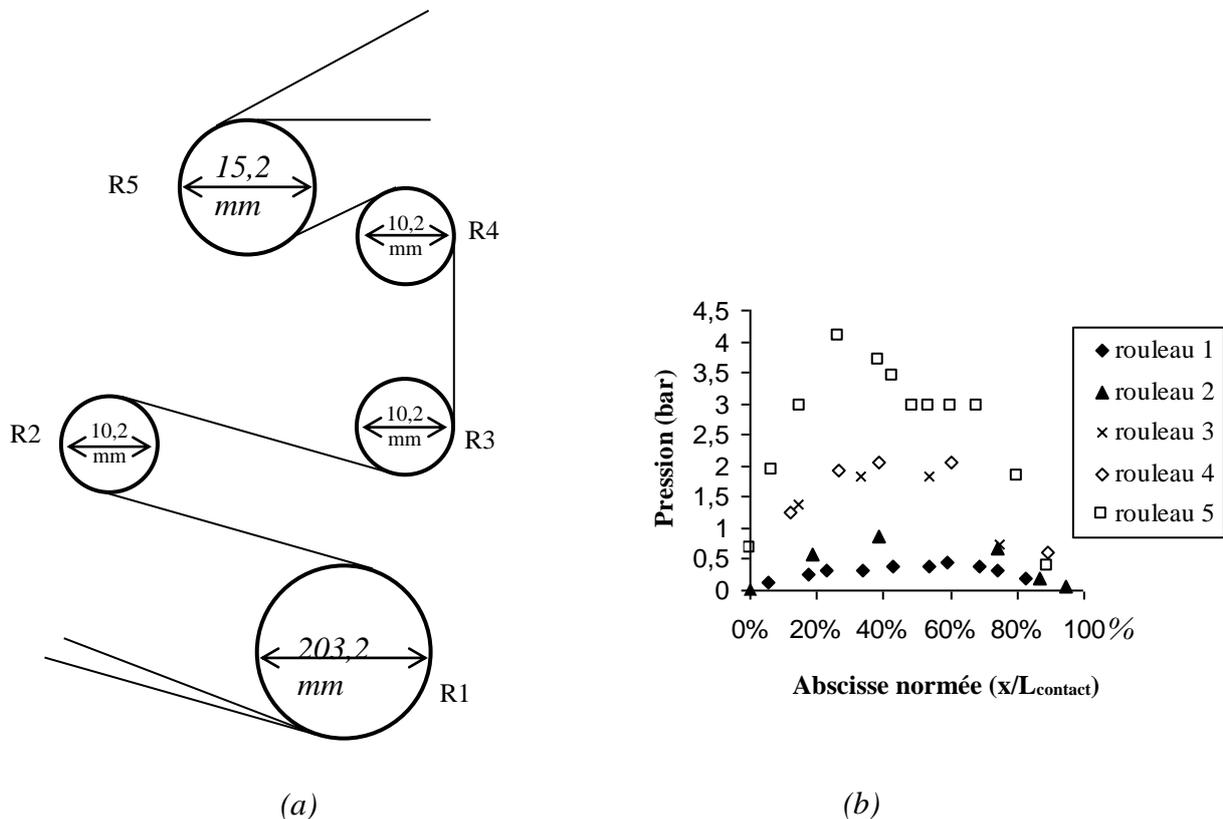


Figure IV.2. : (a) schéma du filtre à bandes sur lequel Badgujar et Chiang (1989) ont réalisé les mesures de pression
 (b) profils de pression obtenus sur les différents rouleaux
 (L_{contact} : longueur de la zone de contact entre les toiles et le rouleau considéré)

Cette différence peut s'expliquer, en partie, par le fait qu'au moment du passage des boues sur le rouleau, la toile est étirée et s'allonge sensiblement (figure IV.3.). Il faut donc

prendre en compte la résistance de la toile à l'allongement. Or les toiles utilisées sont peu élastiques et leur résistance importante. D'ailleurs, des mesures de tension de toile réalisées sur le pilote montrent une élévation de la tension de cette dernière supérieure à 10 kg au moment du passage des boues au niveau du rouleau de pressage.

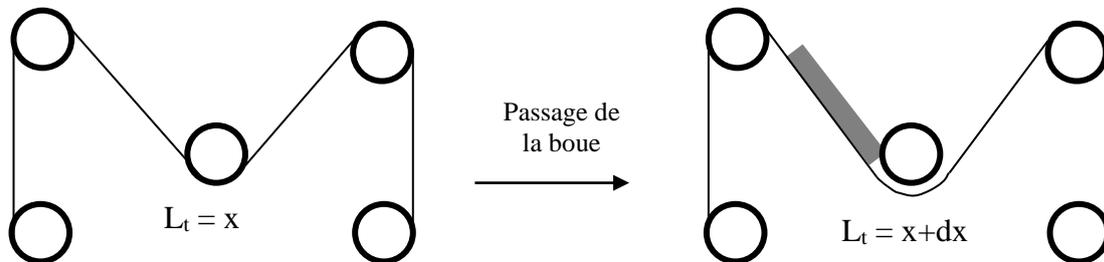


Figure IV.3. : allongement de la toile dû au passage des boues

De plus, les boues déforment la toile dans sa largeur : sans boue les toiles ont une surface plane alors qu'en présence de boue, elles sont bombées (figure IV.4.). Il faut donc prendre en compte la résistance à la déformation des toiles tendues.

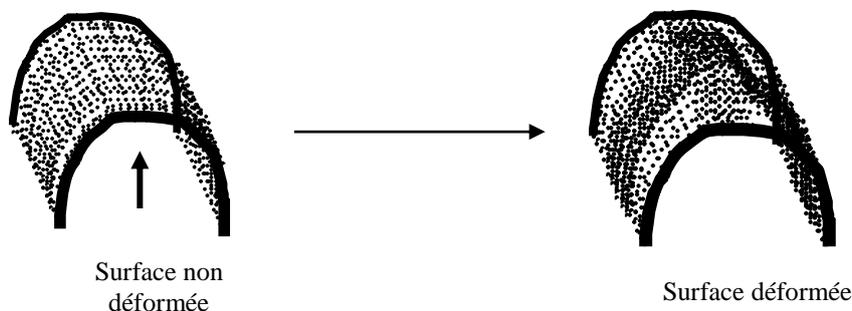


Figure IV.4. : schéma des toiles au contact du rouleau de pressage en l'absence et en présence de boue

Suite à ces différentes remarques, il apparaît difficile de calculer simplement la pression appliquée sur les boues à l'intérieur du filtre à bandes. Des mesures de pressions semblent donc nécessaires pour chaque appareil. Pour ce faire une technique intéressante est le "Prescale" film de Fuji Film (utilisé par Badgular et Chiang). Ce film est constitué de micro-billes remplies d'encre rouge qui se brisent sous certaines conditions de pression. Un lecteur optique permet ensuite de transformer les variations de densité de rouge en profil de pression.

Toutefois cette technique reste très coûteuse. Une méthode avec un coût plus modeste a été retenue dans le cadre de notre étude.

IV.1.2. Mesure des pressions dans le pilote

Les mesures de pression ont été effectuées avec un capteur de pression miniature (PS-5KA de marque Kyowa, figure IV.5.) constitué d'un diaphragme (de 6 mm de diamètre) sur lequel sont collées quatre jauges en pont complet. L'épaisseur du capteur mesure 0,6 mm. L'afficheur électronique (modèle XMAG-35-80/A-SAB de marque Fema Electronique) auquel est relié ce mini-capteur a été calibré en simulant électriquement la réponse du capteur par un générateur de courant.

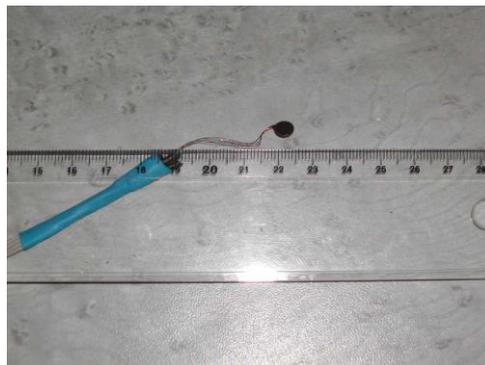


Figure IV.5. : le capteur de pression miniature

L'ordre de grandeur des mesures a été vérifié avec un montage plus "artisanal" constitué d'une tétine en caoutchouc remplie d'eau reliée par un tube souple à un manomètre (figure IV.6.).

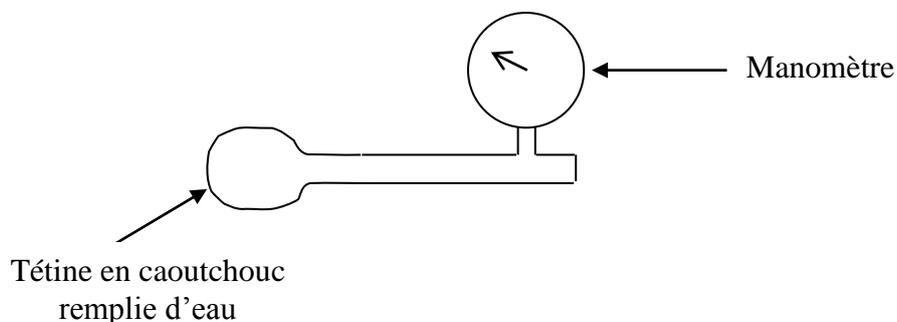


Figure IV.6. : schéma du montage avec la tétine en caoutchouc

Dans les deux cas, le capteur de pression (capteur miniature ou tétine) est installé entre les deux toiles. Ces dernières sont ensuite tendues. La pression dans le pilote est mesurée le long du rouleau de passage en faisant avancer les toiles centimètre par centimètre. Les mesures ont principalement été réalisées sur le rouleau de passage de 270 mm de diamètre avec un enroulement de toile légèrement inférieur à 180° , donc sur une longueur de 33 cm (au lieu de 42 cm qui est le demi périmètre du rouleau).

Les mesures effectuées sur le rouleau de 270 mm de diamètre confirment le fait que la pression n'est pas uniforme sur le rouleau, mais révèlent l'existence d'un plateau de pression assez important (figure IV.7.).

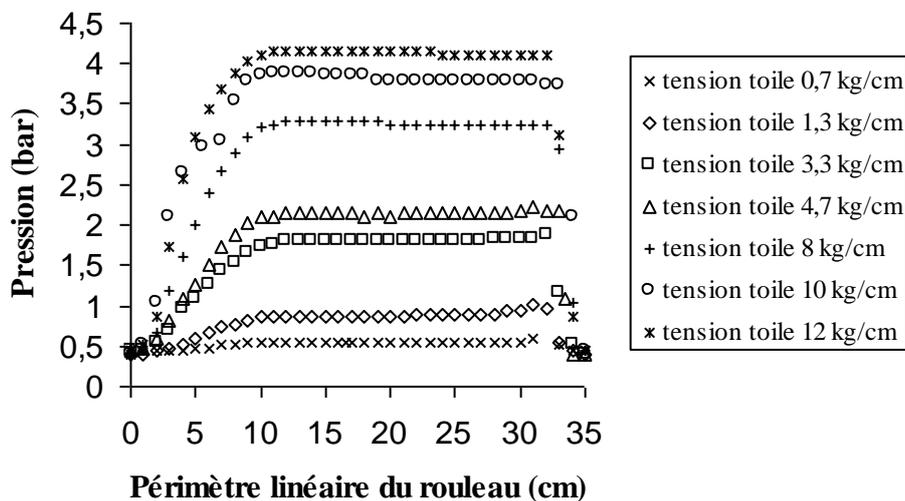


Figure IV.7. : mesure de pression ($\pm 0,2$ bar) dans le pilote avec le capteur miniature pour le rouleau de 270 mm de diamètre

La valeur de la pression maximale (pression sur le plateau) peut être corrélée à la tension des toiles (figure IV.8.). Cette pression est très supérieure à la pression calculée grâce à l'équation IV.1.

