



PDF
Complete

*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

ent Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB DE BLIDA



Faculté de technologies

Département de Chimie industrielle

Mémoire Présenté par

ANTAR Soumya

En vue d'obtenir le diplôme de Master

Option : **Chimie pour les sciences de l'environnement**

Titre

**CONDITIONNEMENT DES BOUES D'ÉPURATION PAR DES
POLYMERES NATURELS
« LE CHITOSANE ET LE JUS DE CACTUS »**

Proposé par : Professeur **A. AOUABED** (université de Blida)

Promotion 2011/2012

Remerciement

Ce travail a été réalisé au laboratoire du département de chimie industrielle à l'université de Blida. Je tiens à saisir cette occasion et adresser mes sincères remerciements à :

Tout d'abord mon dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Je remercie mon encadreur le Professeur Ali AOUABED, et je lui exprime toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses orientations, ses qualités humaines et sa constante disponibilité qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

J'exprime ma plus profonde gratitude à mes professeurs du département de chimie industrielle pour l'ensemble des connaissances et compétences qu'ils m'ont apportées au cours de ma formation, ainsi que notre responsable de Master Madame HADJ ZIAN.

Mes remerciements s'adressent également à l'équipe administrative du département particulièrement le chef du département Monsieur Mohamed HOUARI pour son support administratif constant.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux membres de jury, pour l'honneur qu'ils me font de juger ce travail. Qu'ils soient assurés de mon entière reconnaissance.

Cette page serait incomplète sans les remerciements de mes proches. Bien évidemment, je remercie mes chers parents, de m'avoir constamment soutenu dans ce long apprentissage universitaire et pour leurs enseignements qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui. A mes sœurs, mon frère, Sid Ahmed et mon fiancé.

Sans oublier tous ceux qui ont une relation de proche ou de loin avec la réalisation du présent travail : Zineb, Hayat, Salima, Seif Eddine, et toutes les amies.

ملخص

في هذا العمل اهتمنا بعملية التعبئة الكيميائية و ذلك بإضافة بوليميرات طبيعية للحمأة الناتجة عن معالجة مياه الصرف الصحي و المأخوذة من محطة بني مسوس المتواجدة بمنطقة الجزائر و بدراسة ريولوجية الحمأة . أظهرت النتائج بأن البوليميرات الطبيعية المستعملة فعالة في هذه العملية و هذا من خلال الحد من العكارة (93%) و المقاومة المحددة للترشيح (0.0181×10^{12} م / كغ الكيتوزان و 0.1504×10^{12} م / كغ لعصير الصبار) وجفاف متزايد (23.51% للكيتوزان و 23.07% في حالة من عصير الصبار) . وتبين أن ريوغرامات الحمأة تعتبر سوائل غير النيوتونية مع عتبة الإجهاد. أظهرت النتائج بأن البوليميرات الطبيعية المستعملة فعالة بالإضافة إلى أنها غير سامة و بشكل خاص قابلة للتحلل.

الكلمات المفتاحية : تعبئة الحمأة، الكيتوزان، عصير الصبار، الريولوجيا.

Résumé

Dans ce travail on s'est intéressé au conditionnement chimique par deux biofloculants des boues de la station d'épuration des eaux usées de Beni-Messous située dans la région d'Alger, ainsi qu'une étude rhéologique. Les biofloculants sont efficaces pour le conditionnement des boues vis-à-vis l'abattement de la turbidité (93%), de la résistance spécifique à la filtration ($RSF = 0.0181 \times 10^{12}$ m/kg pour le chitosane et 0.1504×10^{12} m/kg pour le jus de cactus) et l'augmentation des siccités (23.51% pour le chitosane et 23.07 % dans le cas du jus de cactus). Les rhéogrammes révèlent que les boues étudiées sont des liquides non-newtoniens à contrainte seuil. Les biopolymères ont été efficaces, de plus ils sont naturels, non toxiques et surtout biodégradables.

Mots clés: conditionnement des boues, chitosane, jus de cactus, rhéologie.

Abstract

In this work we became interested in the chemical conditioning by two biofloculants of sludge from wastewater treatment plant of Beni-Messous located in the region of Algiers, and a rheological study. The biofloculants are effective for sludge conditioning vis-à-vis the reduction of turbidity (93%), the specific resistance to filtration ($RSF = 0.0181 \times 10^{12}$ m / kg for chitosan and 0.1504×10^{12} m / kg for cactus juice) and the increased dryness (23.51% for chitosan and 23.07% in the case of cactus juice). The rheograms show that sludge is considered as liquid non-Newtonian yield stress. Biopolymers were effective , natural, non-toxic and biodegradable especially.

Keywords: sludge conditioning, chitosane, cactus juice, rheology.

Table des matières

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des matières

Introduction générale..... 11

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Origine et devenir des boues résiduaire..... 14

I.1.1. Les eaux usées..... 14

I.1.1.1. Définition..... 14

I.1.1.2. Epuration des eaux usées..... 14

I.2. Les boues des stations d’épurations..... 18

I.2.1. Types de boues..... 18

I.2.2. Etats physiques des boues..... 19

I.2.3. Traitement des boues..... 20

I.2.3.1. L’égpaississement..... 21

I.2.3.2. La stabilisation..... 22

I.2.3.3. Le conditionnement..... 26

I.2.3.4. La déshydratation..... 27

I.2.4. La floculation des boues..... 27

I.2.5. Types de floculants..... 28

I.2.5.1. Les réactifs minéraux..... 28

I.2.5.2. Les polyélectrolytes..... 28

I.2.5.3. Les polymères naturels « biopolymères »	28
I.3. La rhéologie	37
I.3.1. Introduction	37
I.3.2. Définition	37
I.3.3. Notion de mouvement laminaire de cisaillement	38
I.3.3.1. Définition	38
I.3.3.2. Déformation et vitesse de cisaillement	39
I.3.4. Propriétés d'écoulement des liquides	40
I.3.4.1. Les fluides Newtoniens	40
I.3.4.2. Les fluides non newtoniens	40
I.3.5. Les comportements rhéologiques	43
I.3.6. Etat d'art	43

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA STATION D'ÉPURATION DE BENI-MESSOUS

II.1. Introduction	46
II.2. Situation géographique	46
II.3. Réalisation de la STEP	46
II.4. Données de base (débit, pollution, DBO ₅ , MES...)	47
II.5. Principe du traitement adopté	48

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

III.1. Introduction	52
III.2. Matériels et méthodes	52
III.2.1. Matériels	52

III.2.2. Méthodes	53
III.2.2.1. Echantillonnage	53
III.2.2.2. Caractérisation des boues	53
III.3. Le conditionnement des boues	58
III.3.1. Préparation des flocculants	58
III.3.1.1. Le chitosane	58
III.3.1.2. Le jus de cactus	59
III.3.1.3. Variation du pH de la boue	60
III.4. La rhéologie	60
III.4.1. Le rhéomètre	60
III.4.2. Procédure	60

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction	63
IV.2. Caractérisation de la boue brute	63
IV.3. Caractérisation de la boue conditionnée	64
IV.3.1. Résultats de la filtration sous vide	64
IV.3.2. Résultats de la siccité du gâteau	67
IV.3.3. Résultats de la mesure de la turbidité du filtrat	68
IV.3.4. Résultats de la mesure du pH	70
IV.3.5. Résultats de la résistance spécifique à la filtration	71
IV.3.6. Mesures rhéologiques	74
IV.4. Variation du pH	76
Conclusion générale	81

Perspectives

Références bibliographiques

Cette étude, a pour but d'étudier la faisabilité de l'utilisation du chitosane et de jus de cactus dans le conditionnement chimique des boues urbaines issues de la station d'épuration des eaux usées de Beni-Messous. La capacité floculante de chacun d'eux et l'amélioration de la déshydratation des boues liquides ont été étudiées.

La boue brute possède une siccité après filtration sous vide de 18.88 %, l'objectif de la déshydratation est d'amener ce chiffre à des valeurs tournant autour de 25 - 30 %, afin d'avoir des boues solide et de réduire leurs volume pour pouvoir les transporter plus commodément. Dans notre cas en appliquant la filtration sous vide (un papier filtre Watman de 0.45 μm), on a obtenus des siccités relativement faibles (23.51 % en utilisant le chitosane et 23.07 % dans le cas du jus de cactus) en comparaison avec celles obtenues en utilisant une filtration sous pression (30 à 35%).

Les biofloculants sont efficaces pour le conditionnement des boues vis-à-vis l'abattement de la turbidité (93%) et de la résistance spécifique à la filtration ($\text{RSF} = 0.0181 \cdot 10^{12} \text{ m/kg}$ pour le chitosane et $0.1504 \cdot 10^{12} \text{ m/kg}$ pour le jus de cactus). Cependant, le chitosane a une action plus rapide que le jus de cactus qui connaît une action plus douce et plus lente.

Lors de la variation du pH, le meilleur résultat de la siccité est obtenu à $\text{pH} = 4$ (siccité = 24.13%). A $\text{pH} = 7$ la siccité est de 23.51%, mais il est préférable de travailler à pH neutre puisque nous avons obtenu des valeurs plus faibles de turbidité et de RSF (turbidité = 1.9 NTU, $\text{RSF} = 0.0374 \cdot 10^{12} \text{ m/kg}$) par rapport à celles obtenues à $\text{pH} = 4$ (turbidité = 3 NTU, $\text{RSF} = 0.192 \cdot 10^{12} \text{ m/kg}$).

Les rhéogrammes révèlent que la boue fraîche et la boue conditionnée avec le jus de cactus et le chitosane sont des liquides non-newtoniens à contrainte seuil, c'est à dire que la boue a besoin que la contrainte atteigne une valeur minimale pour qu'elle s'écoule. Le modèle de Bingham semble le mieux adapté pour décrire le comportement plastique de la boue conditionnée.

Il est à noter que le chitosane et le jus de cactus sont des polymères naturels, non toxiques et surtout biodégradables, ne provoquent pas de nuisances ni pour la santé humaine



PDF
Complete

*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

Conclusion générale

l'application contribue actuellement à la valorisation des ressources naturelles et au développement durable.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Etats physiques des boues en fonction de la siccité	..19
Tableau I.2 : Le temps de la digestion des boues urbaine en fonction de la température	...22
Tableau I.3 : Les différents Comportements rhéologiques des matériaux	.43
Tableau II.1 : Débits à l'entrée de la STEP de Beni-Messous	...47
Tableau II.2 : Charges polluantes de la STEP de Beni-Messous	...48
Tableau IV.1 : Résultats de la caractérisation de la boue brute	..63
Tableau IV.2 : Caractéristiques de jus de cactus	64
Tableau IV.3 : Résultats du conditionnement par le chitosane	..72
Tableau IV.4 : Résultats du conditionnement par le jus de cactus	.73
Tableau IV.5 : Résultats de la filtration sous vide	..74
Tableaux IV.6 : Résultats de la variation du pH	.78

Liste des figures

- Figure I.1 :** Installation courante d'égouttement des eaux usées 15
- Figure I.2 :** Représentation schématisée d'un système de traitement secondaire par boues activées 17
- Figure I.3 :** Les différentes étapes de traitement des boues 20
- Figure I.4 :** Fosse IMHOFF 23
- Figure I.5 :** Bassin de stabilisation aérobie 24
- Figure I.6 :** Stabilisation à la chaux des boues liquides 25
- Figure I.7 :** Détail de l'Opuntia (Nopal) 30
- Figure I.8 :** Structure chimique du chitosane 34
- Figure I.9 :** Forces agissant sur deux éléments de couches voisines 38
- Figure I.10:** Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles 39
- Figure I.11:** Courbes d'écoulement de fluides présentant une contrainte critique 41
- Figure I.12:** Courbes d'écoulement des principales catégories de fluides sans contrainte critique 42
- Figure II.1:** Vue d'ensemble de la STEP de Beni- Messous 49
- Figure III.1:** Dispositif de la filtration sous vide 56
- Figure III.2 :** Le rhéomètre utilisé 60
- Figure IV.1 :** Variation du volume filtré en fonction du temps à différentes concentrations du chitosane 65

Figure IV.2 : Variation du volume filtré en fonction du temps à différentes concentrations du jus de cactus ë .65

Figure IV.3 : Variation de la siccité du gâteau en fonction de la dose des biofloculants ë ...67

Figure IV.4 : Variation de la turbidité en fonction des doses des biopolymères ë ë ë ë68

Figure IV.5 : Variation du pH des filtrats en fonction de la concentration des floculants ë .70

Figure IV.6 : Variation de la RSF en fonction de la dose du chitosane et de jus de cactus ë 71

Figure IV.7 : Courbes d'écoulement de la boue conditionnée avec le jus de cactus à différentes concentrations ë 75

Figure IV.8 : Courbes d'écoulement de la boue conditionnée avec le chitosane à différentes concentrations ë ..75

Figure IV.9 : Résultats de la variation du pH ë .77

L'eau a toujours été synonyme de vie et de croissance. Cet air bleu est tout d'abord essentiel à la survie de l'être humain, aussi partout dans le monde, l'eau douce et potable est un bien de plus en plus cher et de plus en plus rare. En effet, la consommation d'eau croissante correspond aux rejets d'eaux usées croissants, avec pour conséquence une diminution conjointe de la quantité et de la qualité des eaux douces terrestres [1]. Ces eaux usées doivent être épurées avant d'être rejetées dans le milieu récepteur.

L'épuration biologique aérobie, qu'elle s'applique à des eaux urbaines ou à des effluents industriels, consiste à mettre en contact la matière organique contenue dans les eaux usées au contact d'un écosystème actif en présence d'oxygène. Composé essentiellement de bactéries et de protozoaires, celui-ci va se nourrir de la matière organique et l'oxyder. Cette voie de biosynthèse bactérienne a pour conséquence directe la production de « **boues d'épuration** ». [2]

Le terme « **boues** » est le terme générique employé pour caractériser les résidus ou sous-produits issus des procédés de séparation liquide-solide des installations de traitement et d'épuration des eaux résiduaires. [3]

La production de boues résulte d'une accumulation consécutive de trois phénomènes combinés : la production de micro-organismes actifs ou morts, l'accumulation de matières en suspension minérales et l'accumulation de matières organiques non biodégradables. Cette production de boues se développe sur une matière organique qui se trouve sous forme soluble, colloïdale ($0,08 \text{ à } 1 \text{ } \mu\text{m}$), supra colloïdale ($1 \text{ à } 100 \text{ } \mu\text{m}$) et enfin, particulaire (matière en suspension).

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. Ces boues sont considérées comme un déchet et sont aussi susceptibles de polluer l'environnement. Elles peuvent être urbaines ou 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.

Les boues des stations d'épurations à moyen terme (construction ou extension de STEP déjà entamée ou prévue à court terme) correspondent à plus de 228 000 tonne par an, elle est amenée à augmenter dans les années à venir soit environ 2020 000 m³/an à l'horizon 2025 [4]. A côté des traitements ciblés sur l'épuration de l'eau, la **filière boue** reprend les opérations concernant spécifiquement les boues. A la sortie du 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, donc coûteuses à éliminer [5]. Les différentes étapes du traitement de boues ont pour but leur stabilisation et leur concentration par déshydratation.

Le conditionnement est l'une des étapes de traitement des boues qui consiste à préparer la boue pour être déshydrater et à réduire au maximum, la teneur en eau des boues produite, il faut donc procéder à la coagulation-floculation par ajout de flocculants (polymères synthétiques ou naturels et sels minéraux).

Dans ce travail le conditionnement des boues se fait par ajout de polymères naturels qui sont le « chitosane » et le « jus de cactus » puisqu'ils sont des sources renouvelables que l'on peut trouver en abondance dans la nature. Ce fait a attiré plus d'intérêt pour le développement durable. Du fait que le chitosane est un biopolymère produit par certains animaux et le jus de cactus est extrait à base de plantes, ils sont donc biodégradables et biorésorbables. Ces deux propriétés sont primordiales à notre époque où la protection de l'environnement joue un rôle important.

Ce mémoire comporte quatre parties distinctes dont la première est une étude bibliographique qui décrit les étapes d'épuration des eaux usées, le traitement des boues, le cactus, le chitosane et la rhéologie. La présentation de la STEP de Beni-Messous où les échantillons de boues ont été prélevés est résumée dans la deuxième partie. La troisième concerne l'ensemble des méthodes (conditions opératoires) et de matériel utilisés au long de ce travail pour le conditionnement et la caractérisation des boues. La quatrième partie regroupe les résultats expérimentaux obtenus ainsi que leurs interprétations. Et enfin une conclusion générale.

I.1. Origine et devenir des boues résiduaire

En zone urbaine, les eaux usées issues de l'activité humaine sont collectées par un réseau d'assainissement, acheminées, et traitées en station d'épuration (STEP), avant d'être rejetées dans le milieu naturel. En fonction de leur origine, domestique ou industrielle, elles sont qualifiées respectivement d'eaux résiduaire urbaine (ERU) en association ou non avec les eaux pluviales, et d'eaux résiduaire industrielle (ERI), voire d'eaux mixtes (ERU+ERI).

L'épuration de ces eaux usées, qui consiste essentiellement à réduire leur charge organique, conduira à la production de boues résiduaire, considérées légalement comme un déchet résultant d'une activité spécifique épuratoire. [2]

I.1.1. Les eaux usées

I.1.1.1. Définition

Les eaux usées sont l'ensemble des eaux ménagères, des eaux industrielles, des eaux de drainages et des eaux-vannes (partie liquide contenue dans les fosses d'aisance, dans les bassins de vidange etc.) [6]. Ces eaux usées doivent être traitées avant d'être rejetées dans la nature.

I.1.1.2. Epuration des eaux usées

La dépollution des eaux usées est effectuée au niveau de la station d'épuration par le biais de différents traitements successifs (Figure I.1).

