
Mémoire

Auteur : Youmsi Massoudom, Astride

Promoteur(s) : Jupsin, Hugues

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée en gestion intégrée des ressources en eau

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/14231>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Faculté des Sciences

Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

**OPTIMISATION DU PROCÉDE DE
DESHYDRATATION MECANIQUE DES BOUES
MIXTES DES EPAISSISSEURS A TRAVERS LE
POLYMERE DE LA STATION D'EPURATION DES
EAUX DE BRUXELLES-NORD**



Mémoire rédigé par Astride YOUMSI MASSOUDOM

En vue de l'obtention du grade de Master en Sciences et Gestion de
l'Environnement, à finalité spécialisée en Gestion Intégrée des Ressources en Eau

Promoteur : **Hugues JUPSIN**

Comité de lecteurs :

Patrizia PERO

Ekaterina ANDREEVA

Joost WELLENS

Année Académique 2021-2022

« Copyright »

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège.

*L'autorité académique est représentée par le promoteur membre du personnel enseignant de l'Université de Liège.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : Astride Youmsi Massoudom

Adresse électronique : astrideyoumsi2@gmail.com

DEDICACES

A LA FAMILLE MBOUTCHOUANG

Pour leur soutien inconditionnel

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été réalisé dans l'usine Aquiris by Veolia au sein de la filière boues du département d'exploitation. Il n'aurait pu si bien aboutir sans le soutien et l'aide de nombreuses personnes.

Tout d'abord, Je tiens à remercier respectueusement Monsieur **Hugues JUPSIN**, mon Directeur de mémoire pour avoir accepté d'encadrer et guider ce travail de fin d'études. Un merci chaleureux pour votre disponibilité, vos orientations et corrections. Et, aux membres du jury qui ont bien voulu examiner et évaluer ce travail, je vous adresse mes vifs remerciements.

Je souhaite remercier de tout cœur Monsieur **Stéphane DELERIS**, directeur général, Madame **Patrizia PERO**, Directeur usine et Responsable du service Conduite des installations, pour l'opportunité de stage et la collaboration pour ce travail.

Mes plus vifs remerciements vont également à l'endroit d'**Ekaterina ANDREEVA** (Ingénieur process) pour avoir suivi de très près l'avancement de mes travaux. Partant de l'élaboration des tâches à réaliser, jusqu'à la réalisation des tests sur les centrifugeuses. A travers vous, que tout le personnel d'Aquiris trouve mes sincères remerciements notamment : **Jérôme, l'équipe du laboratoire ainsi que les opérateurs** pour leurs conseils, leur disponibilité et le suivi minutieux qui m'ont permis de faire les rondes sur site, de prélever mes échantillons et faire des analyses approfondies.

Je remercie infiniment le corps enseignant et administratif du Campus Environnement d'Arlon, pour la qualité des enseignements, l'encadrement, et l'écoute. Je sors de ce Master mieux outillée, confiante et sereine.

Je remercie également Monsieur **Serge CLOOTS** de la Société Nouvelle Floerger (SNF) pour avoir répondu à mes questions et pour ses éclaircissements sur les types de polymère utilisé dans la filière boue de l'usine Aquiris.

Un merci très chaleureux à ma famille, plus particulièrement à Monsieur & Madame **MBOUTCHOUANG** et mes petites cousines pour leur motivation, leur soutien et leur encadrement inconditionnel.

Je ne finirai pas sans remercier mes frères et sœurs, mes ami(e)s et toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin.

Oui, vos précieux conseils m'ont permis de m'accrocher et de rester motivée, même dans les moments difficiles. Recevez du plus profond de mon être, ma sincère gratitude.

RESUME

Dans un contexte d'augmentation des volumes de boues résiduelles produits avec la croissance de la population, optimiser le processus de déshydratation mécanique par les centrifugeuses est crucial pour la station d'épuration des eaux usées de Bruxelles-Nord. Cette dernière assure l'assainissement des eaux usées urbaines des 2/3 de la région de Bruxelles-capitale et de ses environs. Elle a une capacité de 1,4 millions équivalents habitants et a vu le jour en octobre 2007. Les performances de la station sont conditionnées autant par le secteur de traitement de l'eau, que par celui de traitement des boues, ainsi que par le secteur des utilités. Le sujet de cette étude a porté sur la filière boues et plus particulièrement sur le paramètre siccité des boues déshydratées qui est celui qui impacte fortement le procédé en lui-même et la filière de valorisation. Ainsi, avant tout, il est important de connaître le fonctionnement du processus de traitement de boues et des centrifugeuses et le mode d'action des polymères.

Des rondes matinales accompagnées d'un opérateur du site ont d'abord été menées afin de voir et comprendre comment se déroule le processus de traitement de boues au sein de la station. Ensuite, des expériences de dosage des polymères utilisés sur site sur les boues mixtes ont été faites au laboratoire pour trouver le polymère qui réagirait le mieux à basse concentration et le taux de traitement du réactif. A travers ces tests, il a été constaté que le jar-test n'était pas approprié pour l'examen des fluides visqueux (boues) ; de nos jours, il existe une norme belge (NBN EN 1470) qui régit ce domaine avec un canevas à suivre pour effectuer les tests expérimentaux sur les boues issues du traitement des eaux (résiduelles, potables) et les boues digérées. A la fin des tests effectués manuellement, il en ressort que le polymère FO 4695 utilisé de base pour les épaisseurs a donné un très bon résultat comparé à celui du polymère FO 4660 habituellement utilisé. Avec une concentration de 2,87 g/l, on obtient un taux de traitement optimal de 3 kg/t de Matière Sèche, alors qu'il faut une concentration de réactif 4,15 g/l à la même concentration de boues (39,48 g/l) pour obtenir le même taux de traitement.

Dans un second temps, ce polymère a été préparé et testé sur une centrifugeuse, le test a malheureusement prouvé que le polymère des épaisseurs n'est pas approprié pour les centrifugeuses. Certes il y a formation des floccs mais ces derniers ne sont pas assez solides pour résister à la force centrifuge des machines (environ 3000 à 5000 g). On a obtenu des centrats sales (4,18 g/l de MS) et une siccité de 18,5 % avec un taux de traitement de 6,5 kg/t MS. Ensuite, un test a été également fait avec le polymère FO 4660 sur la centrifugeuse. Il en ressort, un très bon fonctionnement car on a observé des centrats très propres (1,59 g/l de MS) et une siccité de 16,55 % avec un taux de traitement de 3,2 kg/t MS.

Enfin, un suivi de la consommation de ces réactifs a été faite afin d'estimer leur coût. Environ 3 sacs sont consommés sur 7 jours et cela induit un coût de 24 204 euros/mois. 50 sachets de 50 kg chacun de polymère biologique sont consommés sur 14 jours et a un coût de 4 034 euros/mois. Et la centrale à polymère de l'épaisseur pluvial a consommé 33 sachets de 15 kg chacun durant 12 jours ce qui aboutit à un coût de 1 238 euros/mois. Pour une meilleure optimisation de la déshydratation des boues, il est recommandé de prévoir une cuve à eau pour la préparation des polymères pour les centrifugeuses et une autre pour les épaisseurs

accompagnés de débitmètres. Pour terminer, il est impératif de changer les pompes qui envoient le polymère vers les centrifugeuses car elles ne permettent pas de pomper un faible débit.

Mots clés : traitement des eaux, traitement des boues, boues résiduaires, optimisation, polymères, déshydratation mécanique, taux de traitement, siccité, centrifugeuses.

ABSTRACT

In a context of increasing volumes of waste sludge produced with the growth of the population, optimizing the mechanical dewatering process by centrifuges is crucial for the Brussels-North wastewater treatment plant. This plant ensures the treatment of urban wastewater for 2/3 of the Brussels-Capital Region and its surroundings. It has a capacity of 1.4 million equivalent inhabitants and was opened in October 2007. The performance of the plant is conditioned as much by the water treatment sector, as by the sludge treatment sector, as by the utilities sector. The subject of this study was the sludge sector and more particularly the dryness parameter of the dewatered sludge which has a strong impact on the process itself and on the valorization sector. Thus, before anything else, it is important to know how the sludge treatment process and the centrifuges work and how the polymers work.

First, morning rounds with a site operator were conducted to see and understand how the sludge treatment process works in the plant. Then, experiments were conducted in the laboratory to determine which polymer would react best at low concentration and the treatment rate of the reagent. Through these tests, it was found that the jar-test was not suitable for the examination of viscous fluids (sludge); nowadays, there is a Belgian standard (NBN EN 1470) that governs this field with a framework to follow for experimental tests on sludge from water treatment (wastewater, drinking water) and digested sludge. At the end of the tests carried out manually, it was found that the FO 4695 polymer used as a base for the thickeners gave a very good result compared to the FO 4660 polymer usually used. With a concentration of 2.87 g/l, an optimal treatment rate of 3 kg/t of Dry Matter is obtained, whereas a reagent concentration of 4.15 g/l at the same sludge concentration (39.48 g/l) is required to obtain the same treatment rate.

In a second step, this polymer was prepared and tested on a centrifuge, the test unfortunately proved that the polymer of thickeners is not suitable for centrifuges. Although flocs are formed, they are not strong enough to withstand the centrifugal force of the machines (about 3000 to 5000 g). We obtained dirty centrals (4,18 g/l of MS) and a dryness of 18,5 % with a treatment rate of 6,5 kg/t MS. Then, a test was also made with the polymer FO 4660 on the centrifuge. The results show that the centrifuge is working very well, with very clean centrates (1.59 g/l of DM) and a dryness of 16.55% with a treatment rate of 3.2 kg/t DM.

Finally, a follow-up of the consumption of these reagents was made in order to estimate their cost. Approximately 3 bags are consumed over 7 days and this induces a cost of 24 204 euros/month. 50 bags of 50 kg each of biological polymer are consumed over 14 days and has a cost of 4 034 euros/month. And the polymer plant of the rain thickener consumed 33 bags of 15 kg each during 12 days which results in a cost of 1 238 euros/month. For a better optimization of the sludge dewatering, it is recommended to provide a water tank for the preparation of polymers for the centrifuges and another one for the thickeners with flow meters. Finally, it is imperative to change the pumps that send the polymer to the centrifuges because they do not allow to pump a low flow.

Keywords: water treatment, sludge treatment, waste sludge, optimization, polymers, mechanical dewatering, treatment rate, dryness, centrifuges.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	2
REMERCIEMENTS.....	3
RESUME.....	4
ABSTRACT	6
LISTE DES ABREVIATIONS.....	9
UNITES	9
LISTE DES TABLEAUX	10
LISTE DES FIGURES.....	11
INTRODUCTION.....	12
1.1. Contexte de l'étude.....	12
1.2. Problématique.....	13
1.3. Hypothèses de l'étude.....	14
1.4. Objectifs de l'étude.....	14
1.4.1. Objectif principal	14
1.4.2. Objectifs spécifiques.....	14
1.5. Résultats attendus.....	14
1.6. Méthodologie.....	15
Chapitre 1 : REVUE DE LITTERATURE.....	16
1.1. Présentation du processus de traitement des eaux usées	16
1.1.1. Origine des boues.....	16
1.1.2. Types de boues et production	18
1.1.3. Composition et structure des boues influençant la déshydratation	19
1.2. Procédés de traitement des boues	21
1.2.1. Epaissement	21
1.2.2. Stabilisation.....	22
1.2.3. Déshydratation mécanique	22
1.2.4. Synthèse des différentes techniques	26
1.2.5. Filière d'élimination ou valorisation des boues	27
1.2.6. Cas de la Belgique.....	30
1.2.7. Impacts des caractéristiques physico-chimiques des boues influençant les performances de déshydratation.....	30
1.3. Etat de l'art « Polymère synthétique »	33
1.3.1. Mécanismes physico-chimiques de coagulation/floculation.....	33
1.3.2. Paramètres des floculants exerçant une influence sur la déshydratation des boues	
	35
Chapitre 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODES	37

2.1. Matériels expérimentaux	37
2.1.1. Présentation simplifiée du processus de traitement des boues à l'usine.....	37
2.1.2. Boues.....	38
2.1.3. Polymères/Floculants organiques.....	38
2.1.4. Centrifugeuses	39
2.1.5. Protocole.....	41
Chapitre 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	44
3.1. Résultats	44
3.1.1. Jar test sans dilution avec le polymère FO 4660.....	44
3.1.2. Jar test avec dilution	45
3.1.3. Résultats du test manuel	46
3.1.4. Suivi de la consommation des polymères	50
3.1.5. Test sur les centrifugeuses	51
3.2. Discussions	53
3.2.1. Jar-test.....	53
3.2.2. Test manuel.....	53
3.2.3. Evaluation de la consommation des polymères	54
3.3.4. Tests sur les centrifugeuses.....	54
Chapitre 4 : RECOMMANDATIONS	55
4.1. Au niveau des centrales à polymères	55
4.2. Au niveau des centrifugeuses.....	55
4.3. Pour les prochains tests.....	55
CONCLUSION.....	57
ANNEXES.....	59
BIBLIOGRAPHIE	63

LISTE DES ABREVIATIONS

ABREVIATIONS

- CO₂ : Dioxyde de Carbone
DCO : Demande Chimique en Oxygène
EH : Equivalent Habitant
EPS : Exopolymère
MES : Matière en Suspension
MS : Matières Sèches
OTV : Omnium de Traitement et de l'Environnement
OVH : Oxydation par Voir Humide
PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
RSF : Resistance Spécifique à la Filtration
SBGE : Société Bruxelloise de l'Environnement
SCF : Temps de Succion Capillaire
STEP : Station d'Épuration des Eaux usées

UNITES

- g: gramme
g/L gramme par litre
kg/h kilogramme par heure
L Litre
m mètre
mm millimètre
m/s mètre par seconde
m/s² mètre par seconde au carré
m³ mètre cube
m³/h mètre cube par heure
m³/s mètre cube par seconde
mg/L milligramme par litre
ml/ min millilitre par min
Mj/kg mégajoules par kilogramme

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Résumé des avantages et inconvénients des différentes technologies de déshydratation mécanique.....	26
Tableau 2: comparaison faite des différents types de technique de déshydratation mécanique des boues biologiques	27
Tableau 3:Teneurs maximales de métaux lourds dans les boues	28
Tableau 4 : Evolution des paramètres de déshydratation d'une boue activée non flocculée selon le pH	Error! Bookmark not defined.
Tableau 5: Caractéristiques des polymères	38
Tableau 6: Comparaison des deux polymères avec un même taux de traitement	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration	16
Figure 2: Types de boues issus au cours de traitement de l'eau (Raynaud, 2010).....	19
Figure 3:Schéma d'un floc de boue activée	20
Figure 4: La structure en trois niveaux des floccs de boue activée (Tosoni, 2015)	20
Figure 5: Schéma simplifié de la filière de traitement des boues (Raynaud, 2010)	21
Figure 6: Schéma d'un filtre à bandes (Tosoni, 2015).....	23
Figure 7: Schéma d'une décanteuse centrifuge à axe horizontal (Raynaud, 2010)	24
Figure 8: Schéma d'un filtre-presse à plateau (Olivier, 2003).....	25
Figure 9: Schéma d'un filtre-presse à membranes (Pambou, 2016)	26
Figure 10: Epandage agricole des boues de STEP ((Martin, 2020)	28
Figure 11 : Exemple de mono-incinérateur	29
Figure 12: Gestion des boues des STEP en Wallonie (SPGE, 2022).....	30
Figure 13: Mode d'action d'un coagulant (SNF)	34
Figure 14: Types de flocculants : anionique (à gauche), cationique (à droite)	34
Figure 15: Mode d'action de la flocculant.....	35
Figure 16: Différentes familles de structure de flocculant (SNF)	36
Figure 17: Les quatre centrales à polymère (respectivement 3100, 3200, 3300 et 3400)	39
Figure 18 : Evolution des paramètres des centrifugeuses influençant la siccité.....	40
Figure 19: Matériel utilisé	43
Figure 20: Centrifugeuse 2 de l'usine	43
Figure 21: Observation après 5 min d'agitation.....	44
Figure 22 : Observation après 20 min d'agitation.....	44
Figure 23: Observation après 5 min d'agitation.....	45
Figure 24: Observation après 60 min d'agitation.....	45
Figure 25: Volume de boue décantée du jar test avec dilution.....	46
Figure 26: Consommation des polymères	Error! Bookmark not defined.
Figure 27: Consommation des polymères	50
Figure 28: Evolution des prix en usine.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 29: Résultats obtenu après un test avec fonctionnement à 100% d'Actiflo.....	47
Figure 30: Taux de traitement du polymère FO 4660 en fonction de la concentration de la boue sur la durée d'étude.....	47
Figure 31: Taux de traitement de polymère 4695 en fonction de la concentration de boue.....	48
Figure 32: Taux de traitement du polymère FO 5449 en fonction de la concentration de boue	49
Figure 33 : Résultats obtenus lors du test du polymère FO 4695 sur la centrifugeuse.....	51

INTRODUCTION

1.1. Contexte de l'étude

Une étude a montré que le monde pourrait être confronté à un déficit en eau de 40 % d'ici 2030 si rien n'est fait pour inverser la situation actuelle (UNESCO, 2020). La croissance galopante de la population mondiale et son corollaire, le développement de l'urbanisation, ont un impact majeur sur les quantités colossales d'eaux usées et de boues d'épuration à traiter par les municipalités. Pour pallier ce problème, une gestion améliorée des eaux usées est essentielle et cruciale à la croissance verte, en particulier dans le contexte du Programme de développement durable à l'horizon 2030. Raison pour laquelle, l'Organisation des Nations Unies (ONU) a défini en 2015 la cible 6.3 des Objectifs de développement durable (ODD) qui vise explicitement la réduction de la pollution et l'amélioration de l'élimination, de la gestion et du traitement des eaux usées et leur impact sur la qualité des eaux. (WWAP, 2017)

Depuis les années 70, différentes directives européennes sont entrées en vigueur afin de protéger les ressources aquatiques, gérer l'eau potable et usée et protéger l'environnement. Il a pourtant fallu attendre la directive de 1991 pour avoir un encadrement plus strict concernant les eaux usées urbaines. La Wallonie, étant préoccupée par l'état écologique et sanitaire de ses cours d'eau, se trouve obligée par la directive européenne 91/271/CEE, d'assainir les eaux usées provenant des agglomérations. Elle exige dans son article 4, 1^{er} paragraphe que « les Etats membres veillent à ce que les eaux urbaines résiduelles qui pénètrent dans les systèmes de collecte soient, avant d'être rejetées, soumises à un traitement secondaire ou à un traitement équivalent selon les modalités suivantes : - au plus tard le 31 décembre 2000 pour tous les rejets provenant d'agglomérations de plus de 15000 EH¹. - au plus tard le 31 décembre 2005 pour tous les rejets provenant d'agglomérations entre 10000 et 15000 EH. - au plus tard le 31 décembre 2005 pour les rejets, dans des eaux douces et des estuaires, provenant d'agglomérations comprises entre 2000 et 10000 EH ».

Le 19 octobre 2006, un cadre sur la politique de l'eau proposée par la Société bruxelloise de gestion de l'eau (SBGE) fut approuvé et signé par le gouvernement de la région de Bruxelles-capitale avec pour objectif principal d'assurer l'assainissement public des eaux résiduelles urbaines. Pour y parvenir, deux stations d'épuration furent construites : celle de Bruxelles sud permettant de traiter les eaux usées du sous-Bassin Sud 360 000 EH. Celle de Bruxelles Nord, d'une plus grande capacité 1,4 million d'EH (Société Bruxelloise de Gestion de l'Environnement, 2012). Valoriser au maximum les sous-produits issus de la chaîne de traitement des eaux usées est devenu un défi majeur pour les opérateurs et décideurs en charge de la gestion des stations d'épuration. Pour relever ce défi, Veolia a imaginé et conçu des services innovants à destination des collectivités depuis 2007, pour les accompagner dans leur transition énergétique et extraire le maximum de matières premières de ces boues d'épuration pour les valoriser. Les sources carbonées présentes dans ces résidus sont transformées en

¹ EH : Equivalent Habitant correspond à la charge polluante d'un effluent d'un rejet moyen journalier de 180 l d'effluent présentant une charge de 90 g de MES, 60 g de DBO5, 135 g de DCO, 9,9 g d'azote total et 2 g de phosphore total.

énergie via la méthanisation tandis que le phosphate et l'azote deviennent de l'engrais dont le monde agricole est friand.

Selon le rapport de la Société publique de gestion de l'eau (SPGE), au 31/12/2018, la Wallonie a traité une capacité de 3 250 000 EH soit 585 000 m³ d'eaux usées. Malgré cette grande capacité de traitement, 1% reste toujours non traité (IW PES, 2022). Près de la moitié a été traité par Aquiris qui est la station d'épuration de Bruxelles-nord.

