

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie des Procédés et Environnement
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en
Génie des Procédés et Environnement

Mise en œuvre d'un coagulant naturel conditionnant les boues du STEP de Baraki

Réalisé par

Fatma Zohra GUENDA

Sous la direction de

Mme. Chahinez TCHEKIKEN

MCB à l'ENP

M. Abdelkader NAMANE

Professeur à l'ENP

Présenté et soutenu le 08 juillet 2024

Composition du Jury :

Présidente	Mme. Naima DJELLOULI	MCB à l'ENP
Examinatrice	Mme. Dalila HANK	Professeure à l'ENSA
Promotrice	Mme. Chahinez TCHEKIKEN	MCB à l'ENP
Co-promoteur	M. Abdelkader NAMANE	Professeur à l'ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département des Procédés et Environnement

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en
Génie des Procédés et Environnement

Mise en œuvre d'un coagulant naturel conditionnant les boues du STEP de Baraki

Réalisé par

Fatma Zohra GUENDA

Sous la direction de

Mme. Chahinez TCHEKIKEN

MCB à l'ENP

M. Abdelkader NAMANE

Professeur à l'ENP

Présenté et soutenu le 08 juillet 2024

Composition du Jury :

Présidente	Mme. Naima DJELLOULI	MCB à l'ENP
Examinatrice	Mme. Dalila HANK	Professeure à l'ENSA
Promotrice	Mme. Chahinez TCHEKIKEN	MCB à l'ENP
Co-promoteur	M. Abdelkader NAMANE	Professeur à l'ENP

ملخص: تهدف هذه الدراسة إلى تطبيق مادة مخثرة طبيعية مصنوعة من مسحوق نوعين من كلالودات نبات التين الشوكي لتكييف حمأة محطة معالجة مياه الصرف الصحي في براقى. تم تقييم الفعالية من خلال تصريف الحمأة بعد تكييفها، استناداً إلى نسبة جفاف الراسب الناتج عن الترشيح، حجم الماء المسترجع، وكمية المواد العالقة المتبقية في الرشاحة. كما تم استكشاف دمج البوليمر الصناعي مع البوليمر الحيوي لدراسة إمكانية استبدال جزء من البوليمر الصناعي بالحيوي، مع الحفاظ على جودة عملية التجفيف. أظهرت النتائج أن النوع الثاني من البوليمر الحيوي كان أكثر فعالية وبشكل ملحوظ من النوع الأول. بالإضافة إلى ذلك، مكن استعمال كمية معينة من البوليمر الحيوي من تقليل جرعة البوليمر الصناعي إلى النصف، مما أدى إلى تحسين أداء اختبار التصريف من حيث نسبة الجفاف وحجم التصريف، مع زيادة في كمية المواد العالقة المتبقية في الرشاحة.

الكلمات المفتاحية: بوليمر طبيعي، التين الشوكي، نزع المياه، حمأة، بوليمر.

Abstract: This work aims to implement a natural coagulant made from the powder of two types of *Opuntia ficus-indica* cladodes for conditioning the sludge from Baraki's wastewater treatment plant, before the dewatering process. The performance was evaluated by draining the sludge after conditioning, based on the dryness of the cake obtained after filtration, the drained volume, and the residual suspended solids (SS) in the filtrate. A combination of industrial polymer and biopolymer was also explored to examine the possibility of replacing part of the industrial polymer with the biopolymer while maintaining the quality of the dewatering process. The results showed that the second type of biopolymer was significantly more effective than the first. Additionally, the dose of industrial polymer could be reduced by half by replacing it with a certain amount of biopolymer, thus improving the performance of the drainage test in terms of dryness and drained volume. However, the residual suspended solids in the filtrate increased.

Keywords: Biopolymer, *Opuntia ficus-indica*, dewatering, sludge, polymer.

Résumé : Le présent travail vise à mettre en œuvre un coagulant naturel à base de poudre de deux types de cladodes d'*Opuntia ficus-indica*, conditionnement des boues de station d'épuration de Baraki avant le process de déshydratation. Les performances ont été évaluées par l'égouttage des boues après leur conditionnement, en se basant sur la siccité du gâteau obtenu après filtration, le volume égoutté et les MES résiduelles du filtrat. Une combinaison entre le polymère industriel et le bio-polymère a également été explorée afin d'étudier la possibilité de remplacer une partie du polymère industriel par le bio-polymère, tout en maintenant la qualité du processus de déshydratation. Les résultats obtenus ont montré que le deuxième type de bio-polymère était nettement plus performant que le premier. De plus, la dose de polymère industriel a pu être réduite de moitié en la remplaçant par une certaine dose de bio-polymère, tout en améliorant, les performances du test d'égouttage en termes de siccité et de volume égoutté. Cependant, les MES résiduelles dans le filtrat ont augmenté.

Mots-clés : Bio-polymère, *Opuntia ficus-indica*, déshydratation, boue, polymère.

Remerciements

Je souhaiterais dans un premier temps remercier ma promotrice et co-promoteur; Mme TCHEKIKEN Chahinez, et M.NAMANE Abdelkader pour avoir accepté de m'encadrer, pour leurs soutien, conseils, leurs disponibilités et pour m'avoir accompagnée tout au long de ce projet de fin d'étude.

Mes remerciements sont adressés à Mme. DJELLOULI Naima pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury. Je remercie également Mme HANK Dalila de l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant d'examiner ce travail

Mes vifs remerciements sont également adressés à tous mes enseignants du département de génie de l'environnement.

Enfin, je souhaite remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de ce parcours universitaire.

Dédicaces

A mes très chers parents, que je remercie pour leurs sacrifices, leur soutien, leurs encouragements et leurs prières tout au long de mes études.

A mes oncles mes tantes et toute la famille, mon frère Billel ma cousine Manel que je considère comme ma sœur.

A Chaima , qui m'était comme une troisième main et un deuxième cerveau à réfléchir, avec laquelle notre relation s'est transformée très rapidement de camarades de classes à copines à deux sœurs.

Je dédie ce modeste travail.

Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	13
Partie 1 : Synthèse bibliographique.....	15
I. CHAPITRE I : LES BOUES	16
I.1. Origine des boues	17
I.1.1. Boues domestiques	17
I.1.2. Boues industrielles	17
I.2. Type des boues	17
I.2.1. Boues primaires.....	17
I.2.2. Boues secondaires	18
I.2.3. Boues mixtes	18
I.3. Composition et caractéristiques des boues	19
I.3.1. Les matières sèches (MS) et la siccité.....	19
I.3.2. Les matières en suspension (MES)	19
I.3.3. La teneur en eau	20
I.3.4. La compressibilité des boues.....	21
I.4. Procédés de traitement des boues	21
I.4.1. Prétraitement	21
I.4.2. L'épaississement	22
I.4.3. La Stabilisation.....	23
I.4.4. La déshydratation	24
I.4.5. Destination finale des boues.....	25
II. CHAPITRE II : LES COAGULANTS/FLOCULANTS	26
II.1. Définitions	27
II.1.1. Les Coagulants	27

Table des matières

II.1.2.	Les flocculants	27
II.2.	Classification des flocculants	27
II.2.1.	Les flocculants minéraux	27
II.2.2.	Les flocculants naturels.....	28
II.2.3.	Les flocculants synthétiques	28
II.2.4.	Les Polyélectrolytes Cationiques	28
II.2.5.	Les Polyélectrolytes Anioniques	29
II.2.6.	Les Polymères Non-Ioniques	29
II.2.7.	Les polyélectrolytes ampholytiques	29
II.3.	Les mécanismes d'action des polymères.....	29
II.4.	Les Facteurs impactant la coagulation flocculation	30
II.4.1.	Le pH des boues	30
II.4.2.	La taille et concentration des particules	31
II.4.3.	La dose du coagulant.....	31
II.4.4.	Le poids moléculaire du polymère	31
II.4.5.	Temps de stockage	31
II.4.6.	Vitesse et temps d'agitation	31
II.4.7.	Influence de la température	32
II.5.	L'Opuntia ficus-indica.....	32
II.5.1.	Un biopolymère ?	32
II.5.2.	Caractéristiques de l'Opuntia ficus-indica	32
Partie 2 : Part	34
ie expérimentale	34
III.	CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES	35
III.1.	Matériels utilisés	36
III.2.	Produits et réactifs.....	36
III.3.	Verreries.....	36

Table des matières

III.4.	Méthodes.....	36
III.4.1.	Échantillonnage des boues.....	36
III.4.2.	Caractérisation des boues	37
III.4.3.	Préparation du bio-polymère	37
III.4.4.	Préparation du polymère.....	38
III.4.5.	Caractérisation de bio-polymère.....	38
III.5.	Etude de la coagulation/floculation avec le bio-polymère.....	40
III.5.1.	Détermination de la dose de bio-polymère seul	40
III.5.2.	Combinaison polymère industriel / bio-polymère	40
III.5.3.	Influence de pH	41
III.6.	La coagulation des boues	41
III.6.1.	Jar-test.....	41
III.6.2.	Égouttage des boues	42
III.6.3.	Grandeurs d'évaluation de la déshydratation	42
IV.	CHAPITRE IV :.....	43
V.	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	43
IV.1	Paramètres de la boue.....	44
V.1.	Préparation du bio-polymère	44
V.1.1.	Méthode de séchage	44
V.1.2.	Température de séchage	44
V.1.3.	Tamissage	45
V.2.	Caractérisation du bio-polymère	45
V.2.1.	Caractéristiques des cladodes.....	45
V.2.2.	Caractéristiques de la poudre	46
V.3.	Performance du bio-polymère	47
V.3.1.	Influence de pH.....	47
V.3.2.	Bio-polymère employé seul	47

Table des matières

V.3.3. Combinaison polymère industriel/bio-polymère.....	50
V.4. Discussion des résultats	53
Conclusion générale et perspectives.....	56
Annexes	62
Annexe 1 : Polymère Chemifloc CV 300.....	63
Annexe 2 : Caractérisation de la viscosité et de la charge du bio-polymère	64

Liste des tableaux

Tableau 1 : Avantages et inconvénients de quelques techniques de déshydratation.....	25
Tableau 2 : Matériels utilisés	36
Tableau 3 : Paramètres de la boue mixte de Baraki	44
Tableau 4 : Caractéristiques des cladodes frais.....	46
Tableau 5 : Caractéristique des poudres de cladodes d'O. ficus.....	46
Tableau 6 : Valeurs optimales des paramètres recherchés, obtenues lors de l'emploi du bio-polymère seul	50
Tableau 7 : Valeurs optimales des paramètres recherchés, obtenues lors de l'emploi d'une combinaison Polymère industriel/Bio-polymère.....	52

Liste des figures

Figure 1 : Configuration des boues activées	18
Figure 2 : Les différents types de prétraitement des boues (Wei et al. 2018)	22
Figure 3 : Taux d'élimination de l'humidité à différents stades du déshydratation (Lee et al. 2005).....	23
Figure 4 : Cladodes d'Opuntia ficus-indica	37
Figure 5 : Poudre de cladodes d'O. ficus obtenue après séchage pour : (a) – Type I (b) – Types II	45
Figure 6 : Fibres retenues après tamisage de la poudre des cladodes d'O. ficus.....	45
Figure 7 : Gâteau obtenu après le test d'égouttage de la boue de Baraki: (a) Sans coagulant, (b) Avec ajout de biopolymère de Type I, (c) Avec ajout de biopolymère de Type II.....	48
Figure 8 : Floccs obtenus après l'ajout de biopolymère Type II	48
Figure 9 : Résultats du test d'égouttage après conditionnement des boues avec des solutions de 3 g/L pour le polymère industriel ou 15 g/L pour le bio-polymère de type II pour : (a) Siccité finale S_f , (b) Volume d'égouttage V_e et (c) MES_r	49
Figure 10 : Résultats du test d'égouttage après conditionnement des boues avec une combinaison de polymère industriel (3 g/L) et différentes doses de bio-polymère de type II (15 g/L) pour : (a) Siccité finale S_f , (b) Volume d'égouttage V_e et (c) MES_r	51

Liste des abréviations

E_g : Indice d'égouttage

MES : Matières En Suspension.

MES_r : La concentration résiduelle de matières en suspension dans le filtrat après égouttage

MS : Matière Sèche.

P_m : poids moléculaire

S_f : Siccité finale de la boue après égouttage

S₀ : Siccité initiale de la boue

STEP : Station d'épuration

V_e : volume égoutté pendant 10min

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est une ressource essentielle à la vie sur Terre, mais sa disponibilité devient de plus en plus rare dans de nombreuses régions du monde, une grande partie est gaspillée, polluée et gérée de façon non durable. Dans ce cas-là, les eaux usées sont considérées comme une ressource réutilisable permettant de récupérer de l'énergie, des nutriments et de l'eau potable (Unesco, 2015).

L'Algérie, en tant que pays sous stress hydrique, est confrontée à des défis majeurs en matière de gestion de l'eau. Il est impératif de traiter les eaux usées (Mozas & Ghosn, 2013). En réponse à cette problématique, l'Algérie a mis en place des Stations d'Épuration des Eaux Usées (STEP) qui imitent le travail de l'écosystème à une plus grande échelle, et accélèrent le processus de dépollution. En 2015, l'Algérie disposait d'environ 200 STEP, assurant une capacité de production de plus 500 millions m³/an (Algérie press service.).

