

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

**Département de Génie de l'Environnement**

**Laboratoire de Biotechnologies Environnementales et Génie des Procédés**

**Ecole Doctorale « Ingénierie & Environnement »**

**Option : Biotechnologies et Environnement**

**Mémoire de magister**

**Présenté par**

**M<sup>lle</sup> Benabderrahmane Ahlem**

**Ingénieur d'Etat en Génie Biologique**

**à l'université Amar Thlédji de Laghouat**

**Thème**

**UTILISATION DU BIOFLOCCULANT DANS LE  
CONDITIONNEMENT DES BOUES URBAINES**

**Soutenu le Jeudi 03 Novembre 2011 devant le Jury composé de :**

<b>Président</b>	<b>: Mr. E.H. BENYOUSSEF</b>	<b>Professeur</b>	<b>ENP</b>
<b>Rapporteur</b>	<b>: Mr. H. LOUNICI</b>	<b>Professeur</b>	<b>UMMTO</b>
<b>Examineurs</b>	<b>: Mme. L. ADOUR</b>	<b>Professeur</b>	<b>UMMTO</b>
	<b>Mme. N. ABDI</b>	<b>Professeur</b>	<b>ENP</b>
	<b>Mr. M. DROUCHE</b>	<b>Maitre de conférences</b>	<b>ENP</b>
<b>Invitée</b>	<b>: Mme. H. ZEMMOURI</b>	<b>Attachée de recherche</b>	<b>CDER</b>

**2010/2011**

**ENP-10 avenue Hacén Badi – El Harrach - ALGER**

## Remerciements

Ce mémoire a été effectuée au sein du Laboratoire de Biotechnologies Environnementales et Génie des procédés de l'Ecole Nationale Polytechnique (BIOGEP/ENP), sous la Direction Scientifique de Monsieur LOUNICI Hakim, professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou et Directeur du Laboratoire BIOGEP/ENP, et Madame TEGUAR Hassiba, Attachée de recherche au Centre de Recherche des Energies Renouvelables et Doctorante à L'école National Polytechnique au laboratoire de Biotechnologies Environnementales et Génie des procédés.

Je tiens à remercier mon promoteur Pr LOUNICI Hakim, pour le soutien qu'il m'a apporté pour la réalisation de ce modeste travail ainsi que pour ses conseils précieux.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au madame TEGUAR Hassiba pour l'intérêt marqué qu'elle a porté à ce travail. Je la remercie particulièrement pour le temps qu'elle a consacré à la relecture attentive et critique du manuscrit.

J'adresse mes remerciements à Monsieur le professeur BENYOUSSEF EL hadi pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de ma soutenance.

Je suis très honorée de compter parmi les membres du jury Madame le professeur ABDI de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Monsieur DROUCHE Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et madame DJABRI- ADOUR L, professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Mes remerciements s'adressent également au Directeur Général de la Division Hydraulique d'Alger. Je lui suis gré de m'avoir autorisée à prélever des boues dans la station d'épuration de Baraki.

## Dédicace

A ma chère grande mère

A mes très chers parents

A mon oncle ALI

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	1
<b>CHAPITRE I: LES BOUES ET ASPECTS DE TRAITEMENT DES EAUX USEES EN ALGERIE</b>	4
I.1 Origine des boues	4
I.2 L'EPURATION DES EAUX USEES	4
I.2.1 Définition d'une eau usée	4
I.2.2 Description d'une station d'épuration classique	5
I.2.2.1 les prétraitements physiques	5
I.2.2.2 le traitement primaire	5
I.2.2.3 Le traitement secondaire	5
I.2.2.4 Le traitement tertiaire	6
I.2.2.5 les boues physico-chimiques	7
I.3 LA FILIERE BOUE	7
I.3.1 La stabilisation	7
I.3.1.1 La stabilisation par digestion anaérobie	7
I.3.1.2 La stabilisation aérobie thermophile	8
I.3.1.3 La stabilisation chimique	8
I.3.2 Conditionnement et déshydratation des boues	8
I.3.2.1 Conditionnement thermique	9
I.3.2.2 Conditionnement chimique	9
I.3.3 Techniques de déshydratation : centrifugation et filtration	9
I.3.3.1 La centrifugation	9
I.3.3.2 La filtration	10
I.3.3.2.1 La filtration sous vide	10
I.3.3.2.2 La filtration sous pression	11
I.4 ELIMINATION FINALE DES BOUES	13
I.4.1. Valorisation agricole	14
I.4.2. Incinération	14
I.4.3 Mise en décharge	14
<b>CHAPITRE II: CHITINE ET CHITOSANE</b>	15
II.1 Chitosane. Préparation, propriétés et principales applications	17
I.1.1 Origine du chitosane	19
I.1.2 Structure chimique	19
I.1.3 Préparation-Production du chitosane	19
I.1.4 Propriétés du chitosane	20
I.1.5 Champs d'applications du chitosane	21
II.2 Interactions chitosane –particules colloïdales	23
II.2.1 Caractéristiques des particules à enlever	24
II.2.1.1 Les particules hydrophobes	26
II.2.1.2 Les particules hydrophiles	26
II.2.1.3 Potentiel Zêta	26

II.2.2 Principe de la coagulation-floculation-décantation	26
II.2.3 Floculation du chitosane	27
II.3 Avantages de l'utilisation du chitosane comme coagulant-floculant	28
<b>CHAPITRE III: MATERIEL ET METHODES</b>	<b>28</b>
III.1 ORIGINES ET CARACTERISATION DES BOUES	30
III.2 MATERIEL	32
III. 2.1 Appareils	32
III.2.2 Verrerie	34
III.3 METHODES DE CARACTERISATION DE LA BOUE	34
III.3.1 Détermination des paramètres organiques	35
III.3.1.1 Détermination de la quantité de matière et de sa répartition	35
III.3.1.1.1 Matières sèches (MS)	35
III.3.1.1.2 Calcul de la siccité (Sc)	35
III.3.1.1.3 Teneur en matières volatiles (MSV)	35
III.3.1.2 Dosage de la Demande Chimique en Oxygène (DCO)	35
III.3.1.3 Carbone organique	35
III.3.2 Détermination des paramètres minéraux	35
III.3.2.1 La conductivité	36
III.3.2.2 Azote total	36
III.3.2.3 Ions ammoniums	36
III.3.2.4 Nitrites	36
III.3.2.5 Nitrates	36
III.3.2.6 Phosphate total	36
III.3.3 Détermination des paramètres organoleptiques	37
III.3.3.1 Mesure de la turbidité	37
III.3.3.2 Le pH	37
III.4 CONDITIONNEMENT ET DESHYDRATATION DES BOUES	37
III.4.1 Préparation des floculants	37
III.4.2 Floculation	37
III.4.3 Filtration	38
III.4.3.1 Description de la cellule de filtration	38
III.4.3.2 Méthode	39
III.4.3.3 Stratégie de conditionnement	39
III.4.3.4 Traitement des résultats	40
III.4.3.4.1 Détermination de la résistance spécifique à la filtration	40
III.4.3.4.2 Détermination du coefficient de compressibilité (s)	40
III.4.3.4.3 Calcule de la siccité limite (S <sub>IL</sub> )	40
III.4.4 Centrifugation	42
<b>CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>43</b>
INTRODUCTION	44
IV.1 CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES BOUES	44
IV. 2 ETUDE DU CONDITIONNEMENT ET DE LA DESHYDRATATION	44

IV. 2.1 Décanteuse centrifuge	45
IV. 2.1.1 Influence de la dose de flocculant sur la siccité du culot	45
IV. 2.1.2 Influence de la dose de flocculant sur la turbidité du surnageant	45
IV. 2.1.3 Influence de la dose de flocculant sur le pH du surnageant	47
IV. 2.2 Cellule de filtration sous pression	50
IV. 2.2.1 Influence de la dose de flocculant sur la RSF du gâteau	52
IV. 2.2.2 Influence de la dose de flocculant sur la siccité du gâteau	54
IV. 2.2.3 Efficacités du flocculant dans l'enlèvement de la turbidité	56
IV. 2.2.4 Influence du dosage de flocculant sur le volume d'égouttage du filtrat	60
IV. 2.2.5 Influence du $\Delta P$ de filtration sur la résistance spécifique à la filtration	60
IV. 2.2.6 Influence du $\Delta P$ de filtration sur la siccité du gâteau	61
IV. 2.2.7 Influence du $\Delta P$ de filtration sur la turbidité du filtrat	62
IV. 2.2.8 Efficacités du chitosane pour l'enlèvement de la DCO	64
IV.3 DISCUSSION DES RESULTATS	64
IV.4 CONCLUSION	66
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	68
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	70

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b>	: Schéma d'une station d'épuration	6
<b>Figure I.2</b>	: Schéma d'un filtre bande	12
<b>Figure I.3</b>	: Schéma d'une filière de traitement par filtre presse	13
<b>Figure II.1</b>	: Production de la chitine et du chitosane	22
<b>Figure II.2</b>	: Distribution ionique autour d'un colloïde	29
<b>Figure III.1</b>	: Plans de situation de la STEP de Baraki	34
<b>Figure III. 2</b>	: Cellule de filtration sous pression.	39
<b>Figure III. 3</b>	: Graphe expérimental $t/V$ en fonction $V$ montrant l'existence d'une zone linéaire, suivie par une zone de pente croissante	41
<b>Figure III.4</b>	: Variation de la RSF en fonction de la pression appliquée	42
<b>Figure III.4</b>	: Variation de la siccité limite en fonction de la pression appliquée	43
<b>Figure IV.1</b>	: Influence de la dose de floculant sur la siccité du culot	46
<b>Figure IV.2</b>	: Influence de la dose de floculant sur la turbidité du surnageant	48
<b>Figure IV.3</b>	: Evolution du volume de filtrat en fonction du temps	53
<b>Figure IV.4</b>	: Influence de la dose de floculant sur la RSF du gâteau	55
<b>Figure IV.5</b>	: Photos des gâteaux récupérés	57
<b>Figure IV.6</b>	: Influence de la dose de floculant sur la siccité du gâteau	59
<b>Figure IV.8</b>	: Evolution des volumes d'égouttages récoltés au cours de la filtration	60
<b>Figure IV.9</b>	: Influence de $\Delta P$ de filtration sur la résistance spécifique à la filtration sous pression	61
<b>Figure IV.10</b>	: Influence du $\Delta P$ de filtration sur la siccité du gâteau.	62
<b>Figure IV.11</b>	: Influence du $\Delta P$ de filtration sur la turbidité du filtrat.	63
		63

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1</b>	: Teneur en DBO <sub>5</sub> , DCO et MES par litre d'équivalent habitant	5
<b>Tableau I-2</b>	: Avantages et inconvénients de la centrifugation	10
<b>Tableau I.3</b>	: Avantages et inconvénients de la filtration sous vide	11
<b>Tableau I.4</b>	: Avantages et inconvénients des filtres à bandes presseuses	11
<b>Tableau I.5</b>	: Avantages et inconvénients des filtres-presses	12
<b>Tableau I.6</b>	: Teneur moyennes en ETM des boues d'épuration comparées à celle d'engrais minéraux, de fumiers de bivins et de lisiers de porcs en g/t de MS	16
<b>Tableau II.1</b>	: Applications du chitosane	25
<b>Tableau VI.1</b>	: Caractéristiques des flocculants utilisés	38
<b>Tableau V.1</b>	: caractéristiques physico-chimiques de la boue	45
<b>Tableau V.2</b>	: Intervalles des doses optimales	50
<b>Tableau V.3</b>	: Augmentation du pH final	51
<b>Tableau V.4</b>	: Coefficient de compressibilité pour les deux polymères	62
<b>Tableau V.5</b>	: Les abattements en DCO obtenus en absence et en présence du polymère	64

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

<b>CEN</b>	: Comité Européen de Normalisation
<b>CET</b>	: Centre d'Enfouissement Technique
<b>CNES</b>	: Conseil National Economique et Social
<b>DA</b>	: Degré d'Acétylation
<b>DBO<sub>5</sub></b>	: Demande biologique en oxygène pendant cinq jours
<b>DCO</b>	: Demande Chimique en Oxygène
<b>DDA</b>	: Degré de désacétylation
<b>EH</b>	: Equivalent Habitant
<b>HAP</b>	: Hydrocarbures Aromatiques Polycyclique
<b>MS</b>	: Matière Sèche
<b>MVS</b>	: Matière Volatile Soluble
<b>NTU</b>	: Néphéломétrie Turbidité Unit
<b>ONS</b>	: Office National de Statistique
<b>PCB</b>	: Polychlorobiphényles
<b>pH</b>	: potentiel d'Hydrogène
<b>RSF</b>	: Résistance Spécifique à la Filtration
<b>Sc</b>	: Siccité
<b>S<sub>iL</sub></b>	: Siccité limite
<b>STEP</b>	: Station d'épuration des Eaux Usées
<b>UV</b>	: Ultraviolet

## ملخص

هذا العمل يدخل في إطار دراسة فعالية المواد الطبيعية في التهيئة الكيميائية للحماة و مقارنة هذه الأخيرة مع مواد عضوية مصنعة تختلف عن بعضها بطبيعة الشحنة التي تحملها. الحماة المستعملة في هذا العمل تابعة لمحطة معالجة مياه مجاري الصرف الصحي لمنطقة براقى، هذه المنطقة التي تتميز بكونها منطقة سكنية بحتة. عملية التهيئة وصلاحياتها يكون باستعمال طريقة التخثر وذلك بإضافة الكيتوزان بكونه مادة طبيعية للحماة. ومجموعة Sedipur كونها مواد عضوية مصنعة حيث يتم فحص وتقييم فعالية كل مادة بحساب كل من: المقاومة المحددة للترشيح، معامل الضغط ونسبة جفاف المادة القسوى. من أجل ذلك قمنا بتصميم تجريبي للمرشح الضاغط بالإضافة إلى ذلك أجرينا تجارب أولية من أجل تحديد مجال فعالية كل مادة وقمنا بتصنيف الخصائص الكيميائية والفيزيائية للحماة. الكيتوزان أثبت فعالية مكافئة للمركب Sed CF802 من جانب جفاف المادة ودرجة نزع التعكر والتقليل من المقاومة المحددة للترشيح ومثالية من حيث معامل الضغط.

**الكلمات المفتاحية:** الحمى، الكيتوزان، مواد عضوية مصنعة، RSF، معامل الضغط، الترشيح بقوة الضغط.

## Résumé

Ce travail, concerne l'étude du conditionnement chimique de la boue provenant de la station d'épuration d'eaux usées de Baraki. Le mécanisme et la performance de déshydratation ont été examinés, en appliquant des coagulants de différentes natures, à savoir le chitosane, et les polymères synthétiques de charge variable : cationique, anionique et non-ionique (Sedipur CF 802, EMO, Sedipur AF 400 et Sedipur NF 102). Trois mesures ont été utilisées dans ce travail ; la résistance spécifique à la filtration (RSF), le coefficient de compressibilité (s) et la siccité limite ( $S_{IL}$ ). Pour la mesure de la RSF, une conception expérimentale d'un filtre presse, a été réalisée. En outre, nous avons effectué une caractérisation physico-chimique des boues étudiées et des essais préliminaires qui nous permettent d'optimiser les doses optimales pour chaque polymère. Les résultats obtenus mettent en évidence une efficacité du biopolymère qui est le chitosane dans le traitement des boues. Le chitosane diminue la turbidité pour une eau filtrée de la boue de Baraki et augmente sa siccité.

**Mots clés :** Boues, Baraki, chitosane, polymères synthétiques, RSF, coefficient de compressibilité, siccité limite, filtration, centrifugation.

## Abstract

This work, relates to the study of the chemical conditioning of sludge coming from the waste water purification plant of Baraki. The mechanism and the performance of deshydration were examine, by implementing coagulants of various natures, has to know the chitosan, and the synthetic polymers with a variable charge: cationic, anionic and non-ionic charge (Sedipur CF 802, EMO, Sedipur AF 400 and Sedipur NF 102). Three measures were used in this work; resistance specific to filtration (RSF), the coefficient of compressibility and limiting dryness. For the measure of the RSF, an experimental design of a filter presses, was carried out. In addition, we have carries out a physicochemical characterization of studied sludge and preliminary tests which enable us to optimize the optimal amounts for each polymer. The results obtained highlight an effectiveness of the biopolymer which is the chitosan in the processing of sludge. The chitosan decreases turbidity for a filtered water of the sludge of Baraki.

**Key words:** Sludges, Baraki, chitosan, polymers, RSF, coefficient of compressibility, limiting dryness, filtration, and centrifugation.

## **INTRODUCTION GENERALES**

L'évolution spectaculaire que connaît l'environnement urbain, et le développement en flèche de l'industrie depuis la fin de la dernière guerre mondiale, posent le problème de l'eau dans le monde.

En effet, ces conditions nouvelles ont créé non seulement des besoins accrus en eau d'alimentation et en eau industrielle, mais ont également engendrés des sources de pollution plus grandes, à l'origine des problèmes d'équilibre entre les ressources et les besoins en quantité et en qualité. Ces dernières réduisent les ressources et les disponibilités en eau de qualité.

Pour éviter que cette situation alarmante qui s'aggrave d'année en année, les pouvoirs publics ont été contraints à prendre des mesures, afin d'assurer d'une façon rationnelle la gestion et la protection des ressources aquifères de notre pays, qui s'avèrent être de plus en plus polluées.

La lutte contre la pollution des eaux a été engagée en Algérie selon les idées de base de la loi-cadre N°83-03 du 5 février 1983 qui, en réglementation de plus en plus sévèrement la qualité des rejets.

Une condition fondamentale, commune à tous les procédés d'épuration des eaux polluées, consiste en la séparation des phases solide-liquide. Cela répond à un double objectif :

- Eliminer de l'eau résiduaire les matières solides en suspension, afin de permettre sa clarification avant le rejet, ou son réemploi ultérieur dans l'usine par recyclage ;
- Extraire des solides concentré le liquide interstitiel, par l'intermédiaire d'un système d'égouttage, de façon à rendre possibles le séchage et la déshydratation des boues, et par suite, leur récupération ou leur évacuation avec le minimum de problèmes de manutention.

Il est bien évident que ces procédés physiques et mécaniques, dont le but est de séparer de l'eau les matières polluantes qui s'y trouvent en suspension, ne peuvent résoudre tous les problèmes de nocivité et de toxicité des rejets industriels, car la pollution peut avoir un caractère organique prédominant, qui ne peut être éliminé que par voie biologique.

On est cependant obligé de convenir que même dans l'épuration biologique, la décantation représente une phase essentielle, car elle permet, en éliminant la plus grande

partie des matières en suspension, de réduire d'environ 30% la charge polluante que devra traiter par oxydation l'installation biologique proprement dite.

L'évolution récente du cadre réglementaire de la valorisation des boues de dépuraison impose à leur production d'une part d'en réduire leur volume et d'autre part de choisir la filière la plus fiable et la plus économique pour leur élimination. Quelle que soit la filière utilisée : valorisation agricole, compostage, incinération, sa mise en œuvre est d'autant plus facile que la boue est riche en solides, donc mieux déshydratée : valeur agronomique accrue, moindres nuisances et coût de transport et de stockage réduits. Il est indispensable de pousser au maximum la déshydratation, quelle que soit la technologie utilisée (décanteuse centrifuge à vis, filtre-presses, filtre à bandes...etc.).

Le conditionnement physico-chimique des boues est une étape clé de tout processus de concentration des solides. Il consiste à ajouter des réactifs chimiques dans la boue afin d'assembler les particules colloïdales dispersées en floccs plus gros ce qui facilite d'autant la séparation solide-liquide.

Ce conditionnement physico-chimique peut être réalisé avec une grande diversité de réactifs minéraux ou organiques (sels métalliques, polymères) qui neutralisent les charges de surfaces des solides et favorisent leur agglomération.

L'apparition de nouvelles technologies dites 'propres' permet de résoudre une grande partie de tous les problèmes inhérents au traitement des eaux usées. Des polymères naturels, peuvent être utilisés dans le conditionnement chimique des boues. Parmi les polymères naturels, le chitosane est un produit écologiquement intéressant qui possède également une structure chimique particulière et une polycationicité unique.

L'objectif spécifique de ce travail est de montrer les performances du chitosane en tant que flocculant dans le conditionnement chimique des boues urbaines par filtre-presses et de fournir aux détenteurs de boues les éléments de décision permettant le choix de la filière de traitement la mieux adaptée à leurs spécificités. A cet effet, une cellule de pression Pont-à-Mousson normalisée (AFNOR, 1979) a été spécialement conçue au laboratoire. L'efficacité et la fiabilité d'une filière de traitement, dépendent fortement de l'optimisation et du contrôle de l'ensemble des procédés de coagulation, floculation et filtration.

Le plan du présent travail comporte quatre chapitres distincts. Le chapitre I décrit le contexte général dans lequel se situe le travail, c'est-à-dire l'épuration des eaux usées et la production de boues qui en résulte. La place du filtre-presses dans les différentes filières de déshydratation mécanique ainsi que la situation du traitement des eaux usées en Algérie sont présentées.

Le chapitre II est consacré et présente l'état de la recherche sur le chitosane et ses applications dans le procédé de coagulation-floculation. Le dispositif expérimental et l'ensemble des méthodes utilisées tout au long de ce travail sont décrits dans le chapitre III. L'ensemble des résultats expérimentaux sont analysés, discutés et commentés dans le chapitre IV. Le travail se termine par une conclusion rassemblant l'ensemble des résultats et par l'énoncé de perspectives qui pourraient constituer une suite intéressante à cette étude.

Cette recherche permettra de répondre aux questions suivantes :

1. Le chitosane est-il mieux efficace dans la concentration de la matière sèche et l'enlèvement de turbidité des boues que les polymères cationiques synthétiques ; quelle que soit la technologie étudiée ?
2. Quels sont les caractéristiques des floes formés avec le chitosane ?
3. Quels sont les paramètres influencent sur leur efficacité dans la déshydratation mécanique par filtre-presse ?
4. Le chitosane est-il efficace en tant que coagulant pour l'enlèvement des matières dissoutes tels que la demande chimique en oxygène (DCO) ?

## **CHAPITRE I**

# **LES BOUES ET ASPECT DE TRAITEMENT DES EAUX USEES EN ALGERIE**

## **I.1 ORIGINE DES BOUES**

Les boues sont composées d'éléments recueillis à différents stades de l'épuration d'une eau usée : matières minérales inertes, d'azote, de phosphore et de matières organiques (Emilian, 2004). Elles sont définies par le Comité Européen de Normalisation (CEN) comme *«un mélange d'eau et de matières solides, séparé par des procédés naturels ou artificiels des divers types d'eau qui le contiennent»*. Parmi les boues, on distingue les boues urbaines et les boues industrielles. Les premières sont produites dans les stations d'épuration traitant des effluents dits 'urbains', c'est-à-dire majoritairement des eaux usées d'origine domestique. Les secondes sont issues du traitement d'eaux usées industrielles. Ces eaux sont le plus souvent traitées directement en aval de leur production (Crini et Badot, 2007).

Dans ce travail, nous nous sommes préoccupés uniquement de boues urbaines. Le paragraphe suivant explique à quel moment et de quelle manière ces boues sont produites au cours de l'opération d'épuration.

## **I.2. L'EPURATION DES EAUX USEES**

### **I.2.1 Définition d'une eau usée**

La pollution d'une eau dite usée peut résulter de nombreux facteurs : rejets domestiques divers, ruissellement, infiltration,... Cette pollution peut être quantifiée par des caractéristiques physiques (MES, odeur,...), chimiques (DCO, DBO<sub>5</sub>, azote Kjeldahl, azote minéral, teneur en phosphate, teneur en matières toxiques,...) et biologiques (bactéries, virus,...) (Dégremont, 2007).

La notion d'équivalent habitant EH, qui représente la charge moyenne rejetée par habitant et par jour, a été introduite de manière à caractériser globalement les rejets d'eaux usées. En Algérie, un équivalent habitant correspond à un rejet de 167 litres d'eaux usées par jour et par habitant, présentant les caractéristiques suivantes :

**Tableau I.1 : Teneur en DBO<sub>5</sub>, DCO et MES par litre d'équivalent habitant (Projet CD4CDM ALGERIE, 2010)**

Paramètre	DBO <sub>5</sub>	DCO	MES
Valeur (mg/l)	350	500	450

On admet que l'épuration de l'équivalent habitant produit 15 à 20 kg de boues, en matières sèches (Perron. et Hébert, 2007), ce qui correspond généralement à une quantité de matières fraîches quatre fois plus grande compte tenu de la teneur en humidité des boues après déshydratation en sortie de station d'épuration.

### I.2.2 Description d'une station d'épuration classique

La Figure I.1 représente schématiquement les opérations rencontrées dans une station d'épuration.

