

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



Département Génie de l'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 de l'Environnement

Optimisation du procédé de déshydratation des boues des stations d'épuration : Etude paramétrique du polymère

Réalisé par

AMMAM Yousra

Sous la direction de

M. Abdelkader NAMANE

Professeur à l'ENP

Mme. Chahinez TCHEKIKEN

MCB à l'ENP

Présenté et soutenu le 04 juillet 2022

Composition du Jury :

Président	M. Yacine KERCHICH,	MCA à l'ENP
Examinatrice	Mme. Naima DJELLOULI	MCB à l'ENP
Promoteur	M. Abdelkader NAMANE	Professeur à l'ENP
Co-promotrice	Mme. Chahinez TCHEKIKEN	MCB à l'ENP

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



Département Génie de l'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 de l'Environnement

Optimisation du procédé de déshydratation des boues des stations d'épuration : Etude paramétrique du polymère

Réalisé par

AMMAM Yousra

Sous la direction de

M. Abdelkader NAMANE

Professeur à l'ENP

Mme. Chahinez TCHEKIKEN

MCB à l'ENP

Présenté et soutenu le 04 juillet 2022

Composition du Jury :

Président	M. Yacine KERCHICH,	MCA à l'ENP
Examinatrice	Mme. Naima DJELLOULI	MCB à l'ENP
Promoteur	M. Abdelkader NAMANE	Professeur à l'ENP
Co-promotrice	Mme. Chahinez TCHEKIKEN	MCB à l'ENP

Résumé

ملخص: الهدف من هذا العمل هو تحسين إعدادات نزع المياه من الحمأة لمحطتي المعالجة في بني مسوس ورغاية بواسطة أنواع مختلفة من البوليمرات لتقليل تكاليف معالجتها. تم تقييم هذه العملية عن طريق استنزاف المياه من الحمأة بعد التكييف. تم استخدام تصميم تجريبي D-optimal (برنامج MODDE 6.0)، باختيار معاملات الدراسة الأس الهيدروجيني pH وجرعة ونوع البوليمر. تم التقييم على : عامل التركيز، الحجم المستنزف و المواد العالقة المتبقية. أظهرت نتائج التحسين أن البوليمر الأنسب لنزع الماء من حمأة بني مسوس ورغاية هما Chemifloc CH 87 و Tefloc FC 4606 PB على التوالي.

الكلمات المفتاحية: تحسين، نزع المياه، حمأة، بوليمر، استنزاف المياه، تصميم تجريبي.

Abstract: The aim of this work is to optimize the parameters for dewatering sludge from the two wastewater treatment plants of Beni Messous and Réghaia using different types of polymers in order to minimize their handling costs. The evaluation of this process was carried out by dewatering the sludge after its conditioning. A D-optimal experimental design (MODDE 6.0 software) was used by choosing pH, dose and polymer type as study parameters. The evaluation was done on: concentration factor; drained volume and residual TSS. The results of the optimization showed that the most appropriate polymer for dewatering the sludge of Beni Messous and Réghaia are Chemifloc CH 87 and Tefloc FC 4606 PB respectively.

Keywords: Optimization, dewatering, sludge, polymer, draining, experimental design.

Résumé : Le but de ce travail est d'optimiser les paramètres de déshydratation des boues des deux stations d'épuration de Beni Messous et de Réghaia par différents types de polymère afin de minimiser leurs coûts de manipulation. L'évaluation de ce procédé a été effectué par égouttage des boues après leur conditionnement. Un plan d'expérience D-optimal (logiciel MODDE 6.0) a été utilisé en choisissant comme paramètres d'étude le pH, la dose et le type de polymère. L'évaluation s'est faite sur : le facteur de concentration ; le volume égoutté et les MES résiduelles. Les résultats de l'optimisation ont montré que le polymère le plus approprié pour la déshydratation des boues de Beni Messous et de Réghaia sont Chemifloc CH 87 et Tefloc FC 4606 PB respectivement.

Mots-clés : Optimisation, déshydratation, boue, polymère, égouttage, plan d'expérience.

Remerciements

Ce travail a été réalisé durant la période de février à juin 2022 au Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement, à L'Ecole Nationale Polytechnique (ENP).

Je tiens d'abord à remercier Dieu tout puissant pour la force qu'il m'a donné pour atteindre tous mes objectifs, pour la patience et le courage tout au long de mes années d'études.

J'adresse mes vifs remerciements aux membres de jury qui apportent la touche finale à ce travail :

A Monsieur Yacine KERCHICH, Maître de conférences classe A à l'ENP et chef de département Génie de l'Environnement, d'avoir fait honneur d'accepter la présidence du jury.

A Madame Naima DJELLOULI, Maître de conférences classe B à l'ENP, d'avoir accepté d'examiner et juger ce travail.

Je tiens également à adresser mes remerciements à mes encadreurs qui m'ont accompagné tout au long de ce mémoire :

A Monsieur Abdelkader NAMANE, Professeur à l'ENP, pour la qualité de son encadrement, sa patience, rigueur et disponibilité, pour son partage de connaissance, pour m'avoir fait confiance ainsi que pour ses précieux conseils et apports pour améliorer et perfectionner ce mémoire.

A Madame Chahinez TCHEKIKEN, Maître de conférences classe B à l'ENP, pour sa bienveillance, sa disponibilité, le temps qu'elle m'a consacré, et ses précieux conseils et aides sans lesquels le présent rapport n'aurait pas pu voir le jour. Un grand merci également pour avoir toujours su prendre le temps de m'écouter, de me conseiller et de me remotiver dans les moments difficiles, lors des discussions professionnelles ou personnelles. J'ai beaucoup appris de vous, et ces 4 derniers mois à votre contact ont été extrêmement agréables et enrichissantes.

Je tiens à remercier sincèrement toute l'équipe du laboratoire et l'équipe de l'exploitation de la station d'épuration de Béni Messous pour nous avoir accueillie au sein de votre laboratoire et pour l'ambiance conviviale que vous savez y faire régner.

Je souhaite également remercier mes enseignants au sein du Département Génie de l'Environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué grandement à ma formation.

Une pensée particulière est adressée aux étudiants que j'ai côtoyé quotidiennement durant mes 5 années à l'ENP et qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de mes études.

Un merci bien particulier à Monsieur Reda, le technicien de laboratoire du département QHSE-GRI pour nous avoir ouvert le labo, encourager et soutenu et avoir été très serviable.

A toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, Merci énormément.

Dédicaces

A mes très chers parents, que j'aime plus que tous et que je remercie pour leur amour, leurs sacrifices, leur soutien, leurs encouragements et leurs prières tout au long de mes études.

A mes deux sœurs Ahlem et Imene pour qui les mots ne pourrons jamais décrire l'affection et l'amour que je porte pour elles, et qui n'ont cessé de m'encourager et me soutenir moralement tout au long de mon parcours académique.

A mes cousines Hanane et Nesrine que je considère comme mes deux sœurs et mon cousin Kouceila que je considère comme le frère que je n'ai jamais eu. A tonton Mohammed et à la mémoire de ma tante Fatiha qui me manque plus que les mots ne peuvent décrire.

A ma copine de chambre Wafa, avec laquelle notre relation s'est transformé très rapidement de camarades de classes à copines de chambre à deux sœurs, nous avons notre propre bonheur et nous seront toujours liées par le cœur.

A Halla, avec laquelle nous n'avons peut-être pas tout compris dans la vie, mais ensemble nous avons tout !

A Chiraz, qui m'était comme une troisième main et un deuxième cerveau à réfléchir, tu es ma meilleure personne et tu resteras toujours la meilleure.

A Maria et Rania, avec lesquelles j'ai eu les meilleures conversations et encouragements, tout semble plus lumineux quand vous êtes là et vous faites sortir le meilleur de moi.

A mes amis avec lesquels j'ai partagé les meilleurs moments de préparation de mon projet, et avec lesquels, nous savions juste que nous nous amusons mais nous n'avons pas réalisé que nous créons des souvenirs, Anis (Izo), Narimane, Hamza, Aicha, Malika, Aymen, Ahlem, Dounia et Ramzi.

Je dédie ce modeste travail.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale.....	13
Chapitre I : Les boues d'épuration, de la production à l'élimination	16
I.1. Origine des boues	17
I.1.1. Boues domestiques	17
I.1.2. Boues industrielles	18
I.2. Types de boues	18
I.2.1. Boues primaires.....	18
I.2.2. Boues secondaires (boues biologiques).....	18
I.2.3. Boues mixtes	18
I.3. Procédés de traitement des boues	19
I.3.1. L'épaississement	19
I.3.2. La stabilisation	19
I.3.3. Le conditionnement.....	19
I.3.4. L'égouttage.....	20
I.3.5. La déshydratation	21
I.4. Procédés de valorisation et d'élimination des boues	23
I.4.1. La valorisation agricole	23
I.5. La valorisation énergétique ou incinération.....	23
I.6. Mise en centre d'enfouissement des déchets	24
I.7. Composition et caractéristiques des boues	24
I.7.1. Teneur en eau	24
I.7.2. Les matières en suspension (MES)	25

Table des matières

I.7.3.	Matière sèche totale ou siccité	25
Chapitre II : Conditionnement et déshydratation des boues d'épuration		26
II.1.	La théorie de la coagulation/floculation	27
II.1.1.	Phénomène de coagulation (théorie de Stern).....	27
II.1.2.	Phénomène de floculation	28
II.2.	Les polymères (floculants organiques).....	29
II.2.1.	La charge du polymère	29
II.2.2.	La densité de charge	30
II.2.3.	Le poids moléculaire	30
II.2.4.	La forme physique.....	30
II.3.	Les facteurs impactant la déshydratation des boues	30
II.3.1.	La taille des particules.....	30
II.3.2.	Le pH des boues	31
II.3.3.	Le poids moléculaire du polymère	31
II.3.4.	La dose du polymère	31
II.4.	Les critères d'évaluation de l'aptitude à la déshydratation	32
II.4.1.	La Résistance Spécifique à la Filtration (RSF)	32
II.4.2.	Le temps de succion capillaire (CST)	32
II.4.3.	La siccité après centrifugation.....	32
II.4.4.	L'indice d'égouttage	33
Chapitre III : Matériel et méthodes.....		36
III.1.	Matériel utilisé	37
III.2.	Produits et réactifs.....	37
III.2.1.	Echantillonnage des boues.....	37
III.2.2.	Caractérisation des boues	39
III.2.3.	Choix du polymère	40

Table des matières

III.2.4.	Préparation du polymère.....	40
III.3.	Choix des facteurs d'optimisation.....	41
III.4.	Plan d'essais.....	41
III.4.1.	Jar-Test	41
III.4.2.	Egouttage des boues	43
III.4.3.	Calcul des grandeurs d'évaluation de la déshydratation	43
III.5.	Plan d'expérience (D-optimal).....	44
Chapitre IV: Résultats et interprétations		46
IV.1.	Propriétés de la boue.....	47
IV.2.	Détermination du domaine d'étude.....	47
IV.3.	Plan d'expérience D-optimal	47
IV.4.	Modélisation et interprétation des résultats de l'égouttage des boues de la STEP de Béni Messous.....	48
IV.4.1.	Validation des résultats.....	49
IV.4.2.	Optimisation	55
IV.4.3.	Diagrammes des effets directs.....	61
IV.4.4.	Diagrammes de contour.....	62
IV.5.	Modélisation et interprétation des résultats de l'égouttage des boues de la STEP de Réghaïa	63
IV.5.1.	Validation des résultats.....	66
IV.5.2.	Optimisation	71
IV.5.3.	Diagrammes des effets directs.....	74
IV.5.4.	Diagrammes de contour.....	75
IV.6.	Conclusion	76
Conclusion Générale		78
Références Bibliographiques.....		81
Annexes : Fiches techniques.....		90

Table des matières

Annexe 1 : Polymère Chemifloc CV 300.....	90
Annexe 2 : Polymère FO 4650 SH PS.....	91
Annexe 3 : Polymère Tefloc FC 4606 PB	92

Liste des tableaux

Tableau II-1 : Correspondance des valeurs de l'indice d'égouttage.....	34
Tableau III-1 : Appareils utilisés dans ce travail.....	37
Tableau III-2 : Propriétés des polymères (cationiques)	40
Tableau IV-1 : Propriétés des boues	47
Tableau IV-2 : Les facteurs et les niveaux du plan d'expérience	47
Tableau IV-3 : Résultats de la modélisation du facteur F, des MES _r et du volume égoutté V _e pour la boue de Béni Messous.....	48
Tableau IV-4 : Plan D-optimal appliqué à la boue de Beni Messous avec les valeurs expérimentales, prédites ainsi que les résidus des 3 réponses.....	50
Tableau IV-5 : Résultats statistiques pour les modèles proposés pour la boue de Béni-Messous	51
Tableau IV-6: Effets du modèle appliqué aux boues de Béni Messous et leurs valeur-p pour le facteur de concentration F, les MES _r et le volume égoutté V _e (En gras : valeur-p > 0,05)	53
Tableau IV-7 : Résultats de maximisation du facteur de concentration F et du volume égoutté V _e , et de minimisation des MES _r pour les boues de Béni Messous (Les optimums en gras) .	56
Tableau IV-8 : Résultats d'optimisation multi-objectif de la déshydratation des boues de Beni Messous	60
Tableau IV-9 : Résultats de la modélisation de F, des MES _r et du V _e pour la boue de Réghaïa	64
Tableau IV-10 : Plan D-optimal appliqué à la boue de Réghaïa avec les valeurs expérimentales, prédites ainsi que les résidus des 3 réponses	65
Tableau IV-11 : Résultats statistiques pour les modèles proposés pour la boue de Réghaïa...	66
Tableau IV-12: Effets du modèle appliqué aux boues de Réghaïa et leurs valeur-p pour le facteur de concentration F, les MES _r et le volume égoutté V _e (En gras : valeur-p > 0,05).....	68
Tableau IV-13 : Résultats de maximisation du facteur de concentration F et du volume égoutté V _e , et de minimisation des MES _r pour les boues de Réghaïa (Les optimums en gras).....	72
Tableau IV-14 : Résultats d'optimisation multi-objectif de la déshydratation des boues de Réghaïa.....	72

Liste des figures

Figure I-1 : Schéma du principe de fonctionnement d'une station d'épuration.....	17
Figure I-2 : Principe de fonctionnement d'une table d'égouttage.....	21
Figure I-3 : Schéma d'une centrifugeuse haute pression.	22
Figure I-4 : Filtre presse à plateaux.....	22
Figure I-5 : Filtre à bandes.	23
Figure II-1 : Schéma de la double couche électrique (couche de STERN).....	28
Figure II-2 : Schéma de formation des flocs par adsorption sur la chaîne de flocculant.....	29
Figure III-1 : Etat physique des boues : (a) Beni Messous (b) Réghaïa.....	38
Figure III-2 : Appareillage de filtration pour mesure des MES	39
Figure III-3 : Banc de Jar-Test	42
Figure III-4 : Flocs formés dans les boues conditionnées	42
Figure III-7 : Dispositif d'égouttage de la boue.....	43
Figure III-8 : Interface du logiciel MODDE 6.0	45
Figure IV-1 : Valeurs mesurées vs. Valeurs prédites des boues de Béni Messous pour : (a) le facteur de concentration F, (b) les MES résiduelles et (c) le volume égoutté V_e	52
Figure IV-2 : Graphique des coefficients de 3 réponses pour la boue de Beni Messous : (a) facteur de concentration ; (b) MES résiduelles ; (c) volume égoutté.....	55
Figure IV-3 : Graphiques des effets directs des trois réponses étudiées pour les boues de Beni Messous.....	62
Figure IV-4 : Diagramme de contour de la boue de Béni Messous pour : (a) Le facteur de concentration F, (b) Les MES_r et (c) Le volume égoutté V_e	63
Figure IV-5 : Valeurs mesurées vs. Valeurs prédites des boues de Réghaïa pour : (a) le facteur de concentration F, (b) les MES résiduelles et (c) le volume égoutté V_e	67
Figure IV-6 : Graphique des coefficients de 3 réponses pour la boue de Réghaïa : (a) facteur de concentration ; (b) MES résiduelles ; (c) volume égoutté.....	71
Figure IV-7 : Graphiques des effets directs des trois réponses étudiées pour la boue de Réghaïa	75
Figure IV-8 : Diagramme de contour de la boue de Réghaïa pour : (a) Le facteur de concentration F, (b) Les MES_r et (c) Le volume égoutté V_e	76

Liste des abréviations

CST : Capillary Suction Time (temps de succion capillaire)

ETM : Eléments Traces Métalliques.

E_g : Indice d'égouttage

F : Facteur de concentration

MES : Matières En Suspension.

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

MS : Matière Sèche.

P₁ : facteur de concentration des matières sèches.

P₂ : Facteur de la cinétique d'égouttage

P₃ : Facteur du taux de capture

RSF : Résistance Spécifique à la Filtration

S₀ : Siccité initiale de la boue

S_f : Siccité finale de la boue après égouttage

STEP : Station d'épuration

t₉₀ : Temps nécessaire pour récupérer 90% du volume totale du filtrat

V_e : volume égoutté pendant 10min

Introduction générale

Introduction générale

Les boues d'épuration sont un sous-produit inévitable du traitement des eaux usées. Cependant, au cours des dernières décennies, les quantités de boues produites ont augmenté de façon spectaculaire en raison de la croissance rapide de l'industrialisation et de la population. Selon les statistiques de l'année 2018 de l'Office National d'Assainissement (ONA), le parc national des stations d'épuration des eaux usées (STEP) compte 177 stations produisant 120 000 tonnes de boues par an. Ceci résulte en une augmentation des coûts de manipulation et de transport des boues, qui représentent souvent la moitié des coûts de fonctionnement des stations d'épuration des eaux usées. Par conséquent, diverses stratégies ont été élaborées pour trouver les meilleures solutions économiques et environnementales à ce problème.

Dans les systèmes de gestion des boues, après avoir été prétraitées (épaississement, digestion ou conditionnement), les boues sont souvent déshydratées avant tout traitement ultérieur tel que l'incinération, le compostage et/ou la mise en décharge (Water Pollution Control Federation, 1985). Cela permettra de réduire le volume des boues et, par conséquent, le coût du transport (Raynaud, 2010). Cependant, malgré ces efforts, la déshydratation des boues reste un défi majeur, notamment dans la conception des systèmes de traitement des boues, en raison de la nature très complexe des boues d'épuration. De nombreux facteurs influencent les caractéristiques de déshydratation des boues (Karr & Keinath, 1978).

De nombreuses tentatives ont été faites pour identifier un indicateur approprié pour refléter réellement l'efficacité de la déshydratation en établissant des relations entre les facteurs d'influence et les propriétés de déshydratation des boues. En tant que technologie de base du conditionnement et du prétraitement des boues, la floculation peut augmenter l'efficacité de la déshydratation des boues et réduire leurs coûts de transport et d'élimination (Zheng et al., 2014). Par conséquent, l'optimisation de l'efficacité et du coût des flocculants est devenu un problème urgent qui doit être résolu dans le domaine du traitement des boues. Ainsi, un flocculant approprié peut améliorer considérablement la capacité de déshydratation des boues d'épuration.

Afin d'évaluer l'efficacité de la déshydratation, la mesure du temps de succion capillaire (TSC) et la mesure de la résistance spécifique à la filtration (RSF) sont le plus souvent utilisées. Cependant, de tels tests peuvent être complexes et prendre du temps, et un test plus simple est souvent suffisant, au moins comme méthode de sélection préliminaire. Parmi les dispositifs de déshydratation, le test d'égouttage constitue une technologie relativement pas chère, simple et

Introduction générale

efficace. Il permet de faire passer la teneur en matières sèches de 1 % à 9-10 % (Djadel et Belmokhtar, 2019).

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à évaluer les performances de déshydratation de deux boues différentes par évaluation de leur qualité d'égouttage, avec les objectifs suivants :

- Optimiser la teneur en matière sèche du gâteau de la boue, le volume égoutté après un intervalle de temps de 10 min et les matières en suspension résiduelles dans le filtrat récupéré.
- Confirmer l'utilité de l'égouttage des boues en tant qu'outil de sélection du flocculant.

Partie 1 :

Synthèse bibliographique

Chapitre I :

Les boues d'épuration, de la
production à l'élimination

Dans ce chapitre, nous expliquerons d'abord la place des boues de station d'épuration dans le processus de traitement des eaux usées, puis nous allons expliciter les différents types de boues selon leurs origines, ainsi que les différents procédés de leur traitement et élimination. Enfin, nous nous intéresserons aux caractéristiques et facteurs importants qui définissent la qualité des boues.

I.1. Origine des boues

Après l'acheminement des eaux usées vers les stations d'épuration, ces dernières subissent différents traitements qui sont résumés de façon simplifiée dans la Figure I-1. A la sortie de ce traitement, l'eau clarifiée est rejetée en milieu naturel, contrairement aux sous-produits récupérés à chaque étape et qui sont appelés des **boues d'épuration**.

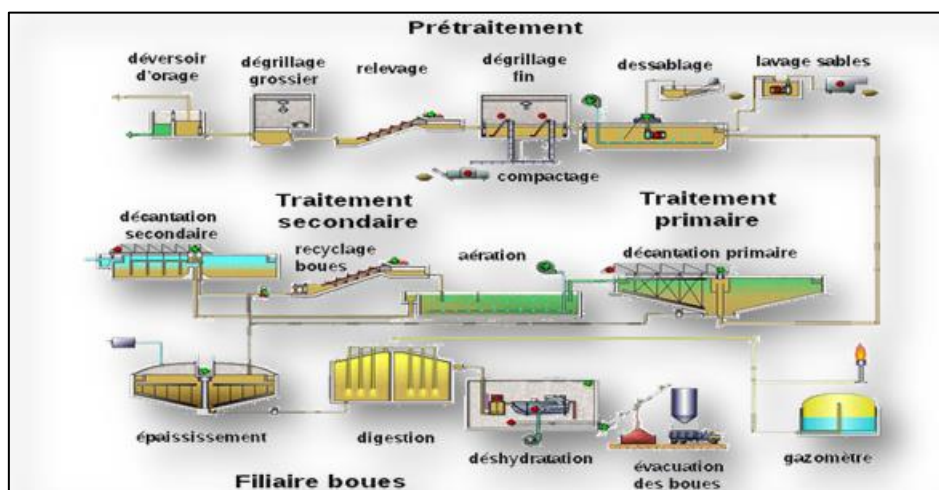


Figure I-1 : Schéma du principe de fonctionnement d'une station d'épuration. Source : <https://franceepuration.com/>

La quantité et la qualité des boues dépendent de l'origine des eaux usées (domestiques, agricoles et/ou industrielle) et des procédés utilisés dans la station d'épuration.