Cependant, les STEPs génèrent des boues qui, bien qu'elles ne représentent qu'une faible proportion du volume total d'eaux traitées (environ 1% à 2%), contiennent une concentration élevée de pollution, allant jusqu'à 80%. Le processus de gestion des boues implique plusieurs étapes, telles que l'épaississement, la stabilisation et la déshydratation, afin de réduire leur volume et faciliter leur stockage, leur transport et leur élimination (Sikos et Klemes, 2009, Oladoja, N. A. 2016).

Des défis sont lancés afin de réduire la facture de traitement des boues qui représente jusqu'à 50% du coût total de fonctionnement de la STEP (Boráň et al, 2010). Le coagulant injecté lors du processus de déshydratation représente, à lui seul, 10 % du coût total de fonctionnement de la STEP. Ce coagulant peut être de nature organique ou inorganique.

Les coagulants inorganiques présentent des inconvénients tels que la nécessité d'un dosage élevé, une faible efficacité ainsi qu'un impact nocif sur la santé humaine et la vie aquatique (Lee et al., 2005). Tandis que les coagulants organiques synthétiques présentent des inconvénients liés à leur coût élevé, à leur toxicité (Zhang et al., 2006) et sont à l'origine de la formation des bactéries filamenteuses dans les bassins d'aération causant l'arrêt des pompes. Par exemple, le polyacrylamide et ses dérivés sont réfractaires à la biodégradation, leurs produits de dégradation intermédiaires sont dangereux et leur monomère est neurotoxique et cancérigène (Oladoja, N. A. 2016).

Face à ces défis, de nombreuses recherches se tournent vers des coagulants naturels, notamment ceux d'origine végétale. Parmi ceux-ci, le gel de figuier de Barbarie ou l'Opuntia ficus-indica a émergé comme un candidat prometteur pour le traitement des eaux usées et la gestion des boues (Choudhary et al, 2019). D'autres plantes telles que le Moringa Oleifera (Ndabigengesere et al, 1995) et l'Aloe vera (Figueiredo et al, 2022) ont également montré leur potentiel dans ce domaine.

L'origine du cactus Opuntia ficus-indica remonte à des siècles en arrière, lorsqu'il a été domestiqué par les anciens Mexicains. Il a ensuite été introduit dans d'autres parties du monde, notamment en Algérie et dans la région méditerranéenne, où il prospère dans les conditions arides et semi-arides grâce à son métabolisme acide crassulacéen (Erre et al, 2019). Étant biodégradable, bon marché, productif, et largement disponible toute l'année, l'Opuntia ficus-indica (O.ficus) est une solution prometteuse à envisager pour remplacer les polymères conventionnels (Choudhary et al, 2019). Cependant, bien que le gel frais de l'O.ficus ait montré de bons résultats dans le traitement de différents types d'eau dans de nombreuses études (Zhang et al, 2006), son effet n'a jamais été étudié dans le conditionnement des boues. De plus, le gel est généralement utilisé sous forme liquide, et perd en efficacité avec le temps, pouvant aller jusqu'à 58% après un mois (Choudhary et al, 2019).

Cette étude vise à tester l'applicabilité de cette plante (l'Opuntia ficus) et confirmer son efficacité en tant que coagulant pour des boues. De plus, pour remédier au problème de perte d'efficacité et de dégradation de mucilage, nous examinerons si la forme séchée conserve la même efficacité et préserve ses propriétés plus longtemps.

Partie 1 :

Synthèse bibliographique

Chapitre I :

LES BOUES

Ce chapitre présente les processus typiques de traitement chimique et physique utilisés dans la gestion des boues. Les caractéristiques les plus importantes des boues y sont abordées. Différents types et origines de boues sont également inclus dans ce chapitre à des fins de comparaison.

I.1. Origine des boues

I.1.1. Boues domestiques

Ces boues sont issues des eaux provenant des habitations, elles sont produites par le métabolisme humain ou les activités ménagères. Elles se caractérisent par de fortes teneurs en matières organiques et substances biodégradables, de germes fécaux et de détergents (Ammam, 2022)

I.1.2. Boues industrielles

Par ailleurs, différents types de boues industrielles sont produites lors du traitement des eaux usées industrielles. Ces boues partagent des caractéristiques communes telles qu'une teneur élevée en humidité difficile à éliminer mécaniquement, des floccs relativement faibles qui se détachent facilement en cas de cisaillement, et des polluants concentrés nécessitant une stabilisation supplémentaire avant leur élimination sécurisée (Lee et al, 2005).

I.2. Type des boues

Les boues se forment en tant que résidus dans divers processus de traitement des eaux. Elles se composent de solides et de colloïdes séparés des eaux usées, ainsi que de substances provenant des unités opérationnelles biologiques et chimiques. En outre, les producteurs d'eau potable génèrent une matrice de solides coagulés-coagulant, qui contient toutes les impuretés présentes dans l'eau brute ainsi que le coagulant ajouté (Lee et al, 2005). Les boues issues du traitement des eaux usées présentent des problèmes supplémentaires en raison de leur grande quantité, de leur toxicité élevée et de leur faible concentration, car la teneur totale en solides avant traitement est généralement inférieure à 8 % (Wei et al, 2018).

I.2.1. Boues primaires

Les boues primaires se composent de solides décantables retirés du clarificateur primaire (Lee et al, 2005). Ces boues sont constituées de particules de grande taille et de forte densité, ce qui

facilite leur concentration par épaissement statique et leur confère une bonne aptitude à la déshydratation. De plus, ces boues sont très fermentescibles en raison de leur richesse en matières organiques et minérales. (Ademe, 2001)

I.2.2. Boues secondaires

Le procédé des boues activées est un processus de croissance suspendue aérobie dans lequel des microorganismes sont cultivés pour éliminer la matière organique soluble (Lee et al, 2005). Ce procédé est si efficace qu'il est largement utilisé dans le traitement des eaux usées depuis des décennies. Une grande quantité de boues activées résiduaires, contenant généralement plus de 95% d'eau (Wei et al, 2018), est générée dans le clarificateur secondaire après ce processus, où la biomasse est séparée en raison de sa nature floculante. Les boues activées sont un mélange hétérogène de particules, de microorganismes, de colloïdes, de polymères organiques et de cations, dont la composition dépend de l'origine des eaux usées et de l'âge de l'échantillon. Lors de la déshydratation, il est souvent constaté que les boues activées sont difficiles à manipuler.

Cela peut être dû à un manque de matériaux grossiers et rigides, ce qui rend les gâteaux de filtration ou de pressage hautement compressibles (Nguyen et al., 2008).

Une représentation schématique de la configuration des boues activées résiduaires est illustrée dans la Figure 1 (Yu et al, 2016).

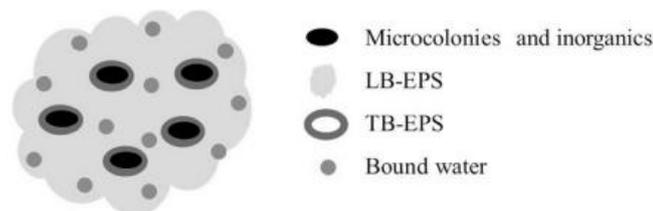


Figure 1 : Configuration des boues activées

I.2.3. Boues mixtes

Les boues mixtes sont un mélange entre les boues primaires et secondaires avec un ratio qui change en fonction de la concentration des deux pour atteindre une concentration dans la marge de fonctionnement du traitement qui suit (digestion, hydratation, ...) (Ademe, 2001).

I.3. Composition et caractéristiques des boues

Les boues constituent un système hautement complexe composé de nombreux solides de petite taille et chargés en surface, qui peuvent être relativement stables dans l'eau non seulement en raison de leur faible gravité et des effets de répulsion électrostatique, mais aussi parce qu'une partie de l'eau est étroitement liée à la surface ou piégée à l'intérieur du réseau colloïdal. En particulier, les substances polymériques extracellulaires fortement chargées peuvent facilement former une structure suspendue stable semblable à un gel qui se lie aux molécules d'eau grâce à sa force stérique. Ainsi, il est difficile de réaliser une séparation efficace des boues, et les mécanismes de déshydratation restent mal compris (Wei et al, 2008). Ainsi, parmi les paramètres les plus importants qui peuvent caractériser une boue on trouve :

I.3.1. Les matières sèches (MS) et la siccité

La teneur en matière sèche inclut à la fois les matières en suspension et les sels dissous. Le résidu sec est utilisé aussi pour déterminer la siccité de la boue exprimée en pourcentage par rapport au poids de l'échantillon. Une indication de la quantité totale de solides contenus dans les boues et permet de calculer le taux d'humidité et d'évaluer les quantités de boues à traiter ou à valoriser. La méthode de mesure consiste à mettre un échantillon de boue à l'étuve à 105°C, jusqu'à obtention d'une masse constante.

Le séchage à 175-185°C, comparé au séchage à 105°C permet d'évaluer notamment la teneur des sels en eau de cristallisation, la teneur en eau liée aux hydroxydes, plus certaines matières très volatiles (huiles...), tant que le résidu sec à 550°C permet de déterminer le taux des matières volatiles (Suez Water Handbook, 2024).

I.3.2. Les matières en suspension (MES)

Les matières en suspension font référence aux particules solides présentes dans l'eau ou dans la boue qui sont suffisamment petites pour être maintenues en suspension par l'agitation de l'eau. Quand les boues sont peu concentrées, le poids sec ne doit pas prendre en compte la teneur en substances dissoutes de l'eau interstitielle de la boue. Les matières en suspension peuvent être utilisées pour évaluer l'efficacité des processus de traitement. Deux méthodes sont proposées pour séparer cette eau, et la méthode par filtration qui est plutôt réservée aux boues assez peu concentrées (de 2 à 10 g. L⁻¹ par exemple). Les deux méthodes sont suivies par un séchage à l'étuve, toujours à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

I.3.3. La teneur en eau

En ce qui concerne l'eau présente dans les boues, différentes formes avec des propriétés distinctes, telles que la pression de vapeur, l'enthalpie, l'entropie, la viscosité et la densité, existent généralement en raison de la présence de divers solides. Selon Wei et al, (2008), une classification claire de l'humidité dans les boues est essentielle pour l'étude de la déshydratation. En général, l'eau des boues peut être classée selon le degré de difficulté de son élimination :

- **L'eau libre** n'est pas affectée par les particules solides. Elle comprend l'eau dans les vides mais non influencée par la force capillaire et représente environ 70 % de l'eau totale.
- **L'eau interstitielle** est piégée à l'intérieur des fissures et des espaces interstitiels des floes et des organismes.
- **L'eau de surface** est adsorbée ou adhère à la surface des particules.
- **L'eau de liaison (interne)** est étroitement liée aux solides.

La somme des trois dernières formes d'eau est généralement désignée collectivement sous le terme d'eau liée. La teneur en eau liée est l'un des principaux facteurs qui limitent la déshydratation des boues.

Cependant, certains chercheurs estiment que l'eau libre pourrait mieux refléter la capacité de déshydratation des boues que l'eau liée, en raison des caractéristiques de liaison fortes et de la petite proportion de l'eau liée (Wei et al, 2008).

Les processus de déshydratation conventionnels ne peuvent éliminer que l'eau libre et une partie de l'eau liée. La libération supplémentaire de l'eau liée à l'intérieur de la structure cellulaire peut être obtenue par la disruption des cellules des boues via des traitements par sonification, alcalinsation, NaCl et thermiques. Cependant, la disruption cellulaire crée des surfaces supplémentaires pour la liaison de l'eau et augmente la teneur en eau "non congelable" (principalement l'eau vicinale, l'eau de liaison et une fraction de l'eau interstitielle). Wei et al. (2008) ont rapporté que la teneur en eau liée dans les boues augmente avec l'intensité de trois traitements (ultrasons, thermique et alcalin), mais que la déshydratation des boues peut encore être améliorée par ces traitements. L'effet de la coagulation/floculation sur l'eau liée est largement reconnu (Wei et al., 2008).

I.3.4. La compressibilité des boues

La compressibilité des boues fait référence à leur capacité à être compressées ou densifiées sous l'effet d'une charge appliquée. Les boues de traitement des eaux usées présentent un comportement compressible dû à la floculation et à l'agrégation. À une concentration critique en solides, un réseau continu et interconnecté de particules se forme, et peut résister à une charge appliquée (pression de filtration mécanique, flottabilité dans la décantation). Cette dernière doit dépasser la résistance du réseau pour consolider celui-ci. La résistance du réseau augmente avec la concentration en solides (Stickland, 2015).

I.4. Procédés de traitement des boues

L'optimisation du système de gestion des boues consiste à traiter les boues de manière à maximiser les avantages du recyclage/récupération et à être adaptée aux circonstances locales, notamment l'économie, la géographie, le climat, etc. Un système typique de traitement/élimination des boues comprend quatre étapes (Lee et al, 2005) :

- **Le prétraitement** : au cours duquel les caractéristiques des boues sont modifiées pour améliorer les performances des processus subséquents.
- **L'épaississement** : au cours duquel sont concentrées.
- **Le post-traitement** : pour stabiliser ou détoxifier les boues.
- **La déshydratation** : pour séparer l'humidité du corps des boues.
- **L'élimination finale** : qui vise à garantir une élimination sûre et économiquement viable.

La séparation solide-liquide peut être ainsi classée en quatre catégories : Le prétraitement ; L'épaississement ; la filtration ; et le post-traitement (Lee et al, 2005).

I.4.1. Prétraitement

Selon Wei et al. (2018), la déshydratation directe des boues sans aucun prétraitement ne permet pas d'atteindre l'effet de déshydratation idéal, et la teneur en matières sèches des boues après déshydratation ne pourrait atteindre que 80% à 98%. Les méthodes existantes de conditionnement des boues peuvent être principalement catégorisées comme le montre la figure 4 en trois.