Ces traitements varient en fonction de la nature des eaux usées et de la sensibilité à la pollution du milieu récepteur. [7]

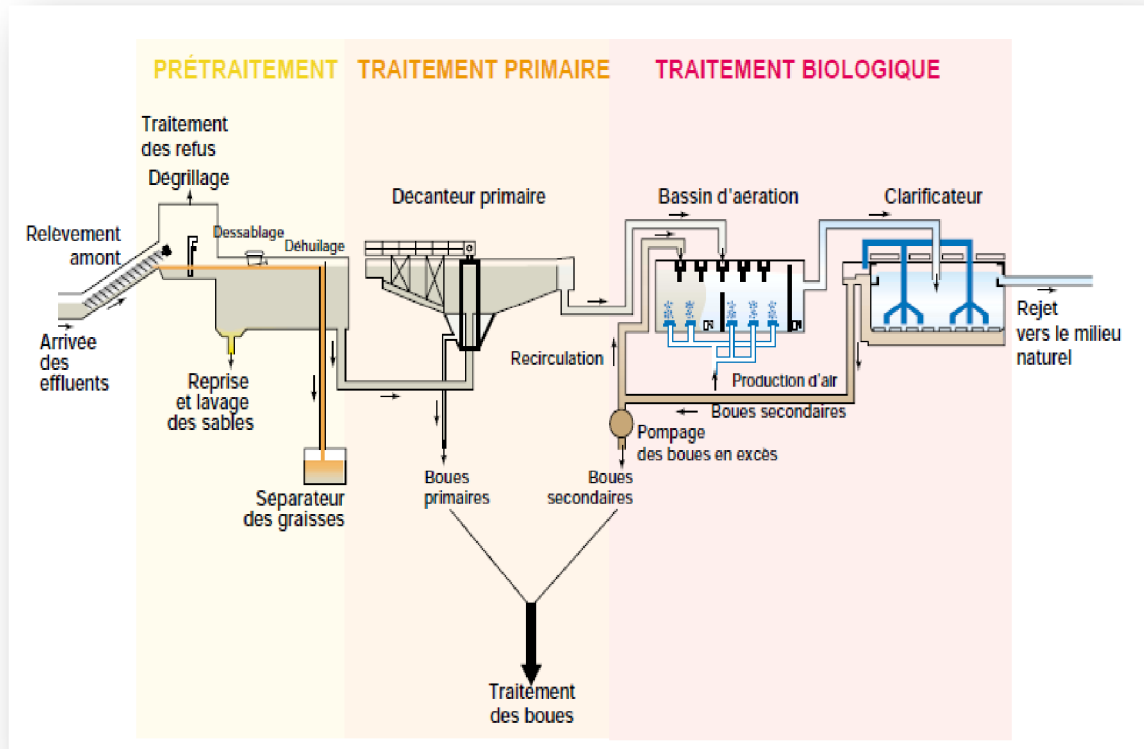


Figure I.1 : Installation courante d'épuration des eaux usées.

- **Le pré-traitement**

Les pré-traitements physiques ont pour objectif d'éliminer les éléments les plus grossiers susceptibles de perturber les traitements ultérieurs. Trois étapes principales sont mises en œuvre : le dégrillage, le dessablage et le déshuilage. Toutes les matières éliminées au cours de ces pré-traitements sont traitées séparément et les déchets ne rejoignent pas la filière de traitement des boues mais une filière d'évacuation spécifique.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

- **Traitement primaire**

Le traitement primaire consiste en une séparation physique des matières en suspension (MES) par décantation. Cette étape, visant à alléger les traitements en aval (séparation des matières facilement décantables) [2], permet de réduire la DBO₅ des eaux brutes d'au moins 20 % et d'éliminer jusqu'à 50% des matières en suspension (MES) [8]. Ces dernières sédimentent au fond du décanteur et sont récupérées par un système de raclage : ce sont les boues dites primaires composées à la fois de matières minérales et organiques. Ce traitement primaire ne permet d'obtenir qu'une épuration partielle des eaux usées, son utilisation est en fonction de la charge polluante.

Les techniques d'épuration biologique utilisent l'activité des bactéries pour dégrader les matières organiques. Les microorganismes hétérotrophes constituant la biomasse cellulaire dégradent la charge carbonée de l'eau usée pour se développer et consomment une partie des éléments nutritifs nécessaires à leur croissance. La chaîne de traitement d'un procédé à boues activées (Figure I.2) est composée:

- D'un bioréacteur maintenu sous agitation et aération dans lequel l'eau à traiter est mise en contact avec les microorganismes épurateurs,
- D'un clarificateur permettant la séparation des boues floculées et de l'eau épurée prête à être rejetée dans le milieu naturel,
- D'une boucle de recyclage des boues afin de conserver une concentration en biomasse constante dans le bioréacteur tout en favorisant les phénomènes de maintenance énergétique. [2]

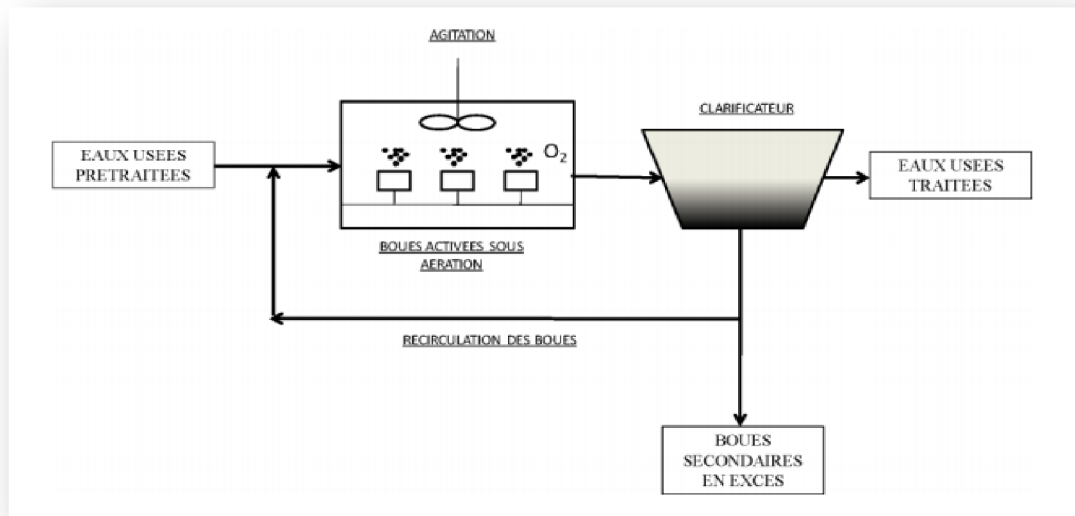


Figure I.2 : Représentation schématique d'un système de traitement secondaire par boues activées.

L'objectif de ce traitement est de réduire la DBO_5 des eaux brutes d'au moins 70 à 90%, leur DCO de 75 % et leur contenu en MES de 70 à 90 %. [8]

- **Traitement tertiaire ou complémentaire**

C'est un traitement d'affinage a pour but d'obtenir une épuration plus poussée, notamment lorsque la sensibilité du milieu récepteur l'exige. Il peut être nécessaire d'effectuer des traitements complémentaires du type :

- Filtration sur lit de sable,
- Désinfection par le chlore ou d'autres produits oxydant (ozone),
- Elimination de l'azote,
- Elimination du phosphore. [7]

I.2. Les boues des stations d'épurations

I.2.1. Types de boues

Qui dit épuration des eaux dit également production de boues. Pourtant, dans un premier temps, l'objectif des stations d'épuration a été essentiellement de garantir le rejet d'une eau de qualité définie en se préoccupant peu des boues engendrées par les procédés d'épuration. La tendance actuelle est différente dans le sens où les boues, au même titre que l'eau épurée, sont considérées comme un élément qui contribue à l'impact environnemental d'une station d'épuration. [1]

Plusieurs types de boues doivent être différenciés en fonction de leur origine, dans la mesure où leur traitement doit être conçu différemment, on distingue :

- **Les boues primaires** : sont les dépôts récupérés par simple décantation des eaux usées (décanteur primaire). Elles sont à la fois riches en matières minérales (microsables, terre, etc.) et contiennent des matières organiques (20 à 30%) susceptible d'évolution [9]. Elles présentent des concentrations élevées, une quantité d'eau importante de l'ordre de 90% et une odeur désagréable avec une couleur noir. [10]
- **Les boues secondaires** : sont les boues issues du traitement biologique (décanteur secondaire), que ce soit en culture libre (boues activées) ou en cultures fixées (lits bactériens, disques biologiques, etc.). Elles sont donc constituées essentiellement de corps bactériens et de leurs sécrétions, très organiques, la fraction de la matière volatile avoisine 80 à 90%.
- **Les boues mixtes** : telle est l'appellation du mélange de boues secondaires avec les boues primaires, elles sont très fermentescibles, 35% à 45% de boues primaires et 65% à 55% de boues secondaires.
- **Les boues physico-chimiques** : sont obtenues par adjonction de réactifs (sels de Fer, d'Aluminium, etc.) visant à coaguler la fraction colloïdale des matières contenues dans les eaux usées. Présentant des concentrations assez élevées, elles nécessitent une stabilisation et posent des problèmes spécifiques de destination finale du fait des ajouts de réactifs, particulièrement les sels métalliques. [9]

I.2.2. Etats physiques des boues

Les boues faiblement concentrées se présentent sous forme liquide. Une forme plus sèche, évitant des transports d'eau coûteux, peut leur être préférée pour une valorisation agricole.

Cette élimination d'eau (la déshydratation des boues) est nécessaire pour des destinations finales telles la mise en décharge ou l'incinération. [9]

Selon la siccité obtenue (exprimée à partir de l'extrait sec), on distingue les états liquide, pâteux et solide physiques suivants:

Tableau I.1 : Etats physiques des boues en fonction de la siccité. [11]

Etat des boues	Siccité (%)		
liquide	< à 10%	fluide	< à 5%
		épais	de 5 à 10%
pâteux	De 10 à 30%	pelletable	< 18%
		Gerbable (état plastique)	de 18 à 30%
solide	à 30%		

I.2.3. Traitement des boues

Le traitement des eaux résiduaires demeure incomplet dès lors qu'il n'inclut pas le traitement et la destination finale des boues. L'élimination des boues d'épuration devient alors une question à part entière. Après leur collecte et avant leur élimination, les boues doivent subir différents traitements afin de réduire leur masse, leur pouvoir fermentescible ainsi que les risques sanitaires qui y sont liés. Cette filière de traitement, interne à la station d'épuration, se décompose classiquement en quatre étapes en fonction du niveau de siccité désiré :

La figure I.3 résume le principe général d'une filière boue, avec toutes les étapes possibles.

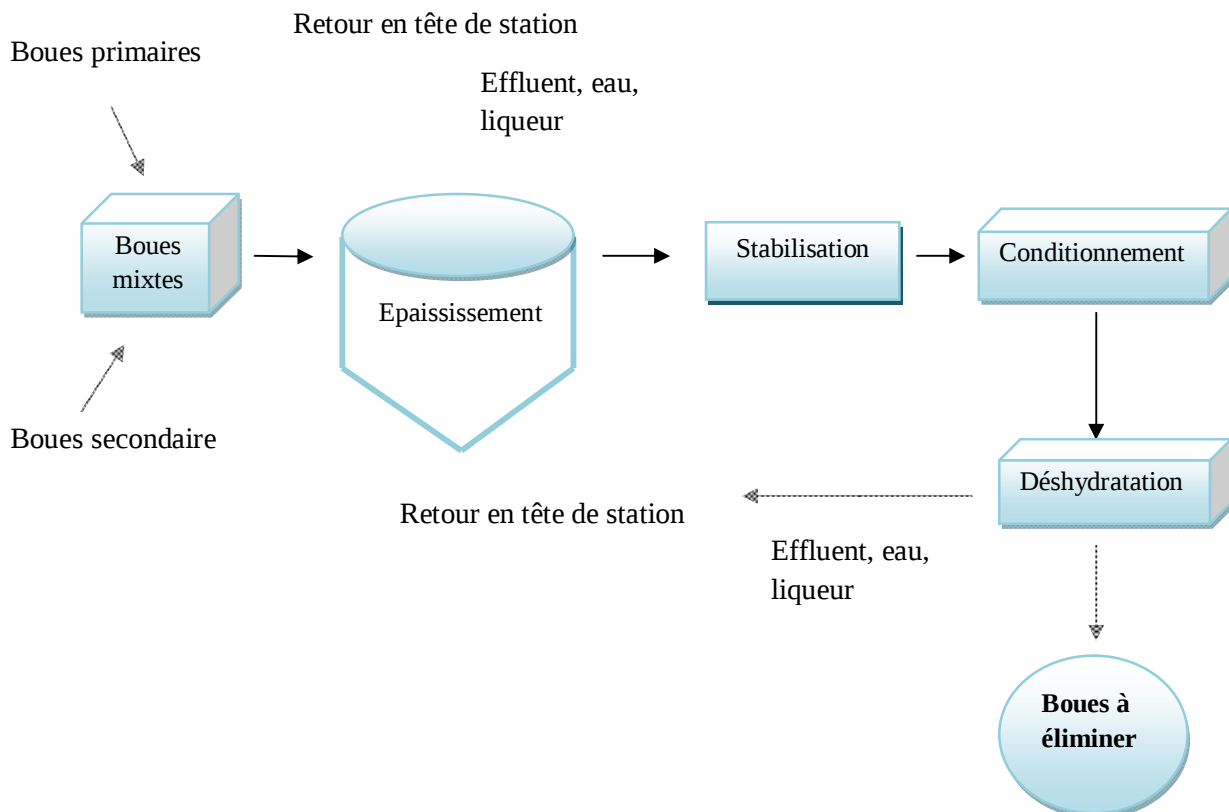


Figure I.3 : Les différentes étapes de traitement des boues.

I.2.3.1. L'épaississement

Il consiste à éliminer le maximum d'eau dans une étape d'épaississement qui est indispensable pour diminuer la taille des ouvrages des traitements en aval et améliorer leur fonctionnement. [12]

La suspension boueuse est introduite dans un ouvrage cylindro-conique (épaississeur) où le temps de séjour est élevé (supérieur à 24 heures), de façon à provoquer le tassement des boues. L'évacuation des boues se fait par le fond tandis que le liquide surnageant est évacué par le haut afin d'éliminer la pollution dissoute dans la fraction soluble [13]. A ce stade, la siccité obtenue (teneur en matière sèche) est de l'ordre de 1 à 10%, selon les installations. [14]

L'épaississement peut être statique, gravitaire ou dynamique par flottation, selon le type de boue à traiter, pour une boue activée, l'épaississement gravitaire permet de concentrer la boue de deux à huit fois, en amenant de quelques grammes par litre à quelques dizaines de grammes par litre. [15]

Cette phase de traitement présente de nombreux avantages :

- Augmentation du temps de séjour dans les ouvrages de stabilisation et, en conséquence amélioration de celle-ci,
- Diminution des quantités de réactifs employés pour la déshydratation ; amélioration corrélative de la productivité et de la siccité sur les machines de déshydratation,
- Diminution des capacités de stockage dans les proportions très importantes ce qui se répercute de façon significative sur les coûts d'investissement,
- Diminution des frais de transport des boues liquides. [9]

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.2.3.2. La stabilisation

La stabilité des boues vise à réduire le taux de matières organiques, de manière à empêcher ou du moins à limiter les fermentations. Les matières organiques sont transformées en matières minérales sous l'action de bactéries, de façon similaire à la transformation des éléments de la charge polluante utilisée dans le principe même du traitement de l'eau. Sur des boues secondaires ou mixtes, on vise en générale une réduction des matières organiques au niveau de 60% des matières sèche totale.

Le procédé de stabilisation peut être réalisé par différentes voies :

- Stabilisation anaérobie

C'est une fermentation bactérienne réalisée dans une cuve appelée digesteur, les bactéries dégradent la matière organique en deux phases successives. Dans la première phase, dite « acide », les enzymes produits par les bactéries permettent la production d'acides volatils ($C_x H_y COOH$), de gaz carbonique, d'hydrogène sulfuré. La phase « méthanique » intervient ensuite réduisant les molécules organiques principalement au stade de gaz méthane CH_4 . Les réactions anaérobies sont fortement influencées par la température (tableau I.2) :

Tableau I.2 : Le temps de la digestion des boues urbaine en fonction de la température.

Température (°C)	33-37	20	15	10
Temps nécessaire à la digestion des boues urbaines (jours)	28	45	60	120

- **Stabilisation aérobie**

Placée dans un bassin d'aération séparé, appelé bassin de stabilisation, les boues subissent une réduction de leur taux de matières volatiles du fait de l'activité des bactéries aérobies. La minéralisation de la matière organique aboutit au stade ultime à la formation de gaz carbonique (CO_2) et d'eau. La durée nécessaire à la stabilisation aérobie varie en fonction de la température (10j à 20°C, 15j à 10-12°C).

Les bassins de stabilisation sont peu fréquents en petites stations d'épuration. Ils se rencontrent essentiellement pour stabiliser des boues secondaires, de boues activées en moyenne et forte charge, leur efficacité est relativement limitée avec une formation d'odeurs.

L'aération est assurée soit par des aérateurs de surface, soit par insufflation d'air (figure I.5).

Les besoins de brassage, compte tenu d'une concentration de boues dont il est souhaitable qu'elle soit élevée, une augmentation de l'efficacité passe par l'allongement du temps de séjour dans le bassin.