Aquiris, filiale du Groupe International Veolia Water, est née à la suite d'un appel d'offre de la Région de Bruxelles-capitale pour concevoir, construire et exploiter durant 20 ans la station d'épuration (STEP) de Bruxelles-Nord dont le début d'exploitation date de 2007. Cette station permet de traiter les eaux de deux des trois bassins hydrographiques de la région de Bruxelles et de ses alentours avant de les rejeter dans la Senne. On distingue trois filières : eau, boue et utilités. Si l'eau usée est considérée comme ressource puisque chaque filière a pour finalité, la production d'électricité verte surtout via la filière boue. Pour ce qui est de la filière boue, un traitement spécifique est effectué à l'aide des centrifugeuses. Le travail de ce mémoire porte sur l'optimisation des centrifugeuses 1, 2, 3 et 4 afin d'améliorer le rendement et diminuer le coût.

1.2. Problématique

Le monde grandit, la population aussi. Elle devient de plus en plus urbaine. Son besoin en consommation en eau grandit également et le besoin de la préserver devient un enjeu crucial. Les effluents issus des stations d'épuration et les eaux usées industrielles et municipales contiennent des quantités non négligeables de polluants organiques, inorganiques et microbiens. Ces eaux résiduaires constituent l'une des principales sources de contamination des eaux de surface et souterraines (augmentation de la demande chimique en oxygène (DCO), coloration et eutrophisation des cours d'eau, etc.) (Seyhi et al. 2011). Dans l'optique de palier à ces problèmes, Aquiris, par sa technologie sophistiquée, offre un moyen de la traiter et d'en bénéficier de sa plus-value. Au sein de la station, l'eau usée traitée biologiquement par la filière eau est envoyée directement dans le milieu naturel (Senne) et la boue qui en résulte du processus est pompée et renvoyée vers les épaisseurs où débute le traitement des boues.

La filière boue reste un problème très complexe des STEP car plusieurs facteurs (état des pompes, des centrifugeuses, des boues etc...) et paramètres (température, concentration des boues et des polymères à différents niveaux de la chaîne de traitement etc...) entrent en jeu et son coût d'exploitation peut aller jusqu'à 60% du coût total de traitement d'après les travaux effectués par Arisily et Hajji en 2020 au Maroc. Les boues issues des épaisseurs peuvent être stockées dans les stockeurs, puis envoyées dans la bache d'alimentation des centrifugeuses afin de réduire considérablement le volume avant d'être envoyé aux digesteurs pour une production de biogaz et d'électricité verte grâce à la cogénération. Au niveau des épaisseurs, le polymère FO 4695 est utilisé à faible concentration (maximum 1.2 kg/t MS) pour la floculation (conditionnement). La formation des floes de boues permet de réduire leur volume et d'avoir une concentration en moyenne de 40 g/l dans la bache amont des centrifugeuses (BA). Au niveau des centrifugeuses, le polymère FO 4660 est utilisé en ayant été au préalable dilué (préparation polymère). Pour un bon rendement des centrifugeuses, il faut obtenir une siccité

qui varie de 17% quand l'Actiflo fonctionne et de 18,5 % quand il est en arrêt. Et pour cela, il faut obtenir une bonne dilution du floculant avant son introduction dans les centrifugeuses. Où se pose le problème actuellement puisqu'on a constaté par observation que le polymère moussait beaucoup et formait des grumeaux, ce qui traduit une concentration élevée d'où gaspillage et perte d'argent. Pour tenter de remédier à ce problème, nous apporterons des éléments de réponse aux questions suivantes :

Comment fonctionnent les centrifugeuses ?

Comment réagissent les polymères et quel polymère agit le mieux et à quelle concentration minimale ?

Quel est le coût des polymères de la filière boue par mois ?

1.3. Hypothèses de l'étude

Notre étude repose sur les hypothèses suivantes :

- La variation de la siccité est due au type de polymère utilisé ou des paramètres de la centrifugeuse ;
- La variation de débit d'eau est à l'origine de la formation des grumeaux dans la centrale solution du polymère ;
- Le rendement des centrifugeuses sera amélioré en trouvant le polymère, qui à basse concentration et à basse taux de traitement donnera une siccité comprise entre (16-18,5%) et des centrâts de bonne qualité.

1.4. Objectifs de l'étude

1.4.1. Objectif principal

L'objectif général de cette étude portera sur l'optimisation des centrifugeuses 1, 2, 3 et 4 de traitement des boues de la station.

1.4.2. Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre l'objectif principal, nous passerons par les objectifs spécifiques suivants :

- Présenter le process du traitement des boues au niveau des centrifugeuses 1, 2, 3 et 4 ;
- Présenter le fonctionnement des différentes centrifugeuses et épaisseurs (pluvial et biologie) ;
- Présenter les trois types de polymère utilisé en zone boue et faire des tests de dosage en laboratoire sur la boue mixte de la bache d'alimentation ;
- Proposer une concentration et taux de traitement de polymère qui pourra améliorer la centrifugation.

1.5. Résultats attendus

- Bonne présentation et compréhension du process de traitement des boues à Aquiris ;
- Bonne présentation et compréhension du fonctionnement des centrifugeuses (1, 2, 3, 4 et 5) ;

- Obtenir une meilleure concentration de polymère pour éviter le gaspillage ;
- Améliorer le process pour un bon rendement des centrifugeuses.

1.6. Méthodologie

Afin d'atteindre les résultats cités ci-dessus, nous avons :

- Une revue de littérature Aquiris et scientifique des autres travaux dans le traitement des boues a été fait. Puis des échanges avec les opérateurs, ingénieurs et techniciens ont été réalisés dans le but de mieux comprendre le fonctionnement de la station et aussi où et comment intervenir en cas de problème.
- Tous les matins, une ronde sera faite avec l'opérateur du jour afin de prélever les échantillons pour analyse au laboratoire, et aussi pour les balances rapides afin d'ajuster les paramètres des centrifugeuses et comprendre en touchant du doigt comment le procédé de traitement des boues se réalise. Dans l'après-midi et les jours prévus, les tests étaient réalisés au laboratoire et le calcul de certains paramètres, était fait avec les formules déjà existantes utilisés par l'usine lors de ses précédant tests.
- Une série de recommandation sera faite en fonction des problèmes rencontrés sur site.

Chapitre 1 : REVUE DE LITTERATURE

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter le processus de traitement de l'eau usée au sein de la station, puis, la place des boues dans ce procédé. Ensuite, nous allons décrire les procédés de traitement des boues en fonction des polymères intervenant dans le traitement. Et pour terminer, nous allons présenter les différents types de polymère et leur fonctionnement.

1.1. Présentation du processus de traitement des eaux usées

L'objectif principal des stations d'épuration est la préservation d'un milieu aquatique sain en éliminant des eaux usées toutes les substances polluantes nuisibles à l'environnement. En Belgique, à Bruxelles, nous avons Aquiris qui possède, par ailleurs, l'une des plus larges capacités de traitement en Europe avec 1,4 million d'EH (équivalent-habitant) pour 110 millions de m³ d'eau traitée annuellement (Aquiris, 2008).

1.1.1. Origine des boues

Les boues sont essentiellement générées par le traitement global des eaux usées au sein des stations d'épuration. Certes, toutes les stations n'ont pas les mêmes procédés, mais le fonctionnement en général est similaire en ce qui concerne le traitement des eaux usées résiduaires urbaines et la Figure 1 ci-dessous l'illustre.

Le traitement se divise en plusieurs étapes. Après le prétraitement (dégrillage, dessablage et déshuilage), l'eau subira en suite un traitement biologique et/ou physico-chimique (Krapf, 2012). En fonction de l'importance de la STEP, elle peut également être équipée d'une filière traitement des boues et de production de biogaz afin de tirer parti au maximum de l'énergie récupérable (Aquiris, 2008).

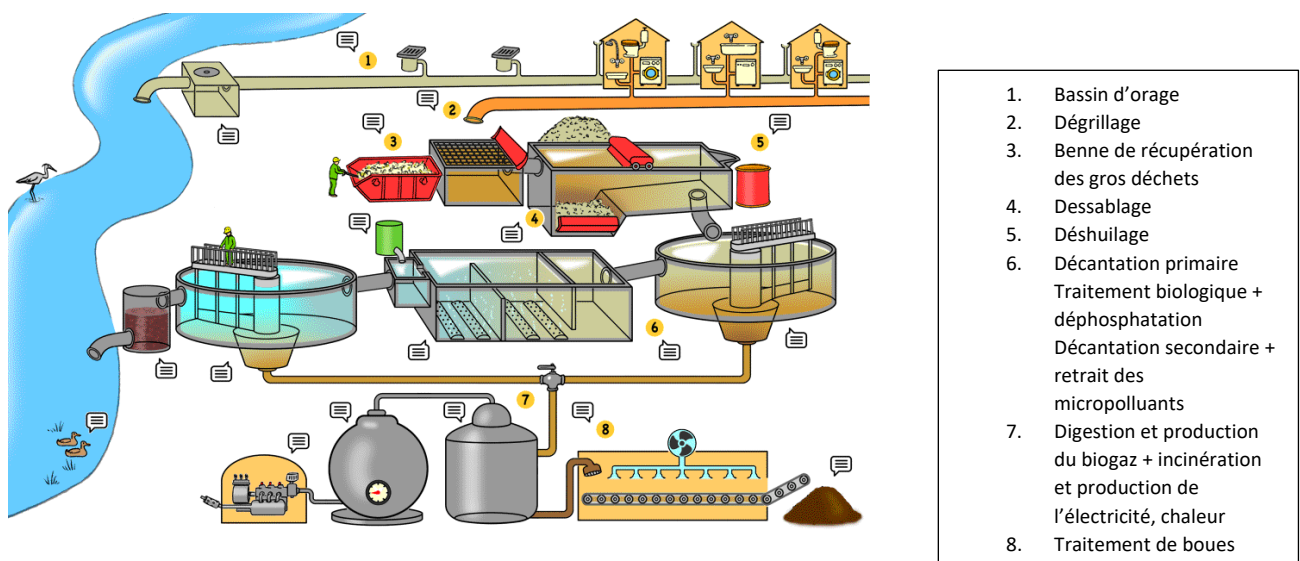


Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration

(Energie-environnement, 2022)

Les eaux usées (eaux urbaines, industrielles et domestiques) arrivant en tête de station subissent d'abord un prétraitement car elles passent au travers des grilles de plus en plus fines afin d'éliminer les matières grossières qui sont récupérées dans des bennes et éliminées via la filière déchets. Ensuite, elles sont acheminées à faible vitesse vers le bassin de dessablage. Le sable va se déposer au fond du bassin par gravité et sera extrait par pompage vers une autre benne. Les graisses sont quant à elles raclées après leur remontée en surface dans le bassin suivant pour évacuation. Ce prétraitement permet d'enlever des eaux usées les matières grossières, fines (sables = 200 microns) environ 80 à 90 % et les matières flottantes, soit au total 30 à 40 % de graisses (Ezzarial, Sauvadet, Sire, & al, 2020).

Certaines STEP disposent d'un traitement primaire visant à éliminer les matières en suspensions dans l'eau. Pour ce faire, une décantation simple est effectuée ou éventuellement, on ajoute une étape de coagulant-floculant pour éliminer les matières colloïdales (Tosoni, 2015). Cela permet l'agrégation des matières organiques puis la décantation s'ensuit. Le réactif utilisé pour la coagulation est le plus souvent le chlorure ferrique associé soit à de la chaux ou soit à un polymère cationique de poids moléculaire élevé. Le but est de déstabiliser les matières en suspension pour provoquer la formation des floes qui se décanteront facilement, cette étape permet de retirer près de 80 % de la pollution (colloïdales) (Krapf, 2012).

L'eau issue de ce processus est transférée dans le bassin de traitement biologique pour un traitement secondaire (biologique). Ici, il est question d'éliminer les composés carbonés, azotés (nitrification-dénitrification) et phosphorés. Une insufflation d'air est nécessaire pour la dégradation hétérotrophe aérobie du carbone et la nitrification. Une zone d'anoxie est également prévue pour la dénitrification. Le mélange des boues biologique et de l'eau traitée sont transférées dans le clarificateur pour y être séparées. Une partie de boues produites est réintroduite dans le bassin biologique afin de maintenir la concentration en boues voulue pour obtenir les performances attendues (Degremont, 2005).

La boue primaire provenant du traitement primaire (décantation) est mélangée à celle secondaire pour former une boue mixte dans une bache de relevage à une certaine siccité² afin d'alimenter la filière de traitement. Elles sont déshydratées par centrifugation, filtre-bande ou filtre presse et soumises à une forte pression avoisinant les 15 bars selon le procédé en y ajoutant un floculant (dans le cas d'Aquiris afin d'obtenir une siccité de 18%). Ce processus permet de faire passer la siccité de boues de 5% à 30% selon les attentes (Krapf, 2012). Les boues afin obtenues peuvent être digérées dans un méthaniseur afin ; de produire du biogaz (Degremont, 2005).

En fonction des installations, l'eau obtenue à la fin est soit rejetée dans la nature (dans la Senne dans le cas de la station de Bruxelles-Nord avec production d'énergie grâce à une turbine), soit dirigée vers une unité de traitement tertiaire (Tosoni, 2015).

Comme nous avons pu le voir, au cours du processus, plusieurs types de boues sont produites. C'est pour cette raison que nous allons faire un récapitulatif afin de mieux comprendre son traitement.

² Siccité est un paramètre fondamental de la caractéristique des boues : elle s'exprime % en de Matière Sèche (MS)

1.1.2. Types de boues et production

D'après les statistiques fournies par la Société Publique de la Gestion de l'Eau en 2022, la Wallonie a produit en 2020, 52 101 t MS de boue. Ce qui est énorme comparé à la production de 1994 qui était 13 267 t MS.

a) Les boues primaires

Elles sont issues de la décantation primaire des particules en suspension présentes dans l'eau juste après le prétraitement et sont composées de matières minérales et organiques (colloïdes) (Dieudé-Fauvel, 2003). La décantation primaire permet d'éliminer environ 60% d'après Raynaud en 2010. Ces particules ont une densité supérieure à celle de l'eau et un traitement de coagulation/floculation est ajouté pour une bonne élimination des polluants. Ces boues sont mélangées aux boues secondaires car elles se fermentent très rapidement (Degremont, 2005).

b) Les boues secondaires ou biologiques

Les boues secondaires sont issues du clarificateur ou décanteur secondaire en sortie du traitement biologique où elles sont produites. Ce traitement biologique consiste en de nombreuses réactions chimiques et mécanismes microbiens (intra³ et exo-cellulaire⁴). Les microorganismes étant à haute concentration, la biofloculation se produit et les floccs obtenus ont une grande densité comparée à l'eau. Les microorganismes épurateurs, assimilent les éléments nutritifs (matières organiques biodégradables et composés azotés) présents. Une agitation est très importante car, elle permet de brasser le contenu du bassin afin de maintenir une bonne mise en contact de la biomasse avec les éléments nutritifs et d'éviter la décantation (Tosoni, 2015).

c) Les boues mixtes

Les boues mixtes sont des boues obtenues par le mélange des boues primaires et secondaires. Elles ont une concentration variable (5 à 12 g/l chez Aquiris) et sont composées de résidus de bactéries cultivées pour digérer la charge polluante et de matières organiques et minérales issues de la décantation primaire. Elles possèdent un pouvoir de fermentation variable dépendant des conditions du procédé. Ces boues sont généralement stockées dans un épaisseur et traitées encore par du chlorure ferrique et un polymère pour réduire le volume de la boue et faciliter son traitement. A Bruxelles-Nord, une concentration de 30 à 50 g/l est acceptable pour l'obtention d'une bonne siccité après la centrifugation (documentation Aquiris).

d) Les boues digérées ou digestats

Elles sont issues de la méthanisation des boues mixtes. Selon Tosoni, après la méthanisation, les boues digérées obtenues sont partiellement stabilisées, plus ou moins liquides, en fonction de la teneur en eau des boues mixtes et le biogaz obtenu est composé d'environ 50 à 70% de

³Intra-cellulaire est un élément qui entre dans un micro-organisme ou une cellule afin de fournir à celui-ci la matière et l'énergie dont il a besoin pour fonctionner.

⁴Exo-cellulaire est un phénomène ou élément qui se trouve ou se produit à l'extérieur d'une cellule

méthane (CH₄), de 20 à 50% de gaz carbonique (CO₂) et de quelques gaz en traces notamment NH₃, N₂, H₂S). La Figure 2 illustre la production de ces différentes boues.

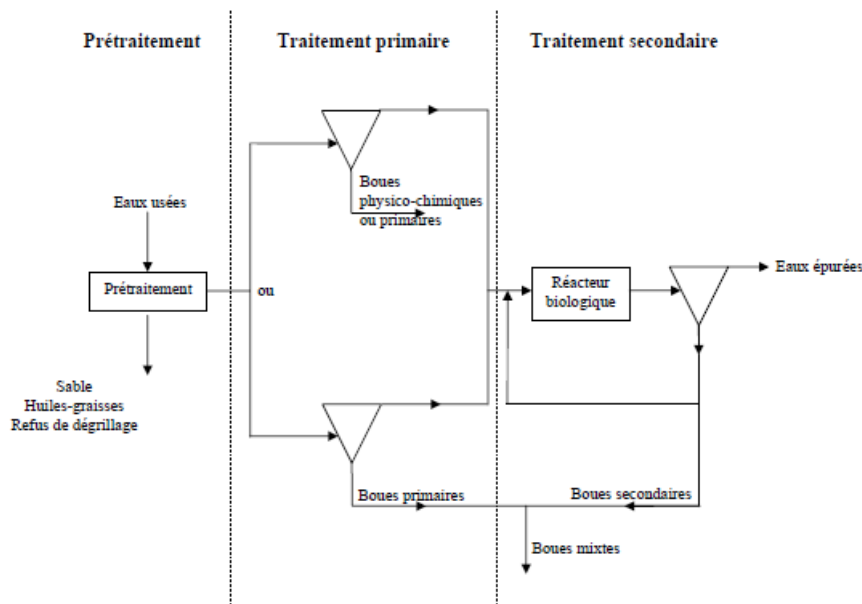


Figure 2: Types de boues issus au cours de traitement de l'eau (Raynaud, 2010)

1.1.3. Composition et structure des boues influençant la déshydratation

La composition exacte des boues varie en fonction de l'origine des eaux usées, de la période de l'année et du type de traitement et de conditionnement pratiqué dans la station d'épuration. Notons également que leur structure évolue de manière irréversible sous cisaillement (leur viscosité diminue dans le temps sous une vitesse de cisaillement constante de manière réversible (Labanda, Marco, & Llorens, 2004). L'analyse qui suit se concentrera sur les boues mixtes. En premier lieu, la composition et en second la structure des boues.

a) Compositions des boues

Les boues sont principalement composées d'eau (99%), mais contiennent également des matières minérales et des floccs microbiens, eux même composés principalement des bactéries, mais aussi de champignons et de protozoaires (Jorand, al., 1995). Les bactéries sont des microorganismes majoritairement responsables de l'épuration des eaux. Elles dégradent les polluants et produisent des polymères exocellulaires impliqués dans la biofloculation des boues activées. Ils sont majoritairement organiques (70 à 81% de la masse de leur matière sèche), mais comportent une part non négligeable de calcium (50 à 60%) et de phosphore (10 à 30%) de la matière minérale, tandis que divers métaux (Al, Co, Mn, Ni, Zn) sont présents sous forme de traces (Tosoni, 2015).