- **Physiques** : Le conditionnement physique consiste à modifier les propriétés physico-chimiques des boues par des méthodes physiques, y compris l'ajout de constructeurs de

squelette, l'approche thermique, l'approche de gel-dégel, l'utilisation de micro-ondes, le conditionnement par ultrasons et leurs combinaisons

- **Chimiques** : Le conditionnement chimique fait référence à l'ajout d'acides, de bases, de Surfactants, d'oxydants, de coagulants/floculants et d'autres agents biochimiques, ou à l'utilisation de méthodes électrochimiques.
- **Biologiques** : comme la digestion ou bien l'ajout d'enzymes.

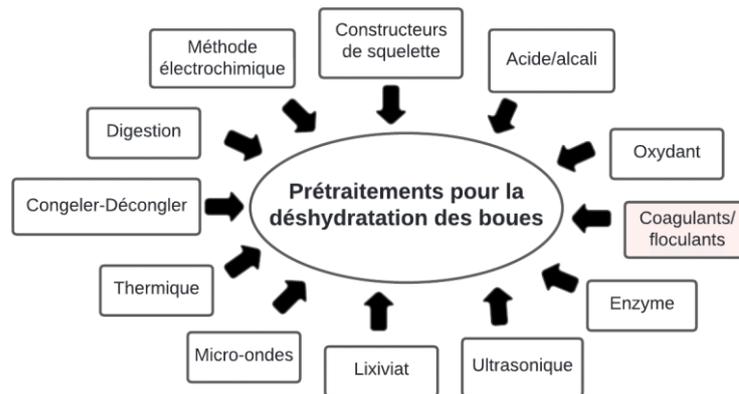


Figure 2 : Les différents types de prétraitement des boues (Wei et al. 2018)

I.4.2. L'épaississement

Selon Lee et al. (2005), les processus d'épaississement des boues peuvent être classés en processus "mécaniques" et "non-mécaniques". La Figure 4 illustre le ratio relatif d'élimination de l'humidité à différents stades de la déshydratation. Plus de 75% de l'élimination de l'humidité se produit lors de l'étape d'épaississement. Un épaississement adéquat peut produire un gâteau plus sec après l'étape de déshydratation, et minimise ainsi le coût relatif au surdosage du polymère de conditionnement. Les épaisseurs de boues incluent l'épaisseur gravitaire, l'épaisseur centrifuge et l'épaisseur par flottation. La conception des épaisseurs repose principalement sur la méthode du flux total obtenue lors des tests en laboratoire. Pour les boues activées, l'épaisseur gravitaire produit une fraction sédimentaire solide concentrée de 5 à 7 %, tandis que l'épaississement centrifuge produit une fraction solide de 9 à 11 %. Pour les boues physico-chimiques, les fractions solides correspondantes sont plus élevées, de 15 à 17 % pour la décantation gravitaire. Dans les stations d'épuration de Beni Messous et de Réghaïa, l'épaississement est réalisé uniquement pour les boues activées. En revanche, dans la station d'épuration de Baraki, les boues primaires subissent un épaississement gravitaire, tandis que les

boues biologiques passent par un épaissement mécanique avec un conditionnement par ajout de polymère.

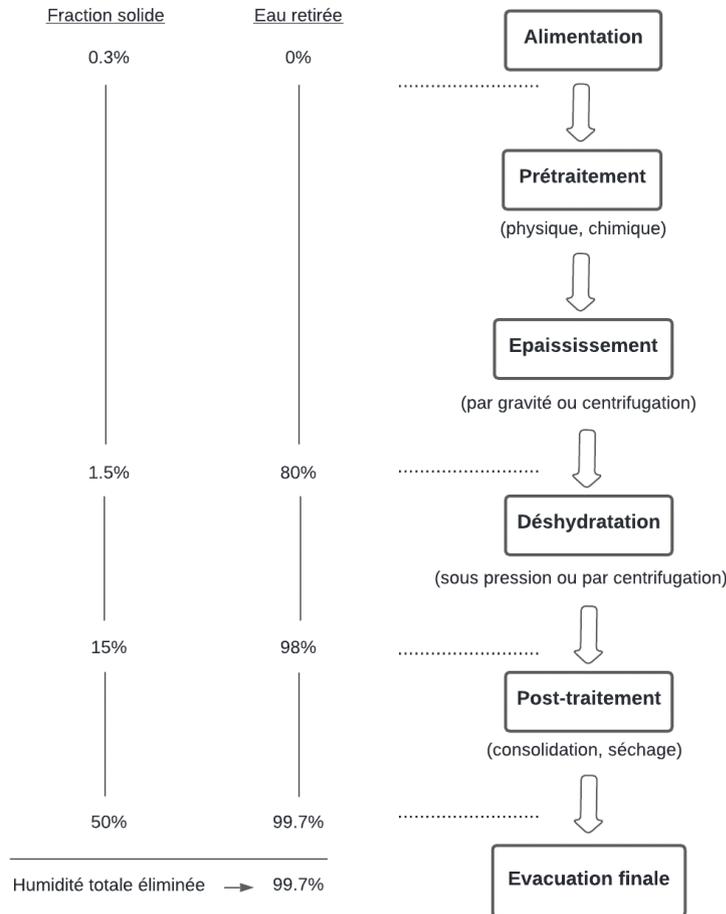


Figure 3 : Taux d'élimination de l'humidité à différents stades du déshydratation (Lee et al. 2005)

I.4.3. La Stabilisation

Selon Lee et al (2005), la stabilisation des boues produites par le traitement des eaux usées domestiques et industrielles est généralement nécessaire avant leur élimination finale ou leur utilisation. Les processus de traitement visent à améliorer l'efficacité de la déshydratation des boues ou à améliorer leurs propriétés hygiéniques. Plusieurs méthodes sont utilisées pour la stabilisation des boues, que ce soit avant ou après la déshydratation :

- **Stabilisation à la chaux** : augmentation du pH à 12 pour désinfecter les micro-organismes.
- **Digestion aérobie** : oxydation des substances biodégradables par aération.

- **La digestion anaérobie** est l'un des plus anciens processus de traitement des boues, utilisant des micro-organismes pour solubiliser et fermenter les substances organiques complexes en l'absence d'oxygène. Les produits de la digestion anaérobie incluent le méthane, le dioxyde de carbone, d'autres gaz traces et les boues stabilisées. Ce processus est efficace pour inactiver les agents pathogènes présents dans les boues.

La méthode la plus intéressante est la digestion anaérobie car elle génère du biogaz. En Algérie, on trouve deux grandes STEP munies d'un digesteur qui sont celle de Baraki (Alger) et celle de Cap Falcon (Oran) (Chadouli & Belabbas année). Le processus de digestion anaérobie se divise principalement sur trois étapes :

- **Hydrolyse** : Les matières organiques à longues chaînes sont dégradées en particules plus petites à un taux de réaction faible. L'adoption de processus d'hydrolyse pourrait augmenter considérablement le taux de digestion.
- **Acidogénèse** : Production d'acides, ce qui réduit le pH.
- **Acétogénèse et Méthanogénèse** : Neutralisation des acides produits précédemment, ce qui stabilise la valeur du pH de la suspension

En général, chaque kilogramme de matière organique détruite pendant la digestion peut produire 1 m³ de biogaz contenant 60% de méthane. Le processus de digestion dure environ 30 à 40 jours, avec une production ultime d'environ 140 g-CH₄/kg-MS pour les boues originales ou 85 g-CH₄/kg-MS pour les boues floculées (Lee et al, 2005).

I.4.4. La déshydratation

Chaque technique de déshydratation des boues présente ses propres avantages et inconvénients en termes de coût, d'efficacité, de maintenance et de conditions spécifiques de fonctionnement. Certaines de ces techniques sont présentées dans le Tableau 1. La sélection de la méthode appropriée dépend des caractéristiques des boues et des objectifs spécifiques du traitement. Les boues sont mieux déshydratées si elles possèdent des floccs poreux et solides ainsi qu'une phase liquide de faible viscosité (Lee et al., 2005).

Technique	Description	Avantages	Inconvénients
Filtre-presse à Bande	Dispositif avec une bande filtrante et une bande de pressage.	- Faible encombrement, niveau de bruit et de vibrations	- L'odeur - Utilise des polyélectrolytes de haut poids moléculaire.
Filtre-Pressé à Plaques et à Cadres	Composé de plaques verticales recouvertes d'un milieu filtrant, maintenues côte à côte dans un cadre.	- Processus par lots - Utilisation de coagulants inorganiques	- Nettoyage fréquent des toiles - Entretien régulier
Centrifugeuse	Utilise la force centrifuge pour augmenter le taux de sédimentation. La centrifugeuse à bol solide avec convoyeur est couramment utilisée depuis plus d'un demi-siècle.	- Moins coûteux et encombrant que d'autres méthodes mécaniques - Moins de problèmes d'odeur	- Abrasion du convoyeur et du bol - Formation de tartre - Coûts de puissance et d'entretien généralement élevés

Tableau 1 : Avantages et inconvénients de quelques techniques de déshydratation

I.4.5. Destination finale des boues

Après traitement, les boues de station d'épuration peuvent être valorisées de différentes manières. L'épandage agricole est l'une des principales options, permettant de recycler les éléments nutritifs contenus dans les boues pour fertiliser les sols. Cependant, une attention particulière doit être portée à la qualité des boues, qui ne doivent pas contenir de trop fortes concentrations en métaux lourds ou autres polluants pouvant contaminer les cultures. Des procédés de stabilisation, comme le séchage sur lits ou la stabilisation par les vers de terre, permettent de préparer les boues pour un usage agricole sûr. Une autre voie de valorisation est l'incinération, qui réduit drastiquement le volume des boues tout en permettant de récupérer l'énergie produite. Les cendres résiduelles peuvent ensuite être recyclées dans certaines applications industrielles. Enfin, la méthanisation anaérobie est également une option intéressante, permettant de produire du biogaz valorisable tout en stabilisant la matière organique des boues. Le choix de la filière de gestion dépend des caractéristiques des boues, des réglementations locales et des débouchés disponibles sur le territoire (Ciešlik et al, 2015).

Chapitre II :

LES COAGULANTS/ FLOCCULANTS

Les boues forment un système complexe de solides de petite taille chargés en surface, stables dans l'eau en raison de leur faible gravité, des effets de répulsion électrostatique, et de l'eau liée à la surface ou capturée dans le réseau colloïdal (Wei et al., 2018). La séparation efficace des solides et des liquides est un défi majeur dans le traitement des eaux usées, la déshydratation des boues étant particulièrement coûteuse et mal comprise (Borán et al., 2010). Les coagulants et flocculants, agissant comme agents de conditionnement, facilitent cette séparation en agglomérant les particules en suspension pour former des floccs plus grands (Nguyen et al., 2008 ; Kettab, 1992).

II.1. Définitions

II.1.1. Les Coagulants

Ce sont des substances chimiques qui neutralisent ou inversent les charges électriques des particules en suspension dans l'eau. Ils favorisent ainsi l'agglomération de ces particules pour former des agrégats plus gros appelés floccs. Ces produits sont surtout des composés minéraux (Kettab, 1992).

II.1.2. Les flocculants

Ce sont des polymères ou composés chimiques, favorisent le pontage entre les particules en suspension pour former des floccs plus gros et plus facilement séparables du liquide. Ils possèdent des groupes réactifs chargés et un haut poids moléculaire (Kettab, 1992). Des flocculants à chaîne longue et flexible sont parfois ajoutés après la coagulation pour améliorer la décantation (Wei et al., 2008).

II.2. Classification des flocculants

Les flocculants se divisent en trois grandes catégories :

II.2.1. Les flocculants minéraux

Comme les floccs d'aluminium et les floccs ferriques, améliorent la porosité et la teneur en solides du gâteau, tout en réduisant leur compressibilité. Ils incluent la silice activée, les bentonites et les hydroxydes métalliques polymères comme l'alumine et l'hydroxyde ferrique (Kettab, 1992). Les sels ferriques et aluminés utilisés dans le traitement des eaux usées se divisent en coagulants inorganiques à petites molécules et polymériques (Wei et al., 2008).

II.2.2. Les flocculants naturels

Ces polymères hydrosolubles, pouvant avoir des charges anioniques, cationiques ou neutres, sont utilisés pour diverses applications. Parmi eux, les dérivés amylicés, les polysaccharides, les alginates et d'autres substances naturelles sont largement étudiés pour leur capacité à agir sur différents types de boues.

II.2.3. Les flocculants synthétiques

Ce type de flocculant présente une grande variété de charges, de densités de charge, et de poids moléculaires (Kettab, 1992). Les polyacrylamides et leurs dérivés sont les conditionneurs polymériques organiques les plus couramment utilisés dans la déshydratation des boues (Wei et al., 2018).

Les coagulants inorganiques sont limités par leur sensibilité au pH, nécessitant des doses élevées qui augmentent le volume des boues à éliminer et réduisent leur valeur calorifique et digestibilité. En revanche, les flocculants polymériques, bien que plus coûteux, assurent une meilleure déshydratation en formant des floccs plus grands et plus poreux, facilitant le drainage de l'eau. Ces polymères, appelés polyélectrolytes après hydrolyse, jouent un rôle crucial dans la capture des particules selon leur charge, influençant ainsi l'efficacité du traitement des boues (Wei et al., 2018 ; Lee et al., 2005 ; Saint-Pierre, 2009 ; Oladoja, 2016).

