
Mémoire

Auteur : Mezagué Koudjou, Mireille

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 : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/11771>

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.

ULiège - Faculté des Sciences -
Département des Sciences et Gestion de L'Environnement

**Optimisation du procédé de traitement des
eaux pluviales de la station d'épuration de
Bruxelles-Nord (Actiflo®)**



Mémoire rédigé par Mireille MEZAGUE KOUDJOU

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

Promoteur : **Monsieur Hugues JUPSIN**

Comité de lecture : **Patrizia PERO, Fouad ZOUHIR**

Année Académique 2020/2021

« 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'Uliège.

« Le présent document n'engage que son auteur,

Mireille Mezague Koudjou »

Adresse électronique : mireillemezaguekoudjou@yahoo.fr

DEDICACES

« A mes enfants, afin que ce travail soit pour vous
une source de motivation, de détermination et de
persévérance »

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à **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.

Un merci particulier à l'Entreprise « **Aquiris by Veolia** » plus particulièrement à **Madame Patrizia PERO**, Directeur usine et Responsable du service Conduite des installations, pour l'opportunité de stage, la collaboration pour ce travail. En tant que superviseur professionnel, votre implication et vos disponibilités ont contribué énormément à la réussite de ce projet. Au travers vous, que tout le personnel d'Aquiris trouve mes chaleureux remerciements notamment : **Ekaterina, Gaétan, Nicholas ainsi que les opérateurs** pour leurs conseils et suivi minutieux qui m'ont permis de faire des analyses approfondies.

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

A **Abdou NJIKAM LINJOUOM**, mon camarade de formation, en tant qu'ingénieur hydraulicien, tes connaissances et compétences dans le domaine de dimensionnement d'ouvrages hydrauliques m'ont été d'un très grand soutien.

Toute ma reconnaissance à mes parents « **KOUDJOU** », mes frères et sœurs qui ont toujours cru en moi : un parcours difficile parsemé d'embûches, mais un aboutissement qui vient essuyer toutes les larmes. Une seule phrase « MERCI DU FOND DU CŒUR ».

Enfin, toute ma gratitude à mon compagnon **Bertran KOUETCHA JIEMBOU**, qui a toujours été là dans les meilleurs moments comme dans les moments d'angoisse, un support affectif et moral sur lequel j'ai pu compter.

RESUME

Afin d'assurer l'assainissement urbain des eaux des 2/3 de la Région de Bruxelles-capitale et ses environs, avec une capacité de 1.4 millions d'équivalents habitants, la station de Bruxelles-Nord voit le jour en octobre 2007. Celle-ci a une capacité de traitement de 16.4 m³/s et utilise pour le traitement des eaux pluviales, le traitement physico-chimique dénommé Actiflo®. C'est un procédé de clarification à très grande vitesse dont la spécificité réside dans l'utilisation du microsable et de réactifs pour abattre rapidement la pollution particulaire et colloïdale contenue dans les eaux. L'une de ses étapes est la séparation de la boue du microsable qui est réutilisé.

L'amélioration des performances et la réduction des coûts liés au fonctionnement de la station est une préoccupation constante d'Aquiris, la présente étude a donc pour objectif de contribuer à l'optimisation du procédé Actiflo® par l'analyse et la réduction de la perte en microsable en surverse des hydrocyclones. Ce microsable étant perdu dans les boues ne peut être réutilisé et doit donc être remplacé d'où le coût supplémentaire, de plus ce sable pose problème dans la filière de traitement des boues.

Cette optimisation, a été réalisée par un suivi en continu du procédé durant trois mois, au moyen des tests expérimentaux qui nous ont permis de quantifier les pertes en sable en sousverse et surverse des quatre hydrocyclones présents sur la station. En premier, sur la base de leurs caractéristiques actuelles de fonctionnement et ensuite, des modifications ont été proposées et testées sur la taille de la buse de surverse de ceux-ci. Ces tests, nous ont aussi permis d'identifier d'autres facteurs qui provoquent les pertes en sable, et, nous avons proposé des solutions pour les limiter.

Le cahier des charges de la station impose une concentration en sable en surverse des hydrocyclones inférieure à 2 g/m³. Ce qui n'est pas le cas pour les hydrocyclones étudiés, leur concentration en sable variait entre 3 et 6.53 g/m³, soit environ 40% au-dessus de la consigne. Ensuite, après avoir modifié la taille des buses de surverse, on a constaté une nette amélioration des pertes en sable, qui sont désormais de 3 g/m³ ou moins.

Afin d'optimiser encore les performances de l'Actiflo® et améliorer le fonctionnement des hydrocyclones, on recommande de réduire encore légèrement la taille des buses de surverse. Et surtout de stabiliser le débit et pression d'alimentation, paramètres conditionnant une bonne séparation dans les hydrocyclones, ceux-ci présentaient une certaine instabilité. A

l'heure où j'écris ces lignes, les pompes viennent d'être remplacées pour éliminer ce défaut et le procédé devrait être passé sous les 2 g/m³ de perte en sable en surverse.

Mots clés : traitement des eaux, traitement physico-chimique, eaux pluviales, Actiflo®, hydrocyclones, pertes en sable, optimisation, surverse, sousverse.

ABSTRACT

In order to treat water of 2/3 of the Brussels-Capital Region and its surroundings, with a capacity of 1.4 million population equivalent, the Brussels-North treatment plant has been created in October 2007. This plant treat maximum 16.4 m³/s and uses physicochemical treatment to treat rainwater with a process called Actiflo®. It is a very highspeed clarification process where microsand and reagents are used to quickly remove particulate and colloidal pollution from wastewater. One of its steps is the separation of the sludge the microsand wich must be reused.