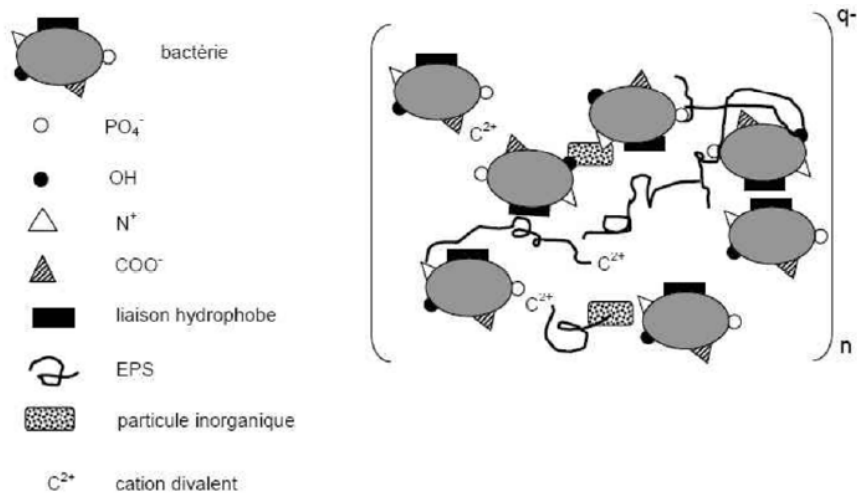


Figure 3: Schéma d'un floc de boue activée

b) Structure des boues

Différents auteurs se sont intéressés à la structure des floes en couplant sonication et granulométrie laser, par des mesures de dimension fractale et par microscopie. Ils mettent en évidence une structuration par biofloculation en trois niveaux représentés à la Figure 4 : les particules primaires se regroupent d'abord en micro-floes (taille de 2,5 μm environ). Ces grappes forment des floes d'environ 125 μm de diamètre et les interactions en jeu sont des liaisons relativement faibles : appelés liaisons hydrogène et liaisons de Van Der Waals. (Tosoni, 2015)

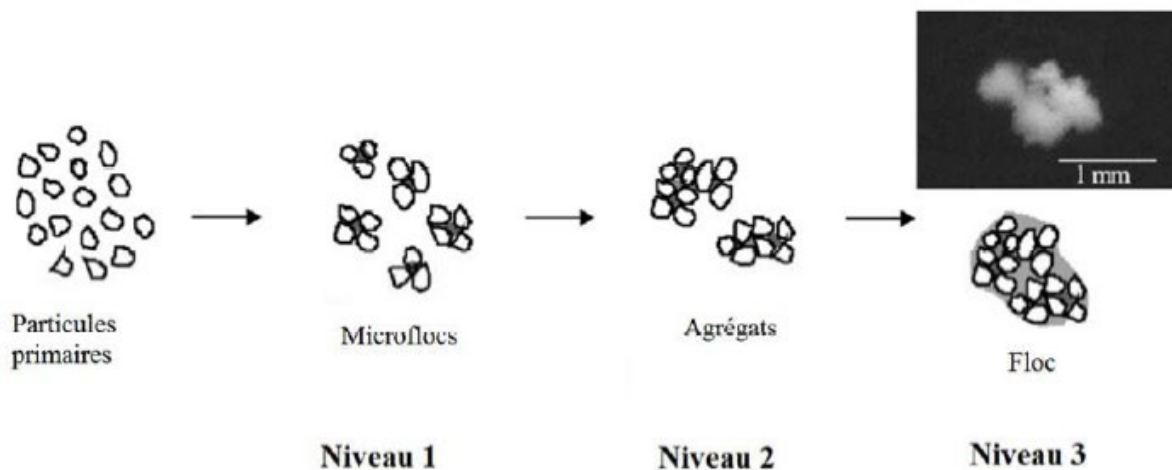


Figure 4: La structure en trois niveaux des floes de boue activée (Tosoni, 2015)

1.2. Procédés de traitement des boues

Après avoir situé l'origine et la place des boues dans le procédé de traitement des eaux usées, nous allons voir comment est-ce qu'elles sont traitées et valorisées. A l'issue du traitement, qu'il soit biologique ou physico-chimique, les boues extraites (mixtes) restent fortement hydratées (98-99% d'eau) et possèdent une forte charge en MO hautement fermentescibles, des matières minérales, ainsi que des éléments métalliques (Pambou, 2016). En fonction de la nature et de l'origine des eaux usées, le traitement change car l'accent est mis sur certains paramètres. Le schéma de la Figure 5 présente la filière de traitement des boues au sein d'Aquiris.

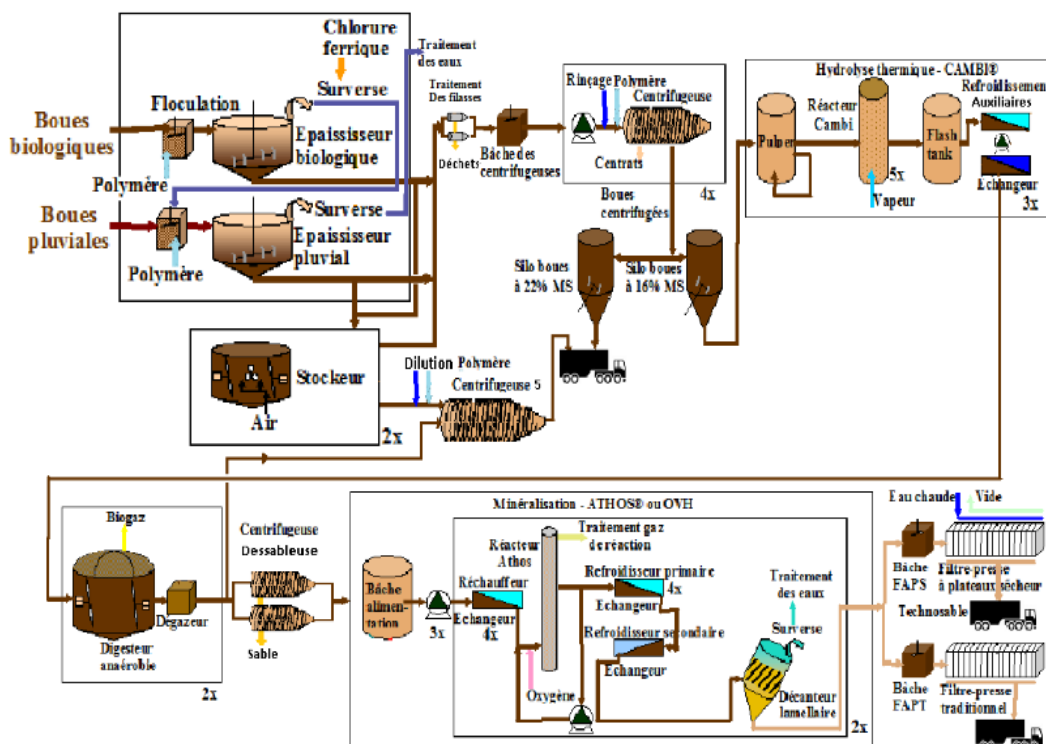


Figure 5: Schéma de la filière de traitement des boues (Documentation Aquiris)

1.2.1. Epaissement

La première étape consiste à épaisser les boues (réduire le volume des boues en éliminant de l'eau). Nous observons deux épaisseurs à la station de Bruxelles-Nord

- ✚ Epaisseur à boues pluviales obtenues après traitement d'eau de pluie (Actiflo) et ;
- ✚ Epaisseur à boues biologiques obtenues après traitement secondaire (clarificateurs).

Le procédé de traitement de la station voudrait qu'on ait une concentration de 30 – 50 g/l dans les sous verses des épaisseurs afin de se retrouver dans le même intervalle de concentration dans la bache d'alimentation des centrifugeuses. Pour atteindre cette concentration, un traitement à base de coagulant (chlorure ferrique) et d'un flocculant (polymère cationique FO 4695) y est appliqué. Les boues sont toujours brassées afin d'assurer le mélange des réactifs, la

floculation et, d'obtenir une très bonne décantation dans ces derniers et pour subir une déshydratation mécanique convenable.

L'épaississement se fait en fonction du type de boue à traiter, statique ou dynamique. L'épaississement dynamique par flottation peut être appliqué sur les boues activées car les particules en suspension sont de gros diamètre et de faible densité. Tandis que les boues primaires et mixtes subissent un épaississement statique ce qui permet de concentrer les boues (de quelques grammes par litre à quelques dizaines de grammes par litre (Olivier, 2003) et (Raynaud, 2010).

1.2.2. Stabilisation

La stabilisation sert à limiter la reprise de réactions de fermentation et le développement d'odeurs nauséabondes. Cette étape peut être réalisée par voie biologique (digestion anaérobie, stabilisation aérobie thermophile ou compostage), chimique (chaulage) ou thermique (séchage à une siccité supérieure à 90%) (Raynaud, 2010).

1.2.3. Déshydratation mécanique

Il s'agira pour nous ici, de présenter les principaux appareils de déshydratation mécanique généralement utilisés dans les stations d'épuration et leur fonctionnement.

Aquiris définit la déshydratation des boues comme un procédé d'augmentation de la concentration des boues épaissies issues de la filière de traitement des eaux (Biologique et Actiflos). C'est la deuxième étape du processus de réduction du volume de boues après l'épaississement gravitaire. Notons qu'avant toute centrifugation, les boues doivent passer dans un strainpress afin d'être défilassées.

Après la première réduction du volume de boues grâce à l'épaississement, les boues épaissies peuvent ensuite être essorées mécaniquement à l'aide d'un filtre à bandes, d'un filtre presse ou d'une centrifugeuse décanseuse. Le filtrat obtenu est généralement recyclé en tête de station afin d'être à nouveau épuré. D'après Raynaud, les boues issues de ces processus de déshydratation sont soit pâteuses (14-25% de siccité) dans les centrifugeuses, soit solides (plus de 25% de siccité) dans les filtres à plateaux ou filtre presse.

a) Les filtres à bandes

Ces filtres à bandes permettent d'essorer la boue entre deux bandes de toiles filtrantes. Le dessin de la Figure 6 ci-dessous le présente.

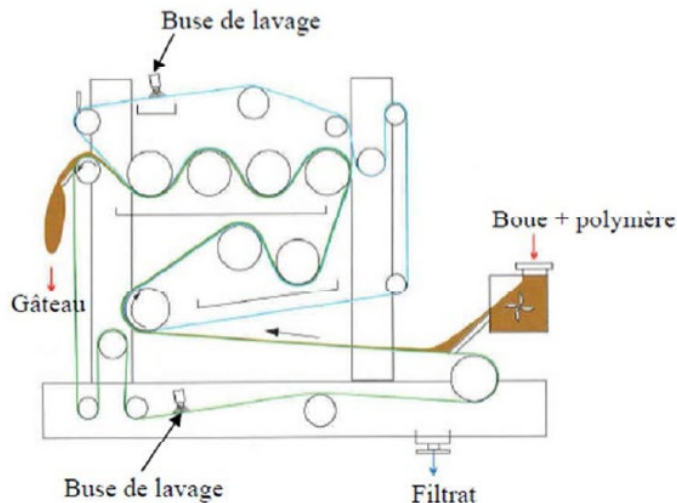


Figure 6: Schéma d'un filtre à bandes (Tosoni, 2015)

La boue arrive sur la bande inférieure, puis vient la seconde bande qui vient se plaquer sur la première, emprisonnant ainsi les boues entre 2 toiles, et va suivre une série de rouleaux permettant d'augmenter progressivement la pression sur la boue. Leurs performances peuvent être améliorées par l'utilisation en amont d'une table d'égouttage qui assure un épaissement préalable de la boue. Il existe plusieurs configurations de filtre à bandes, qui se différencient par le nombre de rouleaux de pressage (de 5 à plus 15), le diamètre des rouleaux, l'intervalle entre chaque rouleau, l'enroulement des toiles autour des rouleaux et la largeur des bandes (0.5 à 3 m) (Tosoni, 2015) ; (Raynaud, 2010) et (Olivier, 2003).

Les filtres utilisés dans les STEP sont classifiés en trois suivant la pression utilisée : les filtres basse pression (3-4 bars pour les STEP < 10000 EH), de moyenne pression (5 bars environ) et ceux à haute pression (environ 7 bars) (OTV, 1997).

Ils sont entièrement automatisés et leur prix d'achat et d'exploitation sont raisonnables et leur mise en œuvre est simple. C'est en fait le procédé le moins énergivore.

Cependant, son principal inconvénient réside dans la limitation de la pression appliquée. Si la pression est trop forte ou appliquée brusquement, la boue va fluer et s'échapper par le bord des toiles et les siccités finales obtenues ne seront pas très élevées (< à 20%) (Tosoni, 2015).

b) Les décanteuses centrifugeuses

Le fabricant des centrifugeuses de marque Andritz de la STEP explique le mode de fonctionnement des centrifugeuses à travers son manuel. Le procédé de séparation par centrifugation consiste à séparer un solide en suspension d'un ou plusieurs liquides en utilisant la force centrifuge pour accélérer le phénomène de décantation statique. La vitesse de décantation est proportionnelle à la masse des boues et à la force d'accélération centrifuge.

La boue préalablement traitée par un polymère synthétique est introduite dans le bol via un tube d'alimentation et un distributeur. L'accélération (3000 à 5000 g) que subit la boue dépend d'un grand nombre de facteurs dont notamment la vitesse de rotation du bol et son rayon (de 15 à 50 cm) (Olivier, 2003). Sous l'effet de cette force, les boues sont mises en rotation, les MES, de

densité supérieure à l'eau sont plaquées contre la paroi tandis que le liquide de densité moindre, va être accumulé vers le centre du bol. Les particules solides décantées sont comprimées en périphérie, sur les parois du bol. Un principe de vis sans fin évacue la phase solide du côté opposé au liquide (Figure 7). Notons que les vitesses du bol et de la vis sont différentes. Si cette différence est trop faible, le convoyage des boues déshydratées est insuffisant et celles-ci déborderont et sortiront avec le centrât. En revanche, si celle-ci est très élevée, les boues ne seront pas suffisamment comprimées et auront une faible siccité (Tosoni, 2015).

Elles sont également automatisées mais ont un prix d'achat et de fonctionnement élevé. Elles nécessitent moins de surveillance que les filtres à bandes et permettent d'atteindre des siccités de 4 à 5 points supérieur à ces derniers. Cependant, leur grande sophistication les rend plus délicates en ce qui concerne l'entretien, et donc elles nécessitent une main d'œuvre plus qualifiée (Raynaud, 2010).

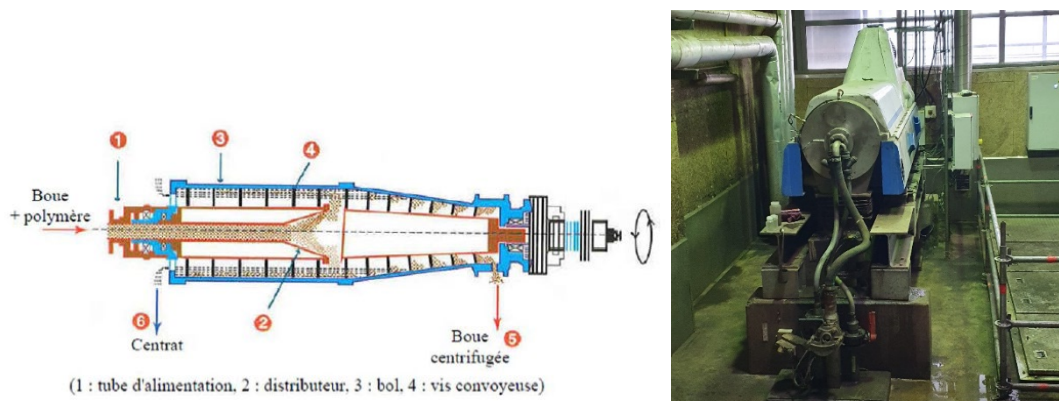


Figure 7: Schéma d'une décanteuse centrifuge à axe horizontal (Raynaud, 2010)

c) Les filtres-presses

Ces filtres sont constitués d'une succession de plateaux, recouverts sur leurs deux faces d'une toile filtrante, qui forment des chambres de filtration. Il existe des filtres -presses à plateaux et des filtres-presses à membranes.

□ Filtre-presse à plateaux

La boue conditionnée, est introduite par l'intermédiaire d'une pompe sous pression (7 à 12 bars) dans les chambres de filtration. Elle est comprimée entre deux plateaux verticaux recouverts d'une toile filtrante à une pression de 8 bars, cette toile retient les particules solides et laisse passer l'eau à travers afin d'être récupéré au centre du plateau (filtrat). L'étanchéité de l'ensemble est assurée par de très fortes pressions appliquées sur les cadres des plateaux par des vérins hydrauliques (voir Figure 8).

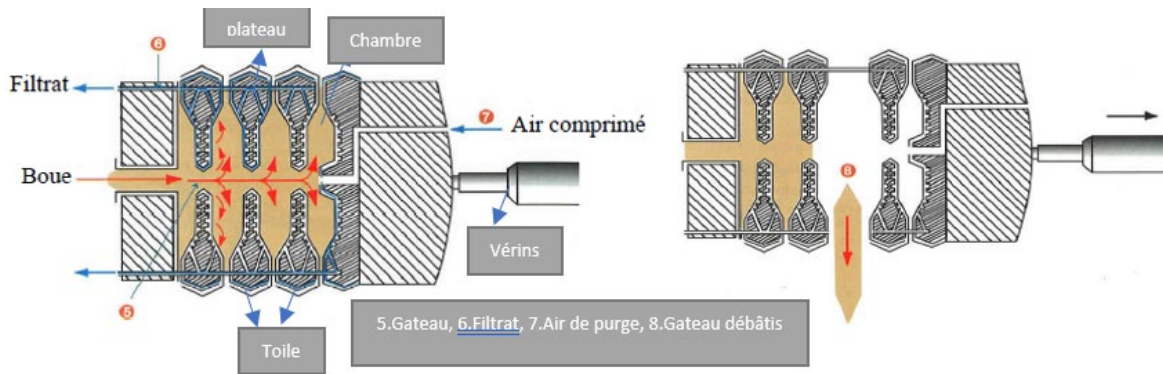


Figure 8: Schéma d'un filtre-pressé à plateau (Olivier, 2003)

Lorsque les chambres sont remplies, la filtration s'arrête et les chambres sont vidées, cela s'appelle le débâtissage. La siccité obtenue après le débâtissage va de 25 à 35 %. La pression des vérins est relâchée et les plateaux sont désunis. C'est la phase de débâtissage au cours de laquelle les gâteaux de boues sont récupérés. C'est donc un procédé discontinu (c'est l'inconvénient de cette technique mais on observe de jour en jour, des versions plus automatisées). Les dimensions des plateaux varient de 0.3 à 1.5 mètres de côtés et l'épaisseur des chambres de 20 à 30 millimètres. La durée complète d'un cycle (alimentation, filtration, débâtissage et lavage) dure environ 2 à 4 heures (Olivier, 2003) ; (Pambou, 2016). Ce filtre est celui utilisé chez Aquiris pour la déshydratation des boues minéralisées.

❑ Filtre-pressé à membranes

La technologie précédente peut être améliorée en ajoutant une membrane en polypropène. Il s'agit alors de filtres-pressés à membranes comme présenté sur la Figure 9. Dans ce cas, la pression de fonctionnement est généralement fixée à 9 bars (ce qui évite d'utiliser une pompe d'alimentation haute pression) pendant la phase de remplissage. Puis une injection d'air ou d'eau a lieu, afin d'augmenter la compression dans les chambres de filtration (16 bars). Les siccités sont alors améliorées et le gâteau obtenu est beaucoup plus homogène. Chez Aquiris, cette technique est utilisée sur les boues minéralisées et une siccité de 85% est atteinte. Son efficacité de déshydratation dépend de la pression atteinte en fin de presse, de l'efficacité de l'étape de conditionnement et du degré d'encrassement des toiles (Pambou, 2016).

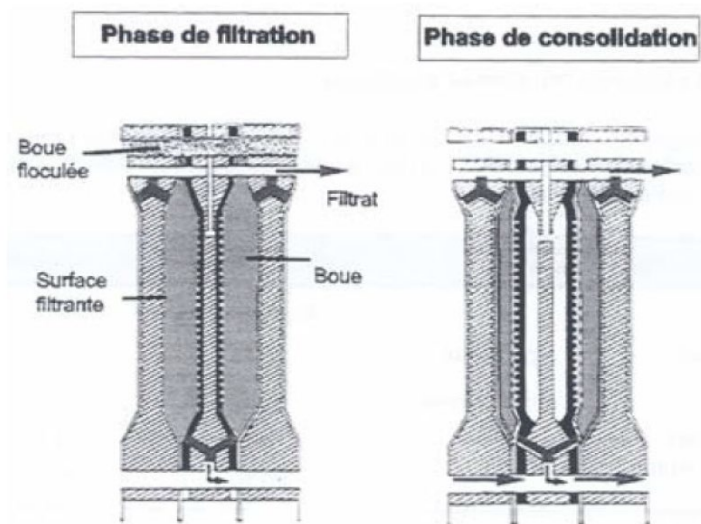


Figure 9: Schéma d'un filtre-presse à membranes (Pambou, 2016)

Ce type de déshydratation est plutôt adapté aux stations de traitement des eaux usées de taille importante. En effet, ces performances en matière de siccité permettent de réduire les volumes de boues de façon importante en comparaison des autres procédés (Tosoni, 2015).

1.2.4. Synthèse des différentes techniques

Le Tableau 1 résume les avantages et inconvénients des différentes technologies de déshydratation mécanique

Tableau 1: Résumé des avantages et inconvénients des différentes technologies de déshydratation mécanique

	Avantages	Inconvénients
Filtre à bandes	<ul style="list-style-type: none"> - Faible consommation de polymère - Robustesse, maintenance aisée - Procédé continu - Coûts d'exploitation faibles 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande consommation d'eau propre pour le lavage des toiles filtrantes ; - Coûts d'investissements élevés pour les filtres les plus performants ; - Siccité plus faible que celle obtenue sur le filtre-presse
Centrifugeuses	<ul style="list-style-type: none"> - Machine compacte ; - Technique adaptée aux boues difficiles à traiter (huileuses) ; - Permet de travailler en milieu confiné, sans odeur 	<ul style="list-style-type: none"> - Forte consommation en polymères ; - Faible consistance de la boue déshydratée ; - Coûts d'exploitation supérieurs à ceux d'un filtre-presse/filtre à bandes

Filtre-presse à plateau	<ul style="list-style-type: none"> - Grande fiabilité ; - Siccité élevée ; - Technologie très solide 	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement discontinu ; - Main d'œuvre importante sauf automatisation
-------------------------	---	--

Comme illustré dans le tableau ci-dessus, chaque technique a ses avantages et inconvénients. Le choix d'une technologie peut reposer sur la siccité qu'on veut atteindre selon le process de la STEP mais également en fonction des coûts d'investissements et d'exploitation. Le Tableau 3 suivant, rend compte des performances moyennes des appareils pour les boues mixtes à environ 4 à 5% de teneur en matières sèches (MS).