II.2.4. Les Polyélectrolytes Cationiques

Les polyélectrolytes cationiques sont largement utilisés dans le traitement des boues biologiques ou mixtes pour leur capacité à capturer efficacement les molécules organiques (Saint-Pierre, 2009). Leur double fonction de coagulation et de flocculation permet de déstabiliser les particules fines chargées négativement présentes dans les eaux usées. Ces agents sont actuellement les plus couramment employés pour ce type de boues (Nguyen et al., 2008). Certains polyélectrolytes cationiques, comme ceux contenant des groupes ammonium quaternaire, maintiennent une charge positive indépendamment du pH. Les polymères cationiques à forte densité de charge et à faible poids moléculaire agissent comme des électrolytes forts, idéaux pour être utilisés comme coagulants primaires (Carmona-Ribeiro and de Melo Carrasco, 2013).

II.2.5. Les Polyélectrolytes Anioniques

Les polyélectrolytes anioniques sont efficaces dans le traitement des boues minérales (Saint-Pierre, 2009). En milieu de boues d'eaux usées, malgré leur charge négative similaire aux particules en suspension, leur capacité à déshydrater repose principalement sur l'adsorption efficace et les effets de pontage (Wei et al., 2018). Ces polymères commerciaux utilisent généralement des groupes carboxylate, comme le polyacrylamide anionique dont la densité de charge varie avec le pH (Carmona-Ribeiro et de Melo Carrasco, 2013). De plus, des polymères anioniques naturels tels que l'héparine, le sulfate de mannanes et le sulfate peuvent être utilisés pour améliorer la liaison des ions des coagulants brisés aux particules en combinaison avec des coagulants primaires (Bolto et Gregory, 2007).

II.2.6. Les Polymères Non-Ioniques

Les polymères non-ioniques, caractérisés par leur absence de groupes fonctionnels chargés à l'état ionique (moins de 1 % d'unités monomères ionisables), incluent des flocculants comme le polyester, les polyols et les polyacrylamides. Leur poids moléculaire élevé favorise un effet de pontage efficace, améliorant la déshydratation par rapport aux polymères cationiques. Des polymères naturels non ioniques tels que l'amidon, la cellulose, les gélatines, les colles et les polysaccharides microbiens sont également utilisés comme coagulants pour réduire les boues et optimiser les séparations de phases (Bolto et Gregory, 2007 ; Lee et al., 2005 ; Oladoja, N. A., 2016 ; Lee et Liu, 2001).

II.2.7. Les polyélectrolytes ampholytiques

Ce sont des polymères ioniques contenant des groupes fonctionnels cationiques et anioniques. Ils montrent généralement une amélioration de la solubilité et de la résistance au sel sur une large gamme de pH. Bien que plusieurs flocculants aient été étudiés, leur application dans la déshydratation des boues reste rare. (Wei et al, 2018).

II.3. Les mécanismes d'action des polymères

La coagulation/floculation est l'une des techniques les plus couramment appliquées dans le traitement de l'eau (Wei et al, 2018). Bien que ses mécanismes dans le traitement de l'eau soient similaires à ceux de déshydratation des boues, les objectifs des deux sont différents.

Ainsi, le premier se concentre sur la séparation des contaminants ; en plus de cet effet, le second met également l'accent sur la construction d'une structure adéquate du gâteau avec de bonnes performances de filtration (Wei et al., 2018).

Les mécanismes essentiels expliquant le comportement observé sont la neutralisation de charge et le pontage. Dans une suspension de colloïdes chargés, les chaînes polymériques s'adsorbent à leur surface, créant une zone chargée opposée. Lors des collisions entre particules, la coagulation se produit. Par ailleurs, les "queues" formées par les chaînes polymériques adsorbées, peuvent interagir avec d'autres molécules de flocculant ou d'autres colloïdes, formant un "pont" pour donner des macroflocs. Pour les polyélectrolytes non ioniques ou anioniques, le pontage est le mécanisme principal. En général, les flocs formés par neutralisation de charge sont relativement petits et fragiles, tandis que ceux formés par pontage sont grands et plus résistants (Lee et al., 2005 ; Bolto et Gregory, 2007 ; Oladoja, 2016).

Chaque type de coagulant /flocculant présente ses propres avantages et inconvénients. Le choix du polymère dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature de la boue, le pH, et le processus de traitement (centrifugation, presse, ...), car les caractéristiques optimales des flocs varient selon les exigences de ce dernier (Lee et al., 2005). Cependant, malgré une expérience considérable, le choix du polymère et de son dosage reste en grande partie un processus d'essais et d'erreurs (Nguyen et al., 2008).

II.4. Les Facteurs impactant la coagulation flocculation

Le phénomène de coagulation-flocculation peut être influencé par de nombreux facteurs. Certains sont liés aux caractéristiques des boues, tandis que d'autres sont associés aux propriétés des polymères et aux conditions opérationnelles. Parmi ces facteurs, on retrouve :

II.4.1. Le pH des boues

Le pH influence la charge de surface des particules et détermine le type de polymère nécessaire pour un bon conditionnement. Un pH élevé favorise l'utilisation de polymères anioniques, tandis qu'un pH neutre ou légèrement acide nécessite l'emploi de polymères cationiques. Le pH optimal dépend principalement des colloïdes à éliminer. (Kettab, 1992 ; Bolto & Gregory, 2007).

II.4.2. La taille et concentration des particules

Pour les particules inférieures au micron, les forces de surface deviennent prépondérantes, entraînant un état de dispersion stable. Une concentration colloïdale basse rend la coagulation difficile en raison d'un taux de contact baissé. De plus, la taille des particules affecte la superficie, augmentant ainsi les répulsions électriques, la résistance de frottement et l'attraction avec l'eau. Les boues primaires ont généralement des particules plus grandes, et la digestion diminue la taille moyenne des particules. (Kettab, 1992).

II.4.3. La dose du coagulant

La dose optimale de conditionnement peut varier en fonction de l'objectif. La dose qui produit le gâteau le plus sec ne donne pas nécessairement le plus haut débit de filtration (Zhang et al, 2006). Une surdose du polymère peut produire une restabilisation des particules, rendant les sites d'adsorption indisponibles pour le pontage. Cela peut entraîner une dégradation d'efficacité et des dépenses supplémentaires. (Kettab, 1992).

II.4.4. Le poids moléculaire du polymère

Les polymères ayant un poids moléculaire élevé ont tendance à être plus visqueux et nécessitent des temps de préparation plus longs. Les chaînes longues forment plus facilement des liens de pontage. Cependant, elles ont tendance à s'enrouler en floc, ce qui signifie que leur efficacité finale est difficile à prévoir (Bolto & Gregory, 2007 ; Lee et al, 2014).

II.4.5. Temps de stockage

Le biopolymère, composé d'une large gamme de sucres et de différents composés organiques, a tendance à se dégrader avec le temps, ce qui peut entraîner une dépolymérisation et altérer ses propriétés physico-chimiques. La même chose peut être observée avec les polymères. Selon la fiche technique du polymère industriel Chemifloc CV300, une solution de 0,5 % de Chemifloc CV300 dans de l'eau distillée peut avoir une durée de vie de 5 jours.

II.4.6. Vitesse et temps d'agitation

Après l'introduction du coagulant, une agitation est nécessaire pour assurer la dispersion et l'homogénéisation. Cependant, une agitation trop intense empêche l'agrégation des particules, tandis qu'une agitation prolongée conduit à la rupture des liaisons entre le coagulant et les particules (Kettab, 1992).

II.4.7. Influence de la température

La température joue un rôle crucial dans la coagulation /floculation. À des températures plus basses, la viscosité augmente et la formation des floccs devient plus lente, rendant ces structures moins robustes et denses. De plus, la réaction chimique peut être affectée, ce qui diminue le pH (Kettab, 1992).

II.5. L'Opuntia ficus-indica

II.5.1. Un biopolymère ?

Pour nombreuse cause et surtout pour les pays en voie de développement, depuis quelque décennie de nombreux coagulant biologique ont été explorés, mise a part celle qui sont d'origine animal ou générer par les micro-organismes, on compte parmi les plante qui présente ce pouvoir : Moringa Oleifera (Kenea et al, 2023), Aloe vera (Figueiredo et al, 2022), figuier de barbarie (Choudhary et al, 2019), foin de grèce, le gombo, le grand plantain (Lim et al, 2022), le Cicer arietinum (Sergeev, 2015), le Dolichos lablab (Exporters India, 2022), tubers de Maerua subcordata (Gerald & Buff, 2002). Après une recherche bibliographique approfondie, et pour plusieurs raisons, le figuier de barbarie a été choisi pour être le sujet de ce travail.

II.5.2. Caractéristiques de l'Opuntia ficus-indica

Opuntia ficus-indica est couramment planté dans les régions arides et semi-arides de l'Afrique du Nord. Son introduction réussie dans ces zones est attribuée à son métabolisme acide crassulacéen. Ces plantes absorbent principalement le CO₂ pendant la nuit, ce qui entraîne une transpiration réduite et des pertes d'eau moindres, des adaptations cruciales pour les régions à faible pluviométrie (Farineau, & Morot-Gaudry, 2018). En Algérie il existe principalement 7 espèces de l'O. ficus indica, divisées en deux grands groupes : celles qui sont épineuses et celles qui ne sont pas. L'O.ficus-indica en Algérie présente une certaine homogénéité génétique, ce sont que les variétés épineuses qui possèdent une légère réponse des propriétés quantitative vis à vis les effets bioclimatiques (Adli et al, 2017). Le genre Opuntia se caractérise par la production d'un hydrocolloïde, communément appelé mucilage. Ce dernier forme des réseaux moléculaires capables de retenir de grandes quantités d'eau. Il a été suggéré que la structure du mucilage contient deux fractions solubles dans l'eau. L'une est la pectine, qui possède des propriétés gélifiantes, et l'autre est le mucilage sans propriétés gélifiantes (Oladoja, 2016).

Les mucilages sont des substances polymériques complexes de nature glucidique, avec une structure fortement ramifiée, contenant des proportions variables de L-arabinose, D-galactose, L-rhamnose et D-xylose, ainsi que de l'acide galacturonique en proportions différentes (Matsuhira et al., 2006). Étant couramment consommé et utilisé en médecine traditionnelle (Nobel, 2002), il était considéré comme sûr et écologique de l'utiliser dans les opérations de traitement des eaux. Il a été signalé que l'acide galacturonique est peut-être un ingrédient actif qui garantit la capacité de coagulation des *Opuntia* spp (Oladoja, N. A., 2016). Cependant, selon l'évaluation, les polysaccharides complexes avec une grande capacité de retenue d'eau sont principalement responsables de la coagulation/flocculation (Choudhary et al., 2019). Choudhary et al. (2019) ont rapporté aussi que le mucilage est un matériau hautement carboné avec un pourcentage de poids en carbone de 43,29%. Des éléments inorganiques tels que le sodium, le magnésium, le potassium et le calcium ont également été détectés en quantités traces. L'analyse FTIR du mucilage liquide a révélé que les groupes fonctionnels principaux sont les groupes carboxyl (-COOH), hydroxyl (-OH) et amino ou amine (-NH₂), ainsi que des liaisons hydrogène. Dans certains cas, les similitudes dans les performances efficaces des deux processus de mucilage et de polyacrylamide ont été attribuées à la présence des mêmes fonctionnalités sur les deux (Oladoja, N. A., 2016). En outre, l'investigation sur la nature acide ou neutre de ces polysaccharides a révélé une structure complexe mais une concentration plus élevée de polysaccharides acides.

Partie 2 :

Partie expérimentale

Chapitre III :

Matériel et méthodes

III.1. Matériels utilisés

Le matériel utilisé est regroupé dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Matériels utilisés

Appareil	Marque
Etuve	Memmert
Broyeur	Multismart MS-GD402
pH-mètre	Adwa AD1030
Jar-test	Aqualytic
Centrifugeuse	Nüve NF 400R
Balance de précision	Kern ABJ-NM/ ABS-N
Conductimètre	HANNA H12316

III.2. Produits et réactifs

Les seuls produits chimiques utilisés sont l'hydroxyde de sodium (NaOH) de la marque BIOCHEM d'une pureté de 99% et l'acide chloridrique HCl, de la marque SCHARLAU d'une concentration de 37 %.

III.3. Verreries

Une verrerie courante du laboratoire a été utilisée, avec principalement, des béchers et des éprouvettes.

III.4. Méthodes

III.4.1. Échantillonnage des boues

L'échantillon de boue a été récupéré de la bêche de stockage des boues mixtes de la STEP de Baraki, après épaissement gravitaire pour les boues primaire et mécanique avec ajout de polymère pour les boues biologiques.

III.4.2. Caractérisation des boues

Une caractérisation a été réalisée sur chaque boue collectée au début de chaque série de tests afin de déterminer ses caractéristiques (siccité, teneur en MS, pH, et couleur) à l'état initial.

- **Mesure de la siccité** : Celle-ci est calculée par la méthode du résidu sec à 105°C.

$$S_0 = \frac{M_2}{M_1} \% \quad \text{Eq. 1}$$

Avec : M_1 : masse initiale de boue (g) ; M_2 : masse sèche de boue (g).

- **Mesure de la matière sèche (MS)** : calculée en même temps que la siccité tel que :

$$MS = \frac{M_2}{V_1} \text{ (g/L)} \quad \text{Eq. 2}$$

Avec : V_1 : volume initial de l'échantillon humide (L).

III.4.3. Préparation du bio-polymère

Des cladodes frais d'*Opuntia ficus-indica* non épineux (deux sous-espèces) ont été récoltés dans les hauteurs d'Alger (Zghara, banlieue de Bologhine). Les raquettes ont été rincées abondamment à l'eau du robinet puis à l'eau distillée.