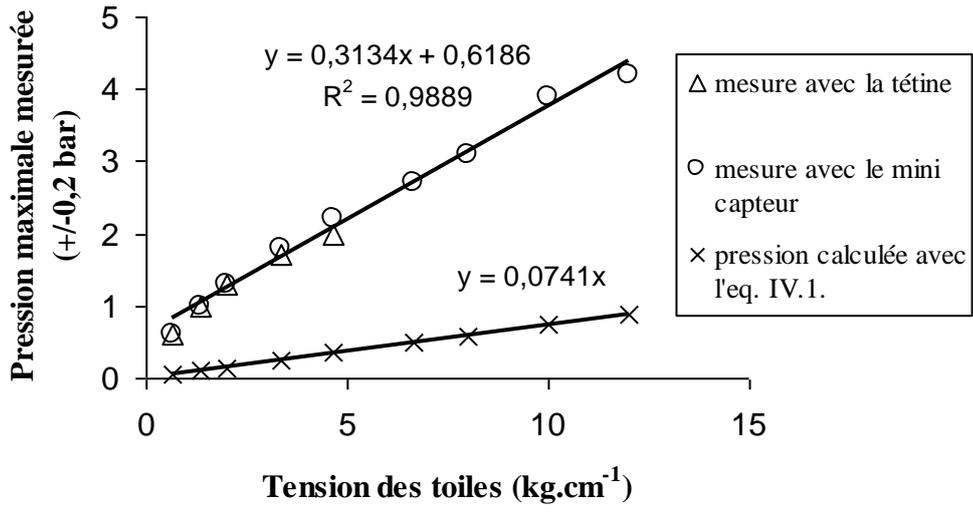


Figure IV.8. : évolution de la pression maximale mesurée dans le pilote au niveau du rouleau de pressage de 270 mm de diamètre

Cependant, des mesures effectuées avec différents rouleaux de pressage montrent bien que la pression augmente avec la diminution du diamètre (figure IV.9.).

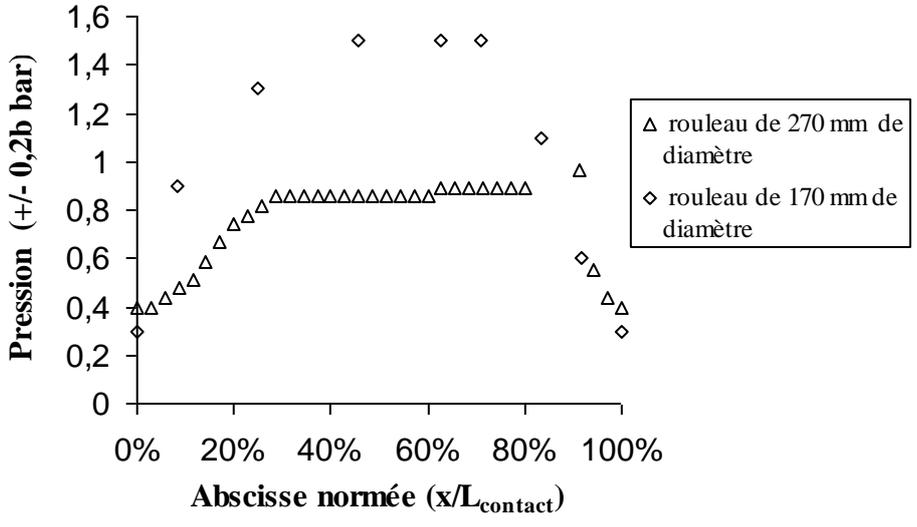


Figure IV.9. : mesure de la pression pour deux rouleaux de pressage de diamètres différents avec une tension de toile de 0,67 kg.cm⁻¹

En fait, d'après les remarques effectuées en début du chapitre, il apparaît difficile d'évaluer de façon théorique le profil de pression le long des filtres à bandes. Des mesures sur le filtre à bandes semblent nécessaires si la connaissance de cette donnée est souhaitée.

Dans le cadre de notre étude, les mesures de pression effectuées vont permettre de mener en parallèle des essais sur le pilote et dans une cellule de filtration compression en essayant d'y appliquer les mêmes pressions. Etant donné que les performances du pilote s'extrapolent bien au cas des filtres à bandes industriels, ces essais devraient nous permettre de proposer une procédure expérimentale en CFC pour prévoir a priori les performances des filtres à bandes industriels.

IV.2. Estimation des performances des filtres à bandes grâce à la cellule de filtration compression

IV.2.1. Présentation

IV.2.1.1. La cellule de filtration compression

La cellule utilisée au laboratoire est une cellule classique de filtration compression (norme AFNOR T 97-001) en acier ayant un diamètre normalisé de 70 mm (figure IV.10.).



Figure IV.10. : cellule de filtration compression

La suspension placée dans la cellule est recouverte d'un piston sur lequel est exercée, grâce à l'air comprimé, une pression constante (figure IV.11.). Une acquisition de la masse de filtrat et du déplacement du piston au cours du temps est réalisée afin de connaître le comportement de la suspension filtrée au cours du temps. Les essais ont été effectués avec un filtre papier Durieux n°111 ou avec une toile de filtre à bandes 16-6 chevron.

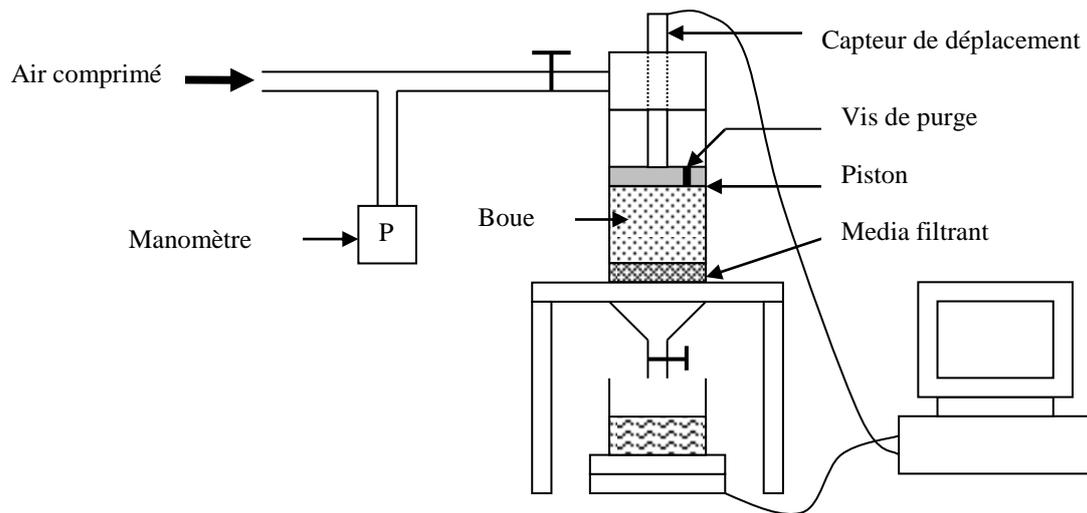


Figure IV.11.: schéma de la cellule de filtration compression

IV.2.1.2. Filtration compression des boues résiduaires en CFC

Il est de pratique courante de mesurer la siccité limite d'un gâteau obtenu par filtration compression en fixant (manuellement ou non) la pression et en attendant que l'écoulement du filtrat s'arrête. Cependant, Gazbar (1993) montre que le coefficient de corrélation entre la siccité limite, ainsi obtenue en CFC, et les performances des filtres à bandes industriels est médiocre. Il semble donc intéressant d'améliorer ce test de laboratoire.

Par ailleurs, d'après Baudez (2001), la boue se déforme continuellement sous pression constante pendant plus de 15h. Par conséquent, la siccité du gâteau augmente sans cesse (même très lentement), il est donc nécessaire de fixer un temps d'arrêt identique pour tous les essais afin de comparer les siccités obtenues. Pour estimer les performances des filtres à

bandes, Baskerville et col. (1978) et Rhemat (1997) conseillent d'après leurs travaux réalisés avec des boues résiduaires urbaines pour l'un et d'industrie papetière pour l'autre, de fixer un temps de pressage de 2 minutes pour une pression, respectivement de 0,7 et 0,91 bar.

Halde (1980) remarque, pour sa part, une influence importante de la montée en pression dans la CFC sur la siccité obtenue en fin de filtration compression. Cela dans le cas d'une boue mixte digérée pressée sous une pression maximale de 2,3 bar. Il observe que les plus grandes siccités sont obtenues avec une montée en pression de 0,15 bar.s⁻¹.

Cependant, les avis des différents auteurs divergent quant à l'influence de la pression sur la filtration et la compression des boues résiduaires biologiques (matériau extrêmement compressible). Ainsi, certains auteurs (Coakley et Jones, 1956 ; Leonard, 2002) observent une influence de la pression appliquée sur le débit de filtrat lors de la filtration des boues résiduaires urbaines qu'ils caractérisent par la loi suivante:

$$\alpha = \alpha_0 P^{n_0} \quad (\text{eq. IV.3.})$$

Par exemple, Coakley et Jones (1956) donnent un coefficient de compressibilité n_0 compris entre 0,7 et 0,86 pour des boues non conditionnées digérées, compris entre 0,6 et 0,79 pour des boues activées non floculées. Léonard (2002), quant à elle, a mesuré sur une boue activée floculée, un coefficient de compressibilité n_0 égal à 0,72, à 0,82 et à 1,01 pour des doses de polymère (Zetag 7587 de marque Ciba) respectivement de 3 g.kg_{MS}⁻¹, 6 g.kg_{MS}⁻¹ et de 9 g.kg_{MS}⁻¹. Leclerc et Minery (1980) observent un n_0 plus faible (0,567) pour une boue résiduaire minérale floculée avec un polymère anionique.

Par ailleurs, La Heij (1994) remarque qu'une augmentation de la pression par palier dans la CFC entraîne des à-coups sur le débit de filtrat récupéré pour des boues résiduaires.

D'autres auteurs tels que Sorensen et Sorensen (1997), Novak et col. (1999), Lee et col. (2000) ne remarquent pas l'influence de la pression sur la filtration des boues au-dessus de 0,02 bar. Ils expliquent ce phénomène par l'apparition d'une fine couche de boue de très haute résistance à la filtration (due à la forte compressibilité des boues) au niveau du filtre. Tiller et Kwon (1998) expliquent ce phénomène en écrivant la loi de Darcy à travers une couche de gâteau d'épaisseur dz :

$$\frac{dV_f}{\Omega dt} = -\frac{\beta dP_s}{\mu dz} \quad (\text{eq. IV.4.})$$

qu'ils écrivent, également, en coordonnées Lagrangiennes :

$$\frac{dV_f}{\Omega dt} = -\frac{1}{\mu \alpha_g} \frac{dP_s}{d\omega_v} \quad (\text{eq. IV.5.})$$

Par ailleurs, il est souvent admis que la perméabilité des matériaux compressibles est une fonction puissance de la pression appliquée au niveau du "squelette" solide (Lee et Wang, 2000). Tiller et Kwon (1998) utilisent alors les expressions empiriques suivantes pour, ensuite, les introduire dans les deux équations précédentes :

$$1 - \varepsilon_g = \left(1 - \varepsilon_{g0}\right) \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^b \quad (\text{eq. IV.6.})$$

$$\alpha_g = \alpha_{g0} \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^n \quad (\text{eq. IV.7.})$$

$$\beta = \beta_0 \left(1 + \frac{P_s}{P_a}\right)^{-\delta} \quad (\text{eq. IV.8.})$$

$$\text{avec } \delta = n + b, \alpha_g \beta (1 - \varepsilon_g) = 1$$

ε_{g0} , α_{g0} , β_0 étant respectivement la porosité, la résistance (m^{-2}) et la perméabilité (m^2) d'un gâteau non soumis à contrainte, b , n , δ étant des coefficients de compressibilité, P_a une pression de référence (Pa). $\delta > 1$ signifie que la suspension est très compressible. Pour les boues activées, Tiller et Kwon (1998) proposent $\varepsilon_{g0} = 0,95$, $\alpha_{g0} = 3,62 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-2}$, $\beta_0 = 5,53 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$, $b = 0,26$, $n = 1,40$, $d = 1,66$, $P_a = 0,0019 \text{ bar}$.