Improvement of performance and reduction of costs associated with the operation of the station is the main goal of Aquiris, the objective of this study is to contribute to the optimization of the Actiflo® process by analyzing the loss of microsand in hydrocyclones overflow. This microsand is lost in surverse with the sludge, with problems in the sludge treatment, and muist be replace in the process with associated cost. To achieve this, we continuously monitored the process for three months. Using experimental tests that allowed us to calculate the rate of sand in underflows and particularly in overflows of the four hydrocyclones and hence quantify sand losses. Firstly, the basis of their current operating characteristics has been studied and, secondly, some changes have been proposed mainly in the size of the overflow nozzle of these hydrocyclones. Through the tests, we also identified some factors that influence sand losses and proposed solutions to improve these limiting factors.

According to the station's specifications, sand losses in hydrocyclones overflow must be less than 2 g/m³. However, the four hydrocyclones studied have an overflow sand concentration between 10 and 40% above this standard. With the change in the diameter of the overflow nozzle from 175 to 160 mm; we observed an improvement in losses from 40 to 10%.

In order to obtain the best performance and to optimize the hydraulic malfunction observed on hydrocyclones, it is recommended to reduce the nozzle size by 10 mm and to make the flow and the pressure of the power supply reliable, which are the key parameters for a good separation.

Keywords: wastewater treatment, physico-chemical treatment, rainwater treatment, Actiflo® process, hydrocyclones, sand losses, optimization, nozzle overflow, underflow.

Table des matières

DEDICACES.....	3
REMERCIEMENTS	4
RESUME	5
ABSTRACT	7
LISTE DES FIGURES.....	11
LISTE DES TABLEAUX	12
ABREVIATIONS.....	13
LISTE DES UNITES.....	14
INTRODUCTION	15
1. Contexte de l'étude	15
2. Problématique	16
3. Objectif général	18
3.1. Objectifs spécifiques.....	18
4. Résultats attendus.....	18
5. Méthodologie	18
6. Organisation du travail	19
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE.....	20
A. Procédé Actiflo®	20
I. Rôle de la Coagulation-Floculation-Décantation dans le traitement des eaux usées.....	20
I.1. Matières en suspension et colloïdales comme caractéristiques des particules à traiter	20
I.2. Stabilité des particules	22
I.3. Coagulation.....	23
I.3.1 Mécanismes d'abattement de la turbidité.....	23
I.3.2. Types de coagulants utilisés	25
I.3.3. Paramètres affectant la coagulation	26
I.4. Floculation	27
I.4.1. Théorie.....	27
I.4.2. Floculation lestée	28
II. Procédé Actiflo® de la STEP	28
II.1. Définition et schéma général de fonctionnement d'Actiflo®	28
II.2. Application : Actiflo® eaux pluviales de la STEP	30
II.2.1. Capacité de traitement Actiflo®	30
II.2.2. Opération	31
II.2.3. Avantages et inconvénients du procédé.....	33

B. Etude théorique d'un hydrocyclone.....	34
III. Séparation centrifuge et hydrocyclone	34
III.1. Principe de la force centrifuge	34
III.2. Les hydrocyclones de séparation solide-liquide.....	36
III.2.1. Définition et histoire.....	36
III.2.2. Conception d'un hydrocyclone.....	36
IV. Principe et mode opératoire d'un hydrocyclone	37
IV.1. Opération d'un hydrocyclone	37
IV.2. Paramètres caractéristiques d'un hydrocyclone et modèles mathématiques	38
IV.2.1. Paramètres caractéristiques	38
IV.2.2. Modèles mathématiques	39
IV.3. Avantage des hydrocyclones.....	40
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES.....	40
A. Opérationnalité des hydrocyclones de la STEP	40
I. Rôle des hydrocyclones dans le processus Actiflo®	40
I.1. Présentation des hydrocyclones	40
I.2. Opération	41
I.3. Critères de performance des hydrocyclones.....	42
I.3.1. Débit d'alimentation des hydrocyclones.....	42
I.3.2. Pression d'alimentation des hydrocyclones.....	42
I.3.3. Caractéristiques géométriques des hydrocyclones.....	43
II. Problématique de perte en microsable dans les hydrocyclones.....	45
B. Test sur Actiflo® pour quantifier les pertes en microsable dans les hydrocyclones.....	47
III.1. Objectifs des tests	47
III.2. Protocole utilisé pour le test	48
III.3. Equipements.....	48
IV. Opération	49
IV.1. Démarrage Actiflo®	49
IV.2. Dosages réactifs	49
IV.2.1. Chlorure ferrique et le polymère	49
IV.2.2. Microsable.....	50
IV.3. Prélèvement échantillons sur site.....	51
IV.4. Analyse des échantillons laboratoire	53
IV.5. Formule calcul Taux de sable	54
CHAPITRE III : RESULTATS ET RECOMMANDATIONS.....	55

A. Quantification de la perte de sable par les hydrocyclones.....	55
I. Résultats des tests avec un diamètre de buse de 175 mm	55
I.1. Vérification de la représentativité des échantillons.....	55
I.2. Synthèse des tests réalisés.....	56
I.3. Synthèse des résultats obtenus sur les hydrocyclones avec un diamètre de la buse de 175 mm	57
I.3.1. Hydrocyclone 2540 d'Actiflo® 2	57
I.3.2. Hydrocyclone 2550 d'Actiflo® 2	60
I.3.3. Hydrocyclone 1540 d'Actiflo® 1	61
I.3.4. Hydrocyclone 1550 d'Actiflo® 1	62
I.4. Récapitulatif des résultats	63
II. Résultats des tests avec un diamètre de la buse de 160 mm	64
II.1. Résultats des tests avec un diamètre de buse de 160 mm	65
II.1.1. Comportement de l'hydrocyclone 2550 après modification de la buse de surverse	65
II.1.2. Comportement de l'hydrocyclone 1550 après modification de la buse de surverse	67
II.3. Influence des problèmes liés à l'opérationnalité des hydrocyclones	69
B. Recommandations	69
III. Au niveau des hydrocyclones	70
III.1. Agir sur les buses.....	70
III.1.1. Réduire de nouveau de 10 mm le diamètre de la buse de surverse.....	70
III.1.2. Contrôler régulièrement les buses de sousverse et surverse	70
III.2. Fiabiliser les pompes de recirculation.....	70
IV. Agir sur certains paramètres de fonctionnement Actiflo®	71
CONCLUSION	73
BIBLIOGRAPHIE.....	76