Deux méthodes de séchage ont été testées :

1. Les cladodes pelés et coupés en petits dés sont mixés, puis séchés à 80°C pendant 24h. Des températures supérieures ont engendré un changement de couleur dans des produits similaires (Kenea et al, 2023).
2. Les cladodes coupés (pelés ou non pelés) sont séchés directement sur du papier aluminium ou du papier sulfurisé. Plusieurs températures de séchage ont été testées, en les réduisant progressivement jusqu'à atteindre 50°C. La quantité de poudre obtenue à partir de la matière fraîche d'*O. ficus-indica* a été mesurée au fur et à mesure. Pour cela, 100 g de morceaux frais d'*O. ficus-indica* sont séchés et pesés jusqu'à ce que le poids reste constant. Ensuite, ils sont broyés et tamisés à l'aide d'une passoire fine d'un diamètre inférieur à 0,5 mm, puis conservés dans des flacons stériles (pots à urine) placés dans un dessiccateur.



Figure 4 : Cladodes d'*Opuntia ficus-indica*

Avec le produit obtenu, des solutions ont été préparées avec de l'eau distillée. Avant chaque manipulation et pour assurer une bonne dissolution et homogénéisation de la solution, elle est agitée pendant 90 min.

Il est à noter que la durée entre la collecte, la préparation du bio-polymère, ne dépasse pas les 48h, de même pour la durée entre la préparation de la poudre et son utilisation.

III.4.4. Préparation du polymère

En se référant au laboratoire d'analyse de la Station d'Épuration des Eaux Usées de Baraki, la concentration utilisée en polymère (Chemifloc CV300) est de 3 g/L. Le temps de maturation était d'environ 3h en raison de son caractère très visqueux. Les solutions sont conservées à 4 °C pendant 24 h au maximum. Un ordre de grandeur du volume de polymère à injecter est déterminé selon la formule suivante, utilisée par les STEP de la SEAAL :

$$V = \frac{D \cdot V_B \cdot MS}{1000 \cdot P} \quad \text{Eq. 3}$$

Avec :

- D : dose du polymère conseillée [kg de polymère / tonne de matière sèche de boue] ;
- V_B : le volume de l'échantillon de boue [mL] ;
- MS : les matières sèches de la boue [g/L] ;
- P : la concentration du polymère [g/L]

III.4.5. Caractérisation de bio-polymère

a. Caractérisation visuelle

Dans la préparation du bio-polymère, on s'est intéressé à deux sous catégories de l'O. ficus avec des propriétés légèrement différentes telles que la couleur, la taille, l'aspect du gel et le poids.

b. Caractérisation physico-chimique

- **La densité de charge** : définie comme étant la quantité de charge électrique par unité de masse. Elle fournit une mesure quantitative des groupes chargés présents dans une substance chimique. Cette dernière a été évaluée à l'aide d'un titrage conductimétrique par lequel la variation de la conductivité est mesurée en fonction du volume de titrant, suivant ces étapes ([Farris et al, 2011](#)) :

- Un échantillon de 100 ml a été préparé pour les deux sous-espèces à une concentration de 6 g/L pour éviter une grande viscosité empêchant la bonne agitation.
- Du HCl 0,1N a été ajouté par excès (jusqu'à pH=2) pour neutraliser les charges négatives des groupes carboxyliques non protonés.
- Après le titrage avec du NaOH (0,1N), une courbe de variation de la conductivité en fonction du volume de titrant est établie, et les deux points délimitant la zone d'équivalence sont identifiés.
- Le volume de titrant V_b utilisé entre ces deux points représente la quantité nécessaire pour déprotoner les groupes carboxyliques. Ce volume est ensuite ramené à la masse initiale du bio-polymère pour avoir finalement la densité de charges par gramme de matière.
- **Le pH** : mesurée pour les bio-polymères préparées ainsi que pour le gel frais (dilué pour avoir la même concentration que celle des solutions préparées).
- **La masse volumique** : on tare la masse d'un pycnomètre vide, la masse de ce dernier remplie est ensuite divisée par son volume.
- **La viscosité dynamique μ** : À une température de 27 °C assurée par un bain marie attaché, on mesure le temps t que met une bille en acier ($\rho_a = 8,73 \text{ Kg/L}$) à traverser une distance $L = 10 \text{ cm}$ dans un viscosimètre à chute de bille rempli avec la solution à analyser. La viscosité est ensuite calculée avec la formule qui suit :

$$\mu = \frac{(\rho_a - \rho_f) V g t}{6 \pi r L} \text{ (Pa.s)} \quad \text{Eq. 4}$$

Avec :

- ρ_f : masse volumique du fluide (Kg/ m^3) ;
- V : volume de la bille (m^3) ;
- r : le rayon de la bille (m).
- **Le poids moléculaire P_M** : Il existe une relation empirique entre la viscosité et le poids moléculaire, ce dernier est calculé en suivant ces étapes ([Kar & Arslan, 1999](#)) :
 - Mesurer la viscosité dynamique μ de chaque solution à différentes concentrations C_i ainsi que celle de l'eau μ_0 .
 - Calculer la viscosité spécifique (relative) selon la relation suivante :

$$\mu_{sp} = \frac{\mu - \mu_0}{\mu_0} \quad \text{Eq. 5}$$

- Calculer la viscosité réduite en fonction des différentes concentrations :

$$\mu_{r,i} = \frac{\mu_{sp}}{C_i} \quad \text{Eq. 6}$$

- Tracer la viscosité réduite en fonction de la concentration et extrapoler à C=0 pour obtenir la viscosité intrinsèque $[\mu]$.
- Utiliser une relation simplifiée de Mark-Houwink :

$$[\mu] = K P_M^a \quad \text{Eq. 6}$$

Où K et a sont des constantes liées à la méthode utilisée.

Dans notre cas, la méthode utilisée est celle des dilutions, ce qui donne : $K=2.34 \times 10^{-5}$ et $a = 0.8244$.

III.5. Etude de la coagulation/floculation avec le bio-polymère

III.5.1. Détermination de la dose de bio-polymère seul

Notre étude a débuté naturellement par l'ajout du bio-polymère seul à la boue afin de pouvoir observer son effet sur cette dernière. Les 2 sous-espèces d'*O.ficus* utilisées ont été testées, notées Type I et Type II (voir Figure 4). Pour chaque type, des tests en Jar-test ont été effectués en injectant différents volumes de bio-polymère, dans le but de déterminer la quantité optimale de ce dernier.

III.5.2. Combinaison polymère industriel / bio-polymère

Des tests visant à réduire de moitié la quantité du polymère industriel utilisée à la STEP de Baraki ont été effectués en substituant la dose réduite par le biopolymère. Pour ce faire, on détermine d'abord la dose optimale du polymère seul. Une solution de 3 g/L de ce dernier a été préparée à cet effet.

Un calcul préliminaire de la dose optimale à injecter, basé sur l'équation 3 et pour une matière sèche (MS) de boue de 33,4 g/L, avec une quantité recommandée de polymère de 6 kg par tonne de matière sèche de boue (voir Annexe 1 : Polymère Chemifloc CV 300), a donné un volume de 26,7 mL. Cependant, cette dose s'est avérée insuffisante pour la coagulation des boues. Des

essais supplémentaires ont donc été réalisés pour déterminer la dose optimale du polymère qui s'est avérée être de 50 mL.

Une fois ce volume déterminé, la combinaison des deux coagulant a été effectuée à partir de 25 mL pour l'industriel et différentes doses du bio-polymère afin de déterminer celle qui retourne le même résultat qu'avec le polymère seul. Dans cette étude, le choix s'est porté sur le deuxième type de bio-polymère.

III.5.3. Influence de pH

Compte tenu de la grande influence du pH dans le monde de la coagulation, ce paramètre a été étudié en acidifiant ou en basifiant les boues avant l'ajout du bio-polymère. Pour ce faire, des solutions de NaOH et de HCl 1N ont été préparées.

III.6. La coagulation des boues

III.6.1. Jar-test

Une série de tests de coagulation/floculation a été effectuée en utilisant un Jar-Test, qui peut supporter 6 béciers d'une capacité de 1 L chacun. Ces essais consistent en une simulation de l'étape d'injection du coagulant boues dans une STEP, juste avant leur déshydratation.

Voici les étapes réalisées lors de nos essais :

- Avant chaque test, des échantillons de boue de 400 mL ont été amenés à une température ambiante, puisqu'elles sont conservées au réfrigérateur après leur prélèvement.
- Par la suite, elles sont homogénéisées pendant 1 min sous agitation à 70 tr/min. Toutefois, si l'échantillon contient des bulles, l'agitation peut être prolongée jusqu'à 5 min.
- Ces conditions sont maintenues pendant 10 s après l'ajout de la dose requise du polymère, avec ou sans biopolymère, pour garantir une dispersion de ce(s) dernier(s) dans la suspension, celle-ci étant très chargée.
- L'agitation est poursuivie pendant 40 secondes à une vitesse réduite de 40 tr/min afin de conserver les floccs qui pourraient se former. A noter que les vitesses et durées appliquées ont été sélectionnées à partir de plusieurs essais préliminaires.

III.6.2. Égouttage des boues

Le test d'égouttage est un test simple, souvent utilisé comme méthode d'évaluation dans les STEP. La déshydratation avec filtres à bandes a été approchée par une filtration avec une toile d'égouttage de 5 mailles/cm² de 1 mm de diamètre, déposées sur un entonnoir. Le filtrat est recueilli dans une éprouvette graduée de manière à ce que les volumes puissent être lus facilement. Le temps d'égouttage est fixé à 10 min.

III.6.3. Grandeurs d'évaluation de la déshydratation

Afin de pouvoir mesurer la qualité de l'égouttage réalisé, nous nous sommes inspirés du protocole par la SEAAL appliqué dans ses stations d'épuration.

La performance du processus de coagulation a été évaluée à partir du test d'égouttage selon deux critères :

- L'égouttage doit provoquer une déshydratation de la boue et éliminer un maximum d'eau.
- Un maximum de particules solides doit être retenu lors du processus d'égouttage.

Ce qui a amené à étudier 3 paramètres après égouttage :

- **La siccité finale S_f** qu'on cherche à maximiser, pour caractériser le taux de déshydratation de la boue ;
- **Le volume d'eau égoutté V_e** pendant 10 min, qu'on cherche à maximiser pour caractériser le taux d'élimination d'eau ;
- **Les MES résiduels dans le filtrat MES_r** récupéré qu'on cherche à minimiser afin de caractériser le taux de rétention des particules solides.

Le calcul de S_f s'effectue suivant la méthode décrite dans la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, le volume égoutté est simplement lu sur l'éprouvette, et les MES_r sont calculés par la méthode de centrifugation. Celle-ci a été réalisée au laboratoire à l'aide d'une centrifugeuse de 4100 tr/min dans laquelle on met à centrifuger des échantillons de 40 mL de filtrat dans des godets de 50 mL pendant 10 minutes. En fin d'opération, les culots de boue sont soigneusement récupérés et séchés à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante (en général pendant au moins 12 heures).

Chapitre IV :

Résultats et discussions

IV.1 Paramètres de la boue

Les paramètres de caractérisation de la boue sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3 : Paramètres de la boue mixte de Baraki

Aspect physique	Siccité (%)	Mature sèche (g/L)	pH
- Couleur noire - Odeur forte et désagréable	3,35	33,4	6,75

V.1. Préparation du bio-polymère

V.1.1. Méthode de séchage

Faire sécher le gel d'O.ficus qui, pour rappel, était obtenu en broyant directement les cladodes frais pelés, présentait plusieurs problèmes. En effet, le gel étant très visqueux, il collait aux parois du contenant où il est mis dedans pour sécher, quelle que soit la nature du matériau qui compose ce dernier (verre, aluminium, ...).

La méthode la plus efficace consistait à couper en petits dés les cladodes et à les broyer après leur séchage à l'étuve sur du papier sulfurisé.

V.1.2. Température de séchage

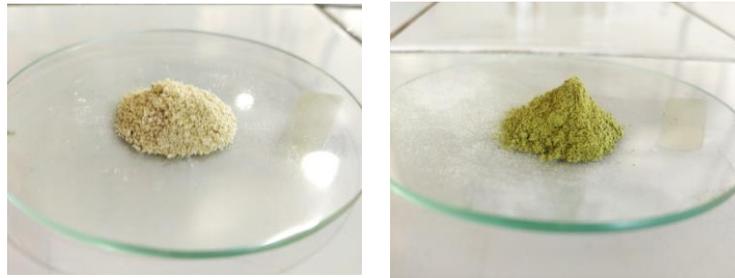
La détermination de la température optimale de séchage des morceaux de cladodes d'O. ficus n'était pas aisée :

- La 1^{ère} température de séchage à 80°C, a donné des résultats non satisfaisants avec quasiment pas de formation de flocons. A noter que les 2 sous-catégories séchaient différemment : le premier type était plus résistant à la chaleur, alors que l'autre a montré une coloration brune à cette température.
- Une 2^{ème} tentative a été réalisée à 50°C, mais une fermentation s'est produite à cette température, l'échantillon a pourri en fin d'opération. Cependant, il a été remarqué que la conservation de la peau des morceaux permet de contrôler le processus de séchage plus facilement, puisque celle-ci les protège de la chaleur et de l'attaque des microorganismes.

Ces différents tests ont conduit à la méthodologie suivante :

- Commencer par une température de 70°C pendant 4-5h, afin d'assurer une sorte de stérilisation ;
- Baisser par la suite à 60-55°C (selon la taille des morceaux) pendant 20h.