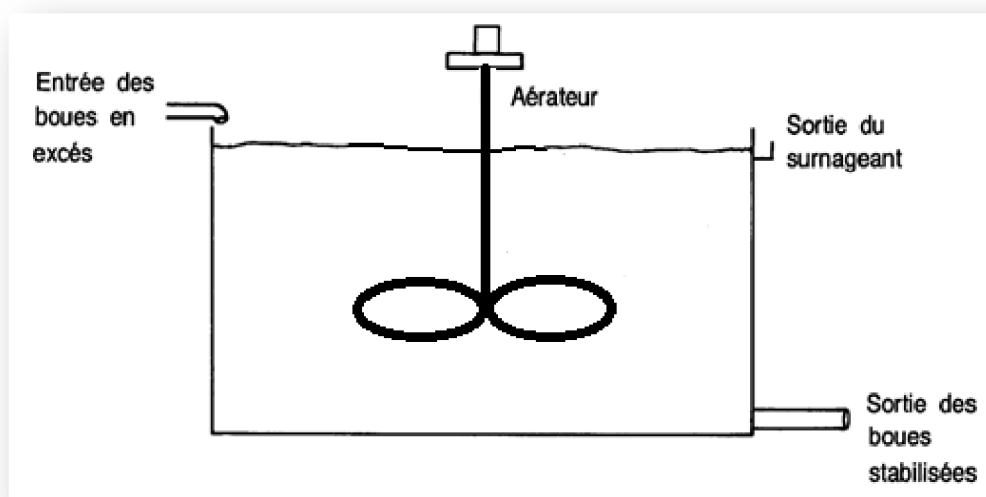


Figure I.5 : Bassin de stabilisation aérobie.

- **Stabilisation chimique**

L'évolution, préjudiciable du fait des nuisances qui l'accompagne, des boues non stabilisées s'effectue sous l'influence d'activités bactériennes. Parmi les produits susceptibles d'inhiber le développement bactérien, la chaux est celle qui s'impose économiquement. La stabilisation à la chaux intervient sur les boues épaissies ou sur les boues déshydratées. Si l'on atteint un pH supérieur à 11 il y a même désinfection des boues. Ces pH élevés inhibent ou tuent les bactéries et donc en particulier les bactéries pathogènes qui y subsistent. [9]

Le schéma de la stabilisation à la chaux des boues liquides est représenté dans la figure I.6.

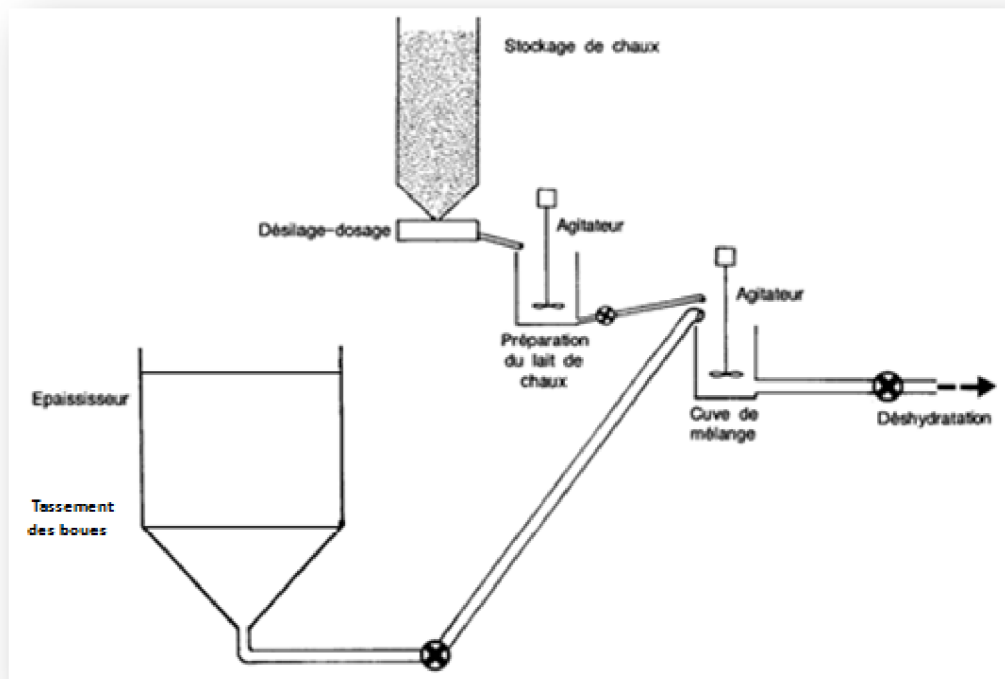


Figure I.6 : Stabilisation à la chaux des boues liquides.

I.2.3.3. Le conditionnement

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 et augmenter artificiellement la taille des particules 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. Les techniques les plus utilisées sont le conditionnement thermique et le conditionnement chimique.[1]

- **Le conditionnement thermique**

Le conditionnement thermique donne une amélioration de la déshydratation des boues, car il résulte une diminution de la teneur en eau liée à 170°C pendant 90 minutes. [16]

Le conditionnement thermique est surtout mis en œuvre dans des grandes stations munies de digesteurs et n'est évoqué qu'à titre indicatif. Il consiste à traiter les boues par cuisson. Lorsque la boue atteint une température suffisante (160 à 210°C), il se produit une transformation irréversible de sa structure qui libère une grande partie de l'eau liée. Cette méthode est la plus efficace mais la plus coûteuse, et induit un fort problème d'odeur. [1]

- **Le conditionnement chimique**

La coagulation-floculation de la boue permet de casser la stabilité colloïdale [13].

Le conditionnement chimique utilise différents réactifs :

- minéraux « électrolytes minéraux ».
- organiques « polymères de synthèse, sont généralement de type cationique ».[1]
- naturels.

Cette floculation aboutit à une agglomération des particules sous forme de floccs qui sont :

- Relativement fins et stables quand il s'agit de réactif minéraux
- Volumineux et plus fragile dans le cas des polyélectrolytes. [6]

I.2.3.4. La déshydratation

Dans cette étape, il existe trois grands types de déshydratation : déshydratation par centrifugation, filtration (sous pression, sur bande) ou séchage (lits de séchage naturel, ou thermiques) afin de réduire à nouveau le volume de boues conditionnées en éliminant le maximum d'eau [2]. Elle permet de donner une consistance plus solide à la boue en atteignant des siccités variant de 15 à 40% [1], selon les boues et les installations utilisées. [15]

I.2.4. La floculation des boues

Les matières colloïdales sont soumises à deux grands types de forces :

- a. Force d'attraction de Van der Waals, liée à la structure et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu, cette force est généralement notée E_A .
- b. Force de répulsion électrostatique liée aux charges superficielles des colloïdes notée E_B

La stabilité d'une suspension colloïdale dépend du bilan des forces d'attraction et de répulsion, dont le niveau énergétique est donné par $E = E_A + E_B$.

Pour déstabiliser la suspension, il faut franchir la barrière énergétique E . Pour cela, et afin de favoriser l'agglomération des colloïdes, il faut diminuer les forces de répulsion électrostatique. C'est la floculation qui réalise cette déstabilisation. [17]

I.2.5. Types de flocculants

Il existe de nombreux réactifs chimiques classés selon leur disponibilité, efficacité, coût, ainsi que la dimension des floccs formés. On distingue :

I.2.5.1. Les réactifs minéraux

Pour des raisons d'économie et d'efficacité, on emploie le plus souvent des sels métalliques, tels que les chlorures ferriques, chlorosulfate ferrique [18], sulfate ferrique, sulfate ferreux et, à un degré moindre, les sels d'aluminium [13]. Ces réactifs ont une action coagulante (leur charge est souvent opposée à celle des colloïdes) et une action flocculante par la formation d'hydroxydes complexes [18]. Souvent ces produits sont considérés comme générateur de pollution et ne sont pas conseillés pour la flocculation des boues hydratées. [19]

I.2.5.2. Les polyélectrolytes :

De manière générale, ce sont des composés de haut poids moléculaires 104-106 Da de types anioniques, cationiques ou non ioniques. L'intensité de la charge d'un polymère dépend de son degré d'ionisation qui dépend à son tour des charges sur les groupes fonctionnels, du degré de copolymérisation et de la quantité de groupes fonctionnels qui ont été substitués [20]. Les polyélectrolytes sont plus efficaces que les réactifs minéraux et qui permettent d'une part d'obtenir une flocculation extrêmement marquée par formation des ponts entre particules et d'autre part de diminuer considérablement la résistance spécifique de la boue, l'eau libre interstitielle libérée étant très rapidement drainable. [6]

I.2.5.3. Les polymères naturels « biopolymères »

Comme l'ont relevé certaines études, les coagulants à base d'aluminium, de fer et même les polymères synthétiques présentent un désavantage important : leur toxicité probante pour l'environnement. Cela a donc poussé quelques chercheurs à investiguer la possibilité d'utiliser des composés d'origine naturelle pour réaliser le procédé de coagulation-flocculation. [21]

Il est impératif de bien comprendre les mécanismes sous-jacents de la coagulation associés à ces coagulants naturels afin que la compréhension complète de leur utilisation puisse être réalisée. L'agrégation des particules dans une solution peut se produire par l'intermédiaire de quatre mécanismes de coagulation classiques: (a) compression double couche, (b) la sweep flocculation, (c) l'adsorption et la neutralisation de charge, et (d) l'adsorption et le pontage inter-particulaires. La présence des sels [ou coagulants appropriés] peut provoquer une compression de la double couche, qui déstabilise les particules. La sweep flocculation se produit quand un coagulant emprisonne les particules en suspension dans un floc mou colloïdale. L'adsorption et la neutralisation de la charge se réfère à la sorption de deux particules avec ions de charge opposée tout en interarticulaire, le pontage se produit quand un coagulant fournit une chaîne polymère qui adsorbe les particules. Les coagulants polymères sont généralement associés à des mécanismes (c) et (d) que leurs structures à longue chaîne (en particulier les polymères de haut poids moléculaire) augmentent considérablement le nombre de sites d'adsorption inoccupée. Il semble que ces deux mécanismes servent de principes sous-jacents au fonctionnement interne des coagulants à base de plantes ainsi et ils sont l'objet de discussions dans les sections suivantes. L'existence d'électrolytes fond en milieu aqueux peut faciliter l'effet coagulant de coagulants polymères car il ya moins de répulsion électrostatique entre particules. Dans notre étude, on s'est intéressé aux coagulants naturels " le jus de cactus et le chitosane ". [22]

a. Le cactus

Le cactus est une plante génératrice d'une multitude de bénéfices, elle est utilisée dans divers domaines et elle a reçu un grand degré d'attention ces dernières années, vue sa richesse en composants nutritifs et médicinaux tels que la protéine, l'amylose, l'acide malique, la résine, les vitamines, et la cellulose. [15]

Cactus est le nom usuel des plantes de la famille des Cactacées. On les appelle également cactées, *Opuntia vulgaris* Miller et *Opuntia Ficus-indica* Miller sont les

Chapitre I

Synthèse bibliographique

deux espèces les plus répandues sur terre, mais la plante peut porter un nom différent selon l'idiome local.

Les plantes des cactacées sont presque toutes des plantes grasses ou plantes succulentes, c'est-à-dire des plantes xérophytes qui stockent dans leurs tissus des réserves de "suc" pour faire face aux longues périodes de sécheresse.

- **Aspect**

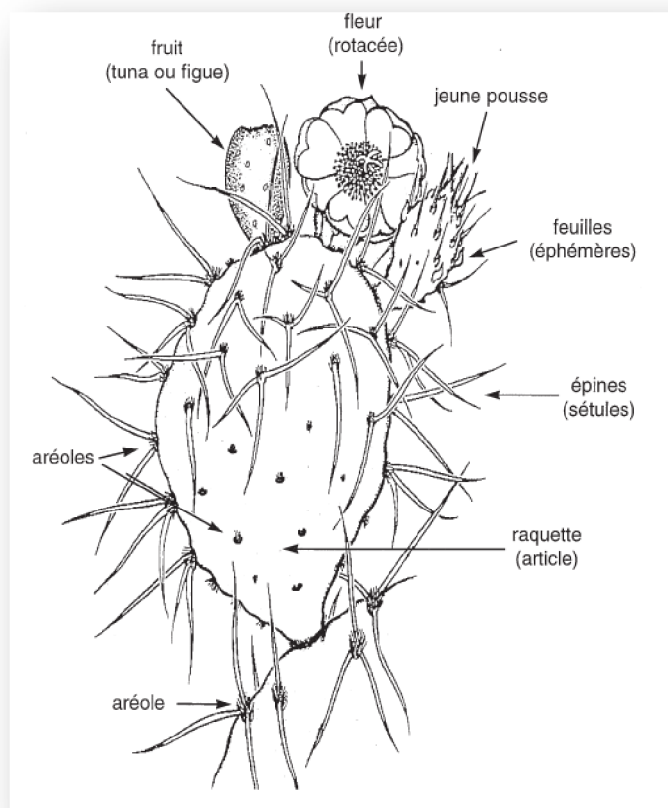


Figure I.7 : Détail de l'Opuntia (Nopal).

Comme le montre la figure 7, La tige de l'Opuntia est formée d'articles ovales, charnus et aplatis, de couleur verte, communément appelés raquettes dont la surface est parsemée d'alvéoles. Protégées par des poils barbelés regroupés en touffes et armés de redoutables épines, elles constituent chacune un point végétatif dormant et polyvalent. C'est dans ces alvéoles que naissent, sur les articles en formation, les

feuilles fragiles, éphémères, caduques. Les bourgeons apparaissent également au creux de ces ócryptesô au sommet des raquettes. Les épines munies de minuscules aiguillons recourbés vers leur base partent également de là. Ce sont ces crochets qui rendent difficile et douloureuse l'extraction d'une épine de Nopal implantée dans la peau.

La plante porte aussi des fleurs qui donnent naissance aux fruits. C'est sur le dessus des raquettes qu'apparaissent de belles et grandes corolles latérales jaunes, oranges ou rouges, aux nombreux pétales soudés à leur base et s'ouvrant gaiement à leur extrémité. Elles offrent leur nectar à la gourmandise des abeilles et aux autres insectes butineurs. [23]

Les bons résultats de coagulation par l'Opuntia sont très probablement attribués à la présence de mucilage qui est un hydrate de carbone visqueux et complexe entreposé en cactus intérieur et garnitures externes qui ont une grande capacité de conservation de l'eau. Des études ont établi que le mucilage dans l'Opuntia de cactus contient des hydrates de carbone tels que le l-arabinose, d-galactose, l-rhamnose, d-xylose et l'acide galacturonique. [22]

- **Etude bibliographique sur l'utilisation du jus de cactus**

Notre recherche bibliographique sur l'application du jus de cactus nous a amené à l'état d'art suivant:

- **A. Diaz et al (Venezuela 1999)** ont étudié la capacité du cactus d'agir comme coagulant naturel, en utilisant une eau synthétique formulée d'une turbidité de 100 NTU pour ressembler à une eau potable fournie à la ville de Maracaibo. La turbidité a été ajoutée comme kaolin. La capacité de coagulation a été évaluée par l'utilisation du Jar-test. Ils ont comparé les résultats avec celles en utilisant des coagulants organiques, et ils ont montré que le cactus est capable de produire une eau dont la turbidité finale a été proche de 5 NTU. Ils ont trouvé aussi que la dose de coagulant optimale trouvée a été plus faible que celle de sulfate d'aluminium. [24]

Chapitre I

Synthèse bibliographique

- **Jingdong Zhang (2006)** a étudié l'effet coagulant du cactus dans le traitement des eaux de surface. Il a comparé la solution de cactus (séchage des branches de cactus à 80°C suivi d'un broyage), préparé à différentes concentrations, avec un autre coagulant « AlCl_3 », la comparaison entre les performances de coagulation, a démontré que le biofloculant a donné des meilleurs résultats en comparant avec l' AlCl_3 . Le biofloculant préparé à 50 mg/l a diminué la turbidité d'une eau synthétique de 200 NTU (préparée par le Kaolin et une eau déionisée) à moins de 5 NTU, avec une efficacité d'enlèvement de 94%, ensuite le cactus est utilisé à une concentration de 60 mg/l pour traiter une eau de mer de turbidité élevée (980 NTU), les résultats montrent une efficacité d'enlèvement de turbidité de 98%, il a été testé aussi pour traiter une eau usée prélevée d'une station de traitement d'eau usée située à Wuhan (Chine), les résultats montrent que le cactus a pu diminuer la turbidité de 70 à 10.5 NTU et un meilleur résultat est obtenu si le cactus est utilisé avec le chlorure d'aluminium AlCl_3 , donc le cactus peut être utilisé pour traiter les hautes turbidités des eaux. [14]
- **A. Abid (Maroc 2009)** a étudié l'effet de jus de cactus sur des échantillons préparés au laboratoire et sur d'autres échantillons issus d'une unité de traitement de surface (bain de laitonage). L'étude comparative avec un floculant industriel (floculant à base d'acrylamide et acrylate de sodium), a montré une très bonne compétitive avec un fort pouvoir de floculation pour le jus de cactus. L'association des deux étapes de neutralisation et de coagulation avec la chaux suivie d'une étape de floculation en utilisant comme agent floculant le nouveau produit extrait des cactus Marocains puis d'une décantation, a montré un effet très significatif sur l'élimination du zinc, du cuivre, et de la matière en suspension. Le pourcentage d'abattement des métaux dépasse 95% pour le cuivre et le zinc. Pour la solution riche en argile, la turbidité passe de 900-1000 NTU à des valeurs avoisinantes de 1 NTU. [21]
- **Chan-Yang Yin (Malaisie 2010)**, a utilisé des coagulants à base de plantes pour le traitement de l'eau et des eaux usées, le cactus est l'un de ces

coagulants. Les processus, l'efficacité et les mécanismes de coagulation pour le traitement de l'eau et des eaux usées ont été présentés. Il a constaté que ces coagulants naturels, sont relativement rentables par rapport aux coagulants chimiques, ils peuvent être facilement traités sous une forme utilisable et biodégradable. Ces coagulants naturels, lorsqu'ils sont utilisés pour le traitement des eaux de faible et moyenne turbidité (50-500 NTU), sont comparables à leurs homologues chimiques en termes d'efficacité du traitement. Leur application dans le traitement des eaux usées industrielles est encore à leur premiers balbutiements, Ces coagulants naturels fonctionnent au moyen de mécanismes d'adsorption suivie d'une neutralisation de charge ou par l'effet de pontage. L'utilisation de ces coagulants représente un progrès important dans la technologie de l'environnement durable car ils sont des ressources renouvelables et leur application est directement liée à l'amélioration de la qualité de vie des communautés sous-développées. [22]

- **S. Hadj-Kouider (Blida 2011)** a réalisé un conditionnement chimique de la boue provenant de la station d'épuration d'eau usée de Baraki. L'aptitude de déshydratation des boues a été examinée par deux méthodes (la filtration sous pression et la centrifugation). Le nouveau biofloculant a été utilisé, afin d'augmenter la siccité des boues déshydratées. Les résultats obtenus par le jus de cactus sont encourageants, puisqu'il diminue la turbidité de 96% pour une eau filtrée de la boue de Baraki, et permet d'obtenir une siccité de 31% obtenue par centrifugation. [15]

b. Le chitosane

Le chitosane est un polysaccharide non toxique, provenant de la désacétylation de la chitine, cette dernière représente le constituant essentiel du squelette externe des crustacés, scorpions, insectes, et de l'exosquelette des céphalopodes. Actuellement, la production de la chitine se fait essentiellement par traitement chimique ou enzymatique des carapaces de crevettes et de plumes de calamars. Généralement, lorsque le degré de désacétylation de la chitine dépasse 50%, ce

polysaccharide prend alors le nom de chitosane. Hydrosoluble dans les solutions acides, ce polymère cationique a la capacité de chélater des composés anioniques.[25]

- **Structure**

Le chitosane est un aminopolysaccharide d'origine biologique: c'est un enchainement monomérique de D-glucosamine et de N-acétyl- D-glucosamine relié par une liaison glycosidique (1 → 4)

La figure I.8 représente la structure chimique du chitosane

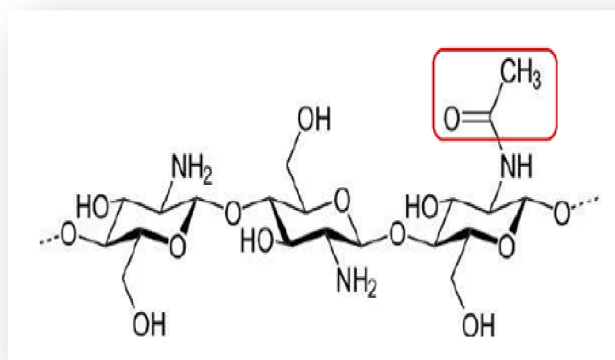


Figure I.8 : Structure chimique du chitosane.