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 (Mazouni et Ramdani, 2017). Elles se caractérisent par de fortes teneurs en matières organiques et substances biodégradables, de germes fécaux et de détergents (Pons et al., 2008).

Chapitre I **les boues d'épuration, de la production à l'élimination**

I.1.2. Boues industrielles

Ces boues sont issues des eaux provenant de différentes usines et installations de fabrication ou de transformation. Elles peuvent contenir des composés organiques et/ou minéraux qui perturbent l'équilibre écologique du milieu récepteur. En fonction de leur origine industrielle, ces eaux peuvent potentiellement inclure des contaminants du type : graisses (industries alimentaires) ; hydrocarbures (raffineries) ; métaux (métallurgie) ; produits chimiques (industries chimiques) et autres rejets industriels (Benkadi et Lezoul, 2017).

I.2. Types de boues

Lors des différents traitements des eaux usées, plusieurs types de boues sont produits, notamment des boues primaires, secondaires et des boues mixtes.

I.2.1. Boues primaires

Les boues primaires sont le résultat d'un processus de décantation dans un clarificateur primaire. Elles ont une teneur importante en matière minérale mais contiennent également de la matière organique. Elles sont constituées de particules larges et/ou denses, ce qui leur procure une excellente aptitude à l'épaississement et à la déshydratation (Canler et Perret, 2013).

I.2.2. Boues secondaires (boues biologiques)

Les boues secondaires sont issues du traitement secondaire, aussi appelé traitement biologique, qui consiste en une oxygénation intensive des micro-organismes aérobies responsables de la digestion des MES organiques non décantables (Sardeing et al., 2005). Ces boues sont constituées de floccs bactériens qui peuvent facilement être retirés de l'eau traitée par une simple décantation. Une partie des boues générée est réintroduite dans le bassin biologique afin de maintenir le ratio pollution/bactérie. Ces boues ont une faible teneur en matières sèches (7 à 10 g/L) et une aptitude à la déshydratation moyenne à passable, contrairement aux boues primaires (S. N. F. Floerger, 2003).

I.2.3. Boues mixtes

Ce type de boue est un mélange de boue primaire et biologique qui est réalisé avant la stabilisation des boues. Les boues mixtes améliorent l'aptitude des boues secondaires à la déshydratation (Addou, 2009).

I.3. Procédés de traitement des boues

Séparées de la filière "eau", les boues sont envoyées vers la filière "boues", où elles subissent différents traitements : de réduction du volume, stockage et élimination, ainsi que la limitation de leur pouvoir fermentescible par une étape de stabilisation (Raynaud, 2010).

I.3.1. L'épaississement

L'épaississement est l'étape initiale du traitement des boues. Il permet d'extraire une partie de l'eau contenue dans les boues afin de réduire leur volume pour les étapes suivantes du traitement. Les méthodes d'épaississement physique fréquemment utilisées sont au nombre de deux (Amorce, 2012) :

- **Epaississement gravitaire** : par sédimentation sous l'effet de la pesanteur.
- **Epaississement dynamique** : par flottation, égouttage ou centrifugation.

Pour les boues activées, l'épaississement dynamique par flottation peut être exploré car les particules en suspension sont de grand diamètre et de faible densité. Les boues primaires, quant à elles, peuvent être concentrées de 2 à 8 fois par épaississement gravitaire (Raynaud, 2010).

I.3.2. La stabilisation

La stabilisation consiste à diminuer autant que possible l'activité biologique des boues, notamment leur fermentation. Ceci peut être réalisé par deux voies différentes (Jardé, 2002) :

- **Biologique** : par la digestion aérobie ou anaérobie des matières organiques ;
- **Chimique** : par le chaulage, qui permet également d'hygiéniser les boues par augmentation de leur pH (> 12), ce qui permet d'éliminer les agents pathogènes.

I.3.3. Le conditionnement

Avant la déshydratation mécanique, les boues doivent être conditionnées afin de favoriser la séparation solide-liquide. Le conditionnement peut être effectué par ajout de (Amorce, 2012) :

- **Floculants minéraux** : tels que le chlorure ou sulfate ferrique et la chaux. Ce type de floculant est appliqué lorsque les boues traitées sont destinées à l'épandage agricole ou au stockage.

- **Floculants organiques** : ils se présentent généralement sous forme de polymères cationiques.

I.3.4. L'égouttage

Avant leur déshydratation, les boues sont déposées sur une table d'égouttage qui se déplace en continu et à travers laquelle un certain volume de filtrat s'écoule par drainage libre sous l'effet de la gravité. Il s'agit du volume d'égouttage. Des bobines fixes reposant sur la toile filtrante sont utilisées pour disperser la boue, permettant à l'eau de s'écouler plus rapidement (Saint-pierre, 2009). Cette technique de table d'égouttage permet d'augmenter la concentration de 10 à 100 g/l et d'obtenir une siccité finale d'environ 8 % (Djadel et Belmokhtar, 2019).

Selon l'entreprise EMO France, experte en solutions globales pour le traitement des boues et des effluents, la table d'égouttage peut être utilisée en :

- **Prétraitement** quand elle est utilisée avec un **filtre à bandes** pour optimiser les opérations et les performances du filtre.
- **Prétraitement** avant un **filtre à plateaux** ou une **centrifugeuse** pour diminuer la taille des équipements.
- **Réducteur du volume** des boues avant un processus de **digestion anaérobie** pour réduire la taille du digesteur.

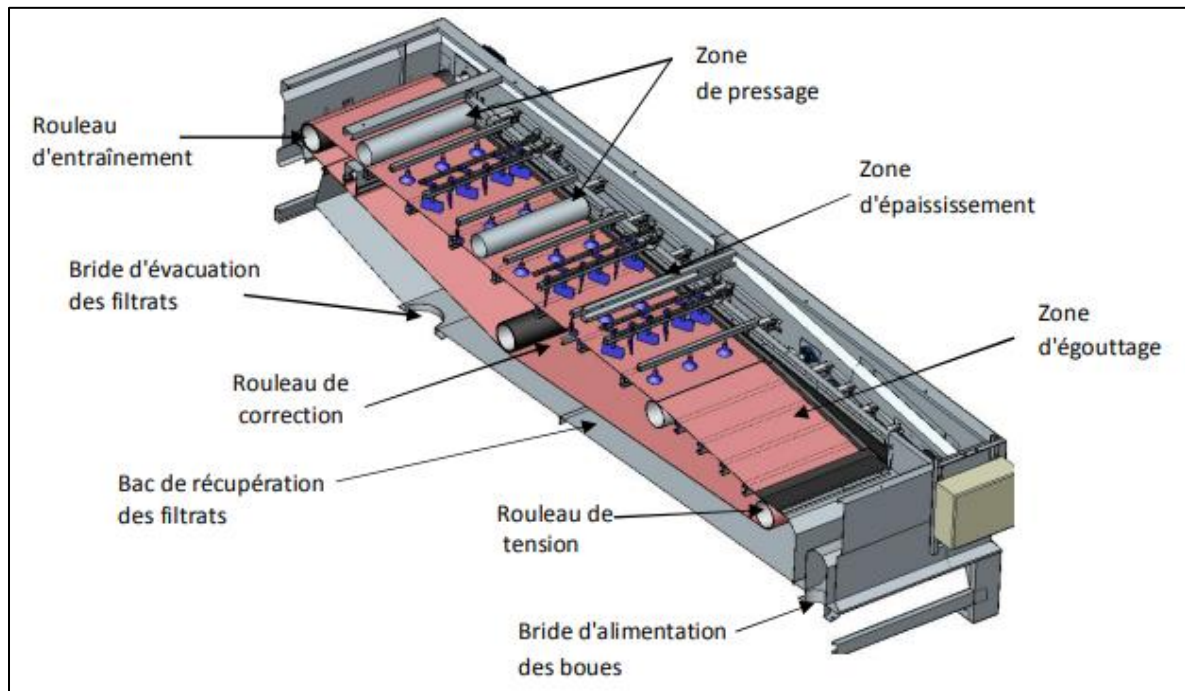


Figure I-2 : Principe de fonctionnement d'une table d'égouttage. Source : <https://www.emo-france.com/>

I.3.5. La déshydratation

La déshydratation est la dernière étape de traitement des boues au cours de laquelle une grande partie de l'eau est éliminée. En effet, à l'issue de cette étape, les boues passent d'un état liquide à un état semi-solide, ce qui facilitera leur transport et élimination.

Selon la nature du procédé, la déshydratation peut être :

- **Naturelle** : comprenant les méthodes pour lesquelles l'humidité est éliminée par évaporation, gravité ou par drainage induit. Il est à noter que les processus naturels sont moins contrôlables que les processus mécaniques (Das, 2013).
- **Mécanique** : réalisée par le biais d'équipements. Les plus fréquemment utilisés sont : la centrifugation, les filtres à bandes, et les filtres presse (ou filtres à plateaux) présentant des capacités de déshydratation (siccité) de 20, 18 et 30 % (ou plus) respectivement (Breton, 2018).

a. La centrifugation

Elle est comparable à une sédimentation accélérée qui permet la séparation solide-liquide par la force centrifugeuse. Bien qu'il s'agisse d'un dispositif de déshydratation à consommation énergétique importante, ces systèmes ne requièrent pas un espace extensif, en plus d'être fiables

et faciles à utiliser. Leur flexibilité permet de faire face aux différents changements des conditions de boue (Saint-pierre, 2009).

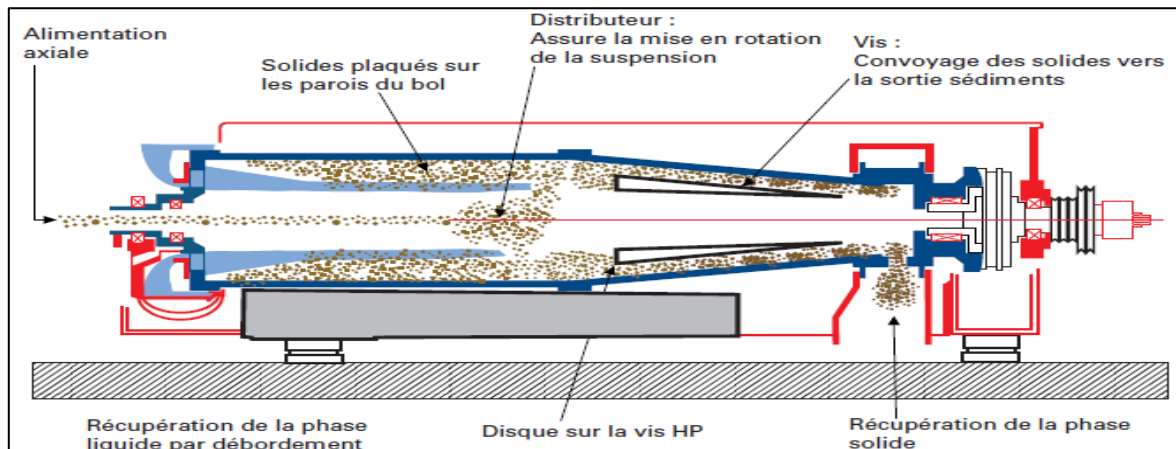


Figure I-3 : Schéma d'une centrifugeuse haute pression. Source : <https://www.suezwaterhandbook.fr/>

b. Les filtres presse (filtres à plateaux)

C'est un procédé de déshydratation qui introduit l'application d'une pression mécanique sur la boue de sorte qu'elle libère un maximum d'eau. Ce système est constitué de plaques encastrées verticalement qui sont pressées les unes contre les autres, permettant ainsi le passage de l'eau interstitielle à travers un filtre, et produisant une boue avec une siccité assez élevée. Ce système de déshydratation est assez répandu bien qu'il ait un coût d'investissement élevé et nécessite un entretien régulier car il fonctionne en discontinu (Pradel et al., 2013).

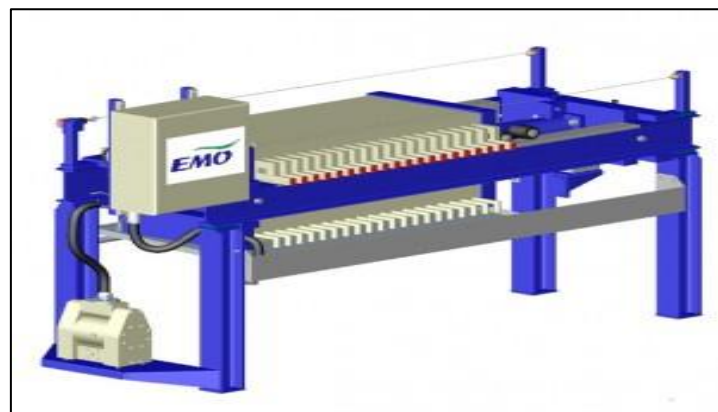


Figure I-4 : Filtre presse à plateaux. Source : <https://www.emo-france.com/>

c. Les filtres à bandes

Dans ce type d'appareillage, la boue est comprimée par des rouleaux entre deux bandes de toile dans le cadre d'un filtrage à pression progressive. La toile doit être nettoyée une fois la boue

enlevée afin de conserver sa porosité. Bien qu'il s'agisse d'une technique à fonctionnement continu, facile à exploiter, et avec des coûts d'investissement et d'exploitation modérés, cette technique est de plus en plus abandonnée car elle produit des boues à une faible siccité en sortie et nécessite une quantité importante d'eau de lavage (Tazi, 2018).

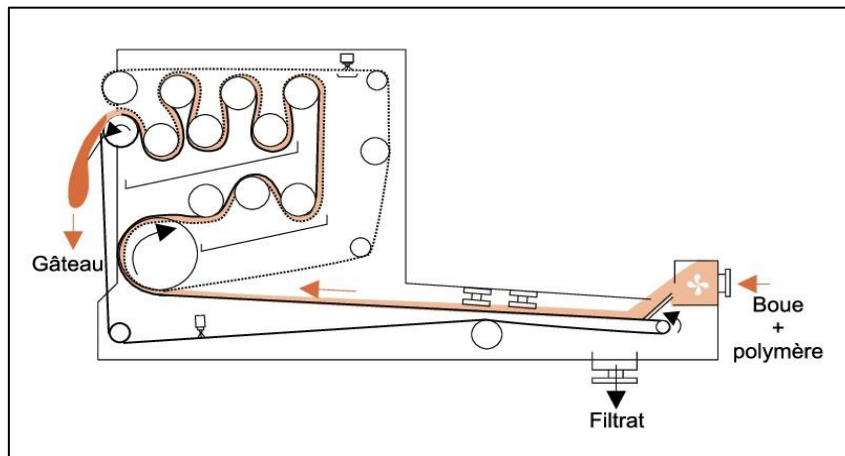


Figure I-5 : Filtre à bandes. Source : (Baudez et al., 1998)

I.4. Procédés de valorisation et d'élimination des boues

La destination finale des boues connaît trois filières principales, différentes les unes par rapport aux autres selon la qualité de la boue et sa charge polluante. Ces principales issues sont la valorisation agricole, la valorisation énergétique par incinération et l'enfouissement.

I.4.1. La valorisation agricole

Les boues d'épuration sont riches en éléments fertilisants (azote, phosphore, matière organique, etc.) ce qui leur permet d'être valorisées en agriculture en les utilisant comme substrat nutritif sur les sols inertes, érodés ou faiblement végétalisés (Amorce, 2012).

Cependant, cette valorisation est limitée par plusieurs contraintes, notamment, la problématique de présence des éléments traces métallique (ETM), des polluants émergents et des bactéries pathogènes dans les boues (Pradel et al., 2013).

I.5. La valorisation énergétique ou incinération

Les boues peuvent subir deux types d'incinération (Amorce, 2012) :

- **Incinération spécifique** : elle accepte uniquement les boues et est réalisé sur le même site que la station d'épuration dans des fours spécifiques.

Chapitre I les boues d'épuration, de la production à l'élimination

- **Co-incinération** : les boues sont combinées avec d'autres déchets comme les ordures ménagères, et traitées dans des sites de traitement thermique des déchets non dangereux.

Une déshydratation (partielle) des boues avant leur traitement permet d'augmenter leur pouvoir calorifique et réduit les quantités à traiter.

I.6. Mise en centre d'enfouissement des déchets

La mise en décharge ou l'enfouissement n'est autorisé que dans le cadre de règles spécifiques de conformité des boues qui devront être strictement appliquées (Pradel et al., 2013). Pour le cas de l'Algérie, à ce jour, il n'existe aucun cadre réglementaire pour l'utilisation de ces boues.

I.7. Composition et caractéristiques des boues

Les boues sont un ensemble hétérogène de particules, micro-organismes, colloïdes et de cations dont la composition varie selon leur origine et âge (Jorand et al., 1994).

I.7.1. Teneur en eau

Toutes les eaux contenues dans les boues ne se comportent pas de la même manière d'un point de vue physico-chimique. En effet, les forces de liaison entre l'eau et les matières solides définissent le type de mouillage. D'après Vesilind (1994), les différents types d'eau dans la boue sont :

- **L'eau libre** : qui est très peu liée aux solides et peut être séparé par gravité. Elle constitue la majorité d'eau dans une boue liquide.
- **L'eau interstitielle** : emprisonnée dans les floes, elle se caractérise par une faible énergie de liaison et peut être éliminée par l'application d'énergie (déshydratation mécanique).
- **L'eau vicinale** : fortement absorbée par les particules de boues par des liaisons hydrogènes de courtes distances mais assez puissantes près de la surface. Ne s'élimine que par déshydratation électro-osmotique ou le séchage thermique.
- **L'eau d'hydratation** : liée aux particules de boue par une forte liaison chimique et ne peut être éliminée que par séchage thermique à une température supérieure à 105°C.

Chapitre I les boues d'épuration, de la production à l'élimination

I.7.2. Les matières en suspension (MES)

Les particules solides minérales et/ou organiques en suspension dans l'eau sont appelées MES. Elles peuvent être récupérées par une simple filtration. Elles constituent une mesure clé pour déterminer le niveau de pollution d'un effluent urbain ou industriel.

I.7.3. Matière sèche totale ou siccité

Les matières sèches totales représentent les MES ainsi que les matières dissoutes. Elles peuvent être récupérées par évaporation d'un échantillon (à 105 °C). Le pourcentage de matières sèches dans une boue représente sa siccité, critère physique de grande importance pour définir la consistance des boues d'épuration et savoir si elles peuvent être transportées ou valoriser.

Selon sa siccité, une boue peut être (Ladjel et Abbou, 2014) :

- **Liquide** : 1 - 5% MS ;
- **Egouttée** : 6 - 8% MS ;
- **Pâteuse** : 10 - 30% MS ;
- **Séchée** : 60 - 80% M

Chapitre II :

Conditionnement et déshydratation des boues d'épuration

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord décrire les processus de coagulation/floculation, puis nous allons nous intéresser aux différents polymères intervenant dans le conditionnement des boues et leurs principales caractéristiques. Ensuite, nous expliciterons l'influence de chaque paramètre intervenant dans la déshydratation et enfin, nous nous intéresserons aux différents critères d'évaluation de l'aptitude à la déshydratation

II.1. La théorie de la coagulation/floculation

La coagulation/floculation est l'une des techniques les plus couramment appliquées pour obtenir une séparation solide-liquide efficace dans le traitement des eaux et des boues. En effet, cette technique facilite l'élimination des MES en les recueillant sous forme de floccs qui sont par la suite séparés par décantation ou par filtration.

II.1.1. Phénomène de coagulation (théorie de Stern)

La coagulation est le phénomène de déstabilisation d'une solution contenant des particules en suspension. On y parvient en ajoutant des produits chimiques (coagulants) qui réduisent les forces qui tendent à maintenir les particules séparées.

Dans le cas des effluents, ceux-ci comportent des colloïdes chargés, pour la plupart, négativement (Zodi, 2012). Les ions positifs présents dans l'eau brute (ou ajoutés) s'attirent à la surface des colloïdes et établissent une distribution spatiale des ions autour, produisant ainsi une double couche, comme montré sur la Figure II-1 :

- L'une chargée **positivement** et fortement adhérente à la surface du colloïde appelée **couche de Stern** ;
- Tandis qu'une autre couche constituée d'un nuage d'ion diffus dans la phase mobile et qui est appelée la **couche diffuse**.

La différence de potentiel entre cette double couche et le fluide environnant est le **potentiel Zeta** de la particule (Saint-pierre, 2009). La coagulation consiste à annuler ce potentiel Zeta en ajoutant un agent de **coagulation chargé positivement**. Celui-ci permet de neutraliser les charges négatives à la surface des particules et annuler, donc, les forces de Vander Waals qui leur permettraient de se répulser des unes des autres et d'être en suspension.

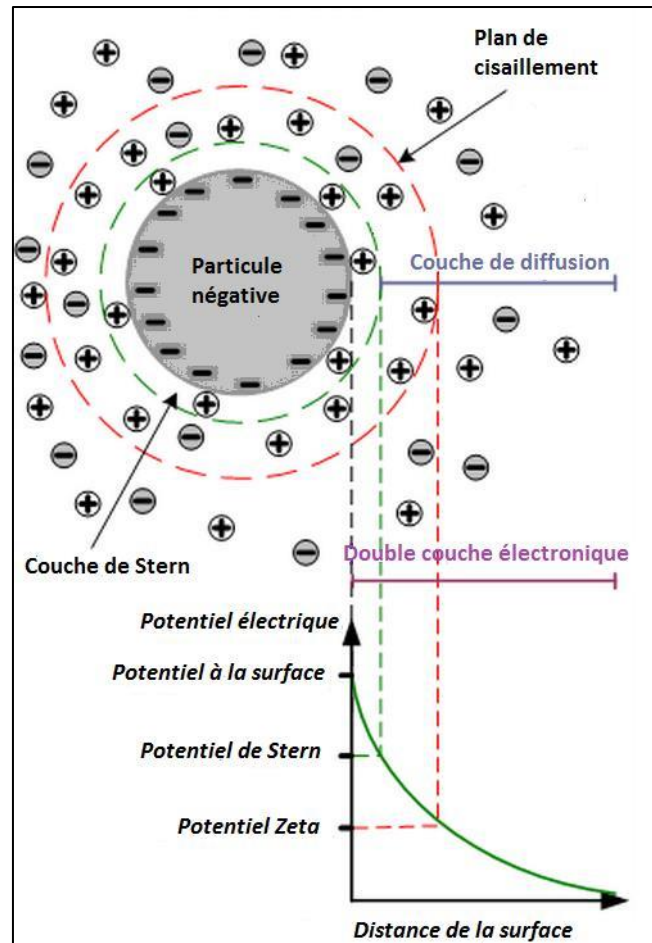


Figure II-1 : Schéma de la double couche électrique (couche de STERN). Source : <https://docplayer.fr/199168290-Auto-assemblage-des-nanotubes-de-carbone-par-dielectrophorese.html>

II.1.2. Phénomène de floculation

Le phénomène de floculation est la deuxième étape qui suit la coagulation. Une fois les colloïdes déchargés, la floculation va permettre l'agglomération des particules en micro-flocs puis en flocs pouvant être décantés (Figure II-2). Les collisions se produisent par :

- **Mouvement brownien** : peu probable, sauf pour les suspensions chargées ;
- **Agitation du milieu** : qui doit être suffisante pour permettre un mélange homogène tout en préservant les flocs créés (Hyrycz et al., 2022).