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma d'épuration de la STEP de Bruxelles-Nord	17
Figure 2: Stabilité d'une suspension colloïdale	22
Figure 3 : Coagulation par théorie de la double couche	24
Figure 4: Mécanisme d'emprisonnement des particules dans la phase de coagulation	25
Figure 5: Schéma du système Actiflo®	29
Figure 6: Etapes de traitement des eaux par Actiflo® de la STEP	31
Figure 7: Rôle du FeCl ₃ dans la coagulation.....	32
Figure 8: Rôle du polymère dans la floculation.....	32
Figure 9 : La force centrifuge et les autres forces d'un composé à centrifuger.....	35
Figure 10: Schéma d'un hydrocyclone	37
Figure 11 : Différentes trajectoires d'une particule dans un hydrocyclone.....	38
Figure 12: Répartition de la séparation boue/microsable des hydrocyclones de la STEP	41
Figure 13: Schéma d'un hydrocyclone montrant ses caractéristiques géométriques principales.....	43
Figure 14: Visualisation phénomène perte microsable dans les hydrocyclones	45
Figure 15: Phase de démarrage Actiflo® via l'automate	49
Figure 16: Variation taux de sable en fonction du débit et des hydrocyclones.....	50
Figure 17: Echantillon TS sousverse pour lecture quantité sable Actiflo®	52
Figure 18: Différentes textures des boues de la surverse des hydrocyclones	53
Figure 19: graphique représentant les moyennes de pertes en sable en surverse de l'hydrocyclone 2540 en fonction du débit d'entrée	58
Figure 20: Graphique représentatif TS sousverse hydrocyclone 2540	59
Figure 21: Moyenne des pertes en microsable en surverse et TS en sousverse de l'hydrocyclone 2550	60
Figure 22: Photo montrant la forte concentration de solides autres que du sable en sousverse de l'hydrocyclone 2550	61
Figure 23: Moyenne des pertes de microsable en surverse et TS en sousverse hydrocyclone 1540... ..	62
Figure 24: Moyenne des pertes de microsable en surverse et TS en sousverse hydrocyclone 1550... ..	63
Figure 25 : exemple d'une décharge en parapluie (à gauche) et en boudin (à droite).....	64
Figure 26: Comparaison TS en surverse des 4 hydrocyclones en fonction du débit.....	64
Figure 27: Modification diamètre buse surverse de 175 à 160 mm	65
Figure 28: Résultat des tests avec une buse de surverse de 160 mm sur l'hydrocyclone 2550	66
Figure 29: comparaison TS en surverse de l'hydrocyclone 2550 en fonction du débit et en fonction du diamètre de la buse de surverse	66
Figure 30: Echantillon de sable et de boue prélevé sur l'hydrocyclone 2550.....	67
Figure 31: comparaison des TS en surverse de l'hydrocyclone 1550 en fonction du débit et du diamètre de la buse de surverse	67
Figure 32: Variation débit d'alimentation hydrocyclone 2550 en fonctionnement	68
Figure 33: Problèmes rencontrés avec le procédé Actiflo®	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Quelques particules et leur temps de décantation	21
Tableau 2: Coagulants dérivés des sels d'aluminium et de fer	26
Tableau 3: Données de dimensionnement Actiflo®	30
Tableau 4: Performances Actiflo® en matière de rejets.....	30
Tableau 5: temps de séjour traitement Actiflo® dans les différents bassins	33
Tableau 6: Répartition hydrocyclones par Actiflo®	42
Tableau 7: Caractéristiques géométriques des hydrocyclones et leur diamètre.....	45
Tableau 8: évolution des pertes en sable des hydrocyclones de la STEP.....	46
Tableau 9: Modification apportée aux buses de sousverse et surverse des 4 hydrocyclones	47
Tableau 10 : Concentration FeCl3 et polymère en fonction de la DCO	50
Tableau 11: Liste des échantillons analysés	56
Tableau 12: Nombre de tests réalisés par hydrocyclones et par diamètre de buse surverse/ sousverse	56
Tableau 13: Paramètres de fonctionnement des hydrocyclones.....	57
Tableau 14: résultats perte en sable hydrocyclone 2540	58
Tableau 15: Résultats des pertes en sable en surverse et TS en sousverse de l'hydrocyclone 2550 ...	60
Tableau 16: Résultats des pertes de sable en surverse et TS en sousverse de l'hydrocyclone 1540 ...	61
Tableau 17 : Résultats des pertes de sable en surverse et TS en sousverse de l'hydrocyclone 1550 ..	62

ABREVIATIONS

Dc	Diamètre du cylindre
DCO	Demande Chimique en Oxygène
D _e	Diamètre d'alimentation
D _s	Diamètre de la sousverse
D _{sr}	Diamètre de la surverse
EB	Eaux brutes
EH	Equivalent Habitant
ERU	Eaux Résiduaires Urbaines
FeCl ₃	Chlorure ferrique
MES	Matières en Suspension
MM	Matière Minérale
MV	Matière Volatile
NTK	Azote Kjeldahl Kotal
OTV	Omnium de Traitement et de Valorisation
P _{tot}	Phosphore Total
SBGE	Société Bruxelloise de Gestion de L'Environnement
STEP	Station d'Epuraton
TS	Taux de Sable
V _s	Vitesse de sédimentation