#### I.2.2.1 les prétraitements physiques

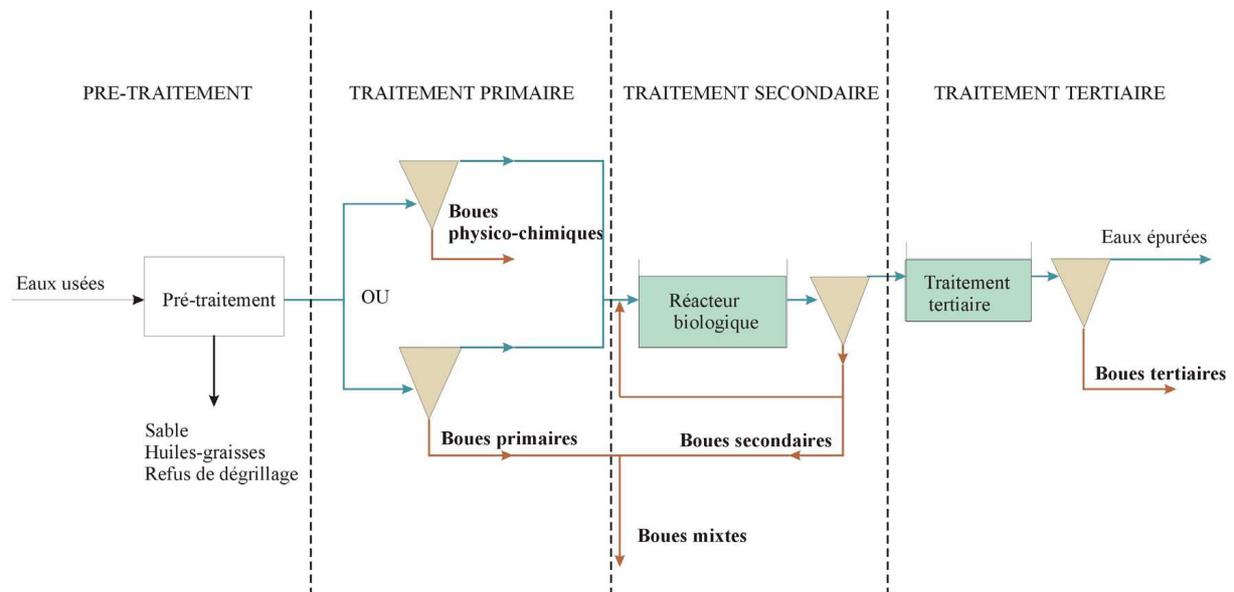
Cette étape vise à enlever les grosses particules de l'eau (débris, huiles, graisses, sables). Ces déchets sont récupérés et traités séparément (Valo *et al*, 2004).

#### I.2.2.2 le traitement primaire

Cette étape vise à parfaire les prétraitements. Elle permet surtout de récupérer les matières en suspension (MES) naturellement décantables. Cette décantation s'effectue dans un décanteur canal ou lamellaire et permet de retenir environ 50 à 70 % des MES contenues dans les eaux usées. Le fond de ce décanteur est régulièrement raclé: ceci permet de récupérer les **boues primaires**. Ces boues sont fraîches, c'est à dire non stabilisées (forte teneur en matière organique) et fortement fermentescibles. Cette étape est facultative et n'est pas présente sur les stations récentes, ni sur les plus petites installations (Degremont, 2007).

#### I.2.2.3 Le traitement secondaire

Cette étape est essentiellement biologique et a pour but la dégradation des matières organiques biodégradables. L'assimilation de ces matières organiques par une flore de microorganismes produit des composés gazeux d'une part et de la biomasse d'autre part (croissance cellulaire) (Wang *et al*, 2005). La biomasse produite en excès, la **boue secondaire**, doit être retirée du système afin d'assurer la continuité de l'épuration. Ce sont des boues fraîches biologiques, très organiques (plus de 50% sur base sèche), essentiellement sous forme de floccs de bactéries. Leur pouvoir fermentescible dépend du temps de séjour dans le bassin d'aération (aussi appelé âge de boues) (Perron et Hébert, 2007).



**Figure I.1** : Schéma d'une station d'épuration (Emilian. K, 2004).

On distingue essentiellement trois types de procédés : les procédés à décantation interne (lagunage), les procédés à biomasse fixée (lits bactériens, biodisques), et les procédés à recyclage de biomasse. Ces derniers, mieux connus sous le nom de procédés à boues activées sont les plus répandus (Nguyen *et al*, 2008). C'est de ce type de procédé dont sont issues les boues étudiées dans le présent travail. Un procédé à boues activées classique comprend :

- un bassin d'aération dans lequel l'eau à épurer est mise en contact avec la biomasse ;
- un dispositif de brassage et d'aération ;
- un décanteur (secondaire) dans lequel s'effectuent la clarification des eaux et l'épaississement de la biomasse ;
- un dispositif de recyclage qui permet de soutirer les boues en excès au bas du décanteur et d'en renvoyer une partie vers le bassin d'aération. Les boues en excès sont envoyées vers un épaisseur (Degrémont, 2007).

#### I.2.2.4 Le traitement tertiaire

Le traitement tertiaire a pour but d'affiner l'épuration selon les qualités exigées pour l'eau rejetée. Les traitements tertiaires les plus courants sont la nitrification, dénitrification et la déphosphatation. Dans ces deux cas, il s'agit également de procédés biologiques qui produisent des **boues** dites **tertiaires** (Bratby, 2007). Dans certains cas, le traitement tertiaire a lieu au sein du réacteur biologique secondaire (par un séquençage dans le temps) et les boues secondaires et tertiaires en sont confondues. Jusqu'à ces dernières années, la majorité des stations ne comportaient pas de traitement tertiaire.

Il est devenu habituel de parler de **boues mixtes** en référence au mélange des boues primaires et secondaires qui est effectué avant le traitement des boues proprement dit. Les boues mixtes sont des boues très fermentescibles, leur composition est dépendante de la quantité de boues primaires et secondaires produites. Ces boues subissent, ensuite le traitement de stabilisation (Scales *et al*, 2004).

Le prétraitement et les traitements primaire, secondaire et tertiaire correspondent à des coûts et des taux d'épuration croissants.

### **I.2.2.5 Le traitement physico-chimique**

Ce type de traitement utilise des flocculants minéraux (sels de fer ou d'aluminium) (Bratby, 2007). Le traitement physico-chimique est principalement utilisé sur les boues industrielles ou pour palier au sous-dimensionnement de certaines stations d'épuration (stations situées en zones touristiques, par exemple).

## **I.3 LA FILIERE BOUE**

À côté des traitements ciblés sur l'épuration de l'eau, la **filère boue** reprend les opérations concernant spécifiquement les boues. En pied de décanteur, les boues contiennent encore une forte proportion d'eau, plus de 95% pour les boues primaires et plus de 99% pour les boues secondaires (Penaud *et al*, 2000). Les différentes étapes du traitement des boues ont pour but leur stabilisation et leur concentration par déshydratation.

### **I.3.1 La stabilisation**

La stabilisation, qui n'est pas effectuée de manière systématique, a pour but d'éviter une reprise de la fermentation des boues qui entraînerait des nuisances olfactives. Dans le même temps, le taux d'agents pathogènes est réduit dans des proportions qui varient selon le type de traitement (Perron et Hébert, 2007). On distingue les stabilisations biologique, chimique et thermique. La stabilisation biologique peut être atteinte par méthanisation (digestion anaérobie mésophile), stabilisation aérobie thermophile ou compostage. Le traitement chimique peut s'effectuer par un chaulage ou une stabilisation aux nitrites. Le séchage (siccité supérieure à 90%) quant à lui constitue une forme de stabilisation thermique (Penaud *et al*, 2000).

#### **I.3.1.1 La stabilisation par digestion anaérobie**

La stabilisation par voie anaérobie, appelé digestion anaérobie, est une fermentation bactérienne réalisée dans une cuve appelée digesteur. Les bactéries dégradent la matière organique en dioxyde de carbone et en méthane. Cette technique s'applique au boues

épaissies et a pour objectif la réduction de la masse de boue en dégradant une partie des MV (et donc MS). La digestion agit de la manière suivante sur les caractéristiques des boues :

- Disparition de 1/3 environ des MES boueuses (45 à 50% de matières organiques disparaissent), d'où la production d'une boue non putride et moins organique ;
- Minéralisation de l'azote organique : eau interstitielle riche en  $\text{NH}_4^+$  (1 à 2 g/l) ;
- Boue plus homogène (disparition des corps fibreux) et plus diluée (Yang Mu et Han-Qing Yu, 2006).

### **I.3.1.2 La stabilisation aérobie thermophile**

C'est une transformation de la substance organique par oxydation en milieu aérobie avec dégagement de chaleur et production de  $\text{CO}_2$ . Pour être optimal, la réaction doit se dérouler à une température comprise entre 50 et 55 °C. Les applications actuelles de ce procédé visent deux objectifs différents :

- Réaliser un prétraitement (pasteurisation et chauffage) avant une digestion anaérobie (temps de séjour de 18 à 36 heures) ;
- Opérer en 6 à 10 jours un traitement de stabilisation des boues avant leur évacuation (Bruce et al, 1983).

### **I.3.1.3 La stabilisation chimique**

Cette technique de stabilisation des boues comporte une opération consistant à ajouter des réactifs chimiques qui permettent de diminuer leur pouvoir fermentescible. Cet apport ne modifie pas la quantité de matières biodégradables mais agit essentiellement par action bactéricide. Parmi, les nombreux produits susceptibles d'inhiber le développement bactérien, la chaux est celui qui s'impose économiquement (Yang Mu et Han-Qing Yu, 2006), les boues, ayant subies une stabilisation chimique, sont assez favorables à la déshydratation, mais souvent difficiles à flocculer à cause des pH élevés (plus de 11) (Bratby, 2007).

### **I.3.2 Conditionnement et déshydratation des boues**

Les boues soutirées en pied de décanteurs subissent deux opérations successives de concentration: l'épaississement et la déshydratation (Olivier et Vaxelair, 2005). L'épaississement est une opération complémentaire optionnelle de décantation qui permet de concentrer les boues liquides de 3 à 10 fois selon le procédé et la nature de départ de la boue. L'étape de déshydratation mécanique permet de donner une consistance plus solide à la boue en atteignant des siccités variant de 15 à 40%. Telle quelle (la boue peut être difficilement déshydratée (et parfois épaissie) et doit être conditionnée pour améliorer sa traitabilité (Bruce et al, 1983).

En effet, les matières organiques qui constituent la boue ont un caractère hydrophile marqué et font de la boue un système colloïdal stable dont l'eau interstitielle est fortement liée. Il est nécessaire de rompre cette stabilité colloïdale afin de libérer l'eau et permettre la déshydratation mécanique. On regroupe sous le terme **conditionnement**, les différentes opérations permettant la rupture de la structure colloïdale (Sandrine, 2009). Les techniques les plus utilisées sont le conditionnement thermique et le conditionnement chimique. Le conditionnement chimique a permis de réduire l'humidité de la boue de 90-99 à 65-85% (Kebreab *et al*, 2004).

### **I.3.2.1 Le conditionnement thermique**

Il consiste à chauffer les boues entre 160 à 210°C pendant 30 à 90 minutes selon le type de boue et la filtrabilité désirée. Au cours de cette cuisson, les gels colloïdaux sont détruits et l'hydrophilie particulière diminue. On assiste également à deux phénomènes simultanés:

- **Solubilisation de certaines MES** (hydrolyse de l'amidon avec formation de sucre) et ammonisation de l'azote organique ;
- **Précipitation de certaines matières dissoutes**, selon le type de boues, la cuisson solubilise 20 à 40 % des MO, et conduit à des jus présentant des DBO<sub>5</sub> de 2 à 5g/l. L'azote est présent dans la phase liquide à des taux relativement élevés (0,5 à 1,5 g/l en NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). mais le phosphore ainsi que les métaux restent précipités dans les boues (Judith *et al*, 1983).

### **I.3.2.2 Conditionnement chimique**

Le conditionnement chimique utilise des réactifs minéraux (électrolytes minéraux à polycation) ou organiques (polymères) dont l'ajout de manière contrôlée (dosage et mélange) provoque la coagulation et/ou la floculation de la suspension (Chih Chao *et al*, 2003). Il en résulte une agglomération des particules sous la forme d'un réseau tridimensionnel : les floccs (Emilian. K, 2004). Les polymères utilisés en pratique sont généralement de type cationique car les particules constitutives de la boue sont majoritairement chargées négativement en surface. Les produits commercialisés se présentent sous forme liquide, solide, émulsions ou sous forme des microbilles. Leur utilisation nécessite une étape de dilution très importante afin de favoriser le mélange au moment de l'injection dans la boue (Sandrine, 2009).

## **I.3.3 Techniques de déshydratation : centrifugation et filtration**

### **I.3.3.1 La centrifugation**

La centrifugation consiste en une décantation accélérée par une force centrifuge (plusieurs milliers de g). Les centrifugeuses sont constituées d'un bol tournant à grande

## **Chapitre I Les boues, aspect de traitement des eaux usées en Algérie**

vitesse et d'une vis racleuse hélicoïdale coaxiale au bol qui permet l'extraction des boues déshydratées en continu. L'alimentation peut être centrale ou tangentielle. La circulation de la suspension et de la boue déshydratée peut s'effectuer à co- ou contrecourant. D'autres variables de type constructif (géométrie du bol, rapport longueur/diamètre, angle de conicité,...) peuvent également distinguer les différentes machines commercialisées. Le diamètre du bol se situe généralement entre 0.3 et 1 m. On obtient ainsi une siccité de l'ordre de 19-23 % (boues biologiques) (Degrémont, 2007). Les avantages et inconvénients de la technique sont repris dans le Tableau I.2.

**Tableau I.2 : Avantages et inconvénients de la centrifugation (Leonard. A, 2002).**

AVANTAGES	INCONVINIENTS
- Technique bien adaptée aux boues difficiles à traiter (boues huileuses)	-Faible consistance de la boue déshydratée
- Compacité de l'équipement	-Nécessité de dessabler pour éviter l'usure de la vis d'extraction
- Coût d'investissement compétitif par rapport à la filtration	- Frais d'exploitation supérieurs à ceux d'un filtre à bandes ou filtre-presse.
- Permet de travailler en milieu confiné, sans odeur	

### **I.3.3.2 La filtration**

La filtration peut être menée sous vide ou sous pression. Dans le premier cas, les filtres sont des tambours rotatifs ouverts. Dans le second cas, la filtration peut être menée dans un filtre à bandes ou un filtre à plateaux.

#### **I.3.3.2.1 La filtration sous vide**

Le système de filtration est constitué de cylindres rotatifs dont la partie inférieure est immergée dans la suspension de boue. Le filtrat traverse les toiles qui recouvrent le cylindre et un gâteau se forme à la surface de la toile. Ce gâteau est égoutté au cours de la rotation puis décollé de la toile qui doit être régulièrement nettoyée, nécessitant l'arrêt de la filtration. Parmi les différentes déclinaisons du procédé, le filtre à sortie de toile est celui qui permet d'atteindre les meilleures performances grâce à un lavage en continu des toiles filtrantes.

Les tambours des filtres industriels développent une surface se situant entre 10 et 60 m<sup>2</sup>, pour un diamètre et une longueur allant respectivement jusqu'à 3.5 et 6 m. La filtration sous vide constituait le procédé traditionnel de déshydratation mais est en recul actuellement au profit de la filtration sous pression ou de la centrifugation. Diverses raisons expliquent

## **Chapitre I Les boues, aspect de traitement des eaux usées en Algérie**

l'abandon progressif de la technique : encombrement important, frais d'exploitation élevés, productivité moyenne comme mentionné dans le Tableau I.3 (Emilian. K, 2004).

**Tableau I.3 : Avantages et inconvénients de la filtration sous vide (Leonard. A, 2002).**

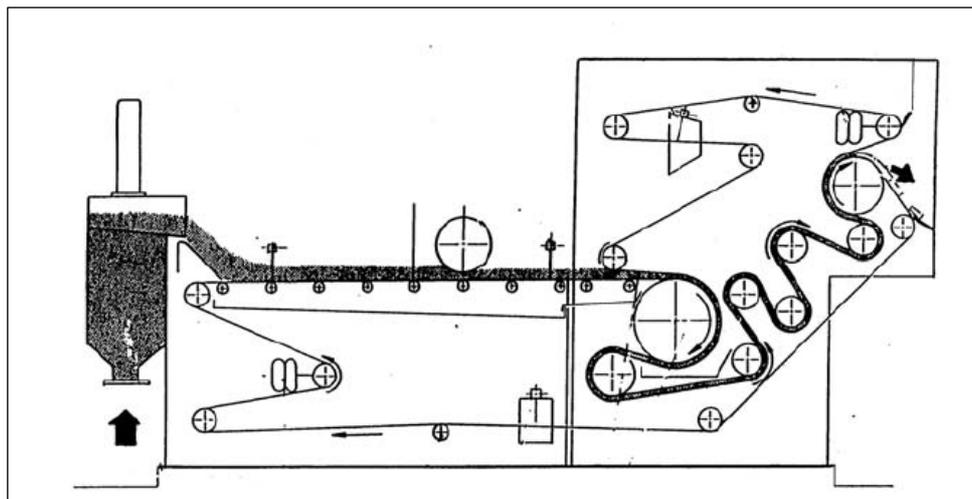
AVANTAGES	INCONVENIENTS
- Fonctionnement parfaitement maîtrisé	- Encombrement important
- Souplesse de fonctionnement	- Frais d'exploitation élevée
	- Productivité moyenne

### **I.3.3.2.2 La filtration sous pression**

Dans les filtres 'à bandes', la suspension floculée est injectée directement sur la toile filtrante. Une période d'égouttage gravitaire précède généralement l'étape de compression puis de cisaillement de la boue. La pression est exercée par des rouleaux, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une bande presseuse. Le procédé peut être mené à basse (2 bars), moyenne (5 bars) ou haute pression (10bars). Les filtres à basse et moyenne pression sont le plus couramment utilisés, particulièrement dans les petites et moyennes stations qui valorisent les boues en agriculture. Les avantages et inconvénients de la technique sont repris dans le Tableau I.4 (Emilian. K, 2004).

**Tableau I.4 : Avantages et inconvénients des filtres à bandes presseuses (Leonard. A, 2002).**

AVANTAGES	INCONVENIENTS
- Robustesse, simplicité de construction et de conduite des appareillages	- Grande consommation d'eau propre pour le lavage des toiles
- Procédé continu	- Coût d'investissements élevé pour les filtres les plus performants
- Frais d'exploitation très faibles	- Siccités plus faibles que pour le filtre- presse



**Figure I.2 :** Schéma d'un filtre bande (Haoua. A, 2007).

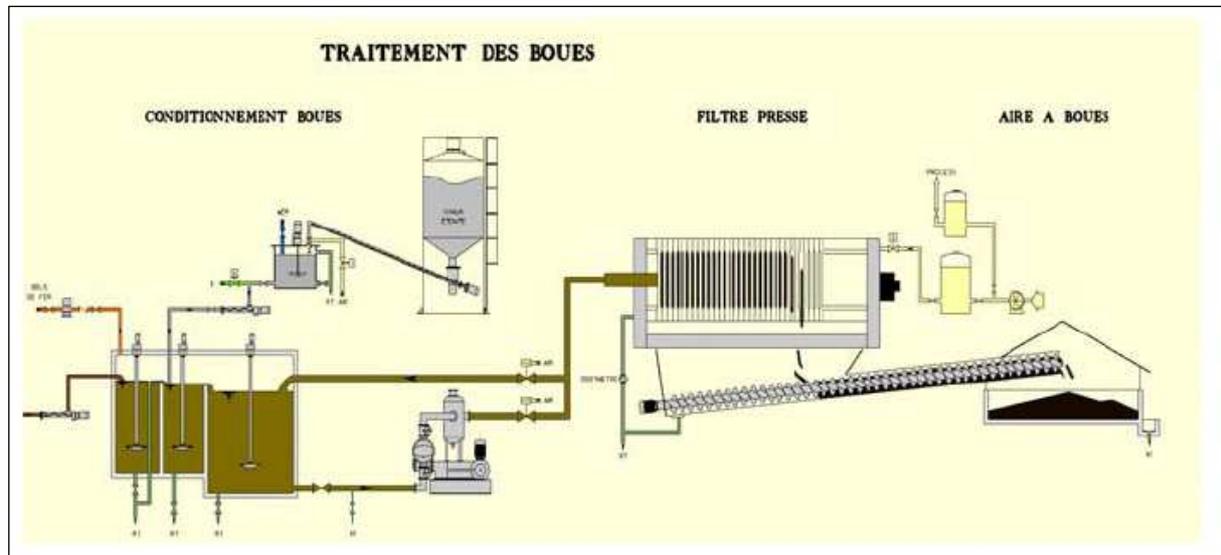
Dans les filtres-presses, la boue est comprimée entre deux plateaux creux recouverts d'une toile métallique en acier ou en tissu synthétique à une pression se situant typiquement entre 5 et 15 bars. Les plateaux sont de forme carrée dont la dimension du côté varie de 0.3 à 1.5 m. Un filtre classique est constitué d'un assemblage de 100 à 120 couples de plateaux, appelés chambres pour une surface totale de filtration de 400 à 450 m<sup>2</sup>. Des membranes gonflables à l'air ou à l'eau peuvent être ajoutées afin d'augmenter la compression dans les chambres de filtration. Cette technique permet d'atteindre des siccités plus grandes que les filtres bandes mais opère en discontinu car il nécessite un 'débâtissage' des gâteaux de filtration après chaque cycle (Tableau I.5). Les toiles doivent également être régulièrement nettoyées. Cependant, dans les nouvelles versions, le débâtissage et le rebâtissage sont automatisés, permettant la réduction des temps morts (Emilian. K, 2004).

**Tableau I.5 : Avantages et inconvénients des filtres-presses (Leonard. A, 2002).**

AVANTAGES	INCONVINIENTS
- Siccité élevée	- Fonctionnement discontinu
- Solidité	- Main d'œuvre importante (sauf pour les versions modernes)
- Grande fiabilité	

Comme illustré dans les Tableaux I.2 à I.5, chaque technique de déshydratation possède ses caractéristiques propres, tant avantageuses que désavantageuses. Le choix vers l'un des procédés repose généralement sur des exigences de siccité finale figurant dans le cahier des charges, tout en tenant compte des coûts d'investissement et d'exploitation. Le type de boue et les quantités à traiter peuvent également orienter le choix final.

Des essais en laboratoire sont souvent nécessaires afin de déterminer la meilleure stratégie de conditionnement et d'estimer la siccité finale qui pourra être atteinte. Une fois déshydratées, les boues vont être éliminées ou valorisées selon différentes filières détaillées dans le paragraphe suivant.



**Figure I.3 :** Schéma d'une filière de traitement par filtre presse (Haoua. A, 2007).

### I.4. ELIMINATION FINALE DES BOUES

La valorisation (destination finale) des boues est souvent aléatoire et leur évacuation constitue presque toujours une charge d'exploitation importante. Sur le plan économique le but à atteindre est en réalité de limiter les frais de leur traitement et de leur transport. Cette optimisation dépend des conditions d'écoulement du produit, des besoins en énergie et du cout de celle-ci, du prix de la main d'œuvre, des réactifs de conditionnement, etc.

Du fait de leurs caractéristiques, plusieurs voies d'élimination ou de valorisation de ces boues sont possibles selon que l'on souhaite mettre en valeur leur caractère fertilisant ou énergétique, et que l'on considère les aspects sanitaires ou micropolluants.

Le devenir des boues dépend, dans un cadre réglementaire précis, essentiellement de trois contraintes : locales, économiques et en particulier sociologiques. Pour la destination finale des boues déshydratées, on pourra envisager, en fonction des propriétés intrinsèques des boues, des possibilités locales d'élimination et des considérations technico-économiques, l'une des trois solutions suivantes : valorisation agricole directe ou épandage, incération ou mise en décharge.

### **I.4.1 Valorisation agricole**

L'utilisation agricole est aujourd'hui la solution la plus satisfaisante sur le plan de l'environnement, et la plus économique. Cependant, Les boues sont épandues dans les champs, directement sous forme liquide ou pâteuse, puis enfouies. Cette pratique, quand elle est bien maîtrisée, ne présente aucun risque sanitaire ni environnemental, mais nécessite une application rigoureuse selon des procédures de qualité mises en place par la réglementation (Emilian. K, 2004).

Les boues d'épuration sont des produits complexes contenant non seulement des éléments fertilisants (N, P et S) ou amendants (éléments alcalinisants et matières organiques), mais aussi des contaminants sous forme d'éléments traces métalliques et de composés traces organiques ainsi que des microorganismes pathogènes.

### **I.4.2 Incinération**

Cette méthode consiste à brûler les boues dans un incinérateur, seules ou avec des ordures ménagères. Après oxydation thermique, il reste des sous-produits minéralisés qui, selon leur nature, peuvent être incorporés dans certains bétons, utilisés pour les soubassements des routes ou sont mis en décharge (Spinosa, 2001).