Le chitosane est caractérisé par la présence des groupes amines (-NH_2) (Fig.9), chargés positivement.

Ces derniers confèrent au chitosane une nature cationique, intéressante dans un milieu acide. Ces groupements sont également responsables de son activité floculante. Le chitosane comporte plus d'un centre réactif, grâce à ses fonctions alcool et amine.[26]

- **Etude bibliographique sur l'utilisation du chitosane**

- **Ivo Georgiev Lalov et al (Bulgarie 1999)** ont étudiée la purification de la vinasse contenant dans l'eau par un processus d'échange d'anions avec le chitosane. Le biopolymère chitosane est utilisé comme échangeur d'anions. Des expériences ont été réalisées avec différentes concentrations du chitosane (2, 3, 5, 10, et 15 g/l). Les quantités ont été ajoutées a 50 ml de liquide avec agitation continue à 20°C pendant 210 min. La cinétique d'adsorption des acides organiques sur la surface du matériau d'échange d'ions ont été étudiés en mesurant la variation de la valeur du pH du mélange à intervalles de temps définis ainsi que la demande chimique en oxygène. Les résultats ont montré qu'avec une concentration de chitosane de 10 g/l et un temps de contact de 30 min, c'est le modèle le plus approprié pour la purification de l'eau usée avec un modèle de demande chimique en oxygène (DCO) de 2800 mg O₂/l.[27]
- **Defang Zeng et al (Birmingham 2007)** ont effectué une floculation d'une eau brute à partir de chitosane, polychlorure d'aluminium (PAC) et de silicate. En comparaison avec le flocculant classique tel que le PAC, le pourcentage d'élimination de la DCO, SS et Al³⁺ dans l'eau traitée à l'aide de ce nouveau flocculant a été amélioré par 1.8 à 23.7%, 50% et de 61,2 à 85,5%, respectivement, et son coût a été abattu 7-34%. Ils ont constaté donc, que ce bioflocculant présente de meilleurs avantages environnementaux et économiques que les flocculants classiques dans le traitement de l'eau. [28]
- **Colin Lafleur et al, (Québec 2008)** ont étudié l'efficacité du chitosane par le procédé de coagulation-floculation pour l'enlèvement du phosphore dans les effluents piscicoles à partir de boues piscicoles. La séquence d'ajout des réactifs se fait en deux temps. En premier lieu est ajoutée la solution de chitosane et ensuite la solution de chlorure ferrique. Les résultats montrent que

le procédé de coagulation-floculation avec le chitosane et le chlorure ferrique est efficace puisqu'il permet d'enlever environ 70 % du phosphore total une fois appliqué à un effluent piscicole. [20]

- **H. Zemmouri (Alger 2010)** a réalisé une étude sur le conditionnement chimique de la boue provenant de la station d'épuration d'eaux usées louée de Beni-Messous. Le mécanisme et la performance du conditionnement ont été examinés en appliquant un coagulant naturel « le chitosane ». Le travail expérimental été fondé sur la mesure de la résistance spécifique à la filtration (RSF). L'examen du volume de la filtration sous vide, le temps de filtration et la masse du gâteau. L'application du chitosane, et pendant la première phase du processus de la coagulation/floculation a donné une formation très brève de gros floes avec une très nette séparation des deux phases liquide/solide. Le V_0 obtenu est très important et très proche du volume total de l'eau contenue dans la boue, obtention d'un gâteau, sec et compacte de masse très réduite, au niveau du filtre. Ces observations traduisent l'efficacité du chitosane en tant que flocculant adéquat agissant sur la séparation rapide et efficace de l'eau contenue dans la boue. [29]

En 2012, Zemmouri a présenté une investigation sur l'application du chitosane dans le traitement des eaux de surfaces (eaux synthétiques et brutes de barages de Keddara et Beni-Amrane) est dans le conditionnement des boues issues de la station d'épuration des eaux usées de Baraki, par le processus de coagulation floculation. Le chitosane a été utilisé comme coagulant primaire et aide coagulant en conjonction avec le sulfate d'aluminium (alun). La performance de coagulation floculation a été évaluée par la mesure de la turbidité résiduelle du surnageant et de la solution aqueuse, en fonction de divers paramètres, à savoir la concentration du chitosane, la dose de l'alun, la turbidité initiale, le pH et le temps de décantation. Les variations en fonction des doses des coagulants, de l'alcalinité, la l'aluminium

résiduel, on été également examinées. Par ailleurs, une caractérisation physico-chimique des bous sujettes d'étude a été effectuée. La boue étudiée a été déshydratée par le biais d'une centrifugation et/ou par une filtration sous pression à l'aide d'une cellule, conçu au laboratoire. La performance du conditionnement a été examinée par la mesure de résistance spécifique à la filtration (RSF). Le volume de la filtration sous vide, le temps de filtration et la masse du gâteau ont été également étudiés. Les résultats obtenus sont en faveur du chitosane. A des faibles concentrations, le chitosane est apte à réduire la turbidité et le volume des boues. [3]

I.3. La rhéologie

I.3.1. Introduction

La rhéologie est connue pour décrire la déformation d'un corps sous l'influence d'un cisaillement imposé. L'application de la rhéologie dans le domaine des boues issues du traitement biologique des eaux usées, s'est révélée utile pour répondre à des problèmes de type transport hydraulique (pompage), stockage des boues, optimisation de procédés de traitement, épandage. [30]

I.3.2. Définition

Le terme « rhéologie » a été proposé par Eugène Cook Bingham en 1928, pour désigner « la science qui étudie les déformations et l'écoulement de la matière », et qui prolonge et complète les différentes branches de la mécanique : élasticité, plasticité, mécanique des fluides, hydraulique, etc. Plus exactement, l'objet de la rhéologie est l'étude du comportement mécanique, c'est-à-dire des relations entre les déformations et les contraintes de matière. [31]

I.3.3. Notion de mouvement laminaire de cisaillement

I.3.3.1. Définition

Un matériau soumis à un ensemble de forces est susceptible de se déformer, les mouvements des différents points du matériau dépendant bien entendu de la répartition et de l'intensité des forces appliquées. Un mouvement laminaire de cisaillement est engendré pour certaines distributions de ces forces. Au cours d'un tel mouvement, on considère que le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes. La déformation du matériau s'effectue par glissement relatif des différentes couches, sans qu'il y ait transfert de matière d'une couche à l'autre. Les mouvements laminaires de cisaillement sont engendrés à l'aide de rhéomètres. C'est à partir de tels mouvements que peuvent être déterminés les paramètres rhéologiques des fluides.

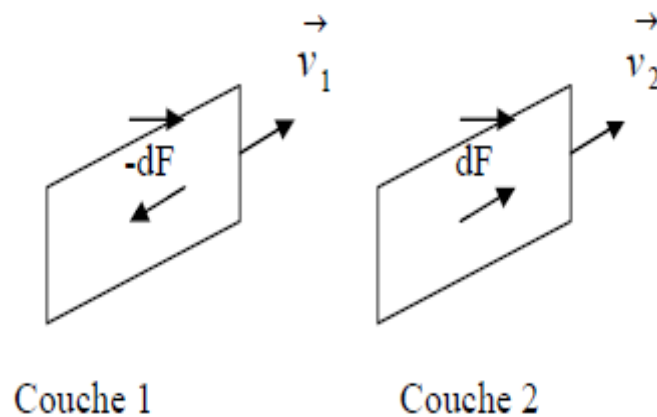


Figure I.9 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines.

En supposant que la couche (1) est animée d'une vitesse v_1 supérieure à la vitesse v_2 de la couche (2), la couche (1) exerce sur la couche (2) une force de cisaillement dF parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche (2). La couche (2) exerce pour sa part sur la couche (1), une force de cisaillement $-dF$

tendant à la freiner. En rapportant ces forces de cisaillement à l'unité de surface, on définit la contrainte de cisaillement :

$$\tau = dF / dS$$

τ représente une force par unité de surface, elle s'exprime en newton par m² ou bien plus commodément en Pascal (Pa) et dS est la surface élémentaire de l'entité considérée.

Il est à noter que dans le calcul de la résultante des forces, les forces de pression s'exerçant perpendiculairement à la surface ne sont pas prises en compte, du fait de leur faible valeur en comparaison des forces de cisaillement.

I.3.3.2. Déformation et vitesse de cisaillement

Ces deux grandeurs constituent les grandeurs cinématiques fondamentales en rhéologie.

La définition de la déformation de cisaillement est présentée dans le cas particulier le plus simple d'un mouvement de cisaillement présentant une symétrie plane. Le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre immobile.

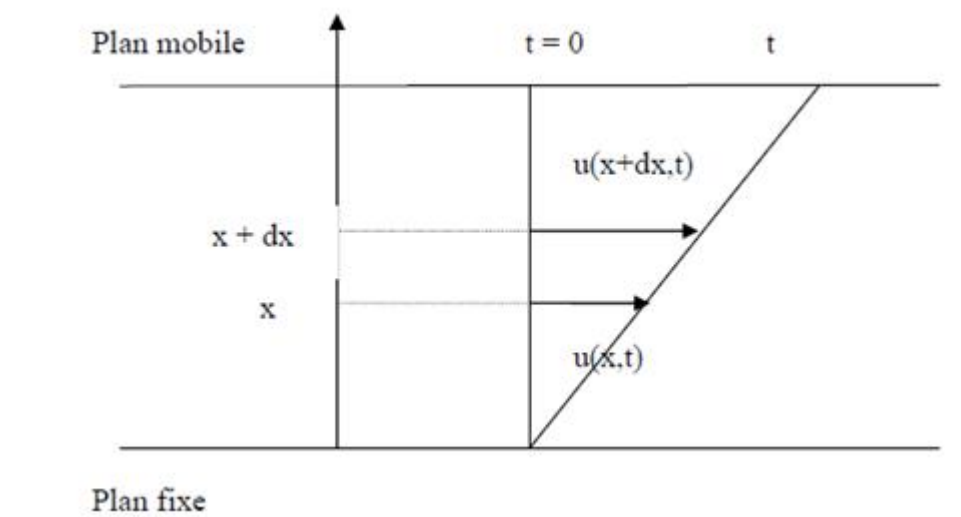


Figure I.10: Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles.

On considère arbitrairement que les particules de matière de deux couches adjacentes se trouvent à l'instant $t = 0$ dans une section droite. A l'instant t postérieur, les particules auront parcouru la distance $u(x,t)$ pour la particule située à l'abscisse x et $u(x+dx,t)$ pour la particule située à l'abscisse $x+dx$.

La déformation de cisaillement est définie par :

$$\gamma = dx / du(x, t)$$

Cette grandeur est sans dimension, elle ne dépend pas du déplacement $u(x,t)$ lui-même mais de la variation de ce déplacement lorsqu'on passe d'une couche à une couche infiniment voisine.

L'expression de la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) est donnée par l'équation suivante, il s'agit de la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = d\gamma / dt$$

...a la dimension de l'inverse d'un temps et s'exprime en s^{-1} .

I.3.4. Propriétés d'écoulement des liquides

I.3.4.1. Les fluides Newtoniens

L'écoulement des fluides newtoniens est le cas le plus simple que l'on puisse trouver, la vitesse de cisaillement et la contrainte de cisaillement sont reliées par une loi linéaire, la pente de la droite alors obtenue en traçant le rhéogramme est la viscosité du fluide.

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

μ : viscosité dynamique ou absolue du fluide (Pa.s).

I.3.4.2. Les fluides non newtoniens

La majorité des fluides présentent toutefois des comportements non newtoniens qui font appel à l'utilisation de modèles rhéologiques plus complexes pour décrire leur comportement en écoulement et qui sont caractérisés par une relation générale de type:

$$\eta = \mu_a \dots$$

μ_a : viscosité apparent dépendante de la vitesse de déformation de cisaillement.

On distingue deux catégories principales de fluides non newtoniens: les fluides à comportement rhéofluidifiant et ceux à comportement rhéoépaississant.

- **Fluides à contrainte critique**

Cette catégorie de fluides est aussi communément désignée par l'appellation fluide plastique, la figure I.11 donne une vue des courbes d'écoulement les caractérisant. Il s'agit de fluides ne s'écoulant pas avant qu'il leur soit appliqué une contrainte de cisaillement minimale.

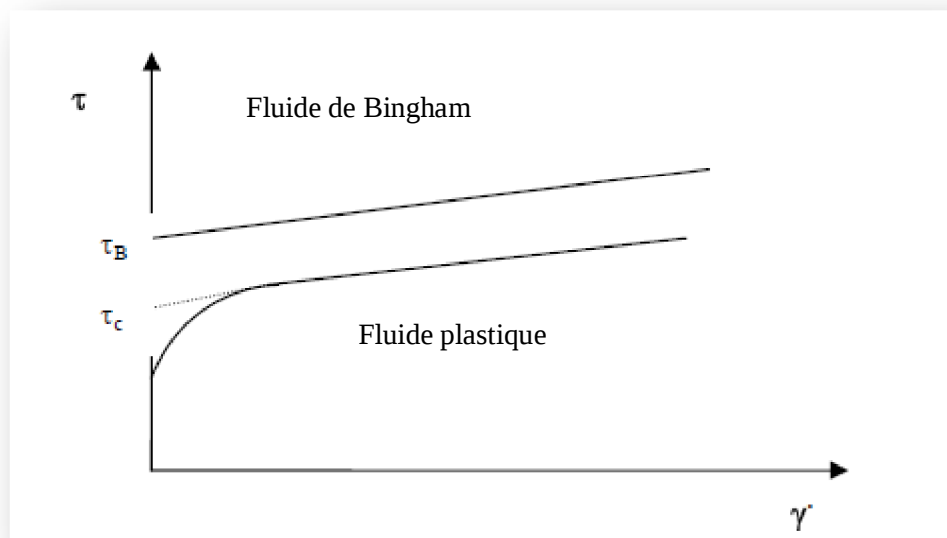


Figure I.11: Courbes d'écoulement de fluides présentant une contrainte critique.

Le fluide de Bingham s'écoule lorsqu'un seuil minimal de contrainte τ_B est dépassé. Ce modèle permet de décrire le comportement rhéologique de nombreux matériaux (boues de forage, peintures à l'huile, certaines graisses etc.).

- **Fluides sans contrainte critique**

La figure I.12 présente les courbes d'écoulement des deux principales catégories de fluides sans contrainte critique, à savoir les fluides pseudo-plastiques (ou rhéofluidifiants) et les fluides dilatants (ou rhéoépaississants).