LISTE DES UNITES

g	gramme
g/L	gramme par litre
g/m ³	gramme par mètre cube
kg/m ³	kilogramme par mètre cube
L	Litre
m	mètre
mm	millimètre
m/s	mètre par seconde
m/s ²	mètre par seconde au carré
m ³	mètre cube
m ³ /h	mètre cube par heure
m ³ /s	mètre cube par seconde
mg/L	milligramme par litre
ml/ L	millilitre sur 1 litre
NTU	Unité Néphélonétries
Pa	pascal
µm	micromètre
W	Watt

INTRODUCTION

1. Contexte de l'étude

La problématique d'assainissement des eaux usées est un enjeu planétaire trop souvent méconnue du grand public. Selon l'Organisation des Nations Unies (ONU), environ 80% des eaux usées résultant des activités humaines sont déversées dans les rivières ou la mer sans aucune dépollution. A cet effet, l'Objectif du Développement Durable six « ODD6 » a été défini dont la cible 2 vise l'accès et le renforcement des services d'assainissement pour tous d'ici 2030¹. La Réglementation Européenne quant-à-elle a commencée à prendre la mesure du sujet de l'assainissement un peu plutôt, la priorité a alors été donnée au traitement des eaux usées urbaines. Ses objectifs ont été formalisés dans la Directive relative aux eaux résiduaires urbaines du 21 mai 1991, qui impose la collecte et le traitement de la globalité des eaux urbaines résiduaires dans des délais qui s'échelonnent entre fin 1998 et fin 2005 selon la taille de l'agglomération (Conseil Européen, 1991). Pour un réseau unitaire, qui collecte à la fois les eaux résiduaires et pluviales, cette Directive implique de prendre en compte pour le dimensionnement, des ouvrages de traitement, les débits et les charges par temps de pluie (Sauvignet & Tisserand, 2007).

La Région de Bruxelles afin de répondre à cet énorme défi d'assainissement, vis-à-vis de l'Arrêté de son Gouvernement du 23 mars 1994 relatif au traitement des eaux urbaines résiduaires, qui transpose en droit bruxellois des normes imposées par les Institutions Européennes (Directive 91/271/CEE du 21 mai 1991 et surtout Directive cadre de l'eau 2000/60/CE) ; a créé la Société Bruxelloise de Gestion de l'Eau (SBGE) le 27 octobre 2006. Cette mission, la SBGE l'a confiée aux stations d'épuration: la station d'épuration de Bruxelles-sud qui permet de traiter les eaux usées du sous-Bassin Sud 360 000 Équivalents-Habitants (EH) (Société Bruxelloise de Gestion de l'Environnement, 2012). Et surtout la station d'épuration de Bruxelles Nord, d'une plus grande capacité 1,4 million EH². C'est cette dernière qui nous intéresse particulièrement compte tenu de sa capacité (300 millions de litre d'eaux usées traitées par jour, soit 110 millions de m³ traitées annuellement), des procédés qu'elle utilise (traitement biologique en temps sec et traitement physico-chimique en temps de pluie,

¹ Objectif 6 : Garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable – Développement durable (un.org) consulté le 10/05/2021.

² [Historique | Aquiris](#), consulté le 10/05/2021.

pour une capacité de traitement de 16.4 m³/s ; soit 8.2 m³/s par procédé³.) et du rayonnement international dont elle jouit (troisième plus grande station d'épuration d'Europe).

Aquiris, filiale du Groupe International Veolia, est née suite à 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 Senne⁴. Pour mieux appréhender la station, on distingue trois filières : eau, boue et les utilités. Pour ce qui est de la filière eau, deux procédés sont applicables : le traitement biologique qui est couramment utilisé et surtout, le traitement temps de pluie dit Actiflo[®] que ce mémoire se propose d'étudier.

2. Problématique

Activé en temps de pluie lorsque le débit d'eau entrant excède 8,2 m³/s (débit maximum de traitement par la filière biologique de la station), Actiflo[®] est un procédé physico-chimique de traitement des eaux très compact et à très grande vitesse utilisant des réactifs et du microsable. Développé et breveté par Veolia Water Technologies, sa spécificité réside dans l'utilisation de microsable, qui sert à initier, faciliter la formation des floccs⁵ et accélérer leur décantation (Aquiris, 2008). L'eau traitée qui ressort est envoyée directement dans le milieu récepteur et la boue qui résulte du processus est pompée et renvoyée dans les hydrocyclones (ce schéma est représenté à la figure 1) :

³ Présentation du procédé Actiflo[®], écrit par Aquiris en 2008.

⁴ La Senne est un Bassin versant en Belgique, qui s'étend sur les régions wallonnes, bruxelloise et flamande. C'est le milieu réceptif des eaux traitées à la station

⁵ Un flocc est un ensemble de particules solides qui s'agglomèrent.