Cette technique demande de fortes quantités d'énergie et des boues ayant une forte siccité. En fonction de leur siccité, les boues ne sont pas incinérées de la même façon. Pour des boues pâteuses à faible siccité (15 à 30%), il est possible de les co-incinérer avec des ordures ménagères : les boues sont ainsi considérées comme un fluide de refroidissement. Cependant, comme leur pouvoir calorifique est faible, les quantités de boues injectées dans le four n'excèdent pas 10 à 20% du tonnage d'ordures ménagères (OTV, 1997). En revanche, pour des boues à forte siccité (60% et plus), il est préférable de construire une installation spécifique (pouvoir calorifique équivalent à celui d'ordures ménagères et donc nécessitant de la capacité thermique).

### **I.4.3 Mise en décharge**

Il faut dire d'emblée que la mise en décharge est une mauvaise solution pour l'élimination des boues de STEP. Dans la mesure du possible, on lui préfère la valorisation, ou à défaut, l'incinération.

La mise en décharge des boues avec les déchets ménagers est également une pratique courante et sans risque pour l'environnement. Dans les Centres d'Enfouissement Technique (CET) modernes, les déchets sont confinés dans des alvéoles étanches et recouverts de terre végétale. La fermentation qui se déclenche dans ces alvéoles, produit au bout de quelques mois, et pendant une dizaine d'années, un gaz riche en méthane. Celui-ci est aujourd'hui capté

par des réseaux de canalisation et peut être utilisé comme combustible sur des moteurs thermiques.

Le rejet en mer est une solution expéditive qui consiste le plus souvent en un déversement discontinu au large au moyen de barrages et chalands. Dans quelques cas cette évacuation est réalisée par un émissaire sous-marin suffisamment long et immergé en profondeur.

Le choix d'un rejet en mer nécessite au préalable un examen minutieux et prolongé des courants ainsi que des études bactériologiques, biologiques et piscicoles de qualité. La destruction des germes pathogènes et la dégradation des matières organiques en milieu marin sont lentes. Les boues déversées en mer doivent être débarrassées des matières flottantes. La digestion anaérobie est le prétraitement préalable le plus souvent adopté (Emilian. K, 2004).

### **1.4.4 Epandage**

- **Composés traces métalliques**

Les éléments traces métalliques appelés couramment métaux lourds sont présents naturellement dans tous les sols cultivés à des taux variables selon la composition de la roche mère dont est issu le sol.

Certains éléments traces métalliques ont uniquement un rôle de contaminant : c'est le cas du cadmium(Cd), du mercure(Hg) et du plomb (Pb). D'autres sont d'abord des oligoéléments indispensables pour les végétaux et/ou les animaux : c'est le cas du chrome(Cr), du cuivre(Cu), du nickel (Ni), du sélénium(Se) et du zinc (Zn). C'est seulement à partir d'un certain niveau de teneur dans le sol que cette deuxième catégorie prend un caractère de contaminant (Feix et Wiart, 1998). Les éléments traces métalliques peuvent présenter des risques dans les domaines suivants :

- Fonctionnement biologique des sols, notamment avec le zinc, le nickel et le cuivre ;
- Phytotoxicité, notamment avec le cadmium, le cuivre, le nickel et le zinc ;
- Toxicité des végétaux récoltés pour les animaux et les humains, notamment avec le cadmium, le mercure et le plomb.

De nombreux éléments traces métalliques sont apportés avec les boues d'épuration. Bien que les teneurs des boues soient en moyenne très inférieures aux valeurs limites réglementaires, elles sont généralement largement supérieures à celles des autres intrants utilisés en agriculture, en gras de ferme. (Tableau I-6) La principale exception concerne la teneur en cadmium et en chrome qui sont présents en plus grande quantité dans les engrais phosphatés solubles Super 45 que dans la matière sèche d'une boue moyenne (Bodet, 2001).

## **Chapitre I Les boues, aspect de traitement des eaux usées en Algérie**

L'épandage est à proscrire sur les sols dont le pH conduit à une forte mobilité des éléments traces. Après l'épandage des boues le pH du sol ne doit pas être inférieur à 6. Bien que les apports annuels doivent être déterminés après une enquête agronomique locale, une dose d'application de 3t MS/ha.an est une valeur guide raisonnable (Emilian. K, 2004).

- **Composés traces organiques**

Les boues d'épuration contiennent de très nombreux types de composés traces organiques. La plus part d'entre eux vont être décomposés très rapidement après épandage par les microorganismes des sols cultivés. Quelques-uns peuvent résister à la biodégradation et s'accumuler au cours des années. C'est par exemple, le cas des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) comme le Fluoranthène, le benzo(b) pyrène ainsi que les Polychlorobiphényles(PCB) (Feix et Wiart, 1998).

Le seul effet négatif actuellement identifié de ces produits est une réduction de l'activité biologique des sols cultivés au delà de certaines teneurs seuils. Des études ont montré que le taux de transfert de ces produits du sol vers les plantes était négligeable, voire nul (Bodet. J.M, 2001).

**Tableau I.6: Teneur moyennes en ETM des boues d'épuration comparées à celle d'engrais minéraux, de fumiers de bovins et de lisiers de porcs en g/t de MS (J.M Bodet, 2001).**

<b>Paramètre</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Hg</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Se</b>	<b>Zn</b>
<b>Boues</b>	2,5	50	330	2,3	40	90	10	800
<b>Engrais phosphaté (super 45)</b>	48,0	230	35,0	0	0	2,5	0	380,0
<b>Engrais Azoté (ammonitrate)</b>	0,5	7	0,5	0	0	0,2	0	0,8
<b>Engrais potassique (chlorure de potassium)</b>	0	11	5,0	0	0	0	0	11,0
<b>Fumier de bovins</b>	0,7	11	28	0	21	10	0	150
<b>Lisiers de porcs</b>	0,3	18	300	0	14	12	0	700

- **Micro-organismes pathogènes**

Les organismes pathogènes présents dans les boues d'épuration ne représentent qu'une infime partie des micro-organismes observés dans celles-ci. Ils appartiennent à cinq grands types : virus, bactéries, protozoaires, champignons et les helminthes (vers parasites) (Robert et

al, 1994). Leur présence dans les eaux usées, majoritairement associés aux matières en suspension, reflètent les caractéristiques épidémiologiques de la population locale. Les populations animales vivant dans le réseau (rongeurs) et les eaux de ruissellement des chaussées (déjections canines) contribuent aussi, mais de façon marginale, à la contamination des eaux usées parvenant à la station d'épuration.

Les procédés de traitement des eaux usées concentrent dans les boues la charge microbiologique. Cette concentration intervient au cours des phases de séparation eaux/boues en raison de la capacité de ces organismes à s'adsorber sur les matières particulaires ou à décanter (cas des parasites du type helminthe) (Feix et Wiart, 1998). Certains traitements : digestion thermophile, stabilisation thermophile, compostage, chaulage fort et pasteurisation des boues d'épuration municipales sont capables d'éliminer partiellement ou totalement les micro-organismes pathogènes qui sont présents. Les micro-organismes pathogènes survivent généralement mal dans les boues d'épuration au cours du stockage.

L'épandage sur le sol accélère généralement leur destruction en les soumettant un effet négatif du climat, puis du sol. On ne peut toutefois exclure que certains micro-organismes survivent et se dispersent (Bodet, 2001).

### **I.5 ASPECT DE TRAITEMENT DES EAUX USEES EN ALGERIE**

La multiplication et l'aggravation des états de carence en eau sont en train de prendre mondialement une dimension de premier ordre. Le niveau des nappes phréatiques est en baisse et menace 1.5 milliards d'habitants sur la planète. Il n'est donc pas exclu que l'eau est amenée à devenir un enjeu stratégique international, pouvant engendrer de graves conflits régionaux. En Algérie, le déficit de cet or bleu est devenu inquiétant confirmant les diverses expertises partant d'hypothèse et usant de méthodologie différentes qui ont toutes conclu que notre pays se trouvera entre 2010 et 2025 confronté à cette pénurie quasi-endémique.

La protection des ressources en eau passe par le développement du potentiel hydrique mais aussi un traitement des eaux usées, qui peuvent constituer un appoint au volume d'eau produit, notamment pour les besoins des secteurs de l'industrie et de l'agriculture.

A partir de la décennie 1980, le secteur a pu bénéficier d'un Plan Hydraulique National destiné essentiellement à définir les priorités entre autre la mise en place dans toutes les agglomérations de plus de 100 000 habitants des STEP.

## **Chapitre I Les boues, aspect de traitement des eaux usées en Algérie**

L'Algérie traite actuellement 570 millions de m<sup>3</sup>, soit 75% de volume déversé qui avoisine les 750 millions de m<sup>3</sup>. Les capacités de recyclage seront revues à la hausse, en 2014 pour atteindre en 2014, plus de 2 millions de m<sup>3</sup>, donc, l'équivalent de 85% du volume global des eaux usées.

En effet, le recyclage des eaux usées représente un axe central de la politique nationale de développement des ressources en eau qui intègre cet aspect à travers la construction de nouvelles unités ainsi que la réhabilitation des stations à l'arrêt. Cet intérêt pour ce dossier sensible au regard de son impact direct sur la santé publique et la sécurité hydrique est sanctionné par la réalisation de près d'une centaine de stations d'épuration durant la dernière décennie.

Aujourd'hui, l'Algérie figure parmi les pays ayant atteint les objectifs du millénaire en termes d'accès à l'eau et d'assainissement. C'est que l'Algérie, soumise à une sécheresse cyclique de par sa position stratégique d'une part, situation aggravée par les changements climatiques, est consciente de l'importance du traitement des eaux usées et leur réutilisation à des fins industrielles et agricoles, d'autant plus que ces deux secteurs consomment jusqu'à 70% des eaux mobilisées.

En effet, les secteurs de l'agriculture et des ressources en eau misent, à la faveur de leurs stratégies respectives, sur l'aménagement de 1 million d'hectares, à l'horizon 2015/2020, dont près de 500.000 en grands périmètres irrigués, 280.000 ha en petite et moyenne hydrauliques pour le nord du pays et 220.000 ha pour les régions sahariennes. Le recours au recyclage des eaux usées est devenu désormais plus qu'une nécessité pour accroître les superficies agricoles irriguées, indispensables pour aboutir à la sécurité alimentaire.

## **CHAPITRE II**

### **CHITINE ET CHITOSANE**

#### **II.1. CHITOSANE. PREPARATION, PROPRIETES ET PRINCIPALES APPLICATIONS**

La chitine est un polysaccharide d'origine marine : c'est l'un des polymères naturels les plus abondants au monde. Ce biopolymère est extrait essentiellement de la carapace des crustacés (principalement crevettes et crabes). Le principal dérivé de la chitine est le chitosane, obtenu par désacétylation partielle en milieu basique. Le chitosane est un aminosaccharide soluble en milieu acide et possède un fort potentiel en raison de son caractère polycationique qui le distingue des autres polysaccharides et polymères naturels (qui sont en général anioniques). La chitine et le chitosane suscitent un intérêt de plus en plus grand en raison de leurs nombreuses propriétés intrinsèques, et de leur large domaine d'applications. Leurs propriétés physico-chimiques et biologiques, ainsi que leurs principales applications sont présentées et discutées dans ce chapitre.

##### **II.1.1 Origine du chitosane**

Le chitosane est un dérivé de la chitine (François *et al*, 2009), substance qui se trouve dans de nombreuses sources naturelles. C'est le deuxième polymère naturel le plus abondant après la cellulose. La chitine est produite par les insectes (blattes, coléoptères, fourmis), les arachnides (scorpions, araignées), les animaux marins (crabes, crevettes, homards, langoustines, calmars) (Hwa et Wen, 2006) et les champignons (Venault. *et al*, 2008). Dans le règne animal, la chitine est un élément de soutien des téguments de certains invertébrés (insectes, crustacés, mollusques, nématodes).

On la retrouve en particulier dans la composition de leur cuticule, et à degré moindre au niveau de la paroi intestinale, du tube digestif, des trachées, des tendons musculaires et du squelette interne. La chitine est également un constituant majeur des endosquelettes des céphalopodes comme les sèches et les calmars (Muzzarelli, 1985). Elle est également présente dans certaines levures et bactéries. La chitine et le chitosane sont tous les deux absents chez les mammifères (Hejazi et Amiji, 2002).

Le meilleur rendement d'extraction de la chitine est actuellement observé chez les crustacés qui en constituent donc la principale source au niveau industriel (Preeda. *et al*, 2002). La quantité de la chitine dans ces déchets peut varier de 15- 30 % en poids sec pour certaines carcasses de crabes à 30-40 % pour les crevettes grises (Muther *et al*, 1990). Pour la crevette, seulement 35% du poids de l'animal est consommé tandis que cette proportion est d'environ 45% pour les crabes et les homards. Selon la méthode de transformation et le produit fabriqué, entre 5% et 65 % du poids de l'animal est perdu.

Le chitosane est une substance très peu répandue dans la nature (Desbrières. 2002). Elle n'est signalée que dans les exosquelettes de certains insectes et dans les parois cellulaires d'une classe particulière de champignons (zygomycètes), de bactérie et de levures. Il n'y a donc pas de source primaire de chitosane exploitable, la production étant assurée par transformation des déchets issus de la pêche.

### **II.1.2 Structure chimique**

La chitine est un polymère linéaire qui a une structure similaire à la cellulose, mais c'est un amino-polysaccharide ayant des groupements acétamide en position C-2 à la place des hydroxyles (Venault *et al*, 2008). Sa structure chimique est un enchainement d'unités monomères N-acetyl-  $\beta$  -D- glucosamine reliées par une liaison glycosidique (1 $\rightarrow$ 4). La nomenclature définit cette structure comme celle d'un poly [ $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)-2-acétamido-2-déoxy-D-glycopyranose] (Grégorio *et al*, 2009). En réalité, la chitine commerciale contient également des monomères D-glucosamine. En fait, le terme chitine est donné à tout copolymère formé d'unités constitutives N-acétyl-d-glucosamine et D-glucosamine, dont le DA est supérieur à 60% (Venault *et al*, 2008).

La désacétylation en milieu basique de la chitine permet d'obtenir le chitosane (François *et al*, 2009) qui est un copolymère linéaire à arrangement aléatoire d'unités D-glucosamine et d'unité N-acétyl-D-glucosamine reliées par des liaisons  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4). Le chitosane est un polysaccharide linéaire appartenant à la famille des glycosaminoglycanes (Grégorio *et al*, 2009). Le terme chitosane est donné à tout copolymère dont le DA est inférieur à 50% (Venault *et al*, 2008).

Le degré de désacétylation (DDA) est un paramètre important à considérer puisqu'il est un indice de la charge ionique du produit. Le DDA nous donne la proportion d'unités monomériques, dont les groupements acétyles qui ont été enlevés, indiquant la proportion

d'amines libres pouvant être chargées positivement ( $H^+$ ) après dissolution dans l'acide. Le DDA varie de 70 à 100 %, selon le procédé de désacétylation. Il existe plusieurs méthodes de mesures, comme la spectroscopie infrarouge ou en UV, la titration acido-basique ou la résonance magnétique nucléaire ; cette dernière technique donnant les résultats les plus précis. En revanche, étant coûteuse, elle n'est utilisée que pour les applications demandant une précision exemplaire comme en biopharmaceutique (Beaulieu, 2007).

### **II.1.3 Préparation-Production du chitosane**

La production de chitosane est décrite à la figure II.1 et, fondamentalement, elle comprend trois étapes successives (déminéralisation, déproteination et désacétylation) (Truong *et al*, 2006).

Pour obtenir la chitine, les carapaces sont d'abord prétraitées (lavage, broyage et séchage), puis les protéines sont extraites par une solution d'hydroxyde de sodium de concentration variable (0,1- 5M), la température et la durée du traitement alcalin peuvent varier. Cette étape de déproteïnisation peut se faire également par voie enzymatique (Hong-liang *et al*, 2010).

Le carbonate de calcium est ensuite extrait par dissolution dans une solution acide chlorhydrique (concentration : 1-10M) à température ambiante (durée du traitement variable). Le résidu, une fois séché, constitue la chitine brute (DD : 20-30%) qui peut être stockée comme un intermédiaire stable.

A la fin de ces deux traitements, il peut subsister une coloration due à des pigments incomplètement éliminés (Truong *et al*, 2006): une étape de décoloration est alors nécessaire par l'ajout d'un agent oxydant ( $KMnO_4$ ,  $NaOCl$  ou  $H_2O_2$ ) avec un risque de dépolymérisation et/ou d'oxydation des unités situées aux extrémités de la chaîne polymérique. La désacétylation en milieu basique de la chitine va permettre ensuite d'obtenir le chitosane, qui est son principal dérivé (Grégorio *et al*, 2009).

Il existe une multitude de méthodes de préparation du chitosane. Le chitosane est produit par une désacétylation partielle de la chitine brute dans une solution d'hydroxyde de sodium concentrée à une température de 110 à 115°C durant quelques heures, en atmosphère inerte et en présence d'un agent réducteur ( $NaBH_4$ ) (Grégorio *et al*, 2009). Le chitosane obtenu est alors séché puis redissous dans une solution d'acide organique afin de le purifier.

La solution acidifiée est ensuite filtrée et séchée. Le chitosane obtenu possède généralement un taux de désacétylation voisin de 70-80%. Il se présente sous la forme d'un solide amorphe ayant une couleur orange brûlé (Beaulieu, 2007). La qualité du chitosane varie selon l'origine de la matière première utilisée et de la procédure expérimentale d'extraction (Grégorio *et al*, 2009).

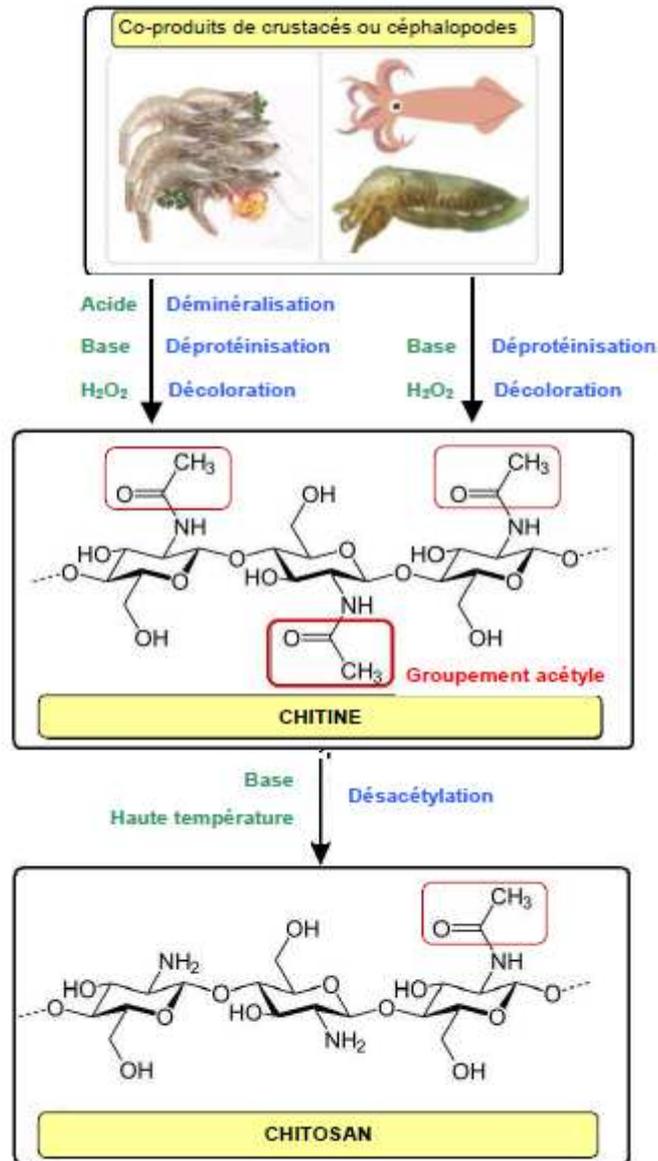


Figure II.1: Production de la chitine et du chitosane (Ifremer, 2010).

**II.1.4 Propriétés du chitosane**

Le chitosane a une structure semi-cristalline avec un degré de cristallinité qui dépend du degré de désacetylation (Zhang *et al*, 2010). Il cristallise dans le système orthorhombique et deux types de produits sont connus : le chitosane I (faible DDA, sous forme de sel) est plus désordonné que le chitosane II (fort DDA, forme amine libre) (Grégorio *et al*, 2009).

Le chitosane est insoluble dans l'eau et dans les solutions alcalines concentrées ou diluées. Cependant, il est soluble dans plusieurs solutions organiques aqueuses légèrement acides (Venault *et al*, 2008). L'acide organique le plus couramment utilisé pour la préparation d'une solution de chitosane est l'acide acétique dilué. En général, le chitosane est parfaitement soluble à un pH 3- 4. Le chitosane est aussi soluble dans des solutions diluées (0,1% à 1%) d'acides nitrique et chlorhydrique.

Les groupes aminés du chitosane sont des protons à partir de pH 3-4 et le polymère chargé positivement devient soluble (Grégorio *et al*, 2009). Le chitosane est insoluble dans les solvants organiques purs. En revanche, en présence d'une faible quantité d'acide, il est soluble dans les mélanges aqueux contenant par exemple 60% de méthanol ou 40% d'acétone.

La solubilité du chitosane est un paramètre très difficile à contrôler car la valeur de DDA influence fortement sa solubilité. Celle-ci dépend également de la force ionique, du pH, de la nature de l'acide utilisé et de la distribution des groupes acétyles le long de la chaîne macromoléculaire (Beaulieu, 2007). Le chitosane se décompose par chauffage à partir de 185°C sans fondre (Grégorio *et al*, 2009).

Le chitosane est un matériau non-poreux ayant des surfaces spécifiques de l'ordre de quelques m<sup>2</sup>/g à quelques centaines de m<sup>2</sup>/g sous formes physiquement modifiées (Grégorio *et al*, 2009). C'est un matériau très stable en phase solide et il a une conservation quasi infinie. En solution, il est relativement fragile et dégradable. Il possède un degré élevé de réactivité chimique due à son groupe amine primaire libre qui lui confère une forte densité de charges positives. La présence de la fonction amine le long de la chaîne macromoléculaire, permet de réaliser des réactions chimiques spécifiques à cette fonction telle que la N-alkylation ou la N-carboxylation.

Le chitosane a une propriété d'interagir avec d'autres substances chimiques (ions, molécules, macromolécules) grâce à une structure chimique particulière, qui permet d'entrevoir des capacités à interagir, complexer ou adsorber (Azzouz, 1994).

Le chitosane et la chitine possèdent ainsi des propriétés de rétention d'eau, de chélation d'ion, de complexation et d'adsorption de molécules ou de polymères (François *et al*, 2009). Le caractère du chitosane en milieu acide permet la fixation de cations comme les colorants anioniques ou les anions métalliques. Cette association sélective avec les espèces anioniques fait du chitosane un excellent agent de floculation dans le traitement des eaux polluées (Fung et Wen, 2006).

Il peut aussi former des complexes polyanion-polycation menant à la préparation des membranes. La polycationicité est d'un grand intérêt puisque les chaînes macromoléculaires de la polyamine sont dotées d'une forte densité de charge positive à l'inverse de la plupart des autres polymères naturels chargés négativement. Cependant, les propriétés du chitosane dépendent fortement du pH. Au-delà d'un pH de 6,5, il précipite et la chaîne macromoléculaire ne comporte plus de groupements ionisés, mais il possède alors de bonnes propriétés chélatantes dues, en particulier, au doublet électronique de l'atome d'azote qui devient disponible (Beaulieu, 2007).

Le chitosane est parfaitement stable, et ne montre aucune dégradation bactérienne de sa solution diluée même après 5 ans (Grégorio *et al*, 2009). Le chitosane est non-toxique, antibactérien, antifongique, biodégradable et résistant aux attaques bactériennes (François *et al*, 2009). La dose létale (LC-50) du chitosane est la même que pour le sucrose ou le sel de table (NaCl). Il est en équilibre avec la pression atmosphérique normale et sa teneur en humidité se situe entre 10% - 14% (Grégorio *et al*, 2009).

### **II.1.5 Champs d'applications du chitosane**

Le chitosane trouve des applications importantes dans différents domaines (Tableau II-1) (Grégorio *et al*, 2009). En pratique, toutes les applications du chitosane sont intimement liées à son caractère polycationique qui est unique parmi les polymères naturels.