Pour les fluides pseudoplastiques, le rapport $\dot{\gamma} \dots = \eta_{app}$ (viscosité apparente) est à peu près constant pour les plus faibles valeurs de vitesse de cisaillement imposées et vaut ∞ . Ce rapport décroît ensuite progressivement lorsque la vitesse de cisaillement augmente (d'où le nom de rhéofluidifiant), jusqu'à atteindre une valeur de viscosité limite (η_0). [32]

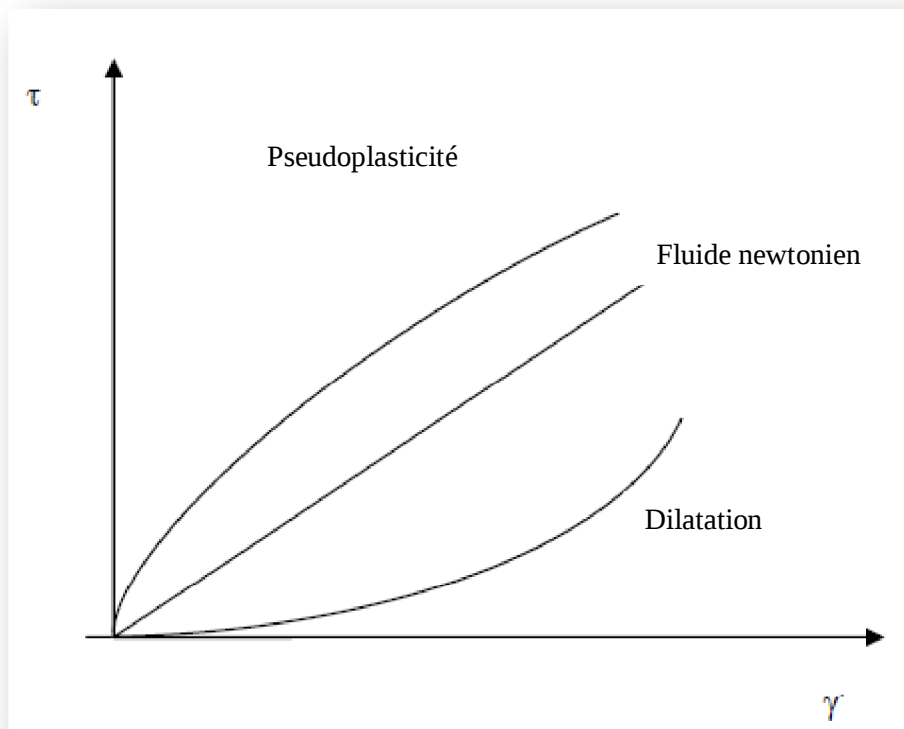


Figure I.12: Courbes d'écoulement des principales catégories de fluides sans contrainte critique.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.3.5. Les comportements rhéologiques

Les différents comportements rhéologiques des matériaux sont résumés dans le tableau I.3 :

Tableau I.3 : Les différents Comportements rhéologiques des matériaux. [33]

Indépendants du temps (sans hystérisis)	Dépendants du temps (avec hystérisis)
Newtonien : la viscosité est une constante.	Thixotrope : la viscosité diminue en fonction du temps sous l'effet du cisaillement et se reconstitue au repos.
Rhéofluidifiant : la viscosité diminue quand le gradient de vitesse augmente.	Antithixotrope : la viscosité augmente en fonction du temps sous l'effet du cisaillement et se reconstitue au repos.
Rhéoépaississant : la viscosité augmente quand le gradient de vitesse augmente.	Viscoélastique : associe à un comportement visqueux un comportement élastique caractérisé par un effet mémoire.
Plastique : viscosité infinie (pas d'écoulement) en dessous d'un seuil de contrainte.	

I.3.6. Etat d'art

- **Angélique Léonard (2002)** a étudié le développement de la procédure du conditionnement et de déshydratation permettant d'obtenir une boue déshydratée dont la siccité est la plus élevée et la plus reproductible possible. La mise au point de cette procédure permet d'effectuer cette étude sur des boues réelles. Les boues sont prélevées après l'étape d'épaississement dans deux stations d'épuration à Retinne et à Embourg. Les gâteaux de boue obtenus sont ensuite caractérisés : les propriétés rhéologiques des gâteaux sont

déterminées. Cette mesure permet de caractériser la texture d'un matériau pâteux présentant un comportement viscoélastique, c'est-à-dire intermédiaire entre l'état solide et l'état liquide. Les tests de rhéologie montrent qu'il n'existe aucune influence des conditions opératoires de conditionnement et de déshydratation sur la texture du gâteau. De plus, ces essais mettent en évidence l'importance de la teneur en eau (ou de la siccité) de la boue : il existe une relation en loi de puissance entre les modules élastiques et visqueux et la teneur en matières sèches du gâteau. [1]

- **L.Wolny et al, (Pologne 2007)** a présenté l'influence des paramètres rhéologique sur les boues conditionnée. La corrélation avec les paramètres de déshydratation de boues d'épuration a également été déterminée. Les tests ont été effectués sur les boues de station d'épuration mécanique et biologique après fermentation avec un débit moyen de $Q = 57\ 000\ \text{m}^3$. La boue a été conditionnée avec le polyélectrolyte. Pour la détermination des courbes rhéologiques et les limites de liquidité, le rhéomètre RC 20 a été utilisé. Les tests ont été effectués pour une vitesse de cisaillement de 0 - 400 / s et un temps de mesure de 120 s. La dose du polyélectrolyte peut provoquer l'augmentation de la contrainte de cisaillement par rapport à la boue brute. Dans le document, les dépendances de détermination du degré de déshydratation des boues et la limite de liquidité (un des paramètres rhéologiques qui n'est pas souvent testés dans les stations de traitement des eaux usées) ont été remarqués. À jour les résultats indiquent qu'il existe des dépendances entre les paramètres rhéologiques et déshydratation des boues testées. Les propriétés rhéologiques peuvent être utiles comme le paramètre de contrôle du traitement des boues. [34]

II.1. Introduction

La station d'épuration des eaux usées est prévue pour traiter les eaux usées du bassin versant Ouest de l'agglomération du grand Alger, elle est située dans la ville de Beni-Messous. Elle est conçue pour traiter un débit journalier moyen de 35.770 m³/J.

La chaîne de traitement est composée de deux lignes : une ligne d'eau et une ligne de boue. Le débit est divisé sur certains ouvrages afin d'améliorer la fiabilité, les opérations de maintenance et la souplesse de fonctionnement de la station.

II.2. Situation géographique

La station d'épuration des eaux usées de Beni-Messous est localisée dans la commune d'Aïn Benian (Wilaya d'Alger).

Cette commune fait partie de la daïra de Chéraga, elle est limitée :

- Au Nord, par la mer méditerranée,
- Au Sud, par la commune de Chéraga,
- A l'Ouest, par la commune de Staouali,
- A l'Est, par la commune d'Aïn Benian.

Le terrain réservé pour la construction de la station représente une superficie totale, hors plage, d'environ 45 ha. [35]

II.3. Réalisation de la STEP

Le projet de construction de la STEP a été lancé en mai 2005 ; les travaux de réalisation ont été achevés en juin 2007.

La construction de la STEP a été réalisée par la société Autrichienne VA TECH WABAG en collaboration avec des sociétés Algériennes.

La date de sa mise en service a été en juillet 2008, le projet de construction a été établi en tenant compte du fait que la station sera réalisée en deux phases :

- La 1^{ère} phase devant satisfaire les besoins de 2008.
- La 2^{ème} phase, qui sera une extension de la première, face au besoin de l'œan 2023.

II.4. Données de base (débit, pollution, DBO₅, MES...)

• Débits

Les dotations principales suivantes pour la partie urbaine ont été prises en compte :

Consommation spécifique : 143 l/hab.j

DBO₅ : 50 g/hab.j

MES : 60 g/hab.j

DCO : 60 g/hab.j

En ce qui concerne les débits, la station a été dimensionnée selon les données suivantes :

Tableau II.1 : Débits à l'œntrée de la STEP de Beni-Messous. [36]

Paramètres	Valeurs des paramètres		
	Unites	1 ^{ère} phase (2008)	2 ^{ème} phase (2023)
Equivalent Habitant	Eq.Hab	250.000	500.000
Débit moyen journalier	m ³ /j	35 770	50 400
Débit moyen horaire - temps sec	m ³ /h	1.490	2.100
Débit de pointe horaire au temps sec	m ³ /h	1 800	2 750
Débit de pointe horaire - temps de pluie	m ³ /h	3.600	5.500

- **Charges polluantes**

Les eaux résiduaires acheminées à la station proviennent essentiellement des rejets domestiques. Les rejets industriels, s'ils existent, doivent subir des prétraitements au niveau des industries les plus polluantes.

Dans les conditions actuelles, la pollution totale reçue par la station est donnée par le tableau II.2:

Tableau II.2 : Charges polluantes de la STEP de Beni-Messous. [36]

Désignation	Valeurs des paramètres	
	1 ère phase (2008)	2 ème phase (2023)
Charge massique en MES à l'entrée de la STEP	15 000 Kg/j	30 000 Kg/j
Charge massique en DBO ₅ à l'entrée de la STEP	12 500 Kg/j	25 000 Kg/j
Charge massique en DCO à l'entrée de la STEP	25 000 Kg/j	30 000 Kg/j

II.5. Principe du traitement adopté

La station d'épuration de la ville de Beni-Messous est constituée par la chaîne d'opérations unitaires du type mécanique, physique et biologique donnant naissance à un procédé de traitement dit à boue activée. (Figure II.1)



Figure II.1 : Vue d'œensemble de la STEP de Beni- Messous.

La filière de traitement comprend ainsi en totalitœ et successivement :

- **Prœtraitement mœcanique constituœe de :**
 - Un dœversoir d'œorage.
 - Dœgrillage mœcanique grossier.
 - Dœgrillage mœcanique fin.
 - Ouvrage de dessablage et dœshuilage.
- **Dœcantation primaire constituœe de :**
 - Deux dœcanteurs primaires circulaires.
- **Traitement biologique constituœ de :**
 - Deux bassins d'œaœration avec trois aœrateurs de surface chacun.
- **Dœcantation secondaire et pompage des boues en excœs constituœe de :**
 - Deux dœcanteurs secondaires circulaires.
 - Ouvrage de pompage des boues activœes et de recirculation des boues.

- **Epaisseur et stabilisation des boues constituée de :**

- Deux épaisseur de boues.
- Station de pompage des eaux troubles.
- Station de pompage de boues épaisies.

- **Stabilisation des boues constituée de :**

- Deux bassins de stabilisation des boues avec deux (02) aérateurs de surface chacun.
- Station de pompage de boues stabilisées.

- **Déshydratation de boue constituée de :**

- Deux chaines de déshydratation avec deux filtres à bandes.
- Station de lavage des filtres à bandes.
- Station de préparation des polymères pour le conditionnement des boues. [37]

III.1. Introduction

Ce chapitre présente essentiellement, les différentes méthodes et manipulations réalisées au laboratoire afin de caractériser et de comparer l'efficacité et le comportement des deux biopolymères "le chitosane et le jus de cactus" lors du conditionnement de la boue. Ainsi que le matériel et la verrerie utilisés.

III.2. Matériels et méthodes

III.2.1. Matériels

Au cours de la réalisation du projet l'ensemble de verrerie utilisé est:

- 1- Bêchers de 100 ml,
- 2- Fioles de 100 ml,
- 3- Eprouvettes de 10, 25 et 50 ml,
- 4- Erlenmeyer de 100 et de 1000 ml,
- 5- Buchner,
- 6- Creusés,
- 7- Verres de montre,
- 8- Moufles.

En ce qui concerne l'équipement, on a utilisé:

- 1- Un Jar-teste de marque Stuart,
- 2- Une pompe à vide de marque Vacuubrand,
- 3- Un manomètre,
- 4- Un turbidimètre de marque Hach,
- 5- Une étuve de marque WST 5020,
- 6- Un four à moufles de marque Naber,
- 7- Une balance de marque Scout SE,
- 8- Un agitateur magnétique,
- 9- Un pH mètre de marque STARTER2C,
- 10- Thermomètre à mercure,
- 11- Un conductimètre de marque HANNA EC214.

III.2.2. Méthodes

III.2.2.1. Echantillonnage

Les échantillons de boues ont été prélevés au niveau du bassin de stabilisation avec un bécher en inox muni d'une tige, la boue est transportée dans un jerrican et conservée à 4 °C dans un délai de 24 heures.

La boue prélevée est analysée dès l'arrivée au laboratoire. Pour le conditionnement des boues un échantillon de 500 ml a été laissé à la température ambiante du laboratoire pour une acclimatation.

III.2.2.2. Caractérisation des boues

III.2.2.2.1. Mesure de la température

On prend un échantillon de boue dans un bécher, on plonge un thermomètre jusqu'à l'obtention d'une valeur stable, on note la température et on refait l'opération pendant plusieurs reprises jusqu'à l'obtention d'une température constante.

III.2.2.2.2. Mesure de l'indice de Mohlman

L'indice de Mohlman IM destiné principalement à la caractérisation des boues biologique, il détermine la décantabilité de la boue.

- Mode opératoire :

On introduit dans une éprouvette un litre de boues. On détermine le volume (en cm³) occupé par les boues après une décantation d'une demi-heure. On détermine par ailleurs la teneur en matière sèche d'un litre de boue à analyser (en passant à l'étuve à 105 °C). I.M. est représenté par le rapport:

$$\frac{M}{V}$$

V: volume de boue après 30 minutes de décantation (cm³).

M: MES présentes dans ce volume (g).



A t = 0 s



A t = 1800 s



Décantation de la boue

III.2.2.2.3. Matière sèche (MS) ou siccité

On Filtre la boue (25 à 100 ml, selon la concentration) sur un papier filtre et un entonnoir en verre. Cette méthode peut être assez longue dans certains cas de mauvaise filtrabilité de la boue. Le filtre est séché à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

- Concentration des MES

$$\frac{M - F}{V} * 1000 \text{ (g/l)}$$

Avec :

- M: masse sèche du filtre et du gâteau(g).
- F: masse du filtre seul (g).
- V: volume de boue filtrée (ml).

III.2.2.2.4. Matière volatile (MVS)

C'est la quantité de matières organiques contenues dans les matières en suspension.

Le résidu sec obtenu lors de la mesure de la matière sèche est broyé et placé pendant 2 heures dans un four à moufle à 550°C préalablement chauffé et thermostaté jusqu'à obtention d'une masse constante. La teneur en matières volatiles est la différence entre la masse initiale et la masse finale qui correspond à la matière minérale.

$$MVS = MES - MM \text{ (g/l)}$$

III.2.2.2.5. Matière minérale (MM)

Le résultat de l'évaporation totale de l'eau représente les matières minérales, c'est-à-dire son « extrait sec », constituées à la fois par les matières minérales en suspension et les matières solubles (nitrates, phosphates, etc.)

Donc, La teneur en matière minérale est la différence entre la matière sèche et la matière volatile (MO).

$$MM = MES - MVS \text{ (g/l)}$$

III.2.2.2.6. Résistance spécifique du gâteau

La résistance spécifique à la filtration « r » est définie comme étant la résistance qui s'oppose à la filtration (ou cheminement du filtrat).

La boue est versée sur un papier filtre placé sur un buchner en appliquant une pression de 0.5 bar, les MES de la boue vont se concentrer et former un gâteau.

- Mode opératoire :

- Remplir la cellule par la boue à filtrer (100ml).
- Etablir le vide et rechercher rapidement la dépression voulue, soit 0,5 bar et veiller à ce qu'elle reste constante tout au long de l'essai

mettre en route le chronomètre et noter le volume de filtrat déjà recueilli : volume V_0 correspondant au temps $t = 0$

- Noter les volumes du filtrat recueilli (V_x) au cours de l'essai pour différents temps de filtration (t_x) : toutes les 10, 15, 20, 30 ou 60 secondes, selon la vitesse d'écoulement du filtrat. L'essai est conduit jusqu'à essorage du gâteau (perte de vide due au craquellement du gâteau).
- Porter sur un graphique les points ayant pour abscisse V_x et pour ordonnée : $\frac{t_x}{V_x}$
- Ces points sont en principe alignés (sauf en début de filtration et pendant l'essorage). La pente de la partie linéaire de la courbe obtenue définit le coefficient a . La **résistance spécifique** sous 0,5 bar est donnée par la relation :

$$r_{0,5} = 2aPS^2 / \eta C$$

Avec :

- r : résistance spécifique exprimée en m/kg,
- a : pente de la droite en s/m⁶,
- P : pression appliquée exprimée en bar (soit 49×10^3 Pa pour 0,5 bar),
- S : surface de filtration exprimée en m²,
- η : viscosité du filtrat exprimé en Pa.s à 20°C.
- C : concentration de la boue à l'entrée de l'appareil (MS) exprimée en kg/m³. [38]

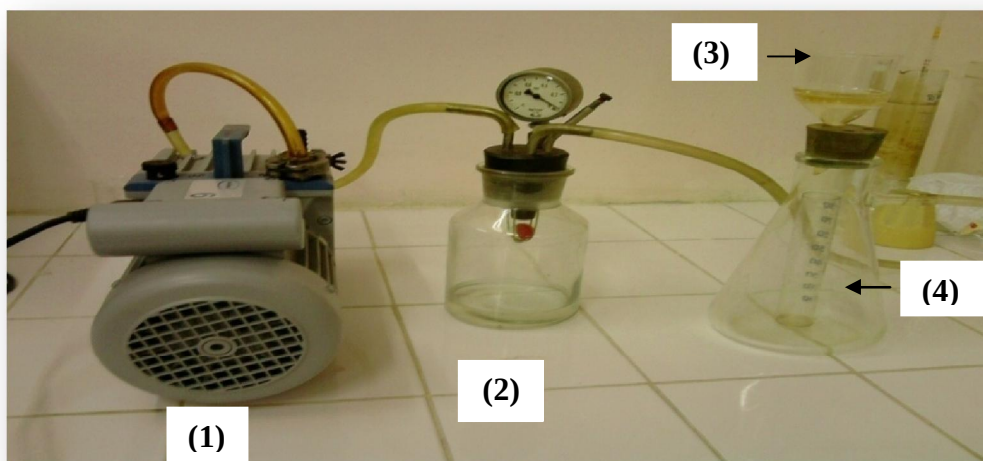


Figure III.1 : Dispositif de la filtration sous vide.

Avec :

- (1) : pompe à vide,
- (2) : manomètre,
- (3) : buchner,
- (4) : éprouvette graduée pour la mesure du volume filtré.

- ✕ Le filtrat obtenu est utilisé pour les mesures de la turbidité, le pH et la conductivité. Le gâteau pour les mesures de la matière sèche, la matière organique et la matière minérale.