En faisant l'hypothèse que le débit de filtrat ne dépend que du temps, qu'il est uniforme dans tout le gâteau et que la concentration de la suspension au-dessus du gâteau en formation reste homogène, ils intègrent sur l'épaisseur totale du gâteau les équations IV.7. et IV.8. pour aboutir, après un bilan matière, aux équations suivantes :

$$1 - \varepsilon_{gmoy} = \frac{1 - \delta}{(1 - n)\alpha_{g0}\beta_0} \left[\frac{\left(1 + \frac{P_{appl}}{P_a}\right)^{1-n} - 1}{\left(1 + \frac{P_{appl}}{P_a}\right)^{1-\delta} - 1} \right] \quad (\text{eq. IV.9.})$$

$$\frac{\mu\alpha_{g0}}{\Omega^2 P_a} V_f \frac{dV_f}{dt} = \frac{1}{C_{vsusp0b}(n-1)} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{P_{appl}}{P_a}\right)^{n-1}} \right] - \frac{1}{(1 - \varepsilon_{g0})(\delta - 1)} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{P_{appl}}{P_a}\right)^{\delta-1}} \right]$$

(eq. IV.10.)

Ainsi dans le cas où n et δ sont supérieurs à 1 (matériau très compressible) et où $P_{appl} \gg P_a$ (la pression appliquée de l'ordre du bar) on déduit de l'équation IV.10., après intégration, l'expression suivante:

$$\frac{V_f^2}{\Omega^2} = \frac{2}{\mu} \left[\frac{P_a}{C_{vsusp0}(n-1)\alpha_{g0}} - \frac{P_a\beta_0}{\delta-1} \right] t \quad (\text{eq. IV.11.})$$

Cette équation montre que pour toutes suspensions très compressibles telles que les boues, la pression n'a aucune influence sur le débit de filtrat, au-dessus d'une certaine valeur.

De même, on déduit de l'équation IV.9. la relation suivante (suspension très compressible):

$$1 - \varepsilon_{gmoy} \approx \frac{1 - \delta}{(1 - n)\alpha_{g0}\beta_0} \quad (\text{eq. IV.12.})$$

On remarque que la porosité moyenne du gâteau ne dépend plus de la pression, mais seulement des paramètres de la boue. Quelle que soit la pression appliquée, la siccité finale obtenue en fin de phase de filtration est la même, si la pression appliquée est suffisamment grande.

IV.2.1.3. Compression des boues résiduaires en CFC

Les résultats des différentes études présentées dans la littérature divergent également à propos de l'impact de la pression sur la compression des boues biologiques. Ainsi, Halde (1980) observe une augmentation de la siccité avec la pression appliquée alors que Léonard (2002) mesure des siccités identiques en fin de compression quelle que soit la pression considérée. De même, Gazbar (1993) et Baudez (2001) en modifiant la pression au cours de la phase de compression des boues (après plusieurs minutes de compression), n'observent, sur des boues activées, aucune évolution du débit de filtrat récupéré.

La pression exercée sur la boue en cellule de filtration compression ne serait pas, d'après ces derniers, un paramètre influant sur le pressage. Ce constat souligne donc une différence importante entre le filtre à bandes et la CFC. En effet, sur le pilote la tension des toiles, donc la pression appliquée au niveau des rouleaux, a une importance non négligeable sur la siccité du gâteau. Par conséquent, les essais réalisés en CFC ne semblent pas transposables aux filtres à bandes. Néanmoins, les expériences menées par tous les auteurs ne prennent pas en compte deux facteurs importants que sont le temps de pressage dans la CFC et le mode de montée en pression. Ces deux aspects sont développés par la suite dans ce chapitre afin d'estimer dans quelle mesure la CFC peut être un outil intéressant pour évaluer a priori les performances des filtres à bandes.

IV.2.2. Essais de filtration et de compression en CFC

Des essais de filtration compression et de compression des boues préalablement égouttées ont été menés en parallèle.

Deux boues activées sont utilisées pour ces expériences :

- des boues prélevées en sortie du silo épaisseur de la station d'épuration d'Idron (FV = 78%) ;
- des boues prélevées en sortie du silo épaisseur de la station d'épuration de Pau-Lescar (FV > 80%).

Dans les deux cas, la floculation est réalisée avec le polymère présenté au chapitre III (EM 840 TRM).

IV.2.2.1. Reproductibilité des essais de compression

Différents essais ont été réalisés dans des conditions expérimentales identiques lors d'une même journée (pour limiter l'évolution de la boue) afin de déterminer le degré de confiance des résultats (figure IV.12.).

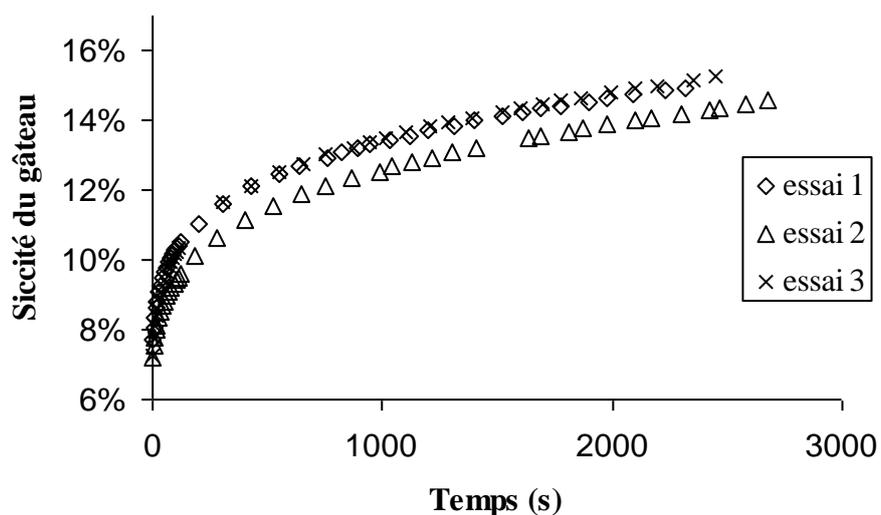


Figure IV.12. : reproductibilité de la compression en CFC des boues secondaires d'Itron égouttées.

La figure IV.12. montre un exemple pour lequel à 2000 s, un écart maximum de siccité de 1,2 points est observé, soit une erreur relative de 6% qui est légèrement supérieure à l'erreur observée sur le pilote. A 90 s, cette erreur relative augmente pour atteindre 9% (soit en fait, 1 point environ de siccité rapporté à des valeurs de siccité plus faibles qu'à 2000 s). Des résultats du même ordre de grandeur sont obtenus durant les essais de filtration compression.

IV.2.2.2. Influence de la charge surfacique

Des essais ont été effectués en faisant varier la charge de boue déposée dans la CFC. Les gâteaux de différentes épaisseurs ainsi obtenus possèdent des siccités très différentes. Les meilleures siccités étant obtenues pour les gâteaux les moins épais. On constate que la diminution de la charge (donc des matières sèches) dans la CFC entraîne une augmentation de

la siccité (figure IV.13.) comme cela a été observé dans le pilote. Ce phénomène peut être expliqué en considérant que pour un temps donné de pressage, il y a, dans le cas d'une charge peu importante, moins de filtrat à faire passer à travers le gâteau de boue. Par conséquent, la siccité augmente.

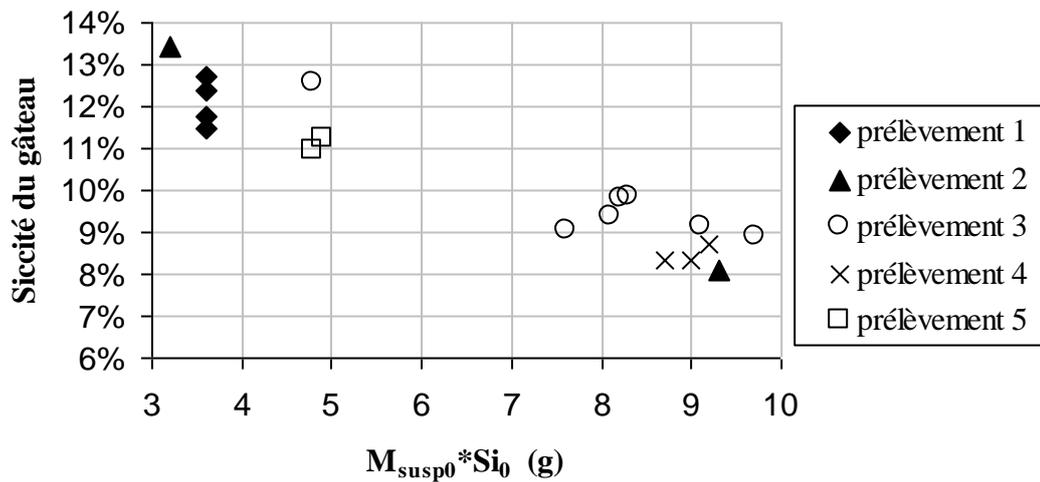


Figure IV.13.: évolution de la siccité du gâteau en fonction de la quantité de MS introduite dans la cellule après 1h de compression de divers prélèvements de boues activées de la station de Lescar préalablement égouttées.

Il est donc important pour faire une étude comparative de déposer dans la cellule les mêmes quantités de boue à chaque essai. Par ailleurs, afin de comparer les performances des filtres à bandes avec les résultats d'essais menés en CFC, il faut veiller à ce que le gâteau formé dans la cellule soit à peu près de la même épaisseur que celui obtenu en sortie du filtre (1 cm environ).

IV.2.2.3. Influence de la toile

Bien qu'elle soit souvent négligée la toile offre une résistance à la filtration supplémentaire à celle engendrée par le gâteau. Il est légitime de se poser la question de son influence sur les essais réalisés en CFC. De plus, l'ouverture des toiles utilisées dans les filtres à bandes étant très importante, il est souvent impossible d'appliquer instantanément une forte pression dans la cellule, la boue passant alors à travers la toile. Il est intéressant d'évaluer dans quelle mesure l'utilisation dans la CFC d'un filtre papier (retenant la boue même sous

l'application instantanée de forte pression) reste cohérente pour l'extrapolation des résultats aux filtres industriels.

Les essais réalisés dans la CFC avec des boues égouttées en utilisant une toile de filtre à bandes 16-6 chevrons (fabriquée par Rai-tillère, ouverture théorique 376 μm) et un papier filtre Durieux n°111 (ouverture : 3 μm) indiquent que la résistance du filtre peut être négligée (figure IV.14.).