La floculation peut être optimisée par l'ajout d'**agents floculants** présentés dans ce qui suit.

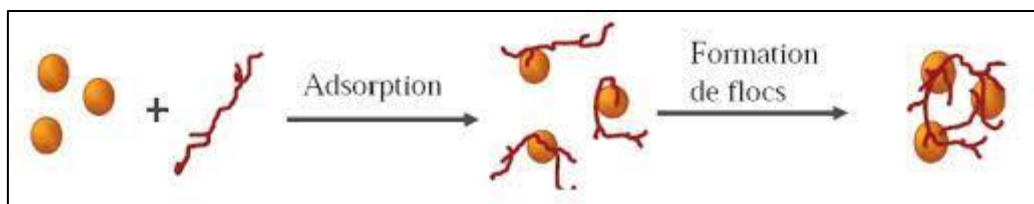


Figure II-2 : Schéma de formation des floccs par adsorption sur la chaîne de flocculant
Source : <http://biblio.univ-antananarivo.mg/>

II.2. Les polymères (floculants organiques)

Les polymères désignent une grande variété de composés macromoléculaires naturels ou synthétiques, solubles dans l'eau, qui ont la capacité de déstabiliser les MES des effluents et/ou d'augmenter leur floculation.

Il existe une large gamme de polymères utilisés dans le traitement des boues, adaptés à chaque équipement et à chaque type de boue. Ils présentent de bonnes performances de déshydratation en raison de la taille importante de leurs floccs, créant ainsi des espaces vides permettant l'évacuation de l'eau (Floerger). Ce sont des poly-électrolytes, contenant certains groupes fonctionnels le long du squelette du polymère. Ils se caractérisent par leur nature ionique (cationique, anionique et non ionique), leur poids moléculaire, leur densité de charge et leur forme physique (Hyrycz et al., 2022).

II.2.1. La charge du polymère

La charge délivrée par le floculant sera déterminée en fonction du type de particules à capturer présentes dans la boue (Saint-pierre, 2009), et donc par le type de boue (biologique, digérée, physico-chimique, minérale, ...). On distingue :

- **Les polymères cationiques** : qui sont utilisés pour les **boues biologiques** ou **mixtes**, car ils sont adaptés pour capter les molécules organiques (Saint-pierre, 2009). Toutefois, et grâce à leur double fonction (coagulation/floculation), ils déstabilisent aussi les particules fines dans les eaux usées sont généralement chargées négativement
- **Les polymères anioniques** : qui sont utilisés pour les **boues minérales** car ils sont efficaces pour capter les molécules minérales (Saint-pierre, 2009). Ils présentent la pire déshydratation sur les boues biologiques en raison des répulsions électrostatiques avec les particules de surface chargées négativement dans les eaux usées (Wei et al., 2018).

Chapitre II Conditionnement et déshydratation des boues d'épuration

- **Les polymères non-ioniques** : Selon Lee et Liu (2001), un polymère non ionique génère un effet de pontage important en raison de son poids moléculaire très élevé et présente donc exceptionnellement une meilleure déshydratation qu'un polymère cationique.

II.2.2. La densité de charge

Il s'agit du pourcentage de charge positive (+) ou de charge négative (-) nécessaire pour obtenir la meilleure floculation avec le plus petit dosage.

II.2.3. Le poids moléculaire

Il correspond à la longueur de la chaîne du polymère. Par convention, les polymères sont considérés comme : polymère à poids moléculaire faible ($< 10^5$ g/mol), moyen ($10^5 - 10^6$ g/mol) ou élevé ($> 10^6$ g/mol) (Bolto et Gregory, 2007).

II.2.4. La forme physique

Les applications industrielles des polymères dépendent de leur forme commerciale : émulsion, liquide ou poudre. Cette dernière présente l'avantage d'avoir une concentration très élevée en matière active (c'est-à-dire, la partie du polymère qui réagit réellement avec le milieu) qui est de l'ordre de 90 %, contre seulement 40 % dans le cas d'une émulsion (Bauer et Kim, 2021).

II.3. Les facteurs impactant la déshydratation des boues

La déshydratation des boues résiduaire est influencée par de nombreux facteurs. Certains d'entre eux sont en relation avec les caractéristiques des boues elles-mêmes, tandis que d'autres sont des facteurs extrinsèques, comme l'ajout de polymère à la suspension. Parmi les facteurs les plus importants, on retrouve :

II.3.1. La taille des particules

La superficie d'une masse de boue donnée augmente avec la diminution de la taille des particules. L'augmentation de cette superficie génère (Das, 2013) :

- Une plus grande répulsion électrique entre les particules de boue en raison d'une plus grande surface chargée négativement.
- Une plus grande résistance de frottement au mouvement de l'eau.

Chapitre II Conditionnement et déshydratation des boues d'épuration

- Une attraction de l'eau plus forte à la surface des particules en raison d'un plus grand nombre de sites d'adsorption.

En général, les boues primaires ont une taille de particules plus grande que les boues secondaires. Le traitement des boues avant la déshydratation par digestion aérobie ou anaérobie diminue également la taille moyenne des particules. Pour ces raisons, les boues digérées sont plus difficiles à déshydrater que les boues brutes (Das, 2013). Enfin, la taille et la stabilité des floccs peuvent être affectées par les différents changements dans la composition du milieu (Krapf, 2012).

II.3.2. Le pH des boues

Le pH affecte la charge de surface des particules de boue et influence également le type de polymère nécessaire pour un bon conditionnement (Novak et al., 1975):

- Si la boue a un **pH élevé**, les **polymères anioniques** sont les plus utiles.
- Si la boue a un **pH neutre** ou **légèrement acide**, c'est les **polymères cationiques** qui sont les plus adaptés dans ce cas.

II.3.3. 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 (Arinaitwe et Pawlik, 2013). Les chaînes longues forment plus facilement des liens de pontage entre les particules, et les floccs formés sont plus grands (Sung et al., 2018). Cependant, elles ont tendance à s'enrouler en floccs, ce qui signifie que leur efficacité finale est difficile à prévoir (Lee et Schlautman, 2015).

II.3.4. La dose du polymère

Il existe un intervalle de dosage optimal pour chaque flocculant donnant une efficacité maximale de déshydratation (Krapf, 2012). Une concentration trop élevée peut inverser le processus de floculation et détériorer la capacité de déshydratation de la boue (Boráň et al., 2010). Il est donc nécessaire de déterminer les limites de la "dose optimale" pour obtenir les résultats les plus probants. L'amélioration de l'efficacité du processus de floculation et du degré de déshydratation des boues reste un défi majeur dans de nombreuses études (Hyrycz et al., 2022).

II.4. Les critères d'évaluation de l'aptitude à la déshydratation

Des analyses statistiques sur des boues provenant de diverses stations d'épuration sont utilisées dans plusieurs articles de la littérature scientifique pour explorer le problème de déshydratation des boues de manière plus large. L'objectif est d'essayer de relier une ou plusieurs caractéristiques physico-chimiques des boues à un critère d'aptitude à la déshydratation.

Des essais en laboratoire sont effectués pour évaluer l'efficacité d'un polymère dans la déshydratation des boues. Parmi les principaux essais utilisés :

II.4.1. La Résistance Spécifique à la Filtration (RSF)

Ce test a été introduit en 1956 par Coackley et Jones. Il mesure la résistance des boues au retrait de l'eau à travers un milieu poreux, soit par le vide, soit par la pression. Plus la RSF est élevée, plus il est difficile de déshydrater les boues, et vice versa (Karr et Keinath, 1978). C'est un paramètre important pour évaluer la qualité de filtration des boues (To et al., 2016). La RSF varie en fonction de la pression appliquée, de la surface du filtre, de la taille des pores et de la viscosité du liquide, ce qui rend sa mesure et sa comparaison plus compliquées (To et al., 2016).

II.4.2. Le temps de succion capillaire (CST)

La théorie du CST a été développée pour la première fois par Baskerville et Gale en 1968 comme substitut au test RSF et a été de plus en plus populaire pour diverses applications et disciplines. Le CST est le temps nécessaire pour qu'un certain volume de filtrat extrait de la boue est aspiré dans le papier buvard par la force capillaire (Vesilind, 1988). Un CST court (< 20 s), indique une boue facilement déshydratable, alors qu'un CST long est représentatif d'une boue mal déshydratée (To et al., 2016).

II.4.3. La siccité après centrifugation

Outre les dispositifs de filtration, la centrifugation fonctionne sur un principe différent et est de plus en plus populaire en raison de sa capacité à produire un gâteau avec une siccité élevés (To et al., 2016). Des tests d'estimation de sa performance ont également été développés et semblent fournir une bonne corrélation avec les performances des prototypes.

II.4.4. L'indice d'égouttage

Avec une vision plus industrielle, lors de l'utilisation des filtres à bandes, la filtration a lieu en grande partie sur des tables d'égouttage situées en amont (Raynaud, 2010). Subséquemment, une méthode d'évaluation de la déshydratation par égouttage a été proposée par Ginisty et al. (2012). Les résultats obtenus en laboratoire ont été reproductibles, faciles à prévoir et ont produit des résultats qui peuvent être appliqués aux performances des tables d'égouttage industrielles, et donc qui peuvent être utilisés pour caractériser la floculation (Olivier et al., 2013).

Un bon processus d'égouttage nécessite la réalisation de trois objectifs (Ginisty et al., 2012) :

- Un facteur de teneur en **matières sèches élevé** (noté P_1) qui caractérise l'augmentation de la siccité des boues. Il peut être évalué par le rapport entre la siccité de la boue épaissie S_f et la teneur initiale en matières sèches de la boue S_i :

$$P_1 = \frac{S_f}{S_0}$$

- Une **cinétique** de libération du filtrat **rapide**. Elle peut être évaluée par la mesure du temps nécessaire pour récupérer 90 % du volume totale du filtrat. Ce temps a été adimensionné par un paramètre de dimensionnement du filtre à bande (60 s) pour les machines industrielles classiques comme suit :

$$P_2 = \frac{t_{90}}{60}$$

- Un **taux de capture élevé** qui se caractérise par une faible concentration en MES dans le filtrat. Noté P_3 , ce paramètre a été défini comme étant le rapport entre la concentration résiduelle de MES dans le filtrat et la teneur initiale en matière sèche de la boue :

$$P_3 = \frac{MES_r}{S_0}$$

Un **bon indice d'égouttage** E_g se caractérise par une valeur élevée de P_1 et des valeurs faibles de P_2 et P_3 . C'est pourquoi l'équation suivante a été considérée pour définir l'indice d'égouttage :

Une étude réalisée par Ginisty et al. (2012) a permis de définir les indices α et β en analysant 92 expériences réalisées sur 5 boues différentes (activées, digérées, traitement d'adduction d'eau, forage et synthétique minérale), floculées par des polymères de nature et de dosage différents.

Chapitre II Conditionnement et déshydratation des boues d'épuration

L'analyse des tests d'égouttage a conduit aux valeurs de 3 pour α et 0,25 pour β . Afin de limiter l'intervalle de variation, l'expression de l'indice d'égouttage a été modifiée comme suit :

Cependant, cette relation n'est valable que pour les critères suivants :

$$3 < P_1 < 10 ; \quad t_{60} < 60 \text{ s, correspondant à } P_2 < 1 ; \quad P_3 < 0,01.$$

La compilation de toutes les données permet de spécifier les cas limites regroupés dans le tableau ci-dessous. Il en ressort qu'un drainage est bon lorsque l'indice d'égouttage est compris entre 6 et 10,5.

Tableau II-1 : Correspondance des valeurs de l'indice d'égouttage

Qualité d'égouttage	Valeur de E_g	Caractéristiques de l'égouttage
Egouttage rejeté	$E_g < 2,2$	Mauvaise cinétique d'égouttage
Egouttage moyen	$2,2 < E_g < 6$	1 ou 2 paramètres non acceptés
Bon égouttage	$6 < E_g < 10,5$	Toutes les valeurs des paramètres sont acceptées
Egouttage limite	$10,5 < E_g < 12,3$	A analyser soigneusement selon le cas
Egouttage rejeté	$E_g > 12,3$	Pas de floculation

Partie 2 :

Partie expérimentale

Chapitre III :

Matériel et méthodes

Cette partie se concentre sur la description des produits et réactifs employés, ainsi que les instruments expérimentaux et les méthodologies analytiques utilisés lors de l'étude de l'effet du conditionnement des boues par les polymères cationiques sur la floculation et la déshydratation des boues.

III.1. Matériel utilisé

Le matériel utilisé est regroupé dans le tableau suivant :

Tableau III-1 : Appareils utilisés dans ce travail

Appareil	Marque	Fonction
Etuve	Memmert	Séchage des échantillons
pH-mètre	HANNA HI2211	Ajustement du pH
Jar-Test	VELP SCIENTIFICA	Floculation des boues
Pompe	Knf Neuberger	Application du sous vide lors de la filtration
Balance de précision	KERN ABJ-NM/ ABS-N	Pesée de la masse de polymères, boues et filtres
Chronomètre	-	Contrôler le temps d'agitation et d'égouttage

III.2. Produits et réactifs

Les produits essentiels de l'étude, leur préparation et caractérisation sont présentés dans cette section.

III.2.1. Echantillonnage des boues

Les boues doivent être échantillonnées de manière représentative. Pour ce faire, l'échantillonnage a été effectué sur 2 stations différentes, celle de Béni-Messous (zone urbaine) et celle de Réghaïa (zone industrielle).

a. Echantillon de la station de Béni-Messous

Le premier échantillonnage de boues résiduelles a été obtenu à partir de la station d'épuration de Béni-Messous qui reçoit les effluents urbains de la zone de l'Ouest d'Alger.

Cette station a une capacité de traitement de 250.000 équivalents-habitants (EH) et traite environ 50 000 m³ d'eaux usées par jour. Elle est composée d'une série d'opérations unitaires survenant dans la procédure de traitement des boues activées à charge moyenne. Pour ce qui est de la filière boue, elle est constituée de :

- 02 épaisseurs,
- 02 bassins de stabilisation des boues par apport d'oxygène supplémentaire avec 02 aérateurs de surface chacun,
- Un conditionnement chimique par ajout de polymère,
- Le passage à travers deux chaînes de déshydratation avec deux filtres à bandes.

Pour la réalisation des expériences, les échantillons de boue ont été prélevés juste avant le point d'injection du polymère correspondant à la sortie du bassin de stabilisation des boues mixtes.

b. Echantillon de la station de Réghaïa

Le second échantillonnage de boues résiduelles a été obtenu à partir de la station d'épuration de Réghaïa qui traite des effluents domestiques mais majoritairement industriels de la zone de l'Est d'Alger. Cette station est de type boues activées à faible charge, et a une capacité de traitement de 400.000 équivalents-habitants (EH) et traite environ 80 000 m³ d'eaux usées par jour. La filière de traitement des boues est constituée de :

- 02 épaisseurs,
- Une stabilisation chimique par chaulage,
- 02 bâches de stockage de boues mixtes,
- Un conditionnement chimique par ajout de polymère,
- Le passage à travers deux chaînes de déshydratation avec deux filtres à bandes.



(a)



(b)

Figure III-1 : Etat physique des boues : (a) Beni Messous (b) Réghaïa

Pour la réalisation des expériences, les échantillons de boue ont été prélevés de la bache de stockage des boues mixtes.

Les contenants utilisés pour conserver les échantillons sont des bouteilles en plastique de 5 L. Ils ont été stockés à 4°C. Les analyses ont été réalisées dans les 5 jours qui suivent afin d'éviter l'évolution de la boue dans le temps. Cette approche permet de limiter l'activité biologique des boues dans le but d'obtenir des résultats suffisamment reproductibles dans le temps (Raynaud, 2010).

III.2.2. 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 MES, pH et couleur) à l'état initial.

a. Mesure de la siccité S

Pour rappel, la siccité représente le pourcentage massique de la matière sèche d'un échantillon. Celle-ci est calculée par la méthode du résidu sec : un échantillon uniforme de masse connue est séché dans une étuve à 105°C jusqu'à poids constant (méthode 2540B dans APHA, 1999).

b. Mesure des MES

Pour la mesure des MES, un échantillon de boue uniforme est filtré sous-vide (Buchner) (Figure III-2). Le filtre, de masse initiale connue, est séché à l'étuve jusqu'à un poids constant entre 103 et 105°C. L'augmentation du poids du filtre représente le total des MES (méthode 2540D dans APHA, 1999).



Figure III-2 : Appareillage de filtration pour mesure des MES

c. Mesure du pH

Un pH-mètre avec une électrode en verre a été utilisé pour mesurer le pH des échantillons obtenus. Pour faire baisser le pH, nous avons utilisé une solution 1 N d'acide chlorhydrique (37%) de la marque Riedel- de Haën.

III.2.3. Choix du polymère

Trois types de polymères différents ont été utilisés dans ce travail, obtenus de la part de 3 fournisseurs différents (SNF Floerger, Chemipol et Tesis S.L.). Ce sont des polymères cationiques vendus sous forme de poudre. Les caractéristiques les plus importantes de ces polymères, d'après les informations recueillies auprès de 3 fournisseurs parmi 6 fournisseurs à l'échelle mondiale, sont précisées dans le Tableau III-2. Les fiches techniques de chaque polymère sont en Annexes : Fiches techniques.

Tableau III-2 : Propriétés des polymères (cationiques)

Compagnie	Polymère	Poids moléculaire	Densité de charge
SNF Floerger	FO 4650 SH PS	Haut	Forte
Chemipol	Chemifloc CH 87	Haut	Très forte
Chemipol	Chemifloc CV 300	Très haut	Moyenne à forte
Tesis S.L.	Tefloc FC 4606	Très haut	Moyenne à forte

III.2.4. Préparation du polymère

Les polymères en poudre sont communément préparés à une concentration allant de 2 à 4 g/L maximum, en les laisser mûrir pendant environ 1h à 1h30 avant de les utiliser (SUEZ).

Les polymères utilisés dans cette étude ont été préparés par dilution à 3 g/L chacun et ont été conservés à 4 °C pendant maximum 24 h. Pour répondre aux exigences opérationnelles à l'échelle machine, le polymère doit être préparé en utilisant la même eau (potable ou industrielle). L'eau doit être en agitation lors de l'ajout du polymère brut pour bien l'homogénéiser en raison de son caractère très visqueux.

Le volume du polymère V_p à injecter lors de l'étape de floculation est déterminé selon la formule suivante :

$$V_p = \frac{D \times V_B \times MS}{1000 \times [P]} \quad [\text{mL}] \quad \text{Eq.III.1.}$$

Avec :

- **D** : la dose du polymère conseillée [kg de polymère / tonne de matière sèche de la 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.3.Choix des facteurs d'optimisation

Le point de départ d'une série de tests servant à caractériser une boue en termes de performance de floculation et de déshydratation est celui de déterminer les différents paramètres et critères d'évaluation les plus représentatifs pour lesquels la procédure d'essai fonctionne le plus efficacement. Les paramètres sélectionnés sont (Olivier et al., 2013) :

- Le **pH**, en premier lieu, puisque chaque polymère a une gamme optimale de pH dans laquelle l'action s'avère plus efficace ;
- La **dose du polymère**, car il existe une dose optimale pour tout conditionneur, compte tenu de l'efficacité de la déshydratation et des enjeux économiques ;
- Le **poids moléculaire** du polymère, car la taille des floccs formés dépend majoritairement de la longueur de la chaîne du polymère. De plus, les polymères à poids moléculaire élevé sont ramifiés et coûtent donc plus cher que les polymères linéaires.

III.4.Plan d'essais

Les sections suivantes décrivent l'appareillage, la méthodologie et les considérations menant à une procédure d'essai satisfaisante.

Deux séries d'expériences distinctes ont été conçues pour chaque boue afin d'étudier l'effet des différents paramètres sur la déshydratation et sur le type des boues.

III.4.1. Jar-Test

L'appareil utilisé pour évaluer les performances d'un polymère particulier est le dispositif connu sous le nom de Jar-Test (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Il consiste essentiellement

en un support d'agitateurs, entraînés par un moteur, sous lequel sont disposés des béchers en verre de 1 L. Les essais en Jar-Test sont une simulation à petite échelle de ce qui se passe lors de la floculation des boues en station d'épuration.

Avant les tests, les échantillons de boue de 400 mL ont été amenés à la température ambiante et ensuite homogénéisés pendant 1 min sous agitation rapide à 90 tr/min. Sous ces mêmes conditions, la variation du pH initial de la boue est effectuée par ajout d'acide chlorhydrique.

Ensuite, et avec la même vitesse d'agitation, la dose requise du polymère est ajoutée à la boue pendant 1 à 3 secondes. Cette vitesse est maintenue pendant environ 5 secondes, ce qui garantit un bon mélange du réactif et de la suspension. Par la suite, l'agitation est poursuivie pendant 30 secondes à une vitesse de 40 tr/min pour observer la formation des floccs (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La vitesse et la durée d'agitation ont été choisies arbitrairement à partir des études précédentes.



Figure III-3 : Banc de Jar-Test



Figure III-4 : Floccs formés dans les boues conditionnées

III.4.2. Egouttage des boues

Idéalement, un essai en laboratoire pour évaluer l'efficacité d'un produit chimique de conditionnement devrait simuler les conditions physiques qui se produiront dans le processus de déshydratation à grande échelle. Cependant, de tels tests peuvent être complexes et prennent du temps. Un test plus simple est souvent suffisant, au moins comme méthode de sélection préliminaire.

Lors de la présente étude, la déshydratation de la boue a été évaluée en utilisant une cellule d'égouttage avec une toile d'égouttage de 15 fils/cm² fixée sur un entonnoir. Le filtrat est recueilli dans une éprouvette graduée de manière à ce que les volumes puissent être facilement lus, comme montré sur la figure ci-contre.



Figure III-5 : Dispositif d'égouttage de la boue

III.4.3. Calcul des grandeurs d'évaluation de la déshydratation

Afin de pouvoir mesurer la qualité de l'égouttage réalisé, nous nous sommes inspirés du protocole d'acquisition des polymères cationiques proposé par la SEAAL aux stations d'épuration, ainsi que de l'indice d'égouttage proposé par Ginisty et al. (2012).