Cette méthode a permis de conserver la couleur verte vive de la deuxième sous-catégorie.



(a)

(b)

Figure 5 : Poudre de cladodes d'O. ficus obtenue après séchage pour : (a) – Type I (b) – Types II

V.1.3. Tamisage

Après broyage une passoire fine a été utilisé (diamètre inférieure a 0,5mm) ce qui était retenue c'est plutôt des fibres comme le montre la figure 6 :



Figure 6 : Fibres retenues après tamisage de la poudre des cladodes d'O. ficus

V.2. Caractérisation du bio-polymère

V.2.1. Caractéristiques des cladodes

Le tableau 4 résume les caractéristiques physiques manifestées sur les deux types de cladodes utilisés dans ce travail, ainsi que des remarques observées lors de manipulation de ces derniers.

Tableau 4 : Caractéristiques des cladodes frais

Types	Type I	Type II
Couleur	Vert clair	Vert foncé
Taille	Courte et épaisse	Longue et fine
Aspect gel	Visqueux et granuleux	Visqueux et lisse
Fibre	Fibreux	Fibres plus fines
Réaction à la température	Assez résistante	Peu résistante
pH	5,05	5,20
Viscosité dynamique μ (Pa.s)	42,53	58,55
Poids moléculaire P_M	399,63	1938,85

V.2.2. Caractéristiques de la poudre

Tableau 5 : Caractéristique des poudres de cladodes d'O. ficus

Types	Type 1	Type 2
Couleur	Blanchâtre, jaunâtre	Vert
pH	5,33	5,39
Densité de charges (mmol/g)	250	350
Masse volumique (g/L)	997,39	997,47
Viscosité dynamique μ (Pa.s)	17,13	44,10
Poids moléculaire P_M (kDa)	35,84	942,64

Il est à noter que le poids moléculaire du polyacrylamide (un des polymères les plus utilisés) est de 10.000 kDa (wei et al, 2008). Le taux de conservation du poids moléculaire pour le premier type est de 9% tandis que pour le second type a atteint les 49%, ce qui fait que l'hypothèse que le second type était plus sensible à la chaleur à cause de sa coloration est mise à défaut.

V.3. Performance du bio-polymère

V.3.1. Influence de pH

L'ajout de l'acide aux boues a provoqué la formation de bulles ainsi que des émanations de vapeurs très odorantes (désagréables), ce qui dénote une dégradation de la matière organique. La basification par contre semblait stabiliser les odeurs de la boue.

L'ajout par la suite du bio-polymère menait à une séparation de phases solide/liquide, sans pour autant l'observation de formation de floccs. Le processus ressemblait plutôt à une gélification de la phase solide dans le cas de basification, et à une flottation de celle-ci, due aux bulles formées lors de l'acidification. Ce comportement peut être expliqué par le fait que l'O.ficus contient beaucoup de groupement carboxylique qui prend la même charge que les particules de boues (charge négative) dans un milieu acide résultant a des forces de répulsion. Ainsi, la basification crée un environnement neutre et diminue la capacité d'hydrolyse, d'où le pH optimal était le pH neutre (Data et al, 2021).

V.3.2. Bio-polymère employé seul

a. Bio-polymère de type I

Les résultats obtenus avec la poudre d'O. ficus de la 1^{ère} sous-catégorie utilisée (Type 1) n'étaient pas satisfaisants. Les boues se gélifiaient légèrement en présence du bio-polymère sans pour autant former des floccs filtrables. Pourtant, différents tests ont été effectués en augmentant à chaque fois la dose du bio-polymère injecté aux 400 mL de boue à déshydrater. Nous nous sommes arrêtés après l'ajout de 100 mL d'une solution concentrée à 30 g/L, sans succès. A noter que cette dose correspond à 20 fois¹ la dose injectée du polymère industriel, ce n'est ni intéressant du point de vue économique, ni technique au niveau des STEP.

De même, des essais ont été menés sur la boue mixte de la STEP de Réghaia ainsi que sur la boue épaissie de la STEP de Béni Messous. Les essais se sont avérés non concluants bien qu'une séparation de phase a eu lieu.

¹ La solution du bio-polymère à 30 g/L est 10 fois plus concentrée que celle du polymère industriel. De plus, le volume injecté pour la 1^{ère} (100 mL) est 2 fois supérieur au volume de la 2^{ème} (50 mL). Le tout retourne une dose 20 fois plus importante.



(a)

(b)

(c)

Figure 7 : Gâteau obtenu après le test d'égouttage de la boue de Baraki: (a) Sans coagulant, (b) Avec ajout de biopolymère de Type I, (c) Avec ajout de biopolymère de Type II

b. Bio-polymère de type II

Le bio-polymère issu de la poudre de cladodes de la 2^{ème} sous-espèce d'*O. ficus* utilisé dans notre étude a retourné de bien meilleurs résultats que le type I. En effet, nous avons pu observer la formation de floccs et une séparation solide/liquide après son ajout aux boues étudiées.

Différentes doses du bio-polymère dans les échantillons de boues ont été testées. Des floccs se sont formés et ont pu être observés, comme sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Les résultats physico-chimiques de ces tests sont représentés sur la Figure 9 pour la siccité finale du gâteau filtré (S_f), le volume de filtrat après 10 minutes d'égouttage (V_e) et les MES résiduels dans ce dernier (MES_r). Ces résultats sont à chaque fois comparés à ceux obtenus avec l'emploi du polymère industriel pour une concentration de 3 g/L et un volume injecté de 50 mL (voir section III.5.2.)

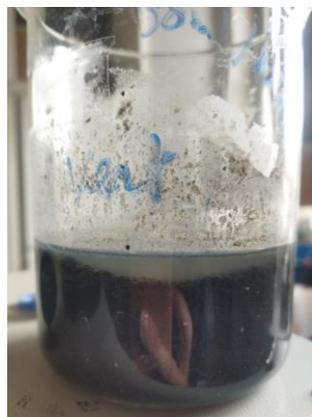
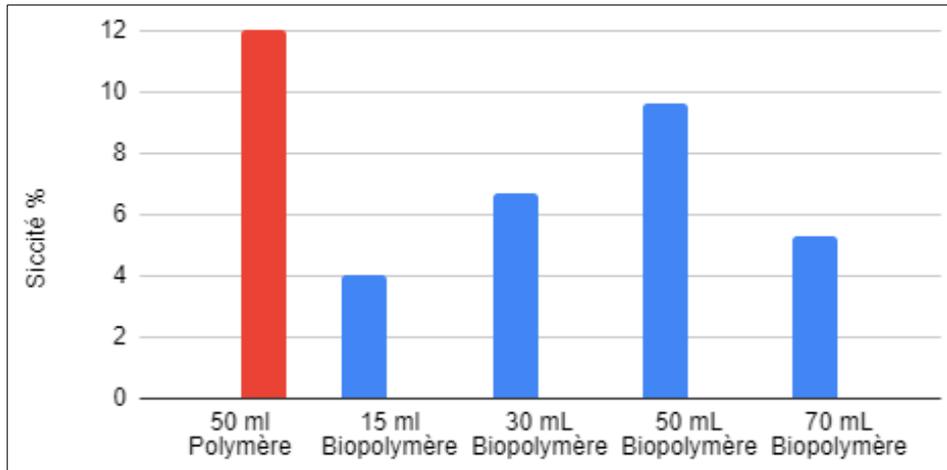
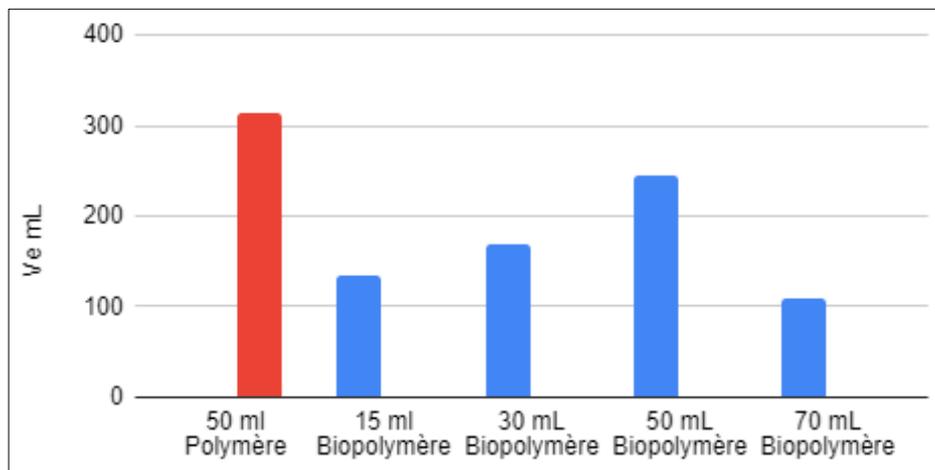


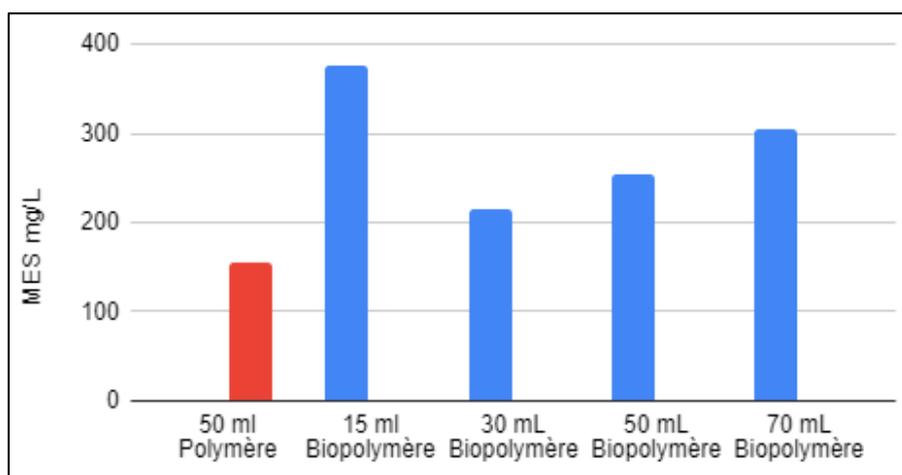
Figure 8 : Floccs obtenus après l'ajout de biopolymère Type II



(a)



(b)



(c)

Figure 9 : Résultats du test d'égouttage après conditionnement des boues avec des solutions de 3 g/L pour le polymère industriel ou 15 g/L pour le bio-polymère de type II pour : (a) Siccité finale S_r , (b) Volume d'égouttage V_e et (c) MES_r

Tous les graphiques présentent des optimums : des maximums pour la siccité et le volume d'égouttage et un minimum pour les MES résiduels. Ces résultats sont satisfaisants puisqu'ils concordent avec ce qui a été décrit à la section III.6.3 (page 42). De plus, ils présentent une certaine cohérence. En effet, l'obtention d'un gâteau avec une siccité importante traduit une bonne séparation entre les phases liquides et solides, ce qui est accompagné avec un bon volume d'égouttage. Aussi, une siccité élevée traduit une bonne rétention de la MS, et donc des MES résiduels réduits dans le filtrat.

Un dernier point à souligner, et pas des moindres, est l'augmentation conséquente de la siccité de la boue qui est passée de 3,5% jusqu'à une valeur maximale de 9,5% pour un volume de bio-polymère de 50 mL. Cette même quantité de bio-polymère a permis de récupérer un volume de filtrat 245 mL à partir d'un volume initial de boue de 400 mL.

Cependant, concernant les MES résiduels, la valeur optimale qui est de 214 mg/L a été observée pour un volume de bio-polymère de 30 mL.