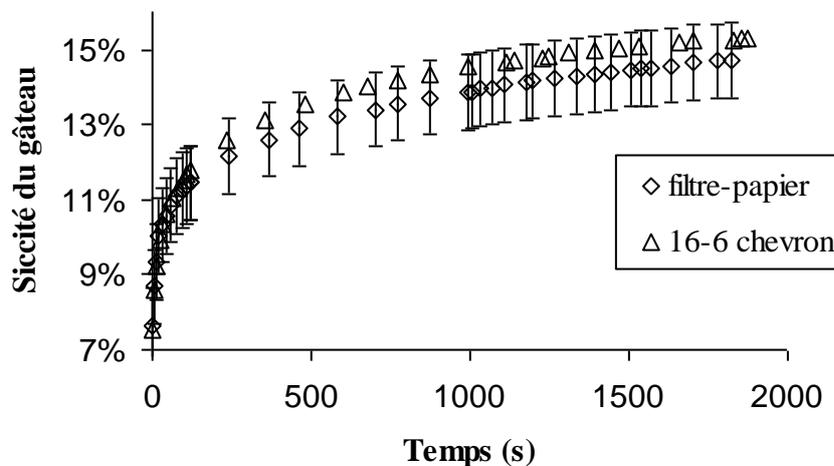


Figure IV.14. : impact du media filtrant sur la compression des boues secondaires d'Idron égouttées

Si dans la CFC, les boues passent à travers la toile pour une pression supérieure à 0,4 bar appliquée instantanément, il n'en est rien dans le pilote pour deux raisons principales :

- la pression n'y est pas appliquée instantanément;
- les boues peuvent se déplacer sur la largeur de la toile où elles ne rencontrent aucune résistance, c'est le fluage. Dans la CFC, les boues sont bloquées par les parois et ne peuvent que passer à travers le filtre.

IV.2.2.4. Influence de la pression appliquée instantanément sur les boues urbaines

Face aux divergences entre les résultats reportés dans la littérature quant à l'influence de la pression appliquée sur la déshydratation des boues biologiques, il semble important, dans le cadre de notre étude, de mener une campagne de mesure pour éclaircir ce point. Pour

cela, des essais ont été effectués en CFC à la fois avec des boues secondaires liquides et égouttées. Les résultats obtenus semblent montrer que la pression appliquée instantanément sur la boue n'a pas d'influence significative dans une gamme de 0,4 à 10 bar (figures IV.15 et IV.16.), puisque les variations observées restent dans le domaine de reproductibilité.

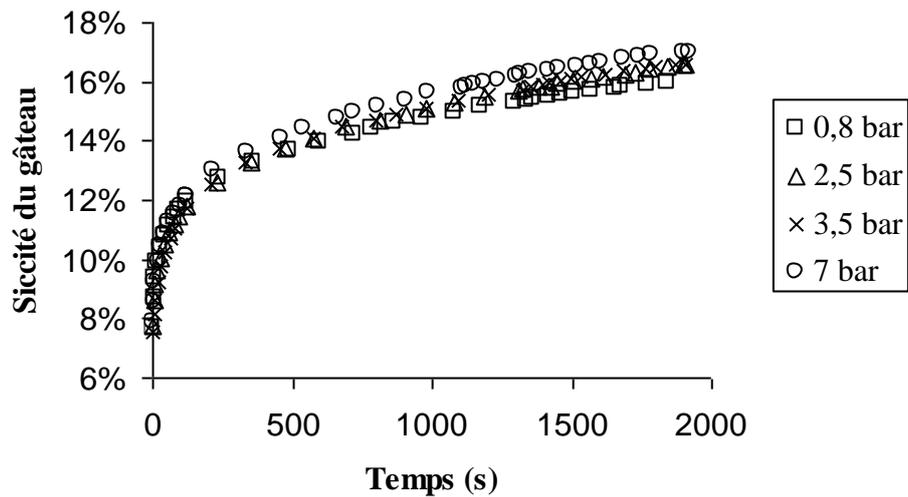


Figure IV.15.: compression des boues secondaires d'Itron égouttées en CFC à différentes pressions

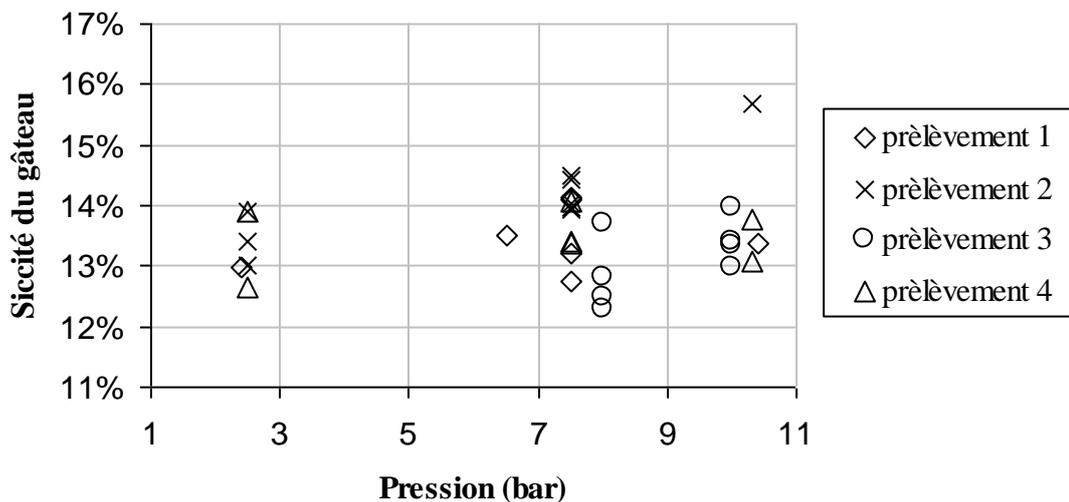


Figure IV.16. : siccités des gâteaux de boues après une heure de filtration compression en CFC pour différentes pressions appliquées instantanément et pour divers prélèvements de boues secondaires de la station d'épuration de Lescar

Afin de vérifier que la procédure de mesure n'est pas à remettre en cause, des essais de filtration compression ont été réalisés sur une suspension de kaolin (matériau compressible). Les résultats alors obtenus mettent en évidence un net accroissement du débit de filtrat lors de la filtration due à l'élévation de la pression (figure IV.17.). Autrement dit le comportement particulier observé avec les boues secondaires semble bien lié à la nature même de ce type de matériaux et non à un problème expérimental.

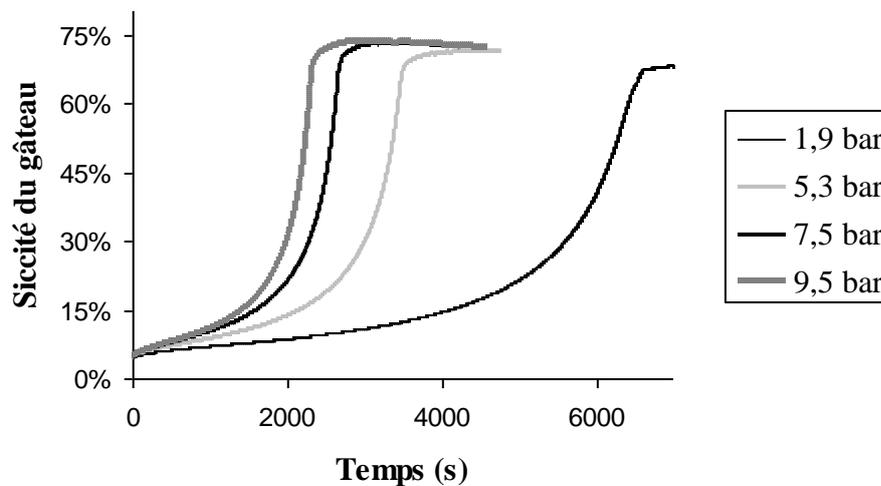


Figure IV.17. : influence de la pression sur une suspension de kaolin

IV.2.2.5. Influence de la vitesse de montée en pression

Selon Halde (1980), la façon dont la pression est appliquée dans la CFC en début d'expérience a une influence notable sur la siccité du gâteau. Cependant Gazbar (1993), qui a fait varier la pression dans sa cellule après 15 min de filtration compression, n'observe aucune évolution. De même, d'après Baudez (2001), la variation de la pression après 45 min de compression d'une boue préalablement pressée sur un filtre à bandes industriel n'a aucune influence sur la cinétique de déshydratation. La variation de pression semble donc avoir une influence significative uniquement pendant les premiers instants de la compression pour s'atténuer avec le temps.

Afin de vérifier ce point, nous avons procédé à un essai durant lequel les boues secondaires égouttées ont été comprimées à 1,5 bar pendant 10 min puis en augmentant la pression à 3 bar (figure IV.18.).

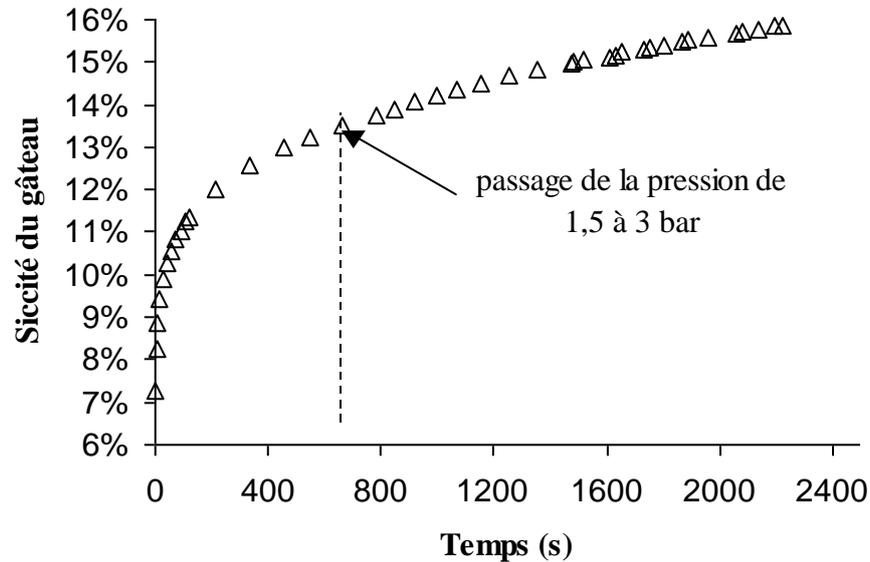


Figure IV.18.: variation de la pression après 10 minutes de compression des boues secondaires égouttées d'Idron

Les résultats de cet essai sont en accord avec les observations de Gazbar et Baudez. L'augmentation de la pression après 10 minutes de compression n'a aucun effet sur la cinétique de déshydratation.

D'autres essais ont ensuite été réalisés en faisant varier la pression dans les premiers instants de la compression pour vérifier l'influence de la montée en pression. La variation de pression a été réalisée en accroissant la pression par palier d'une durée de 10 à 20 secondes. Ces essais montrent que la variation de pression a un effet non négligeable seulement pendant les premières minutes de la compression (figure IV.19. et figure IV.20.). Au-delà de cette durée, aucune influence ne peut être significativement remarquée. De plus, la variation de pression a un effet maximal sur la cinétique de déshydratation pendant les premières secondes de la compression puis cet effet s'atténue avec le temps.