Nous allons évaluer la performance de l'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.

Est déterminé ainsi :

- Le **facteur de concentration** F qu'on cherche à **maximiser** pour caractériser le taux de concentration de la boue, il se calcule comme suit :

$$F = \left(\frac{S_f}{S_i} \right) \quad [\%] \quad \text{Eq. III.2}$$

- 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_i et MES_r s'effectuent suivant les méthodes décrite dans (§ III.2.2), et le volume égoutté selon la méthode décrite dans (§ III.4.2)

III.5. Plan d'expérience (D-optimal)

Pour ce travail, nous avons utilisé la méthode de surface de réponse pour estimer les effets principaux des facteurs du modèle sur les différents critères d'évaluation. La surface de réponse peut regrouper toutes les différentes réponses par le biais d'approches d'optimisation sophistiquées, qui conduisent finalement à la détermination des points où le plan répond à tous les critères avec un coût minimal (Anderson et Whitcomb, 2016).

Parmi les différentes méthodes de surface de réponse, nous avons choisi la méthode D-optimale, une méthode qui présente certains avantages par rapport aux autres méthodes de surface de réponse (Kuram et al., 2013) :

- Elle donne un plus petit nombre d'expériences ;
- Elle peut traiter les facteurs qualitatifs inclus dans le plan d'expérience ;
- Elle est applicable à l'expérimentation factorielle de types mixtes et de niveaux mixtes.

Contrairement au plan d'expériences classique, la méthode D-optimale cherche à maximiser le déterminant $[X^T X]$ de la matrice X , fournissant ainsi la meilleure estimation des paramètres du modèle. Ici, X est la matrice du plan d'expériences avec n lignes représentant les expériences du plan et p colonnes représentant les facteurs du modèle. De plus amples informations sur la méthode D-optimale sont disponibles dans la littérature (Chang, 1994 ; Triefenbach, 2008).

La planification expérimentale et les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel MODDE 6.0, l'interface du logiciel est illustrée dans la Figure III-6.

File Edit View Design Worksheet Analysis Prediction Show Window Help

Facteur de concn

Factors

	Name	Abbr.	Units	Type	Use	Settings	Transform	Prec.	MLR Scale	PLS Scale
1	pH	pH		Quantitative	Controlled	2,5 to 6,5	None	Free	Orthogonal	Unit Variance
2	Dose	Dos	Kg/ T MS	Quantitative	Controlled	2 to 6	None	Free	Orthogonal	Unit Variance
3	Type de polymère	Typ		Qualitative	Controlled	ChemiflocCV300; FO4650SHPS; ChemiflocCH87; TeflocFC4606PB	add	a new	factor	

Responses

	Name	Abbr.	Units	Transform	MLR Scale	PLS Scale	Type
1	Facteur de concentration	F1		None	None	Unit Variance	Regular
2	MES Résiduels	MESr	g/l	None	None	Unit Variance	Regular
3	Volume égoutté	Ve	ml	None	None	Unit Variance	Regular

Worksheet

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	pH	Dose	Type de polymère	Facteur de concentration	MES Résiduels	Volume égoutté
1	1	N1	26	Incl	2,5	2	ChemiflocCV300	1,45	3,2	170
2	2	N2	24	Incl	6,5	2	ChemiflocCV300	1,23	4	183
3	3	N3	8	Incl	2,5	6	ChemiflocCV300	1,89	0,36	164
4	4	N4	14	Incl	6,5	6	ChemiflocCV300	1,64	1,01	157
5	5	N5	2	Incl	4,5	4	ChemiflocCV300	1,59	1,2	166
6	6	N6	6	Incl	2,5	2	FO4650SHPS	1,63	1,05	145
7	7	N7	22	Incl	6,5	2	FO4650SHPS	1,24	2,38	116
8	8	N8	27	Incl	2,5	6	FO4650SHPS	1,54	1,11	168
9	9	N9	10	Incl	6,5	6	FO4650SHPS	1,58	1,03	127
10	10	N10	3	Incl	4,5	4	FO4650SHPS	1,42	1,98	155
11	11	N11	20	Incl	2,5	2	ChemiflocCH87	1,4	1,93	145
12	12	N12	23	Incl	6,5	2	ChemiflocCH87	1,32	2,11	180
13	13	N13	13	Incl	2,5	6	ChemiflocCH87	1,68	1,01	207
14	14	N14	1	Incl	6,5	6	ChemiflocCH87	1,55	1,85	175

Ready

Figure III-6 : Interface du logiciel MODDE 6.0

Chapitre IV :

Résultats et interprétations

IV.1. Propriétés de la boue

La détermination des différentes caractéristiques a été effectuée avant le début des plans d'expérience. Le Tableau IV-1 montre les paramètres importants des 2 types de boues étudiées.

Tableau IV-1 : Propriétés des boues

Station de prélèvement	Origine des effluents	Etat physique	Siccité (%)	MES (g/l)	pH initial
Beni Messous	Zone urbaine	Marron avec de fines particules	3,35	19,33	6,7
Réghaia	Zone industrielle	Noir avec une mauvaise odeur	5,9	28,25	6,56

IV.2. Détermination du domaine d'étude

Compte tenu des travaux publiés précédemment et des résultats des essais préliminaires sur la floculation et l'égouttage des boues, les niveaux inférieurs, supérieurs et le centre des deux paramètres quantitatifs à optimiser ont été fixés et regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV-2 : Les facteurs et les niveaux du plan d'expérience

Paramètres	Abréviation	Unités	Facteurs X	Niveau bas (-1)	Niveau central (0)	Niveau haut (+1)
pH	pH	-	X ₁	2,5	4,5	6,5
Dose du polymère	Dos	Kg/T MS	X ₂	2	4	6

Le troisième paramètre qualitatif à optimiser est le type de polymère. Nous avons choisi 4 types de polymères avec différentes caractéristiques, comme indiqué dans le Tableau III-2.

IV.3. Plan d'expérience D-optimal

Les données expérimentales ont été ajustées à un modèle polynomial du second ordre et des coefficients de régression ont été obtenus. Le modèle complet de second ordre pour le cas de trois facteurs quantitatifs (X) et d'un facteur qualitatif (Z) à quatre niveaux est donné sous la forme de (Kuram et al., 2013) :

$$Y = b_{0,k} + \sum_{i=1}^2 b_{i,k} X_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^2 b_{i,j} X_i X_j + \sum_{i=1}^2 b_{i,i} X_i^2 \tag{Eq.IV.1}$$

Où k est l'indice du type de polymère ; i et j font référence aux facteurs quantitatifs.

Comme le montre l'équation (IV.1), le modèle contient des termes purement linéaires pour les facteurs quantitatifs et qualitatifs, des interactions à deux termes et des termes de second ordre seulement pour les facteurs quantitatifs.

IV.4. Modélisation et interprétation des résultats de l'égouttage des boues de la STEP de Béni Messous

Les résultats de la réponse Y ont été mesurés expérimentalement selon la matrice du plan D-optimal donnée par le logiciel MODDE 6.0 et qui comprend 27 séries d'expériences.

Le Tableau IV-3 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre les modèles de F, MES_r et V_e. Dans ces modèles, les termes d'interaction sont indépendants du type de polymère, tandis que les termes linéaires en dépendent. Ces coefficients dépendants sont présentés pour chaque type de polymère.

Le Tableau IV-4 montre le plan expérimental D-optimal généré par le logiciel comportant 27 essais avec les réponses mesurées ainsi que celles prédites par le logiciel lui-même. En utilisant l'analyse de régression multiple, les réponses (F, MES_r et V_e) ont été corrélées avec les trois facteurs du plan d'expérience en utilisant le polynôme de second ordre (Eq. 3.2).

Tableau IV-3 : Résultats de la modélisation du facteur F, des MES_r et du volume égoutté V_e pour la boue de Béni Messous

$F = b_{0,k} + \sum_{i=1}^2 b_{i,k} X_i + 3,059 * pH * Dos - 0,079 pH^2 + 0,095 Dos^2 \tag{Eq.IV.2}$			
$MES_r = b_{0,k} + \sum_{i=1}^2 b_{i,k} X_i - 0,066 * pH * Dos + 0,175 pH^2 + 0,157 Dos^2 \tag{Eq.IV.3}$			
$V_e = b_{0,k} + \sum_{i=1}^2 b_{i,k} X_i - 9,125 * pH * Dos - 10,738 pH^2 - 0,809 Dos^2 \tag{Eq.IV.4}$			
Coefficients des termes linéaires des modèles			
Type de polymère	b _{0,k}	b _{1,k}	b _{2,k}
Facteur de concentration F			
Chemifloc CV 300	-0,098	0,067	0,014

FO 4650 SH PS	-0,046	0,005	-0,023
Chemifloc CH 87	0,086	-0,067	-0,050
Tefloc FC 4606 PB	0,058	-0,005	0,060
MES résiduels MESr (g/l)			
Chemifloc CV 300	-0,045	0,054	-0,058
FO 4650 SH PS	-0,007	0,058	-0,039
Chemifloc CH 87	-0,171	-0,055	0,176
Tefloc FC 4606 PB	0,224	-0,057	-0,078
Volume égoutté Ve (ml)			
Chemifloc CV 300	17,652	-5,074	0,621
FO 4650 SH PS	-12,547	-2,824	-2,628
Chemifloc CH 87	6,088	0,509	-0,294
Tefloc FC 4606 PB	-11,194	7,389	2,301

IV.4.1. Validation des résultats

La validité du modèle mathématique proposé par le logiciel MODDE 6.0 a été vérifiée en abordant les points suivants :

a. Le coefficient de détermination R^2

Il représente le pourcentage de la variation de la réponse expliquée par le modèle. R^2 est une mesure de l'ajustement, c'est-à-dire, de la façon dont le modèle s'adapte aux données. Plus les valeurs R^2 et $R^2_{\text{ajusté}}$ sont proches de l'unité, mieux le modèle correspond aux données expérimentales, et donc l'écart entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par le modèle est minimal (Soltani, 2010). Autrement dit, si :

- $R = 0$: le modèle n'explique rien, indiquant qu'il n'y a pas de lien entre les variables dépendantes et explicatives.
- $R = 1$: toutes les réponses mesurées sont expliquées, ce qui indique que le modèle mathématique est bien ajusté.

Tableau IV-4 : Plan D-optimal appliqué à la boue de Beni Messous avec les valeurs expérimentales, prédites ainsi que les résidus des 3 réponses

N°	pH	Dose	Type de polymère	F			MES _r (g/l)			V _e (ml)		
				Exp	Prédites	Résidus	Exp	Prédites	Résidus	Exp	Prédites	Résidus
1	2,5	2	Chemifloc CV 300	2,23	2,22	0,01	0,5	0,535	-0,035	298	300	-2
2	6,5	2	Chemifloc CV 300	2,16	2,21	-0,05	1,03	1,020	0,009	257	245	12
3	2,5	6	Chemifloc CV 300	2,3	2,35	-0,05	0,055	0,045	0,009	332	320	12
4	6,5	6	Chemifloc CV 300	2,59	2,58	0,01	0,23	0,265	-0,035	280	282	-2
5	4,5	4	Chemifloc CV 300	2,64	2,52	0,11	0,185	0,133	0,051	298	316	-18
6	2,5	2	FO 4650 SH PS	2,38	2,38	0	0,475	0,551	-0,076	276	270	4
7	6,5	2	FO 4650 SH PS	2,24	2,24	0	1,11	1,043	0,066	210	221	-11
8	2,5	6	FO 4650 SH PS	2,43	2,43	0	0,165	0,098	0,066	274	285	-11
9	6,5	6	FO 4650 SH PS	2,54	2,54	0	0,25	0,326	-0,076	256	250	6
10	4,5	4	FO 4650 SH PS	2,59	2,57	0,02	0,19	0,171	0,018	298	285	13
11	2,5	2	Chemifloc CH 87	2,66	2,61	0,05	0,223	0,286	-0,063	292	283	9
12	6,5	2	Chemifloc CH 87	2,42	2,33	0,09	0,485	0,550	-0,065	243	240	3
13	2,5	6	Chemifloc CH 87	2,67	2,61	0,06	0,152	0,264	-0,112	309	302	7
14	6,5	6	Chemifloc CH 87	2,65	2,57	0,08	0,263	0,264	-0,001	283	275	8
15	2,5	4	Chemifloc CH 87	2,68	2,70	-0,02	0,187	0,118	0,068	310	314	-4
16	6,5	4	Chemifloc CH 87	2,46	2,54	-0,08	0,208	0,249	-0,041	279	279	0
17	4,5	2	Chemifloc CH 87	2,48	2,55	-0,07	0,358	0,242	0,115	262	269	-7
18	4,5	6	Chemifloc CH 87	2,6	2,67	-0,07	0,189	0,088	0,100	285	296	-11
19	2,5	2	Tefloc FC 4606 PB	2,38	2,41	-0,03	1,14	0,939	0,200	243	257	-14
20	6,5	2	Tefloc FC 4606 PB	2,3	2,25	0,05	1,3	1,199	0,100	217	227	-10
21	2,5	6	Tefloc FC 4606 PB	2,66	2,63	0,03	0,35	0,407	-0,057	283	281	2
22	6,5	6	Tefloc FC 4606 PB	2,7	2,71	-0,01	0,51	0,403	0,106	260	267	-7
23	6,5	4	Tefloc FC 4606 PB	2,55	2,58	-0,03	0,58	0,644	-0,064	275	269	6
24	4,5	2	Tefloc FC 4606 PB	2,41	2,41	0	0,64	0,893	-0,253	269	249	20
25	4,5	4	Tefloc FC 4606 PB	2,7	2,68	0,02	0,37	0,404	-0,034	291	287	4
26	4,5	4	Tefloc FC 4606 PB	2,67	2,68	-0,01	0,42	0,404	0,015	289	287	2
27	4,5	4	Tefloc FC 4606 PB	2,69	2,68	0,01	0,39	0,404	-0,014	287	287	0

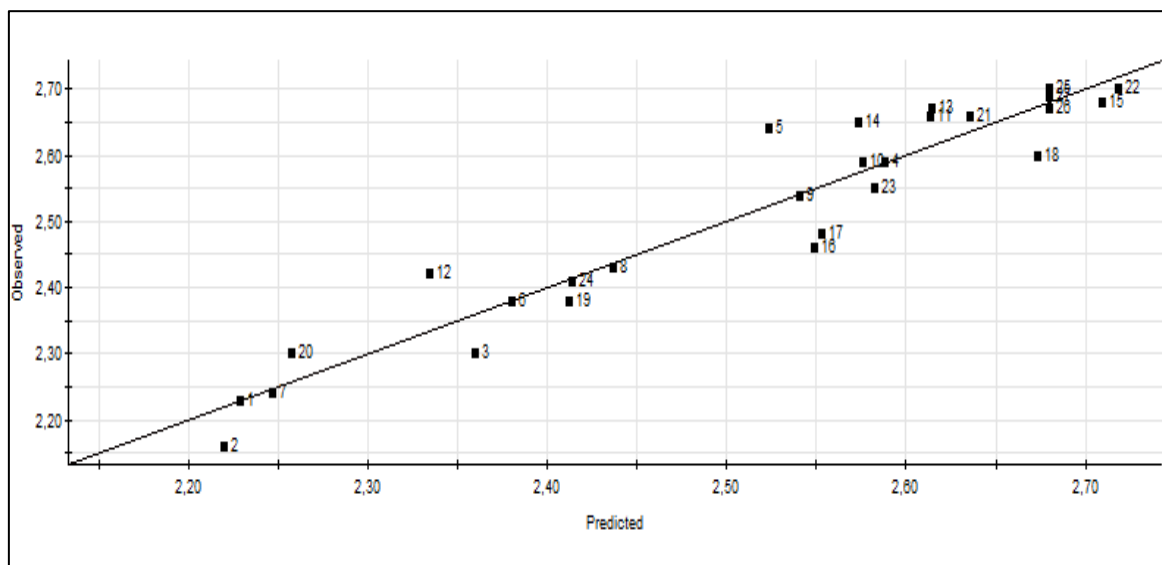
Les coefficients de détermination R^2 et $R^2_{ajusté}$ pour les 3 réponses que nous étudions sont données dans le Tableau IV-5. Elles sont proches de 1, ce qui montre la bonne qualité de l'ajustement des trois modèles du facteur de concentration F, du volume égoutté V_e , et des MES résiduelles.

Tableau IV-5 : Résultats statistiques pour les modèles proposés pour la boue de Béni-Messous

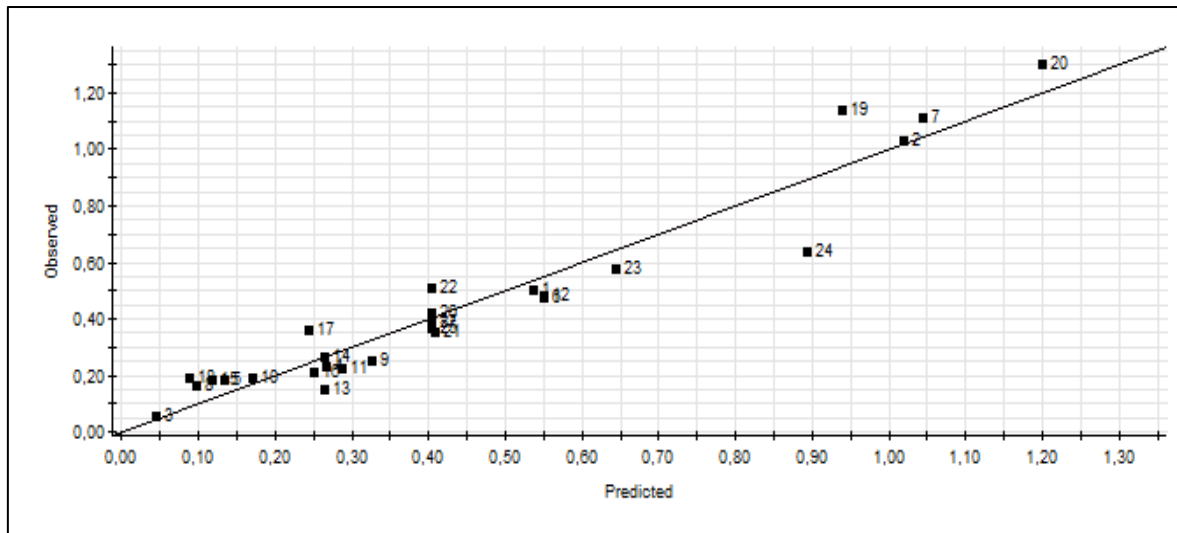
	F	MES _r	V _e
R^2	0,910	0,927	0,884
$R^2_{ajusté}$	0,804	0,841	0,749

b. L'analyse des résidus

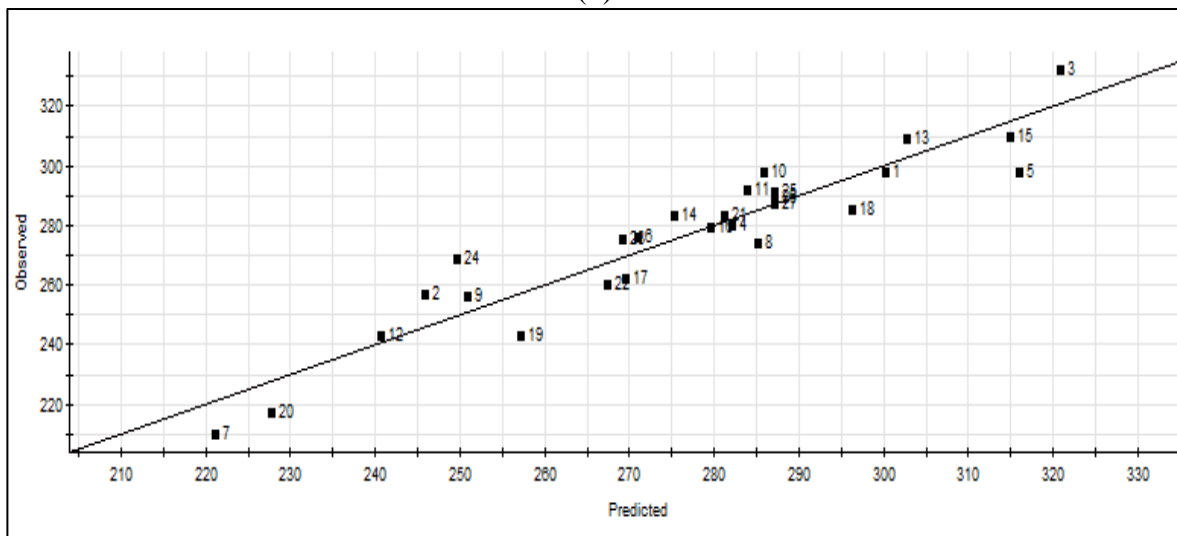
La représentation graphique des valeurs mesurées par rapport aux valeurs prédites est présentée sur la Figure IV-1. Les points représentant les valeurs des réponses acquises expérimentalement et les valeurs des réponses estimées sont proches de la droite $y = x$. Ceci dénote, encore une fois, de la bonne qualité du modèle, avec certains points dispersés autour de la ligne de régression.



(a)



(b)



(c)

Figure IV-1 : Valeurs mesurées vs. Valeurs prédites des boues de Béni Messous pour : (a) le facteur de concentration F, (b) les MES résiduelles et (c) le volume égoutté V_e

c. Test de la valeur-p

La probabilité p mesure la certitude avec laquelle l'hypothèse nulle peut être rejetée, et donc que l'instance analysée s'écarte fortement de la norme (hypothèse nulle), ce qui lui confère un intérêt particulier. Cette valeur-p de chaque facteur est comparée à un seuil de signification pour pouvoir se renseigner sur la validité de la relation entre la réponse et les variables du modèle (Assistance de MINITAB 18, 2022).

Tableau IV-6: Effets du modèle appliqué aux boues de Béni Messous et leurs valeur-p pour le facteur de concentration F, les MES_r et le volume égoutté V_e (En gras : valeur-p > 0,05)

Effets	Valeur-p		
	F	MES _r	Ve
Modèle	0,04	0,03	0,02
pH	0,47	0	0
Dos	0	0	0
Typ(Chemifloc CV 300)	0	0,38	0
Typ(FO 4650 SH PS)	0,12	0,88	0,03
Typ(Chemifloc CH 87)	0	0	0,19
Typ(Tefloc FC 4606 PB)	0,03	0	0,03
Effets quadratiques			
pH²	0,05	0,02	0,30
Dos²	0,02	0,03	0,01
Effets conjugués			
pH*Dos	0	0,07	0,27
pH*Typ(Chemifloc CV 300)	0,05	0,35	0,40
pH*Typ(FO 4650 SH PS)	0,87	0,32	0,63
pH*Typ(Chemifloc CH 87)	0,03	0,28	0,92
pH*Typ(Tefloc FC 4606 PB)	0,85	0,30	0,20
Dos*Typ(Chemifloc CV 300)	0,66	0,32	0,92
Dos*Typ(FO 4650 SH PS)	0,47	0,50	0,66
Dos*Typ(Chemifloc CH 87)	0,09	0	0,95
Dos*Typ(Tefloc FC 4606 PB)	0,06	0,17	0,68

Selon le statisticien Ronald Fisher, un seuil de signification de 0,05 est généralement pris pour référence, ce qui représente une probabilité de 5 % de suffisance contre l'hypothèse nulle.