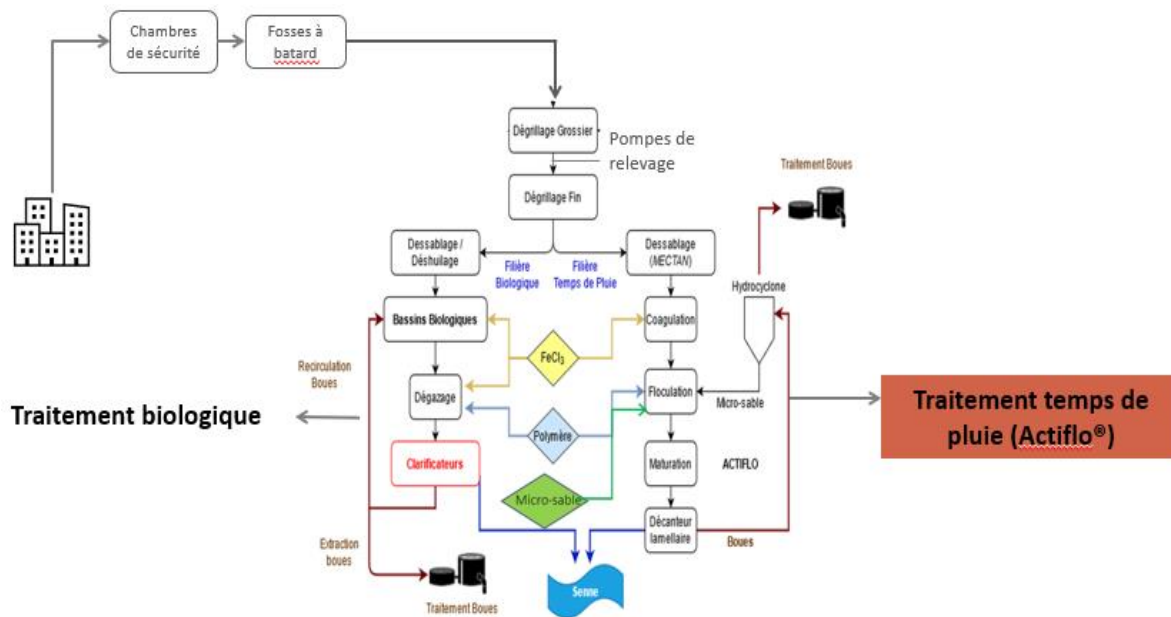


Figure 1: Schéma d'épuration de la STEP de Bruxelles-Nord

Un hydrocyclone est un dispositif qui assure la séparation boues/microsable, les boues, plus légères, partent en surverse et sont évacuées vers les unités de traitement des boues, tandis que les microsables, plus denses, sont réinjectés dans le bassin de floculation via la sousverse de l'hydrocyclone et participe à la formation de nouveaux floccs. Ce fonctionnement n'est plus le cas depuis un certain temps, à cause de son faible pourcentage de recirculation, on est trop souvent obligé d'injecter du microsable pour faire fonctionner l'Actiflo®, dont les résultats de performance ont été satisfaisants jusqu'à ces trois dernières années pour lesquelles on remarque une baisse de rendement hydraulique/sable sur les hydrocyclones.

Sur la base des données de performance de l'année 2020 du procédé, d'un audit réalisé par un cabinet indépendant⁶ et de mes propres observations, il en ressort que cette baisse de rendement est due en partie aux hydrocyclones qui ne fonctionnent plus correctement, suite à de fortes pertes en microsable. Quelle quantité de sable perd-on ? Qu'est ce qui est à l'origine de cette baisse de rendement des hydrocyclones ? Et comment optimiser le procédé ? Sont les questions de recherche auxquelles nous essayerons d'apporter des éléments de réponse.

⁶ Expertise Actiflo® par un cabinet indépendant EXPCOM BRX EU 20S3 Fle VA et écrit par F, LEFORT le 14/01/2020.

3. Objectif général

L'objectif à travers cette étude est de contribuer à l'amélioration des performances du procédé Actiflo® de la station d'épuration de Bruxelles-Nord. Il sera question de proposer des solutions pour réduire la perte en microsables dans les hydrocyclones d'une part et optimiser le procédé d'autre part. Cette contribution ne sera pas basée sur les calculs de redimensionnement de l'Actiflo® et des hydrocyclones, mais se fera sur la base des données actuelles de son fonctionnement et des tests expérimentaux que nous aurons à réaliser pour trouver les conditions opératoires qui cadrent le mieux à ses exigences.

3.1. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques assignés à cette étude sont :

- ✚ Présenter le procédé ;
- ✚ Faire des tests sur le procédé afin de quantifier les pertes en microsable par hydrocyclones (4). Ce qui permettra de déterminer les causes de leur baisse de rendement ;
- ✚ Proposer des solutions pour optimiser le procédé.

4. Résultats attendus

- ✚ Une bonne connaissance et compréhension du procédé Actiflo® ;
- ✚ Une quantification des pertes en microsable en surverse des hydrocyclones ;
- ✚ Une connaissance des facteurs qui influencent la baisse de rendement des hydrocyclones ;
- ✚ Des propositions pour réduire les pertes en microsable et optimiser Actiflo®.

5. Méthodologie

Afin d'atteindre les résultats escomptés, nous avons utilisé la démarche suivante :

- ✚ Une analyse bibliographique de tous les documents sur le procédé mis à notre disposition par Aquiris, une recherche de revues scientifiques liées au sujet d'étude. Pour compléter la littérature, nous avons effectué les observations et entretiens avec l'équipe qui pilote le procédé ;
- ✚ Ensuite un suivi en temps réel du procédé a été fait pendant trois mois. Ce suivi consistait à faire des tests sur l'Actiflo® afin de quantifier les pertes de microsable dans

les hydrocyclones. Ce qui a été fait par le biais d'une méthodologie bien définie et rigoureuse, la procédure d'échantillonnage, d'analyses laboratoire et les formules pour calculer le taux de sables sont celles définies par l'entreprise et propre au procédé ;

- ✚ En fin, l'ensemble des résultats obtenus ont été analysés par le logiciel Office 2019, suivis des interprétations.