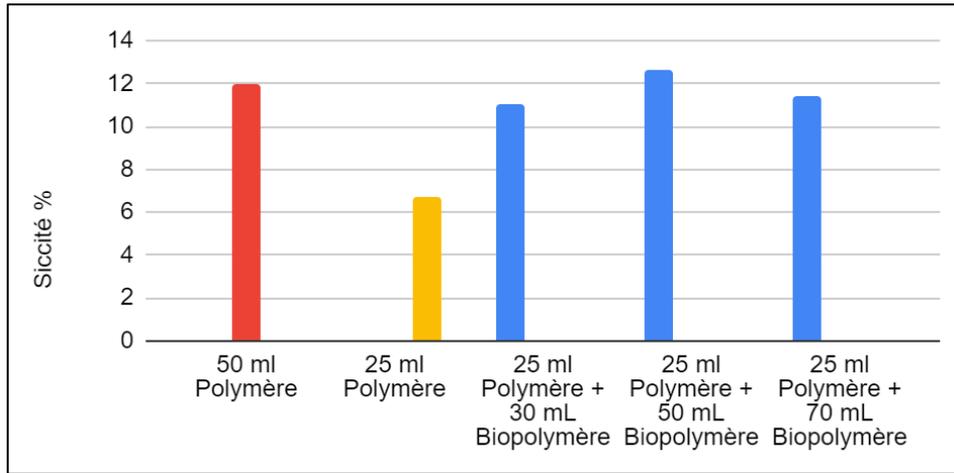
Les résultats obtenus dans cette partie de l'étude du bio-polymère employé seul peuvent être résumés dans le tableau suivant :

Tableau 6 : Valeurs optimales des paramètres recherchés, obtenues lors de l'emploi du bio-polymère seul

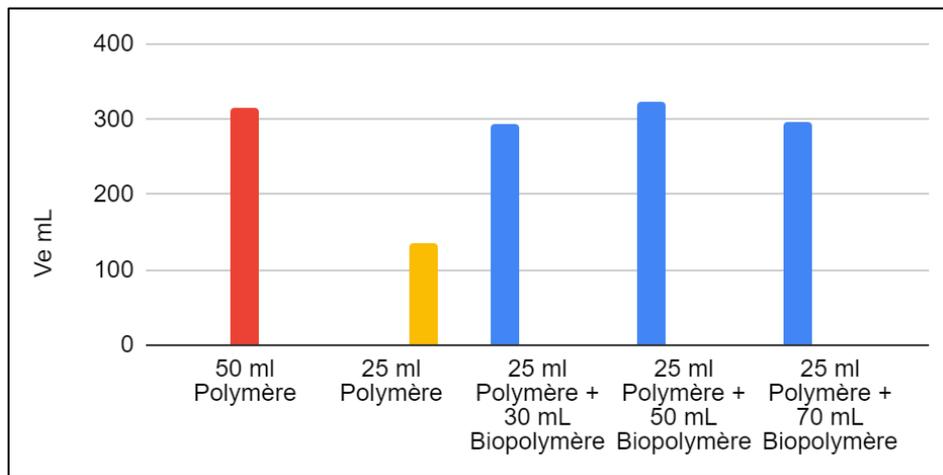
Paramètre	Valeur	Volume du bio-polymère (mL)
Siccité finale S_f (%)	9,6	50
Volume d'égouttage V_e (mL)	245	50
MES résiduelles MES_r (mg/L)	214	30

V.3.3. Combinaison polymère industriel/bio-polymère

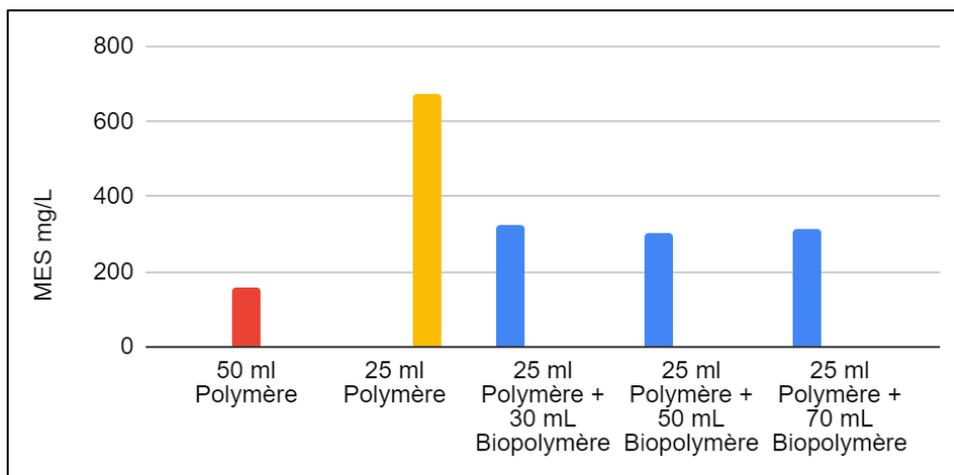
La dose optimale du polymère industriel a été réduite de moitié dans les tests qui suivent avec l'ajout de différentes doses de bio-polymère, en plus d'un essai avec le polymère seul réduit de moitié (sans l'ajout de bio-polymère) qui sert de témoin afin de voir si l'ajout du bio-polymère provoque un changement ou non. Les résultats obtenus sont reportés sur la Figure 10.



(a)



(b)



(c)

Figure 10 : Résultats du test d'égouttage après conditionnement des boues avec une combinaison de polymère industriel (3 g/L) et différentes doses de bio-polymère de type II (15 g/L) pour : (a) Siccité finale S_r , (b) Volume d'égouttage V_e et (c) MES_r

En analysant la figure ci-dessus, il est à constater que l'utilisation d'une dose réduite de moitié (25 mL) pour le polymère industriel seul a retourné des résultats non satisfaisants, comparé à l'utilisation de la dose complète (50 mL).

L'ajout du bio-polymère à la dose réduite du polymère industriel a amélioré les performances du test d'égouttage et ce, pour tous les paramètres étudiés et pour toutes les doses de bio-polymère testées, ce qui prouve que ce dernier joue réellement un rôle de coagulant.

La dose de bio-polymère ayant apporté les meilleurs résultats correspond à 50 mL, combinée à 25 mL de polymère industriel. Pour ce volume, la siccité finale s'est vue doubler de valeur en passant de 6,7% pour le polymère industriel utilisé seul et réduit de moitié, à 12,6% avec l'ajout de bio-coagulant. De même, le volume d'égouttage est passé de 135 mL à 325 mL, ce qui correspond à une augmentation de 150%. Concernant les MES résiduels du filtrat, elles ont été considérablement réduites en passant de 674 mg/L à 302 mg/L.

Enfin, il est à noter que la réduction du polymère industriel et son remplacement par le bio-polymère a non seulement fonctionné mais a retourné de meilleures performances, même si elles sont légères, que si le polymère industriel était utilisé seul à dose complète. En effet, la siccité est passé de 12 à 12,6 % et le volume d'égouttage de 315 à 325 mL. Cependant, les MES résiduels ont augmentés avec l'ajout du bio-polymère en passant de 156 à 302 mg/L. Ce résultat ne peut s'expliquer que par la présence de poudre de bio-polymère dans le filtrat. En effet, les 50 mL de bio-polymère sont injectés sous forme de suspension, compte tenu du fait que la poudre de cladodes d'O. ficus ne se dissout que très peu dans l'eau. Cette poudre étant tellement fine, elle passe aisément à travers les mailles du filtre lors du test d'égouttage et se retrouve dans le filtrat, ce qui explique la concentration élevée de MES dans ce dernier.

Tableau 7 : Valeurs optimales des paramètres recherchés, obtenues lors de l'emploi d'une combinaison Polymère industriel/Bio-polymère

Paramètre	Valeur optimale	Volume des polymère
Siccité finale S_f (%)	12,6	25 mL de Polymère industriel + 50 mL de Bio-polymère
Volume d'égouttage V_e (mL)	325	
MES résiduelles MES_r (mg/L)	302	

Il est à noter que l'ajout de 30 mL de bio-polymère avec la dose réduite de polymère industriel a retourné des résultats satisfaisant avec lesquels on pourrait se contenter. En effet, la siccité

finale est de l'ordre de 11% et le volume égoutté est de 295 mL, ce qui est très proche des valeurs obtenues lors de l'emploi de la dose complète du polymère industriel. Les MES résiduelles dans le filtrat restent cependant élevées mais sans danger, comme expliqué précédemment.

V.4. Discussion des résultats

La méthode de séchage des cladodes d'O.ficus (séchage du gel frais ou des cladodes directement) et la température de séchage plus spécifiquement (50, 60 ou 80°C) semblent avoir un effet majeur sur le rendement du bio-polymère dans le processus de déshydratation des boues. Ceci s'explique par la sensibilité des agents actifs aux hautes températures au-delà de 70°C et pour une longue durée.

Cela est supporté par l'augmentation du pH, de la diminution de la viscosité et du poids moléculaire du bio-polymère après séchage, indiquant ainsi, la dégradation de quelques molécules, telles que l'acide carboxylique, et la dépolymérisation de quelques polysaccharides.

Avec la bonne méthode de séchage, la poudre de cladodes d'O. ficus de la 2^{ème} sous espèce étudiée arrive à conserver une bonne partie de ces propriétés (49% de sa masse moléculaire) contrairement à la 1^{ère} sous espèce (9%), (voir Tableau 4 et Tableau 5).

Dans ce contexte, la recherche d'autres méthodes pour la préparation de la poudre peut être, à elle seule, l'objet d'une autre étude.

De même, la poudre d'O. ficus gardée à température ambiante pendant plus de 3 mois n'a montré aucun signe visible de dégradation, contrairement au gel frais d'O. ficus, pourtant conservé à 4°C. En effet, ce dernier s'est désagrégé et a pourri au bout d'une semaine. Une étude comparative d'efficacité des deux formes en fonction du temps serait intéressante afin de confirmer ces constats.

Le gel frais brut d'O. ficus injecté à la boue a un effet de gélification avec une légère séparation de 2 phases. Cependant, aucune floculation n'est produite et ce quel que soit la dose injectée. Cela peut être attribué à une concentration trop élevée de bio-actifs, ce qui signifie que le mucilage ne peut pas être utilisé directement sans dilution. Celle-ci, quant à elle, peut être une étape lente et fastidieuse surtout pour la poudre de type II vue sa viscosité élevée. Les pertes en viscosité et en poids moléculaire après séchage deviennent très probablement admissibles quand des paramètres tels que les frais de transport et de stockage, ainsi que la durée de

conservation du bio-polymère, et la difficulté de manipulation du gel brut sont pris en compte.

Le séchage du type II à 80 °C a provoqué un changement de couleur plus important (brun) que sur le type I (jaune). Le séchage à 50 °C, quant à lui, a conduit à une prolifération plus rapide des microorganismes sur le type II que sur le type I. Ces deux observations indiquent que le type II est plus riche en polysaccharides que le type I. Cette hypothèse est confirmée par les résultats de la viscosité, du poids moléculaire, et de la densité de charges (voir Tableau 5). Ces mêmes résultats ont conduit à des essais non concluants pour le type I en termes de coagulation/floculation, contrairement au type II.

Ceci dit, le type I n'engendre pas une séparation nette de phases et n'est donc pas exploitable par la filtration gravitaire à cause de la faible taille et force des floccs.

Les deux types sont très proches en matière de pH, ce qui confirme que le mécanisme d'action du produit est lié directement à sa densité de charges et au poids moléculaire et non pas à son acidité (Tableau 5).

Les tests préliminaires menés avec le type I ont montré que la boue de Réghaïa avait une meilleure réponse en ce qui concerne le temps de décantation qui est passé d'environ 12h à 1h. Ces constats peuvent être expliqués par les caractéristiques de cette boue se rapprochant de celles des boues industrielles et donc répondant mieux à un coagulant anionique, ce qui est le cas pour l'O.ficus.

Des tests prolongés pourraient être intéressants sur cette boue, et en utilisant plutôt le type II.

Il est à noter que lors des combinaisons de bio-polymère/polymère industriel, l'ordre d'injection est très important. Le bio-polymère ajouté en dernier n'est pas compatible avec l'échantillon, probablement à cause de sa viscosité et le fait que le polymère industriel ait déjà occupé la majorité de sites actifs sur les particules de boue.

Une formation de mousse a été constaté sur la surface des boues traitées avec le polymère avec l'apparition d'une épaisse couche huileuse flottant sur le filtrat (obtenue lors des filtrations pour la mesure des MES résiduelles) avec une couleur rouge sur les parois de l'enceinte. Ce phénomène peut être expliqué par la prolifération des bactéries filamenteuses qui dépolymérisant le polymère industriel en fragments plus petits (substance huileuse). Cependant ce phénomène n'a pas été constaté sur les boues traitées avec le bio-polymère seul, ni sur leurs filtrats, ce qui lui procure une qualité additionnelle.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion générale et perspectives

Dans le but de mettre en œuvre un coagulant naturel conditionnant les boues des STEP avant leur envoi vers les machines de déshydratation, un bio-coagulant sous forme de poudre a été produit par séchage pour deux types de cladodes d'*Opuntia ficus-indica*. Les différents tests de séchage ont conclu à un protocole de séchage bien défini.

Le premier type d'*O.ficus* s'est révélé peu performant, la suite des tests a donc été menée avec le deuxième type uniquement. Les performances de ce dernier ont été testées sur les boues en injectant différents volumes afin de déterminer celui qui retourne les meilleurs résultats. Il s'est révélé qu'un volume de 50 mL de bio-polymère injectée dans un échantillon de 400 mL de boue permettait d'augmenter la siccité de la boue de 3,5 jusqu'à une valeur optimale de 9,6 % avec un volume d'égouttage de 245 mL. Cependant, les MES résiduelles ont retourné une valeur minimale pour un volume différent de bio-polymère, correspondant à 30 mL.

Etant donné que ces tests étaient bons mais pas encore concluants comparés à un test effectué avec le polymère industriel utilisé dans le STEP de Baraki, il a été convenu de tenter de réduire de moitié la quantité utilisée de ce dernier et de la remplacer avec le bio-polymère. Les résultats obtenus étaient plus que concluants, compte tenu du fait que la siccité de la boue est passée à 12,6 %, avec un volume d'égouttage correspondant à 345 mL et ce pour une dose de bio-polymère de 50 mL combinée à 25 mL de polymère industriel. Cependant, les MES résiduelles retournaient des valeurs plus élevées dans le filtrat avec l'ajout du bio-polymère pour ces mêmes concentrations, sans doute due à la présence de particules solides du bio-polymère (poudre) qui est injecté sous forme de suspension.

Cette étude peut être complétée avec une étude technico-économique afin de démontrer les économies que pourrait réaliser une STEP en substituant une partie du polymère utilisé à leur niveau par le bio-polymère.

Aussi, une étude microbiologique pourrait être menée après l'utilisation du bio-polymère et sa présence dans le filtrat qui est recirculé en tête de la STEP afin de voir si, à son tour, il ne provoquerait pas des problèmes au niveau des bassins d'aération (ou ailleurs) par une prolifération de bactéries propres à lui, ou filamenteuses, comme c'est le cas avec le polymère industriel.

Enfin, cette étude devrait être reproduite en essayant de réduire encore plus la quantité du polymère industriel avec la recherche de la quantité adéquate de bio-polymère, en effectuant un plan d'expérience afin de réduire le nombre d'expériences.