**Tableau II.1:** Applications du chitosane (Grégorio *et al*, 2009).

Utilisation	Commentaires
<b>Traitement des eaux usées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• agent coagulant et chélatantes</li> <li>• réduction des métaux toxiques et radio-isotopes</li> <li>• récupération des métaux réutilisables</li> <li>• agent de déshydratation des boues</li> </ul>
<b>Traitement de l'eau potable</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• agent coagulant et chélatant</li> <li>• réduction des métaux toxiques</li> <li>• enlèvement du fer et du manganèse des piscines</li> </ul>
<b>Agriculture</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrôle des métaux essentiels à la croissance des plantes</li> </ul>
<b>Alimentation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• extraction du fer (catalyseur de l'oxydation des acides gras insaturés, causant des mauvaises odeurs dans les viandes précuites);</li> <li>• agent antibactérien</li> </ul>
<b>Domaine biomédical et pharmaceutique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• diminution du taux de cholestérol</li> <li>• accélération de la guérison des blessures</li> <li>• stimulation du système immunitaire</li> <li>• agent antibactérien et anti-tumeur</li> <li>• peau synthétique</li> </ul>
<b>Industrie des cosmétiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• agent hydratant</li> </ul>
<b>Photographie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• extraction de l'argent</li> </ul>
<b>Industrie textile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• agent de rétention d'eau</li> </ul>
<b>Pates à papier</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• augmentation de la résistance du papier à la déchirure</li> </ul>

## **II.2 INTERACTIONS CHITOSANE –PARTICULES COLLOÏDALES**

### **II.2.1 Caractéristiques des particules à enlever**

Les matières existantes dans l'eau peuvent se présenter, selon leurs tailles, sous les trois états suivants :

- Etat de suspension qui regroupe les plus grosses particules.
- Etat colloïdale.
- Etat dissous des sels minéraux.

Les colloïdes présentent un diamètre compris entre 1µm et 1nm (Judith *et al*, 1983). Ils possèdent deux autres caractéristiques très importantes:

- leur rapport surface/volume leur confère des propriétés d'adsorption des ions présents dans l'eau. Ce phénomène explique en partie l'existence de charges électriques à leur surface. Ces charges souvent négatives, engendrent des forces de répulsion inter-colloïdales. Celles-ci permettent d'expliquer la grande stabilité de ces particules mises en solution.
- Leur densité, qui peut atteindre 2,5, ne modifie pas la valeur de leur vitesse de décantation (Cardot, 1999).

L'origine des colloïdes est très diverse. On peut citer l'érosion des sols, la dissolution des substances minérales, la décomposition des matières organiques, le déversement des eaux résiduaires urbaines et industrielles ainsi que les déchets agricoles (Degrémont, 2007).

Les particules colloïdales sont classées en deux catégories suivant leur comportement vis-à-vis de l'eau. Il s'agit des particules hydrophobes et hydrophiles.

#### **II.2.1.2 Les particules hydrophobes**

Les particules hydrophobes n'ont aucune affinité pour l'eau. Leur stabilité est due à la charge électrique que portent ces particules qui engendre une répulsion mutuelle empêchant toute agglomération. Ce sont en général des particules minérales telles que la silice et les argiles (Cardot, 1999).

#### **II.2.1.3 Les particules hydrophiles**

Les particules hydrophiles présentent une grande affinité avec l'eau. Ces particules sont entourées d'une enveloppe d'eau fixée par des liaisons physico-chimiques à certains groupement de la matière tels que  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{NH}_2$ , ou  $-\text{OH}$ . Les particules colloïdales hydrophiles sont le plus souvent de nature organique. Les colloïdes hydrophiles sont plus difficiles à déstabiliser que les solutions hydrophobes (Cardot, 1999). En effet, il faut agir

d'abord sur les molécules d'eau qui les entourent pour permettre leur agglomération (Lene Haugaard et Kristian, 2002).

Lorsqu'une particule colloïdale est suspendue dans un milieu polaire, qui contient des ions, elle attire électrostatiquement des ions de charge opposée. Ceux-ci sont étroitement collés au colloïde et forment la couche liée ou couche de STERN. Cette couche attire à son tour les contre d'ions accompagnés d'une faible quantité des ions de signe contraire. Cette nouvelle formation comporte une alternance d'anions et de cations. C'est la couche diffuse ou couche de GOUY, qui n'est pas rigide, flexible, déformable (Cardot, 1999).

La couche fixe et la couche diffuse forment la double couche de STERN. Il y'a donc un gradient électrostatique entre la surface de la particule et la solution (David et Matthew, 2002).

Le potentiel à la surface de la particule est appelé potentiel de Nernst. Le plan de cisaillement est la limite entre la partie de la solution qui se déplace avec la particule et la partie de la solution qui se déplace indépendamment de la particule. Le potentiel électrostatique mesuré au plan de cisaillement est appelé potentiel zêta (figure II.3) (Hermite et Ott, 1983).

#### **II. 2.1.4 Potentiel Zêta**

Le potentiel Zêta est responsable du comportement électrocinétique de la particule colloïdale dû à la charge effective de l'ensemble particule-double couche. Quand la charge effective diminue, le potentiel Zêta et la stabilité diminuent. Le potentiel qui existe entre la surface délimitant l'entité mobile et la surface extérieure de la couche diffuse, s'appelle potentiel Zêta (Judith *et al*, 1983).

Les suspensions colloïdales se repoussent mutuellement par des forces électrostatiques induites par des charges de même signe. En même temps, des forces d'attraction moléculaires s'exercent aussi, favorisant le rapprochement ou la cohésion entre des particules dispersées. Une suspension colloïdale stable est justement le résultat d'un équilibre entre ces forces de répulsion et d'attraction, qui s'exercent à certaines distances entre deux particules colloïdales (Grégorio *et al*, 2009).

Pour vaincre l'énergie de répulsion entre les particules colloïdales, principalement par la réduction du potentiel zêta, on ajoute des produits chimiques tels des polyélectrolytes ou des sels de métaux contenant des cations multivalents qui seront adsorbés au niveau de la surface colloïdale. Il va y avoir donc une neutralisation de charge électrique, et ainsi permet de réduire ce potentiel zêta, provoquant la coagulation (Judith *et al*, 1983).

On distingue ainsi quatre mécanismes de base pour la déstabilisation des particules colloïdales (Desjardins, 1988): compression de la double couche (coagulation électrostatique); adsorption et neutralisation des charges; emprisonnement des particules dans un précipité; adsorption et pontage.

La couche de STERN indissociable du colloïde possède une charge inférieure à celle de la particule et est composée exclusivement de cations. La couche de GOUY présente un nombre décroissant d'anions et croissant de cations au fur et à mesure de l'éloignement de la surface du colloïde.

### **II.2.2 Principe de la coagulation-floculation-décantation**

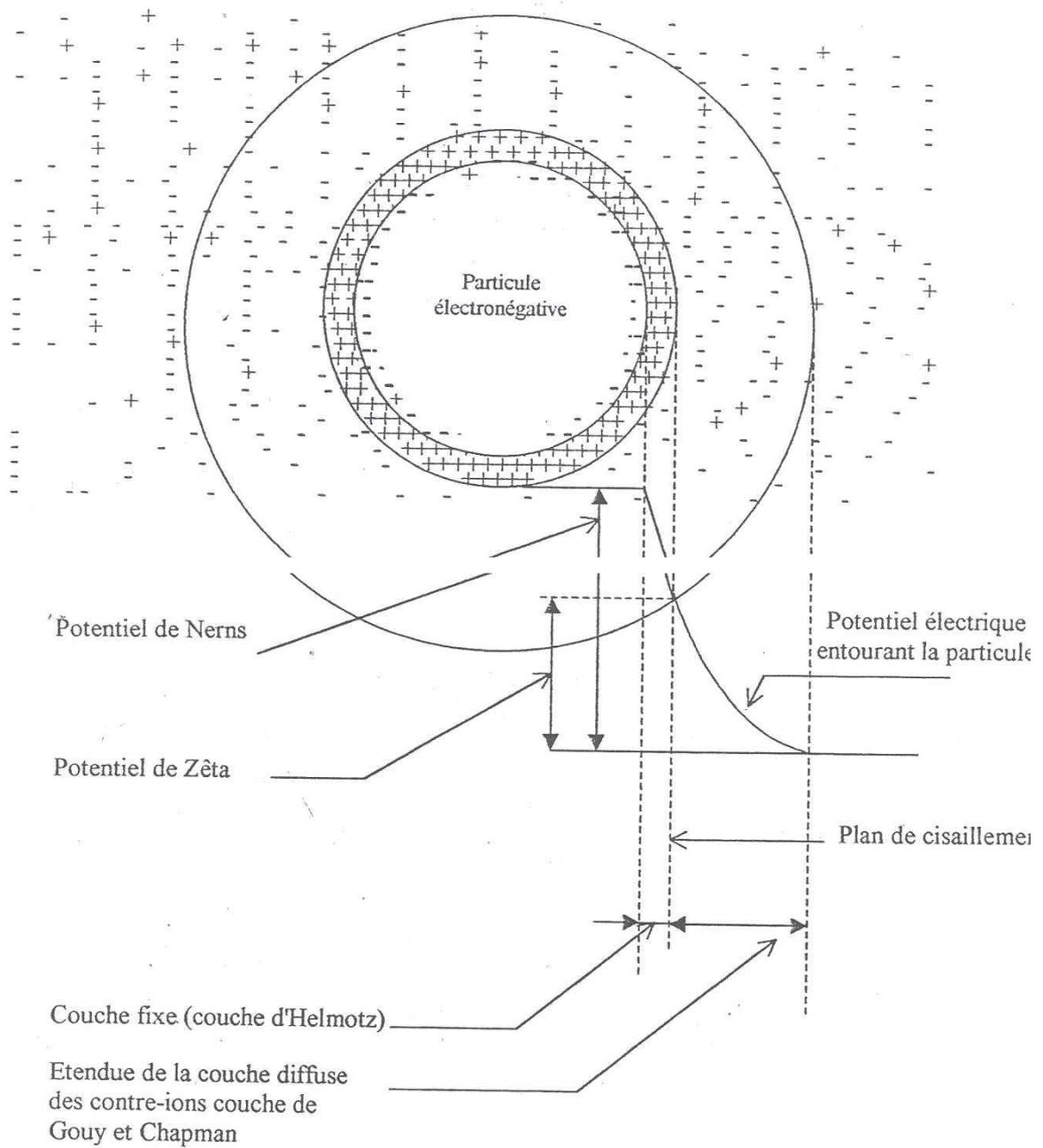
La coagulation est un processus impliquant, dans une première étape, la déstabilisation d'une suspension colloïdale. Dans une seconde étape, l'agrégation des particules génère de petits flocons sous l'action du mouvement brownien. La floculation, quant à elle, consiste en un grossissement des flocons sous l'influence d'un brassage modéré (Cardot, 1999), suivi d'une sédimentation de ces flocons lorsqu'ils deviennent assez lourds qu'on peut facilement éliminer par les procédés de décantation et filtration. Dans la plupart des cas, ces deux processus sont indissociables, ayant lieu simultanément, surtout lorsque la coagulation est prononcée et les temps d'agitation sont prolongés.

### **II.2.3 Floculation du chitosane**

Après déstabilisation de la suspension colloïdale, la tendance des particules à s'agglomérer lors de leurs collisions les unes avec les autres produit le phénomène de floculation. Les schémas proposés jusqu'à ce jour font rarement la distinction phénoménologique entre la coagulation et la floculation (Grégorio *et al*, 2009).

La stabilité de la dispersion colloïdale est un état d'équilibre très précaire, qui peut être perturbée par une simple modification du pH et/ou la moindre agitation mécanique. Une modification de pH peut, en effet, causer une prolongation ou une déproteination d'une macromolécule de chitosane mais en même temps une désolvation ou une solvation d'une particule colloïdale avoisinante.

Ces phénomènes sont accentués par les collisions entre les particules différentes ou identiques, cette déstabilisation de la dispersion colloïdale forme l'essence même du processus de coagulation (Judith *et al*, 1983). Ce processus implique des interactions aussi bien entre une macromolécule de chitosane et une particule, qu'entre particules similaires, de chitosane ou de suspension colloïdale.



**Figure II.2 :** *distribution ionique autour d'un colloïde (Ezziane, 2007).*

Une frontière claire entre coagulation et floculation est très difficile à établir, car la formation de micro flocons commence immédiatement après déstabilisation de la dispersion colloïdale et continue durant la floculation.

La théorie des ponts chimiques propose que la molécule de polymère soit attachée à la particule colloïdale par un ou plusieurs sites. L'attachement résulte d'une attraction coulombienne si le polymère et la particule ont des charges opposées, ou d'un échange d'ions, de liaisons d'hydrogène, ou des forces de Van der Waals s'ils ont des charges de même signe (Franchi et O'Melia, 2003).

L'extrémité d'une macromolécule déjà fixée à une particule déstabilisée peut se lier à une autre particule colloïdale, et ensuite à d'autres macromolécules de chitosane, formant ainsi des ponts chimiques. Ce processus de pontage génère des flocons, et les fait grossir en les densifiant jusqu'à les faire précipiter. Si l'extrémité de la macromolécule ne réussit pas à fixer une autre particule, il est possible qu'elle se replie sur la même particule et rentabilise cette dernière. Une telle structure enchevêtrée n'est pas très rigide et une agitation mécanique intense ou prolongée peut détruire les ponts déjà établis, et entraîner la rupture en fragment de flocons et la dispersion de ces derniers, causant une rentabilisation de la dispersion colloïdale (Judith *et al*, 1983).

L'ajout d'un excès de chitosane peut entraîner plutôt une auto-coagulation de celui-ci, et rendre totalement inefficace une coagulation-floculation pour l'élimination d'une suspension colloïdale indésirable. Dans ce cas, il ne reste plus des sites disponibles pour la formation des ponts avec les autres particules (Grégorio *et al*, 2009).

### **II.3 AVANTAGES DE L'UTILISATION DU CHITOSANE COMME COAGULANT-FLOCULANT**

Comparer aux polymères synthétiques, le chitosane se caractérise par un certains nombre d'avantages qui sont les suivants :

1. Il est disponible et bon marché ;
2. C'est un produit écologiquement intéressant qui possède également une structure chimique particulière et une polycationicité unique parmi les polymères naturels ;
3. Il est modulable (versatile) en fonction des utilisations potentielles tout en étant stable d'un point de vue chimique, thermique et/ou mécanique ;
4. Il présente des fortes capacités d'adsorption vis-à-vis d'une large gamme de polluants tout en ayant des cinétiques d'adsorption rapides ;
5. Il présente des sélectivités importantes (Grégorio *et al*, 2009);

6. Il est biodégradable et non-toxique;
7. Les boues qu'il produit stimulent la croissance des plantes;
8. Il est efficace en eau froide (Brzeski, 1987).

Le chitosane peut être utilisés comme choix alternatif aux sels de métaux et aux polymères organiques synthétiques dans les procédés de coagulation-floculation des eaux usées. L'utilisation du chitosane dans le procédé de coagulation des eaux usées signifie que les déchets de crustacés couramment disposés dans les champs d'enfouissements pourraient être recyclés.

Ce présent travail a pour but de décrire les possibilités d'utilisation du chitosane et son utilisation en tant que flocculant dans le traitement des boues urbaines.

## **CHAPITRE III**

### **MATERIEL ET METHODES**

Dans ce chapitre, l'ensemble des matériels et des méthodes utilisés sont présentés. Ainsi, l'origine des boues, les stratégies de conditionnement et de déshydratation de la boue, et toutes les méthodes d'analyses utilisées sont exposés.

#### **III.1 ORIGINES ET CARACTERISATION DES BOUES**

Le choix de la station est en fonction de la nature des boues désirées. En effet, la station d'épuration des eaux usées de la région de Baraki est située dans une zone peu industrialisée, les eaux provenant à la station sont majoritairement domestiques, à cet effet, les boues issues de cette station sont des boues urbaines. Dans le but d'améliorer la siccité de la boue utilisée, nous avons fait le choix d'en prélever après l'étape d'épaississement, afin de la conditionner et de la déshydrater au laboratoire. L'échantillonnage s'est fait avec un Bêcher en plastique muni d'une tige en bois, la boue est transportée dans des jerricans et stockée à 4 °C pendant une à deux semaines. Avant les essais, un échantillon de 500 ml de boues a été laissé à la température ambiante du laboratoire pour une acclimatation.

La station de Baraki a été réalisée dans le cadre de schéma général d'assainissement du Grand Alger (élaboré en 1976) qui prévoyait la réalisation des collecteurs principaux longeant l'Oued el Harrach et ses affluents afin de collecter tous les rejets d'eaux usées urbaines et industrielles pour les acheminer, par le biais des stations de relevage, à la station de Baraki.

La station de traitement de Baraki traite actuellement les rejets de 900.000 équivalents/ habitants. Elle est mise en service en 1987.

Le bassin versant de l'Oued el Harrach abrite 1.125.283 hab. qui représentent une vingtaine de commune. Il englobe :

- Zone industrielle d'Oued Smar (210 unités) ;
- Zone industrielle d'El Harrach (53 unités industrielles) ;
- Zone industrielle de Gue de Constantine ;
- Zone industrielle de Dar el Baida, Eucalyptus, Birtouta, Oued Chebel.....

En total, 300 unités industrielles déversent dans l'un des affluents de l'Oued sans aucun traitement préalable et qui représente en total 52 points de rejets identifiés.

La station de Baraki reçoit les 2/3 d'eaux usées urbaines et 1/3 d'eaux usées industrielles, qui une fois traitées seront déversées dans l'Oued el Harrach et par la suite dans la mer.

La station de Baraki est conçue pour procéder à la décantation (5 à 6h), traitement physique suivi d'un traitement biologique achevé par une clarification et une désinfection au chlore. Le temps de séjour global est de 12-15h. L'objectif de station est de réduire 90-95% DBO<sub>5</sub>, 75-80% DCO et 90-95% MES.

La capacité nominale de la station de traitement est de 900.000 équivalents habitants, avec une charge hydraulique moyenne autour de 150.000 m<sup>3</sup>/j.

Il est prévu aussi la reconstruction et le doublement de la capacité de la station de Baraki pour traiter à terme les eaux usées de 1,8 millions d'habitants d'Alger (projet CD4CDM Algérie, 2010).

La station de Baraki comprend principalement :

- Deux Stations de relevage PR1 & PR2
- Dégrillage grossier mécanisé
- Dégrillage fin mécanisé
- Dessablage/déshuilage
- Aération biologique
- Station de pompage des boues recyclées et de boues activées en excès
- Décantation secondaire
- Ouvrage de rejet
- Epaissement des boues
- Stabilisation anaérobie des boues par digestion
- Formation et traitement du biogaz
- Déshydratation mécanique et stockage des boues.



**Figure III.1 :** Plan de situation de la STEP de Baraki

## III. 2 MATERIEL

### III. 2.1 Appareils

Le matériel utilisé pour ces essais se résume dans :

- Agitateurs Magnétiques de type Stuart SB162.
- Turbidimètre : HANNA INSTRUMENTS : modèle HI 88703.
- pH - mètre : 691 METROHM.
- Balance analytique de marque DENVER INSTUMENT.
- Flocculateur (Jar test) de marque: Janke et Hunkel ; appareil à 6 agitateurs mécaniques à vitesse variable.
- Cellule de filtration sous pression conçue au laboratoire pour la mesure de la RSF.
- Conductimètre de type WTW modèle LF318/SET.
- Etuve de marque : Nuve.
- Four de marque : Nuve.
- Spectrophotomètre de type UV/Visible de type : UV MINI 1240 Shimadzu.

- Centrifuge de marque : TOMOS 3-18R.
- Bloc chauffant, Compresseur, Minéralisateur, dessiccateur.

### **III.2.2 Verrerie**

- Bêchers, pipettes, burettes, tubes Nesler.
- Filtres de marque Double Rings 202.
- Tamis.

## **III.3 METHODES DE CARACTERISATION DE LA BOUE**

### **III.3.1 Détermination des paramètres organiques**

#### **III.3.1.1 Détermination de la quantité de matière et de sa répartition**

La détermination des différentes fractions de la matière est réalisée par pesées et séchages des boues, selon la méthode normalisée NF T 90 105 (1972) (Lacée, 1985).

##### **III.3.1.1.1 Matières sèches (MS)**

Cette mesure s'effectue par la mise en place de l'échantillon dans une étuve à 105°C durant 24 h. Connaissant la masse initiale et la masse finale après perte d'eau, la teneur en matières sèches est calculée (Lacée, 1985).

##### **III.3.1.1.2 Calcul de la siccité (Sc)**

La siccité est le pourcentage de matière sèche. En effet, une boue avec une siccité de 10% correspond à 90% d'eau (Lacée, 1985).

##### **III.3.1.1.3 Teneur en matières volatiles (MSV)**

Le résidu sec obtenu lors de la mesure de la matière sèche est broyé et porté pendant 2 heures dans un four à moufle à 550°C. Connaissant la masse initiale et la masse finale, la teneur en matières volatiles rapportées à la matière sèche est calculée. Pour la majorité des boues, la détermination des matières volatiles est une évaluation approchée de la matière organique (Lacée, 1985).

#### **III.3.1.2 Dosage de la Demande Chimique en Oxygène (DCO)**

Les mesures de demande chimique en oxygène (DCO) sont réalisées sur les boues totales et sur le surnageant et le filtrat, selon la méthode normalisée NF T 90 101 (1988).

La matière organique est oxydée, en milieu acide ( $H_2SO_4$ ) et en présence d'un catalyseur ( $Ag_2SO_4$ ), par le bichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ), introduit en excès. Après deux heures de chauffe à 150°C, la DCO est déterminée par dosage en retour : l'excès de bichromate de potassium est déterminé à l'aide d'une solution de fer ferreux et d'ammonium (sel Mohr à 0,25 N) par dosage colorimétrique, avec la ferroïne comme indicateur coloré. La mesure de la DCO est destinée à quantifier la pollution d'effluents solubles peu concentrés.

La gamme de mesure est de 50 à 750 mg O<sub>2</sub> /l. Pour se rapprocher le plus possible de ces conditions, les boues totales sont diluées 20 à 200 fois. La densité optique de l'échantillon est obtenue par spectrophotométrie à une longueur d'onde de 610 nm (Rejsek, 2002).

### **III.3.1.3 Carbone organique**

La matière organique est oxydée à chaud par le mélange sulfochromique, selon la méthode Anne, et le sulfate de chrome formé est dosé par colorimétrie à l'auto analyseur. La prise d'essai nécessaire pour le dosage colorimétrique est de 0,5. La lecture de la densité optique au spectrophotomètre se fait à une longueur d'onde de 630 nm (Rejsek, 2002).

### **III.3.2 Détermination des paramètres minéraux**

Les boues ont été caractérisées selon le protocole d'analyse proposé par (Rejsek, 2002).

#### **III.3.2.1 La conductivité**

La conductivité électrique est mesurée par un conductimètre, elle est exprimée en mS.cm<sup>-1</sup>.

#### **III.3.2.2 Azote total**

Les composés azotés présents dans les boues, sont oxydés en nitrates par une solution alcaline de persulfate à l'autoclave (120°C). Ensuite, les nitrates sont dosés par la méthode de salicylate de sodium, ils donnent du paranitro-salicylate de sodium coloré en jaune et susceptible d'un dosage colorimétrique à une longueur d'onde de 415 nm. La concentration de l'azote total est déterminée à partir d'une gamme étalon de KNO<sub>3</sub> à des concentrations comprises entre 0,5 et 5 mg de NO<sub>3</sub> (Rejsek, 2002).

#### **III.3.2.3 Ions ammoniums (norme NFT 90-015)**

Les ions ammoniums sont dosés par la méthode d'indophénol. En milieu alcalin et en présence de nitroprussiate de sodium comme catalyseur, ils réagissent avec le phénol l'hypochlorite de sodium, et forment le bleu d'indophénol susceptible d'un dosage colorimétrique. La lecture de la densité optique au spectrophotomètre se fait à une longueur d'onde de 630 nm. La concentration des ions ammoniums est déduite à partir d'une gamme étalon d'une solution de NH<sub>4</sub>Cl à des concentrations comprises entre 1 et 10 mg de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Rejsek, 2002).

#### **III.3.2.4 Nitrite (norme NFT 90-013)**

Les nitrites sont dosés par spectrophotométrie, c'est celui de la méthode de Shinn : réaction de diazotation entre les nitrites et le réactif amino-4benzène sulfonamide en présence d'acide orthophosphorique. Le diazoïque formé donne un complexe rose avec le

dichlohydrate de N-naphtyl-1 diamino-1,2 éthane qui possède un maximum d'absorption à 540 nm (Rejsek, 2002).

#### **III.3.2.5 Nitrate (norme NFT 90-045)**

Les nitrates sont dosés par spectrophotométrie à l'acide sulfosalicylique, en présence de salicylate de sodium et après traitement en milieu alcalin, les nitrates donnent du paranitrosalicylate de sodium, coloré en jaune, pouvant être mesuré par colorimétrie. En même temps que le réactif alcalin, on ajoute du sel disodique de l'acide éthylènediamine-tetraacétique pour empêcher la précipitation des sels de calcium et de magnésium. L'addition d'azotate de sodium vise à neutraliser l'interférence des nitrites (Rejsek, 2002).