Tableau 2: comparaison des différents types de technique de déshydratation mécanique des boues biologiques

Appareils	Puissance consommée (kWh/t MS)	Siccité (%)	Dosage du polymère (kg/tMS)
Filtre à bandes	10-25	14-17	6
Centrifugeuse	30-60	16-20	5-8
Filtre-presse à plateau	20-40	30-35	28-30% de chaux et 8-10% de FeCl ₃
Références	(Olivier, 2003)	(AMORCE, 2012)	(Pambou, 2016)

Il est constaté que, le filtre à bande reste la technique la moins onéreuse en termes de consommation énergétique, mais produit des boues plus humides. Le filtre-presse à plateau semble donc la solution la plus attrayante pour garantir une forte siccité, cependant la main d'œuvre doit être plus qualifiée.

1.2.5. Filière d'élimination ou valorisation des boues

Dans les stations d'épuration collectives (STEP), les eaux urbaines résiduaires sont traitées afin de réduire leur teneur en matières solides et en polluants avant rejet dans les cours d'eau. Ces traitements produisent comme déchets des boues, dont la gestion passe par la valorisation de leur potentiel agronomique ou énergétique en veillant à l'absence d'effets néfastes sur l'environnement et la santé. De nos jours, les boues d'épuration ne sont plus considérées comme un déchet au sens strict, mais comme un produit à valoriser. Leur mise en décharge étant interdite selon la directive N° 1999/31/CE du 26/04/1999 concernant la mise en décharge des déchets). Cette section présente non seulement les voies de valorisation généralement usitées mais également les filières dites prometteuses.

A l'heure actuelle, il existe deux principales voies de valorisation des boues issues du traitement des eaux usées résiduaires ; valorisation agricole et valorisation énergétique par incinération (Pambou, 2016).

a) Valorisation agricole : Épandage des boues

La directive européenne de 12 juin 1986 transposée dans le code de l'environnement, définit toutes les modalités techniques d'épandage que doivent respecter les producteurs de boues pour prévenir tout risque sanitaire et écologique de contamination du sol et des cultures (AMORCE, 2012). La valorisation agricole des boues résiduaires peut être considérée comme le mode de recyclage le plus adapté pour rééquilibrer les cycles biogéochimiques (C, N, P ..), pour la protection de l'environnement et présentant un très grand intérêt économique. Elle vise à ménager les ressources naturelles et à éviter tout gaspillage de matière organique dû à l'incinération (Lambkin & Nortcliff, 2004). Les boues résiduaires peuvent ainsi remplacer ou réduire l'utilisation excessive d'engrais coûteux. En 2020, 69% des boues de STEP produites en Wallonie ont été valorisées en agriculture. Cette filière est aussi généralement moins coûteuse : 37 € par tonne de matière brute (t MB) pour la filière agricole contre 81 €/t MB pour la filière énergétique en 2020 selon la SPGE. A l'annexe 1.A de la directive, on retrouve les teneurs maximales en métaux lourds admissibles dans les boues pour l'épandage agricole.

Tableau 3: Teneurs maximales de métaux lourds admissibles dans les boues

Eléments	Teneur en métaux lourds en mg/kg de matières sèches
Cadmium	10
Cuivre	600
Nickel	100
Plomb	500
Zinc	2.000
Mercure	10
Chrome	500



Figure 10: Épandage agricole des boues de STEP ((Martin, 2020)

b) Valorisation énergétique : incinération

Environ 19 à 21% de la production de boues (EU 27 et EU 15) est traitée par oxydation thermique (Kelessidis & Stasinakis, 2012), (Mininni, al, 2015). Cette méthode consiste à brûler les boues dans un incinérateur, seules ou avec des ordures ménagères. D'après les données de la SPGE, 30% des boues de STEP en Wallonie en 2020 ont été incinérées avec valorisation énergétique et 1% ont été incinérées sans valorisation énergétique. Pour effectuer une bonne incinération et en raison des techniques (seuil d'auto-combustion), les boues doivent avoir une siccité allant de 25-45%. Il est donc avantageux de faire une déshydratation au préalable des

boues (AMORCE, 2012). La Figure 11 présente le four à lit de sable fluidisé qui est un type d'incinérateur (mono-incinérateur) souvent utilisé.

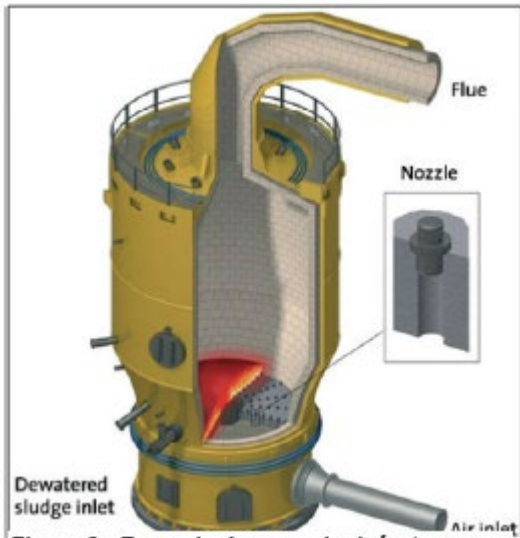


Figure 11 : Exemple de mono-incinérateur

Il fonctionne à très haute température comprise entre 850 et 900°C. les boues sont mélangées au sable chaud sorti du réacteur, afin de faciliter la combustion et celle-ci reste auto-entretenu si les boues ont une siccité supérieure ou égale à 26%. Un co-traitement avec les ordures ménagères est envisageable si la STEP est proche (AMORCE, 2012).

Aussi, une boue ayant une siccité comprise entre 60-90% est requise pour la co-incinération avec ordures ménagères (PCI=8 MJ/kg) et pour les siccités supérieures à 85% (PCI=8 à 17 MJ/kg), la boue peut être pyrolysée ou gazéifiée (Pambou, 2016).

d) Oxydation par Voie Humide (OVH)

D'après la documentation fournie par la STEP, elle consiste à détruire la matière organique de déchets aqueux par des réactions d'oxydation en phase liquide, à chaud et sous pression, en présence d'une source d'oxygène gazeux. Les conditions opératoires sont comprises entre :

- ✚ Température : entre 160 et 300°C ;
- ✚ Pression : entre 25 et 120 bars ;
- ✚ Temps de séjour : entre ¼ et 2 heures ;
- ✚ Oxydant : air ou oxygène.

Cette technique permet de traiter des boues sortant directement de l'épaississeur (siccité inférieure à 10%). Elle présente les avantages de :

- ✚ Simplifier le traitement de l'air par rapport à l'incinération (diminution de moitié des émissions de CO₂ et fumées dépourvues de poussières, de métaux lourds et de dioxines) ;
- ✚ Être bien adaptée aux stations de capacité moyenne (50 000 à 150 000 EH).

Le coût moyen de cette technique en cours de développement est d'environ 50€/t de boues brutes. Les boues séchées obtenues sont appelées technosables (AMORCE, 2012)

1.2.6. Cas de la Belgique

En région wallonne, les principales filières de gestion des boues sont la valorisation en agriculture et l'incinération (Figure 10). L'arrêté du Gouvernement Wallon du 12/01/1995 définissant la réglementation de l'utilisation sur ou dans les sols, des boues d'épuration fixe les seuils d'acceptation. En 2020, 69 % des boues de STEP produites en Wallonie ont été valorisées en agriculture, 30 % ont été incinérées avec valorisation énergétique et 1 % ont été incinérées sans valorisation. Les filières d'incinération (avec et sans valorisation énergétique) se sont développées dès 1999, à la suite de la perspective d'interdiction d'élimination par mise en centre d'enfouissement technique (CET) (SPGE, 2022).

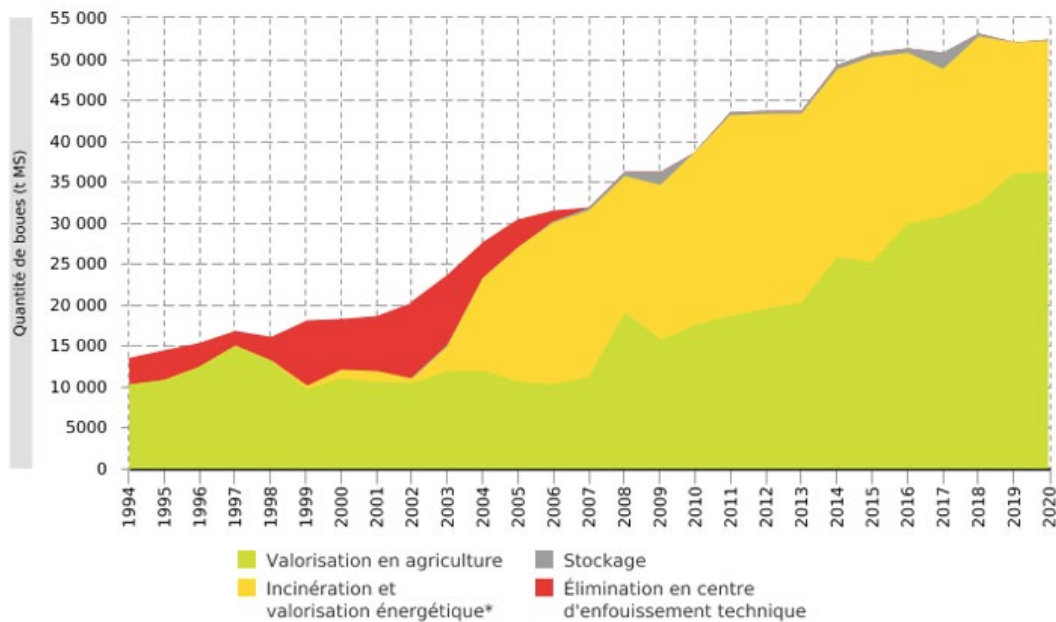


Figure 12: Gestion des boues des STEP en Wallonie (SPGE, 2022)

En région flamande, la valorisation agricole a été interdite du fait de la surabondance de l'épandage de lisier et des teneurs trop élevées en métaux lourds et polluants organiques dans les boues. L'incinération permet alors de valoriser toute la boue produite. Enfin, pour la zone bruxelloise, aucune boue n'est actuellement recyclée sur sol, qu'il soit agricole ou non. La co-incinération permet de valoriser la majorité des boues produites, tant que leur taux de siccité est suffisamment élevé. Une autre partie de la boue produite est recyclée via le procédé d'oxydation par voie humide. Cette méthode permet de réduire le volume de boues de plus de 99%. (Pambou, 2016).

1.2.7. Impacts des caractéristiques physico-chimiques des boues influençant les performances de déshydratation

Diverses études disponibles dans la littérature scientifique montrent que l'aptitude à la déshydratation des boues dépend de leurs caractéristiques physico-chimiques. Cette section a pour but de comprendre comment les propriétés des boues impactent leur déshydratation.

a) Impact des exopolymère (EPS) sur la structure des floes et la déshydratation

Les exopolymères microbiens sont des polymères biosynthétiques ou biopolymères. Garrido et al, le définissent comme étant des substances polymériques extracellulaires d'origine biologique qui participent à la formation des agrégats microbiens. Elles peuvent être synthétisées biologiquement en provenance de la lyse bactérienne ou de l'adsorption de matières organiques présentes dans le milieu à la surface des floes bactériens. (Krapf, 2012). Les exopolymères sont constitués principalement des protéines et des polysaccharides qui contribuent de manière significative à lier physiquement l'eau à l'intérieur des floes. Donc, contribuent fortement à leur hydratation et de ce fait, conditionnent leur déshydratation (Tosoni, 2015).

Dans sa recherche bibliographique, Tosoni, a trouvé que certains auteurs ont constaté que plus la teneur en EPS d'une boue est élevée, plus la résistance spécifique à la filtration (RSF) et le temps de succion capillaire (CST) sont élevés. Il définit le CST comme un indicateur qui permet d'évaluer la capacité du floe à laisser échapper son eau à travers une membrane filtrante. Ceci explique le fait que, plus sa valeur est faible et plus la boue est apte à la filtration et inversement.

Il a également mis en évidence que certains auteurs, lors de leurs études expérimentales, ont trouvé une relation inverse tels que Jin et al, en 2004. Ces derniers ont remarqué que le CST tend à diminuer avec l'augmentation de la teneur en EPS totaux. Ils expliquent ce résultat par le fait que cette augmentation favorise le phénomène de floculation et limite ainsi la présence de fines particules dans la phase liquide, ce qui permet une meilleure déshydratation. Mikkelsen et Keiding quant à eux, ont remarqué une siccité finale du gâteau plus faible pour une boue pauvre en EPS.

Cette contradiction pourrait s'expliquer par la composition des EPS plutôt que leur quantité. Les polysaccharides auraient donc tendance à avoir un effet négatif sur la déshydratation d'après Tosoni. Néanmoins, les EPS ne sont pas le seul facteur contrôlant la déshydratation des boues de station d'épuration, l'hydrophobicité a aussi son rôle à jouer.

b) Impact de l'hydrophobicité des boues

D'après techno-science.net, un composé est dit hydrophobe ou lipophile, s'il est soluble dans les corps gras, mais insoluble dans l'eau. La séparation de la partie hydrophile se fait par décantation par ajout d'hexadécane, telle est l'expérience menée par Raynaud. La matière sèche hydrophile permet d'évaluer la matière sèche hydrophobe. Certaines études réalisées sur ce caractère ont montré qu'une augmentation du pourcentage d'hydrophobicité permet une meilleure floculation des boues. (Tosoni, 2015)

Vu que les EPS sont en partie hydrophobes, ils augmentent donc le taux d'hydrophobicité des boues, cela a été démontré par l'étude de Jorand et al. D'après lui, environ 12% de protéines peuvent être considérées comme hydrophobes alors qu'aucun polysaccharide n'était présent dans la fraction hydrophobe. Grâce aux études de Jorand et al, et Higgins et al, ont démontré que parmi les EPS, les protéines seraient les principales responsables de l'hydrophobicité des boues, tandis que les polysaccharides contribuent à leur nature hydrophile⁵.

⁵ Hydrophile : est le caractère d'un composé à avoir une affinité avec l'eau et ayant tendance à se dissoudre.

c) Impact de la teneur en cations

De nombreuses études s'accordent pour souligner l'importance des cations dans la structuration des floccs mais les résultats obtenus ainsi que les mécanismes de floculation proposés peuvent parfois diverger selon les auteurs (Raynaud, 2010).

Les EPS divalents possédant des groupes fonctionnels chargés négativement, sont reliés entre eux par l'intermédiaire de cations divalents. Ceci met en évidence l'implication des cations notamment divalents dans la fabrication et la structure des floccs. Bruus et collaborateurs suggèrent qu'il existe un pontage entre les cations divalents et les groupes carboxylates des acides portés par les floccs et les EPS. Donc, ces cations divalents assurent la stabilité des floccs en créant des ponts entre les microorganismes.

Sanin et Vesilind quant à eux, montrent que pour une concentration en polysaccharide donnée, l'ajout de Ca^{2+} améliore la floculation. Le calcium divalent va créer des liaisons avec les parties chargées négativement du polysaccharide, qui favoriseront la floculation.

Cependant, Sobeck et Higgins démontrent que l'ajout de cations monovalent (Na^+) vont entrainer un effondrement de la structure flocculée et provoquer dans ce cas, une augmentation de la turbidité du surnageant.

En conclusion, en utilisant un cation divalent, on obtient une bonne structure des floccs et cela impacte par ailleurs les boues sur leur filtrabilité. Selon les études de Jin et al, Sobeck et Higgins, 2002 ; Kara et al ; 2008 l'ajout de cations divalents tels que Ca^{2+} et Mg^{2+} permet d'améliorer les propriétés de déshydratation en entrainant une diminution des valeurs du CST et de la RSF du fait d'une meilleur biofloculation des boues.

d) Impact du pH

Le pH est un paramètre qui varie sensiblement suivant les types de boues, il est donc indispensable de connaître ses effets sur les performances de déshydratations. Il a un impact sur la teneur en charge de surface des floccs et sur la structure des EPS.

Selon certains auteurs, la déshydratation serait efficace en milieu acide, avec un pH optimal de 2,5 correspondants au point isoélectrique⁶ puisque le pH exprime la concentration en ions hydronium (H^+). Avec la présence de protons en milieu acide, ces derniers vont neutraliser les charges négatives portés par les floccs de boues. Ainsi, la dose de polymère cationique nécessaire pour le conditionnement serait donc réduite en milieu acide d'après Neyens et al. Cette diminution de charges de surfaces négatives par adsorption des protons à la surface des EPS, permet d'atteindre une dose de polymère optimale pour un pH égal à 3 (Tosoni, 2015).

En revanche, la déshydratation est fortement limitée en conditions basiques parce que la RSF semble augmenter de façon exponentielle avec le pH d'après Karr et Keinath en 1978, Neyens et al., en 2003 et Shao et al., en 2009. Ceci peut s'expliquer par le fait que, le taux de particules dissoutes (taille compris entre 0.01 – 1 μm) et décantables (taille supérieure à 100 μm) augmente lorsque le Ph est faible, tandis que le taux de particules supracolloïdales (1 à 100 μm) diminue (Raynaud, 2010). Ces particules supracolloïdales semblent être un facteur important de la déshydratation des boues puisqu'elles sont considérées comme responsables du colmatage des gâteaux de boue et des média filtrants limitant ainsi les performances de déshydratation. Donc, il faut limiter la présence de ces particules. (Raynaud, 2010).

⁶ Point isoélectrique : c'est le Ph pour lequel la charge globale de cette molécule est nulle.

e) Impact de l'âge des boues

L'évolution de la structure des floccs par suite du vieillissement, influence sensiblement l'aptitude de la boue à être déshydratée. Les essais réalisés par Raynaud en 2010 montrent que la cinétique de déshydratation est beaucoup plus lente pour un âge de boue élevé, cependant la masse de filtrat recueillie en fin de compression est plus importante.

D'après les expériences réalisées par Liao et al et Liss et al, la teneur en charges de surface négatives à la surface des floccs diminue avec l'âge des boues ce qui entrainerait ainsi la réduction de l'intensité des forces de répulsions électrostatiques et stabiliserait les floccs. De plus, l'hydrophobicité des floccs semble également augmenter avec l'âge ce qui contribue à la stabilité des floccs (Liao, Allen, Leppard, Droppo, & Liss, Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability, 2001).

1.3. Etat de l'art « Polymère synthétique »

Le procédé de coagulation/floculation joue un rôle majeur dans le traitement des eaux usées en induisant l'agrégation de particules organiques ou inorganiques comme vu précédemment. Afin de déstabiliser les microorganismes en suspensions (particules colloïdales) avant toute floculation, un réactif chimique (coagulant) est utilisé.

Cette partie est consacrée aux flocculants/polymères synthétiques afin de comprendre de quoi il s'agit et leurs mécanismes d'action sur les boues.

1.3.1. Mécanismes physico-chimiques de coagulation/floculation

a) Coagulation

Le processus de coagulation est un processus « *de déstabilisation des particules colloïdales pour provoquer leur agglutination pour faire des floccs qui se prêtent à la sédimentation* » telle est la définition donnée par Elias Assaad en 2006. Selon (Monette, 1999), c'est un procédé couramment utilisé en STEP pour limiter le rejet de certains polluants (phosphore total, les MES) au cours du traitement des eaux et ceci, dans le but de diminuer la quantité et le coût des produits chimiques nécessaire au traitement. Plusieurs mécanismes sont généralement utilisés (emprisonnement des particules dans un précipité, adsorption et pontage inter particulaire, adsorption et neutralisation des charges, le potentiel Zéta (Z) et la théorie de la double couche). On retrouve souvent en station le chlorure ferrique (FeCl_3) comme réactif et il favorise le mécanisme d'adsorption et le pontage inter particulaire. On utilise des coagulants cationiques, non ioniques ayant une masse moléculaire élevée entre 10^5 et 10^7 , qui vont aider les particules à s'agglomérer par pontage. Leur mécanisme est simple : le polymère va adsorber une des extrémités du colloïde présent dans l'eau, les autres extrémités demeurent libres et peuvent adsorber un autre colloïde (Mezague, 2021). Pour mieux comprendre le processus de de déstabilisation des particules, la Figure 13 l'illustre. Après la coagulation, suit la floculation afin d'avoir de gros amas pour une bonne déshydratation.