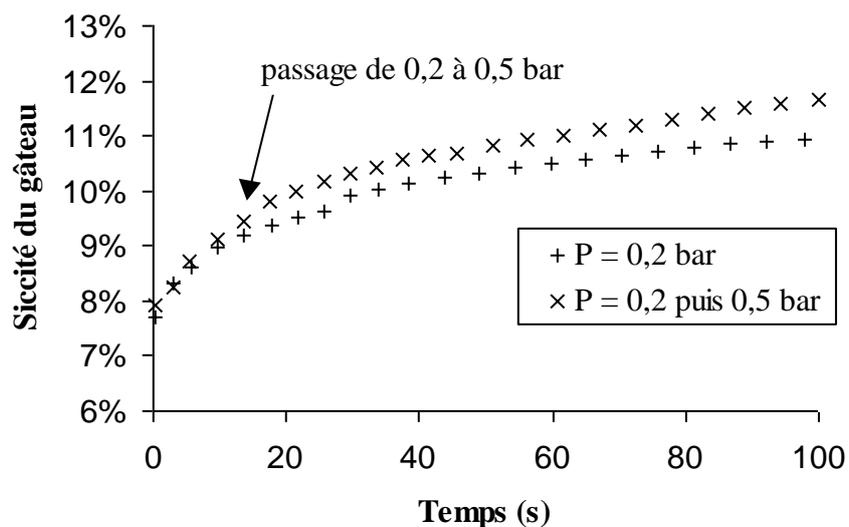


Figure IV.19. : impact de la variation de pression dans les premiers instants (15^{ème} s) de la compression de boues secondaires égouttées d'Idron

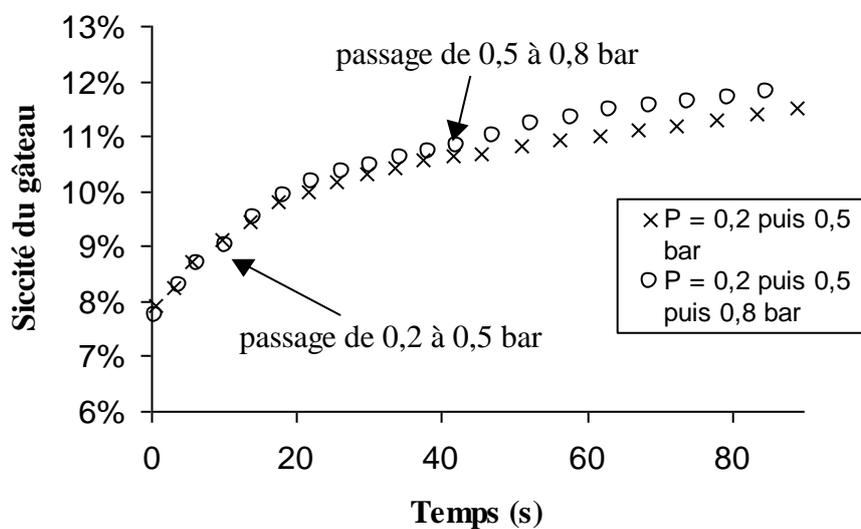


Figure IV.20. : impact de la variation de pression dans les premiers instants (15^{ème} et 40^{ème} s) de la compression de boues secondaires égouttées d'Idron

D'autres essais réalisés avec une montée progressive en pression dans la CFC mettent en évidence un gain de siccité important (figure IV.21.).

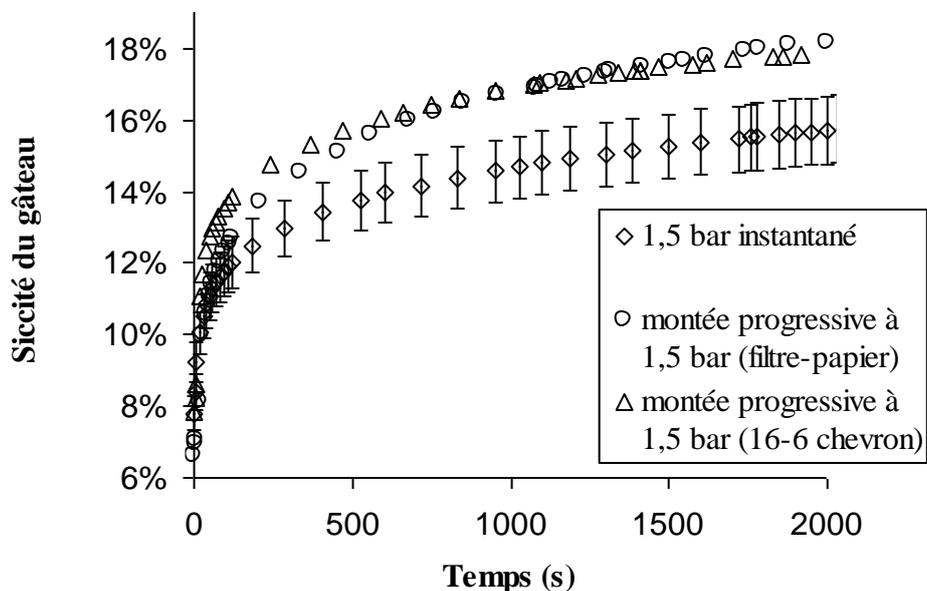


Figure IV.21. : gain de siccité engendré par une application progressive de la pression (environ $0,04 \text{ bar}\cdot\text{s}^{-1}$) dans la CFC pour des boues secondaires d'Idron égouttées.

Ces résultats indiquent, dans le cas des boues résiduaire, qu'une procédure normalisée devrait être établie quant à la vitesse de montée en pression dans la cellule de filtration compression. Cependant, ces résultats ne sont que des observations préliminaires qu'il faudrait affiner en modifiant la cellule de filtration compression de façon à pouvoir programmer la vitesse de montée en pression.

Quoiqu'il en soit, la pression semble avoir une incidence sur le gâteau de boue tant que celui-ci n'est pas tout à fait structuré.

IV.2.2.6. Conclusion

Pour effectuer des essais sur les boues secondaires en CFC et pouvoir comparer les résultats, il est nécessaire d'utiliser pour chaque essai la même charge de boue et une vitesse de montée en pression identique. Les essais peuvent être effectués aussi bien avec un filtre papier qu'avec une toile de filtre à bandes.

La différence de comportement observée quant à l'influence de la pression sur les boues entre le pilote et la cellule indique qu'un test en CFC ne sera jamais idéal. Quoiqu'il en soit, la CFC reste un outil commun pour l'étude de la déshydratation mécanique des suspensions et il est intéressant de proposer une procédure pour l'utiliser dans le cadre d'études et de dimensionnement des filtres à bandes industriels.

IV.2.3. Comparaison entre les performances de déshydratation de la CFC et du pilote

Les siccités obtenues dans une CFC en fin de la compression sont généralement très supérieures à celles obtenues en sortie des filtres à bandes. Ces différences proviennent, en partie, du fait que le temps de pressage de la boue dans les filtres industriels est très court. Cette durée a été estimée sur notre pilote de la manière suivante :

$$\frac{L_{coinc} + N \times L_{contact}}{s_b} \quad (\text{eq. IV.13.})$$

Nous avons procédé à des mesures dans la CFC avec un faible temps de pressage, identique à celui calculé sur le pilote. La plupart des expériences sur le pilote ont été réalisées avec une pression maximale mesurée au niveau du rouleau de pressage de 1,5 bar (rouleau de 170 mm de diamètre). Les essais en CFC ont été menés de telle sorte que l'épaisseur du gâteau formé soit la même (à 1 ou 2 mm près) que celle du gâteau en sortie du pilote. De plus, afin de se rapprocher au maximum du fonctionnement des filtres à bandes, les mesures en CFC ont été réalisées sur des boues égouttées et flocculées à $7 \text{ g.kg}_{\text{MS}}^{-1}$ avec du EM 840 TRM.

IV.2.3.1. Application instantanée de la pression dans la CFC

Dans un premier temps, deux échantillons issus d'une boue flocculée et égouttée ont été respectivement déshydratés sur le pilote et dans la CFC. La pression dans la cellule, fixée en fonction de celle mesurée sur le rouleau de pressage (soit 1,5 bar), a été appliquée instantanément. Un filtre papier a été utilisé comme support filtrant dans la cellule.

Les résultats de ces mesures indiquent que la siccité du gâteau obtenu après 30 minutes de compression en appliquant la pression dans la cellule instantanément est supérieure de 1,5 à 3 points à celle obtenue avec le pilote (7 passages à 1,5 m.min⁻¹). Cependant pour un temps de pressage identique à celui du pilote (soit 100 s), la siccité du gâteau dans la cellule est très inférieure (figure IV.22.). Autrement dit, l'application instantanée de la pression dans la CFC ne permet pas d'estimer les performances du pilote et par extrapolation celles des filtres à bandes.

Une montée progressive en pression dans la CFC pourrait diminuer l'écart observé.

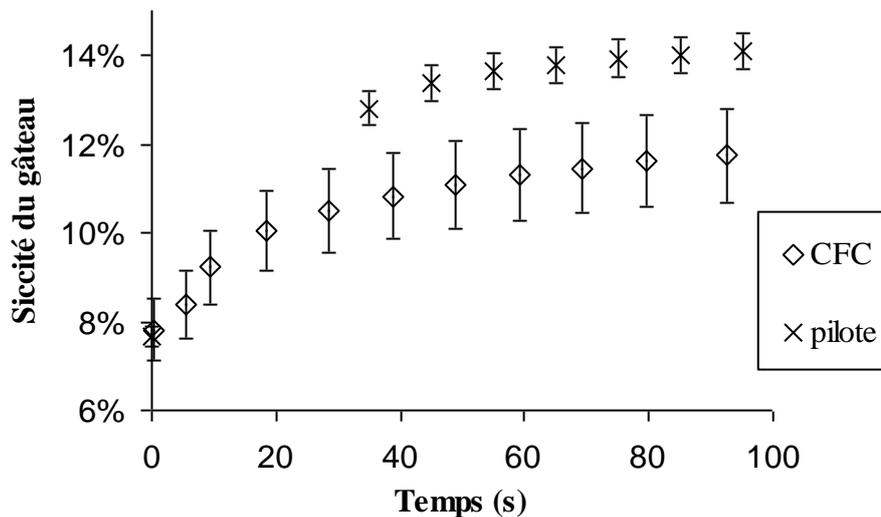


Figure IV.22. : comparaison des performances entre le pilote et la CFC pour les boues secondaires égouttées d'Idron.

IV.2.3.2. Montée progressive de la pression dans la CFC

Des essais ont été réalisés en essayant d'augmenter manuellement la pression dans la CFC avec une vitesse de montée en pression proche de celle mesurée dans le pilote. Un premier essai a été réalisé en utilisant une très faible vitesse de défilement des toiles dans le filtre à bandes (0,1 m.min⁻¹) afin d'obtenir une montée en pression relativement lente, plus simple à reproduire dans la cellule. La figure IV.23. montre l'évolution de la pression dans les deux situations : CFC et pilote.

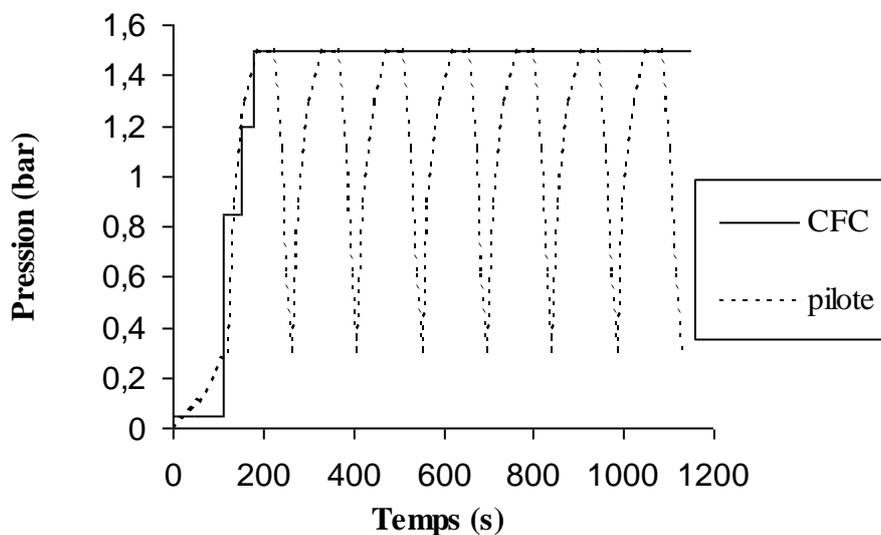


Figure IV.23. : évolution de la pression appliquée sur les boues dans le pilote et la CFC

Les résultats obtenus dans la CFC avec une telle montée en pression décrivent correctement l'évolution de la siccité mesurée sur le pilote (écart inférieure à 0,5 point de siccité, figure IV.24.)).