III.2.2.2.7. Mesure de la turbidité

Après chaque échantillon de boue filtrée après ajout de coagulant-floculant, Les mesures de la turbidité des échantillons de boues sont réalisées directement sur le filtrat issu de ceux-ci, pour se faire il suffit de :

- Remplir la cuvette de mesure propre avec 10 ml de surnageant.
- Vérifier qu'aucune bulle d'air ne soit présente dans cette cuvette.
- Fermer la cuvette à l'aide du bouchon et nettoyer celle-ci à l'aide d'un chiffon propre, pour éviter toute trace de doigt ou de toute autre trace pouvant affecter le passage de rayon émis par la diode électroluminescente.
- Mettre la cuvette dans son logement.
- Lire directement les valeurs de la turbidité en NTU (nephelometric turbidity units).

III.2.2.2.8. Mesure du pH

La mesure du pH est déterminée par un pH mètre de type STARTER2C, on introduit directement l'électrode dans l'échantillon. La lecture se fait quand la valeur reste constante.

III.2.2.2.9. Mesure de la conductivité

La conductivité est mesurée par un conductimètre en introduisant l'électrode dans l'échantillon. La lecture de la conductivité en milli siemens par centimètre se fait lorsque la valeur reste constante.

III.3. Le conditionnement des boues

Afin de séparer l'ensemble des particules polluantes présentes dans la boue, de l'eau liée (séparation solide-liquide), il suffit de casser la stabilité colloïdale et de faire décanter gravitairement les floccs formés, c'est l'opération du conditionnement.

La floculation des boues a été assurée par un Jar test ayant six rampes. Un échantillon de 500 ml de boues a été mis dans des béchers de 1 l ainsi que des doses croissantes (un pas de 0.4 g /kg) de flocculants ont été ajoutés. Le mélange subit une forte agitation à 120 rpm pendant 30 seconds suivis d'une agitation réduite à 40 rpm pendant 2 minutes.

L'échantillon est pris directement sur la cellule de filtration, sans laisser le temps de décantation.

III.3.1. Préparation des flocculants

III.3.1.1. Le chitosane

Fourni 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 % et il possède un poids moléculaire moyen.

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 complété à 100 ml par l'eau déminéralisée. [3]

Dans notre travail la concentration de la solution du chitosane préparé est égale à 3 g/l.

III.3.1.2. Le jus de cactus

Pour préparer le jus de cactus il faut nettoyer les branches de cactus, les couper en petits dés et les mixer à l'aide d'un mixeur. L'extract aqueux de plante recueilli est ensuite filtré à l'aide d'une passoire de fine pores. Le jus de cactus obtenu a été dilué à 10 % dans de l'eau distillée, puis homogénéisé par une agitation pendant 15 à 20 minutes, et conservé à 4°C pour être utilisé ultérieurement. [21]

✗ Pour connaître la concentration de jus de cactus il faut déterminer la matière sèche en (g /l) de ce dernier :

- Donc un volume de 50 ml de jus de cactus a été mis dans l'étuve à 105 °C pendant 24 heures
- La MS est égale à 28.6 g/l, c'est la concentration du jus de cactus pure.

Donc : 28,6 g $\longrightarrow$ 1000 ml

m (g) $\longrightarrow$ 100 ml (solution diluée de jus de cactus 10%)

$\implies C_{\text{jus de cactus 10 \%}} = 2,86 \text{ g/l}$

Alors on prend 10 ml de jus de cactus pure, et on complète jusqu'à 100 ml avec de l'eau distillée, on obtient un jus de 2,86 g /l.

✗ La dose des flocculants est calculée par rapport à la matière sèche de la boue utilisée, selon la formule suivante:

$$\begin{aligned}
 & \text{Dose (g/l)} = \frac{\text{Matière sèche (g/l)} \times \text{Dose flocculant (g/kg)}}{1000} \\
 & \text{Dose (g/l)} = \frac{28,6 \text{ g/l} \times 100 \text{ g/kg}}{1000} = 2,86 \text{ g/l}
 \end{aligned}$$

III.3.1.3. Variation du pH de la boue

Afin d'étudier les caractéristiques de la boue et son comportement vis-à-vis la méthode de filtration et le conditionnement, des essais de variation du pH de la boue brute ont été effectués. On a utilisé l'acide acétique 1N pour diminuer le pH initial et une solution de NaOH 1N pour l'augmenter.

III.4. La rhéologie

III.4.1. Le rhéomètre

En pratique l'appareil utilisé pour étudier le comportement mécanique des fluides s'appelle le rhéomètre, et le tracé obtenu est nommé rhéogramme.

Le rhéomètre utilisé est un appareil rotatif de marque PHYSICA RHEOLAB MC1 (figure 3), relié à un thermostat où la température est fixée à 20 °C. Le système de mesure utilisé est mesure de géométrie cylindrique à double entrefer Z2 présente une grande sensibilité (0,1mPa.s) et nécessite un volume V d'échantillon de 100 ml pour chaque mesure.

Le rhéomètre est piloté par le logiciel SOFTWARE RHEOLAB MC1 US 200.



Figure III.2 : Le rhéomètre utilisé.

Lors des essais, on obtient des rhéogrammes qui sont des courbes d'écoulement qui traduisent graphiquement l'équation rhéologique d'état.

III.4.2. Procédure

Afin de déterminer le comportement rhéologique de notre boue, on a suivi les étapes suivantes :

- 1- Détermination de la contrainte seuil de l'écoulement : on applique une montée de la contrainte de cisaillement,
- 2- Faire un test de dépendance au temps, on applique trois valeurs de contrainte de cisaillement constantes. Si le fluide est thixotrope, on détermine le temps d'équilibre,
- 3- Détermination de la courbe d'écoulement (écoulement simple): on applique une montée et une descente de la vitesse de cisaillement, qui doit être suffisante, pour maintenir la boue en suspension et prévenir ainsi les problèmes de sédimentation dans la cellule de mesure, et pas trop élevées afin d'éviter l'apparition des zones de turbulences. Pour cela, la valeur maximale de la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) lors du balayage aller retour ne dépasse pas 800 s^{-1} pour une durée de 120s.
- 4- Enregistrement de la contrainte (τ) en fonction de la vitesse de cisaillement imposée ($\dot{\gamma}$).
- 5- La modélisation du comportement consiste à chercher un modèle rhéologique existant ou de développer un modèle qui exprime au mieux les résultats expérimentaux et le phénomène réel. Dans notre cas, le modèle utilisé est celui de Bingham.

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{D}$$

Avec :

τ : la contrainte,

τ_0 : la contrainte seuil,

η_p : la viscosité plastique,

$\dot{D}$: la déformation.

Dans ce chapitre, on a englobé l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus, qui vont être discutés pour pouvoir comparer l'efficacité des flocculants utilisés, et pour distinguer le biomatériau le mieux utilisé pour le conditionnement des boues. Ces résultats vont permettre aussi d'étudier la performance de la méthode de déshydratation « la filtration sous vide ».

IV.2. Caractérisation de la boue brute

Les résultats de la caractérisation de la boue au laboratoire sont présentés dans le tableau IV.1. Ces résultats représentent la moyenne de trois échantillons de boue prélevée.

Tableau IV.1 : Résultats de la caractérisation de la boue brute.

T (°C)	pH	MS (g/l)	MVS (g/l)	MM (g/l)	Siccité (%)	Turbidité (NTU)	Conductivité (ms/cm)	MVS/MS (%)	Im (cm ³ /g)
25	7.16	45.46	24.1	21.36	4.62	30	3.6	53.01	30.65

Pour l'ensemble des résultats montrés dans le tableau IV.1 on peut dire que :

- D'aspect, les boues étudiées sont liquides et présentent une couleur brune.
- **La température** correspond à la température ambiante du laboratoire.
- **Le pH** est pratiquement neutre.
- **La matière sèche et la matière organique** sont plus élevées aux **matières minérales**.
- **La siccité** de la boue est très faible ceci se traduit par le fait que notre boue est très liquide, et que l'épaississement n'a pas joué son rôle.
- **La turbidité** des filtrats des boues est élevée puisque la boue étudiée provient des eaux usées urbaines.
- La mesure de **la conductivité** explique que la boue contient des sels minéraux, ce qui est normale, le fait qu'une eau usée urbaine contient en moyen 3 à 4 g/l de sel, ce qui correspond à 3 à 4 cm/ms.

est entre 50 et 70 % ce qui signifie que la boue étudiée est légèrement organique (mauvaise stabilisation).

- **L'indice de Mohlman** renseigne sur la décantabilité des boues. Dans notre cas il est inférieur à $50 \text{ cm}^3/\text{g}$, donc on a une mauvaise décantabilité des boues car les floccs ne sont pas assez concentrés.

IV.3. Caractérisation de la boue conditionnée

IV.3.1. Résultats de la filtration sous vide

La boue de la station de Beni-Messous, collectée du bassin de stabilisation à été conditionnée par deux nouveaux flocculants naturels, le chitosane et le jus de cactus.

Le jus de cactus obtenu est visqueux, de couleur verte, et possède les caractéristiques suivantes (tableau IV.2) :

Tableau IV.2 : Caractéristiques de jus de cactus.

pH	Conductivité (ms/cm)	Matière sèche (g/l)
4.61	10.5	28.6

Selon la mesure de la conductivité on remarque que le jus de cactus préparé contient beaucoup de sel, environ 10 g/l.

En se basant sur la recherche bibliographique, et sur des essais qui ont été déjà fait sur le conditionnement des boues en utilisant le jus de cactus, on a constaté que ce dernier donne des meilleurs résultats lorsqu'il est dilué à 10%.

Pour cela on a préparé un jus de concentration égale à 2.86 g/l, d'un pH égal à 5.03 et qui présente une conductivité de 1.1 ms/cm.

A partir des résultats de la filtration sous vide en utilisant des doses croissantes de polymères, on a pu tirer les courbes suivantes :

Les figures IV.1 et IV.2 représentent le volume filtré en fonction du temps à différentes doses du chitosane et de jus de cactus.

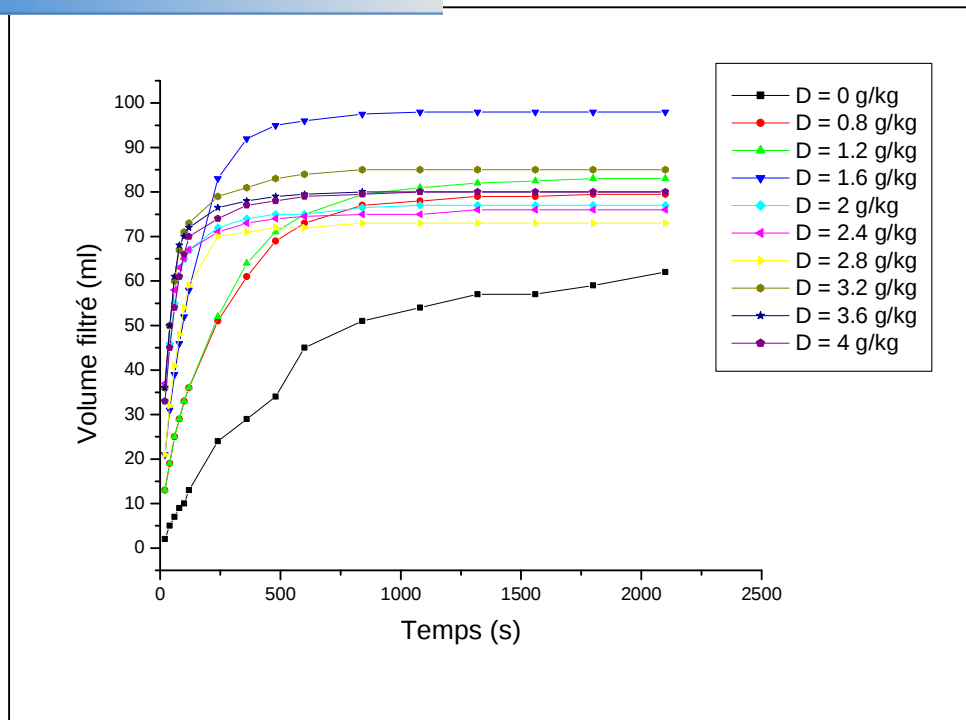


Figure IV.1 : Variation du volume filtré en fonction du temps à différentes concentrations du chitosane.

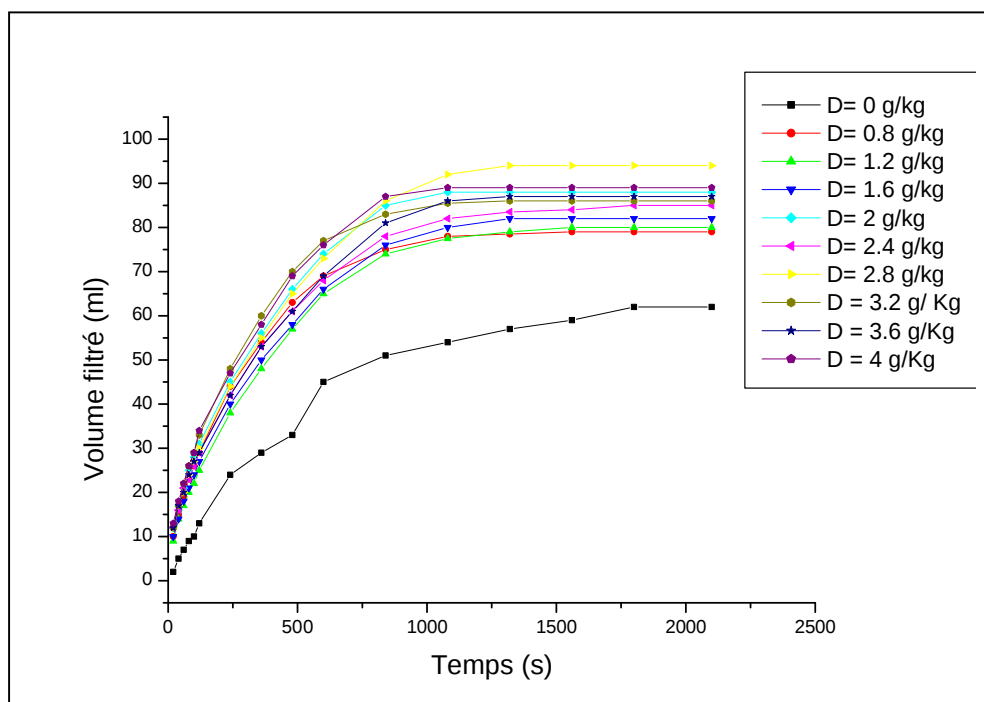


Figure IV.2 : Variation du volume filtré en fonction du temps à différentes concentrations du jus de cactus.

La boue non conditionnée, met beaucoup de temps pour qu'elle soit filtrée, avec un taux de filtration très bas (62%), ceci veut dire que les particules en suspension emprisonnent et empêche l'eau contenue dans la boue, à sortir.

Dans les deux courbes on remarque la présence de deux phases ou la première correspond à une augmentation rapide du volume d'eau recueilli, or que dans la deuxième phase la filtration devient plus lente. Le temps de filtration dans la première phase de la courbe 2 (840 s) est plus long que la première phase de la courbe 1 (240 s), ce qui nous mène à dire que le jus de cactus est un polymère qui a une action plus douce et plus lente si on le compare avec le chitosane.

Si on remarque le graphe de la figure 1 on constate que le conditionnement en utilisant le chitosane a permis de libérer le maximum d'eau liée aux particules en suspension dans un temps de filtration très réduit.

Le temps de filtration diminue, et le taux augmente avec l'augmentation de la dose du chitosane jusqu'à la dose 1.6 g/kg ou la libération d'eau est presque totale au bout de 480 seconds (taux de filtration égal à 95%), et il atteint le 98% après 600 seconds. Au-delà de cette dose le taux de filtration subit une diminution jusqu'à atteindre la valeur 73% avec la dose 2.8 g/kg.

En effet, le chitosane provoque la neutralisation des particules colloïdales : il s'adsorbe à la surface de ces particules par des liaisons hydrogènes entre les charges négatives situées à la surface des particules et les groupements amines libres du chitosane.

Le graphe de la figure 2 montre l'efficacité du conditionnement par le jus de cactus, le volume recueilli augmente en augmentant la dose du biofloculant jusqu'à la dose 2.8g/kg. Un meilleur taux de filtration (94%) est obtenu avec la dose 2.8 g/kg. A partir de la dose 3.2 g/kg le taux de filtration diminue, et il atteint le 89% avec la dose 4 g/kg.

On a noté visuellement que la texture des floccs obtenus est différente lors de l'utilisation des deux biofloculants. En effet, les floccs formés, sont fins lorsqu'on ajoute le chitosane, et sont trop fins lorsqu'on remplace ce dernier par le jus de cactus.

IV.3.2. Résultats de la siccité du gâteau

La courbe suivante (figure IV.3) montre la variation de la siccité du gâteau en fonction des doses croissantes du chitosane et de jus da cactus.