6. Organisation du travail

La présente étude est organisée en trois chapitres, encadrée par une introduction et la conclusion :

- ✚ L'introduction présente le contexte de l'étude, sa problématique, les objectifs, les résultats attendus ainsi que la méthodologie utilisée ;
- ✚ Le chapitre I présente une revue bibliographique liée au sujet ;
- ✚ Le Chapitre II décrit les tests expérimentaux effectués ainsi que la méthodologie utilisée pour quantifier les pertes en microsable dans les hydrocyclones ;
- ✚ Le chapitre III expose les résultats obtenus, les différentes interprétations et propose des solutions pour optimiser le procédé ;
- ✚ La conclusion quant-à-elle répond aux questions de recherche et énumère quelques difficultés rencontrées dans la collecte des données.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE

Avant tout travail d'optimisation, il est indispensable de bien définir et décrire l'objet étudié. Ce chapitre est consacré dans une première partie à la description du procédé Actiflo[®], puis dans une deuxième partie à la présentation détaillée de l'outil de séparation à analyser, l'hydrocyclone.

A. Procédé Actiflo[®]

Le procédé Actiflo[®] repose sur les techniques de Coagulation-Floculation-Décantation (CFD) et plus spécifiquement sur la floculation lestée.

I. Rôle de la Coagulation-Floculation-Décantation dans le traitement des eaux usées

Parmi les techniques de traitement d'eaux usées, nous avons la CFD. D'une manière générale, la CFD a pour rôle d'abattre et séparer les matières en suspension (MES) et colloïdales présentes dans les eaux. Celles-ci sont responsables de la turbidité et la couleur de l'eau. Cette technique repose sur la difficulté qu'ont certaines particules dites colloïdales à se décanter naturellement (Desjardins, 1999).

I.1. Matières en suspension et colloïdales comme caractéristiques des particules à traiter

Les eaux résiduaires urbaines (ERU) ou eaux usées sont définies comme des « *eaux chargées de polluants solubles ou non provenant essentiellement de l'activité humaine* » (Rejsek, 2002). Ainsi, sous la terminologie d'eau résiduaire, on regroupe les eaux d'origines diverses (urbaines, pluviales, industrielles et agricoles) ; pour ce qui nous concerne, la STEP ne traite que les eaux urbaines et pluviales. On peut regrouper les composés de ces eaux en trois catégories : les MES, les matières colloïdales et les matières dissoutes (Degrémont, 1989).

D'origine minérale (sables, argiles etc.) ou organique (matières fécales, déchets alimentaires, produits pharmaceutiques, urée etc.), les MES mesurent la quantité de matières minérales ou organiques présentes dans les eaux ; elles ont un diamètre supérieur à 1 μ m et selon leur densité, le temps pour qu'elles décantent d'un mètre varie souvent d'une seconde à plusieurs jours (tableau 1).

Les matières colloïdales (argiles fines, kystes de protozoaires, bactéries, macromolécules etc.) sont aussi considérées comme des MES, mais de plus petite taille. Elles

ont deux caractéristiques très importantes : un diamètre faible, inférieur à 1 µm et un rapport surface/volume qui leur donne des propriétés d'adsorptions des ions présentes dans l'eau. Ce phénomène explique en partie l'existence des charges électriques à leur surface. Ces charges peuvent être négatives et engendrent des forces de répulsions inter-colloïdales (CARDOT, 2010). Ces deux facteurs leur confèrent alors une vitesse de décantation faible. Leur origine dans l'eau est très diverse : entre autres la dissolution des substances minérales, la décomposition des matières organiques, le déversement des ERU etc. Théoriquement selon le (tableau 1), il faut jusqu'à 200 ans pour qu'elles décantent d'1 mètre.

De quelques nanomètres de diamètre, les matières dissoutes quant-à-elles sont les anions, cations et quelques gaz contenues dans les eaux.

Les composés que nous venons de décrire sont très stables, de ce fait décantent difficilement. Le tableau 1 présente certaines particules et leur temps de décantation selon la Loi de STOKES :

Diamètre de la particule (µm)	Types de particule	Temps de décantation pour 1m d'eau	Surface spécifique m ² . m ⁻³
10 ⁴	Gravier	1 seconde	6.10 ²
10 ³	Sable	10 secondes	6.10 ³
10 ¹	Argile	2 heures	6.10 ⁵
1	Bactérie	8 jours	6.10 ⁶
10 ⁻¹	Colloïde	2 ans	6.10 ⁷
10 ⁻²	Colloïde	20 ans	6.10 ⁸
10 ⁻³	Colloïde	200 ans	6.10 ⁹

Tableau 1: Quelques particules et leur temps de décantation (Degrémont, 1989)

Cette Loi permet de prédire la vitesse limite de chute d'une sphère soumise à la pesanteur dans un fluide, donnée par la formule⁷ :

$$v = \frac{2r^2 g \Delta \rho}{9\mu}$$

Equation 1

Où :

v est la vitesse limite de chute (en m/s) ;

⁷ Loi de Stokes — Wikipédia (wikipedia.org) consulté le 14 mai 2021.

r , le rayon de la sphère (en m) ;

g , l'accélération de la pesanteur (en m/s^2) ;

$\Delta\rho = \rho_p - \rho_f$, la différence de masse volumique entre la sphère et le fluide (en kg/m^3) ;

μ , la viscosité dynamique du fluide (en Pa s).

En application à notre domaine, on a recours aux techniques de CFD pour abattre et faire décanter dans des délais raisonnables les MES et matières colloïdales qui se trouvent dans les ERU.