#### **III.3.2.6 Phosphate total (norme NF EN 1189)**

Les ions phosphate réagissent en solution acide avec les ions molybdate et antimoine pour donner un complexe de phosphore molybdate d'antimoine. Celui-ci est réduit par l'acide ascorbique en bleu de phosphoremolybdène. La mesure de l'absorbance de ce complexe se fait à 890 nm (Rejsek, 2002).

### **III.3.3 Détermination des paramètres organoleptiques**

#### **III.3.3.1 Mesure de la turbidité**

La turbidité est mesurée à l'aide d'un turbidimètre. Elle correspond à la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de particules en suspension ou des matières colloïdales. Elle se mesure en faisant passer un faisceau lumineux à travers l'échantillon à tester. La turbidité est déterminée en mesurant la lumière qui est diffusée par les particules en suspension ou les matières colloïdales. Les mesures ont été réalisées sur le surnageant après centrifugation des boues et sur le filtrat après filtration cette dernière. La gamme de mesure est comprise entre 0,1 et 2 000 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) (Rejsek, 2002).

#### **III.3.1.4 Le pH**

Le pH est mesuré sous agitation magnétique à l'aide d'un pH-mètre.

Les mesures du pH et de la turbidité permettent de contrôler le bon fonctionnement du procédé de coagulation floculation et de comprendre et répondre à un éventuel dysfonctionnement.

### **III.4 Conditionnement et déshydratation des boues**

Les principaux objectifs de cette recherche sont de montrer les performances du chitosane a titre de floculant pour le traitement des boues urbaines et de déterminer les conditions opératoires optimales de conditionnement et de déshydratation.

### III.4.1 Préparation des flocculants

Les flocculants utilisés dans notre étude, nous ont été gracieusement offerts par la société BASF (Allemagne). Ce sont des polymères et copolymères d'acrylamide de charges variables et de masses moléculaires élevées. Leurs propriétés sont regroupées dans le tableau suivant :

**Tableau VI. 1 : Caractéristiques des flocculants utilisés (Dégremont, 2007)**

Flocculant	Sedipur CF802	SedipurAF400	SedipurNF102
<b>Abréviation</b>	Sed CF802	Sed AF400	Sed NF102
<b>Caractère ionique</b>	Cationique	Anionique	Non-ionique
<b>Poids moléculaire (dalton)</b>	Haut (250000-million)	Très haut (5-10 millions)	Très haut (15 millions)

Nous avons utilisés aussi le polymère qui est utilisés par les exploitants de la station d'épuration de Baraki. C'est un polymère de nature cationique. Le chitosane utilisé dans cette étude est fournit par SIGMA-ALDRICH : C3646-256, il est sous forme solide de couleur beige et de viscosité de 100 Pa.s. Son degré de désacétylation est supérieur à 75%.

La préparation de la solution de polymère passe par quatre phases successives: la dispersion, l'hydratation, la dissolution et la maturation. La dispersion doit éviter la formation de blocs de polymère insolubles. Pour ce faire, le polymère est soumis à un fort cisaillement. L'étape d'hydratation aboutit à la formation d'un gel. Le gel hydraté se dissout ensuite sous l'effet de l'agitation et les chaînes de polymères se déploient entièrement pendant la maturation. La solution de polymère ne doit pas être trop visqueuse afin de faciliter le mélange avec la boue (IAP, 1986). Les solutions sont préparées à 5 g/l (Azize *et al*, 2005). La durée de vie d'une solution est estimée à 7 jours, délai au-delà duquel son efficacité est altérée (IAP, 1986). L'agitation est assurée par un agitateur Magnétique.

Le chitosane a été dissous dans l'acide acétique sous agitation à la température ambiante. Les proportions adoptées sont les suivantes : 100 mg de chitosane/1 ml d'acide acétique 80 % masse/masse et 99 ml d'eau déminéralisée (Zemmouri, 2008).

### III.4.2 Flocculation

Les quantités de polymères à ajouter ne peuvent être déterminées que de façon empirique par des essais sur échantillons en laboratoire.

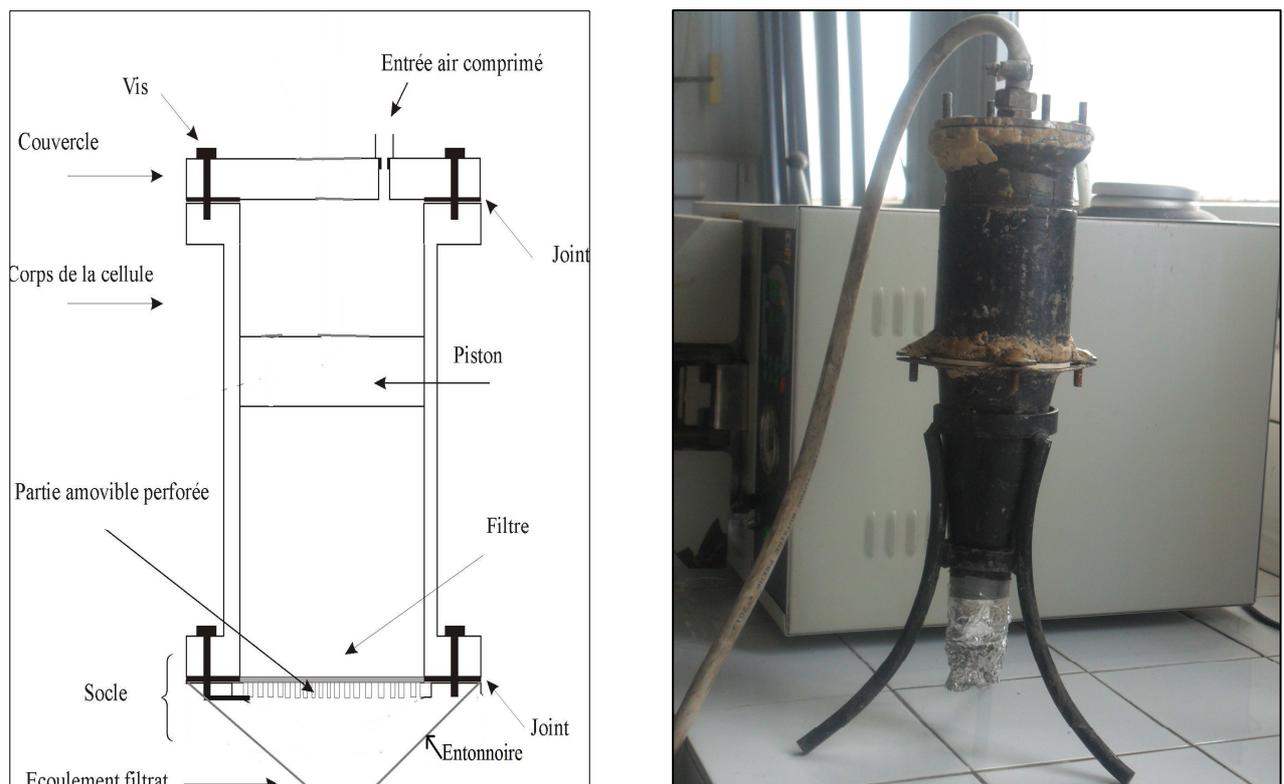
La flocculation de la boue s'effectue dans un jar test (Flocculateur) ayant six rampes de type 100 ml de boue sont prélevés et placés dans un Becher de 600 ml. La quantité de solution de flocculant requise est introduite sous agitation rapide à 150-120 tr/min. Après 20 sec, l'agitation est poursuivie pendant 2 min à une vitesse réduite à 28 tr/min (Krishnamurthy, 2005).

### III.4.3 Filtration

Une cellule de filtration sous pression normalisée (AFNOR, 1981) décrite ci-dessous a été spécialement réalisée pour les essais de déshydratation.

#### III.4.3.1 Description de la cellule de filtration

La cellule de filtration, en acier inoxydable, est de forme cylindrique. Elle est composée de quatre parties distinctes : le piston, le corps de la cellule, l'entonnoir et le couvercle. Le piston est cercle en bois de diamètre de 68 mm et de hauteur 2 cm. Le milieu filtrant (toile ou papier filtre) est disposé sur cette partie amovible. Le corps de la cellule est un cylindre creux dont le diamètre intérieur et la hauteur valent respectivement 70 mm et 130 mm. Le couvercle possède un seul orifice destiné pour l'injection de l'air sous pression. La fixation du corps avec l'entonnoir d'une part, et du couvercle au corps d'autre part, est assurée par deux fois quatre vis. L'étanchéité entre le corps et le couvercle d'une part et le corps et le socle d'autre part est garantie par deux joints en caoutchouc. L'air comprimé est fourni par un compresseur. Le papier filtre utilisé est de 9.0 cm. (Yinguang *et al*, 2004).



**Figure III. 2:** Cellule de filtration sous pression.

**III.4.3.2 Méthode**

Après la mise en place du filtre, le corps de la cellule est fixé hermétiquement sur l'entonnoir. Ensuite, la suspension de boue est transférée dans la cellule de filtration immédiatement après la floculation. Le piston est introduit dans la cellule jusqu'au niveau de la solution ensuite le couvercle est mis en place et après la pression adéquate est appliquée. Pendant la mise en place du piston, un certain volume de filtrat peut s'écouler sous l'effet de la gravité. Il s'agit du volume d'égouttage. De manière à pouvoir comparer les essais, la durée de filtration a été fixée à une heure (Lee et Liu, 2001). Ce temps permet d'atteindre des siccités comparables aux unités de filtration réelle.

**III.4.3.3 Stratégie de conditionnement**

Afin de choisir les conditions optimales de conditionnement et de déshydratation, un plan expérimental a été conçu. Il s'agit d'un plan à trois niveaux dont les deux variables sont la pression de filtration  $\Delta P$  et la dose de flocculant. Les valeurs étudiées correspondent à des  $\Delta P$  similaires à ceux rencontrés dans les filtres presses. La gamme de dosage de flocculant étudiée a été choisie à partir des résultats obtenus par la centrifugation. L'objectif est d'atteindre un gâteau le plus sec possible.

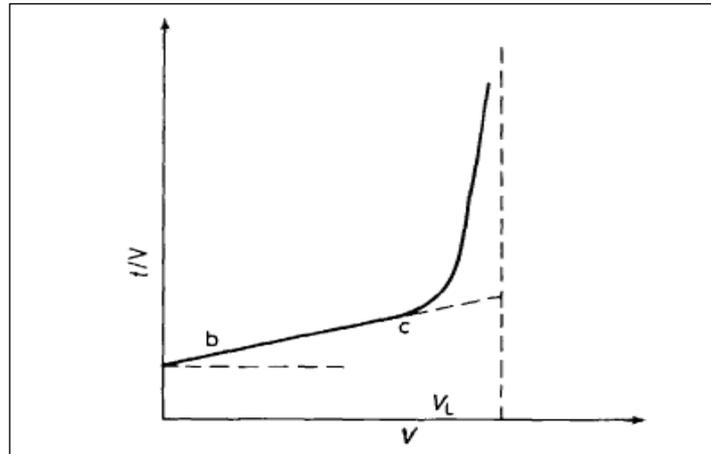
**III.4.3.4 Traitement des résultats**

Les expériences vont être traitées sur deux plans différents. La caractérisation du gâteau va fournir des informations sur la performance de la déshydratation (siccité limite  $S_{IL}$ ). D'autre part, l'analyse des données de filtration permet de déterminer deux grandeurs caractéristiques de la boue: la résistance spécifique à la filtration (RSF) (Mahmut et Ayhan, 2000) et le coefficient de compressibilité ( $s$ ). L'obtention de ce dernier nécessite de travailler sous différentes pressions.

**III.4.3.4.1 Détermination de la résistance spécifique à la filtration (RSF ou  $\alpha$ )**

La grandeur  $\alpha$  se définit comme étant la résistance qu'offre à la filtration une quantité de gâteau contenant un gramme de matières sèches, répartie sur 1 cm<sup>2</sup> de surface filtrante. C'est en fait un paramètre qui relève uniquement des propriétés physiques de la matière à filtrer (Jill Ruhsing *et al*, 2003).

Il découle de la théorie de Carman qui, partant de la formule de Poiseuille pour la vitesse d'écoulement d'un fluide en capillaire, établit l'équation générale de filtration donnant le débit (en cm<sup>3</sup>/s), pour une surface filtrante  $S$  (en cm<sup>2</sup>), sous une pression  $AP$  (en g/cm<sup>2</sup>) (Boeglin, 1970).



**Figure VI.3:** Graphe expérimental  $t/V$  en fonction  $V$  montrant l'existence d'une zone linéaire, suivie par une zone de pente croissante (Boeglin, 1970).

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta PS^2}{\mu(\alpha CV + R_m S)} \cdot \frac{\Delta PS^2}{\mu \alpha CV}$$

Si l'on considère que la résistance du medium filtrant  $R_m$  est négligeable devant la résistance spécifique à la filtration, imposant seule la vitesse de filtration exprimée en  $\text{sec}^2/\text{g}$ , ou en  $\text{cm}/\text{g}$ . L'intégration à pression constante de l'équation différentielle conduit à l'équation simplifiée ci-dessous :

$$(t/v) = (\mu C \alpha V) / (2 \Delta P S^2)$$

Où  $t$  (en sec) est le temps nécessaire au bout duquel un volume  $V$  ( $\text{cm}^3$ ) de filtrat est extrait d'un volume défini de boue, dont la teneur en solide est  $C$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Cette expression montre que le quotient  $t/V$  est une fonction linéaire de  $V$ ; la pente  $b$  de la droite expérimentale permettra le calcul de la résistance spécifique (Boeglin, 1970).

$$\alpha = 2b \Delta P S^2 / \mu C$$

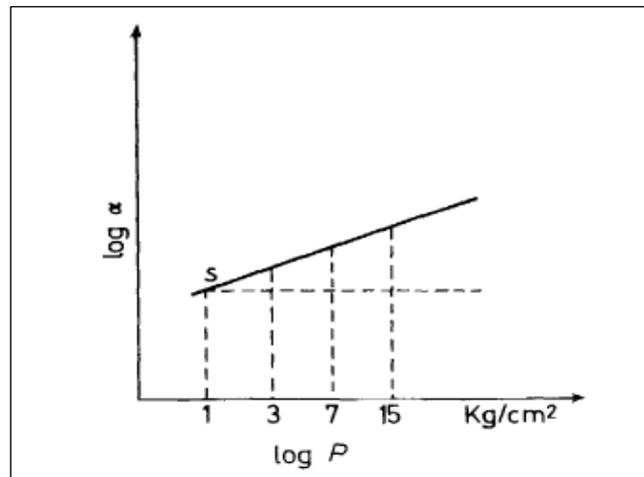
#### IV.4.3.4.2 Détermination du coefficient de compressibilité (s)

Caractérise la façon dont la perméabilité du gâteau filtrant diminue par tassement sous une augmentation de la pression appliquée, en permettant de juger de l'utilité d'application de pressions élevées, dans la mesure où est fonction de  $\Delta P$  suivant la relation :

$$\alpha = \alpha_0 \Delta P^s$$

En effet, suivant que la valeur du coefficient de compressibilité, définie graphiquement par la pente de la droite:  $\log \alpha = s \log P$  est inférieure, égale ou supérieure à l'unité, le débit du filtre, conformément à la relation ci-dessous: augmentera, restera constant, ou diminuera (Boeglin, 1970). Les boues sont dites peu compressibles lorsque  $s$  est inférieur à 0.6 et compressibles pour des valeurs de  $s$  comprises entre 0.6 et 1 (Lacée, 1985).

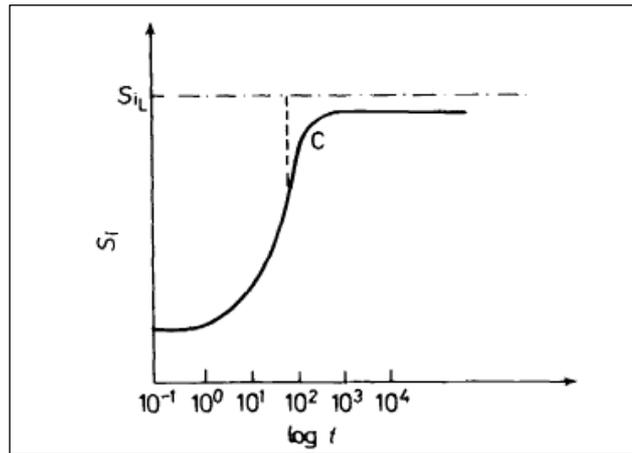
$$(dV/dt) = (\Delta P^{1-s} S^2) / (\mu \alpha C V)$$



**Figure III.4 :** Variation de la RSF en fonction de la pression appliquée (Boeglin, 1970).

#### III.4.3.4.3 Calcul de la siccité limite $S_{IL}$

Correspond à un volume limite  $V$ , à pression élevée, quel que soit le temps de filtration. En effet, la courbe  $t/V = f(V)$ , après la partie rectiligne (domaine d'application de la loi de Carman), s'infléchit vers le haut. Vers une asymptote verticale, alors que le gâteau atteint une siccité dite limite, comme le traduit parfaitement le graphique donnant la siccité moyenne du gâteau au cours de la filtration en fonction du temps. La valeur  $S_{IL}$  est fonction de la pression appliquée (Boeglin, 1970).



**Figure III.4:** Variation de la siccité limite en fonction de la pression appliquée (Boeglin, 1970).

#### III.4.4 Centrifugation

Les essais consisteront à centrifuger la boue conditionnée dans une centrifugeuse de laboratoire, avec des vitesses de rotation opératoires représentatives des conditions industrielles et à mesurer la siccité obtenue et la turbidité du surnageant récupéré. La boue a été centrifugée à 3000 tr/min pendant 2 minutes (Yi-Zhong *et al*, 2003).

Ces essais permettront de définir d'une part, la performance de cette technique et d'autre part le choix et le dosage optimal du système de conditionnement qui a été choisis dans cette étude.

## **CHAPITRE IV**

### **RESULTATS ET DISCUSSION**

#### **INTRODUCTION**

Le conditionnement des boues est une étape clé dans la déshydratation des boues. La taille et la répartition des particules d'une suspension est une propriété fondamentale pour l'efficacité de la déshydratation. L'objectif du conditionnement est d'augmenter la taille des particules en combinant les petites particules en particules plus grosse (Nivelons et Cleyet, 2001).

L'objectif visé par cette recherche est d'étudier la performance du chitosane comme biofloculant dans le conditionnement des boues urbaines par le procédé de filtre-pressé. Pour cela, des caractérisations physico-chimiques ont été effectuées en premier lieu pour mettre en évidence la nature des boues prélevées et de choisir leurs traitement convenable, des essais préliminaires ont été effectuées en deuxième lieu par centrifugation afin de déterminer l'intervalle des doses dans lequel le chitosane est efficace. Ces expériences ont permis de comparer l'efficacité du chitosane avec les polymères synthétiques. Une détermination des conditions opératoires optimales de conditionnement et de déshydratation sur filtre-pressé a été faite en dernier lieu. Il s'agit d'identifier expérimentalement le couple 'dose de floculant- $\Delta P$  de filtration' permettant l'obtention de gâteaux de boue le plus sec possible. Des comparaisons ont également été faites avec les polymères synthétiques.

#### **IV.1 CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES BOUES**

Pour la caractérisation physico-chimique de la boue collectée, nous avons effectué quelques analyses justes après le prélèvement. Il s'agit de la mesure de la RSF, de la viscosité dynamique de la boue, du carbone organique, des résidus calcinés à 550 °C, des matières sèches, de la mesure du pH, et de la température, de la mesure des paramètres de pollution à savoir les nitrites ; les nitrates ; l'azote total ; l'ammonium ; le phosphate total et de la DCO. Le tableau IV.1 indique les caractéristiques physico-chimiques des boues justes après le prélèvement dans la station. Le rapport MV/MS permet de mettre en évidence la nature des boues et leur traitement convenable. En effet, si MV/MS= 50 à 70 %, les boues sont fortement organiques, l'usage des polyélectrolytes cationiques s'impose, les polymères anioniques ayant

une action très défavorable, surtout a dosage élevé. Tandis que si MV/MS= 30 à 35%, les boues sont prédominantes de matières minérales, les polyélectrolytes anioniques sont plus efficaces que les polyélectrolytes cationiques, mais qu'un excès de ces réactifs au-delà d'une concentration optimale, est préjudiciable (Dégrmont, 2007). Dans notre cas, ce rapport est compris entre 65,75% et 74,96 %, notre boue est fortement organique, un traitement avec les polymères cationiques est nécessaire.

**Tableau IV.1 : Caractéristiques physico-chimiques de la boue.**

Paramètres	valeurs	Paramètres	valeurs
Nitrate NO <sub>3</sub> (g/kg MS)	0,555-0,665	Température (°C)	19,2-21,7
Nitrite NO <sub>2</sub> (mg/kg MS)	0,12-0 ,88	Conductivité (µS/ cm)	1966-1541
Ammonium NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g/kg MS)	1,275-0,866	pH	6,77-6,99
Azotes total NT(g/kg MS)	3,751-2,603	Siccité (%)	6,27-7,26
Phosphate total PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (g/kg MS)	0,2988-0,480	MV (g/l)	47-47,73
DCO (mg O <sub>2</sub> /l)	13847-15914	Viscosité (mPa.s)	1,23-1,47
Carbone organique (g/kg MS)	34,98-35,74	RSF. 10 <sup>12</sup> (m/kg)	7,519

## IV.2 ETUDE DU CONDITIONNEMENT ET DE LA DESHYDRATATION

### IV.2.1 Décanteuse centrifuge

La centrifugation relève essentiellement du principe de séparation des phases solide-liquide par décantation accélérée sous l'influence d'un champ centrifuge, auquel est soumise la pulpe boueuse. Elle permet de voir des floes résistants capables de refloculer après cisaillement, une siccité élevée des boues et un concentrât clair. La force centrifuge exerce une compression qui casse les zones de rétention d'eau dans la matrice floculée (Chézaud.D, 2010).

#### IV.2.1.1 Influence de la dose de flocculant sur la siccité du culot

Le dosage du polymère est un facteur important qui impacte de façon significative les performances des outils de déshydratation. La figure IV.1 met en évidence l'influence de la dose de flocculant sur la siccité du culot récupéré. Les résultats montrent que le polymère cationique « Sed CF802 » procure une efficacité intéressante permettant d'avoir des siccités des boues supérieures à celles obtenues aux autres essais avec les d'autres polymères, Le Sed CF802 a permis d'avoir une siccité maximale de 18,39% alors qu'elle n'est que 12,3% sans

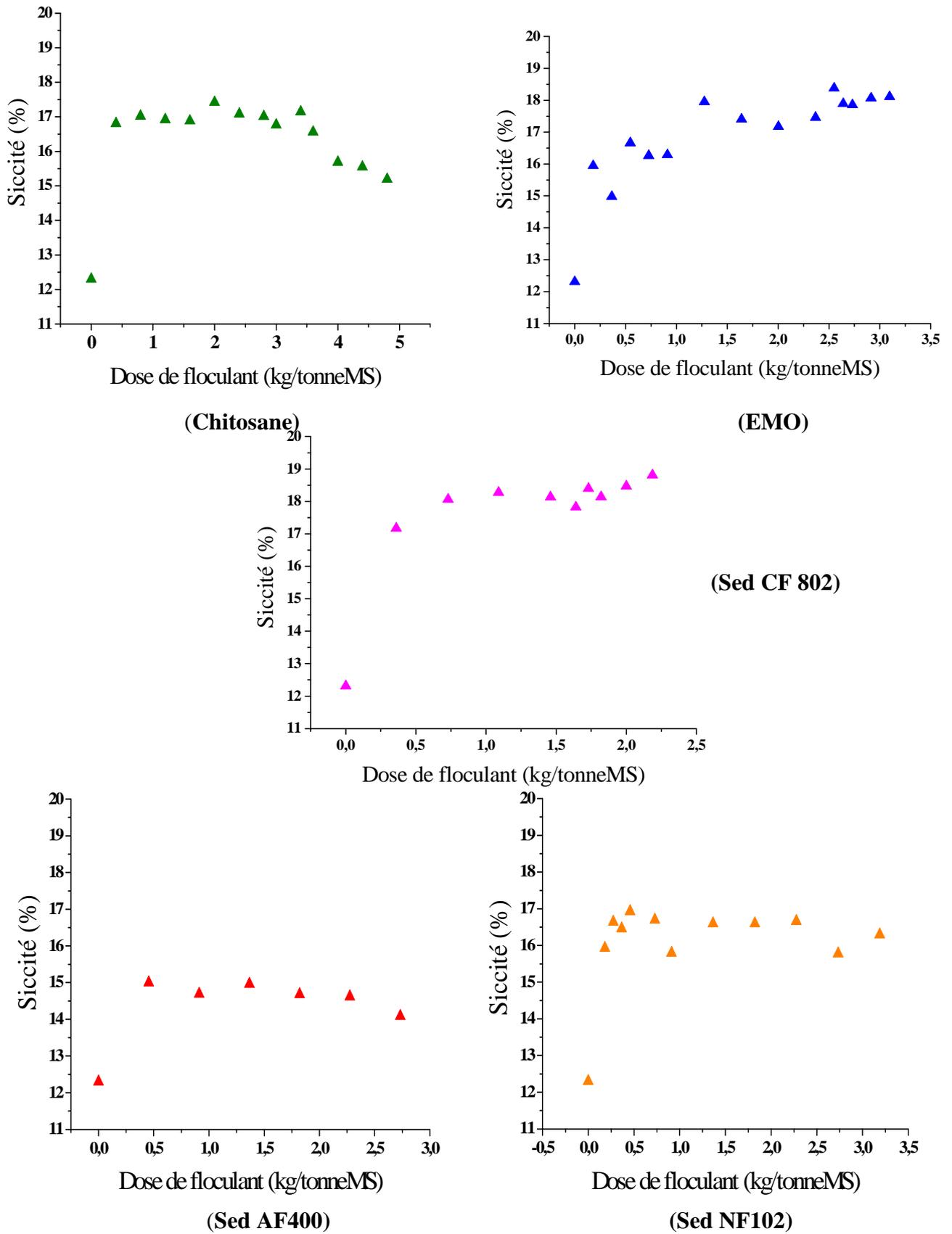


Figure IV.1 : Influence de la dose du flocculant sur la siccité du culot.

ajout de polymère. Le conditionnement des boues avec le chitosane a permis d'obtenir une siccité maximale de 17,42% correspondant à une dose 2 kg/tonne MS. Tandis que avec le Sed CF 802 : 1,73 kg/tonne MS a permet d'avoir une siccité maximale. Avec l'EMO, la siccité maximale a été trouvée 18,38%.