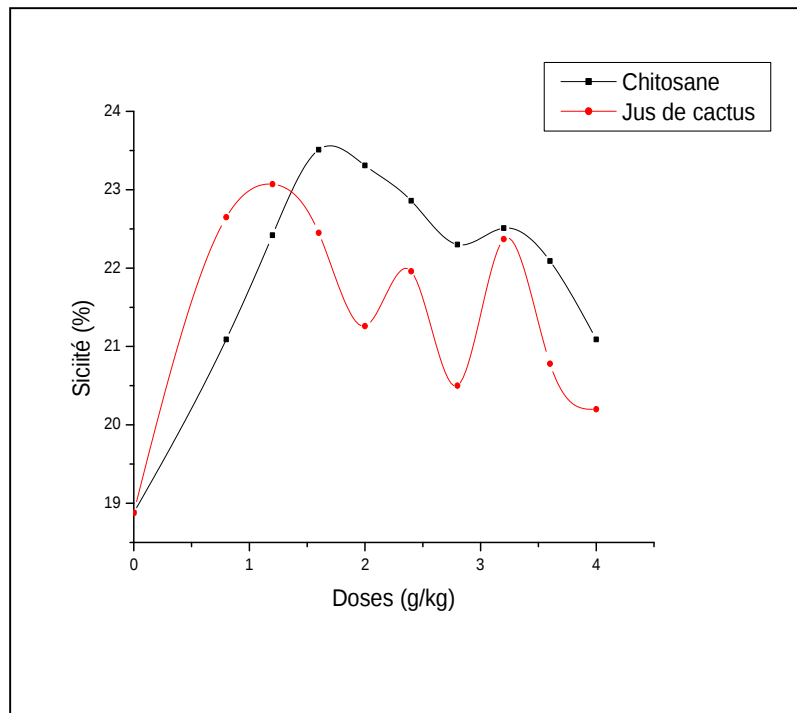


Figure IV.3 : Variation de la siccité du gâteau en fonction de la dose des biofloculants.

La variation de la siccité en fonction de la dose des biofloculants est une courbe sous forme de cloche qui passe par un optimum (dose optimale), puis elle diminue, ce qui correspond à une courbe de type coagulation-floculation. La diminution de la courbe peut être expliquée par la ré-stabilisation des floes formés lors du conditionnement de la boue.

En utilisant le chitosne, la siccité du gâteau augmente en augmentant la dose, et elle atteint un maximum de 23.51% ce qui correspond à 1.6 g/kg, puis elle diminue jusqu'à 21.9% avec la dose 4 g/kg.

Dans le cas de jus de cactus, la siccité augmente toujours. Cette valeur est maximale à 1.2 g/ kg ou elle est égale à 23.07% et minimale à 4 g/kg (Sc = 20.2%).

Les valeurs de la siccité sont légèrement plus élevées dans le cas du chitosane par rapport à celles en utilisant le jus de cactus, mais dans les deux cas, elles sont supérieures à la siccité de la boue non conditionnée (18.88%).

Les gâteaux formés sont secs, compacts, et contiennent des craquèlements, ils possèdent un diamètre qui varie entre [4.6 ã 5.5] cm lors de l'utilisation du chitosane, tandis que dans le cas de jus de cactus, leurs diamètre est compris entre [5.5 et 6.5] cm, cette variation est due au rétrécissement du filtre pendant la filtration. Ces gâteaux ont une épaisseur de [0.5 à 1] cm.

IV.3.3. Résultats de la mesure de la turbidité du filtrat

Les résultats de la turbidité sont portés sur le graphique de la figure IV.4 qui représente la variation de la turbidité en fonction de la dose des biopolymères.

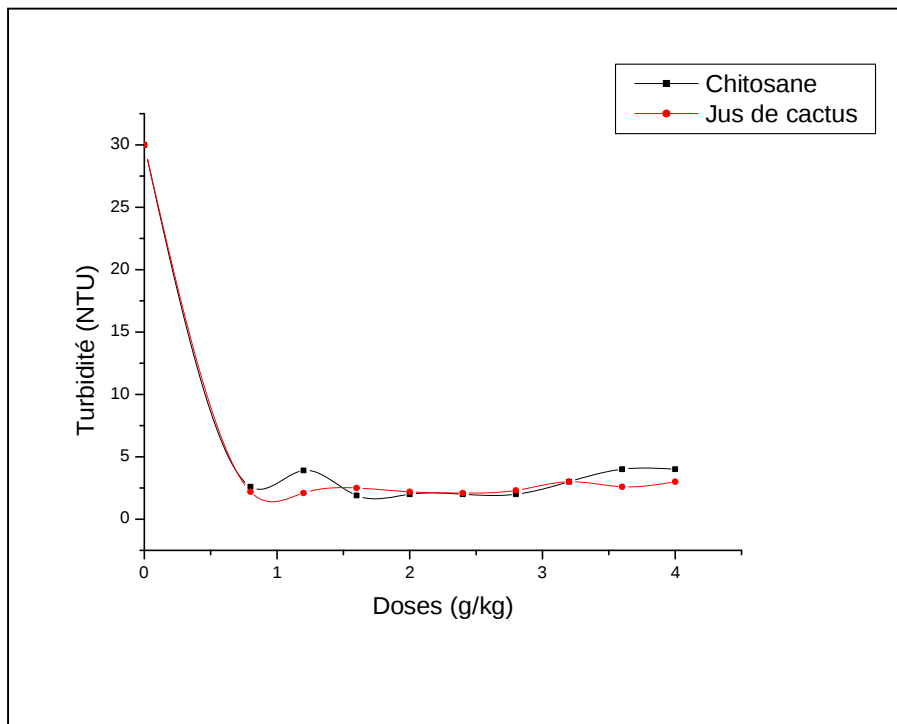


Figure IV.4 : Variation de la turbidité en fonction des doses des biopolymères.

On remarque une diminution considérable de la turbidité des filtrats à une faible dose (à 0.8 g/kg on obtient des valeurs de 2.2 NTU pour le jus de cactus et 2.6 NTU pour le chitosane), cela veut dire que les particules en suspension ont été bien éliminées.

Zimerman rapporte récemment que l'acide galacturonique est probablement la substance active, bien qu'il convient de noter qu'il diminue 50% de turbidité. Il propose que l'Opuntia fonctionne principalement par un mécanisme de pontage où les particules de la solution ne sont pas en contact direct avec d'autres mais sont liées à des matériaux polymères qui proviennent des espèces de cactus. Cependant plusieurs études soulignent l'importance de l'acide galacturonique qui peut agir en tant que l'un des principaux agents de coagulation chez les plantes et, par conséquent, mérite encore d'évaluation technique. [22]

La quantité du chitosane adsorbé croît avec l'augmentation de la dose en chitosane ajoutée. La taille élevée du polymère combinée à sa configuration très étendue en suspension, du fait de fortes répulsions entre segments de même signe, favorise le pontage des particules par les segments du polymère adsorbé. [39]

A des concentrations plus élevées des flocculants, on obtient une légère augmentation de la turbidité finale (à 4 g/kg la turbidité atteint la valeur 3 NTU pour le jus de cactus et 4 NTU dans le cas du chitosane), mais elle reste toujours inférieure de la valeur initiale. En effet l'ajout excessif de polymère peut ré-stabiliser les particules colloïdales qui ont été coagulées, ce qui entraîne l'augmentation de la turbidité de la solution finale.

IV.3.4. Résultats de la mesure du pH

La figure suivante (figure IV.5) représente la variation du pH des filtrats recueillis en fonction de la concentration des flocculants.

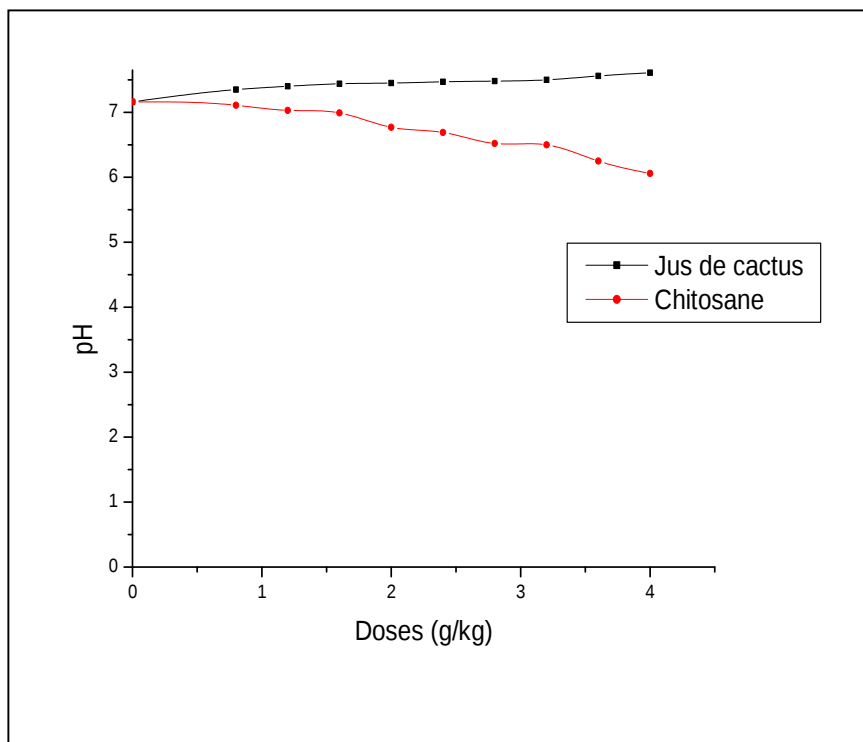


Figure IV.5 : Variation du pH des filtrats en fonction de la concentration des flocculants.

Vu que le chitosane présente un pH acide (égal à 2), donc l'augmentation de la concentration du chitosane entraîne une diminution du pH du filtrat, alors les filtrats deviennent acides.

Le jus de cactus dilué présente un pH légèrement acide (5.03), ce qui n'a pas vraiment influencé sur le pH du filtrat. Ce dernier varie entre [7.16 et 7.6].

IV.3.5. Résultats de la résistance spécifique à la filtration

Les courbes de la figure IV.6 représentent l'évolution de la RSF en fonction de la dose du chitosane et de jus de cactus.

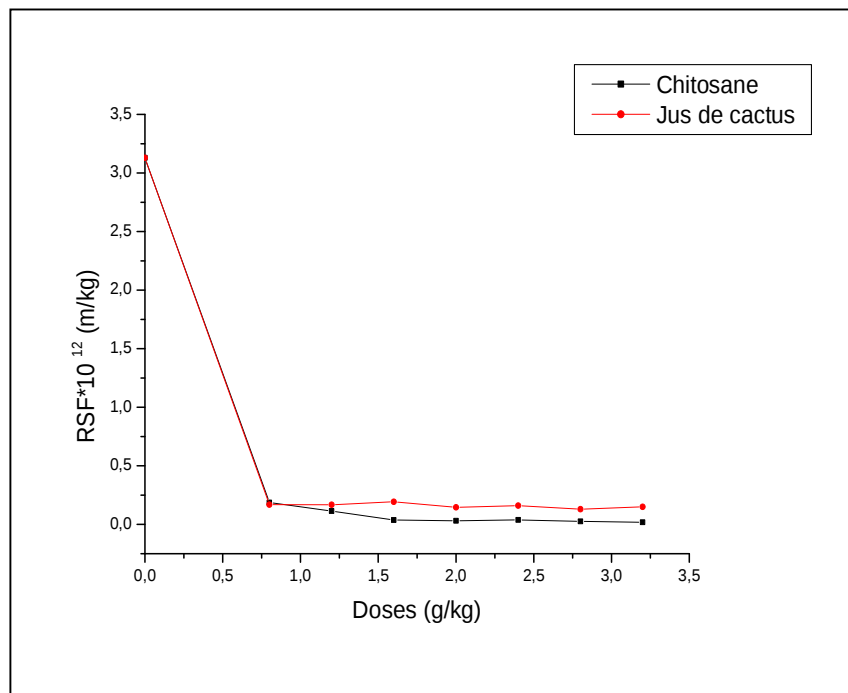


Figure IV.6 : Variation de la RSF en fonction de la dose du chitosane et de jus de cactus.

On observe que cette courbe se présente en deux phases, dans la première on remarque une diminution très rapide de la RSF à une très faible dose de polymères (la RSF passe de $3,13 \cdot 10^{12}$ à $0,1869 \cdot 10^{12}$ m/kg en utilisant le chitosane et à $0,169 \cdot 10^{12}$ m/kg pour le jus de cactus avec la dose 0,8 g/kg). Dans la deuxième phase (au-delà de 0,8 g/kg) elle devient presque constante ($RSF = 0,0181 \cdot 10^{12}$ m/kg pour le chitosane et $0,1504 \cdot 10^{12}$ m/kg pour le jus de cactus). On constate que ces valeurs sont meilleures dans le cas du chitosane, et indiquent que la boue est bien filtrée (bonne séparation solide/liquide).

- ✕ Les résultats de la mesure de la viscosité et de la conductivité à différentes concentrations du chitosane et de jus de cactus sont présentés dans les tableaux IV.3 et IV.4.

❖ **En utilisant le chitosane**

Tableau IV.3: Résultats du conditionnement par le chitosane.

Dose (g/kg)	0	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	3.2	3.6	4
Turbidité finale (NTU)	30	2.6	3.9	1.9	2	2	2	3	1.6	1.6
Siccité (%)	18.88	21.09	22.42	23.51	23.31	22.86	22.3	22.51	22.09	21.9
RSF *10 ¹² (m/kg)	3.130	0.1869	0.1138	0.0374	0.0379	0.0262	0.0181	0.0190	/	/
Viscosité (Pa.s)	0.018	0.021	0.024	0.030	0.030	0.029	0.032	0.034	0.038	/
Conductivité (ms/cm)	3.6	3.16	3.1	3	3	3.3	3.5	3.5	3.5	3.6

D'après ce tableau on remarque que:

- La viscosité de la boue conditionnée augmente en augmentant la dose du chitosane, donc elle dépend de la grosseur et du nombre des particules.
- La conductivité varie entre 3 et 3.6 ms/cm, ce qui signifie que l'ajout du chitosane à doses croissantes, a peu influencé sur la conductivité des filtrats puisque ces valeurs sont proches de la valeur initiale.

❖ **En utilisant le jus de cactus**

Tableau IV.4 : Résultats du conditionnement par le jus de cactus.

Dose (g/kg)	0	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	3.2	3.6	4
Turbidité finale (NTU)	30	2.2	2.6	2.5	2.2	2.1	2.3	3	2.6	3
Siccité (%)	18.88	22.65	23.07	22.45	21.26	21.96	20.50	22.37	20.78	20.02
RSF *10 ¹² (m/kg)	3.130	0.169	0.167	0.193	0.146	0.160	0.130	0.150	/	/
Viscosité (Pa.s)	0.018	0.022	0.024	0.025	0.026	0.026	0.028	0.029	/	/
Conductivité (ms/cm)	3.6	3.6	3.5	3.6	3.5	3.6	3.3	3.4	3.4	3.4

Ces résultats montrent que:

- L'augmentation de la viscosité des boues conditionnées dépend de la concentration du jus de cactus.
- Comme le chitosane, le jus de cactus n'a pas influencé sur la conductivité des boues, cette dernière varie entre 3.3 et 3.6 ms/cm.

Le tableau IV.5 résume l'ensemble des résultats obtenus :

Tableau IV.5 : Résultats de la filtration sous vide.

floculants	Dose optimale (g/kg)	Siccité (%)	Turbidité (NTU)	RSF (m/kg)
chitosane	1.6	23.51	1.9	$0.0347 \cdot 10^{12}$
Jus de cactus	1.2	23.07	2.6	$0.1679 \cdot 10^{12}$

Selon les courbes tracées et les résultats montrés dans les tableaux IV.5 on a conclus:

- Les biofloculants de part leurs origines, sont efficaces pour être utilisés dans un tel procédé. A faibles doses on a marqué de bon résultats vis-à-vis les paramètres qu'on a déterminé.
- Les meilleurs résultats du conditionnement des boues sont obtenus avec la dose 1.6 g/kg pour le chitosane (taux de filtration égale à 98%), et avec 1.2 g/kg dans le cas de jus de cactus (taux de filtration égale à 80 %) ou on a marqué des valeurs maximales de la siccité avec une forte diminution de la turbidité des filtrats, ainsi que la RSF.

IV.3.6. Mesures rhéologiques

Les figures IV.7 et IV.8 présentent les rhéogrammes de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement obtenus.

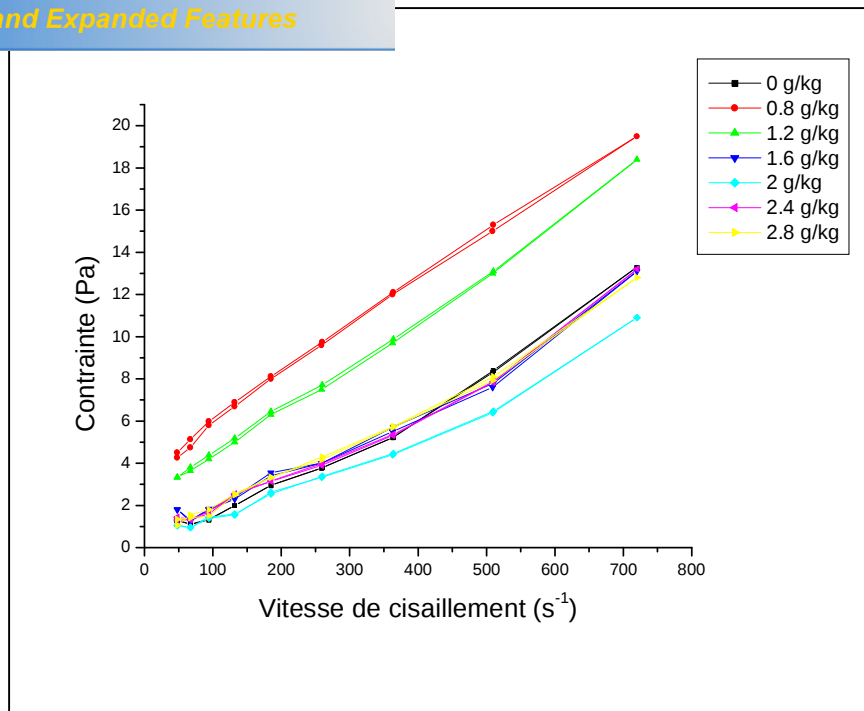


Figure IV.7 : Courbes d'écoulement de la boue conditionnée avec le jus de cactus à différentes concentrations.