I.2. Stabilité des particules

Il apparaît selon le tableau 1 que les colloïdes sont des particules impossibles à décanter naturellement et pour lesquelles les phénomènes de surface sont primordiaux. Ceux-ci déterminent la stabilité des suspensions colloïdales (Degrémont, 1989) . La figure 2 montre que lorsque deux particules sont sur le point d'entrer en contact, elles sont soumises à deux forces : la force d'attraction de Van der Waals liée d'après Degrémont à la structure et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu ; elle correspond à (E_A sur la figure,2). La deuxième est la force de répulsion électrostatique, liée aux charges superficielles des colloïdes (E_B).

La stabilité d'une suspension colloïdale va dépendre alors du bilan des forces d'attraction et de répulsion, dont le niveau énergétique est donné par l'équation :

$$E = E_A + E_B$$

Equation 2

Cette relation est schématisée sur la figure 2 :

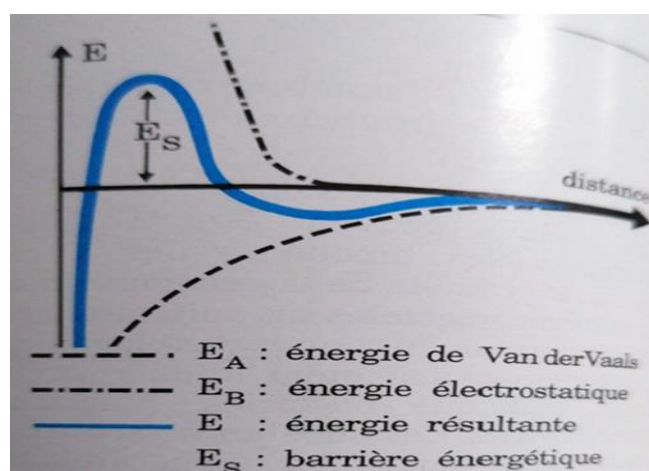


Figure 2: Stabilité d'une suspension colloïdale (Degrémont, 1989)

Pour déstabiliser la suspension, il faut franchir la barrière énergétique E_s . Cela se fait par diminution des forces de répulsion électrostatique afin de favoriser l'agglomération des colloïdes : c'est le processus de coagulation qui opère cela.

I.3. Coagulation

C'est le processus au cours duquel il y'a déstabilisation des particules colloïdales par ajout d'un réactif chimique : le coagulant. La coagulation peut s'opérer par le biais de différents mécanismes qui abattent la turbidité⁸.

I.3.1 Mécanismes d'abattement de la turbidité

Il existe plusieurs mécanismes d'élimination de MES dites colloïdales présentes dans les ERU, dont le plus connu est :

Potentiel Zéta (Z) et théorie de la double couche : Nous avons vu que les colloïdes présents dans l'eau brute ont des charges négatives ; ceci étant, elles se repoussent et demeurent stables. Afin de neutraliser ces charges négatives, des ions positifs présents dans l'eau ou ajoutés viennent former une « *couche adhérente* » autour du colloïde et assurent leur neutralité, c'est la théorie de Helmholtz. Cette couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du colloïde, la neutralité est ainsi obtenue à plus grande distance et forme la « *couche diffuse* » : c'est la théorie de Gouy-Chapman. Cette étape constitue donc l'augmentation de la force ionique de la solution. La théorie de Stern enfin regroupe les deux précédentes et considère la formation d'une « *double couche* » (Degrémont, 1989). La première couche est adhérente au colloïde, le potentiel y décroît rapidement et la seconde est plus diffuse avec une diminution plus lente du potentiel représentée à la figure qui suit:

⁸ Est le nom qu'on donne aussi à la pollution comprise dans les eaux usées.

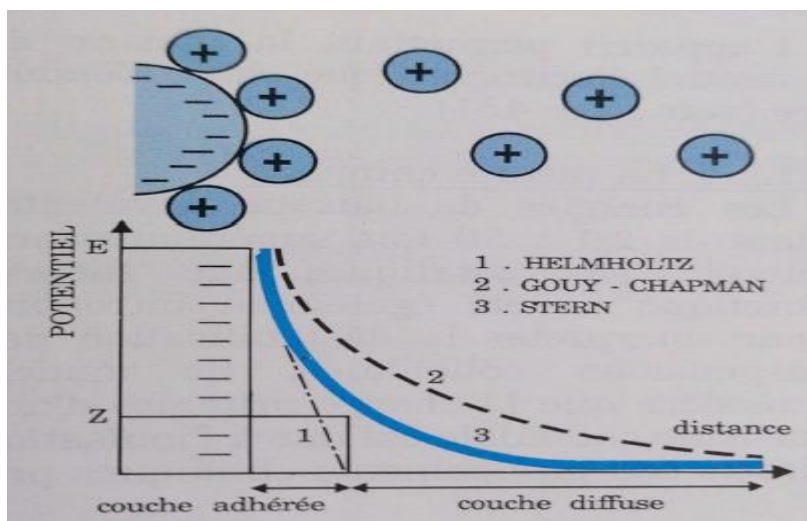


Figure 3 : Coagulation par théorie de la double couche (Degrémont, 1989)

Cette figure représente aussi deux caractéristiques du colloïde : E qui est le potentiel à la surface et Z le potentiel à la surface du plan de cisaillement. Ce potentiel encore appelé Potentiel Zéta régit le déplacement des colloïdes et leur interaction mutuelle, s'il est élevé, les colloïdes auront tendance à rester disperser. Le potentiel est donc important car il définit d'après (Desjardins, 1999) le comportement électrocinétique des particules et par voie de conséquence leur stabilité dans la solution. Ceci étant, l'annulation de ce potentiel Zéta est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et favoriser leur agglomération.