Cette figure montre que tous les polymères favorisent l'augmentation de la siccité, avec pour autant qu'il y ait restabilisation de la suspension due a l'ajout de flocculant en excès à l'exception de Sed NF102 et Sed AF400. Ce dernier provoque une légère augmentation de la siccité et ce à presque toutes les concentrations en flocculant utilisées. La dose optimale est très faible (0,46 kg/tonne MS) comparée aux polymères cationiques, avec une siccité maximale de 15%.

Le Sed NF102 induit également l'augmentation de la siccité (16,93%) avec une faible quantité de flocculant (0,36 kg/tonne MS). Au-delà de cette quantité, on remarque que la siccité reste stable (formation d'un plateau), ce qui veut dire que l'excès en Sed NF102 ne provoque pas une restabilisation de la suspension boueuse.

#### **IV.2.1.2 Influence de la dose de flocculant sur la turbidité du surnageant**

Pour comparer l'effet du chitosane par rapport aux quatre polymères sur les suspensions boueuses, l'abattement de la turbidité est représenté en fonction de la teneur en flocculant (figure IV.2). D'après les observations prises lors de la coagulation-floculation-décantation des essais avec le chitosane et avec les polymères synthétiques cationiques, les solutions finaux sont devenues claires à très claire. Il y a eu un enlèvement évident de la turbidité et MES. Les flocs formés avec le SedCF802 et le EMO ont été plus gros et fragiles contrairement au ceux formés par le chitosane, ces flocs étaient stables. En revanche, lors des essais réalisés avec Sed NF 102 et avec le Sed AF 400, la turbidité n'a pas été totalement éliminée, des très fins flocs ont été formés. La figure IV.2 donne l'évolution de la turbidité en fonction de la dose du flocculant. En effet, le surnageant des solutions boueuses non traitées se caractérise par une turbidité très élevée (565 NTU). Pour le cas où le chitosane est utilisé, nous remarquons une chute brutale de la turbidité atteinte à une faible dose 0,36 kg/tonne MS. Le chitosane favorise l'abattement de la turbidité d'environ 82% à presque 98%, nous remarquons la formation de deux pics, la première à la dose 2 kg/tonne MS avec un taux d'abattement 92,81% et la deuxième à la dose 3,6 kg/tonne MS avec un taux d'abattement 97,46. Nous remarquons également une légère restabilisation de la solution constatée au delà de ces deux pics.

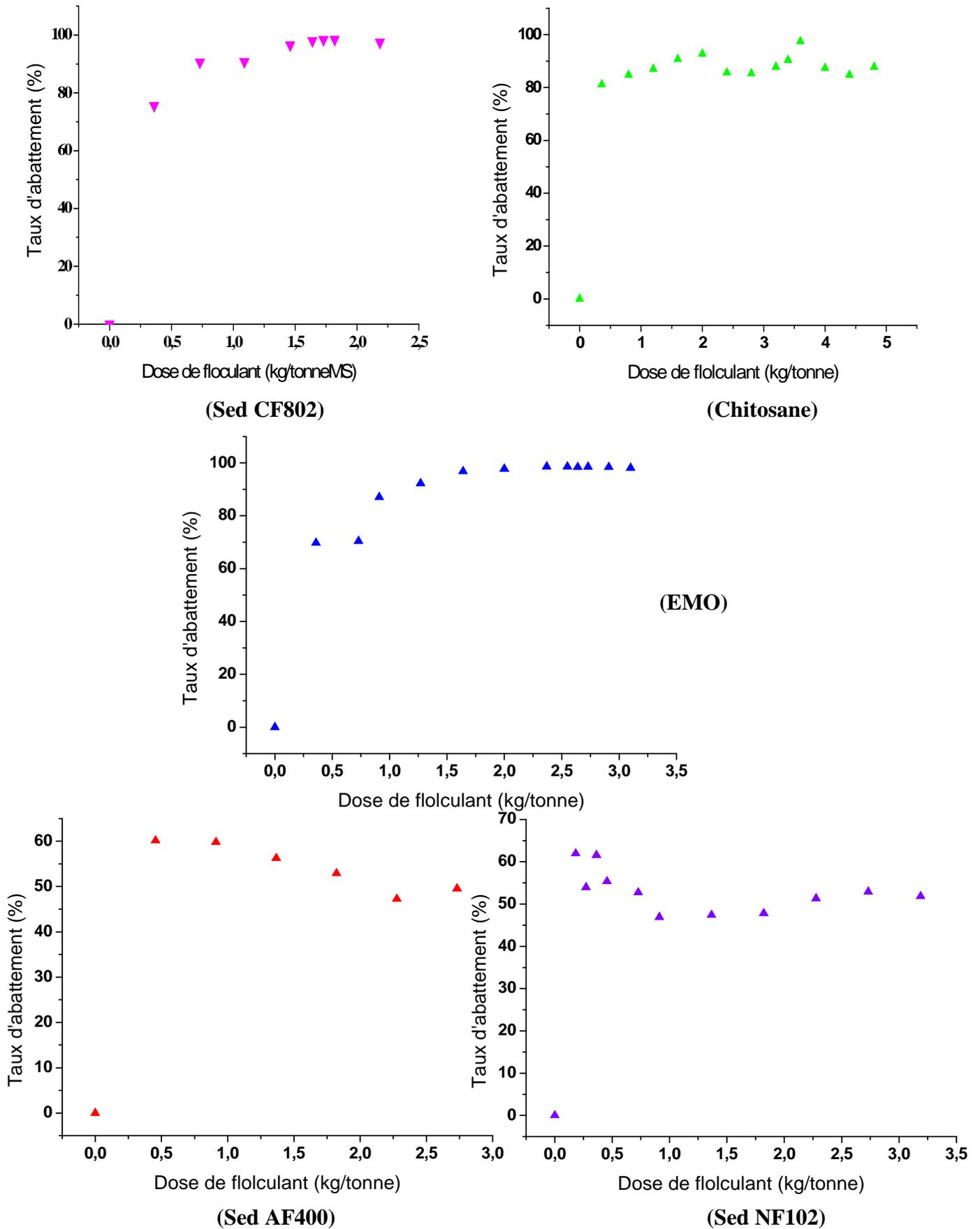


Figure IV.2 : Influence de la dose de flocculant sur la turbidité du surnageant.

Concernant l'EMO, on a remarqué un abattement meilleur atteignant 98,6%. La turbidité diminue progressivement avec l'ajout de celui-ci, la dose optimale se situe dans ce large intervalle [1,64; 3,10]. Au-delà de cet intervalle, la turbidité résiduelle devient moins intéressante.

En effet, le poids moléculaire du polymère influe fortement sur son efficacité. En général, la concentration optimale en polymère à mettre en œuvre doit permettre de laisser au moins la moitié des sites libres sur les particules (Chang *et al*, 1998). Cela explique la formation d'un palier (zone de déstabilisation), en effet, au-delà de la dose optimale, la quantité du polymère qui est en excès se fixe sur la moitié restante de sites libres, dès que ces sites sont totalement comblés, la déstabilisation de la suspension boueuse reprend sa place. La largeur de la zone de déstabilisation de la solution boueuse dépend d'une part de la qualité des colloïdes en solution et d'autre part de la taille du polymère, plus le poids moléculaire est grand, plus la zone est étroite (Mottot, 2000). On constate que l'EMO a un poids moléculaire faible, plus bas que le chitosane et le Sed CF802.

L'utilisation du Sed802 donne un taux d'abattement 98,49% avec seulement 1,73 kg/tonne MS. L'intervalle de la dose optimale est étroit, il est [1,73 ; 1,83]. Le surdosage de celui-ci conduit à une restabilisation de la suspension boueuse.

On note qu'avec 0,36 kg/tonne MS, les taux d'enlèvement de la turbidité avec le Sed CF802 et l'EMO sont 75,58% et 69,73% respectivement. Tandis que, avec la même dose, le chitosane a pu enlever 81,24% de la turbidité initiale.

L'action combinée de la masse et de la charge du polymère contribue à mettre en œuvre à la fois des phénomènes de pontage et de neutralisation de charges (Grégoire *et al*, 2009). Le pontage permet au polymère de fixer un nombre important de particules et de les englober dans des floccs volumineux. L'augmentation de la concentration des particules en suspension favorise leur rapprochement et la possibilité d'être adsorbées au polymère ou à des floccs existants (Baudin *et al*, 2005). Il s'ensuit que la consommation en polymère diminue avec l'augmentation de la teneur en particules dans la suspension (Grégoire *et al*, 2009).

En cas d'excès de polymère, les particules sont totalement isolées de la solution par le polymère. La solution colloïdale redevient stable, il n'y a plus de coagulation/floculation.

En outre, à une concentration faible, le Sed NF 102 provoque un abaissement de la turbidité. Au-delà de cette concentration nous remarquons un palier constant formé pour toutes les concentrations ajoutées. Comparant le Sed NF 102 au chitosane, le Sed CF802 et l'EMO, nous constatons que le Sed NF 102 est légèrement efficace pour le traitement des boues urbaines.

Enfin, le Sed AF 400 induit également à une réduction modéré de la turbidité, elle est de l'ordre de 60,18%, aussi légèrement inférieur au Sed NF 102. Le Sed AF 400 et le Sed NF 102 permettent d'initier les floccs et contribuent également à leur croissance.

D'après ces résultats nous déterminons les intervalles des doses optimales de chaque polymère, qui sont :

**Tableau V.2 : intervalles des doses optimales de chaque polymère.**

Polymère	Plage des doses optimales (kg/tonne MS)	Dose optimale (kg/tonne MS)
Chitosane	3,2-6,3	3,2
SedCF802	1,4- 1,8	1,4
EMO	1,6-1,8	1,6
SedNF102	1,3	1,3
SedAF400	0,4-3,1	0,4

#### IV.2.1.3 Influence de la dose de flocculant sur le pH du surnageant

Lorsqu'on utilise des biopolymères ou des polymères organiques synthétiques, il faut tenir compte non seulement du pH, mais également de la variation de pH qui peut se produire dans la solution. Le Tableau IV.2 donne les variations du pH final durant les essais de coagulation-floculation-décantation centrifuge avec l'ensemble des polymères qui a été choisis.

Nous remarquons que, avec les polymères cationiques et non-ioniques, plus l'augmentation du pH final est faible plus le polymère est efficace. Par contre avec les polymères non-ioniques le pH final augmente et puis il se stabilise (formation d'un palier). Ceci peut s'expliquer par une certaine neutralisation de la surface du polymère lorsque le pH diminue et donc une diminution des répulsions électrostatiques au profit des interactions de Van der Waals (Treguer *et al*, 2005).

Lors de l'utilisation du chitosane, le pH final à la dose optimale n'augmente que de 0,4. En effet, comme le chitosane possède des groupements ionisables qui peuvent donner facilement des réactions de protonation/déprotonation en solution aqueuse. Les interactions électrostatiques entre les fonctions aminées protonées et les charges négatives des molécules anioniques peuvent changer les propriétés acido-basiques du système (Grégoire *et al*, 2009).

L'utilisation des polymères synthétiques modifiée légèrement le pH final (inférieur à 1,30) du surnageant mais avec le chitosane, cette augmentation ne dépasse pas 0,66.

Tableau V.3 : Augmentation du pH final.

Polymère	Dose (kg/tonne MS)	Augmentation du pH	Polymère	Dose (kg/tonne MS)	Augmentation du pH
Chitosane	0,4	0,33	Sedipur CF802	0,91	0,48
	0,8	0,23		1,37	0,4
	1,2	0,57		1,82	0,43
	1,6	0,66		2,28	0,41
	2	0,25		2,73	0,4
	2,4	0,31		0,36	0,98
	2,8	0,47		0,73	1,1
	3,2	<b>0,40</b>		1,09	1,12
	3,6	0,37		1,46	1,08
	4	0,35		1,64	1,3
	4,8	0,29		1,73	0,96
EMO	0,36	0,26	Sedipur NF102	1,82	1,41
	0,73	0,39		2,19	1,11
	0,91	0,68		0,18	0,73
	1,27	0,8		0,27	0,52
	1,64	0,75		0,36	0,62
	2	0,75		0,46	0,58
	2,37	0,67		0,73	0,59
	2,55	0,71		0,91	0,46
	2,64	0,62		1,37	0,79
	2,73	0,87		1,82	0,4
	2,91	0,61		2,28	0,5
3,10	0,76	2,73	1,25		
SedAF400	0,46	0,52		3,19	0,49

**IV.2.2 Cellule de filtration sous pression**

Une filtration sous pression, cherche à générer des floccs qui possèdent une bonne aptitude à la déshydratation sous pression avec la plus faible résistance spécifique possible, une siccité élevée de la boue, un filtrat clair et un décollement aisé du gâteau des toiles filtrantes.

Comme expliqué au paragraphe III.4.3.2 du chapitre III, le temps de filtration est fixé à 1 heure. Les pentes de la droite de Carman ont été déterminées selon la méthode décrite au chapitre III. La Figure IV.3 représente les courbes de filtration obtenues avec les cinq polymères, donnant l'évolution du volume de filtrat en fonction du temps. Le volume d'égouttage ( $V_0$ ) qui s'écoule avant la mise en place du piston est bien visible sur la figure. Le volume d'égouttage ( $V_0$ ) est très petit lorsqu'on n'a pas utilisés le conditionnement chimique. Cela veut dire que la couche de gâteau formée avant démarrage de la filtration sous pression gêne l'infiltration de l'eau mais cela se passe même en ajoutant les coagulant-floculant, donc la seule explication est que les matières colloïdales ne laissent pas l'eau descendre vers le bas et forcer le gâteau à se déformer pour s'infiltrer.

Au vue de ces résultats, la filtrabilité de la boue conditionnée avec le chitosane et le SedCF802 a semblé être plus efficace que l'EMO, le SedAF400 et le SedNF102. De façon générale, une augmentation de la dose du chitosane et du Sed CF802 provoque le déplacement vers le haut des courbes de filtration. Les temps de filtration sont très courts. Aucun blocage du passage du filtrat n'a été marqué.

Contrairement a ce qui a été obtenue avec ces deux polymères, l'excès en EMO, et en SedAF400, engendre une grande altération de la filtration et bloque par conséquent le passage du filtrat à travers le milieu filtrant. Avec l'EMO cette altération est atteinte à la dose 2,55 kg/tonne MS tandis que avec le SedAF400, elle est atteinte à 1,82kg/tonne MS.

En effet, l'excès en EMO, et en SedAF400 conduit à la formation d'une pré-couche sur le papier filtre, inhibant par conséquent le passage du filtrat.

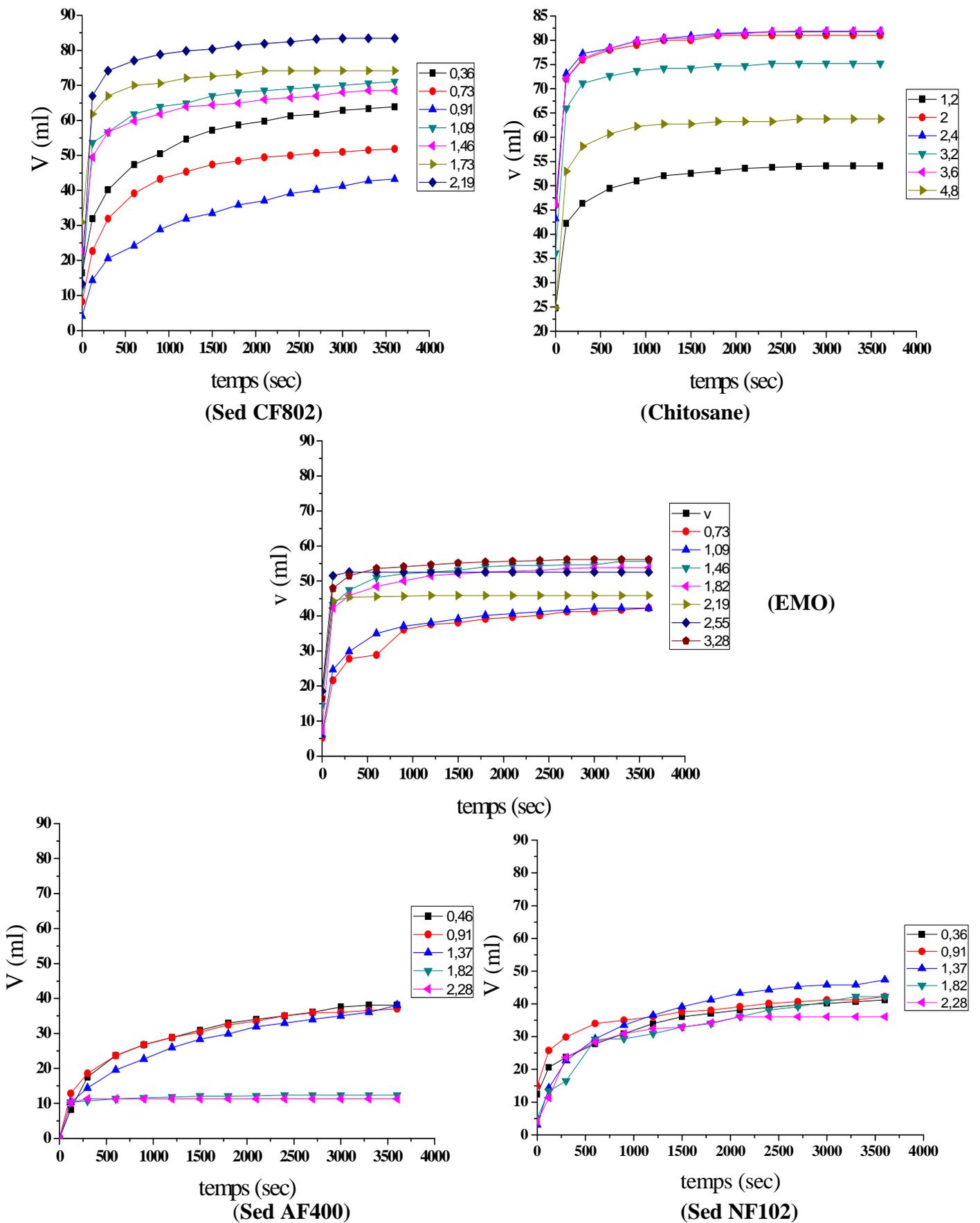


Figure IV. 3: Evolution du volume de filtrat en fonction du temps.

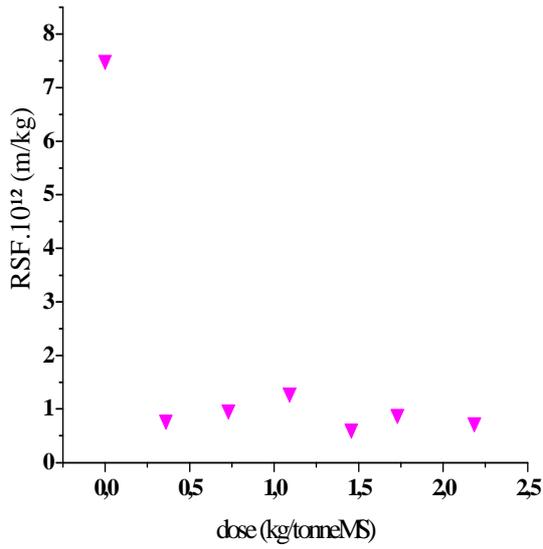
#### IV.2.2.1 Influence de la dose de flocculant sur la RSF du gâteau

La Figure IV.4 met en évidence l'influence du dosage de flocculant sur la RSF. La RSF diminue avec l'ajout de polyélectrolyte. Cette constatation est conforme au but poursuivi par l'ajout de flocculant, qui est de faciliter la déshydratation de la boue en réduisant la RSF. Cependant, les meilleurs résultats ont été obtenus avec le chitosane et le SedCF802. Pour une dose de 3,2 kg/tonne MS de chitosane, la RSF diminue jusqu'à  $0,932 \cdot 10^{12}$  m/kg. Au-delà de cette valeur, la RSF re-augmente. Par ailleurs, l'application du SedCF802, induit à la réduction de la RSF jusqu'à  $0,634 \cdot 10^{12}$  m/kg à la dose 1,46 kg/tonne MS. L'application du SedCF802 à la dose 0,36 kg/tonne MS induit à une chute brutale de la RSF atteinte  $0,988 \cdot 10^{12}$  m/kg.

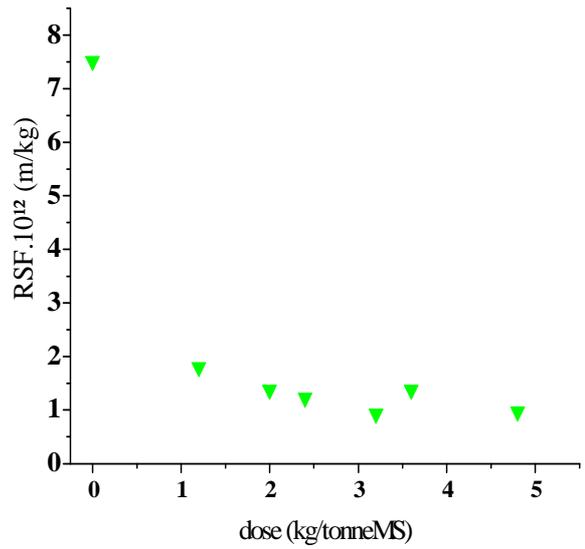
En ce qui concerne les autres flocculants testés, les résultats sont moins concluants. Concernant le EMO, il permet d'avoir des RSF faibles mais il faut cependant noter que, dans l'intervalle de (2,2; 2,5 kg/tonne MS), la filtration des boues devient difficile, les RSF re-augmentent jusqu'à la valeur  $25,51 \cdot 10^{12}$  m/kg. L'augmentation de la RSF avec des doses élevées peut s'expliquer par une restabilisation due à un excès de polymère.

Cependant, ces performances ne sont pas atteintes par le polymère anionique (SedAF400), les petites valeurs de la RSF ont été trouvées seulement avec les faibles doses (0,46 ; 1,37 kg/tonne MS), au-delà de cet intervalle, la filtration des boues était presque nulle. La RSF a été augmentée jusqu'à  $79,41 \cdot 10^{12}$  m/kg. Pour une faible dose de Sed AF400 à 0,46 kg/tonne MS, l'abaissement de la RSF atteint  $1,172 \cdot 10^{12}$  m/kg.

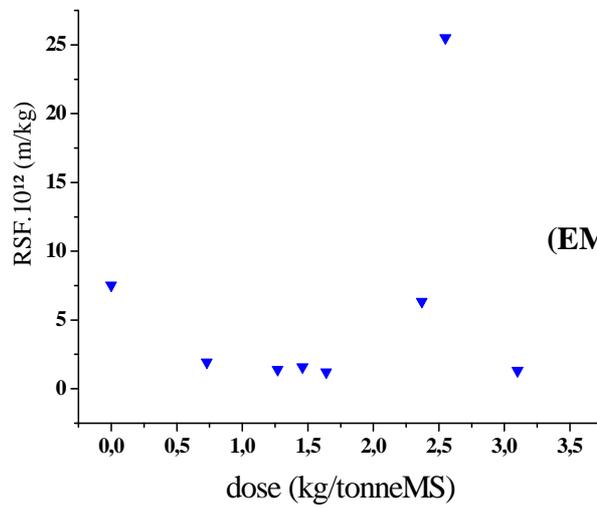
L'ajout de sedipur non-ionique permet d'atteindre une RSF de l'ordre de  $1,393 \cdot 10^{12}$  m/kg avec la dose 1,37 kg/tonne MS, l'excès en polymère engendre une restabilisation de la suspension boueuse conduisant à l'augmentation de la RSF.