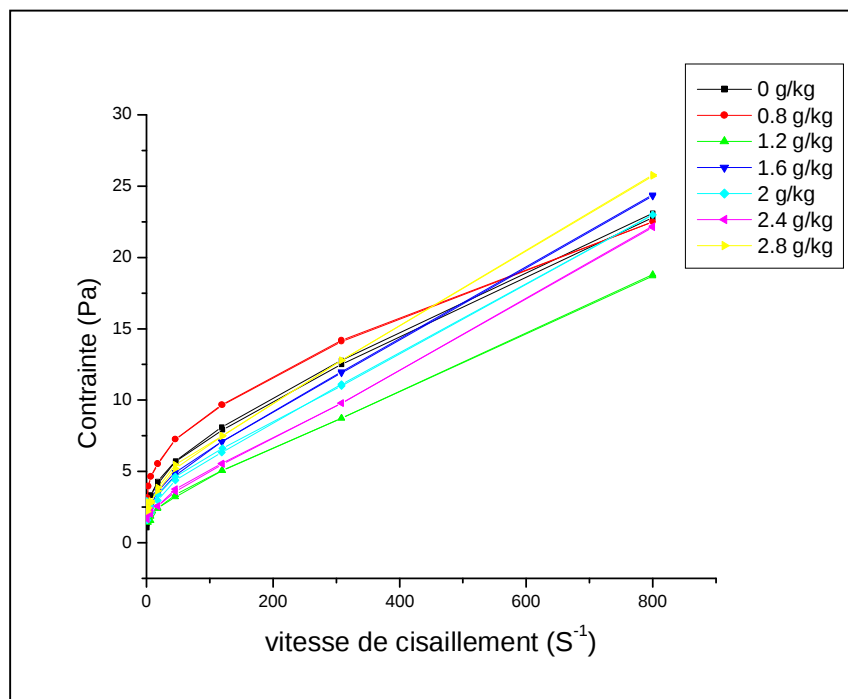


Figure IV.8 : Courbes d'écoulement de la boue conditionnée avec le chitosane à différentes concentrations.

Les rhéogrammes révèlent que la boue fraîche et la boue conditionnée avec le jus de cactus et le chitosane sont des liquides non-newtoniens à contrainte seuil, c'est à dire que la boue a besoin que la contrainte atteigne une valeur minimale pour qu'elle s'écoule. Le modèle de Bingham semble le mieux adapté pour décrire le comportement plastique de la boue conditionnée, Dans le cas du jus de cactus on remarque que la contrainte de cisaillement a augmenté avec la dose 0.8 et 1.2 g/kg où la siccité est maximale, a partir de la dose 1.6 g/kg, la contrainte diminue et la boue adopte un comportement différent l'un de l'autre.

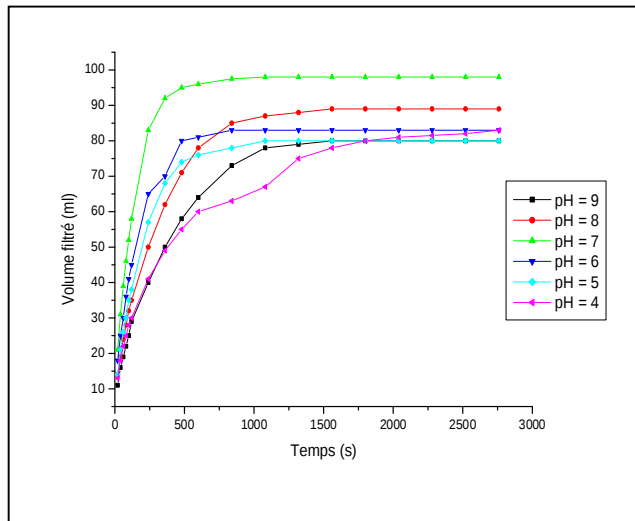
Dans le cas du chitosane le maximum est observé à la dose 1.6g/kg, avec cette dose du chitosane on a obtenu une siccité maximale de 23.52%, à partir de la dose de 2g/kg, les rhéogrammes du chitosane adoptent un comportement anarchique.

Avec les doses 1.2 et 1.6 g/kg du jus de cactus et du chitosane respectivement où on a obtenu des siccités maximales, la boue conditionné est plus compacte. les résultats obtenus nous permettent d'établir un lien entre la siccité et les mesures rhéologiques.

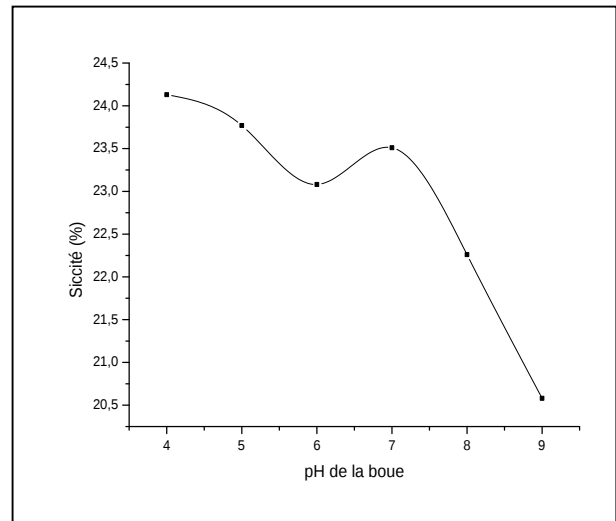
IV.4. Variation du pH

- Pour la dose optimale du chitosane (1.6 g/kg) on a varié le pH initial de la boue (pH= 9, 8, 6, 5, 4). Les paramètres étudiés précédemment sont déterminées.

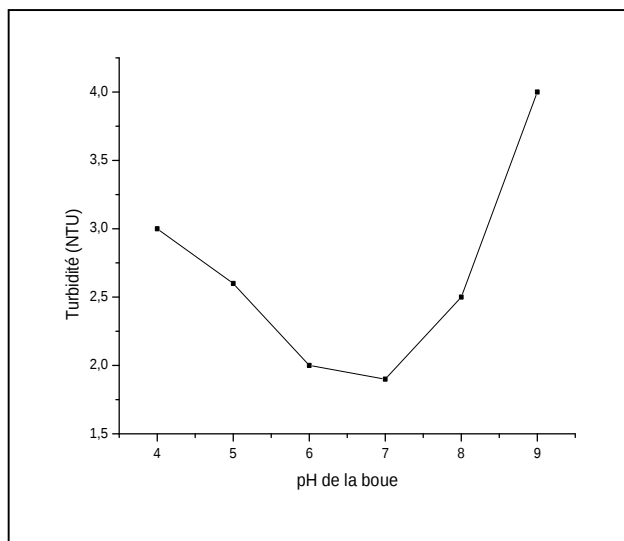
Les différents tracés sont affichés dans la figure IV.9



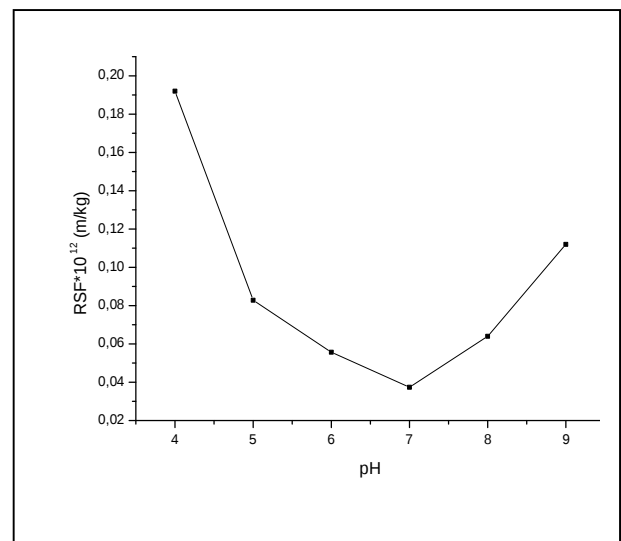
Influence du pH sur le volume recueilli



Variation de la siccité en fonction du pH de la boue



Variation de la turbidité en fonction du pH de la boue



Variation de la RSF du gâteau en fonction du pH de la boue

Figure IV.9 : Résultats de la variation du pH

- ✗ Les gâteaux formés sont humides et moussants, les résultats de mesure de la conductivité et la viscosité sont présentés dans le tableau IV.6.

Tableaux IV.6 : Résultats de la variation du pH.

pH	4	5	6	7	8	9
Turbidité finale (NTU)	3	2.6	2	1.9	2.5	4
Siccité (%)	24.13	23.77	23.08	23.51	22.62	20.58
RSF $\times 10^{12}(\text{m/kg})$	0.196	0.082	0.055	0.037	0.064	0.112
Viscosité (Pa.s)	0.026	0.030	0.031	0.030	0.038	0.038
Conductivité (ms/cm)	4.2	4	3.5	3	3.9	3.7

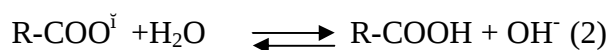
D'après les courbes tracées et le tableau IV.6 on remarque que :

- Le volume filtré est plus intéressant à pH neutre (98 ml filtré). A pH 8 et 6 (pH près de la neutralité), la filtration est aussi importante qu'à pH égale à 9, 5 et 4. La boue a été filtrée rapidement avec un taux égal à 89 et 83 % respectivement.
- La siccité du gâteau est maximale à pH égale à 4 ($S_c = 24.13\%$), cette dernière s'affaiblit en augmentant le pH de la boue jusqu'à atteindre le 20.58% à pH 9. A pH 7 la siccité est égale à 23.51%, ce résultat est acceptable puisqu'on a augmenté la siccité initiale.
- La réduction de la turbidité du filtrat apparaît à pH 7, au-delà et en deçà elle augmente mais elle reste toujours inférieure à celle de la boue non conditionnée.
- La RSF du gâteau est plus élevée à pH acide (pH = 4), cette dernière diminue jusqu'à atteindre la valeur $0.0374 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ à pH 7, au-delà on remarque qu'elle augmente.
- La viscosité de la boue augmente en augmentant le pH de cette dernière.

de 3 et 4.2 ms/cm. Donc la boue contient toujours des sels minéraux.

Remarque

Pour cactus *Opuntia*, l'effet du pH de la solution sur la coagulation est assez compliquée et plus difficile à élucider en raison de la nature imprécise de ses agents de coagulation, bien qu'il ait été suggéré que l'acide galacturonique (élément clé dans le mucilage de *Opuntia*) joue un rôle essentiel dans la coagulation de particules de kaolin. Puisque l'acide galacturonique est essentiellement un polyélectrolyte anionique, les réactions suivantes peuvent se produire en solution aqueuse:



Dans ce cas, R-représente la structure de base d'acide galacturonique. Pour la réaction (1), le groupe carboxyle de l'acide galacturonique [22]. Cette libération des OH^- a tendance à augmenter légèrement le pH.

Perspectives

- Orienter le conditionnement des boues vers une technologie propre en utilisant des flocculants naturels tel que le chitosane et le jus de cactus, dans le cadre de la préservation de l'environnement et la santé publique.
- Une bonne caractérisation de ces bioflocculants est nécessaire pour connaître la molécule active responsable à la floculation et d'établir les mécanismes mis en jeu.
- Approfondir l'étude rhéologique des boues pour définir leur comportement rhéologique en fonction des polymères ajoutés.
- Une étude de l'effet du pH de la boue conditionnée sur le jus du cactus.

Références bibliographiques

[1] : Angélique Léonard, "Etude du séchage convectif de boues de station d'épuration- suivi de la texture par microtomographie à rayons x", thèse de doctorat 2002, université de Liège.

[2]: Audrey Prorot, "Approche comparative des effets microbiologiques et chimiques de traitements d'hydrolyse de boues urbaines dans le cadre de la réduction de leur production", thèse de doctorat, 2008, université de Limoges.

[3]: Zemmouri Hassiba, "Valorisation d'un biomatériau, le chitosane dans le traitement des eaux de surface et dans le conditionnement des boues", thèse de doctorat, ENP-Alger, 2012.

[4]: DEZENCLOS T. 2010. Problèmes des boues des STEP d'Alger. SEAAL, direction production et ressources, 97, Parc Ben Omar ñ Kouba- Alger. Séminaire sur les enjeux de la qualité dans le secteur de l'eau et de l'assainissement en Algérie, Apport de techniques nucléaires. (EQSAATN). Tipaza (Algérie), 11-12 Mai 2010.

[5]: Ben-Aïm, R., "Qu'est-ce qu'une boue ? D'où viennent les boues ?," Actes Du Colloque. Les Boues. Quels Enjeux? Quelles Solutions ?, Pau, France, 23-24 Février, 2000.

[6]: Nader Moatamri, "De l'analyse du pilotage d'un décanteur centrifuge à son instrumentation", thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires, 2003.

[7]: Henri Aussel, Collete Le Bacle, Graziella Dornier, institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, Paris, 2004.

[8]: Vincent Brahy et Didier Cadelli, "La collecte et l'épuration des eaux usées".

[9]: Philippe Duchène groupe d'antony, "Les systèmes de traitement des boues des stations d'épuration des petites collectivités", Paris.

[10]: Gamrasni M, "Utilisation agricole des boues d'épuration d'origine urbaine", 1981, Paris, 128 p.

[11]: C. Brison, J.M. Perrete, J.P. Canler, "Le séchage solaire des boues: état actuel de l'art et retour d'expériences", département écotechnologies, Lyon.

[12]: Lazarova. V et Manem, "Advances in biofilm aerobic reactors ensuring effective biofilm activity control", 1994, Ed. Water Science and Technology, 327 p.

[13]: Degremont, Mémento Technique De L'eau, Paris: Lavoisier technique et documentation, 1989, 1524 p.

[14]: Jingdong Zhang, Fang Zhang, Youhong Luo, Hong Yang, "A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment", 2006, vol 41, 730-733.

[15]: Hadj-Kouider Saida, "Caractérisation et traitement des boues d'épuration de la région d'Alger", thèse de magistère, université Saad Dahlab de Blida, 2011.

[16]: Fenwu Liu, Jun Zhou, Dianzhan Wang, Lixiang Zhou, "Enhancing sewage sludge dewaterability by bioleaching approach with comparison to other physical and chemical conditioning methods", Department of Environmental Engineering, College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China, 2011.

[17]: Faust, T. et W. Gösele (1986). Investigation on the clarification process in decanter centrifuge. Ger. Chem. Eng, Weinheim, Verlagsgesellschaft.

[18]: Berk, J. S., et al, "Enhanced biosolids dewatering through the use of the ferrous chloride", 67th annual conference & exposition, Chicago, ILLINOIS, WEFTEC'94. 1994

[19]: McDonald. S et al, "Side-by-side pilot testing of centrifuge and belt filter press dewatering equipment on anaerobically digested biosolids and storage/treatment lagoon biosolids", 67th annual conference & exposition, Chiacago, ILLINOIS, WEFTEC'94, 1994

[20]: Colin Lafleur et al, "Evaluation d'un procédé de coagulation floculation au chitosane pour l'enlèvement du phosphore dans les effluents piscicoles", université du Québec, 2008.

[21] : Abid. A et al, "Valorisation d'un nouveau bio floculant (extrait de cactus) dans le traitement physico-chimique des rejets liquides chargés en cuivre, en zinc et en matière en suspension", université du Maroc, 2009.

[22]: Chun-Yang Yin, "Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment", Malaysia, 2010, 1437-1444.

[23]: Schweizer.M, " Docteur Nopal le médecin du bon dieu", 1997, France, 81p.

[24]: A. Diaz et al, "A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela", Birmingham University, 1999, 391-395.

[25]: Saunier C, Rivollier M, Michaud P, " Le chitosane : un nouvel antimicrobien/antioxydant pour les produits carnes", Clermont Université

[26]: Zemmouri Hassiba, "Le chitosane est il la molécule du siècle", Division Bio-Energie et Environnement.

[27]: Ivo Georgiev Lalov, "Treatment of waste water from distilleries with chitosan", Bulgaria, 1999, Vol. 34, N°5, 1503-1506.

[28]: Defang Zeng, Juanjuan Wu, John F. Kennedy, "Application of a chitosan flocculant to water treatment", Birmingham, 2007, 135-139.

[29]: Zemmouri. H, " Conditionnement des Boues de la Station d'Épuration de Beni-Messous Utilisant le $FeCl_3$, le Chitosane et un Polyélectrolyte Synthétique", Ecole Nationale Supérieure Polytechnique 10, Alger. 2010.

[30]: Audrey Pevere, "Apport des mesures rhéologiques à l'étude des biomasses épuratoires granulaires anaérobies", thèse de doctorat, université de Limoges, 2006,

[31]: Hadj Sadouk, cours de rhéologie, université de Blida 2010.

[32]: Nicolas Tixier, "Approche des propriétés rhéologiques de suspensions biologiques floculées", thèse de doctorat, université de Limoge, 2003.

[33]: Jacques Bouton, "Les mesures rhéologiques, complexes mais pas insurmontables", ThermoRhéo, JUIN 2001, pp81-86.

[34]: Lidia Wolny, Pawed Wolski, Iwona Zawieja, "Rheological parameters of dewatered sewage sludge after conditioning" Poland, 2007, 382-387.

[35]: Achouri, Etude des performances épuratoires de la station d'épuration par lagunage naturel de l'oued Béni-Messous, Alger.

[36]: Document du Ministère des ressources en eaux : Descriptif de fonctionnement et d'exploitation de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Béni-Messous. Direction des Ressources Hydrauliques et l'économie de l'Eau. Algérie.

[37]: M. Daghar, A. Sisalah, « Descriptif de fonctionnement et d'exploitation de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Béni-Messous ». M.R.E., direction des ressources hydrauliques et de l'économie de l'eau, 2007.

[38]: Degremont, (2005).Mémento Technique De L'eau : Tome 1, Dixième édition; Edition : Technique et Documentation Lavoisier Paris;785p.

[39]: Grégorie C, Badot P, Guibal E. Chitine et Chitosane. Du Biopolymère a l'application. Ed: press universitaires. Franche-comité.