Le logiciel MODDE 6.0 permet d'évaluer les modèles mathématiques par analyse de la variance (ANOVA) qui permet de se renseigner sur la validité du modèle de régression.

Le Tableau IV-6 indique les valeurs de la probabilité p permettant de tester la signification statistique de chaque influence des facteurs étudiés. On peut y lire que les 3 réponses étudiées

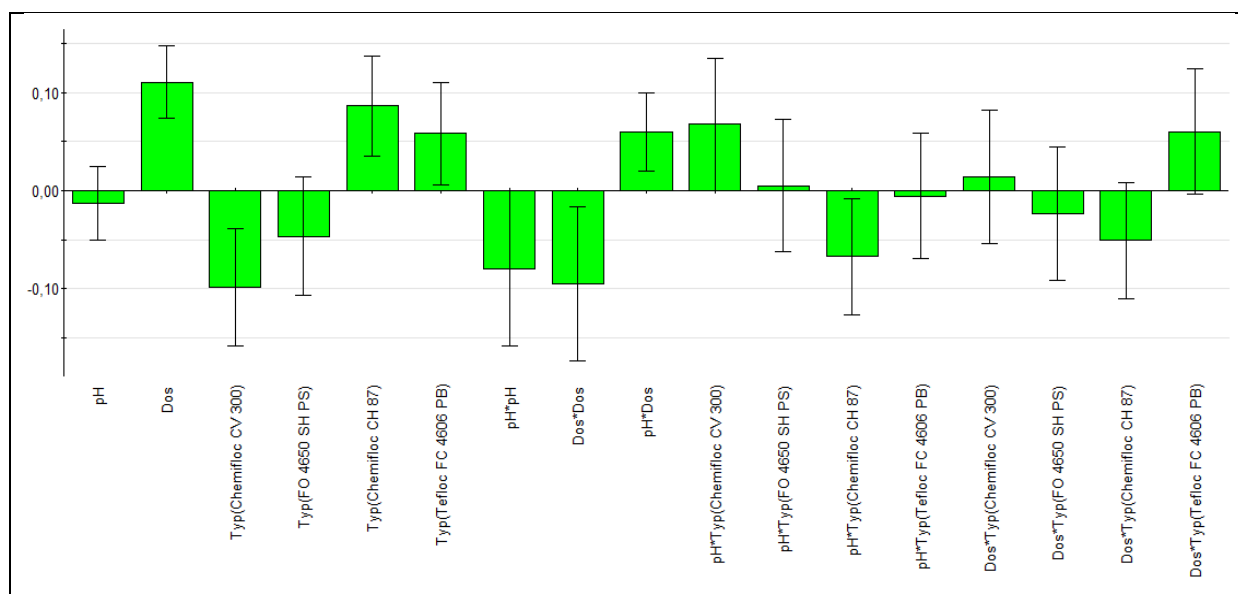
(Facteur F, MES_r et le volume égoutté V_e) ont chacune un modèle significatif (Valeur-p < 0,05). Inversement, la majorité des effets conjugués ont un effet non significatif.

Pour le reste des effets, ils sont tous significatifs, sauf pour :

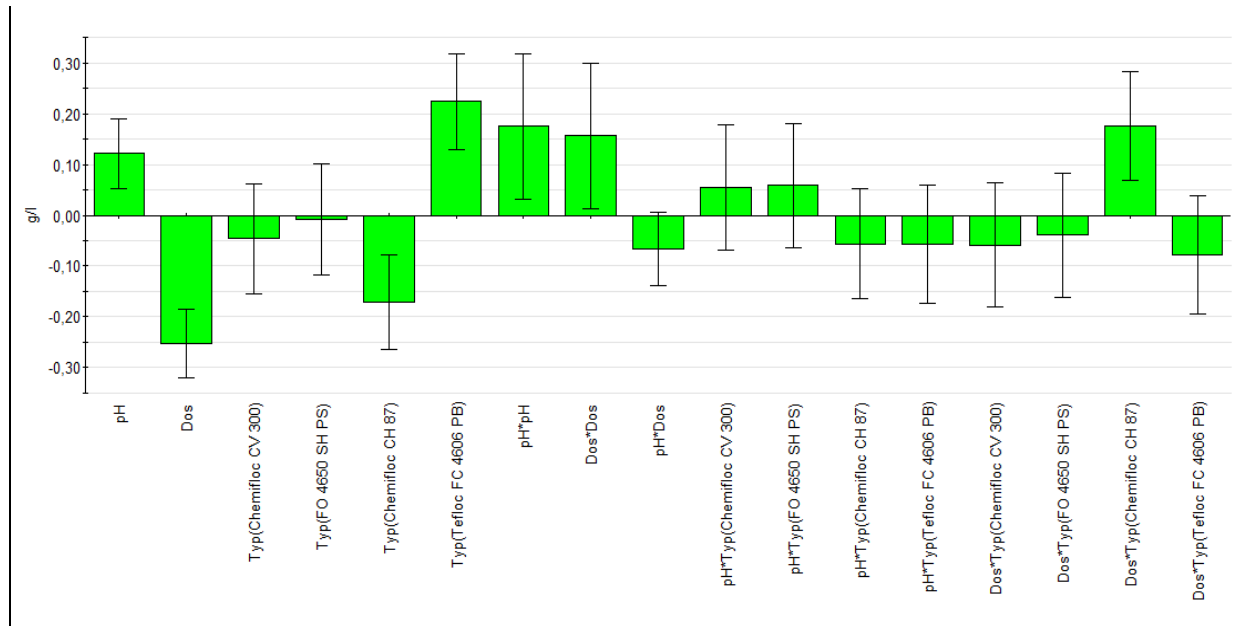
- Le facteur F : le pH et le polymère FO 4650 SH PS sont les seuls à avoir un effet non significatif ;
- Les MES_r : les polymères Chemifloc CV 300 et FO 4650 SH PS ont un effet non significatif ;
- Le volume égoutté V_e : le polymère Chemifloc CH 87 et l'effet quadratique du pH ont un effet non significatif.

Les graphiques des coefficients donnés par le logiciel MODDE 6.0 et illustrés dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** affiche les coefficients de régression avec les intervalles de confiance. Par défaut, le tracé des coefficients est centré et mis à l'échelle pour les données, ce qui rend les coefficients comparables. La taille du coefficient représente le changement de la réponse lorsqu'un facteur varie de 0 à 1, en unités codées, alors que les autres facteurs sont maintenus à leur moyenne. Le coefficient est significatif, lorsque l'intervalle de confiance ne croise pas zéro.

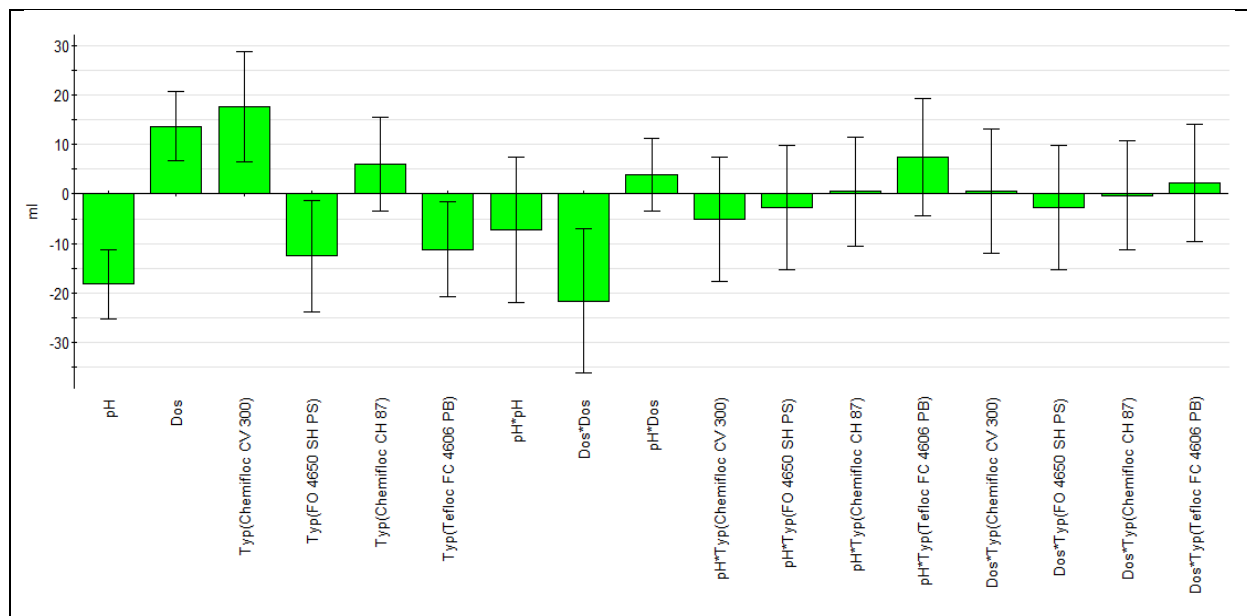
D'après la Figure IV-2, les résultats obtenus à partir des tests de la valeur-p sont vérifiés.



(a)



(b)



(c)

Figure IV-2 : Graphique des coefficients de 3 réponses pour la boue de Beni Messous : (a) facteur de concentration ; (b) MES résiduelles ; (c) volume égoutté

IV.4.2. Optimisation

Dans les sections suivantes, les résultats des trois études d'optimisation sont présentés, dans un premier temps, suivant une méthode d'optimisation mono-objectif qui est basée sur la maximisation/minimisation d'une fonction objective unique. Son but est d'identifier la meilleure réponse connue sous le nom de solution optimale, qui est facilement définie en fonction d'une performance unique du problème recherché (facteur F, MES_r, volume égoutté V_e).

Par la suite, nous procédons à **une optimisation multi-objectif**, qui optimise en même temps plusieurs fonctions objectives qui sont souvent contradictoires. On recherche la solution optimale sur la base d'un ensemble de performances du problème (facteur F, MES_r, volume égoutté V_e). Les résultats d'un problème multi-objectifs sont généralement un assortiment de solutions se distinguant par des compromis variés entre les objectifs (Houam, 2013).

Les résultats sont donnés et commentés à partir de différentes perspectives d'égouttage des boues, y compris l'impact du type de polymère sur la performance de l'opération.

a. Optimisation mono-objectif

Les différents modèles des réponses obtenus dans cette étude sont considérés pour l'optimisation de la déshydratation de la boue. Ces réponses peuvent être utilisées seules dans les études d'optimisation comme fonction objective. Il s'agit d'un problème d'optimisation sous contrainte avec des variables quantitatives et qualitatives indiquées par l'écriture suivante :

$$\text{Optimiser } y = f(X, Z)$$

Avec :

- $L_i \leq X_i \leq U_i$, $i = 1: 2$;
- $X_1 = \text{pH}$, $X_2 = \text{Dos}$;
- L et U sont les limites inférieures (*Low*) et supérieures (*Up*) des facteurs quantitatifs ;
- $Z = \text{Chemifloc CV 300, FO 4650 SH PS, Chemifloc CH 87, Tefloc FC 4606 PB}$.

Les résultats de maximisation des différents facteurs donnés par le logiciel MODDE 6.0 sont illustrés dans le Tableau IV-7 qui montre les effets directs des facteurs sur chaque réponse étudiée.

Tableau IV-7 : Résultats de maximisation du facteur de concentration F et du volume égoutté V_e, et de minimisation des MES_r pour les boues de Béni Messous (Les optimums en gras)

Type de polymère	pH	Dos (Kg/T MS)	F	MES _r (g/l)	V _e (ml)
Facteur de Concentration					
Chemifloc CV 300	5,840	5,734	2,596	0,141	295,638
FO 4650 SH PS	4,780	5,011	2,597	0,088	283,02
Chemifloc CH 87	3,980	4,808	2,726	0,004	310,022
Tefloc FC 4606 PB	3,985	4,811	2,727	0,297	291,988
MES_r					
Chemifloc CV 300	3,980	4,809	2,532	0,006	323,405

FO 4650 SH PS	3,985	4,811	2,585	0,016	291,263
Chemifloc CH 87	3,980	4,808	2,726	0,004	310,022
Tefloc FC 4606 PB	4,540	6	2,756	0,229	281,435
Volume égoutté V_e					
Chemifloc CV 300	3,9808	4,8094	2,533	0,0063	322,885
FO 4650 SH PS	2,5	4,335	2,505	0,134	300,159
Chemifloc CH 87	2,5	4,438	2,704	0,123	315,907
Tefloc FC 4606 PB	3,175	4,619	2,689	0,364	293,208

A partir de ces résultats, on peut tirer les conclusions suivantes :

– **Maximisation du facteur de concentration :**

Les valeurs maximales du facteur de concentration dépendent considérablement du type de polymère. La valeur optimale est obtenue avec le polymère Tefloc FC 4606 PB (2,727) est d'environ 51% supérieure au pire cas (2,596) obtenu avec le polymère Chemifloc CV 300. Par ailleurs, pour les mêmes valeurs optimales des facteurs de déshydratation, le polymère Chemifloc CH87 donne une valeur presque identique de facteur de concentration avec des valeurs optimales des deux autres réponses. Dans le cas du polymère Chemifloc CV 300, le pH et la dose optimales sont beaucoup plus supérieures à celles des autres polymères. Des valeurs élevées de ces paramètres entraînent inévitablement des MES résiduelles élevées et un facteur de concentration très faible.

En conclusion, si l'objectif principal est de maximiser le facteur de concentration avec un dosage minimal, un choix entre les polymères **Chemifloc CH 87** et **Tefloc FC 4606 PB** peut être considéré.

– **Minimisation des MES résiduelles :**

Les MES résiduelles minimales sont obtenues avec le polymère Chemifloc CH 87 et le plus mauvais résultat appartient au polymère Tefloc FC 4606 PB. Les valeurs optimales du pH et de la dose sont presque identiques pour les 3 premiers types de polymères et sont maximales pour le polymère Tefloc FC 4606 PB.

Le facteur de concentration et le volume égoutté, ne montrent pas les mêmes tendances avec les valeurs des MES résiduelles minimales. Par exemple, La valeur des MES résiduelles donné par le polymère Chemifloc CV 300 est assez proche de la valeur optimale avec un volume

égoutté le plus élevé. Comme les résultats de maximisation de facteur de concentration, ce polymère donne le taux de concentration le plus faible.

D'après les résultats ci-dessus, si l'objectif principal est de minimiser les MES résiduelles, un choix entre les polymères **Chemifloc CH 87** et **Chemifloc CV 300** peut être considéré.

- **Maximisation du volume égoutté :**

Pour maximiser le volume égoutté, le pH et la dose du polymère doivent être pris à 3,98 et 4,8 Kg/T MS respectivement. Les valeurs maximales du volume égoutté de Chemifloc CH 87 et Chemifloc CV 300 sont similaires.

Le type de polymère influence également les autres valeurs de réponse avec des conditions opératoires différentes. Chemifloc CV 300 des MES résiduelles optimales avec un facteur de concentration assez faible. Ainsi, si l'objectif principal est de maximiser le volume égoutté, le polymère **Chemifloc CV 300** est le polymère à privilégier. Mais cette conclusion n'est pas très évidente si les autres réponses sont également prises en compte.

D'après les optimisations numériques, on constate que les deux polymères **Chemifloc CV 300** et **Chemifloc CH 87** sont globalement plus performants que les autres. En outre, nous ne pouvons pas tirer des conclusions générales sur les conditions optimales de déshydratation, car ils dépendent du type de fluide et de la réponse à optimiser simultanément.

b. Optimisation multi-objectif

Le problème d'optimisation peut être considéré dans un contexte plus général, différents objectifs peuvent être définis en prenant en compte la performance du processus pour une optimisation multi-objectif. La qualité de la siccité de la boue finale est généralement l'objectif principal qui est exprimé par le facteur de concentration. Cependant, d'autres objectifs reflétant l'économie du processus peuvent également être pris en compte pour une déshydratation plus efficace. Dans ce contexte, le pH reflète le coût de consommation de l'acide, tandis que la dose de polymère reflète le taux de consommation du polymère. Ces deux coûts représentent une part importante des coûts directs d'exploitation.

Un problème d'optimisation multi-objectif peut être défini de diverses manières. Dans cette étude, le problème est défini dans le contexte de "**l'optimisation sous contrainte implicite**" : L'une des réponses est sélectionnée comme fonction objective primaire y à optimiser, tandis que les autres sont utilisées comme contraintes implicites f (Houam, 2013) :

Optimiser : $y = f(X, Z)$

Avec :

- $L_i \leq X_i \leq U_i \quad i = 1:2$;
- $K_j \leq f_j \leq H_j \quad j = 1, 2$;
- $Z =$ Chemifloc CV 300, FO 4650 SH PS, Chemifloc CH 87, Tefloc FC 4606 PB ;
- K et H sont les limites inférieures et supérieures sur les contraintes implicites qui sont sélectionnées sur la base des résultats de l'optimisation mono-objectif comme suit :

$$F \geq 2,7 ; \text{MES}_r \leq 0,007 \text{ g/l} ; V_e \geq 310 \text{ ml}$$

Ces contraintes sont données à titre indicatif et peuvent être décidées en fonction de leur application spécifique.

Tout d'abord, le **facteur de concentration** est choisi comme fonction objective primaire, tandis que les MES résiduelles et le volume égoutté sont utilisées comme contraintes implicites. Ces résultats sont donnés par le logiciel MODDE 6.0 et sont présentés dans le Tableau IV-8. Les conclusions suivantes sont tirées de ce tableau :

- Le facteur de concentration maximal est obtenu avec le polymère Tefloc FC 4606 PB alors que le polymère Chemifloc CV 300 donne le pire résultat.
- Alors que le polymère Tefloc FC 4606 PB donne un facteur de concentration maximale, sa valeur de MES résiduelles est la plus mauvaise. Ceci est dû à une valeur de pH plus importante par rapport aux autres types de polymères.
- Pour les valeurs du volume égoutté et des MES résiduelles, les polymères Chemifloc CV 300 et Chemifloc CH 87 présentent des valeurs similaires. De même pour les polymères FO 4650 SH PS Tefloc FC 4606 PB.
- En conclusion, si l'objectif principal est de maximiser le facteur de concentration, le polymère Tefloc FC 4606 PB doit être préféré comme le meilleur polymère. D'autre part, la proportion des coûts du polymère consommé dans le coût total déterminera le polymère le plus approprié. Dans ces conditions, le polymère Chemifloc CH 87 peut être utilisé comme polymère de déshydratation, en raison de sa dose optimale 17% plus faible que celle du polymère Tefloc FC 4606 PB.

Ensuite, les **MES résiduelles** sont sélectionnées comme fonction objective primaire, tandis que le facteur de concentration et le volume égoutté sont utilisées comme contraintes implicites. Ces résultats sont donnés dans le Tableau IV-8 et les conclusions suivantes en sont extraites :

- Contrairement aux résultats observés pour le facteur de concentration, la pire valeur de MES_r est donnée par le polymère Tefloc FC 4606 PB, et la valeur optimale est donnée par le polymère Chemifloc CV 300.
- Le polymère Chemifloc CV 300 donne toujours des performances similaires à celles du polymère Chemifloc CH 87 pour les valeurs des MES résiduelles et du volume égoutté.
- En conclusion, si l'objectif principal est de minimiser les MES résiduelles, le polymère Chemifloc CV 300 devrait être préféré comme polymère de déshydratation. Le type du polymère le plus approprié sera également déterminé par le coût du polymère consommé. Dans ces conditions, le polymère Chemifloc CH 87 peut être également utilisé comme polymère de déshydratation avec une dose 16% plus faible que celle de Chemifloc CV 300.

Enfin, le **volume égoutté** est sélectionné comme fonction objective primaire, tandis que le facteur de concentration et les MES résiduelles sont utilisées comme contraintes implicites. Les conclusions suivantes sont tirées du Tableau IV-8 :

- Le volume égoutté maximal est obtenu avec le polymère Chemifloc CV 300 et d'une amplitude similaire à celle du polymère Chemifloc CH 87.
- Les valeurs des autres réponses sont similaires à celles interprétées auparavant pour les 4 types de polymères.
- D'après les optimisations numériques multi-objectifs pour la boue de Beni Messous, nous constatons que le polymère Chemifloc CH 87 est globalement plus performant que les autres.

Tableau IV-8 : Résultats d'optimisation multi-objectif de la déshydratation des boues de Beni Messous

Type de polymère	pH	Dos (Kg/T MS)	F	MES_r (g/l)	V_e (ml)
Facteur de Concentration					
Chemifloc CV 300	4,734	5,5374	2,5736	0,0042	311,794
FO 4650 SH PS	3,8276	5,2716	2,5741	0,0225	289,519
Chemifloc CH 87	3,7696	4,4344	2,7308	0,0036	311,521
Tefloc FC 4606 PB	4,0364	5,2106	2,7404	0,265	290,494
MES_r					
Chemifloc CV 300	4,9938	5,2192	2,5821	0,0465	311,126
FO 4650 SH PS	4,0066	4,6395	2,5861	0,0655	291,576
Chemifloc CH 87	2,9941	4,452	2,7222	0,0604	314,902
Tefloc FC 4606 PB	4,0098	5,1791	2,739	0,2678	290,73

	Volume égoutté V_e				
Chemifloc CV 300	4,5122	5,2088	2,5649	0,0036	316,642
FO 4650 SH PS	3,8245	5,2877	2,573	0,0219	289,396
Chemifloc CH 87	3,7177	4,44	2,7309	0,0058	311,821
Tefloc FC 4606 PB	4,1156	5,3086	2,7444	0,2571	289,698

IV.4.3. Diagrammes des effets directs

La Figure IV-3 représente les effets directs des trois réponses. Ils montrent comment chaque facteur a un impact individuel sur une réaction spécifique.

En se basant sur les graphiques du facteur de concentration, nous pouvons dire que ce facteur est optimiser à une valeur de pH moyenne de 3 à 4 et une dose optimale d'environ 4 à 5 Kg/T MS.

D'après les graphiques des MES résiduelles, la réponse est optimale pour une valeur de pH de 4 à 4,5, et une valeur de 4 à 4,5 Kg/T MS de dosage optimal.