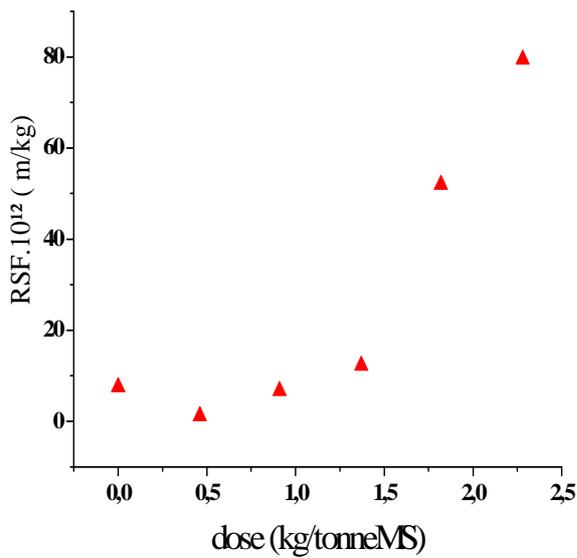
(Sed CF802)



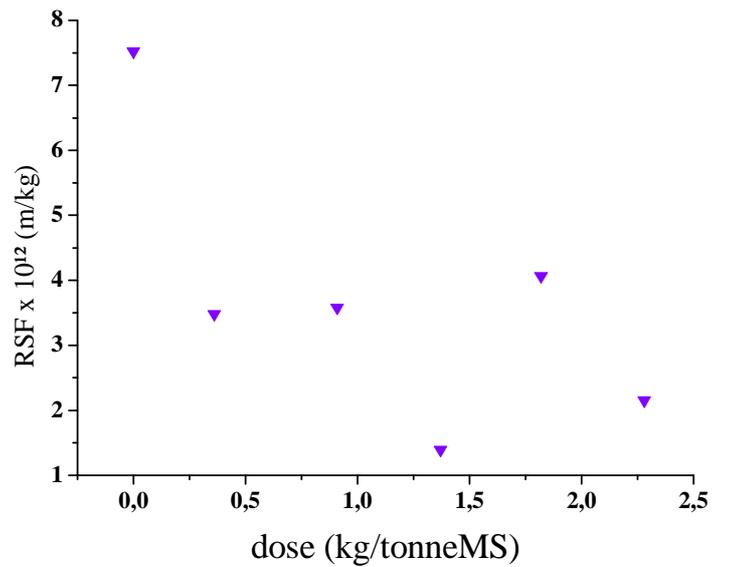
(Chitosane)



(EMO)



(Sed AF400)



(Sed NF102)

Figure IV.4: Influence de la dose de flocculant sur la RSF du gâteau.

**IV.2.2.2 Influence de la dose de flocculant sur la siccité limite du gâteau(S<sub>IL</sub>)**

La Figure IV.6 indique que avec le chitosane, la siccité du gâteau augmente tout d'abord avec l'augmentation de la dose de flocculant puis semble plafonner entre 2 et 4,8 kg/tonne MS. Le gain de siccité est important (33,89% ; 35,01%). Les gâteaux qui ont été formés sont uniformes, décollent facilement des papiers filtres, dépourvus des creusets avec des épaisseurs variant entre 0,5 et 0,6 cm.

Du fait de la grande efficacité du SedCF802, la siccité a augmenté de 35,15% avec seulement 1,73 kg/tonne MS. Le gâteau formé est uniforme, décolle difficilement du papier filtre, ne contenant pas de creusets, son épaisseur est égale à 0,5cm.

Ces résultats ont permis de conclure, que la performance de ces deux polymères est presque semblable et que la différence d'effet semble minime.

En ce qui concerne l'EMO, l'ajout de ce dernier permet d'améliorer la siccité de la boue sans pour autant arriver à la même efficacité du chitosane ou du SedCF802. La valeur maximale de la siccité est de 31,07% à la dose 1,46 kg/tonne MS. A la fin de filtration, le gâteau récupéré est d'une épaisseur égale à 0,6 cm, formé par de grands floccs, présentant des alvéoles très visibles, décolle facilement du papier filtre.

D'après les résultats, les faibles siccités des gâteaux, ont été obtenus avec les polymères anioniques et non-ioniques. On constate qu'un surdosage du polymère influence négativement sur les performances de déshydratation avec des siccités bien plus faibles, une résistance à la filtration beaucoup plus élevée et des qualités de filtrats très mauvaises. Avec 0,46 kg/tonne MS du polymère anionique, le gâteau récupéré est d'une épaisseur égale à 1,3 cm, très lisse, homogène, uniforme et humide, la siccité est de l'ordre de 20,82%. Concernant le polymère non-ionique, il montre une performance légèrement stable en termes de siccité. Le gâteau qui a été formé avec la dose optimale (1,37 kg/tonne MS), a une siccité de 23,57, il n'est pas uniforme, ses floccs sont très petits, dépourvu des alvéoles, son épaisseur est 0,8 cm.

En effet, si l'obtention de floccs volumineux et lourds est favorable à une bonne décantabilité, la filtrabilité ne dépend pas de l'importance en taille des floccs, mais essentiellement de leur cohésion ou de leur résistance mécanique, fonction des forces de liaison unissant les particules élémentaires qui constituent l'agglomérat formé (Nivelons et Cleyet, 2010). La faiblesse de ces liaisons pourra entraîner une modification de la structure du gâteau filtrant, qui en devenant moins poreux, est à l'origine de la diminution de la vitesse de filtration.

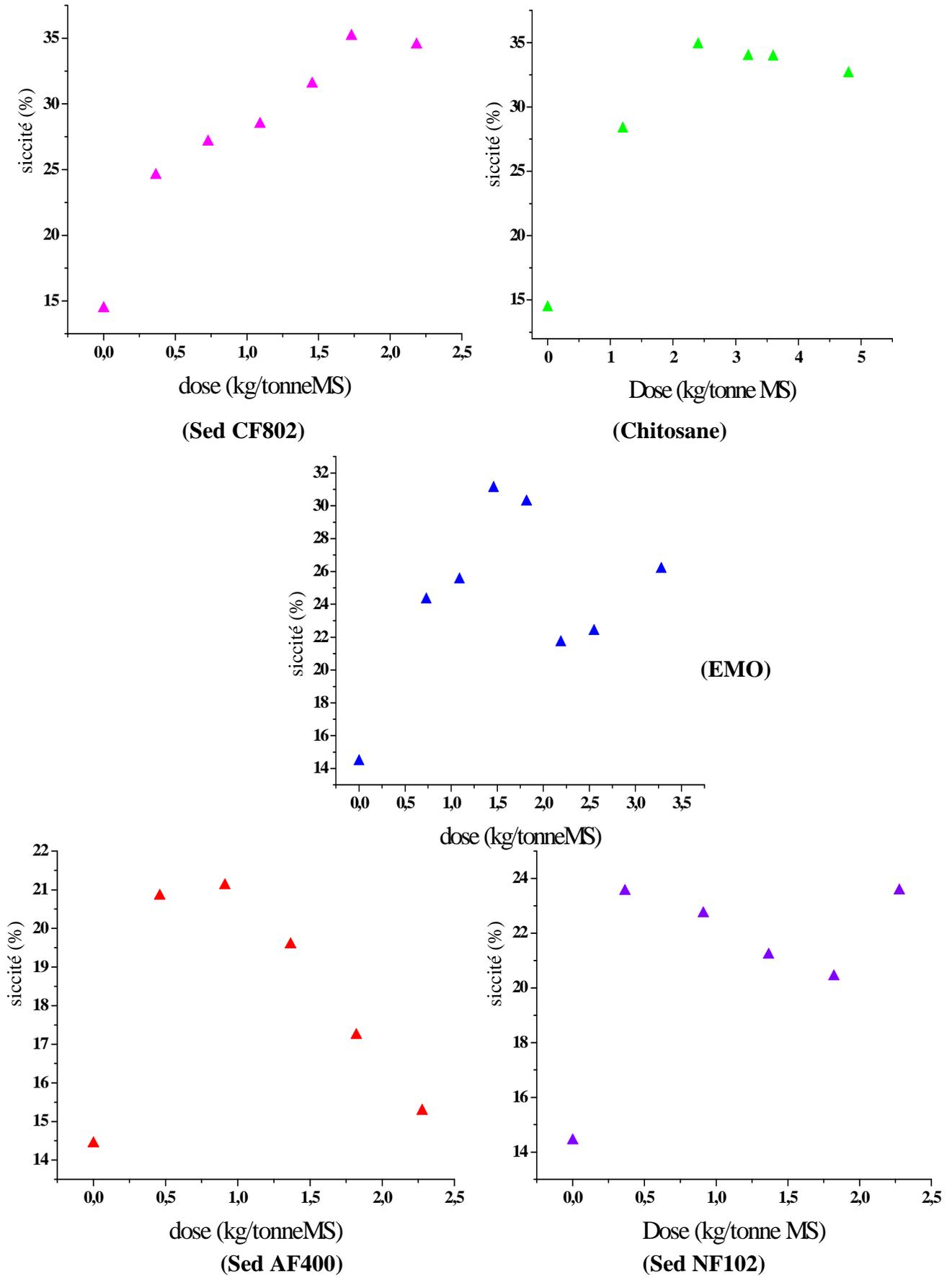


Figure IV.6: Influence de la dose de flocculant sur la siccité du gâteau



**Sans polymère**



**Chitosane**



**EMO**



**Sed CF802**

**Sed AF400:**



**Déstabilisation**



**Restabilisation**

**Sed NF102:**



**Déstabilisation**

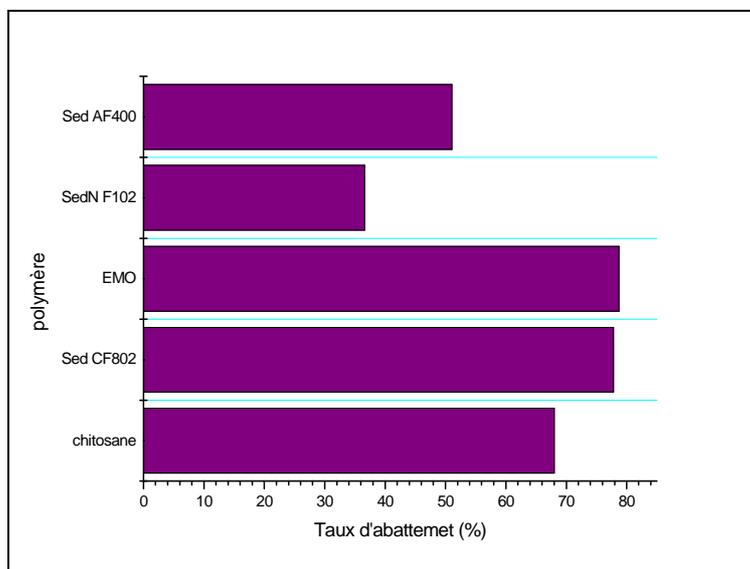


**Restabilisation**

**Figure IV.7:** Photos des gâteaux récupérés.

### IV.2.2.3 Efficacités du floculant dans l'enlèvement de la turbidité

La comparaison entre les taux d'abattement d'enlèvement de turbidité obtenue lors de la filtration avec ceux qui ont été obtenues avec la décantation centrifuge, permet de constater que le filtre-presse est moins performant pour l'enlèvement de la turbidité résiduelle.

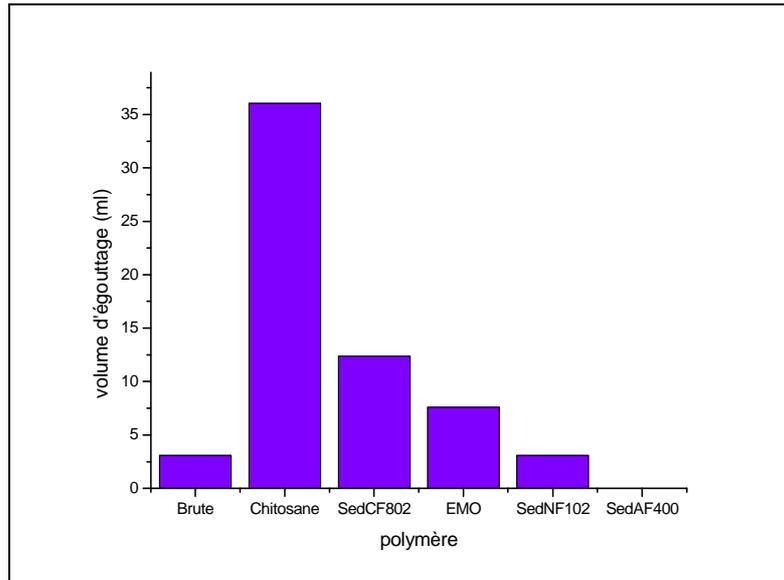


**Figure IV.7 :** l'évolution du taux d'abattement de l'élimination de turbidité par filtration sous pression

Le EMO et SedCF802 ont presque la même performance avec des taux d'abattement : 78,71% ; 77,85% respectivement, tandis que, le chitosane a permis d'éliminer 68% de la turbidité initiale. Les taux d'abattement obtenus avec le SedNF102 et Sed AF400 sont respectivement 36,62 % et 51,08.

### IV.2.2.4 Influence du dosage de floculant sur le volume d'égouttage du filtrat

Il est facile de comparer les résultats présentés ci-dessous à la figure IV.8, du fait de la grande différence entre les volumes d'égouttages des boues conditionnées. Le chitosane montre une efficacité incomparable aux polymères synthétiques, il a permis d'éliminer 36,06% du volume total de boue, deux fois plus que le SedCF802, cinq fois plus que le EMO et deux fois plus que le SedNF102, et la boue sans traitement, aucun volume filtrant a été marqué lors de l'utilisation du SedAF400 (filtration arrêtée).



**Figure IV.8:** Evolution des volumes d'égouttages récoltés au cours de la filtration avec le filtre-presse

#### IV.2.2.5 Influence du $\Delta P$ de filtration sur la résistance spécifique à la filtration

Rappelons que la résistance spécifique à la filtration, RSF, permet de juger de la perméabilité et de la texture du gâteau et de leur évolution avec les conditions de déshydratation. La Figure IV. 9 représente l'évolution de cette RSF avec le  $\Delta P$  de filtration pour la boue brute et les deux polymères les plus performants à la dose optimale. On peut remarquer qu'il existe une pression critique dans laquelle la RSF diminue. Cette évolution peut être caractérisée par une loi de puissance dont l'exposant est appelé 'coefficient de compressibilité' ( $s$ ) (chap. III). Les valeurs de ce coefficient figurent sur le tableau IV.3. Les valeurs comprises entre 0,48 et 0,95 indiquent que le comportement de la boue vis-à-vis la filtration sous pression été totalement modifiée par l'ajout du polymère. Cette modification dépend du type de flocculant ajoutée.

En effet, au-delà de la pression critique le resserrement des pores du gâteau est tel que tout drainage est impossible (Lacée, 1985). La présence de flocculant rend la boue plus facilement déformable.

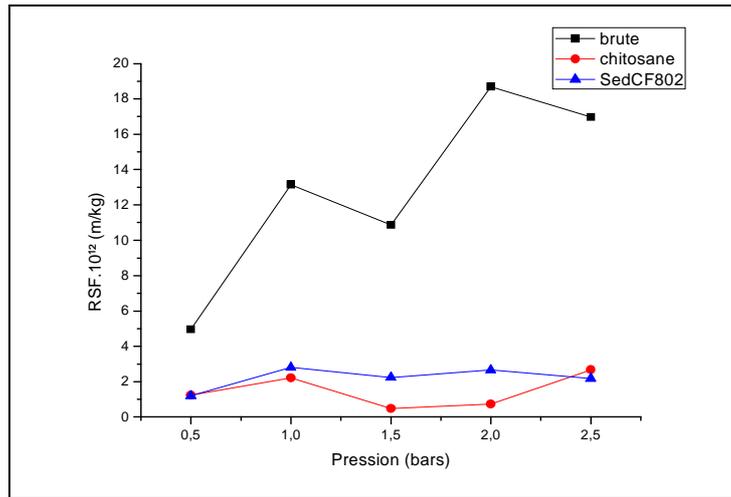


Figure IV.9 : Influence du ΔP de filtration sur la résistance spécifique à la filtration

Tableau IV.3 : Coefficient de compressibilité pour les deux polymères.

Polymère	Coefficient de compressibilité (S)
Sans polymère	0,95
Chitosane	0,48
Sedipur CF802	0,717

D’après le tableau V.3, il semble que la boue utilisée durant cette recherche est un matériau de forte compressibilité, donc à faible tenue mécanique, se filtre en général assez mal. L’ajout du chitosane à permet de lui rendre un matériau à faible compressibilité, constitué de floccs ayant une bonne cohésion et une bonne résistance mécanique à l’écrasement et se filtre plus aisément.

**IV.2.2.6 Influence du ΔP de filtration sur la siccité du gâteau**

Il semble que le ΔP de filtration n’a pas un réelle influence sur la siccité du gâteau (Figure IV. 10). Comme pour le chitosane, le profil de la courbe indique que la siccité la plus faible, et comparables à celles obtenues par la boue brute et par le SedCF802, est obtenue avec la pression critique, soit 30,89%. Pour la boue non traitée et traitée avec SedCF802, les siccités les plus élevés ont été obtenues à la pression critique, on atteint des siccités 15,89 et 33,38% respectivement.

La composition physico-chimique et structurale des boues aura une très forte incidence sur les performances pouvant être atteintes. Pour notre boue, qui est fortement organique (S=0,95), elle est très compressible et donc difficiles à déshydrater, les performances sont moins prometteuses, car le fluage des boues ne permet pas d'appliquer des pressions élevées. Le gain de siccité est alors nettement moindre.

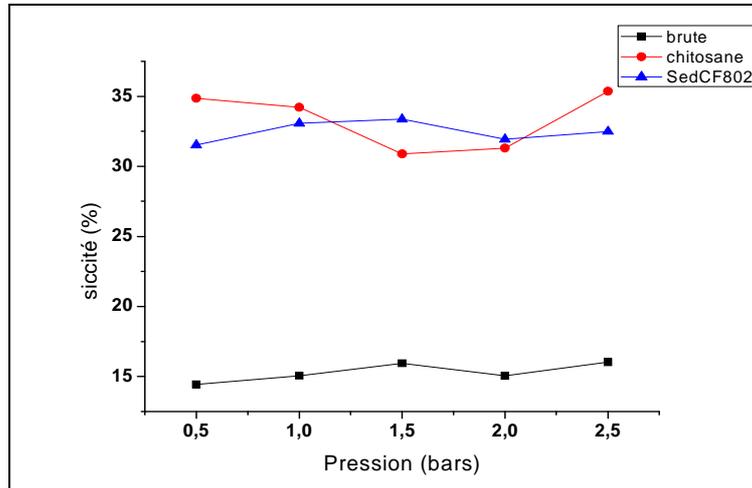


Figure IV. 10 : Influence du  $\Delta P$  de filtration sur la siccité du gâteau.

#### IV.2.2.7 Influence du $\Delta P$ de filtration sur la turbidité du filtrat

D'après la figure IV.11, il semble qu'avec le chitosane et contrairement aux SedCF802 et la boue brute, à la pression critique la turbidité a été augmente, au-delà de laquelle, elle diminue.

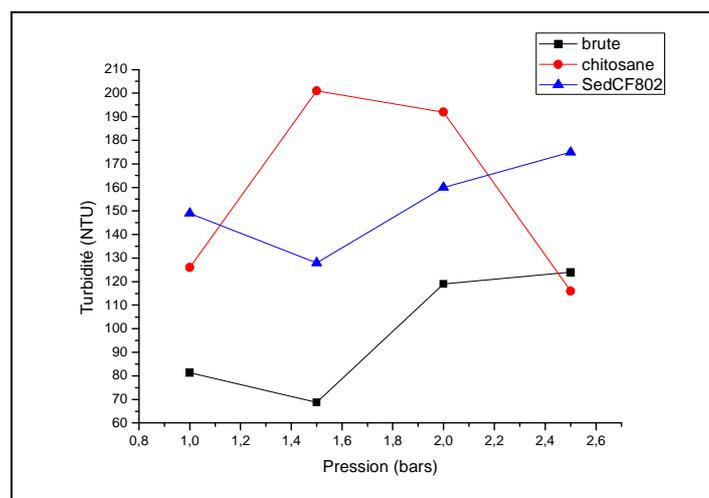


Figure IV. 11: Influence du  $\Delta P$  de filtration sur la turbidité du filtrat.

#### IV.2.2.8 Efficacités du chitosane pour l'enlèvement de la DCO

En effet, après avoir déterminé le couple «  $\Delta P$ - dose de flocculant », des essais ont été faites pour déterminer la performance du chitosane pour l'enlèvement de la DCO, et de lui comparé avec la boue non traitée et traitée avec le SedCF802. Les résultats de la DCO obtenus sont figurés sur le tableau IV.4.

**Le tableau IV.4 : Les abattements en DCO obtenus en absence et en présence du polymère.**

Polymère	DCO (mg/l)	Taux d'abattement (%)
Sans polymère	6000	88,15
Chitosane	666,67	98,68
Sedipur CF802	1800	96,44

Il est clair que le chitosane est très efficace pour éliminer la DCO du filtrat, mais il faut noter que la filtration toute seule permet également d'éliminer un taux important de la DCO initiale. Cependant la DCO d'une eau résiduaire se répartit dans les proportions de 1/3 de MES décantables, de 1/3 de colloïdes et 1/3 de composés solubles (Cardot, 1999).

### IV.3 Discussion des résultats

Le chitosane ainsi que les polymères cationiques (SedCF802 et EMO) s'adsorbe à la surface des particules colloïdales par des liaisons hydrogènes entre les charges négatives situées à la surface de particules et les groupements amine libre du chitosane (Grégoire *et al*, 2009). Les interactions électrostatiques attractives entre les segments du chitosane chargés positivement et les sites chargés négativement à la surface des particules favorisent l'adsorption. La quantité de chitosane adsorbée croît avec l'augmentation de la dose en chitosane ajouté. Des résultats semblables sont rapportés pour la floculation de kaolin avec un polyacrylamide cationique (Chang *et al*, 1998). La taille du polymère élevée combinée à sa configuration très étendue en suspension, du fait de fortes répulsions entre segments de même signe, favorisent le pontage des particules par les segments de polymère adsorbé (Grégoire *et al*, 2009).

D'après l'ensemble des résultats obtenus concernant l'effet de la dose du chitosane, la tendance générale montre que l'ajout d'un excès de chitosane au-dessus de sa concentration optimale entraîne une augmentation de la turbidité finale dans la solution. Une des hypothèses

à ce phénomène serait le renversement des charges et une restabilisation des particules colloïdales qui ont été coagulées. Cette restabilisation des charges est fonction du potentiel zêta de la solution (Grégorie *et al*, 2009).

Le chitosane de par sa constitution possède un surplus électronique et il a été solvaté par l'eau en emprisonnant les particules colloïdales causant la turbidité. L'ajout excessif de chitosane a créé une eau hyper conductrice où les chocs entre les particules dus aux forces électriques étaient tellement intenses qu'ils ont perturbé complètement l'équilibre de la solution (Grégorie *et al*, 2009).

De la même manière, le polymère anionique s'adsorbe à la surface des particules colloïdales par l'intermédiaire de liaison hydrogènes entre les groupements négatifs de surface et les groupements fonctionnels d'amide primaire portés par les segments du polymère. Cependant, la quantité de polymère adsorbé est moindre et limitée, du fait des répulsions électrostatiques entre les charges négatives du polymère. Les polymères adsorbés provoquent un glissement des plans de cisaillement à la surface des particules (Nasser et James, 2003). Au-delà de la dose optimale de floculant, il en résulte des mécanismes d'adsorption d'origine chimique à la surface des particules, résultant en ce que l'agrégation des particules a lieu sans modifications du potentiel zêta (Besra *et al*, 2002).

Le polymère non-ionique peut également s'adsorber aux charges positives situées sur les faces latérales des particules colloïdales, apportant ainsi un supplément de charges négatives. Par ailleurs, par le biais de polycation en solution, le polymère anionique peut s'adsorber aux charges négatives des particules.