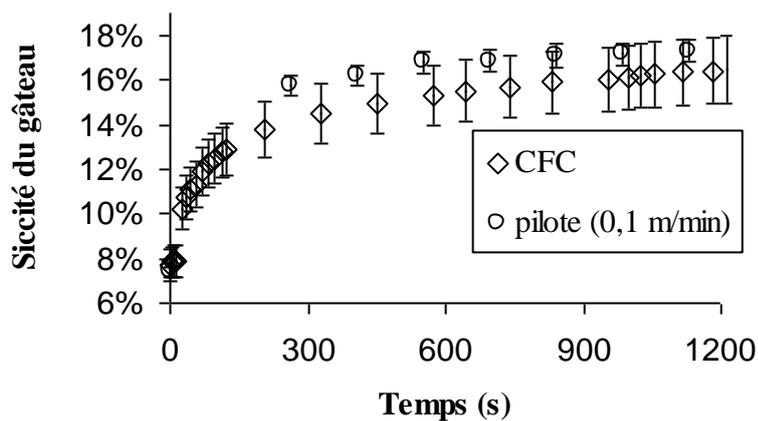


Figure IV.24. : comparaison des performances entre le pilote et la CFC

Dans ces conditions un écart inférieure à 1 point de siccité est observé entre la siccité mesurée dans la cellule et celle obtenue après quatre passages dans le pilote.

Afin de se rapprocher du fonctionnement habituel des filtres à bandes, deux essais similaires ont été menés avec une vitesse de défilement des toiles de $1,5 \text{ m.min}^{-1}$ et une montée en pression dans la cellule beaucoup plus rapide. Les figures IV.25. et IV.26. montrent à nouveau que l'évolution de la siccité dans la CFC est très proche de celle obtenue dans le pilote.

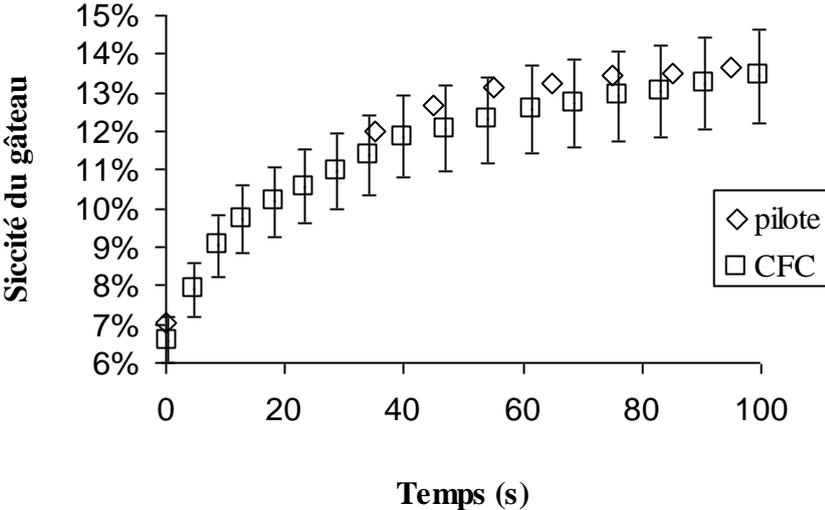


Figure IV.25. : série d'essais 1, comparaison entre les performances du pilote et de la CFC (avec une pression maximale mesurée dans le pilote de 1,5 bar)

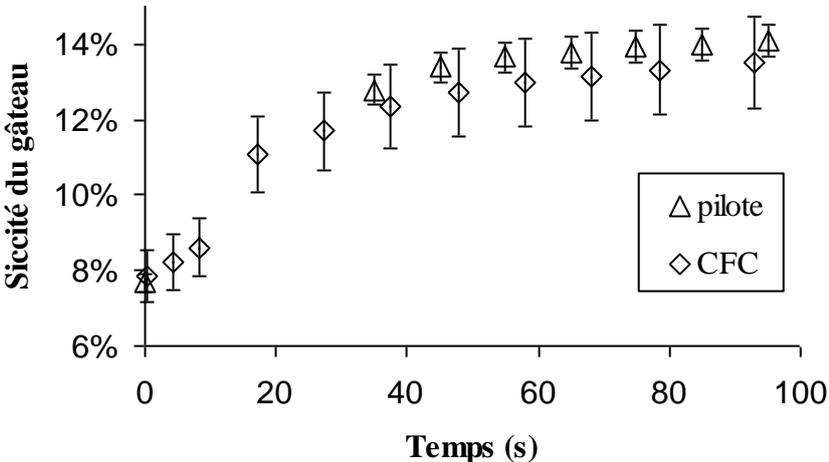


Figure IV.26. : série d'essais 2, comparaison entre les performances du pilote et de la CFC (avec une pression maximale mesurée dans le pilote de 1,5 bar)

Dans ces conditions, un écart inférieur à 1 point de siccité est à nouveau observé entre la siccité mesurée dans la cellule et celle obtenue après quatre passages dans le pilote.

Ces essais montrent qu'il est possible, en appliquant une procédure adaptée aux essais réalisés au laboratoire en CFC, d'estimer a priori les performances des filtres à bandes.

IV.2.3.3. Limites de la procédure

La montée en pression dans la cellule étant réalisée manuellement, il est difficile de la maîtriser si elle est trop rapide. En augmentant la tension des toiles dans le pilote et en conservant une vitesse des toiles de $1,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, la montée en pression est accélérée. Il est alors difficile de réaliser une montée en pression similaire dans la CFC. Dans ce cas, la prévision de la performance du pilote grâce à la CFC se dégrade (figure IV.27).

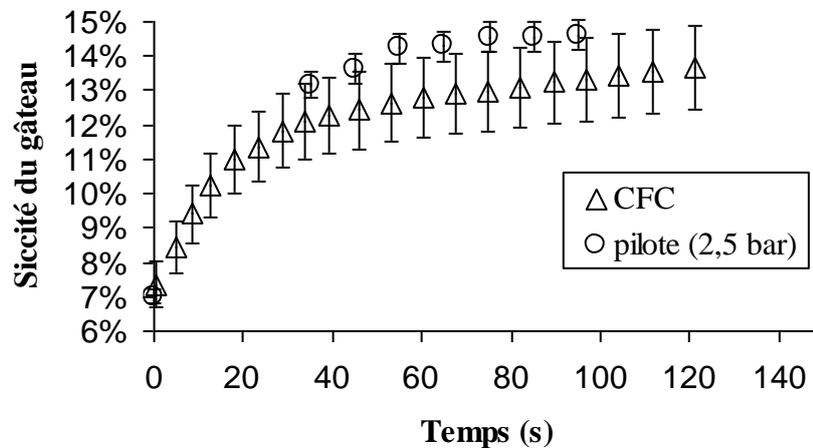


Figure IV.27. : comparaison entre les performances du pilote et de la CFC

Afin de réduire en partie cet écart, il semble important de modifier la CFC en installant un système permettant une vitesse de montée en pression continue et programmable.

IV.2.3.4. Conclusion

La prise en compte du temps de séjour dans le filtre à bandes et de la vitesse de montée en pression permet d'estimer de façon relativement précise la siccité en sortie d'un filtre à bandes (environ 1 point d'écart après quatre pressages (ou rouleaux), soit environ 8% d'erreur relative). De plus, d'après tous nos essais, cette procédure sous-estime la performance du pilote, il semble qu'elle renseigne sur la siccité minimale obtenue avec un filtre à bandes. De même, la siccité du gâteau relevée au bout d'une demi-heure de compression dans la CFC surestime de 2 à 3 points celle relevée au niveau du pilote. Ces deux valeurs permettent de fournir une plage de performances du filtre à bandes.

Enfin, les campagnes d'essais réalisées à la fois sur le pilote et sur la CFC montrent qu'il serait intéressant de modifier la CFC en adaptant un système de montée en pression continue.

Le fait que la siccité obtenue dans la CFC pour un temps de pressage identique à celui appliqué dans le pilote (1 à 3 min) soit systématiquement inférieure à celle obtenue sur le pilote semble pouvoir s'expliquer par :

- le cisaillement qui s'opère dans les filtres à bandes ;
- la différence de géométrie des deux appareils. En effet, les boues peuvent se déplacer dans la largeur des toiles sur le pilote (géométrie à 2 dimensions). De plus la prise en compte du cisaillement dans le sens de défilement des bandes implique une distribution des efforts dans le pilote dans trois dimensions. Dans la cellule, la boue est bloquée par les parois et ne peut être que compressée (géométrie à une dimension).

IV.3. Influence du cisaillement

IV.3.1. Description d'une cellule de filtration compression avec piston rotatif

Une cellule de filtration compression classique (diamètre 70 mm) a été modifiée afin d'installer un piston rotatif (figure IV.28.).



Figure IV.28. : photo de la cellule de filtration compression modifiée

Un moteur permet, grâce à un variateur de fréquence, de mettre en rotation le piston avec une vitesse de 0 à 30 $\text{tour} \cdot \text{min}^{-1}$ (figure IV.29.).

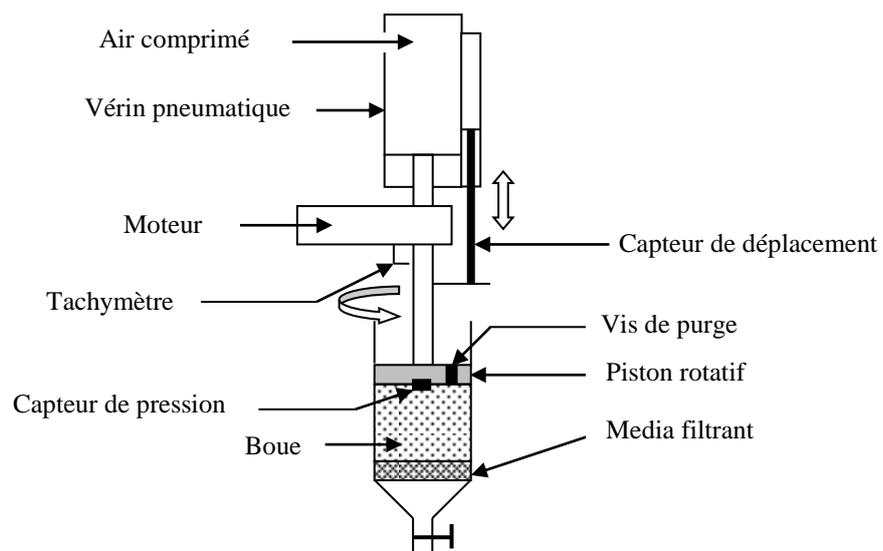


Figure IV.29. : schéma simplifié de la cellule de filtration compression modifiée

Les essais de filtration compression peuvent être effectués dans une gamme de pression de 2 à 12 bar. Un capteur de pression a été installé sur le piston afin de connaître la pression exercée sur la suspension pendant la phase de filtration. Lors des essais, le filtrat est récupéré dans un bêcher posé sur une balance reliée à un ordinateur enregistrant ainsi l'évolution de la masse de filtrat avec le temps. Un capteur de déplacement lié au piston permet également de suivre l'évolution de la hauteur de la suspension dans le temps.

Tous ces essais sont réalisés en utilisant un filtre papier Durieux n° 111 protégé par une toile de filtre à plateaux afin qu'il ne se déchire pas lors de la mise en rotation du piston.

Afin de limiter les phénomènes de glissement au niveau du piston, la surface de ce dernier est usinée (figure IV.30.) pour créer une rugosité proche de celle des toiles de filtre à bandes.



Figure IV.30. : surface usinée du piston

IV.3.2. Impact du cisaillement

Etant donné que les boues subissent un effet cisailant au niveau des rouleaux de pressage dans le filtre à bandes, c'est à dire lors de la compression, il nous a semblé opportun de mettre en fonctionnement la rotation du piston seulement pendant la phase de compression des boues. Afin de bien mettre en évidence l'impact de cette rotation, le piston est mis en mouvement seulement en fin d'étape de compression (quand il n'y a pratiquement plus de filtrat récupéré par un pressage normal). Liebhart et Koenders (2000) et Wakeman et col. (2000) ayant montré des résultats encourageants dans ce domaine avec des suspensions

minérales, des essais préliminaires ont été réalisés sur des suspensions minérales pour tester notre montage expérimental.