Références bibliographiques

- ADEME, 2001, Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture, Paris, ADEME Edition.
- Adli, B., Boutekrabt, A., Touati, M., Bakria, T., Touati, A., & Bezini, E. (2017). Phenotypic diversity of *Opuntia ficus indica* (L.) MILL. in the Algerian steppe. *South African Journal of Botany*, 109, 66-74.
- Algérie press service, Le volume des eaux usées épurées estimé à 500 millions m³/an ; Publié Le : Jeudi, 10 Mars 2022 18:36
- Ammam, Yousra. (2022). Optimisation du procédé de déshydratation des boues des stations d'épuration : Etude paramétrique du polymère
- Bolto, B., & Gregory, J. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water research*, 41(11), 2301-2324.
- Boráň, J., Houdková, L., & Elsässer, T. (2010). Processing of sewage sludge: Dependence of sludge dewatering efficiency on amount of flocculant. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(5), 278–282.
- Carmona-Ribeiro, A. M., & de Melo Carrasco, L. D. (2013). Cationic antimicrobial polymers and their assemblies. *International journal of molecular sciences*, 14(5), 9906-9946.
- CHADOULI, Mohamed., BELABBAS, Malika.(2017). Étude du fonctionnement de la digestion d'une station d'épuration des eaux usées urbaine : Cas de la STEP de Baraki (W. Alger), 4.570.1.090 ; 63
- Chemifloc Group : Chemifloc CV300, 2024-05-08, <https://www.chemifloc.com/products/#product-search>
- Choudhary, M., Ray, M. B., & Neogi, S. (2019). Evaluation of the potential application of cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a bio-coagulant for pre-treatment of oil sands process-affected water. *Separation and Purification Technology*, 209, 714-724.
- Ciešlik, B. M., Namieśnik, J., & Konieczka, P. (2015). *Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. Journal of Cleaner Production*, 90, 1–15.
- Đata, T. T., Nguyenb, T. T., & Van Namb, T. (2021). Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using nopal cactus powder. *Journal of Technology & Innovation*, 1(2): 39-42

- Erre, P., Chessa, I., Nieddu, G., & Jones, P. G. (2009). Diversity and spatial distribution of *Opuntia* spp. in the Mediterranean Basin. *Journal of Arid Environments*, 73(12), 1058-1066.
- Farineau, J., & Morot-Gaudry, J. F. (2018). La photosynthèse: processus physiques, moléculaires et physiologiques. p.310-312
- Farris, S., Mora, L., Capretti, G., & Piergiovanni, L. (2011). Charge Density Quantification of Polyelectrolyte Polysaccharides by Conductometric Titration: An Analytical Chemistry Experiment. *Journal of Chemical Education*, 89(1), 121–124.
- Figueiredo, F. F., de Souza Freitas, T. K. F., Dias, G. G., Geraldino, H. C. L., Scandelai, A. P. J., Vilvert, A. J., & Garcia, J. C. (2022). Textile-effluent treatment using Aloe vera mucilage as a natural coagulant prior to a photo-Fenton reaction. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 429, 113948.
- Figueiredo, F. F., de Souza Freitas, T. K. F., Dias, G. G., Geraldino, H. C. L., Scandelai, A. P. J., Vilvert, A. J., & Garcia, J. C. (2022). Textile-effluent treatment using Aloe vera mucilage as a natural coagulant prior to a photo-Fenton reaction. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 429, 113948.
- Kenea, D., Denekew, T., Bulti, R., Olani, B., Temesgen, D., Sefiw, D., ... & Mekonin, W. (2023). Investigation on surface water treatment using blended moringa oleifera seed and aloe vera plants as natural coagulants. *South African Journal of Chemical Engineering*, 45(1), 294-304.
- Kenea, D., Denekew, T., Bulti, R., Olani, B., Temesgen, D., Sefiw, D., ... & Mekonin, W. (2023). Investigation on surface water treatment using blended moringa oleifera seed and aloe vera plants as natural coagulants. *South African Journal of Chemical Engineering*, 45(1), 294-304.
- Kettab, A. (1992). *Traitement des eaux (les eaux potables)*. OPU, Alger. 34-58
- Lee, C. H., and J. C. Liu. Sludge dewaterability and floc structure in dual polymer conditioning. *Advances in environmental research* 5.2 (2001): 129-136.
- Lee, C. S., Robinson, J., & Chong, M. F. (2014). A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(6), 489-508
- Lee, D. J., Tay, J. H., Hung, Y. T., & He, P. J. (2005). Introduction to sludge treatment. *Physicochemical Treatment Processes*, 677-703.
- Lim, K. S., Sethu, V., & Selvarajoo, A. (2022). Natural plant materials as coagulant and flocculants for the treatment of palm oil mill effluent. *Materials Today: Proceedings*, 48, 871-887.

- Matsuhiro, B., Lillo, L. E., Sáenz, C., Urzúa, C. C., & Zárate, O. (2006). Chemical characterization of the mucilage from fruits of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydrate polymers*, 63(2), 263-267.
- Mozas, M., & Ghosn, A. (2013). État des lieux du secteur de l'eau en Algérie. Institut de Perspective Économique du Monde Méditerranéen (IPMED), 27.5
- Ndabigengesere, A., Narasiah, K. S., & Talbot, B. G. (1995). Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. *Water research*, 29(2), 703-710.
- Nguyen, T. P., Hilal, N., Hankins, N. P., & Novak, J. T. (2008). Characterization of synthetic and activated sludge and conditioning with cationic polyelectrolytes. *Desalination*, 227(1-3), 103–110.
- Nobel, P. S. (Ed.). (2002). *Cacti: biology and uses*. Univ of California Press.
- Oladoja, N. A. (2016). Advances in the quest for substitute for synthetic organic polyelectrolytes as coagulant aid in water and wastewater treatment operations. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 3, 47–58.
- Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2015: l'eau dans un monde durable: résumé, 2015 WWW.UNESCO.ORG
- Saint-pierre, Xabi. Procédure de Réduction de Consommation de Polymère. 2009.
- Sikos, L., & Klemeš, J. (2009). RAMS contribution to efficient waste minimisation and management. *Journal of Cleaner Production*, 17(10), 932-939.
- Stickland, A. D. (2015). *Compressional rheology: A tool for understanding compressibility effects in sludge dewatering*. *Water Research*, 82, 37–46.
- Suez Water Handbook, 2024-04-02.
- Vijayaraghavan, G., Sivakumar, T., & Kumar, A. V. (2011). Application of plant based coagulants for wastewater treatment. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 1(1), 88-92.
- Wei, H., Gao, B., Ren, J., Li, A., & Yang, H. (2018). Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review. *Water Research*, 143, 608–631
- Zhang, J., Zhang, F., Luo, Y., & Yang, H. (2006). A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment. *Process Biochemistry*, 41(3), 730–733.

ANNEXES

Annexe 1 : Polymère Chemifloc CV 300

CHEMIFLOC CV 300
Polyélectrolyte



Chemipol

Caractéristiques

Le nom CHEMIFLOC comprend une gamme complète de floculants synthétiques de différents poids moléculaires et fonctionnalité ionique, et qui sont appropriés pour la séparation solide/liquide dans un ample spectre de procès chimiques et traitements des eaux urbaines et industrielles.

Hauts niveaux d'efficacité sont obtenus pour la décantation de solides en suspension, utilisant généralement un coagulant des habituels pour le traitement des eaux avant du floculant.

Ces floculants peuvent s'utiliser pour la déshydratation des boues qu'ont valeurs bas de matière organique.

Applications et doses

En générale, c'est recommandable préparer une solution du produit à une concentration du 0,2 - 0,5 %, utilisant un educteur qui peut être fourni sous demande. Le temps nécessaire pour la préparation est 150 minutes avec une agitation minime de 300 rpm.

La vie de la solution dépend de la concentration et type d'eau utilisé. Une concentration plus élevé et une qualité de l'eau supérieure donne une vie plus longue de la solution. Mais nous pouvons noter qu'une solution au 0,5% dans eau distillé peut avoir une durée de vie de 5 jours.

Les doses d'application ont une relation avec les caractéristiques de la boue à déshydrater à un titre orientative pour la déshydratation de la boue des doses sont utilisé 6-10 · Kg/Tn de matière sèche

Données techniques

Aspect	Poussier granulé blanc
Stabilité du produit sec	24 mois
Poids spécifique apparent	0.80 gt/ml
Viscosité (0,25 %)	450 cps.
Ionacité	Cationique Moyen
Poids moléculaire	Très Haut
Granulométrie	2% > 10 mesh - 6% < 100 mesh

Information générale sur emmagasinage, sécurité et transport

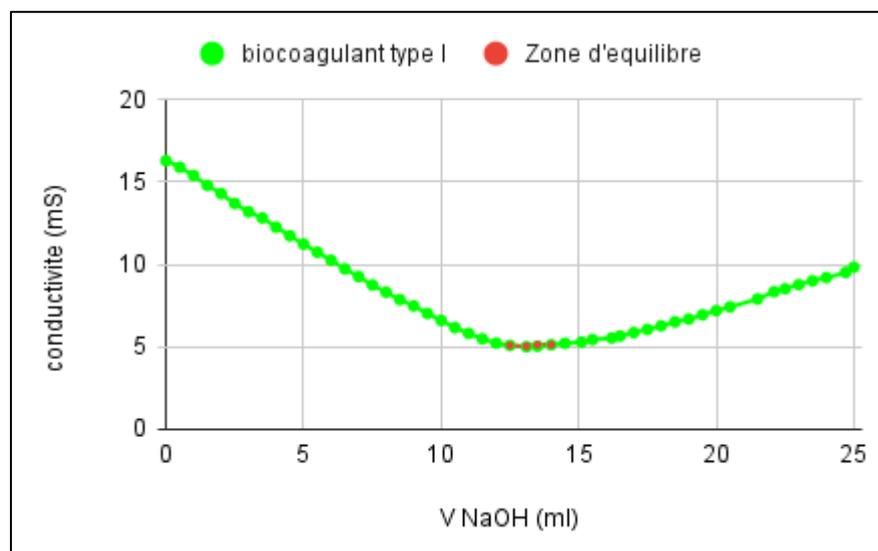
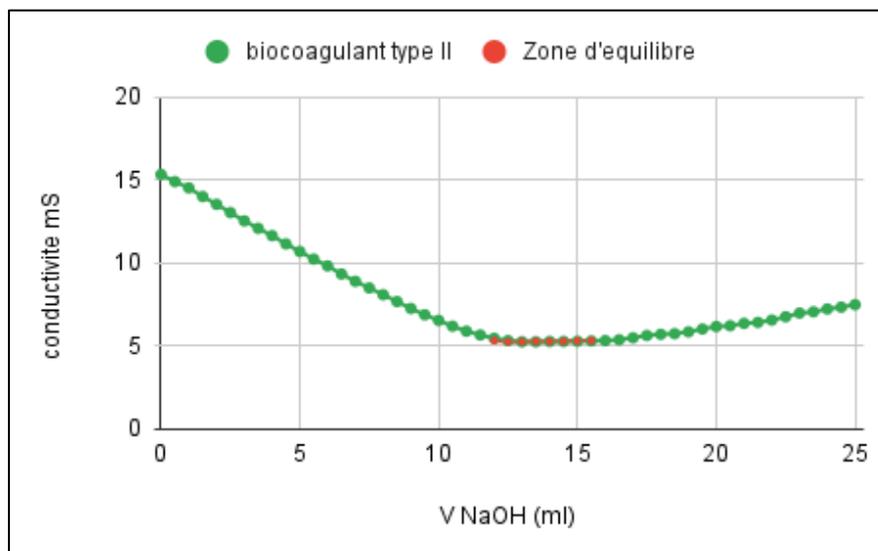
On recommande maintenir le produit dans un lieu sec, couvert et une température entre 0 et 50 °C. Maintenir les sacs bien fermés pour éviter l'absorption d'humidité.

Éviter que le produit se répandre sur surfaces humides, et éviter le contact avec eau du produit répandu.
Le produit est disponible en sacs de 25 kg et big-bags de 750 kg.

Nos recommandations relatives à ces produits sont basées sur des essais approfondis de notre Département Technique. Elles sont données en bonne foi, mais ne peuvent d'aucune façon engager notre responsabilité.

Annexe 2 : Caractérisation de la viscosité et de la charge du biopolymère

Les courbes de variation de conductimétrie en fonction du volume titrant utilisé pour déterminer la densité de charges sont présentées sur les figures qui suivent :



Les différentes viscosités des solutions des deux types ainsi que les courbes utilisées pour déterminer la viscosité intrinsèque sont les suivantes :

	Concentration (g/L)	t (s)	Masse volumique (g/L)	Viscosité dynamique (Pa.s)	Viscosité spécifique	Viscosité réduite (L/g)	Viscosité intrinsèque (dL/g)	Poids moléculaire (g/mol)
Poudre Type I	30	3,0	1003	33,3	1,96	0,07	0,13	35841
	15	1,6	997	17,1	0,52	0,03		
	10	1,4	997	15,0	0,33	0,03		
Poudre Type II	15	4,0	997	44,1	2,92	0,19	1,97	942639
	10	3,0	997	33,2	1,96	0,20		
	5	2,0	997	22,3	0,98	0,20		
Gel Type I	15	3,9	997	42,5	2,78	0,19	0,97	399626
	10	2,7	997	29,0	1,58	0,16		
	5	1,7	997	18,3	0,63	0,13		
Gel Type I	15	5,4	1000	58,5	4,21	0,28	3,57	193885 5
	10	4,2	1000	46,1	3,10	0,31		
	5	2,7	999	29,8	1,65	0,33		
Eau	/	1,2	996	11,2	/	/	/	/