Les forces répulsives entre segments de même signe permettent au polymère d'adopter une configuration étendue en suspension, et de s'adsorber aux particules en formant des boucles et des queues qui favorisent les mécanismes de pontage et la formation de larges floes poreux (Gregory, 2005).

Pour des doses en SedNF102 inférieures 1,3 kg/tonne MS, l'adsorption se fait probablement en mosaïque, du fait de la configuration contractée du polymère et de ce que le taux de couverture de la surface des particules est inférieur par rapport à l'optimum (Aguilar *et al*, 2005). Par conséquent, il y a peu de changement du potentiel zêta avec le polymère ajouté.

Ceci suggère que l'épaisseur du polymère adsorbé provoque un moindre décalage du plan de cisaillement et par conséquent une moindre modification du potentiel zêta. Brooks (1973) a noté que l'adsorption d'un polymère neutre à la surface de particules provoque une augmentation de potentiel zêta. Cette augmentation, qui n'est effective que si le plan de

cisaillement n'est pas trop écarté de la surface des particules, résulte du changement de distribution ionique dans la couche diffuse. L'augmentation de la turbidité initiale et par conséquent de la teneur en particules en suspension favorise le pontage par polymère non-ionique, dont la grande taille favorise l'adsorption de plusieurs particules aux segments du polymère (Lée *et al.*, 2001).

#### **IV.4 Conclusion**

L'ensemble des essais réalisés au cours de cette recherche permet de conclure que le procédé de coagulation-floculation à l'aide du chitosane est, sous certaines conditions, parmi les moyens les plus efficaces de traitement des boues urbaines pour l'amélioration de siccité et l'élimination de la turbidité.

Conformément à notre objectif fixé au début de chapitre, nous avons montré qu'il est possible de produire avec le chitosane des échantillons de boue déshydratée dont la siccité est presque constante. Le calcul de la RSF montre que pour la procédure de conditionnement-déshydratation avec le chitosane, la boue offre une résistance plus faible à la filtration, signifiant que la perméabilité du gâteau est plus grande. Il semble donc que le chitosane soit mieux adapté à la boue que les polymères synthétiques, cela est dû à la formation des petits floccs qui ayant une bonne cohésion et une bonne résistance mécanique à l'écrasement, assurant une meilleure floculation de la boue. Ce type de floccs est formé grâce à son caractère polycationique, et à sa conformation spécifique dans les milieux aqueux.

L'étude de la performance du chitosane montre que celui-ci est efficace pour une large gamme de concentrations. La siccité et le taux d'abattement d'enlèvement de la turbidité ont été optimaux pour la dose : 3,2 kg/tonne MS de chitosane.

Le chitosane s'avère également un bon adsorbant. L'enlèvement de la DCO a été de l'ordre de 98,68%.

L'étude de l'efficacité du Sed CF802 montre que ce dernier présente une efficacité similaire au chitosane. À raison de 1,4 kg/tonne MS, il a permis de voir une siccité de 31,51% par filtration ; et de 18,14% par centrifugation, un taux d'abattement d'élimination de la turbidité de 96,58% par centrifugation ; 77,84% par filtration et une réduction de la RSF similaire au chitosane  $0,9 \cdot 10^{12}$  m/kg.

L'EMO montre une efficacité importante dans l'élimination de la turbidité (par centrifugation : 96,89% ; par filtration 78,84% à raison de 1,6 kg/tonne MS), moyenne en termes de siccité (par filtration 31,07% ; par centrifugation 17,40%) et mauvaise dans la réduction de la RSF à des concentrations élevées.

Le Sed AF400 montre une mauvaise performance dans le traitement des boues urbaines, sa performance totale est obtenue à des faibles doses (0,46 ; 0,91 kg/tonne MS). Il permet de voir une siccité de 15% par centrifugation ; de 20,82% par filtration et un taux d'abattement d'enlèvement de la turbidité de 51,08% par filtration ; 60,18% par centrifugation. L'ajout excessif de ce polymère conduit à une altération totale du mécanisme de filtration conduit à une mauvaise réduction de la RSF.

Le Sed NF102 permet de voir une performance modéré dans le traitement des boues urbaines, il a augmenté une siccité de 23,57% par filtration ; de 16,93% par centrifugation et un taux d'abattement d'enlèvement de la turbidité de 61,95% par centrifugation ; 36,62% par filtration. Il est également efficace à des faibles doses (1,3 kg/tonne MS), à cette dose, il a réduit la RSF jusqu'à  $1,393 \cdot 10^{12}$  m/kg.

Le Sed AF 400 et le Sed NF 102 peuvent être utilisés comme des co-coagulants qui permettent d'initier les floccs et contribuent également à leur croissance.

## **CONCLUSION GENERALE**

Les connaissances que nous avons acquises au cours de cette recherche sur le comportement des boues urbaines vis-à-vis des différents outils de déshydratation, nous permettent d'entrevoir des stratégies de traitement des boues adaptées aux configurations des ateliers de déshydratation des boues. La décanteuse centrifuge et la cellule de filtration sous pression et particulièrement adaptée pour comparer l'efficacité de ces différents flocculant, choisir le plus efficace, et en déterminer la dose optimale. Le type du polymère et la concentration de la boue et sa teneur en boues biologiques sont des paramètres qui influent sur le dosage du polymère.

Les résultats présentés dans ce rapport permettent à tout le moins de fournir un ordre d'idée plus clair de l'efficacité et du potentiel technique d'un procédé de coagulation-floculation par le chitosane. Cette étude montre que le chitosane convient mieux à l'épuration des boues urbaines à des faibles concentrations, une élimination majoritaire de la turbidité et une diminution importante du volume de boues issues. Ces propriétés, ajoutées à sa non-toxicité et son prix, fait du chitosane le meilleur substitut aux polyélectrolytes synthétiques conventionnels utilisés jusqu'à présent.

Un acquit important de ce travail est la mise au point d'une technique de déshydratation des boues dont la siccité est reproductible. L'ajout de chitosane à raison de 3,2 kg/tonne MS suivi d'une filtration d'une heure sous une pression de 0,5 bar aboutit à la formation d'un gâteau dont la siccité est similaire à celle obtenue sur site réel (plus de 35%).

Ces résultats expérimentaux permettent de lier la qualité du floc obtenu aux performances des procédés de déshydratation (cellule de filtre-pressé, décantation centrifuge).

L'enjeu est une réduction des coûts de fonctionnement de la station d'épuration par une diminution de la consommation de polymère et/ ou un gain sur la siccité des boues déshydratées. Une diminution du volume des boues produites conduit à une diminution leurs coûts de transport et de valorisation.

L'analyse de la résistance spécifique à la filtration (RSF), de la siccité limite ( $S_{il}$ ) et le coefficient de compressibilité ( $S$ ) a révélé que le conditionnement de la boue avec le chitosane ne nécessite pas une forte pression pour sa déshydratation.

Ce concept de floculation a permis ultérieurement d'orienter les recherches vers la combinaison du chitosane avec d'autres minéraux et/ou polymères organiques pour obtenir des matrices composites pour diverses applications.

La mise en place de projets pilotes utilisant cette technologie est toutefois essentielle afin d'en évaluer la rentabilité et l'efficacité avec plus de certitude. À titre l'ajustement du dosage in situ des produits de réaction et une connaissance pratique de tous les équipements nécessaires sont des facteurs qui risquent d'influencer significativement les coûts en cours.

Le présent travail prépare également le terrain pour plusieurs thématiques de recherches à différentes échelles. Également, il serait pertinent de tester l'utilisation de techniques de réduction des coûts comme la réutilisation des produits de réaction.

Enfin, d'autres connaissances seraient souhaitables pour assurer l'intégration du procédé à la gestion intégrée des boues urbaines et leur valorisation.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

1. Aguilar. M. I., J. Sáez., M. Lloréns., A. Soler., J.F. Ortuño., V. Meseguer., A. Fuentes. *Improvement of Coagulation-Flocculation Process Using Anionic Polyacrylamide as Coagulant Aid.* (2005). *Chemosphere* (58): 47-56.
2. Amoukrane. A., Comel. C., Veron. J. *Landfill Leachates Pretreatment by Coagulation-Flocculation.* (1997). *Water Research* (31): 2775-2782.
3. Azize Ayol., S. K. Dentel., Filibeli.A. *Dual Polymer Conditioning of Water Treatment Residuals.* (2005). *Journal of Environmental Engineering. ASCE.* (131): 1132-1138.
4. Azzouz. A. *Physicochimie des tamis moléculaires.* Alger : Office des Publications Universitaires (1994).
5. Bache. D.H., Papavasiliopoulos. E.N. *Dewatering of Alumino-Humic Sludge: Impacts of Hydroxide.* (2003). *Water Research* (37): 3289-3298.
6. Bodet Jean Marie. *Boues de Station D'épuration Municipale: Les Enjeux et les Risques de leur Utilisation en Agriculture.* (2001).
7. Beaulieu. C. *Les effets multiples du chitosane.* (2007). *Phytothérapie.* N° : Hors-Sé-rie: HS38–HS45.
8. Besra.L., Sengupta.D. K., Roy.S. K and Ay. P. (2002). *Flocculation and dewatering of kaolin suspensions in the presence of polyacrylamide and surfactants.* *International Journal of Mineral Processing*, 66, 203-232.
9. Boeglin. J. C. *Progrès réalisés dans la séparation des phases solide-liquide et le séchage des boues par centrifugation a l'aide de polymères organiques de synthèse.* Journées Annuelles d'Etude de la Société de l'industrie Minérale, Orléans (septembre 1970).

10. Böhnke. B. *Traitement Préalable Des Boues D'épuration : Rapport de Synthèse du Groupe de Travail 5. 4<sup>e</sup> Congrès International du GIROM, 2-5 Juin 1969, à Bâle.*
11. Bratby.J. *coagulation and flocculation in water and wastewater treatment.* (2007). IWA Publishing, 2<sup>ème</sup> Ed.
12. Brooks. D. E. *Effect of neutral polymers on the electrokinetic potential of cells and other charged particles.* (1973). Journal of Colloid Interface Science, 43.
13. Brzeski, M. *Chitin and Chitosan Putting Waste to Good Use.* (1987). Infofish International.
14. Casey. J. T., P. L'hermite. Newman. P.J. *Methods of Characterization of Sewage Sludge: Proceedings of a Workshop Held in Dublin, July 6, 1983.* Ed: D. Reidel Publishing Company.
15. Chih Chao Wu., Jerry J. Wu., Ruey Yi Huang. *Effect of Flocc Strength on Sludge Dewatering by Vacuum Filtration.* (2003), Colloids and surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects (221): 141-147.
16. Crini. G., Badot. P.M. *Traitement et épuration des eaux industrielles polluées.* (2007). PUFC Press, Besançon, France.
17. David. C. Sobeck., Matthew J. Higgins. *Examination of Three Theories for Mechanisms of Cation-Induced Bioflocculation.* (2002). Water Research (36): 527-538.
18. Degremont. *Water Treatment Handbook.* Sixième édition: 2007. Paris, France.
19. Desjardins R. *Le traitement des eaux.* 2<sup>ème</sup> éd, Montréal : Ecole Polytechnique de Montréal (1988) 304.
20. Emilian Koller. *Traitement des Pollutions Industrielles: Eau. Air. Dechets. Sols. Boues.* (2004). Ed: Dunod.
21. Ezziane Souad. *Traitement des eaux de rejets de l'unité ceramit 'TENES'.* (2007). Mémoire de magister, Université de Chlef.

22. François. R., Bertrand. S., Jérémie. C., Morin-Crini. N., Badot. P.M; Winterton. P and Crini. G. *Chitosane Flocculation of Cadboard-Mill Secondary Biological Wastewater*. (2009). Chemical engineering journal (155): 775-783.
23. Rejsek Franck. *Analyse des Eaux : Aspects Réglementaires et Techniques*. (2002). Ed: Centre Régional de Documentation Pédagogique d'Aquitaine.
24. Fung Hwa Chi., Wen Po Cheng. *Use of Chitosane as Coagulant to Treat Wastewater from Milk Processing Plant*. (2006). J Polym Environ (14): 411-417.
25. Gamrasni, M. A. *Utilisation Agricole des Boues d'origine Urbaine*.
26. George. V. F. *Stimulant Sensitive Flocculation and Consolidation for Improved Solid/Liquid Separation*. (2005). Colloïdes and Surfaces Science (292): 598-603.
27. Grégorio. C., Badot. P., Guibal. E. *Chitine et Chitosane. du Biopolymère a L'application*. (2009). Ed : Presse universitaires de Franche-Comité.
28. Gregory, J. *Particles in water*. (2005). Properties and Processes. London: IWA publishing.
29. Hans. S., meersseman. S., Olivier thas. Van der meeren. P. *Influence of Polyelectrolyte Characteristics on Pressure-Driven Activated Sludge Dewatering*. (2005). Colloids and surfaces A: Physicochem. Eng.Aspects (262):40-51.
30. Hejazi, R. et M. Amiji. *Polymerie Biomaterials*. (2002).<sup>e</sup> Ed: New York, Marcel Dekker.
31. Haoua Amadou. (2007). *Modélisation du séchage solaire sous serre des boues des stations d'épuration urbaines*. Thèse doctorat à l'université Louis-Pasteur-StrasbourgI.
32. Hong-liang Zhang., Si-huiWu., Yi Tao., Lin-quan Zang., and Zheng-quan Su. *Preparation and Characterization of Water-Soluble Chitosan Nanoparticles as Protein Delivery System*. Journal of Nanomaterials Volume 2010, Article ID 898910, 5 pages.

33. Ifremer- BRM/ STBM- 2010-V1- Fiche “ en savoir plus” sur la chitine et le chitosane.
34. Institut Algerien du Petrole. *Floculants Synthétiques Organiques dans le Traitement des Eaux* : Séminaire industriel, 6 avril 1986. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
35. Isabelle Feix Et Jacques Wiart. *Connaissance et Maîtrise des Aspects Sanitaires de L'épandage des Boues d'épuration des Collectivités Locales*. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (1998). 2<sup>e</sup> Ed.
36. Jianfen Yu., Dongsheng Wang., Mingquan Yan., Changqing Ye., Min Yang., Xiaopeng Ge. *Optimized Coagulation of High Alkalinity, Low Temperature and Particle Water: pH Adjustment and Polyelectrolytes as Coagulant Aids*. (2007). Environ Monit Assess (131): 377-386.
37. Jin Yi-Zhong., Zhang Yue-Fen., Chen Xiao-Ping., Gao Hua-Sheng. *Application of Organic Polymeric Flocculants in Centrifugal Dewatering of Oil Refinery Sludge*. (2003). Journal of Environmental Sciences Vol.15 (4):510-513.
38. Journal Officiel de la République Algérienne N° 60. 5 Février 1983.
39. Judith B. Carberry, Ph.D., Andrew J. englande, jr, Ph.D., P.E. *Sludge Characteristics and Behavior*. 1983. Ed: Martinus Nijhoff Publishers.
40. Kathy A. Northcott., Ian Snape., Peter J. Scales., Geoff W. Stevens. *Dewatering Behavior of Water Treatment Sludges Associated with Contaminated Site Remediation in Antarctica*. (2005). Chemical Engineering Science (60): 6835-6843.
41. Kebreab A., Ghebremichael and Bengt Hultman. *Alum Sludge Dewatering Using Moringo Oleifera AS A Conditioner*. (2004). Water, air, and soil pollution (158): 153-167.
42. Krishnamurthy.S. Viraraghavan.T. *Conditioning for Dewatering Municipal Wastewater Sludges*. (2005). Energy Sources (27): 113-122.
43. Lacée. C. *Analyse des Boues, A.F.E.E.*, Tome 1 ; Tome 2. (1985).

44. Laurent Dambies., Theirry Vincent., and Eric Guibal. *Treatment of Arsenic-Containing Solutions Using Chitosane Derivatives: Uptake Mechanism and Sorption Performances.*(2002). Water Research (36): 3699-3710.
45. Lee. C.H., Liu. J.C. *Sludge Dewaterability and Flocs Structure in Dual Polymer Conditioning.* (2001). Advances in Environmental Research (5): 129-136.
46. Léonard Angélique. *Étude du séchage convectif de boues de station d'épuration-suivi de la texture par microtomographie à rayons x.* (2002).Thèse Doctorat. Université de LIÈGE
47. L'Hermite, P., and Ott, H. *Processing and Use of Sewage Sludge: Proceedings of the Third International Symposium Held at Brighton, September 27-30, 1983.* Ed: D. Reidel Publishing Company.
48. Lene Haugaard Mikkelsen., Kristian Keiding. *Physic-Chemical Characteristics of Full Scale Sewage Sludges with Implications to Dewatering.* (2002). Water Research (36): 2451-2462.
49. Lin-li chang. Martha d. Bruch. Nancy J. Griskowitz., Steven k. Dentel. *NMR spectroscopy for determination of cationic polymer concentrations.* (2002). Water research (36): 2255-2264.
50. Luminita Ghimici., Stela Dragan. *Transport and Flocculation Properties of Some Cationic Polyelectrolytes.* (2002). Environmental Engineering and Management Journal vol 1 (3): 333-340.
51. Ma, W., Zhao.Y.Q. Kearney. P. *A Study of Dual Polymer Conditioning of Aluminium-Based Drinking Water Treatment Residual.* (2007). Environmental Science and Health Part A (42): 961-968.

52. Mahmut Özacar et ayhan Şengil. *Effectiveness of Tannins Obtained from Valonia As A Coagulant Aid for Dewatering of Sludge*. (2000). Water Research. Vol 34. (4): 1407-2000.
53. McGuire. M. J., Addai-Mensah.J., and Bremmell, K. E. *The effect of polymer structure type, pH and shear on the interfacial chemistry, rheology and dewaterability of model iron oxide dispersions*. (2006) Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 275, 153-160.
54. Min-Chao Chang., Hui-Ling Lin., Cheu-Lin Huang., Yung-Yun Wang., Chi-Chao Wan. *Conditioning Characteristics of Kaolin Sludge with Different Cationic Polyelectrolytes*. (1998). Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng.Aspects (139): 75-85.
55. Mohammad M. Abu-Orf., Christopher A. Walker., Steven K. Dentel. *Centrate Viscosity for Continuous Monitoring of Polymer Feed in Dewatering Applications*. (2003). Advances in Environmental Research (7): 687-694.
56. Muzzarelli RAA. *The Polysaccharides*. Aspinall Go, Ed New York: Academic Press (1985) 417.
57. Nasser. M. S and James, A. E. *The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the flocculation and sedimentation behavior of kaolinite suspensions*. (1973). Separation and Purification Technology, In Press, Corrected Proof.
58. Olivier J., Vaxelaire J. *Municipal sludge dewatering by belt filter press. Effect of operating parameters*. (2005). Journal of Chemical Technology and Biotechnology 80(8): 948-953.
59. OTV, *Traiter et valoriser les boues*, Infinités Communication : Rennemoulin (1997).
60. Penaud V., Delgenès J. P. and Molleta R. *Influence of thermochemical pretreatment conditions on solubilization and anaerobic biodegradability of microbial biomass*. (2000).Environmental Technology, 21: 87-96.

61. Perron V., et Hébert M. *Caractérisation des boues d'épuration municipales – Partie I : Paramètres agronomiques.* (2007). Vecteur environnement, 40 (4): 48-52.
62. Preeda Parkpian., Shing Tet Leong. Preecha Laortanakul and Pichit Poonpolwatanaporn. *Environmental Applicability of Chitosan and Zeolite for Amending Sewage Sludge.* (2002). Journal of Environmental Science and Health. Vol. A37. (10): 1855-1870.
63. Projet CD4CDM Algérie. *Développement des capacités pour la promotion du mécanisme de développement propre.* (2010). Ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et du tourisme.
64. Sajjad Haydar and Javed Anwar Aziz. *Coagulation-Flocculation Studies of Tannery Wastewater Using Combination of Alum with Cationic and Anionic Polymers.* (2009). Journal of Hazardous Materials (168): 1035-1040.
65. Sandrine Parotin, OIEau. *Boues d'épuration : la déshydratation au cœur du traitement.* (2009). Environnement & Technique (284).
66. Sawalha. O and Scholz. *Assesment of Capillary Suction Time (CST) Test Methodologies.* (2007) Environmental technology (28): 1377-1386.
67. Serge Defaye., Dominique Plumail., et Etienne Vitré, Biomasse Normandie. *Les Boues d'épuration Comportent-Elles un Risque de Pollution des Sols ?*(1999). Environnement & Technique (177).
68. Shihab. M. S. *Assesment of Using Chemical Coagulants and Effective Microorganisms in Sludge Dewaterability Process Improvement.* (2010). Environmental Science and Technology 3 (1): 35-46.
69. Spinosa L. *Evolution of sewage sludge regulations in Europe.* (2001), Water Science Technology, 44, (10): 1-8.
70. Sylvie Nivelon et Serge Cleyet. *Optimisation de la Déshydratation des Boues Papetières : Un Enjeu Economique.* (2010). Vol.64 (1).

71. Stickland. A. D., Harbour. P.J. Dixo., P.J. Scales. *Scaling Filtration Time Initial Dependencies of Wastewater Sludges*. (2007) 206-216.
72. Tan Phong Nguyen., Nidal Hilal., Nicholas P. Hankins., Et John T. Novak. *Characterization of Synthetic and Activated Sludge and Conditioning with Cationic Polyelectrolytes*. (2008). *Desalination* (227): 103-110.
73. To Oanh Truong., Robert Hausler., Frédéric Monette., et Patrick Niquette. *Valorisation des Résidus Industriels de Pêches Pour La Transformation de Chitosane Par Technique Hydrothermo-Chimique: The Valorization of Industrial Fishery Waste Through the Hydrothermal-Chemical Transformation of Chitosan*. (2007). *Journal Of Water Science*, Vol. 20, (3): 253-262.
74. Treguer Ronan., Couvert Annabelle., Wolbert Dominique Suty Hervé., Randon Guy Larcip – Enscr. *Etude de la Coagulation Flocculation pour L'élimination des Matières Organiques Dissoutes*. (2005). *Récents Progrès En Génie Des Procédés*(92).
75. Valo A., Carrère H., and Delgenès J. P. *Thermal, chemical and thermo-chemical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion*. (2004). *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 79: 1197-1203.
76. Venault. A., Vachoud. L., Pochat. C., Bouyer. D. and Faur. C. *Elaboration of Chitosane/Activated Carbon Composites for the Removal of Organic Micropolluants from Waters*. (2008). *Environmental Technology*, Vol 29: 1285-1296.
77. Walaszek. W, P. Ay. *Pelleting Flocculation-An Alternative Technique to Optimise Sludge Conditioning*. *Mineral Processing* (76): 173-180.
78. Wang.J.S. Liu.J.C. And Lee. D. J. *Dual Conditioning of Sludge Utilizing Polyampholyte*. (2005). *Journal of Environmental Engineering* (131): 1659-1666.
79. Wayne A. Bough., D. R. Landes., Josephine Miller., Young. C.T., Mcwhorrt. T. R. *Utilization of Chitosan for Processing Wastes and Treatment Systems*.

80. Webber M D. *Valorisation agricole des biosolides municipaux : Revue de littérature et recommandation concernant l'impact des sels d'aluminium et de fer sur la disponibilité du phosphore du sol.* (2003). *Agrosol*, 14 (1): 22-27.
81. Wu. R.M.,Lée. D.J., Wang. C.H. Wang., Chen.J.P. And Tan. R. B. H. *Novel Cake Characteristics of Waste-Activated Sludge.* (2001). *Water Research*. Vol. 35(5): 1358-1362.
82. Xin Feng., Jinchuan Deng., Hengyi Lei., Tao Bai., Qingjuan Fan Et Zhaoxu Li. *Dewaterability of Waste Activated Sludge with Ultrasound Conditioning.*(2009). *Biosource Technology* (100): 1074-1081.
83. Yang Mu. Han-Qing Yu. *Rheological and fractal characteristics of granular sludge in an upflow anaerobic reactor.* (2006). *Water Research*, 40: 3596 – 3602.
84. Yinguang Chen., Yin-Sheng Chen. And Guowei Gu. *Influence of Pretreating Activated Sludge with Acid and Surfactant Prior to Conventional Conditioning on Filtration Dewatering.* (2003). *Chemical Engineering Journal* (99): 137-143.
85. Zemmouri H. *Utilisation du chitosane comme agent flocculant dans le traitement des eaux. Mémoire de Magister.* (2008). Laboratoire de Biotechnologie Environnementale et Génie des procédés, Ecole Nationale polytechnique, Alger, Algérie.
86. Zhao. Y.Q., Bache. D. H. *Integrated Effects of Applied Pressure, Time, and Polymer Doses on Alum Sludge Dewatering Behavior.* (2002). *Waste Management* (22): 813-819.
87. Zhao. Y. Q. *Correlations Between Flocc Physical Properties and Optimum Polymer Dosage in Alum Sludge Conditioning and Dewatering.* (2003). *Chemical Engineering Journal* (92): 227-235.