Afin de bien mettre en évidence le volume de filtrat supplémentaire récupéré au moment du démarrage de la rotation du piston, des courbes classiques de la forme $\frac{t}{V_f} = f(V_f)$ ont été tracées. Elles montrent un net décrochement (récupération de filtrat) pour les suspensions minérales (figure IV.31.).

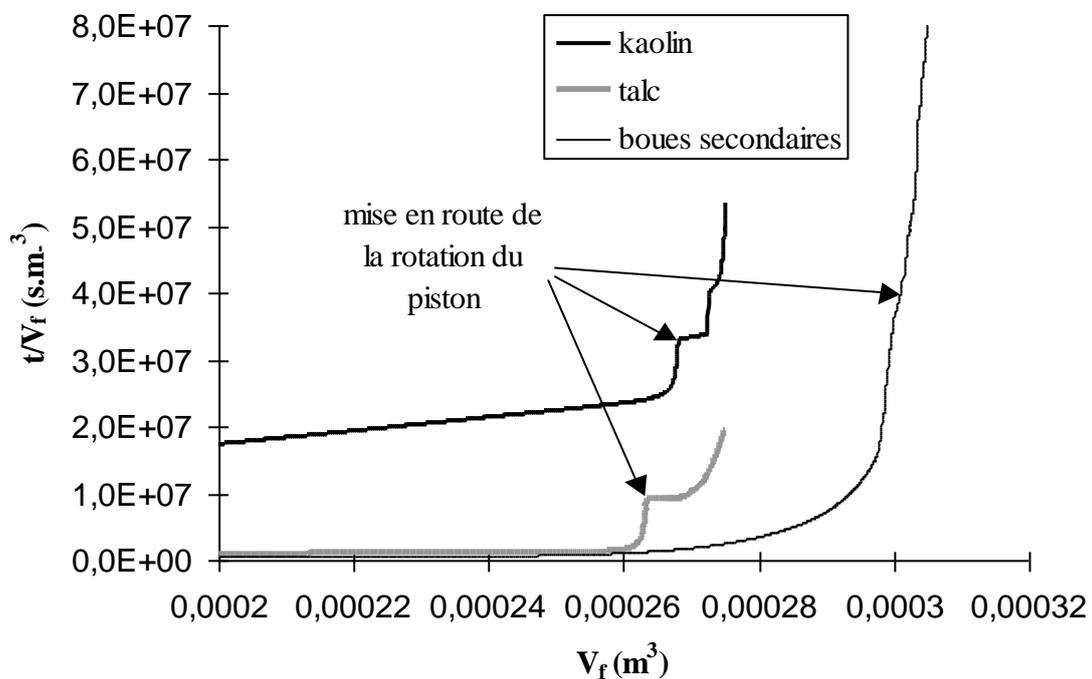


Figure IV.31. : effet de la mise en rotation du piston (10 tr/min) en fin d'étape de consolidation à 5 bar pour différentes suspensions :
 boues secondaires de Lescar flocculées avec du EM 840 TRM
 suspension de kaolin (70 g dans 300 ml d'eau)
 suspension de talc (70 g dans 300 ml d'eau)

Une expulsion de filtrat pendant quelques secondes est observée pour les suspensions minérales au moment de la mise en rotation du piston. En revanche aucune augmentation significative du volume de filtrat n'est observée dans le cas des boues secondaires.

De plus d'autres essais, qui ont abouti à la même conclusion, ont été effectués sur les boues secondaires en mettant la rotation du piston durant toute la phase de compression (pour les boues égouttées) ou au cours de la phase de filtration (pour des boues liquides).

La comparaison des différents essais réalisés semble montrer que le gain de siccité est le plus important pour la suspension la moins compressible (talc) et nul pour les boues activées (matériau extrêmement compressible) (tableau IV.1.).

suspension	Pression dans la CFC (bar)	Vitesse de rotation du piston (tr.min-1)	Epaisseur finale du gâteau (mm)	Siccité finale du gâteau	Gain de siccité	Gain de siccité relatif
Talc (70 g dans 300 ml d'eau)	5	10	12	75,8%	+7,9 points	11,6%
Kaolin (70g dans 300 ml d'eau)	5	10	12	73,60%	+4,9 points	7,1%
Boues secondaires de Lescar (floculées avec du EM840TRM à 7g.kg _{MS} ⁻¹)	2 à 12	2 à 30	3 à 25	12 à 16%	+0 point	0%

Tableau IV.1.: gain de siccité dû à la mise en rotation du piston en fin d'étape de compression dans la CFC modifiée

Ce phénomène peut s'expliquer par la rigidité des particules. Un matériau peu compressible est constitué de particules relativement rigides. Sous l'effet de la rotation du piston en fin de compression, ces particules sont mises en mouvement (comme des billes) et se réarrangent dans le sens de la rotation. La mise en mouvement des particules et leur réarrangement diminuent la résistance du gâteau au passage de l'eau. Un surplus de filtrat est alors récupéré. Dans le cas des boues extrêmement compressibles, la rotation du piston ne perturbe certainement pas la fine couche de boue de très faible perméabilité située à l'interface gâteau/média filtrant. Ceci expliquerait qu'aucune amélioration de la déshydratation n'est observable.

IV.3.3. Conclusion

Nos essais confirment que le cisaillement lors de la filtration entraîne des gains de siccité importants sur les suspensions minérales et peu compressibles. A l'inverse sur les

suspensions très compressibles telles que les boues, le cisaillement n'apporte aucune amélioration de la déshydratation.

Ainsi, l'effet du cisaillement dans les filtres à bandes doit être peu significatif sur les boues secondaires. Par conséquent la différence observée entre la déshydratation des boues en CFC et sur le pilote doit provenir de la différence de géométrie des deux appareils et non du cisaillement engendré au niveau des rouleaux. Les boues pouvant se déplacer dans la largeur de la toile, leur rhéologie doit jouer un rôle important comme le montre l'impact de la vitesse de défilement des toiles.

Dans toute tentative de modélisation des filtres à bandes appliqués aux boues secondaires, l'effet de cisaillement peut être négligé. En revanche, la compression dans les filtres à bandes doit être considérée dans deux directions (largeur des toiles, épaisseur du gâteau) en prenant en compte l'évolution de la pression avec le temps.

IV.4. Nomenclature

b	Facteur de compressibilité (eq. IV.6.)
C_{vsusp0}	Concentration volumique de la boue en matière sèche avant la filtration ($m^3.m^{-3}$)
D	Diamètre d'un rouleau de pressage (m)
$F_{pression}$	Force de pression exercée par la toile sur le rouleau (N)
l_t	Largeur de la toile filtrante (m)
$L_{contact}$	Longueur de la zone de contact entre les toiles et un rouleau de pressage (m)
L_t	Longueur de la zone d'égouttage (m)
L_{coinc}	Longueur de la zone du premier rouleau (zone de coincement) (m)
M_{susp0}	Masse de boue floculée déposée dans la CFC (kg)
N	Nombre de passages dans le pilote
n	Facteur de compressibilité (eq. IV.7.)
n_0	Facteur de compressibilité (eq. IV.3.)
P	Pression (Pa)
P_a	Paramètre de la relation empirique utilisée par Tiller et Kwon (1998) (Pa)
P_{appl}	Pression appliquée dans la cellule de filtration compression (CFC) (Pa)
P_s	Pression appliquée sur la phase solide (Pa)
P_θ	Pression au niveau de rouleau de pressage à l'abscisse θ (Pa)
\vec{R}	Force de contre réaction du rouleau sur la toile (N)
s_b	Vitesse linéaire des toiles du filtre à bandes ($m.s^{-1}$)
S_{i0}	Siccité initiale de la boue exprimée en % ($kg_{MS}.kg_{boue}^{-1}$)
t	Temps (s)
T_{toile}	Tension des toiles (N)
V_f	Volume de filtrat recueilli (m^3)
z	Direction Oz (épaisseur du gâteau)
α	Résistance spécifique du gâteau ($m.kg^{-1}$)
α_0	Résistance spécifique du gâteau à pression nulle ($m.kg^{-1}$)
α_g	Résistance du gâteau par unité d'épaisseur (m^{-2})
α_{g0}	Résistance du gâteau non soumis à contrainte par unité d'épaisseur (m^{-2})
β	Perméabilité du gâteau (m^2)

β_0	Perméabilité du gâteau non soumis à contrainte (m^2)
δ	Facteur de compressibilité (eq.IV.8.)
ε_g	Porosité du gâteau de filtration
ε_{gmoy}	Porosité moyenne du gâteau de filtration
ε_{g0}	Porosité du gâteau de filtration non soumis à contrainte
θ	Angle de recouvrement des toiles sur un rouleau (rad)
μ	Viscosité du filtrat (Pa.s)
ω_v	Volume de solide pris entre le filtre et une hauteur z dans le gâteau de filtration par unité de surface filtrante (m)
Ω	Section du média filtrant (m^2)

IV.5. Bibliographie

Badgujar M.N., Chiang S.-H., 1989, "*An analysis of belt filter press dewatering mechanism*", Filtration and Separation, **vol 26**, sept/oct, pp364-367.

Baskerville R.C., Bruce A.M., Day M.C., 1978, "*Laboratory technique for predicting and evaluating the performance of a filterbelt press*", Filtration and Separation, **vol 15**, Sept/Oct, pp445-454.

Baudez J.-C., 2001, "*Rhéologie et physico-chimie des boues résiduaireuses pâteuses pour l'étude du stockage et de l'épandage*", Thèse de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Centre de : Paris.

Coackley P., Jones B.R.S., 1956, "*Vaccum sludge filtration. I. Interpretation of results by the concept of specific resistance*", Sewage and Industrial Wastes, **vol 28**, n°8, pp963-976.

Galla C.A., 1996, "*Laboratory prediction of belt filter press dewatering dynamics*", Rapport de Master, University of Illinois, U.C., Department of Civil and Environmental Engineering.

Gazbar S., 1993, "*Evaluation et amélioration des performances des procédés de déshydratation mécanique des boues résiduaireuses*", Thèse de l'Institut Polytechnique de Lorraine.

Halde R.E., 1980, "*Filterbelt pressing of sludge - a laboratory simulation*", Journal of Water Pollution and Control Federation, **vol 52**, n°2, pp310-316.

La Heij, 1994, "*An analysis of sludge filtration and expression*", thèse, Technische Universiteit Eindhoven, Netherland.

Leclerc D., Minery E., 1980, "*Comparaison du comportement des boues floculées et non floculées lors de leur déshydratation par compression mécanique*", Tribune Cebedeau, **vol 33**, n°443, pp441-449.

Léonard A., 2002, "*Etude du séchage convectif des boues de stations d'épuration – Suivi de la texture par microtomographie à rayon X*". Thèse de l'Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Belgique.

Lee D.J., Ju S.P., Kwon J.H., Tiller F.M., 2000, "*Filtration of highly compactible filter cake : variable internal flow rate*", *AICHE Journal*, vol 46, n°1, pp110-118.

Lee D.J., Wang C.H., 2000, "*Theories of cake filtration and consolidation and implications to sludge dewatering*", *Water Research*, vol 34, n°1, pp1-20.

Liebhart E., Koenders M.A., 2000, "*Dead-end filtration under torsional shear: experimental findings and theoretical considerations*", VIIIth World Filtration Congress, Brighton, England, 2000, pp303-306.

Novak J.T., Agerbaek M.L., Sorensen B.L., Hansen J.Aa., 1999, "*Conditioning, filtering, and expressing waste activated sludge*", *Journal of Environmental Engineering*, vol 125, n°9, pp816-824.

Prinssen A.A.J.A., 1982, "*Horizontal vacuum beltfilters, type RT, in a totally enclosed configuration and the pannevis pressbelt device*", World Filtration Congress, September, Downingtown, pp262-269.