Les graphiques du volume égoutté indique que plus le pH est bas plus la réponse est optimisé.

Pour le type de polymère, comme a été conclu ci-dessus, c'est le polymère Chemifloc CH 87 qui optimise les 3 réponses.

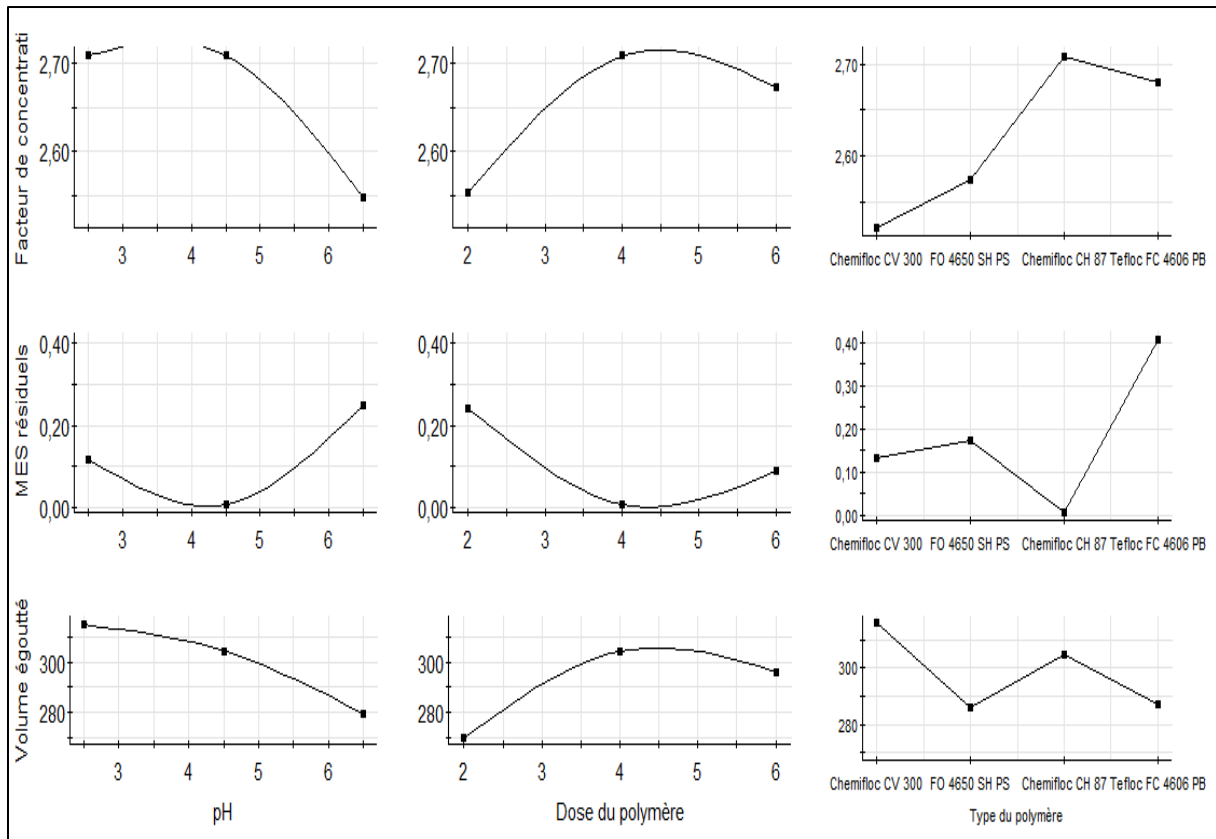


Figure IV-3 : Graphiques des effets directs des trois réponses étudiées pour les boues de Beni Messous

IV.4.4. Diagrammes de contour

Pour une meilleure explication des variables indépendantes et de leurs effets interactifs sur la déshydratation des boues de Beni Messous, des diagrammes de contour sont représentés dans la Figure IV-4.. Ils permettent de trouver la réponse optimale pour chaque réponse en fonction des deux facteurs qualitatifs et en fixant le polymère Chemifloc CH 87 qui a donné les meilleures performances pour les 3 réponses.

La réponse du système pour le facteur de concentration est donnée à une valeur de 2,73, pour les MES résiduelles est de 0,004 g/l et le volume égoutté de 315,7 ml.

L'examen des diagrammes de contour des trois critères d'optimisation montrent que les optimums obtenus et illustrés dans la Figure IV-3 sont vérifiés.

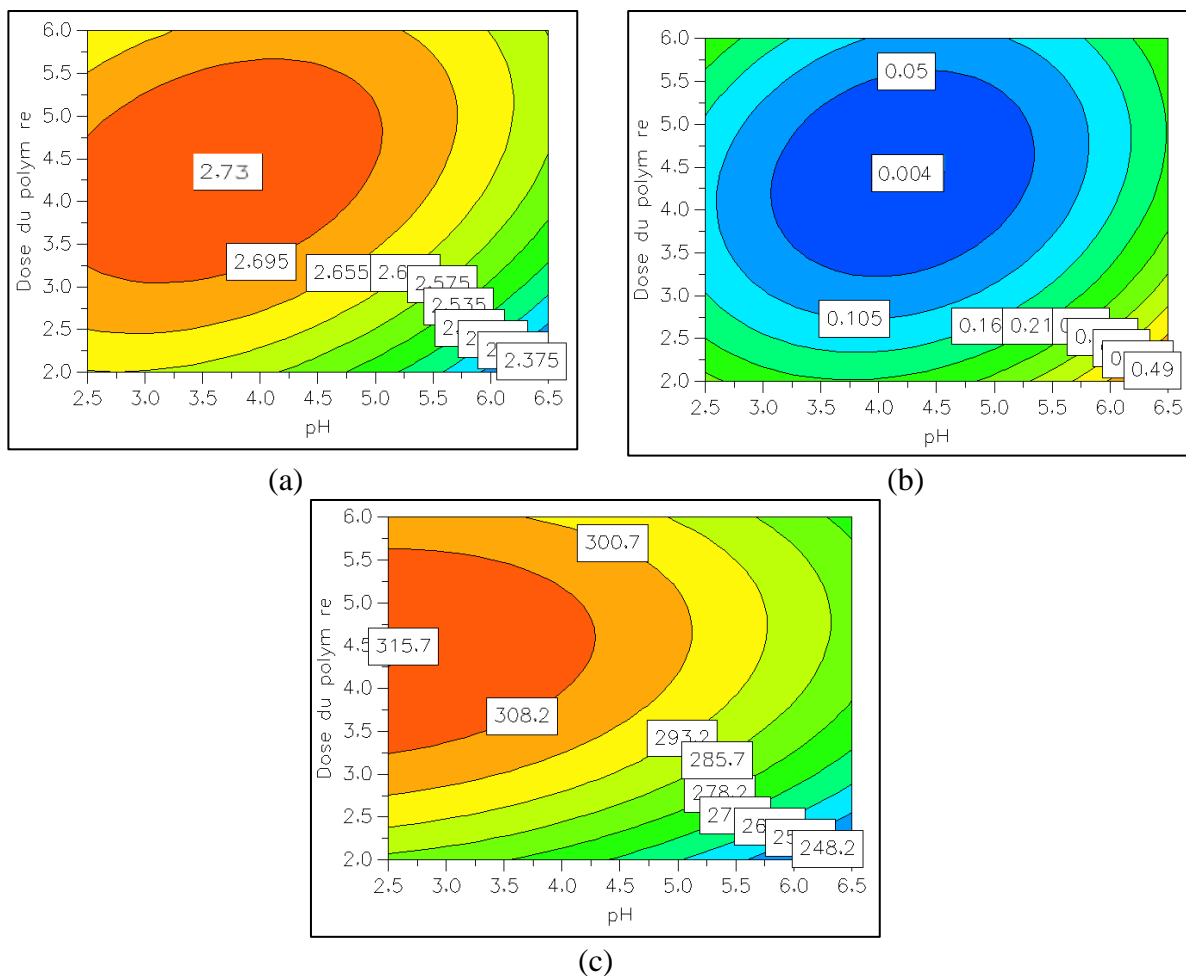


Figure IV-4 : Diagramme de contour de la boue de Béni Messous pour : (a) Le facteur de concentration F, (b) Les MES_r et (c) Le volume égoutté V_c

IV.5. Modélisation et interprétation des résultats de l'égouttage des boues de la STEP de Réghaïa

Le même plan d'expérience cité dans la section § IV.4 appliqué aux boues de Beni Messous a été appliqué aux boues de Réghaïa et a donné les modèles des 3 réponses et les résultats expérimentaux décrits dans le Tableau IV-9 et le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** respectivement.

Tableau IV-9 : Résultats de la modélisation de F, des MESr et du Ve pour la boue de Réghaïa

$F = b_{0,k} + \sum_{i=1}^2 b_{i,k} X_i - 0,039 * pH * Dos - 0,037 pH^2 + 0,010 Dos^2$				Eq.IV.5
$MESr = b_{0,k} + \sum_{i=1}^2 b_{i,k} X_i + 0,128 * pH * Dos + 0,121 pH^2 - 0,033 Dos^2$				Eq.IV.6
$Ve = b_{0,k} + \sum_{i=1}^2 b_{i,k} X_i - 9,125 * pH * Dos - 10,446 pH^2 - 0,517 Dos^2$				Eq.IV.7
Coefficients des termes linéaires des modèles				
Type de polymère	b _{0,k}	b _{1,k}	b _{2,k}	
Facteur de concentration F				
Chemifloc CV 300	-0,030	0,008	-0,105	
FO 4650 SH PS	-0,156	-0,064	0,021	
Chemifloc CH 87	0,059	0,022	0,026	
Tefloc FC 4606 PB	0,128	0,033	0,057	
MES résiduels MESr (g/l)				
Chemifloc CV 300	0,128	-0,031	0,262	
FO 4650 SH PS	0,406	0,106	-0,044	
Chemifloc CH 87	-0,140	-0,002	-0,082	
Tefloc FC 4606 PB	-0,395	-0,072	-0,135	
Volume égoutté Ve (ml)				
Chemifloc CV 300	-4,484	5,142	-14,922	
FO 4650 SH PS	-30,284	-13,857	1,577	
Chemifloc CH 87	8,717	1,642	5,910	
Tefloc FC 4606 PB	26,050	7,071	7,434	

Tableau IV-10 : Plan D-optimal appliqué à la boue de Réghaia avec les valeurs expérimentales, prédites ainsi que les résidus des 3 réponses

N°	pH	Dose	Type de polymère	F			MES _r (g/l)			V _e (ml)		
				Exp	Prédites	Résidus	Exp	Prédites	Résidus	Exp	Prédites	Résidus
1	2,5	2	Chemifloc CV 300	1,62	1,59	0,03	1,38	1,46	-0,08	170	163	7
2	6,5	2	Chemifloc CV 300	1,66	1,66	0	1,24	1,22	0,02	183	184	-1
3	2,5	6	Chemifloc CV 300	1,5	1,50	0	1,62	1,60	0,02	164	165	-1
4	6,5	6	Chemifloc CV 300	1,45	1,42	0,03	1,79	1,87	-0,08	157	150	7
5	4,5	4	Chemifloc CV 300	1,53	1,57	-0,04	1,59	1,45	0,14	166	176	-10
6	2,5	2	FO 4650 SH PS	1,44	1,41	0,03	1,84	1,91	-0,07	145	139	6
7	6,5	2	FO 4650 SH PS	1,31	1,33	-0,02	1,98	1,94	0,04	116	123	-7
8	2,5	6	FO 4650 SH PS	1,55	1,57	-0,02	1,47	1,43	0,04	168	175	-7
9	6,5	6	FO 4650 SH PS	1,38	1,35	0,03	1,91	1,98	-0,07	127	121	6
10	4,5	4	FO 4650 SH PS	1,45	1,44	0,001	1,81	1,73	0,08	155	150	5
11	2,5	2	Chemifloc CH 87	1,5	1,53	-0,03	1,64	1,51	0,13	145	159	-14
12	6,5	2	Chemifloc CH 87	1,66	1,63	0,03	1,26	1,32	-0,06	180	173	7
13	2,5	6	Chemifloc CH 87	1,75	1,71	0,04	0,9	0,95	-0,05	207	202	5
14	6,5	6	Chemifloc CH 87	1,63	1,65	-0,02	1,35	1,28	0,07	175	180	-5
15	2,5	4	Chemifloc CH 87	1,62	1,61	0,01	1,14	1,26	-0,12	195	181	14
16	6,5	4	Chemifloc CH 87	1,65	1,63	0,02	1,29	1,34	-0,05	180	177	3
17	4,5	2	Chemifloc CH 87	1,63	1,62	0,01	1,33	1,29	0,04	176	176	0
18	4,5	6	Chemifloc CH 87	1,71	1,72	-0,01	1,09	1,00	0,09	196	202	-6
19	2,5	2	Tefloc FC 4606 PB	1,53	1,56	-0,03	1,54	1,38	0,16	159	169	-10
20	6,5	2	Tefloc FC 4606 PB	1,69	1,68	0,01	1,12	1,05	0,07	192	194	-2
21	2,5	6	Tefloc FC 4606 PB	1,81	1,80	0,01	0,73	0,72	0,01	220	216	4
22	6,5	6	Tefloc FC 4606 PB	1,75	1,76	-0,01	0,92	0,91	0,01	206	205	1
23	6,5	4	Tefloc FC 4606 PB	1,71	1,71	0	1,11	1,01	0,1	195	200	-5
24	4,5	2	Tefloc FC 4606 PB	1,68	1,66	0,02	0,89	1,09	-0,20	210	192	18
25	4,5	4	Tefloc FC 4606 PB	1,74	1,73	0,01	0,88	0,92	-0,04	207	207	0
26	4,5	4	Tefloc FC 4606 PB	1,73	1,73	0	0,92	0,92	0	200	207	-7
27	4,5	4	Tefloc FC 4606 PB	1,76	1,73	0,03	0,86	0,92	-0,06	211	207	4

IV.5.1. Validation des résultats

La validité du modèle mathématique proposé par le logiciel MODDE 6.0 a été vérifiée en abordant les mêmes points adoptés pour la boue de Beni Messous.

a. Le coefficient de détermination R^2

Les coefficients de détermination R^2 et R^2 ajusté pour les 3 réponses et donnés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** sont proches de 1, ce qui montre la bonne qualité de l'ajustement des trois modèles du facteur de concentration F, volume égoutté V_e , et des MES résiduelles MES_r .

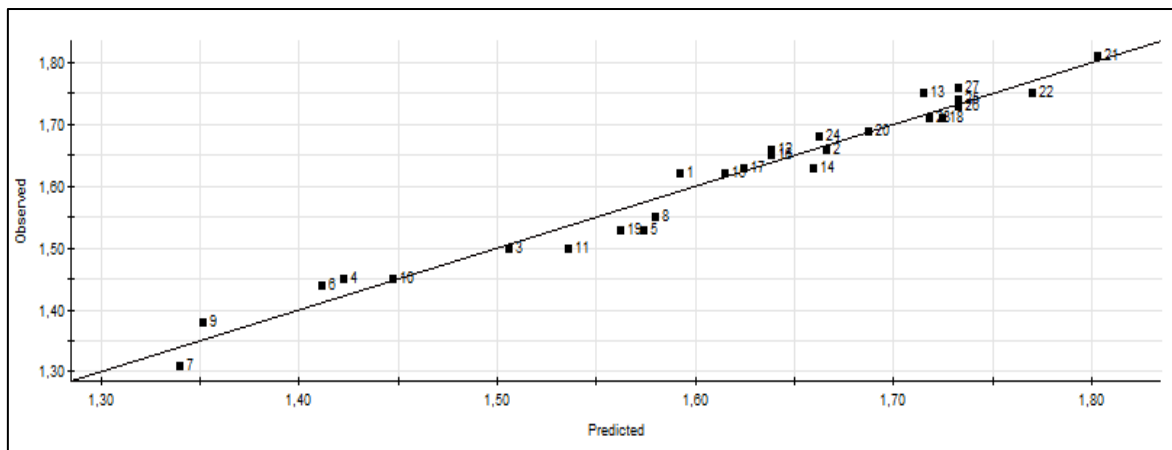
Tableau IV-11 : Résultats statistiques pour les modèles proposés pour la boue de Réghaïa

	F	MES_r (g/l)	V_e (ml)
R^2	0,968	0,943	0,922
R^2 ajusté	0,931	0,877	0,831

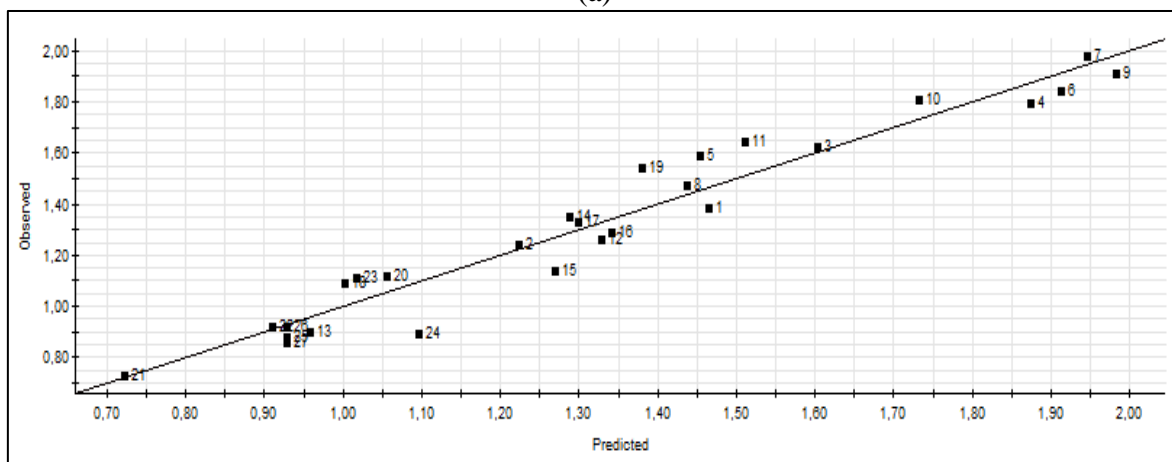
b. L'analyse des résidus

Les courbes de régression présentées **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour la boue de Réghaïa montrent que les points représentant les valeurs des réponses acquises expérimentalement et les valeurs des réponses estimées sont proches de la droite $y = x$, avec certains points dispersés autour de la ligne de régression.

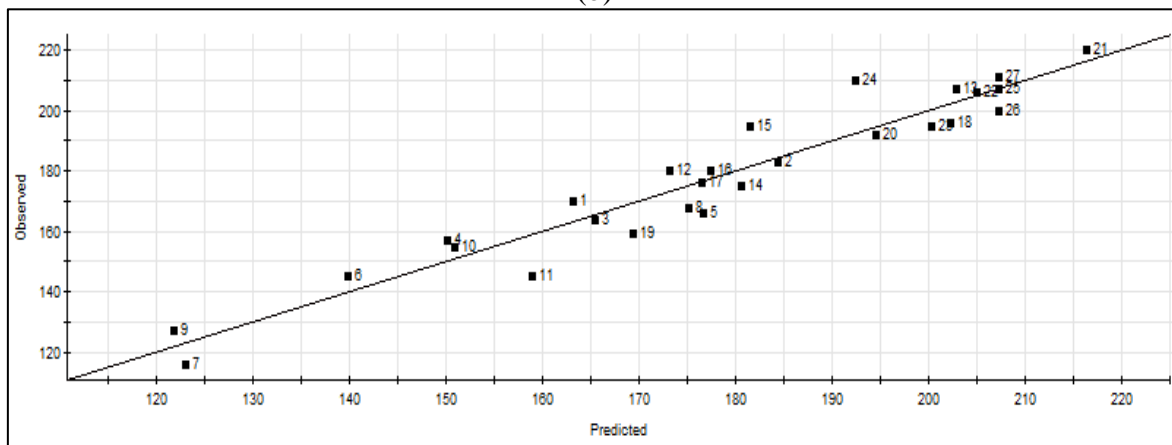
En tenant compte aussi du coefficient R^2 élevé et proche de 1 comme pour le modèle de la boue de Beni Messous, ceci laisse à conclure que les modèles proposés pour la boue de Réghaïa sont également assez proches des trois phénomènes étudiés.



(a)



(b)



(c)

Figure IV-5 : Valeurs mesurées vs. Valeurs prédites des boues de Réghaïa pour : (a) le facteur de concentration F, (b) les MES résiduelles et (c) le volume égoutté V_e

c. Test de la valeur-p

Le Tableau IV-12 indique les valeurs de la probabilité p permettant de tester la signification statistique de chaque influence des facteurs étudiés.

Tableau IV-12: Effets du modèle appliqué aux boues de Réghaïa et leurs valeur-p pour le facteur de concentration F, les MES_r et le volume égoutté V_e (En gras : valeur-p > 0,05)

Effets	Valeur-p		
	F	MES _r	V _e
Modèle	0,16	0,046	0,12
pH	0,20	0,22	0,18
Dos	0,01	0,05	0,02
Typ(Chemifloc CV 300)	0,03	0,02	0,30
Typ(FO 4650 SH PS)	0	0	0
Typ(Chemifloc CH 87)	0	0,01	0,03
Typ(Tefloc FC 4606 PB)	0	0	0
Effets quadratiques			
pH²	0,05	0,08	0,08
Dos²	0,55	0,61	0,93
Effets conjugués			
pH*Dos	0	0	0
pH*Typ(Chemifloc CV 300)	0,58	0,58	0,29
pH*Typ(FO 4650 SH PS)	0	0,07	0,01
pH*Typ(Chemifloc CH 87)	0,10	0,97	0,69
pH*Typ(Tefloc FC 4606 PB)	0,03	0,18	0,13
Dos*Typ(Chemifloc CV 300)	0	0	0
Dos*Typ(FO 4650 SH PS)	0,16	0,43	0,74
Dos*Typ(Chemifloc CH 87)	0,06	0,11	0,17
Dos*Typ(Tefloc FC 4606 PB)	0	0,02	0,12

En ce qui concerne le facteur de concentration F, la valeur $p = 0,159$ pour le modèle indique qu'il est non significatif. Pour les effets linéaires, **le pH** ($p = 0,2049 > 0,05$) est le seul facteur ayant un effet non significatif, le dosage ($p = 0,0130$) et les autres types de polymère ont tous un effet assez significatif.