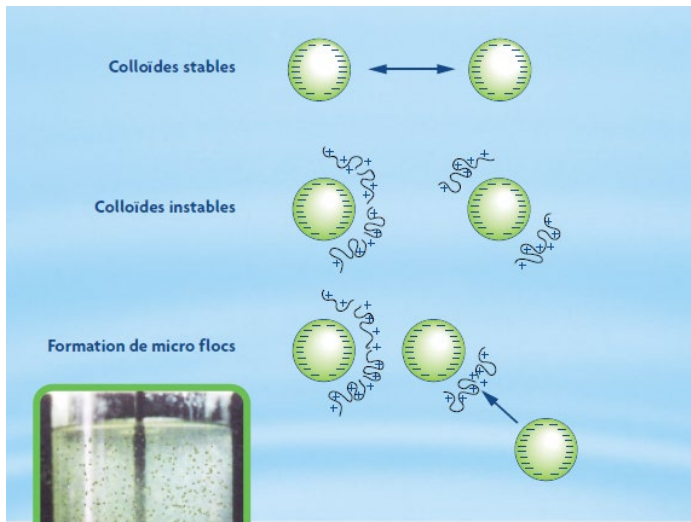


Figure 13: Mode d'action d'un coagulant (SNF)

b) Flocculation

Grâce à la déstabilisation des particules (simple rapprochement), le flocculant servira à renforcer le contact entre les uns les autres. La flocculation a justement alors tout son sens, celui d'augmenter la probabilité de contact entre les particules pour former des particules plus grosses appelées floccs (Assad, 2006). Il en résulte deux mécanismes conjoints au cours de ce processus, le pontage entre les particules colloïdales et la neutralisation des charges de celles-ci (Krapf, 2012). D'après cet auteur, le pontage est autant plus efficace pour les polymères de hautes masses moléculaires présentant une longue chaîne linéaire car, la longueur de la chaîne détermine le nombre de particules auxquelles le flocculant s'adsorbe.

Les flocculants organiques se différencient des coagulants par : leur poids moléculaire qui est plus élevé, leur charge ionique qui est fonction des effluents à traiter (elle peut aller de 0 à 100% d'anionité ou de cationité) et par leur forme physique (liquide, poudre, bille ou émulsion). Selon SNF, il existe deux grands types de flocculants : les flocculants anioniques qui ont une charge négative et les flocculants cationiques de charge positive (c'est ce type qui est utilisé à l'usine).

Selon Dixon et al., cité par Krapf, l'efficacité de la flocculation dépend du pH (il agit sur la charge et de l'ionisation du polymère).

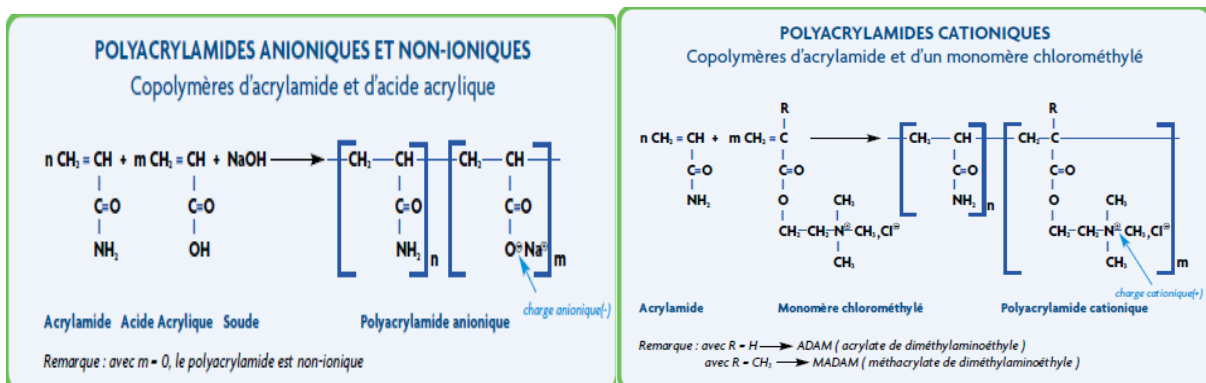


Figure 14: Types de flocculants : anionique (à gauche), cationique (à droite)

Au sein d'Aquiris, plus précisément dans la filière boue, est observé des polymères cationiques. Leur mode d'action est présenté sur la figure suivante.

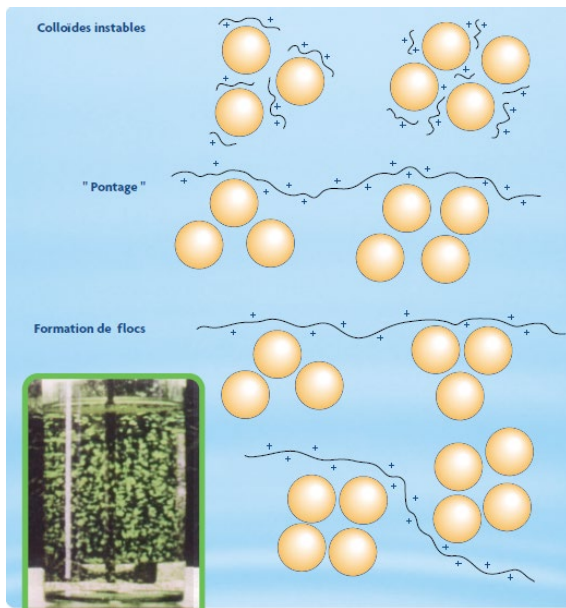


Figure 15: Mode d'action du flocculant

1.3.2. Paramètres des flocculants exerçant une influence sur la déshydratation des boues

Plusieurs paramètres des réactifs organiques influencent la déshydratation des boues, les plus primordiaux sont les suivants :

a) Type de charge (+ ou -)

Ce paramètre permet dès le départ (au laboratoire), de choisir quel type de polymère à utiliser sur le type de boue.

- ✚ La charge positive (+) : les flocculants sont appelés cationiques et sont utilisés pour capter les particules organiques ;
- ✚ La charge négative (-) : les flocculants sont appelés anioniques et sont utilisés pour capter les particules minérales.

b) La densité de charge

Selon Hugues, c'est un nombre de charge rapporté à une surface, g, volume... Elle dépend fortement du type de boue à conditionner, également du taux du Matière Volatiles en Suspension (MVS) des boues. Plus le taux de MVS est élevé, plus la densité de charge cationique à apporter dans la boue sera élevée.

c) Le poids moléculaire (PM)

Il reflète la longueur de la chaîne du flocculant et son choix dépend de l'appareil utilisé lors de la déshydratation. Il est conseillé d'utiliser de haut à très haut PM lorsque ce sont les centrifugeuses qui sont utilisées vu leurs forces de cisaillement qui s'exercent sur les floccs. Cependant, un faible à moyen PM sera suffisant pour la filtration afin d'obtenir un égouttage correct. D'après Krafpt, plus la masse moléculaire des polymères est importante (supérieure à 2000 g/mol), plus le polymère (flocculant) a une large possibilité de se lier avec plusieurs

particules puisqu'il existe plusieurs points d'ancrages (restabilisation⁷ des particules en suspensions) et inversement quand le PM est inférieur à 2000 g/mol.

d) La structure moléculaire

Elle se résume en trois familles (Figure 16) :

- ✚ Structure linéaire : c'est l'agencement d'une chaîne de monomères reliés par des liaisons covalentes. Sa principale caractéristique est un faible dosage et de bonnes performances si le PM est bien sélectionné. Elle a l'avantage de réagir à faible dosage et possède une large gamme de poids moléculaire. En revanche, les floccs formés ont une faible résistance et une surdose est possible.
- ✚ Structure ramifiée : c'est une chaîne linéaire à laquelle sont greffées d'autres chaînes en cours de formation. Elle se caractérise par un dosage moyen et d'excellentes performances sur la vitesse d'égouttage.
- ✚ Structure réticulée : ce caractère réticulé fait référence à un filet en plusieurs dimensions et se caractérise par un dosage élevé et des performances exceptionnelles en égouttage et en résistance aux cisaillements. Les floccs formés sont très résistants, favorisant un excellent égouttage et après déshydratation, on obtient une meilleure siccité. Mais, elle nécessite un dosage élevé car, certaines charges ne sont pas accessibles.



Figure 16: Différentes familles de structure de flocculant (SNF)

⁷ Restabilisation : redevenir de nouveau stable ou nouvelle action de stabilisation.

Chapitre 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODES

Afin d'optimiser la déshydratation mécanique des boues par les centrifugeuses 1, 2, 3 et 4 de la STEP de la société Aquiris, les essais ont été réalisés au laboratoire avec trois types de polymères à différents dosages et à la fin, les résultats les plus conséquents ont été testés sur les centrifugeuses. Ce chapitre est consacré à la présentation du matériel expérimental et à la procédure utilisée au cours des tests et les méthodes d'analyse associées.

2.1. Matériels expérimentaux

Dans cette section, sont présentés la structure d'accueil, les produits indispensables à la réalisation de l'étude.

2.1.1. Présentation simplifiée du processus de traitement des boues à l'usine

Aquiris, la station d'épuration de Bruxelles-Nord, est une filiale du groupe international français Veolia. L'entreprise Aquiris est née par suite d'un appel d'offre de la Région de Bruxelles-Capitale. Cet appel d'offre avait pour objectif final, de réaliser la construction et d'exploiter la station d'épuration, pendant une période de 20 ans. L'expertise fournie par la société Veolia permet à Aquiris de jouir d'un rayonnement professionnel international. Ainsi, la station d'épuration possède des structures à la pointe du progrès, comme son procédé d'Oxydation par Voie Humide (OVH) par exemple, permettant de traiter ses boues organiques. Les étapes de traitement peuvent être décomposées en deux grandes étapes, correspondant chacune à une filière. On distingue ainsi, dans un premier temps, la file de traitement des eaux suivie de la file de traitement des boues, située en aval de la première filière et en fin la filière des utilités.

Le réseau d'égouttage étant unitaire, la station collecte, par la même voie, les eaux usées ménagères et les eaux de pluie. Après un premier passage dans une succession de dégrilleurs, permettant de retirer les débris solides, les eaux usées ont deux possibilités de trajectoire, en fonction du débit en entrée d'usine. La Figure 1 illustre ces deux possibilités de trajectoire. Si le débit d'entrée est inférieur à 8,2 m³/s, les eaux usées se dirigent vers la filière biologique. Si, en revanche, ce débit dépasse 8,2 m³/s, c'est-à-dire en cas de plus fortes intempéries, les eaux usées sont alors dirigées à la fois vers la filière biologique ainsi que vers la filière de traitement par temps de pluie, nommée ACTIFLO. Après le prétraitement, s'ensuit le traitement (primaire et biologique ou secondaire), puis le traitement des boues et en fin le traitement des utilités.

Le traitement des boues (est le secteur qui nous concerne directement). Les boues sont conditionnées dans les épaisseurs comme expliqué plus haut. Quand le niveau est très haut dans les épaisseurs ou quand la concentration est élevée, les boues sont pompées dans le stockeur 2 avant d'être soutirées vers la B.A. Une concentration de 30 à 50 g/l doit être maintenue. Une fois ces boues dans les centrifugeuses, grâce à la force de centrifuge, elles sont déshydratées et les boues épaissies tombent dans les pompes gavageuses à une siccité variable de 17 % quand il pleut et à 18,5 % quand il ne pleut pas. Ces pompes gavageuses les pompent et les envoient dans le silo 1 ou 2 en fonction du besoin. Les boues sont ensuite envoyées dans la trémie d'homogénéisation avant d'être hydrolysées (appelée CAMBI en usine), puis après cette

chauffe à haute température dans les réacteurs, les boues sont digérées dans deux digesteurs. Une partie de ces boues vont être déshydrater par la centrifugeuse 5 au moment voulu, une autre partie recirculée et en fin une autre partie envoyée à Athos pour une minéralisation. Ces boues sont déshydratées par un filtre presse à plateau.

En fin, la filière des utilités concerne tout ce qui est traitement des odeurs, traitement de l'eau pour une réutilisation en entreprise, production d'électricité...

2.1.2. Boues

Les échantillons de boues utilisés dans le cadre de ce travail proviennent de la station Aquiris. Les informations y relatives sont tirées du laboratoire de l'usine. Précisément, les boues des épaisseurs (pluvial et biologique) et celle de la bache d'alimentation des centrifugeuses ont été collectées quotidiennement pour les tests. Comme détaillé dans la revue de littérature, les boues proviennent du traitement biologique pour l'épaississeur biologique et d'Actiflo quand il pleut, mais aussi lorsque le débit d'entrée en station dépasse 8,2 m³/s. La concentration de boues provenant des bassins de clarification pour les épaisseurs varie de 5 à 12 g/l. A la sortie de ces derniers pour la Bache Amont (B.A), elle doit atteindre une concentration variable de 30-50 g/l pour une bonne centrifugation.

2.1.3. Polymères/Floculants organiques

Les polymères utilisés dans le cadre de notre expérience sont ceux utilisés dans l'usine, ce sont des polymères cationiques à différents taux de cationicité. Ils sont fournis par la Société Nouvelle Floerger (SNF, France), fournisseur agréé. Les caractéristiques de chaque polymère fournis par le fabricant sont consignées dans le Tableau 6.

Tableau 4: Caractéristiques des polymères

Caractéristiques	FO 4660	FO 4695	FO 5449 AF
Poids moléculaire (g/mol) ou Dalton	8-10.10 ⁶	8-10.10 ⁶	8-10.10 ⁶
Densité de charge (%)	45	40	40
Caractère ionique	Cationique	Cationique	Cationique
Couleur	Blanche	Blanche	Blanche
Taille des particules (mm)	2	2	2
Structure	Linéaire	Linéaire	Etoilée
Conditionnement	Big bag de 750 kg	50 sacs de 15 kg	Big bag de 750 kg

a) Préparation

Au sein de la station, on a trois types de polymère qui correspondent à trois centrales de préparation différentes. Le polymère FO 4660 est utilisé pour les centrifugeuses 1, 2, 3 et 4 pour traiter les boues de B.A (centrale à polymère 3100, 3200 et 3300 pour réserve). Le polymère FO 4695 est utilisé pour le conditionnement des boues dans les épaisseurs et le polymère FO 5449, est utilisé dans la centrifugeuse 5 pour le traitement des boues digérées (centrale à polymère 3400). Comme expliqué plus haut, chaque polymère est spécifique à chaque type de boues. La figure présente les centrales à polymère (voir Figure 17).

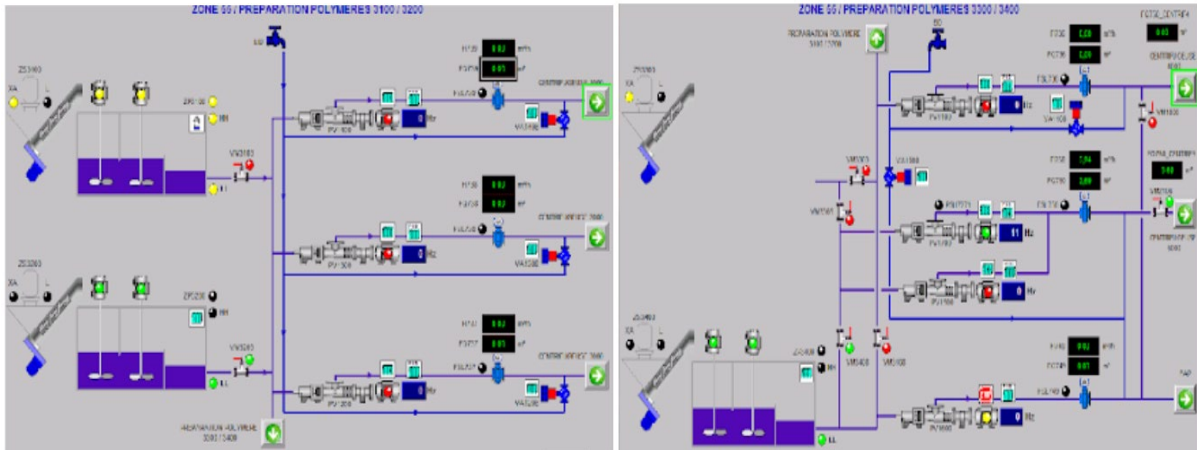


Figure 17: Les quatre centrales à polymère (respectivement 3100, 3200, 3300 et 3400)

Avant prélèvement de polymère, le débit et la concentration étaient mesurés.

b) Détermination de la concentration des polymères

À l'aide d'un plastique de 1,41 g vide qui a été pesé au préalable, la poudre de polymère était recueillie sur une durée de 30 secondes. Ensuite, l'ensemble était pesé sur une balance. À l'aide de la formule de l'Équation 1, le débit de la poudre qui se déversait dans la centrale à préparation a été calculé et la concentration, grâce à l'Équation 2.

$$Q_{po} = \frac{(M_{po}/1000)}{t} \quad \text{Équation 1}$$

Q_{po} : débit polymère (kg/h) ;

M_{po} : masse polymère seul (g) ;

T : temps (h)

$$C_o = \frac{Q_{po}}{Q_{eau}} \quad \text{Équation 2}$$

C_o : Concentration (g/l) ;

Q_{po} : Débit polymère (kg/h) ;

Q_{eau} : Débit de l'eau (m³/h).

2.1.4. Centrifugeuses

La centrifugeuse 1 a été utilisée pour tester le meilleur résultat obtenu avec le polymère FO 4695 après les tests au laboratoire, qui est le polymère utilisé sur les épaisseurs. Plusieurs paramètres de la centrifugeuse ont été pris en compte. Les centrâts ont été prélevés et analysés au laboratoire, les boues épaissies ont été prélevées et une balance rapide a toute suite été faite afin de connaître la siccité et à la fin, une description en termes de qualité de centrât a également été faite. Les caractéristiques des centrifugeuses sont consignées dans le tableau de l'Annexe 1. Certains paramètres des centrifugeuses influencent la siccité des bouse épaissies tels que la vitesse du bol, la vitesse de la vis, vitesse relative, le couple, les plaquettes de niveau (ANDRITZ, 2018).

La vitesse du bol est induite par le moteur le plus puissant et atteint une vitesse maximale de 3200 tr/min. La force centrifuge générée par la rotation du bol permet de séparer les particules solides du liquide à l'intérieur du bol. Les boues épaissies sortent par un orifice ouvert en

dessous du côté opposé à l'alimentation en revanche, les contrats sortent par un autre orifice placé du côté de l'alimentation et son anneau liquide est réglé par les plaquettes de niveau.

La vitesse de la vis est la vitesse de la vis convoyeuse induite le moteur de plus faible puissance. Elle tourne à une vitesse différente (plus petite) de celle du bol grâce au réducteur. Cette vis permet de transporter les particules solides vers la zone de séchage et de sortie. Elle tourne en continu.

La vitesse relative est la différence entre la vitesse du bol et de la vis divisée par le rapport K du réducteur utilisé. Elle constitue l'élément central qui influence la siccité des boues. Quand elle est basse, le couple et la siccité augmentent mais les matières en suspension dans l'effluent augmentent. Tandis que, lorsqu'elle est élevée, le couple et la siccité baissent et les MES baissent considérablement. L'équation suivante permet de la calculer

$$Vr = (Vbol * Vvis) / K \quad \text{Équation 3}$$

Vr : vitesse relative (tr/min) ;

Vbol : vitesse du bol (tr/min) ;

Vvis : vitesse de la vis (tr/min)

K : rapport de réduction en fonction du type de réducteur utilisé.

Le couple (%) est fonction de la vitesse relative. Il évolue inversement à la vitesse relative.

Les plaquettes de niveau servent à régler la hauteur de l'anneau liquide dans le bol. Ils influencent les performances de la machine. La Figure 18 suivante illustre l'évolution de ces paramètres.

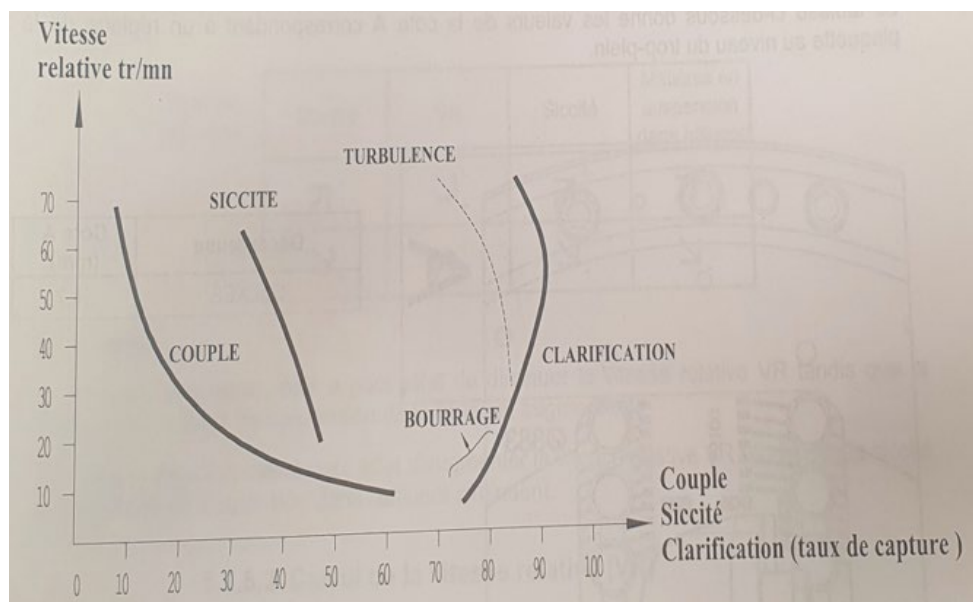


Figure 18 : Evolution des paramètres des centrifugeuses influençant la siccité

2.1.5. Protocole

Matériels :

- Jar test ;
- Boue de la bêche amont des centrifugeuses de concentration variable ;
- Polymère FO 4660, FO 4695, FO 5449 ;
- 6 béchers de 1000 ml ;
- Une pipette de 5 – 10 ml pour prélever la quantité de polymère nécessaire et l'introduire dans les béchers contenant les boues.