Rhemat T., Branion R., Duff S., Groves M., 1997, "*A laboratory sludge press for characterizing sludge dewatering*", *Water Science and Technology*, vol 35, n°2-3, pp189-196.

Sorensen B.L., Sorensen P.B., 1997, "*Structure compression in cake filtration*", *Journal of Environmental Engineering*, vol 123, n°4, pp345-353.

Tiller F.M., Kwon J.H., 1998, "*Role of porosity in filtration : XIII. Behavior of highly compactible cake*", *AICHE Journal*, vol 44, n°10, pp2159-2167.

Tokunaga K., Fujinami S., Ishimi T., Okahashi H., Nakano I., 1983, "*High pressure filtration and/or squeezing of sewage sludges*", *Filtration and Separation*, nov/dec, pp 450-456.

Wakeman R.J., Zhang G.M., Koenders M.A., 2000, "*Effects of rotational flow induced in a rotary piston press on the formation and properties of filter cakes*", VIIIth World Filtration Congress, Brighton, England, 2000, pp1121-1124.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le traitement des boues résiduaires urbaines devient un enjeu technique et économique majeur dû, en partie, à une augmentation de production prévue suite à la mise en application des nouvelles directives européennes. Afin de diminuer leur volume et de réduire les coûts de leur élimination, il est important d'en améliorer la déshydratation mécanique. Dans cette optique, l'amélioration des performances des filtres à bandes, qui passe par une meilleure conception et une meilleure mise en œuvre, est indispensable ; ceci afin de pouvoir assurer une déshydratation suffisamment poussée et réaliser l'élimination (incinération ou valorisation agricole par exemple) ultérieure des boues dans de bonnes conditions.

Ainsi l'étape préliminaire d'égouttage a, dans un premier temps, été étudiée. L'influence des principaux paramètres de fonctionnement liés à cette filtration gravitaire a été analysée sur différentes boues de STEP. Il a été montré qu'une cellule d'égouttage de laboratoire pouvait décrire de façon très correcte les performances d'égouttage sur table ou dans la première zone des filtres à bandes. La modification d'un modèle empirique initialement issu de la littérature montre que des paramètres communs peuvent être considérés pour des boues différentes. Les performances de cette étape de déshydratation peuvent alors être évaluées pour n'importe quelle boue activée

Dans un deuxième temps, un pilote a été conçu et réalisé au laboratoire pour étudier le pressage des boues dans des conditions les plus proches possibles de celles rencontrées dans les filtres à bandes industriels. L'influence des paramètres de fonctionnement des filtres à bandes a été hiérarchisée. Il a été montré, entre autres, que le paramètre le plus pertinent pour améliorer la siccité en sortie de ces appareils est la réduction de la vitesse de défilement des toiles. L'amélioration, de la siccité n'est pas seulement due à l'augmentation du temps de pressage, elle semble résulter également d'un meilleur arrangement des particules (flocs) au sein du gâteau formé. Par conséquent, ces gâteaux sont très sensibles à la manière dont est appliquée la pression au niveau des rouleaux. Forte de ces résultats, cette étude propose une nouvelle stratégie de conduite et de conception des filtres à bandes industriels. Un gain de siccité de 3 à 5 points pour des boues secondaires et de 4 à 8 points pour des boues mixtes

devrait être atteint dans le cas des petites et moyennes stations d'épuration. Ce gain pourrait permettre aux filtres à bandes de rivaliser avec les performances des centrifugeuses.

Enfin, il a été montré comment l'estimation des performances des filtres à bandes peut se baser sur des essais réalisés au laboratoire dans une cellule de filtration compression, en prenant en compte le temps de pressage dans les filtres industriels. La méthode permet d'évaluer une valeur minimum de la siccité en sortie des filtres à bandes (à 1 point près). Par ailleurs, la pression appliquée sur la boue ne semble pas avoir d'influence sur les performances de filtration et sur la siccité du gâteau en fin de compression. En revanche, la vitesse de montée en pression a un impact non négligeable. Toutefois, des différences de comportement à la compression des boues entre le filtre à bandes et la CFC subsistent. Ces différences ne semblent pas induites par le cisaillement engendré par les différences de vitesses des toiles au niveau des rouleaux, mais plutôt par le phénomène de fluage.

Les perspectives industrielles directes de ce travail sont à deux niveaux :

- la conception de nouveaux filtres à bandes fonctionnant avec les critères définis dans la thèse ;
- l'utilisation du pilote de laboratoire et de la procédure mise en place dans la CFC dédiées aux études de faisabilité (avec d'autres suspensions par exemple).

Les perspectives de recherches sont quant à elles :

- l'étude de l'impact du conditionnement des boues sur les performances du filtre à bandes. Par exemple, l'optimum de floculation est-il identique pour l'égouttage et le pressage ?
- la modification des CFC en intégrant une programmation de la vitesse de montée en pression automatique afin de se rapprocher du comportement au niveau des rouleaux de pressage ;
- le développement d'un modèle numérique de compression des boues en 2D intégrant l'évolution de la pression dans le temps afin de s'affranchir ultérieurement des essais sur le pilote.

GLOSSAIRE

Aérobic : se dit d'un milieu contenant de l'oxygène dissous.

Anaérobic : se dit d'un milieu ne contenant pas d'oxygène libre.

Anoxique : se dit d'un milieu où l'oxygène utilisé par les micro-organismes ne se trouve pas sous forme d'oxygène dissous mais sous d'autres formes telles que NO_3^- (ion nitrate) ou NO_2^- (ion nitrite).

CFC : Cellule de Filtration Compression.

DBO : Demande Biologique en Oxygène. C'est la quantité d'oxygène qu'il faut fournir à un échantillon d'eau pour minéraliser les Matières Organiques (MO) biodégradables contenues dans l'eau par oxydation par des bactéries aérobies (voie biochimique). La minéralisation étant lente, c'est la quantité d'oxygène disparue au bout de 5 jours qui est mesurée (**DBO₅**).

DCO : Demande Chimique en Oxygène. Elle correspond à l'oxygène consommé par voie chimique pour oxyder l'ensemble des matières oxydables présentes dans un échantillon d'eau. Cette mesure représente la matière biodégradable et la matière minérale oxydable.

ECP : Polymères Exocellulaires.

EH : Equivalent Habitant. C'est une unité de référence de la quantité de pollution émise en un jour par une personne. La directive européenne sur l'assainissement des agglomérations donne comme définition :

$$1 \text{ EH} = 60 \text{ g de DBO}_5/\text{jour soit } 21,6 \text{ kg de DBO}_5/\text{an}$$

Eutrophisation : enrichissement excessif d'un milieu aquatique (notamment si les eaux sont stagnantes ou à circulation réduite) en éléments nutritifs ou en matières organiques provoquant un développement surabondant de biomasse végétale dont la décomposition

ultérieure consommation, en partie (ou en totalité) l'oxygène dissous dans l'eau et réduit la biodiversité du milieu aquatique.

FV : Fraction Volatile. C'est la proportion (massique) de Matières Organiques (MO) contenue dans la totalité des Matières Sèches (MS).

HPA : Hydrocarbures Polycycliques Aromatiques. Formés lors de la pyrolyse des matières organiques, ils se retrouvent potentiellement dans les boues par l'intermédiaire des eaux de ruissellement (via les gaz d'échappement automobiles, l'usure des pneumatiques, les dérivés de l'asphalte et les fumées des unités thermiques industrielles) et des eaux usées (rejets aqueux de l'industrie).

I_{mohman} : Indice de Molhman. Il permet de caractériser la "décantabilité" des boues. Une boue qui décante facilement a un indice de 100 ml.g⁻¹. Il est estimé en laissant décanter, dans une éprouvette, 1000 ml de suspension de boues. Le volume occupé par les boues après 30 minutes de décantation est alors mesuré. L'indice de Molhman est calculé par :

$$I_{molhman} = \frac{V_{30}}{MS \times f}$$

Avec f le facteur de dilution de l'échantillon de boue mis à décanter.

MO : Matières Organiques. Elles sont déterminées par la calcination d'un échantillon de Matières Sèches (MS) à 550°C pendant 2h. Le résidu est constitué des matières minérales (cendres). Par conséquent, les MO sont calculées par la différence entre la masse de l'échantillon de matières sèches et la masse de matières minérales restantes après la calcination à 550°C.

MS : Matières Sèches. C'est la quantité de boue restante après le séchage d'un échantillon à 105°C pendant 24h (jusqu'à ce que la masse de l'échantillon de boue n'évolue plus).

PCB : PolyChloroBiphényles. Ils se retrouvent anormalement dans les boues résiduelles urbaines via les eaux usées (rejets des installations électriques) et en étant présents dans les produits manufacturés (comme les photocopies sur papier) systématiquement retrouvés dans les effluents.

RSF : Résistance Spécifique à la Filtration (α).

Siccité : c'est le rapport de la masse des Matières Sèches (MS) contenues dans un échantillon de boue sur la masse totale de cet échantillon.

STEP : Station d'Épuration des eaux usées

TSC : Temps de Succion Capillaire. Il est déterminé en mesurant la vitesse de propagation de la phase liquide d'un échantillon de boue dans un papier filtre sous l'action des forces capillaires. Plus il est petit, meilleure est la filtrabilité de la boue.

Résumé

L'application des directives européennes sur l'assainissement des eaux usées engendre un accroissement considérable de la production de boues résiduares urbaines. Le traitement de ces boues devient donc un enjeu majeur. La réduction de leur volume par une amélioration de leur déshydratation mécanique est un moyen intéressant de réduire leur coût d'élimination. Le but de ce travail est d'augmenter les performances de déshydratation des filtres à bandes sur les boues urbaines. Après une étude bibliographique, un modèle empirique, permettant de dimensionner la zone d'égouttage (première étape d'épaississement lors de l'utilisation du filtre à bandes) est présenté. Puis, un pilote instrumenté, permettant de caractériser au laboratoire le fonctionnement des filtres à bandes industriels, est décrit. Les essais menés sur cet appareil de laboratoire permettent de hiérarchiser l'influence de chaque paramètre opératoire sur la siccité du gâteau. Une nouvelle stratégie de pilotage des filtres à bandes est alors proposée. Un nouveau protocole d'essais est également proposé pour estimer, à partir de mesures réalisées en cellule de filtration-compression (CFC), la siccité en sortie de filtres à bandes. Enfin, dans le but de quantifier l'effet du cisaillement engendré au niveau des rouleaux de pressage, des essais sont menés dans une CFC modifiée avec un piston rotatif.

Mots clés : filtre à bandes, égouttage, déshydratation mécanique, pressage, boues urbaines, cellule de filtration-compression, approche expérimentale

Abstract

The implementation of European regulations about wastewater treatments leads to a significant increase of the municipal sludge production. So, the treatment of this sludge becomes more and more necessary. The improvement of the mechanical devices used to achieve the volume reduction of this waste is an important step to reduce the cost of the treatment. Our study focuses on the case of the filter belt presses in order to improve their performances in terms of activated sludge dewatering. After a bibliographic overview, an empirical model is proposed to design belt gravity thickeners (which are usually the first step dehydration when belt presses are used). Then, an experimental set up, allowing the characterisation of industrial filter belt presses at the laboratory scale, is described. The experimental investigations carried out on this laboratory device enable to study the influence of every functioning parameters on the cake moisture. From these results a new operating strategy of filter belt presses is proposed. A new procedure is also presented to evaluate, from measurement carried out in a filtration compression cell (FCC), the moisture of the sludge after a dewatering in a belt filter press. Finally, to investigate the impact of the shear stress which appears around the rollers, some experiments are realised in a FCC modified with a rotary piston.

Key words : filter belt press gravity drainage, mechanical dewatering, expression, municipal sludge, filtration-compression cells, experimental tests

Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (LaTEP)

ENSGTI rue Jules Ferry

64000 Pau