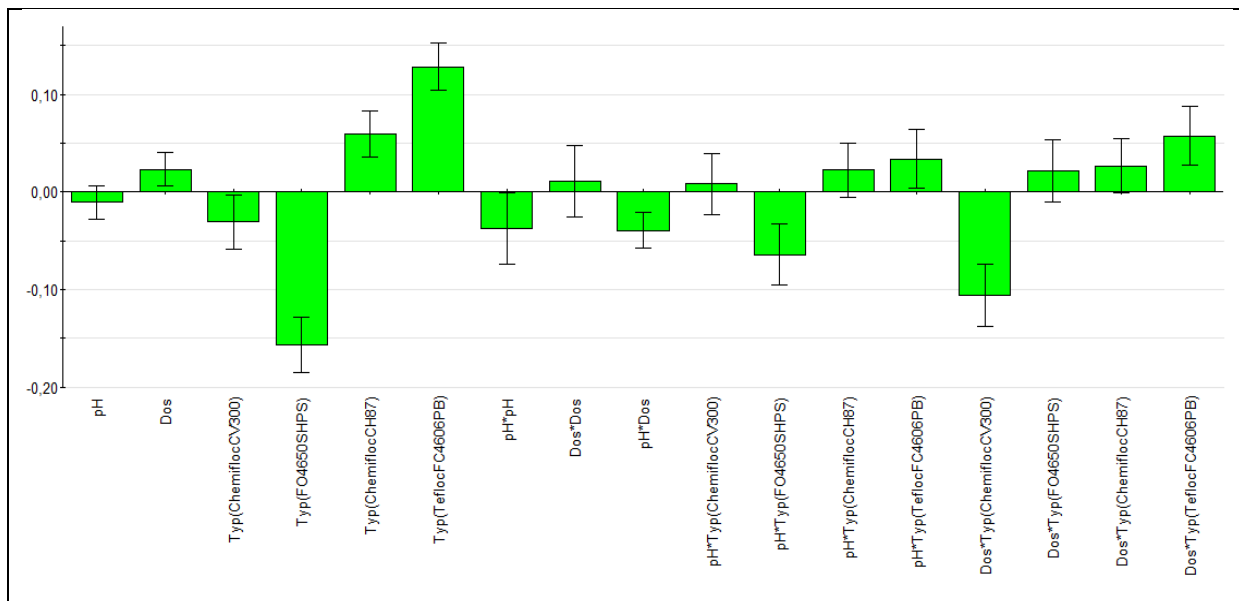
Quant aux effets quadratiques, le pH a une valeur de p inférieure à 0,05 ($p = 0,0462$) et donc est un effet significatif, au contraire du qui a une valeur de p supérieure à 0,05 et donc a un effet non significatif. Les effets conjugués, en revanche, seules les effets pH/ Dosage, pH/ polymère FO 4650 SH PS, pH /polymère Tefloc FC 4606 PB et Dosage / Polymère Chemifloc CV 300 ont des effets significatifs car les valeurs p de chacun d'entre eux sont supérieures à 0,05, les autres effets conjugués ont tous des effets non significatifs.

La valeur $p = 0,046$ pour le modèle des MES résiduelles indique qu'il est significatif. Pour les effets linéaires, seuls les effets des polymères : **Chemifloc CV 300**, **Chemifloc CH 87** et **Tefloc FC 4606 PB** qui ont des valeurs de p inférieurs à 0,05 sont significatifs.

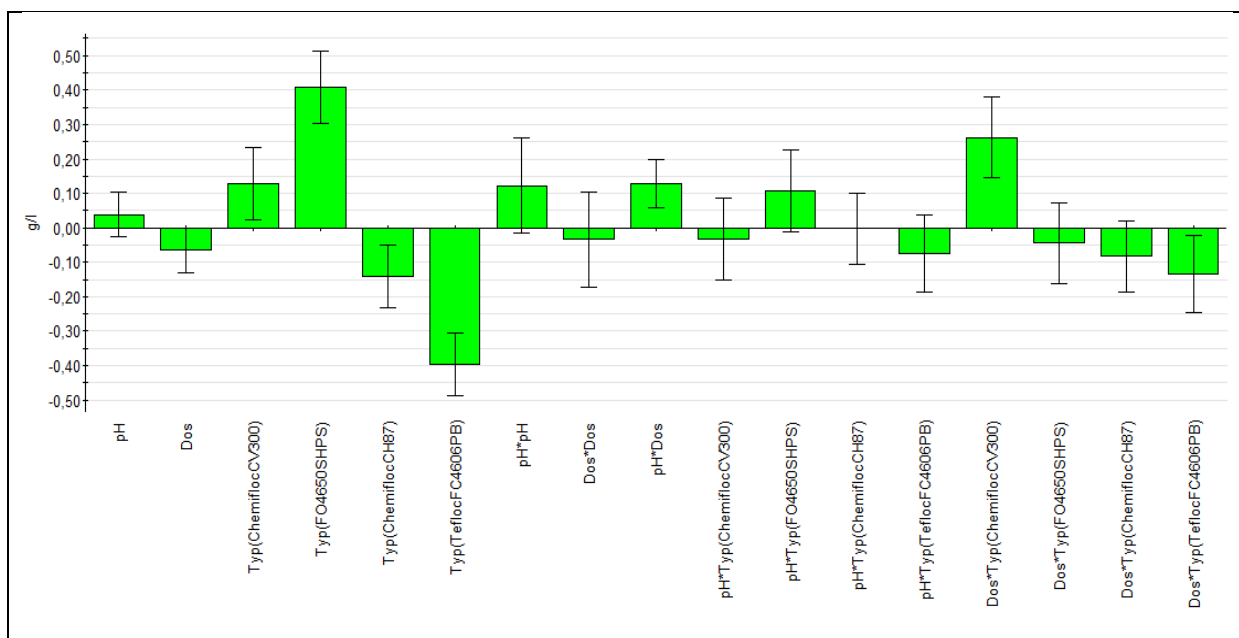
Les effets quadratiques ont les deux des valeurs de p supérieures à 0,05 et sont donc non significatifs. Par contre, les effets conjugués sont tous non significatifs pour ce modèle, sauf pour les effets du **pH/ dosage**, **pH/ polymère Chemifloc CV 300** et **Dosage/ Tefloc FC 4606 PB** qui ont des valeurs de p supérieures à 0,05 et sont donc significatifs.

Pour ce qui du volume égoutté, la valeur $p = 0,198$ pour le modèle indique qu'il est non significatif. Pour les effets linéaires, ils ont tous un effet significatif sauf le pH et le polymère **Chemifloc CV 300** qui sont négligeables pour cette réponse. Pour les effets quadratiques, ils sont les deux négligeables. Egalement, les effets conjugués ont tous un effet non significatif, à l'exception de 3 effets : **pH/ Dosage**, **pH/ polymère FO 4650 SH PS** et **Dosage/ polymère Chemifloc CV 300**.

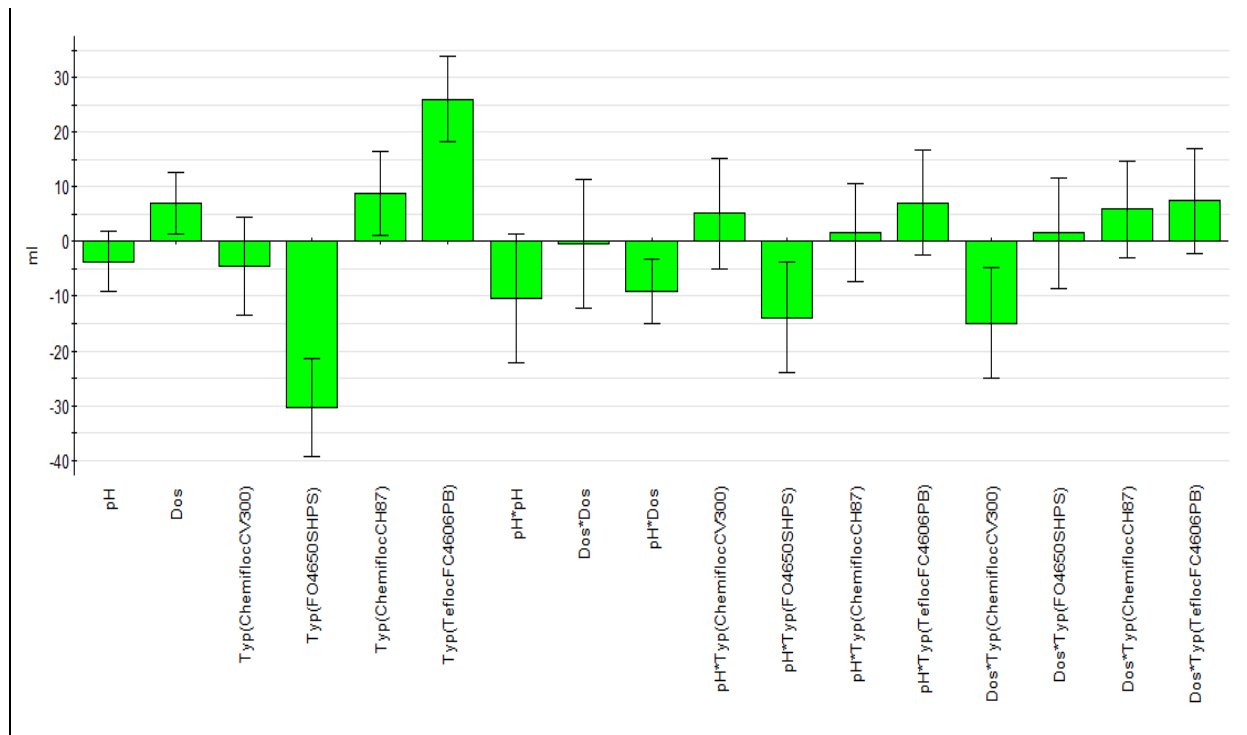
Les graphiques des coefficients sont donnés dans la et les résultats observés vérifient les conclusions obtenues à partir des test de la valeur- p .



(a)



(b)



(c)

Figure IV-6 : Graphique des coefficients de 3 réponses pour la boue de Réghaia : (a) facteur de concentration ; (b) MES résiduelles ; (c) volume égoutté

IV.5.2. Optimisation

a. Optimisation mono-objectif

Optimiser $y = f(X, Z)$

Avec $L_i \leq X_i \leq U_i \quad i = 1:3$

Z = Chemifloc CV 300, FO 4650 SH PS, Chemifloc CH 87, Tefloc FC 4606 PB

où L et U sont les limites inférieures et supérieures des facteurs quantitatifs, et i est l'indice des deux facteur quantitatifs X_1 et X_2

Les résultats de maximisation du facteur de concentration et du volume égoutté et de minimisation des MES résiduelles donnés par le logiciel MODDE 6.0 sont illustrés dans le Tableau IV-13 qui montre les effets directs des facteurs sur chaque réponse étudiée. A partir de ces résultats, on peut tirer les conclusions suivantes :

Différemment des résultats obtenus avec la boue de Béni Messous, les résultats obtenus avec la boue de Réghaia sont identiques pour les 3 objectifs d'optimisation. De ce fait, quel que soit l'objectif principal d'optimisation, le polymère Tefloc FC 4606 PB est largement préféré

comme le polymère le plus performant pour la déshydratation et avec des valeurs de pH et de dosage identiques de 4 et 6 g/l respectivement.

Tableau IV-13 : Résultats de maximisation du facteur de concentration F et du volume égoutté V_e , et de minimisation des MES_r pour les boues de Réghaïa (Les optimums en gras)

Type de polymère	pH	Dos (Kg/T MS)	F	MES_r (g/l)	V_e (ml)
Facteur de Concentration					
Chemifloc CV 300	5,487	2	1,675	1,1926	186,953
FO 4650 SH PS	2,5011	6	1,58	1,4365	175,129
Chemifloc CH 87	3,763	6	1,7296	0,9579	204,97
Tefloc FC 4606 PB	4,0418	5,9999	1,8253	0,6798	221,902
MES_r					
Chemifloc CV 300	5,4945	2	1,6756	1,1926	186,954
FO 4650 SH PS	2,5001	6	1,58	1,4365	175,132
Chemifloc CH 87	3,1474	6	1,726	0,9463	205,034
Tefloc FC 4606 PB	3,7129	6	1,8242	0,6767	221,769
Volume égoutté V_e					
Chemifloc CV 300	5,5058	2	1,6756	1,1926	186,955
FO 4650 SH PS	2,5	6	1,58	1,4365	175,132
Chemifloc CH 87	3,4343	6	1,7286	0,9488	205,251
Tefloc FC 4606 PB	3,9449	5,9999	1,8252	0,6782	221,921

b. Optimisation multi-objectif

L'optimisation sous contrainte implicite : En se basant sur les résultats obtenus lors de l'optimisation mono-objectif, nous avons sélectionné les limites sur les contraintes implicites suivantes :

$$F \geq 1,82 ; MES_r \leq 0,68 \text{ g/l} ; V_e \geq 221 \text{ ml}$$

Les résultats de l'optimisation multi-objectifs sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV-14 : Résultats d'optimisation multi-objectif de la déshydratation des boues de Réghaïa

Type de polymère	pH	Dos (Kg/T MS)	F	MES_r (g/l)	V_e (ml)
Facteur de Concentration					
Chemifloc CV 300	5,4991	2	1,6756	1,1926	186,954

FO 4650 SH PS	2,5	5,9998	1,58	1,4365	175,131
Chemifloc CH 87	3,4619	6	1,7287	0,9493	205,249
Tefloc FC 4606 PB	3,7295	6	1,8243	0,6767	221,79
MES_r					
Chemifloc CV 300	5,5047	2	1,6756	1,1926	186,955
FO 4650 SH PS	2,5	6	1,58	1,4365	175,132
Chemifloc CH 87	3,4112	6	1,7284	0,9484	205,249
Tefloc FC 4606 PB	4,1999	6	1,8251	0,6835	221,765
Volume égoutté V_e					
Chemifloc CV 300	5,5025	2	1,6756	1,1926	186,954
FO 4650 SH PS	2,5	5,9999	1,58	1,4365	175,132
Chemifloc CH 87	3,4347	6	1,7286	0,9488	205,251
Tefloc FC 4606 PB	3,739	6	1,8243	0,6767	221,801

Tout d'abord, **le facteur de concentration** est choisi comme fonction objective primaire, tandis que les MES résiduelles et le volume égoutté sont utilisées comme contraintes implicites. Les conclusions suivantes sont tirées du Tableau IV-14 :

- Le facteur de concentration maximal est obtenu avec le polymère Tefloc FC 4606 PB alors que le polymère FO 4650 SH PS donne le pire résultat. Cependant, les valeurs du facteur de concentration données par les 4 polymères sont proches.
- Pour les autres valeurs de réponse, le polymère Tefloc FC 4606 PB donne également des valeurs optimales pour les MES résiduelles et le volume égoutté, et les pires résultats pour ces derniers sont donnés par le polymère FO 4650 SH PS.
- Les valeurs des facteurs d'optimisation ainsi que celles des trois réponses sont d'amplitude similaire pour les deux polymères Tefloc FC 4606 PB et Chemifloc CH 87.
- En conclusion, si l'objectif principal est de maximiser le facteur de concentration, le polymère Tefloc FC 4606 PB doit être préféré comme le meilleur polymère. Cependant, en tenant compte de l'optimisation du coût de consommation de polymère, et également de l'acidification de la boue, le polymère Chemifloc CV 300 peut être utilisé comme polymère de déshydratation, en raison de sa dose optimale 200% plus faible que celle du polymère Tefloc FC 4606 PB et une acidification 47% plus faible.

Ensuite, **les MES résiduelles** sont sélectionnées comme fonction objective primaire, tandis que le facteur de concentration et le volume égoutté sont utilisées comme contraintes implicites.

- Pareil que pour le facteur de concentration, les MES résiduelles maximales sont obtenues avec le polymère Tefloc FC 4606 PB alors que le polymère FO 4650 SH PS donne le pire résultat.
- Les autres valeurs de réponses sont également optimisées avec le polymère Tefloc FC 4606 PB.
- En conclusion, si l'objectif principal est de maximiser le facteur de concentration, le polymère Tefloc FC 4606 PB doit être préféré comme le meilleur polymère même avec une dose élevée.

Enfin, le **volume égoutté** est sélectionné comme fonction objective primaire, tandis que le facteur de concentration et les MES résiduelles sont utilisées comme contraintes implicites. Les conclusions suivantes sont tirées du Tableau IV-14 :

- Le volume égoutté est maximisé avec le polymère Tefloc FC 4606 PB et donne des valeurs optimales pour les deux autres réponses.

D'après les optimisations numériques multi-objectifs, nous constatons que le polymère Tefloc FC 4606 PB est globalement plus performant que les autres.

IV.5.3. Diagrammes des effets directs

La Figure IV-7 représente les effets directs des trois réponses. Ils montrent comment chaque facteur a un impact individuel sur une réaction spécifique.

En se basant sur les graphiques des effets du pH, nous pouvons dire que ce facteur optimise la réponse à une valeur de pH moyenne de 4 à 5. Pour ce qui est du dosage, plus il augmente plus la réponse est optimisée.

Pour le type de polymère, comme a été conclu ci-dessus, c'est le polymère Tefloc FC 4606 PB qui optimise les 3 réponses.

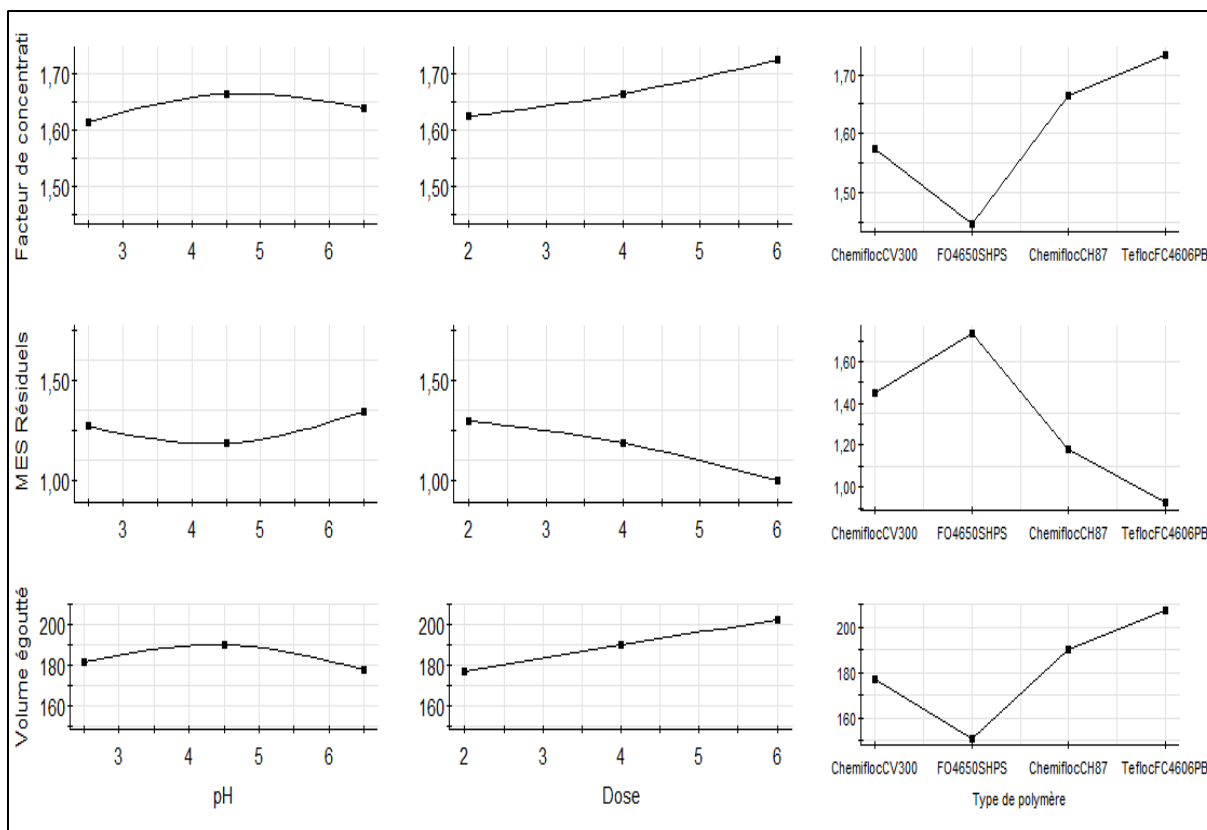


Figure IV-7 : Graphiques des effets directs des trois réponses étudiées pour la boue de Réghaïa

IV.5.4. Diagrammes de contour

Pour une meilleure explication des variables indépendantes et de leurs effets interactifs sur la déshydratation des boues de Réghaïa, des diagrammes de contour sont représentés dans la Figure IV-8. Ils permettent de trouver la réponse optimale pour chaque réponse en fonction des deux facteurs qualitatifs et en fixant le polymère Tefloc FC 4606 PB qui a donné les meilleures performances pour les 3 réponses.

La réponse du système pour le facteur de concentration est donnée à une valeur de 1,823, pour les MES résiduelles est de 0,677 g/l et le volume égoutté de 221,4 ml.

L'examen des diagrammes de contour des trois critères d'optimisation montrent que les optimums obtenus et illustrés dans le Figure IV-7 sont vérifiés.