Procédure du jar test :

Détermination du dosage du polymère :

- Prélever sur le terrain, le polymère dans deux flacons de 250 ml dans le bassin de préparation ;
- Prélever 10 l de boue de la bêche amont des centrifugeuses ;
- Faire une balance rapide de la boue afin de déterminer la concentration de la boue ;
- Utiliser l'Équation 4 pour calculer le dosage (Dpo) en fonction du taux de traitement prévu :

$$Dpo = \frac{(C_{po} * V_{po})}{C_b} \quad \text{Dpo en ml} \quad \text{Équation 4}$$

- Remplir ces données dans différents tableau correspondant à chaque polymère (voir Annexe 2) ;

Évaluation des polymères :

- Remplir les 6 béchers de 1000 ml de boue ;
- Ajouter dans chacun, la dose correspondante (ml) à l'aide de la micropipette ;
- Mettre en agitation pendant 10 min à 300 tr/min ;
- Arrêter l'agitation, soulever les agitateurs ;
- Observer soigneusement le volume de boues décanté au cours de différents temps (après 5, 10, 20, 30, 60, 120 minutes) ;
- Les résultats sont sur le graphe de la Figure 24 (voir partie résultat).

Interprétation :

L'accent est mis sur les volets quantité et qualité d'eau obtenue après filtration (filtrat). Le meilleur résultat est celui qui est obtenu avec le plus bas taux de traitement, qui donne de gros floes, une bonne quantité d'eau et a une bonne vitesse de décantation (un bon égouttage).

Jar test avec dilution

11/04/2022

Après les résultats non satisfaisants du premier test, on a décidé de refaire le jar test mais, cette fois avec dilution afin de faciliter l'agitation. On a commencé par faire des mesures et calculs sur le polymère tel qu'on a fait avec le test précédent. Le même matériel a été utilisé. On a eu en plus, 10 l d'eau prélevés à la sortie des clarificateurs.

La procédure également reste la même, juste qu'une dilution X2 est effectuée (introduction de 500 ml de boue, 500 ml d'eau). La dose du polymère était également diminuée de moitié.

Même après cette dilution, on s'est rendu à l'évidence que le jar test n'est pas adapté pour ces tests de dosage de polymère, puisqu'on n'a toujours pas obtenu de résultats convainquants.

Après plusieurs échanges avec le fournisseur de polymère de l'usine (Mr Serge Cloots), la lecture du document sur la théorie de la centrifugation fourni par le fabricant des centrifugeuses et après discussion avec mon encadrante ; on a décidé de faire un autre type de test « contrôle de la floculation », qui est un test manuel.

Test « contrôle de la floculation »

12/04/2022

Les résultats obtenus grâce au jar test avec dilution, n'étant pas les résultats escomptés, on a décidé de faire un autre type de test avec la boue qui est le test de floculation avec agitation 5 fois à la main. Ce test avait déjà été réalisé au sein de l'usine après constat de centrât toujours noir après centrifugation pour les boues digérées.

Matériels :

- Boue de la bêche d'alimentation des centrifugeuses ;
- Polymère de la préparation ;
- 6 béciers de 1000 ml ;
- Une mini-pipette pour prélever les quantités de polymère nécessaires et introduire dans les béciers contenant les boues ;
- Tamis de mailles 1,25 mm ;
- Eprouvette pour recueillir l'eau après filtration (1000 ml) ;
- Système de filtre ;
- Pipette pour nettoyer la sonde du pH-mètre ;
- pH-mètre pour la mesure d pH des boues.

Procédure

Détermination du dosage du polymère :

- Prélever sur le terrain, chaque fois, deux flacons de 250 mml des polymères dans le bassin de préparation ;
- Prélever 10 l de boue de la bêche amont des centrifugeuses ;
- Faire une balance rapide de la boue afin de déterminer la concentration de la boue ;
- Utiliser l'Équation 4 pour calculer le dosage en fonction du taux de traitement prévu ;
- Remplir ces données dans différents tableaux correspondant à chaque polymère (voir Annexe 4) ;

Évaluation des polymères :

- Remplir les 6 béchers de 500 ml de boue ;
- Ajouter dans chacun, la dose correspondante (ml) à l'aide de la micropipette ;
- A chaque bécher et à l'aide d'un autre bécher vide, mélanger 5 fois en renversant dans l'autre bécher ;
- Verser complètement la boue flocculée dans le tamis de 1,25 mm de mailles puis attendre une filtration totale (égouttage) ;
- Un échantillon de boue épaissie a été pris pour chaque taux de traitement afin de calculer la siccité (%) au laboratoire ;
- Verser par la suite l'eau recueillie dans l'éprouvette afin de quantifier le volume d'eau et faire une observation après 5 minutes de décantation ;
- Les résultats sont consignés dans le tableau de l'Annexe 5 pour chaque polymère ;
- La centrifugeuse utilisée pour le test est visible à la Figure 20.



Figure 19: Matériel utilisé



Figure 20: Centrifugeuse 2 de l'usine

Chapitre 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Résultats

Après plusieurs jours de tests, les résultats obtenus sont présentés dans cette partie comparée avec les résultats d'autres études.

3.1.1. Jar test sans dilution avec le polymère FO 4660 :

Les Figure 21 et Figure 22 montrent les résultats obtenus pour une durée d'agitation de 5 et de 20 minutes.



Figure 21: Observation après 5 min d'agitation



Figure 22 : Observation après 20 min d'agitation

On constate qu'il n'y a pas eu réaction au cours de l'agitation car aucune présence de flocons. Après constat, un autre test a été réalisé avec dilution.

3.1.2. Jar test avec dilution

Les Figure 23 et 24 présentent les résultats obtenus avec 5 te 60 minute d'agitation.



Figure 23: Observation après 5 min d'agitation



Figure 24: Observation après 60 min d'agitation

Nous observons une formation de petits floccs fins dans les béchers 1, 2 et 5 et de floccs grossiers dans les béchers 3, 4 et 6. Nous avons également observé un changement important de volume de boue décanté entre les deux temps (voir Figure 25) mais, à une vitesse de décantation faible. Il y'a aussi présence de fins floccs dans tous les béchers.

Après 60 minutes, la couleur du surnageant est trouble dans les béchers 1, 2 et 5 tandis qu'elle est claire dans les béchers du 3, 4 et 6.

Volume de boue décanté

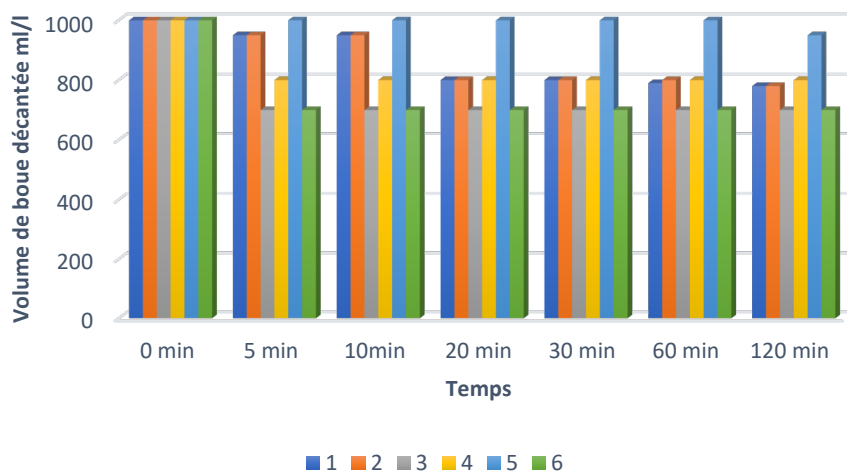


Figure 25: Volume de boue décantée du jar test avec dilution

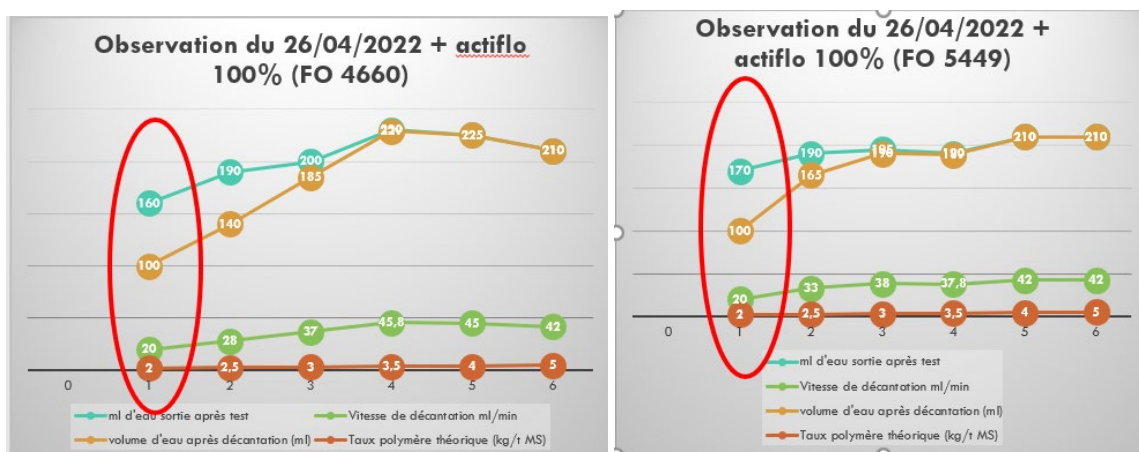
Le résultat le plus satisfaisant est celui du bécher 3 car avec 16,55 ml de polymère, on a une bonne formation de gros floccs, un surnageant clair et une bonne décantation car nous passons de 1000 ml à 0 min pour 700 ml à 60 min. avec une dose 27,59 ml, on a obtenu les mêmes résultats. Le tableau comportant les données de qualité des floccs est indiqué dans l'Annexe 3.

3.1.3. Résultats du test manuel

Les résultats sont présentés selon 3 sections. Tout d'abord, la présentation des résultats des tests quand l'Actiflo fonctionne et ensuite, quand il ne fonctionne pas, et en fin une brève analyse du suivi quotidien de la consommation des différents polymères.

a) Résultats du test quand il y'a fonctionnement des Actiflo

Il est constaté que tous les trois polymères ont très bien réagi (Figure 26).



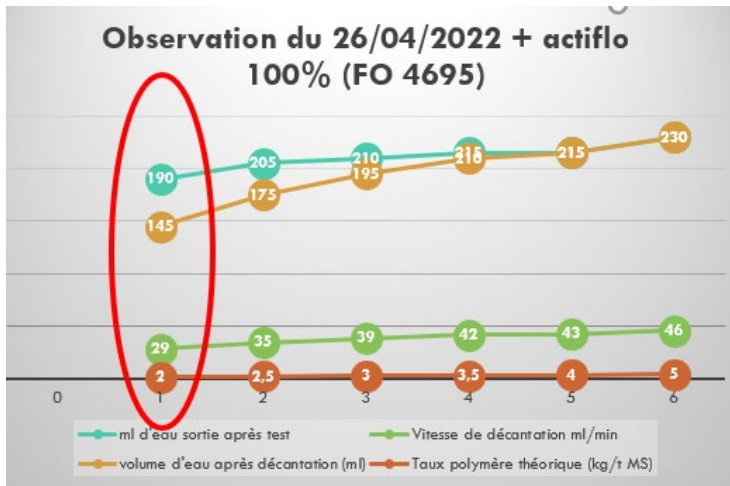


Figure 26: Résultats obtenu après un test avec fonctionnement à 100% d'Actiflo

Nous n'avons qu'un seul graphe pour chacun des polymères car, il n'a plu qu'une seule fois durant la période de test. Pour le test, la boue de départ avait une concentration de 42,97 g/l et les solutions de polymères avaient les concentrations (4.15 g/l; 4.74 g/l et 2.87g/l) respectivement pour les de polymères (FO 4660, FO 5449 et FO 4695), on a observé un meilleur résultat (taux optimal) avec le taux de traitement de 2 kg/t MS.

b) Résultats quand il y'a pas fonctionnement des Actiflo

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus sur les différents polymères. La Figure 27 présente les résultats obtenus avec le polymère des centrifugeuses 1 à 4.

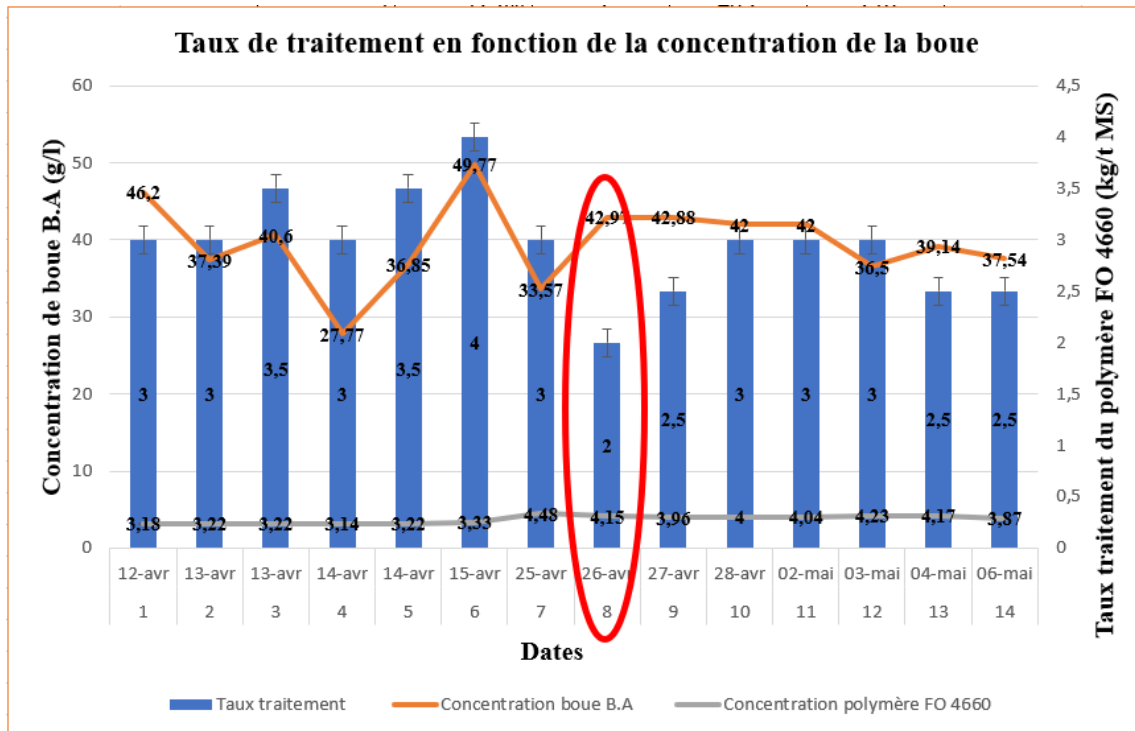


Figure 27: Taux de traitement du polymère FO 4660 en fonction de la concentration de la boue sur la durée d'étude

Le polymère FO 4660 est le polymère habituellement utilisé pour les centrifugeuses 1 à 4. En observant la figure ci-dessus, on constate que le taux de traitement varie en fonction de la concentration de la boue et du polymère. Pour une concentration fixe de polymère, le taux de traitement va augmenter avec la concentration de boue. Le taux de traitement optimal obtenu est de 3 kg/t MS avec une concentration comprise entre 3,7 à 4 g/l de polymère.

Ce test a été également fait avec le polymère des épaisseurs. La Figure 28 ci-dessous illustre les résultats obtenus avec le traitement des boues de B.A mais avec le polymère FO 4695 utilisé pour les épaisseurs en remplacement du polymère couramment utilisé.

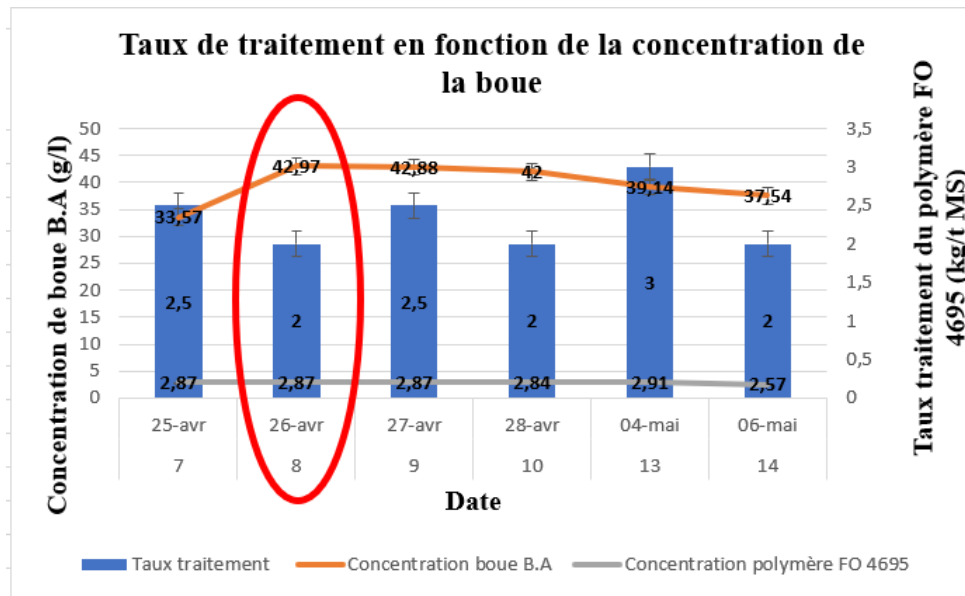


Figure 28: Taux de traitement de polymère 4695 en fonction de la concentration de boue

Les résultats obtenus avec le polymère des épaisseurs, nous ont permis de choisir 2,5 kg/t MS comme taux de traitement optimal avec une concentration de 2,87 g/l de polymère.

Pour plus de précision, une comparaison entre les deux polymères a été faite et le Tableau 5 illustre la situation.

Tableau 5: Comparaison des deux polymères avec un même taux de traitement

Éléments de comparaison	Polymère FO 4660	Polymère FO 4695
Concentration polymère de préparation (g/l)	4,15	2,84
Concentration de boue BA (g/l)	39,48	
Taux de traitement du polymère (kg/t MS)	3	3
Quantité d'eau obtenue après le test (ml)	171,67	160
Quantité d'eau après décantation (ml)	123,33	106,67
Vitesse de décantation (ml/min)	24,67	21,33

Après lecture du tableau, il est constaté qu'à faible concentration (2,84 g/l) du polymère FO 4695 comparé à celle du polymère FO 4660 (4,15 g/l), avec le même taux de traitement (3 kg/t MS), la même concentration de boue (39,48 g/l), on a obtenu presque les mêmes résultats. 171,67 ml d'eau, 123,33 ml d'eau décantées, 24,67 ml/min comme vitesse de décantation et un surnage de bonne qualité pour le polymère FO 4660 et 160 ml d'eau totale obtenue, 106,67 ml d'eau décantées, 21,33 ml/min comme vitesse de décantation et un surnage de bonne qualité. Ce dernier sera testé sur la centrifugeuse afin de confirmer ses performances.

Malgré le fonctionnement intermittent de la centrifugeuse 5 destinée à déshydrater les boues digérées, on a pu également faire quelques tests avec son polymère (FO 5449). La Figure 29 nous présente les résultats qui en ressortent.

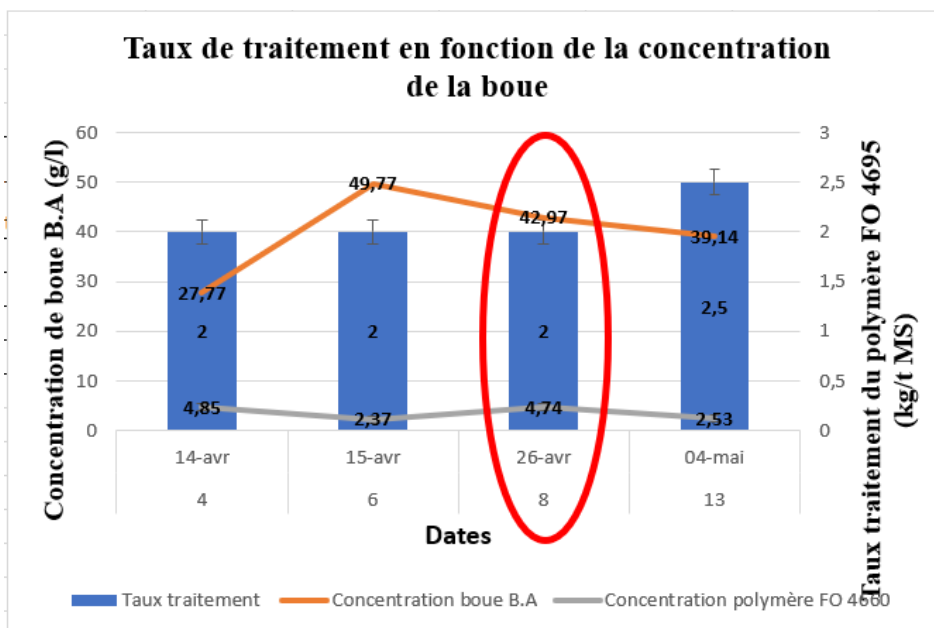


Figure 29: Taux de traitement du polymère FO 5449 en fonction de la concentration des boues

De base, ce polymère est utilisé pour les boues digérées des digesteurs. Ce dernier est utilisé à grande concentration (4-5 g/l). Lors des tests, pendant 2 jours, il n'a pas été dilué et 2 jours, on a effectué une dilution X2 telle que la Figure 23 le présente.

On constate que ce polymère agit également très bien sur la boue de la B.A et, à faible taux de traitement, même à faible concentration. Mais l'inconvénient avec ce polymère est qu'il est plus coûteux que les deux autres.

Le jour entouré est le jour où la filière Actiflo a fonctionné.

3.1.4. Suivi de la consommation des polymères

Au niveau de la supervision de contrôle de tous les process, une courbe de consommation de polymères n'a pas été prévue. Un tableau où était noté les heures de remplacement de big bag de polymère sur les centrales a été rempli par chaque opérateur qui effectuait le remplacement afin d'estimer la consommation réelle des polymères. Le Tableau 6 illustre les consommations.

Tableau 6 : Consommation des polymères

Polymères	FO 4660	FO 4695 Ep. Bio	FO 4695 Ep. Plu
Consommation	3 big bags	50 sacs de 15 kg/sac	33 sacs de 15 kg/sac
Nombre de jour	7	14	12
Coût en euros	5 647,5	1 882,5	1 242,45
Coût par mois (euros)	24 204	4 034	3 106

Sachant qu'1 kg de polymère FO 4660 coûte 2,51 euros, on a constaté qu'en 7 jours, on consommait 3 big bags de polymère FO 4660. Un big bag pèse 750 kg donc, on dépense environ 5648 euros par semaine pour ce polymère. Donc, 24 204 euros en un mois (30 jours).

Pour le polymère de l'épaississeur biologique, le prix est le même, mais la consommation de 50 sachets de 15 kg/sac s'est faite sur 14 jours, d'où une dépense de 1 882,5 euros. Donc, 4 034 euros par mois.

Pour celui de l'épaississeur pluvial, on a eu une consommation de 33 sacs de 15 kg/sac en 12 jours, ce qui induit un coût de 1 242,45 euros d'où 3 106 euros/ mois. Ceci conduit à un coût total de 31 344 euros par mois.

Il existe une problématique sur le coût d'achat des polymères car les prix ont augmenté de plus de 50% du 1^{er} juin 2021 au 1^{er} juin 2022. La Figure 30 suivante illustre la situation.

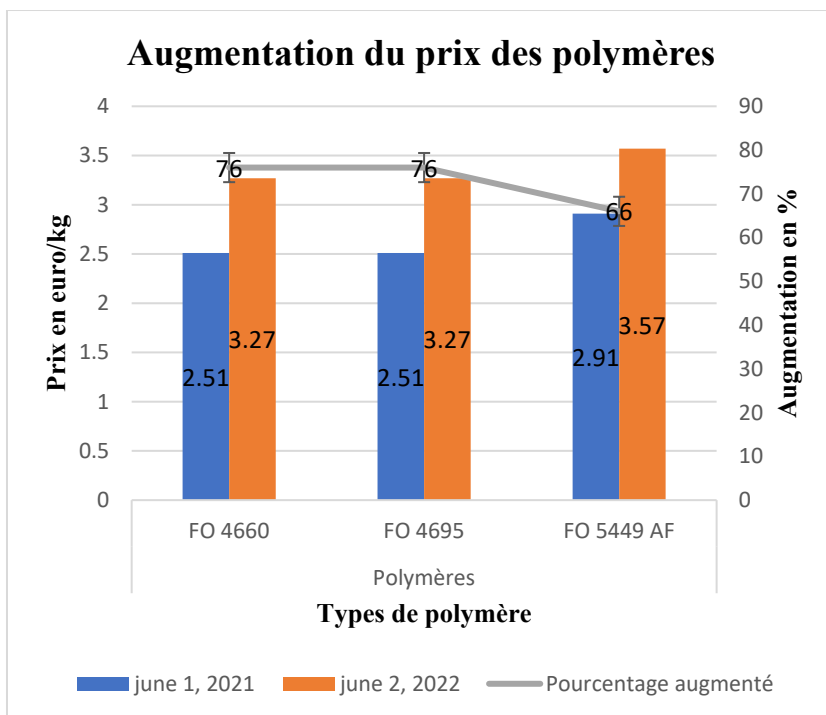


Figure 30 : Evolution du coût d'achat des polymères

3.1.5. Test sur les centrifugeuses

Test sur la centrifugeuse 1 (DC SC1001)

Vu la bonne réaction du polymère des épaisseurs sur les boues de la B.A, et ceci déjà à partir d'un taux de traitement de 2,5 à 3 kg/t MS. On a décidé de tester ce dernier sur les centrifugeuses. La centrale 3200 a été utilisée pour la préparation du polymère FO 4695 à une concentration réelle de 3,35 g/l. Le résultat obtenu est présenté à la Figure 31.

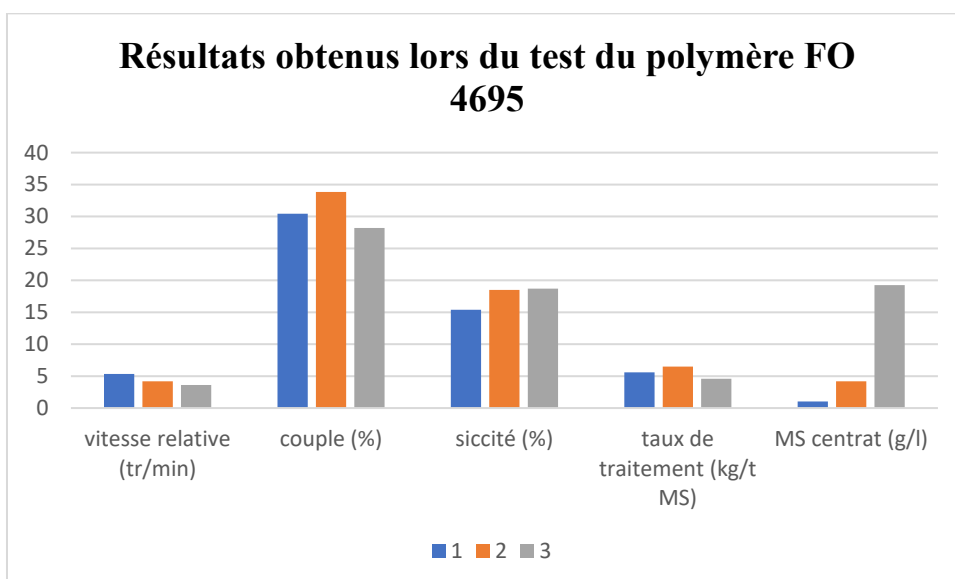


Figure 31 : Résultats obtenus lors du test du polymère FO 4695 sur la centrifugeuse

Les chiffres (1,2 et 3) représentent le nombre de fois que le taux de traitement a été changé.

Le test a débuté avec un débit de boues de 15 m³/h, un taux de traitement de 5,6 kg/t MS sur la centrifugeuse 2. On a obtenu une boue épaissie à 15,39% de siccité, avec un centrât de bonne qualité avec 1,03 g/l de MS. Le taux de traitement élevé avait pour but de rendre les contrats de bonne qualité avant de commencer à le baisser. Malheureusement, il y'a eu une incidence « Arrêt d'urgence ». On a ensuite, après correction du problème, continué le test sur la centrifugeuse 1. Dès lors, on n'a plus pu obtenir de bonnes qualités de contrats mais une bonne siccité (18,5 à 18.7%).

Test sur la centrifugeuse 3 (DC SC3001)

Le test a été également réalisé sur la centrifugeuse trois après réparation de cette dernière. Ce choix a été fait pour vérifier par la même occasion son bon fonctionnement après sa réparation. Le test s'est fait sur 1 jour et les résultats obtenus sont présentés à la Figure 32.

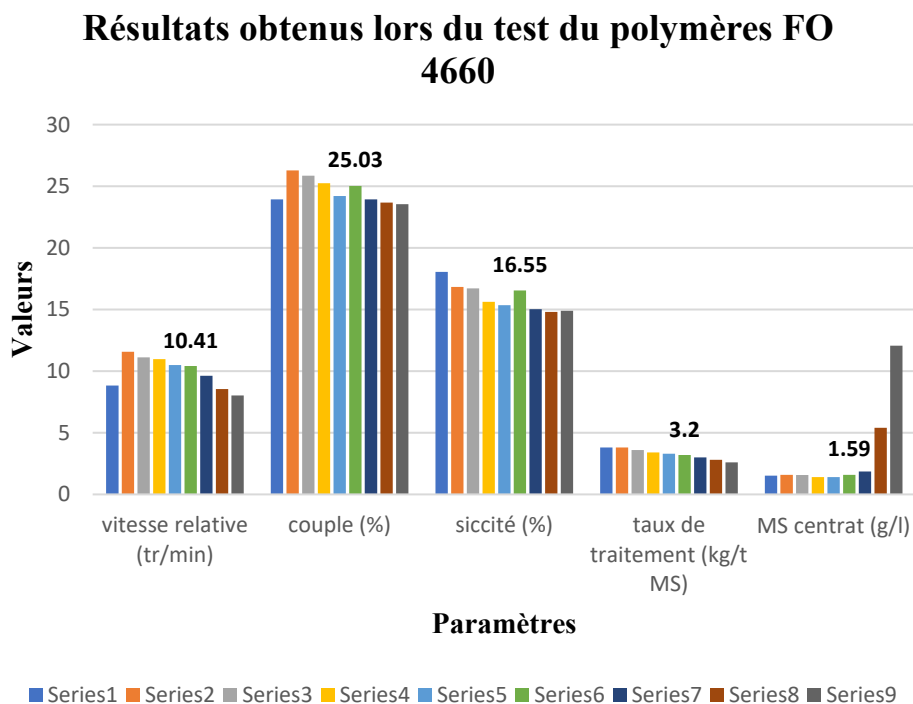


Figure 32 : Résultats obtenus lors du test du polymère FO 4660 sur la centrifugeuse

Le taux de traitement a été changé 9 fois. On a débuté avec un taux de traitement de 3,8 kg/t MS, on a obtenu une siccité de 18,05% et un centrât de bonne qualité. Le test s'est achevé avec un taux de traitement de 2,6 kg/t MS, on a obtenu une siccité faible (14,9%) et un centrât de mauvaise qualité (12,06 g/l). On a pu enregistrer le taux de traitement 3,2 kg/t MS comme le meilleur résultat. Car on a obtenu une siccité de 16,55% et un centrât de bonne qualité (1,59 g/l).

3.2. Discussions

3.2.1. Jar-test

Ce test n'a pas été concluant parce que : la vitesse d'agitation était de 300 tr/min qui est très faible par rapport à celle des centrifugeuses qui est de 3000 tr/min. En plus, la boue était très concentrée (36 g/l) pour cette vitesse. Le mélange n'a vraiment pas eu lieu au bout de 10 min et pas de décantation, ni formation de floccs. Ce résultat vient prouver les résultats des chercheurs Pascal et Marie-Andrée quand ils disent que les jar-tests, avec la procédure conventionnelle n'assurent pas un mélange adapté aux bonnes vitesses nécessaires à la formation de floccs dans les boues.

Au bout du jar-test avec dilution, nous pouvons conclure qu'au fur et à mesure que la quantité de polymère augmente, on observe de plus en plus de gros floccs. Mais le bécher 5 montre le contraire et cela peut s'expliquer par le fait que l'agitation n'était pas à 300 tr/min dans ce bécher donc, mauvaise mixtion.

Avec dilution, on a pu observer un changement mais les résultats ne sont pas toujours satisfaisants donc, nous concluons qu'en général, le jar-test n'est pas fait pour tester des produits visqueux mais est approprié aux produits liquides.

3.2.2. Test manuel

Il est constaté que tous les trois polymères ont très bien réagi. Ceci peut s'expliquer par le fait que les boues issues des Actiflo sont déjà assez épaisses et solides. Quand les Actiflo fonctionnent, un traitement à l'aide de chlorure ferrique a lieu pour assurer la coagulation. Ce processus se met en marche automatiquement quand le débit à l'entrée de la station dépasse 8,2 m³/s et permet de traiter directement l'eau de pluie. Le coagulant utilisé déstabilise les particules colloïdales en suspension dans l'eau et diminue, voir neutralise la charge électrique négative des colloïdes afin de favoriser leur rapprochement et la formation de petits floccs fragiles. Avec l'ajout du polymère, il y'a formation de gros floccs solides. Ces boues arrivent aux centrifugeuses et avec un nouvel ajout de polymère, cela permet une meilleure déshydratation.

Ceci peut également être dû à la présence de sable dans les boues car on observe des pertes de 2g/m³ de sables en surverse des hydrocyclones (ceci a été démontré par Mireille Mezague lors de son stage à la station). Ce sable accélère la floculation et la déshydratation. Mais il constitue aussi un danger pour le fonctionnement des centrifugeuses (usure).

En conclusion, quand la filière Actiflo fonctionne, on n'a pas besoin d'une grande dose de traitement du polymère. Ces résultats se rapprochent de ce que Tosoni a obtenu en 2015 quand il réalise des expériences sur le contrôle des performances de la déshydratation mécanique des boues résiduelles en filtre-presse. Il conclut qu'afin de favoriser le rapprochement des particules colloïdales et de déstabiliser la suspension, il est important d'utiliser un coagulant.

Le test réalisé quand les Actiflo ne fonctionnent pas nous a permis de juger du fonctionnement de ce dernier. Mais on constate que la concentration de polymère est très élevée comparé à ce que veut l'ingénieur process (maximum de 3,5 g/l). En observant la Figure 27, on constate que le taux de traitement varie en fonction de la concentration de la boue et du polymère. Pour une

concentration fixe de polymère, le taux de traitement va augmenter avec la concentration de boue. Ceci est en adéquation avec les résultats obtenus par Mikkelsen et Keiding. Ils remarquent qu'une siccité finale est plus faible pour une boue faible en EPS. D'autres auteurs tels que Sanin et Vesilind montrent que l'ajout de cations bivalents améliore la floculation.

En comparant les moyennes des résultats obtenus avec le traitement des polymères, on constate que le polymère FO 4695, à faible taux de traitement et à faible concentration, agit très bien sur les boues (Tableau 6). Ceci traduit sa capacité à agir dans les centrifugeuses.

3.2.3. Evaluation de la consommation des polymères

Cette consommation décroissante peut s'expliquer par les différentes concentrations aux centrales de préparation. Pour la centrale 3100 (polymère des centrifugeuses 1 à 4, on a besoin d'une concentration comprise entre 3 et 3,5 g/l, pour celle de l'épaississeur biologique, on a besoin de 2 g/l de concentration et en fin 1,5 g/l de concentration.

3.3.4. Tests sur les centrifugeuses

Le résultat obtenu avec la centrifugeuse D5LX peut s'expliquer par la diminution de la vitesse relative puisque nous sommes passés de 5,34 tr/min à 3.61tr/min. D'après Andritz, lorsque la vitesse relative diminue, le couple et la siccité augmentent mais les centrâts contiennent plus de matières en suspension si le couple n'est pas bien réglé.

Ce résultat peut également être dû au fait que la machine n'a pas été lavée durant 24h. car, il a été constaté durant les tests qu'une centrifugeuse produit des centrâts de mauvaise qualité parfois quand elle fait 24h sans être lavée. Nous pouvons aussi expliquer ce résultat par la variabilité constante de la qualité de boue et aussi par sa structure linéaire car, selon la société SNF, ce polymère a l'avantage de réagir à faible dose mais, les floccs formés ont une faible résistance et une surdose est possible. On pourra également penser aux forces de cisaillement des centrifugeuses car ces forces sont très élevée dans les centrifugeuses (300 à 4000 G) que dans les épaisseur (décantation gravitaire avec une force de gravité de 1 G)

En revanche, on a obtenu de meilleur résultat avec la centrifugeuse 3. Ceci peut s'expliquer par le fait que la centrifugeuse a été lavée avant le test. Car, avant lavage de la machine, un test avait été réalisé avec un taux de traitement de 3,8 kg/t MS, mais le centrât obtenu n'était pas de bonne qualité. Ce bon résultat peut également s'expliquer par la concentration élevée du polymère (4 g/l) et aussi sa structure linéaire car, selon la société SNF, ce polymère a l'avantage de réagir à faible dose mais, les floccs formés ont une faible résistance et une surdose est possible pour obtenir un bon centrât. On a observé une augmentation de concentration du polymère au cours du test. On a débuté avec une concentration de 4 g/l et fini avec environ 5 g/l.

Chapitre 4 : RECOMMANDATIONS

Durant le stage, grâce aux différentes rondes et tests réalisés sur site, plusieurs problèmes ont été constatés pour lesquels nous allons proposer des pistes de solutions.

4.1. Au niveau des centrales à polymères

Il a été constaté que les centrales des épaisseurs n'avaient pas de débitmètres donc il a été très difficile pour nous, de calculer la concentration de polymère au niveau des épaisseurs. Au niveau des centrales à polymère pour les centrifugeuses 1 à 4 et 5, il y'a un souci parce que quand la centrifugeuse 5 (centrale 3400) fonctionne, le débit en eau de la centrale 3100 diminue et donc, on assiste à une augmentation de la concentration de la solution de polymère. C'est sans doute ce phénomène qui favorise la formation des grumeaux dans la troisième cuve de la centrale 3100. Il a également été constaté qu'il existe une seule conduite d'amenée d'eau où sont raccordés les tuyaux pour le nettoyage ATHOS, CAMBI, centrifugeuses 1 à 4, 5, 6 et 7 et pour les centrales de préparation des polymères.

Pour remédier à ces problèmes, je recommande de placer pour les centrales 1 à 5, une première cuve et une autre pour la centrale des épaisseurs ainsi qu'un débitmètre afin de savoir réellement quel est la quantité d'eau utilisée pour la préparation.

Il faudrait également changer les pompes d'injection de polymère dans les centrifugeuses puisque, quand la filière Actiflo fonctionne, on n'a pas besoin d'une grande quantité de polymère mais, malheureusement, ces pompes ne permettent pas de diminuer le débit en dessous d'un certain seuil.

Pour terminer, vu la hausse de prix des polymères, je recommande de trouver un autre fournisseur qui livrera à des prix un peu plus bas.

4.2. Au niveau des centrifugeuses

Le lavage des centrifugeuses est primordial car, j'ai constaté lors de mes tests qu'une machine non lavée durant plus de 24h, donne des centrâts de mauvaise qualité. Tandis que, avec la même machine et les mêmes paramètres, mais la centrifugeuse étant lavée, on a obtenu des centrâts de très bonne qualité sur une longue durée. Je préconise dpc, un lavage d'environ 40 min toutes les 24h.

4.3. Pour les prochains tests

Vu nos limites pour les tests manuels (certains paramètres importants ne sont pas pris en compte comme la résistance spécifique à la filtration, le temps de succion capillaire...). Nous recommandons d'acheter la cellule d'égouttage gravitaire proposée par la norme européenne EN14701 de 2015. Cet appareil permet d'identifier les conditions de floculation, de contrôler les paramètres tels que la siccité du gâteau, l'indice d'égouttage, le temps d'incorporation du polymère, de peser le filtrat toutes les secondes et de travailler avec un logiciel qui fournit les résultats automatiquement sous forme de courbe. Notons que ce test est très rapide et permet de faire une dizaine de tests par jour. Cet appareil permet de se rapprocher le plus possible des machines industrielles (machines à déshydratation mécanique).