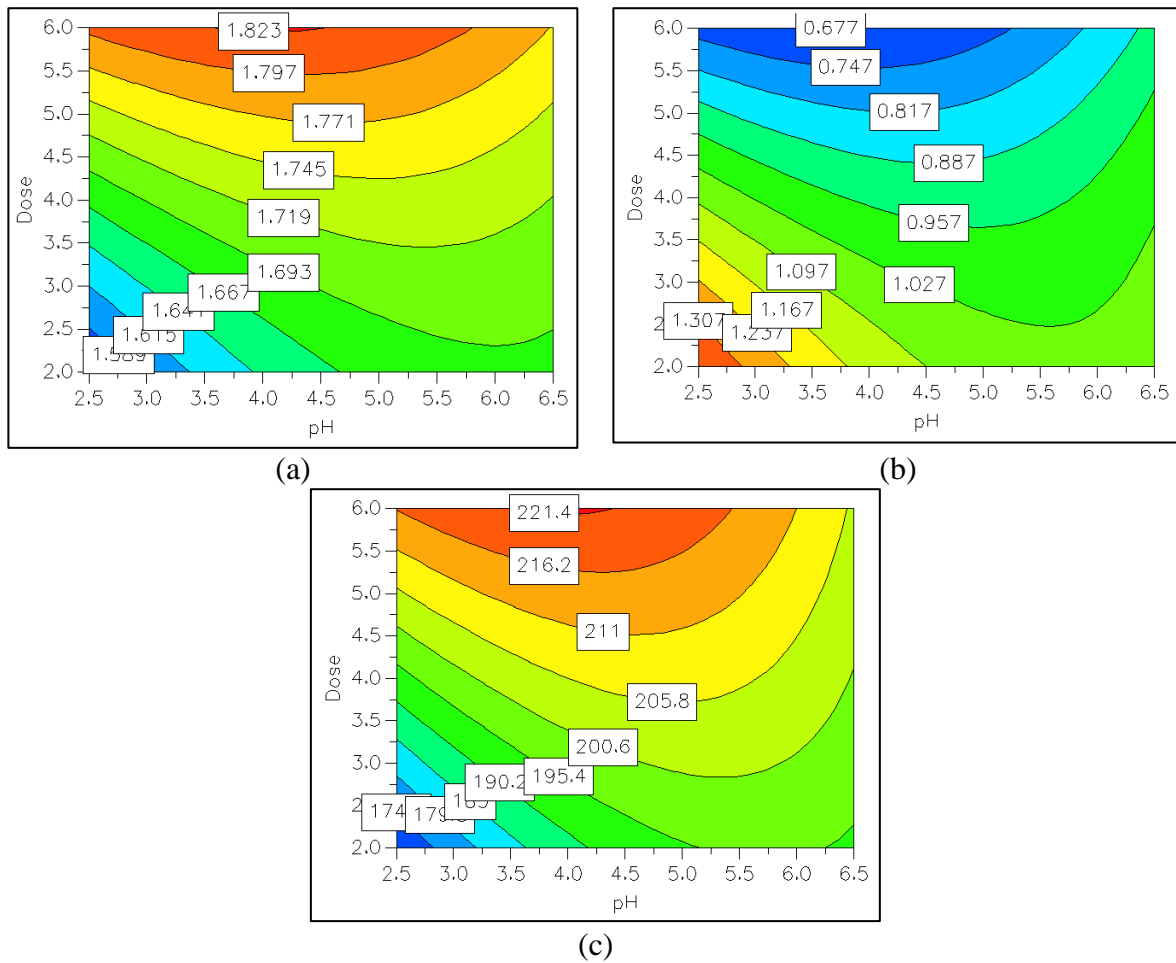


Figure IV-8 : Diagramme de contour de la boue de Réghaïa pour : (a) Le facteur de concentration F, (b) Les MES_r et (c) Le volume égoutté V_e

IV.6. Conclusion

D'après les résultats obtenus pour les deux types de boues, nous constatons que les performances de déshydratation dépendent fortement du type des polymères mais peu de leurs caractéristiques (poids moléculaire, densité de charge). Ces performances sont également fonction de la nature de la boue, la boue de Beni Messous donne des résultats de déshydratation meilleurs que celle de Réghaïa. Par conséquent, la procédure de choix du polymère de déshydratation au niveau des stations d'épuration doit suivre impérativement une série de tests afin de sélectionner le polymère le plus performant pour le type de boue considéré.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'évaluation de la déshydratation des boues est indispensable pour tout système de traitement des boues dont l'objectif est d'optimiser le processus de déshydratation.

Pour cela, nous avons tout d'abord établi la caractérisation des deux boues étudiées ainsi que les polymères utilisés pour leur conditionnement. Ensuite, l'évaluation du procédé de déshydratation a été effectuée par égouttage des boues après leur conditionnement. La modélisation et l'analyse des résultats a été effectuée à l'aide d'un plan d'expérience D-optimal donné par le logiciel MODDE 6.0 qui permet d'estimer les effets des différents paramètres d'optimisation choisis ainsi que d'optimiser les critères d'évaluation de la performance du procédé. Pour ce faire, nous avons examiné l'influence du pH initial de la boue, le type de polymère ainsi que son dosage, sur trois critères différents : le facteur de concentration, les MES résiduelles et le volume égoutté après 10 min. Les modèles mathématiques et les optimisations mono-objectif permettent de tirer les conclusions suivantes :

La relation entre les réponses et les variables utilisées dans ce travail est bien représentée par les modèles proposés.

Lorsque les caractéristiques des boues changent, il est souvent nécessaire de changer de flocculant pour obtenir des performances optimales. Le choix du flocculant parmi la vaste gamme de produits dont le poids moléculaire, le type et la densité de charge varient, se fait le plus souvent sur une base purement empirique.

Si l'objectif principal est de maximiser le facteur de concentration avec un dosage minimal, un choix entre les polymères Chemifloc CH 87 et Tefloc FC 4606 PB peut être considéré pour la boue de Beni Messous. Si l'objectif principal est de minimiser les MES résiduelles, un choix entre les polymères Chemifloc CH 87 et Chemifloc CV 300 peut être considéré. Si l'objectif principal est de maximiser le volume égoutté, le polymère Chemifloc CV 300 est le polymère à privilégier.

Pour ce qui est de la boue de Réghaïa, quel que soit l'objectif principal d'optimisation, le polymère Tefloc FC 4606 PB est largement préféré comme le polymère le plus performant pour la déshydratation et avec des valeurs de pH et de dosage identiques de 4 et 6 g/l respectivement.

D'autre part, d'après les optimisations multi-objectif, on constate que pour la boue de Beni Messous, le polymère Chemifloc CH 87 est globalement plus performant que les autres, en termes de performance de déshydratation et d'optimisation du coût de consommation de polymère. Pour ce qui est de la boue de Réghaïa, le polymère Chemifloc CH 87 est plus performant que les autres. Cependant, en tenant compte de l'optimisation du coût de consommation de polymère, et également de l'acidification de la boue, le polymère Chemifloc CV 300 peut être utilisé comme polymère de déshydratation, en raison de sa dose optimale 200% plus faible que celle du polymère Tefloc FC 4606 PB et une acidification 47% plus faible. Néanmoins, ce polymère donne des performances de déshydratation plus faible que celles données par le polymère Tefloc FC 4606 PB.

De ce fait, l'évaluation par égouttage peut être utilisé pour optimiser la dose de polymère, le facteur de concentration, les MES résiduelles dans le filtrat ainsi que le volume d'eau récupéré. Il semble être un outil d'optimisation de la floculation et de la déshydratation.

Cependant, il ne faut pas supposer que toutes les boues produites dans les stations d'épuration réagiront de la même manière avec ces polymères, en raison des caractéristiques différentes des boues. Les propriétés des boues dépendent non seulement des différentes origines des eaux usées, mais aussi des conditions opératoires du traitement de ces dernières. Il est donc nécessaire que chaque station d'épuration réalise une série de tests pour vérifier quels polymères sont les mieux adaptés au type de boues produites. Cependant, le polymère choisi doit pouvoir s'adapter aux différentes évolutions des propriétés des boues. Une fois les polymères sélectionnés, des stratégies de contrôle peuvent être développées pour leur dosage et utilisation.

Des recherches plus approfondies pourraient contribuer à réduire à la fois l'impact économique de ces polymères et des différents procédés de déshydratation, en améliorant leur formule et leur taux de floculation. L'attention doit ensuite se concentrer sur le développement de nouveaux types de polymères à base végétale ou des bio-floculant qui permettent de remplacer une certaine quantité de polymère afin de réduire leur coût de consommation. La réduction de la consommation du polymère par bio-floculant d'origine végétale, permet de minimiser les coûts d'exploitation et les impacts environnementaux.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

A

Addou, Ahmed. *Traitement des déchets: valorisation, élimination*. Ellipses, 2009

APHA American Public Health Association. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Part 1000. American Water Works Association, Water Environment Federation, 1999.

AMAOUZ, Linda, KAKACHI Zoubir. *Optimisation de l'extraction des antioxydants hydrosolubles de feuilles d'olivier* [en ligne]. Thèse de projet de fin d'étude : Génie chimique. Ecole Nationale Polytechnique, 2019. Disponible sur : <http://catalogue1.biblio.enp.edu.dz/>

AMORCE, *Boues de station d'épuration : technique, valorisation et élimination*. Série Technique DT 51, 2012.

ANDERSON, Mark J. et WHITCOMB, Patrick J. *RSM simplified: optimizing processes using response surface methods for design of experiments*. [En ligne] Productivity press, 2016.

Disponible sur : <https://books.google.dz/books?id=1YJZb-f1e40C&lpg=PP1&hl=fr&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>

Arinaitwe, Esau, and Marek Pawlik. "A role of flocculant chain flexibility in flocculation of fine quartz. Part I. Intrinsic viscosities of polyacrylamide-based flocculants." *International Journal of Mineral Processing*, 2013.

Assistance de MINITAB 18. *Interprétation des résultats principaux pour la fonction Analyser un plan de criblage définitif* [en ligne]. [Consulté le 15/06/2022]. Disponible sur à l'adresse : <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/>

B

Baudez, Jean-Christophe, Philippe Coussot, and François Thirion. "Rhéologie des boues de stations d'épuration: études préliminaires pour la maîtrise des stockages et épandages." *Ingénieries eau-agriculture-territoires* 15. 1998, p-33.

Références Bibliographiques

Bauer, Heidi, and Kim, Yong. *Understanding polymer for thickening and dewatering processes*. 2021, pp. 1–10.

BENKADI, Oussama, and Selmane LEZOUL. *Etude de l'efficacité de La Station d'épuration de Réghaïa et l'impact de La Pollution Sur Le Lac de Réghaïa*. 2017.

BOLTO, Brian et GREGORY, John. *Organic polyelectrolytes in water treatment*. Water research, 2007, vol. 41, no 11, p. 2301-2324.

BORÁŇ, Jaroslav, HOUDKOVÁ, Lucie, et ELSÄBER, Thomas. *Processing of sewage sludge: Dependence of sludge dewatering efficiency on amount of flocculant*. Resources, Conservation and Recycling, 2010, vol. 54, no 5, p. 278-282.

Bratby, John. *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment*. IWA publishing, 2016.

Breton Françoise, *Procédés de déshydratation mécanique des boues : l'ensemble des filières progressent* [en ligne]. [Consulté le 22/05/2022]. Disponible sur : <https://www.revue-ein.com/article/les-boues-et-leur-traitement>

C

Canler, J. P., and J. M. Perret. *La réduction de boues par voie biologique par le procédé MycET : Document de Synthèse*. Centre de Lyon. 2013.51p.

CARTER, Matilda. *Coagulants and flocculants for water treatment*. [en ligne].2017. Disponible sur : <https://docplayer.net/46169775-Coagulants-and-flocculants-for-water-treatment.html>

CHANG, Shing I. *Some properties of multiresponse D-optimal designs*. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1994, vol. 184, no 2, p. 256-262.

D

Das, Dipesh. *Determination of optimum polymer dose for Grand Forks Wastewater Treatment Plant lagoon sludge dewatering*. The University of North Dakota, 2013.

DJADEL, Sanaa, BELMOKHTAR Fatma. *Essai d'un bio-floculant: Application à l'égouttage de la boue stabilisée de la STEP Salamandre de Mostaganem* [en ligne]. Mémoire de fin

Références Bibliographiques

d'études : Génie des procédés. Mostaganem : Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2019.

DROESBEKE, Jean-Jacques, FINE, Jeanne, et SAPORTA, Gilbert. *Plans d'expériences: applications en entreprise*. 7e Journées d'étude en statistique, Marseille. l'Association pour la statistique et ses utilisations et la Société statistique de France, 1996.

G

Ginisty, Pascal, et al. *Correlations between floc characteristics and drainability properties: How to define a good flocculation?*. 11th World Filtration Congress. 2012.

GRAHAM, Todd M. *Predicting the performance of belt filter presses using the Crown Press for laboratory simulation*. Clemson univ sc-coll of engineering, 1999.

Goupy, Jacques. *Tutoriel LES PLANS D ' EXPERIENCES* [en ligne] 2006, pp. 74–116.
Disponible sur: <https://www.rocq.inria.fr/axis/modulad/numero-34/Goupy-34/goupy-34.pdf>

GOUPY, Jacques et CREIGHTON, Lee. *Introduction aux plans d'expériences: avec applications*. Paris, 2013.

H

HOUAM, Yahia. *Commande multi-objectifs en utilisant les inégalités matricielles linéaires (LMIs) et les algorithmes génétiques*. 2013. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.

HOUGHTON, J. J., QUARMBY, J., et STEPHENSON, T. *Municipal wastewater sludge dewaterability and the presence of microbial extracellular polymer*. Water Science and Technology, 2001, vol. 44, no 2-3, p. 373-379.

Hyrycz, Michał, et al. *A review of flocculants as an efficient method for increasing the efficiency of municipal sludge dewatering: Mechanisms, performances, influencing factors and perspectives*. Science of The Total Environment (2022): 153328.

Références Bibliographiques

J

Jardé, Emilie. *Composition organique de boues résiduelles de stations d'épuration lorraines: caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation*. Diss. Université Henri Poincaré-Nancy I, 2002.

Jemali A., Soudi B., and Berdai H. *Valorisation Agricole Des Boues Résiduelles: Valeur Fertilisante et Leur Impact Sur Les Sols*. Vol I: Land and Water Use, no. 1, 1998, pp. 1–16.

JIN, Bo, WILÉN, Britt-Marie, et LANT, Paul. *A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge*. Chemical Engineering Journal, 2003, vol. 95, no 1-3, p. 221-234.

Jorand F., Guicherd P., Urbain V., Block J. C. *Hydrophobicity of activated sludge flocs and laboratory-grown bacteria*. Water Science and Technology 30.11 (1994): 211-218.

K

KARR, Philip R. et KEINATH, Thomas M. *Influence of particle size on sludge dewaterability* [en ligne]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1978, p. 1911-1930.

KRAPF, Marie-Eve. *Agrégation de cellules bactériennes par des polymères cationiques (polyéthylèneimine): influence de la masse moléculaire du polymère et de la présence/absence de surstructures exopolymériques bactériennes sur la déshydratation des boues biologiques*. 2012. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.

KURAM, Emel, OZCELIK, Babur, BAYRAMOGLU, Mahmut, et al. *Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments*. Journal of Cleaner Production, 2013, vol. 42, p. 159-166.

L

Ladjel, Farid, and Sonia Abbou. *Perspectives de Valorisation Agricole et Énergétique Des Boues Issues Des STEP En Algérie*. Office National De L'Assainissement, 2014.

LAJOIE, Curtis A., LAYTON, Alice C., GREGORY, Ingrid R., et al. *Zoogleal clusters and sludge dewatering potential in an industrial activated-sludge wastewater treatment plant*. Water Environment Research, 2000, vol. 72, no 1, p. 56-64.

Références Bibliographiques

LEE, Byung Joon et SCHLAUTMAN, Mark A. *Effects of polymer molecular weight on adsorption and flocculation in aqueous kaolinite suspensions dosed with nonionic polyacrylamides*. Water, 2015, vol. 7, no 11, p. 5896-5909.

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.

Lu, Yi, et al. *Significances of deflocculated sludge flocs as well as extracellular polymeric substances in influencing the compression dewatering of chemically acidified sludge*. Separation and Purification Technology 176 (2017): 243-251.

M

MAZOUNI, Abdelkrim, and Amar RAMDANI. *Traitement et valorisation des boues de station d'épuration d'Oued D'Hous*. la ville de Bouira. Diss. Université de Bouira, 2017.

MIKKELSEN, Lene Haugaard et KEIDING, Kristian. *Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to dewatering*. Water research, 2002, vol. 36, no 10, p. 2451-2462.

N

Novak, John T., and James H. O'Brien. *Polymer conditioning of chemical sludges*. Journal (Water Pollution Control Federation) (1975): 2397-2410.

O

OLIVIER, Jérémy, GINISTY, Pascal, et VAXELAIRE, Jean. *Characterisation of sewage sludge flocculation and gravity drainage*. In : 14ème Congrès de la Société Française de Génie des Procédés. 2013.

P

Pons, Marie-Noëlle, et al. *Analyse du cycle de vie-Épuration des eaux usées urbaines*. Techniques de l'Ingénieur (2008): Dossier-G5820.

Références Bibliographiques

Pradel, M., Murielle Richard, and A. L. Reverdy. *Analyses du cycle de vie des filières de traitement et de valorisation des boues issues du traitement des eaux usées. Inventaire du Cycle de Vie et principales sources d'optimisation des filières de traitement et de valorisation des boues issues du traitement des eaux usées*. Diss. irstea, 2013.

R

Raynaud, Martine. *Couplage de caractérisations mécanique et physico-chimique en vue d'analyser les limites de la déshydratation des boues résiduelles urbaines*. Diss. Doctorat Génie des Procédés, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2010.

S

Saint-pierre, Xabi. *Procédure de Réduction de Consommation de Polymère*. 2009.

Sardeing, Rodolphe, Martine Poux, and Catherine Xuereb. *Procédé d'oxygénation et de brassage pour le traitement biologique des eaux usées*. Techniques de l'ingénieur. Environnement 1.IN44 (2005).

S. N. F. Floerger *Deshydratation Des Boues* [en ligne]. Andrézieux Cedex – France.
[Consulté le 14/05/2022] Disponible sur <https://www.snf.com/wp-content/uploads/2019/12/Traitement-des-Eaux-D%C3%A9shydratation-des-Boues-FR.pdf>

SOLTANI, Nassima. *Optimisation de l'adsorption et de la biosorption du phénol sur charbon actif en batch* [en ligne]. Thèse de fin d'études : Génie de l'Environnement. Ecole Nationale Polytechnique, 2010. Disponible sur : <http://catalogue1.biblio.enp.edu.dz/>

SUEZ. *Conditionnement des boues* [en ligne]. Consulté le 31/05/2022. Disponible sur: <https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/traitement-des-boues-liquides/conditionnement-des-boues>

Sung Ng, W., Connal, L.A., Forbes, E., Mohanarangam, K., Franks, G.V. *In situ study of aggregate sizes formed in chalcopyrite-quartz mixture using temperature-responsive polymers*. Adv. Powder Technol. 2018

Références Bibliographiques

T

Tazi, Oumaima. *Optimisation des conditions opératoires pour la déshydratation des boues d'épuration par la technique de gel/dégel en régions nordiques (cas du village de Salluit)*. Diss. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 2018.

TO, Vu Hien Phuong, NGUYEN, Tien Vinh, VIGNESWARAN, Saravanamuth, *et al.* *A review on sludge dewatering indices*. *Water science and technology*, 2016, vol. 74, no 1, p. 1-16.

TRIEFENBACH, Fabian. *Design of experiments: the D-optimal approach and its implementation as a computer algorithm*. A Thesis for a Bachelor Degree, Information and Communication Technology, Umea University, Sweden, 2008.

V

Vesilind, P. Aarne. *The role of water in sludge dewatering*. *Water Environment Research* 66.1 (1994): 4-11.

VESILIND, P. Aarne. *Capillary suction time as a fundamental measure of sludge dewaterability*. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1988, p. 215-220.

W

WAHDAME, Bouchra. *Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences*. 2006. Thèse de doctorat. Université de Franche-Comté; Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

Wei, Hua, *et al.* *Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: a review*. *Water research* 143 (2018): 608-631.

Y

YUKSELER, Hande, TOSUN, İsmail, *et* YETIS, Ulku. *A new approach in assessing slurry filterability*. *Journal of Membrane Science*, 2007, vol. 303, no 1-2, p. 72-79.

Z

Zheng, Huaili, et al. "*UV-initiated polymerization of hydrophobically associating cationic flocculants: Synthesis, characterization, and dewatering properties.*" *Chemical engineering journal* 234 (2013): 318-326.


ZHENG, Huaili, SUN, Yongjun, GUO, Jinsong, *et al.* *Characterization and evaluation of dewatering properties of PADB, a highly efficient cationic flocculant.* *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, vol. 53, no 7, p. 2572-2582.

Zodi, Salim. *Étude de l'épuration d'effluents de composition complexe par électrocoagulation et des couplages intervenants entre le traitement électrochimique et l'étape de séparation: application à l'industrie textile et papetière.* Diss. Université de Lorraine, 2012.

ANNEXES

Annexes : Fiches techniques

Annexe 1 : Polymère Chemifloc CV 300



Chemipol

CHEMIFLOC CV 300
Polyélectrolyte

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 500 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 gr/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 en gager notre responsabilité.

Annexe 2 : Polymère FO 4650 SH PS



Technical Data Sheet

SNF (UK) Limited, Solutions House, Ripley Close, Normanton WF6 1TB, United Kingdom
phone: 01924-311000, e-mail: sds@snf.fr

FLOPAM™ FO 4650 SH

Form:	Granular solid
Color:	White
Ionic character:	Cationic
Charge density:	Very high
Molecular Weight:	High
Particle size:	> 2 mm : <= 2 % < 0.15 mm : <= 6 %
Approx. bulk density:	0.85
Brookfield viscosity† (cps):	@ 5.0 g/L : 580 @ 2.5 g/L : 180 @ 1.0 g/L : 100
pH:	2.5 - 4.5 @ 5 g/L
Recommended working concentration (g/l):	4
Maximum use concentration (g/l):	10
Dissolution time (minutes) in DI water @ 5 g/l, 25°C:	60
Stability of DI solution (days):	1
Storage temperature (°C):	0 - 35
Shelf life (months)*:	24
† Average values given for determination of preparation and dosing equipment for which a viscosity 10 times lower can be used. * When stored inside a building at a stable temperature between 5°C and 30°C.	
Packing sizes	
Multiwall bags	25 kg
Big Bags	750 kg
Other dimensions	On request

The data in this Technical Data Sheet is provided for information only. It is correct to the best of our knowledge, information and belief at the date of its publication. It does not constitute a specification and no liability is assumed, nor freedom from any existing patents.

Annexe 3 : Polymère Tefloc FC 4606 PB



® = registered Trademark of TESIS S.L

Tefloc[®] FC _PB

GAMME POUDRE

Polyélectrolytes cationiques solides

La description	Floculants à base de polyacrylamide de masse moléculaire élevée, qui présentent différents degrés de charge cationique. Ils sont fournis sous forme poudre à écoulement libre.
Structure chimique	Copolymères d'acrylamide et de monomère cationique quaternisé.
Utilisation principale	Polyélectrolytes pour le conditionnement de divers substrats municipaux et industriels avant la séparation solide / liquide mécanique ou statique. Ces produits ne peuvent pas être utilisés dans des applications d'eau potable. En cas de doute quant à la pertinence d'une application donnée, veuillez contacter votre représentant local.
Avantages	Hautement efficace dans un large éventail d'applications (par ex. Déshydratation mécanique et épaissement, flottaison et clarification). Fonctionnement sur une large gamme de pH (4 - 9).
Propriétés typiques	Apparence: Blanc, poudre Densité Apparente: Approx. 0.7 g/cm ³ pH of 1 % solution à 25 °C: 3.6 – 4.6

Produit	Cationique Charge	Poids Moléculaire	Apparent Viscosity (cP) à 25 °C à conc. montré (%)		
			0.25	0.50	1.0
Tefloc FC 4206 PB	Très faible	haut	350	600	1350
Tefloc FC 4406 PB	moyenne	haut	250	500	1400
Tefloc FC 4606 PB	Moyenne-haut	Très haut	350	800	2200
Tefloc FC 4806 PB	haut	Très haut	350	700	1750