Nous devons veiller à suivre rigoureusement la norme belge **NBN EN 14701** qui indique les paramètres à contrôler et les conditions à respecter lors des tests de traitement des boues des eaux usées résiduaires, des boues digérées et des boues provenant des filières d'eau potable.

CONCLUSION

Dans un souci d'optimiser les centrifugeuses 1 à 4 à travers les polymères de la station de Bruxelles-Nord, des tests de dosage de différents polymères ont été réalisés sur les boues de la bache d'alimentation des centrifugeuses. Ces tests ont été réalisés au laboratoire dans un premier temps afin de choisir le taux de traitement optimal qui donne les meilleures performances (bonne formation des floccs et bon égouttage) avant de tester ce taux sur les centrifugeuses dans un deuxième temps. Cela a nécessité une étude du fonctionnement du processus de traitement des boues à l'aide des centrifugeuses, des différents polymères, et surtout une évaluation du coût de consommation de ces deniers.

Pour garantir un bon fonctionnement des centrifugeuses, il faut avoir un polymère qui permette une bonne floculation et qui favorise une bonne déshydratation à faible concentration et taux de traitement pour que le traitement soit le moins onéreux possible.

Au sein de la filière boue, la station utilise trois polymères ; le FO 4660 utilisé pour les centrifugeuses 1 à 4, le FO 4695 utilisé pour le conditionnement des boues au niveau des épaisseurs et le FO 5449 AF utilisé par la centrifugeuse 5 pour déshydrater les boues digérées. Ces différents polymères ont été utilisés lors des tests sur la boue de la B.A afin de déterminer celui qui donnait les résultats optimaux à plus faible concentration possible.

Les tests ont débuté avec la procédure classique de jar-test, mais au terme de ceux-ci, aucun effet n'a été observé car la vitesse de la machine expérimentale (300 tr/min) était trop faible pour un fluide aussi visqueux. Pour résoudre ce problème, nous avons dilué la boue d'un facteur 2. À la fin de ce nouveau test, une formation de petits floccs a été observée mais presque sans décantation observable. Afin de parvenir à faire des essais concluants, une procédure manuelle a été mise au point, dérivé de la procédure qu'utilisaient la plupart des chercheurs avant la sortie de la norme belge en 2015. Cette norme propose l'utilisation d'un appareil qui se rapproche le plus des machines industrielles, elle précise bien sûr la procédure à suivre et des paramètres à prendre en compte.

Ces tests manuels ont permis de mettre en évidence, que le polymère des épaisseurs fonctionne très bien à une concentration de 2,84 g/l à comparer aux 4,15 g/l pour le polymère habituel qui fonctionne également très bien à un même taux de traitement de 3 kg/t MS et sur une concentration de boue de 39,48 g/l.

Après les tests sur les centrifugeuses du polymère utilisé sur les épaisseurs avec une concentration de 3 g/l, on a obtenu une bonne siccité (18,7%) mais les centrâts étaient de très mauvaise qualité (19,26 g/l) avec un taux de traitement de 4,6 kg/t MS. Pour terminer, le test effectué avec le polymère prévu au départ pour les centrifugeuses a permis de montrer l'évolution de la siccité en fonction du taux de traitement

La durée du stage ainsi que la disponibilité d'une des centrifugeuses pour réaliser nos tests a constitué une limite pour notre étude. Le test avec les polymères n'a pu être réalisé qu'une seule fois et cela n'est donc pas très représentatif. Ce test devrait être refait en modifiant le

couple afin de vérifier leur influence sur les performances de traitement avant de conclure que ce polymère n'est pas adéquat pour les centrifugeuses.

ANNEXES

Annexe 1 : Caractéristiques des centrifugeuses

Type machine	D5LXC60CHPE2	D5LXC60CHPE2	Défaut	D5LLC30CHP
N° machine	133133053	400421095		80-3858
Nombre Heure/jour	24/24	24/24		24/24
Fonction	Décanter	Décanter		Décanter
Tag	Ct1 : DC_SC1001	Ct2 : DC_SC2001	Ct3 : DC_SC3001	Ct4 : DC_SC4000
Nombre jour de fonctionnement/Semaine	7/7	7/7		7/7
Vitesse de bol (tr/min)	2700-3220	2700-3220		3000-3200
Gamme de Vitesse relative appliquée (tr/min)	1-12	1-12		1-12
Anneau Liquide (mm)				
Couple de consigne habituelle (%)	20-30	20-30		20-30
Débit appliqué (m ³ /h) (boue entrée Ct)	20-32	20-32		20-32
Concentration boue alimentation MST des boues (%)	3-5	3-5		3-5
Concentration boue alimentation des centrifugeuses (g/l)	30-50	30-50		30-50
Débit appliqué (kgMS/h)				
Siccité atteinte (%)	17-18,5	17-18,5		17-18,5
Centrât MES (g/l)	1,5	1,5		1,5
Débit polymère (m ³ /h)	1,5-4	1,5-4		1,5-4
Concentration préparation polymère (g actif/l)	3,5	3,5		3,5

Annexe 2 : Tableau permettant le calcul du débit et de la concentration des polymères

Dates	Position vernier vis	Poids sachet vide (g)	Chronométrer le temps de remplissage en polymère du sachet (seconde)	Poids polymère + sachet (g)	Poids polymère seul (g)	Débit poudre (kg/h)	Concentration polymère (g/l)	Débit préparation du polymère (Qeau : m3/h)
07-04-22	5,00	9,14	30,00	310,70	301,56	36,20	4,02	9,00
08-04-22	5,00	9,14	30,00	421,65	412,51	49,52	5,83	8,50
	7,00	9,14	30,00	317,31	308,17	37,00	4,35	8,50
	4,00	9,14	30,00	257,42	248,28	29,81	3,51	8,50
11-04-22	4,00	9,14	30,00	240,67	231,53	27,79	3,16	8,80
12-04-22	4,00	9,14	30,00	242,16	233,02	27,97	3,18	8,80
13-04-22	4,00	9,14	30,00	245,48	236,34	28,37	3,22	8,80
14-04-22	4,00	9,14	30,00	239,07	229,93	27,60	3,14	8,80
15-04-22	4,00	9,14	30,00	253,00	243,86	29,27	3,33	8,80
25-04-22	4,00	9,14	30,00	337,47	328,33	39,42	4,48	8,80
26-04-22	4,00	9,14	30,00	313,34	304,20	36,52	4,15	8,80
27-04-22	4,00	9,14	30,00	299,76	290,62	34,89	3,96	8,80
28-04-22	4,00	9,14	30,00	302,6	293,46	35,23	4,00	8,80
02-05-22	4,00	9,14	30,00	305,2	296,06	35,54	4,04	8,80
03-05-22	4,00	9,14	30,00	318,96	309,82	37,19	4,23	8,80
04-05-22	4,00	9,14	30,00	315	305,86	36,72	4,17	8,80
06-05-22	4,00	9,14	30,00	292,82	283,68	34,06	3,87	8,80

Annexe 3: Tableaux de données qualitatives collectées pour le jar test

Observation après 30 min de décantation						
N° bécher	1	2	3	4	5	6
Aspect des floccs	Fin	Fin	Moyen	Moyen	Très fin	Élevé
Quantité des floccs	Petite	Petite	Moyenne	Moyenne	Petite	Grosses masses
Présence des fines (OUI=+; NON=-)	++	++	+	+	++	+
Vitesse de décantation	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible
Couleur du surnage (claire=+; trouble=-)	-	-	+	+	-	++

Annexe 4: Tableau pour chaque polymère pour le calcul du dosage

Test 10h polymère Ep.Bio

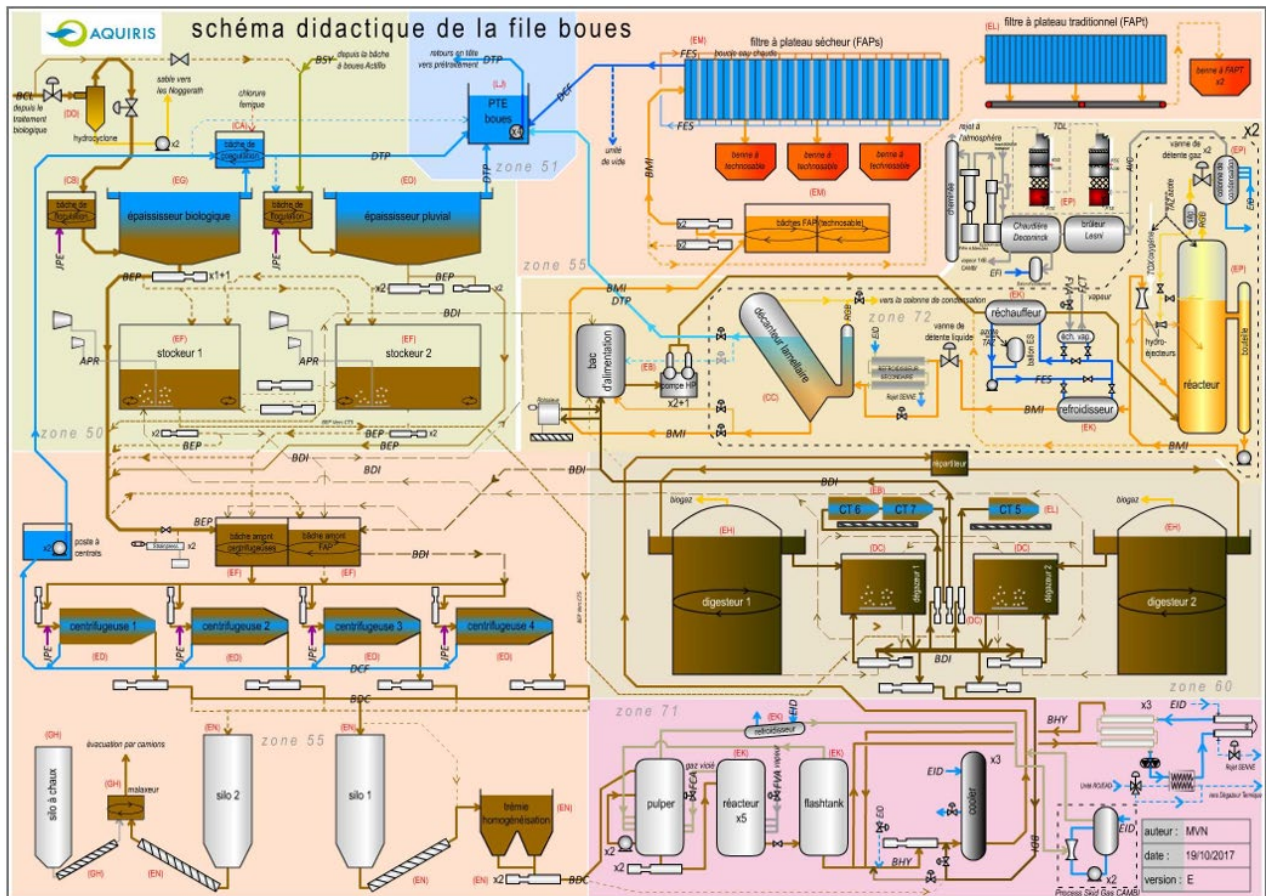
Date	06-05-22					
Réactif						
Données calculées	Polymère 4695		2,57	g/l		
	MS B.A		37,54	g/l		
Taux polymère théorique (kg/t MS)	2	2,5	3	3,5	4	5
ml polymère dans 1l boue	29,21	36,52	43,82	51,12	58,43	73,04
ml Polymère dans 0,5 l	14,61	18,26	21,91	25,56	29,21	36,52
MS polymère labo (g/l)	3,73					
MS boue labo (g/l)	38,33					
Taux polymère recalculé (kg/tMS)	2,84	3,55	4,26	4,98	5,69	7,11

Annexe 5: tableau de données quantitatives et qualitatives collectées avec le test manuel

Date	06/05/22	Observations : polymère FO 4660				
N° bécher	1	2	3	4	5	6
Aspet des floccs	Fin/léger	Moyen	Gros /lourd	Gros /lourd	Très gros /lourd	Très gros /lourd
Quantité de floccs	Petite	Moyenne	Grosse masse	Grosse masse	Grosse masse	Grosse masse
Couleur eau filtrée (clair +; trouble -)	+	+	+	++	++	++
Masse boue épaissie + coupelle	31	29,76	33,42	30,74	31,97	30,63
Masse boue séchée (g)						
Siccité (%)						

Volume de boue décanté après 5min (ml)	60	60	25	15	0	0
Quantité d'eau obtenue après filtration (ml)	145	220	195	220	205	220
Vitesse de décantation ml/min	17	32	34	41	41	44

Annexe 6: schéma de la filière boues



BIBLIOGRAPHIE

- AMORCE. (2012). *Boues de Station d'Épuration : Technique de traitement, Valorisation et Élimination*. Série Technique, DT 51.
- ANDRITZ. (2018). *Décanteuses haute performance: centrifugeuse type D (Manuel opérateur)*. France: ANDRITZ S.A.S.
- Aquiris. (2008). *La station d'épuration de Bruxelles-Nord*. Récupéré sur <https://www.aquiris.be/fr/environnement/lenvironnement>
- Arisily, T., & Hajji, A. (2020). Technologie de séchage solaire des boues des stations d'épuration des eaux usées et son impact sur la gestion des boues au Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 8(1), pp. 57-66. Consulté le Avril 09, 2022
- Assad, E. (2006). *Etude du processus de coagulation-floculation du système montmorillonite-chitosane dans l'élimination de métaux de transition*. Montréal: Université du Québec .
- Degremont. (2005). *Mémento technique de l'eau* (Vol. 1). Technique de l'ingénieur.
- Dieudé-Fauvel, E. (2003). *Analyse de la transition liquide-pâteux, rapport bibliographique*.
- Energie-environnement. (2022). *Energie-environnement.ch*. Récupéré sur sezvices cantonaux de l'énergie et de l'environnement: <https://www.energie-environnement.ch/dechets-recyclage/1431>
- Ezzarial, A., Sauvadet, L., Sire, S., & al. (2020). *Optimisation de la filière de traitement des boues pour limiter la dissémination de l'antibiorésistance*. ADEME.
- Garrido, F., Michel, C., & Morin, D. (2002). Les exopolymères bactériens ; Synthèse bibliographique. *BEGM RP-51637-FR*, 39.
- Higgins, M. J., & Novak, J. T. (1997). The effet of cations on the settling and dewatering of activated sludges: laboratory results. *water environnement research* , 215-224.
- IWPES. (2022). *Energie et environnement*. Bruxelles: L'Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique (IWEPS). Consulté le 04 08, 2022, sur <https://www.iweps.be/>
- Jin, B., Wilén, B.-M., & Lant, P. (2004). Impact of morphological and chemical properties of sludge flocs on dewaterability of activated sludge. *Chemical Engineering journal*, 115-126.
- Jorand , F., Guïcherd, P., Urbain, V., Manem, J., & Block, J. (1994). Hydrophobicity of activated sludge flocs and laboratory-grown bacteria. *Water Science and Technology*, 211-218.

- Jorand, F., Boue-Bigne, F., Block, J., & Urbain, V. (1998). Hydrophobic/hydrophilic properties of activated sludge exopolymeric substances. *Water Science and Technology*, 307-315.
- Jorand, F., Zartarian, F., Thomas, F., Block, J. C., & Bottero, J. Y. (1995). Chemical and structure (2D) linkage between bacteria within activated sludge flocs. *Water Research*, 1639-1647.
- Kaar, P. R., & Keinath, T. M. (1978). Influence of particle size on sludge dewatering. *Journal Water Pollution Control Federation* 50, 1911-1930.
- Kang, S.-M., Kishimoto, M., Shioya, S., Yoshida, T., Suga, K.-I., & Taguchi, H. (1989). Dewatering characteristics of activated sludges and effect of extracellular polymer. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 117-122.
- Kara, K., Gurakan, G. C., & Sanin, F. D. (2008). Monovalent cations and their influence on activated sludge floc chemistry, structure, and physical characteristics. *Biotechnology and Bioengineering*, 231-239.
- Kelessidis, A., & Stasinakis, A. (2012, janvier 15). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management* 32, pp. 1186-1195.
- Krapf, M.-E. (2012). *AGREGATION DE CELLULES BACTERIENNES PAR DES POLYMERES CATIONIQUES (POLYETHYLENEIMINE) : INFLUENCE DE LA MASSE MOLECULAIRE DU POLYMER ET DE LA PRESENCE/ABSENCE DE SURSTRUCTURES EXOPOLYMERIQUES BACTERIENNES SUR LA DESHYDRADATION DES BOUES BIOLOGIQUES*. Nancy: Université de Lorraine. Consulté le avril 10, 2022
- Labanda, J., Marco, P., & Llorens, J. (2004, novembre 30). Rheological model to predict the thixotropic behaviour of colloidal dispersions. *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, 249(1-3), pp. 123-126.
- Lambkin, D., & Nortcliff, S. (2004, novembre). The importance of precision in sampling sludges, biowastes and treated soils in a regulatory framework. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, p. 13.
- Liao, B. Q., Allen, D. G., Leppard, G. G., Droppo, I. G., & Liss, S. N. (2001). Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability. *Water Research* 35 (2), 339-350.
- Liao, B. Q., Allen, D. G., Leppard, G. G., Droppo, I. G., & Liss, S. N. (2022). Interparticle interactions affecting the stability of sludge flocs. *Journal Colloid Interf. Science*, 372-380.
- Martin, M. (2020). Coronavirus: un risque de contamination des boues d'épuration à destination de l'épandage agricole.
- Mezague, M. (2021). *Optimisation du procédé de traitement des eaux pluviales de la station d'épuration de Bruxelles-Nord (Actiflo)*. Liège: Université de Liège.

- Mikkelsen, L. H., & Keiding, K. (2002). Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implication to dewatering. *water research*, 2451-2462.
- Mininni, G., Blanch, A. R., Lucena, F., & Berselli, S. (2015, juin 20). EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. *Environmental Science and Pollution Research* 22, pp. 7361-1374.
- Monette, F. (1999). *Traitement des eaux usées par coagulation-floculation avec recirculation des boues chimiques*. Montréal: Université de Montréal.
- Novak, J., Muller, C., & Murthy, S. (2001). Floc structure and the role of cations. *Water Science & Technology*, 209-213.
- Nyens, E., Baeyens, J., & Weemaes, M. (2003). Hot acid hydrolysis as a potential treatment of thickened sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 275-293.
- Olivier, J. (2003). *Etude des filtres à bandes pour la déshydratation mécanique des boues résiduaire urbaines*. Université de Pau et des pays de l'Adour.
- OTV. (1997). *Traiter et valoriser les boues*. Collection OTV.
- Pambou, Y.-B. (2016). *Influence du conditionnement et de la déshydratation mécanique sur le séchage de boues d'épuration*. Liège: Université de Liège.
- Raynaud, M. (2010). *Couplage de caractérisation mécanique et physico-chimique en vue d'analyser les limites de la déshydratation des boues résiduaire*. Université de Pau et des pays de l'Adour.
- Ruus, J. H., Nielsen, P. H., & Keiding, K. (1992). On the stability of activated sludge flocs with implications to dewatering. *Water Research*, 1597-1604.
- Sanin, D., & Vesilind, P. (200). Biofloculation of activated sludge: the role of calcium ions and extracellular polymers. *Environmental Technology*, 1405-1412.
- Seyhi, B., Droguil, P., Buelna, G., Blais, J.-F., & Heran, M. (2011, Décembre 1). État actuel des connaissances des procédés de bioréacteur à. *Revue des sciences de l'eau*, 24(3), pp. 283-310. doi:<https://doi.org/10.7202/1006478ar>
- Shao, L., Peipei, H. P., & Yu, G. (2009). Effect of proteins, polysaccharides, and particle sizes on sludge dewaterability. *Journal of Environmental Science*, 83-88.
- SNF. (s.d.). *Préparation des polymères organiques*. France: Société Nouvelle Floerger.
- Sobeck, D. C., & Higgins, M. J. (2002). Examination of three theories for mechanisms of cation-induced biofloculation. *Water Research*, 527-538.
- Société Bruxelloise de Gestion de l'Environnement. (2012). La station d'épuration de Bruxelles-Sud se modernise. *Journal de la senne*, 3. Consulté le 04 08, 2022
- Société Publique de Gestion de l'Eau. (2018, 06 15). Récupéré sur site officiel de la Wallonie: <http://www.spge.be/fr/notion-d-equivalent-habitant-eh.html?IDC=1094&IDD=1368>

- SPGE. (2022, février 15). *Gestion des boues de stations d'épuration collectives*. Récupéré sur Etat de l'environnement Wallon: <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/DECHETS%208.html#body>
- Tosoni, J. (2015). *Compréhension des facteurs de contrôle des performances de la déshydratation mécanique des boues résiduelles en filtre-pressé*. Clermont-Ferrand: Université Blaise Clermont-Ferrand II.
- WWAP. (2017). *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2017. Les eaux usées – Une ressource inexploitée*. Paris: UNESCO. Récupéré sur <http://www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-en>