On a aussi recours à d'autres mécanismes de coagulation qui seront brièvement décrits ci-dessous :

Adsorption et neutralisation des charges : c'est un mécanisme qui repose sur l'ajout de cations dans le but de neutraliser les charges négatives des particules stables par adsorption de cations sur leur surface. Les plus utilisés sont les sels métalliques ou les polymères cationiques organiques qui neutralisent les charges négatives se trouvant à la surface des colloïdes. Attention cependant à ce que ces cations ne soient pas en excès car on risque la déstabilisation des particules qui vont se casser et l'opération sera un échec. L'ajout des réactifs est quelque chose qu'il faut bien contrôler dans cette technique.

Adsorption et pontage inter particulaire : fait recours à l'utilisation de « *polymères⁹ cationiques, non ioniques ou anioniques ayant une masse moléculaire élevée entre 10^5 et 10^7* »

⁹ Un polymère est un ensemble formé de plusieurs macromolécules. Il existe plusieurs ; celui à considérer dans notre étude est le polymère en poudre qui est très visqueux en solution, cationique, anionique ou non et de couleur blanche.

qui vont aider les particules à s'agglomérer par "pontage" (Desjardins, 1999). Le mécanisme est le suivant : le polymère adsorbe une des extrémités du colloïde présente dans le bassin, les autres extrémités demeurent libres et peuvent adsorber un autre colloïde ; c'est ce qui est utilisé à la STEP et nous allons illustrer plus bas.

Emprisonnement des particules dans un précipité : c'est un processus qui nécessite un dosage de réactifs qui vont former des précipités ayant généralement une charge positive, ces précipités vont entourer les colloïdes et les emprisonner. Selon Crittenden cité par (Mpodé, 2009) le dosage de coagulant ne dépend pas du type de particules présentes dans l'eau à traiter, mais de son pH.

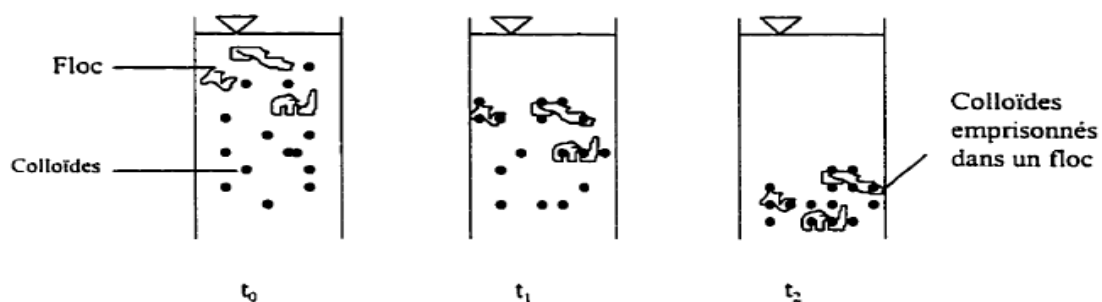


Figure 4: Mécanisme d'emprisonnement des particules dans la phase de coagulation (Desjardins, 1999)

Cependant, il convient de noter que ces mécanismes décrits se produisent en même temps ou, à la suite les uns des autres. Parfois, les exploitants ont le choix d'utiliser ce qui correspond le mieux à leur contexte. Au début de cette partie, nous avons vu que plusieurs réactifs intervenaient dans le processus de coagulation, maintenant nous allons présenter quelques-uns de ces réactifs.

1.3.2. Types de coagulants utilisés

L'efficacité de la coagulation dépend d'abord du coagulant utilisé. Les plus efficaces selon C. Desjardins sont : les sels d'aluminium et de fer. Ils sont repris dans le tableau 2 :

Sels d'aluminium ¹⁰	Formule chimique	Sels de fer ¹¹	Formule chimique
Sulfate d'aluminium (Alun)	$Al_2(SO_4)_3$	Chlorure ferrique	$FeCl_3$
Chlorure d'aluminium	$AlCl_3$	Sulfate ferrique	$Fe_2(SO_4)_3$
Aluminate de sodium	$NaAlO_2$	Sulfate ferreux	$FeSO_4$

Tableau 2: Coagulants dérivés des sels d'aluminium et de fer (Desjardins, 1999)

Les réactifs les plus utilisés dans le traitement des eaux sont l'alun et le chlorure ferrique. Une fois introduits dans l'eau, ceux-ci forment des produits d'hydrolyse qui déterminent l'efficacité de la coagulation. Ces produits complexes ont une solubilité qui varie avec le pH ; d'où les effets de certains paramètres sur la coagulation.

I.3.3. Paramètres affectant la coagulation

Les techniques de coagulation sont délicats et peuvent être influencées par plusieurs paramètres. Dans cette section, nous discutons brièvement des effets de la turbidité, du pH et de la température.

La turbidité : est l'un des facteurs à prendre en compte pour la coagulation des matières colloïdales. En effet, il a été démontré par les études de Crittenden que l'abattement de la turbidité est meilleure lorsque la turbidité est élevée dans les eaux (Mpode, 2009). La présence d'un taux élevé de particules dans les eaux, facilite la formation de gros floccs. Ce qui favorise alors une décantation rapide et un meilleur abattement de ces particules.

Le pH : en fonction du type de coagulant utilisé, la coagulation des particules se fait idéalement dans un intervalle de pH précis. Pour la coagulation par emprisonnement (voir figure 4), le pH de coagulation optimal lors de l'emploi de sulfate d'aluminium doit être compris entre 5,5 et 7,7 ; par contre, il est de 5 à 8,5 si le coagulant est du sulfate de fer (Mpode, 2009). A la STEP, avec l'utilisation du chlorure ferrique, un pH favorable doit se situer entre 6 et 8.

La température : affecte également la coagulation. En effet, une température basse diminue la vitesse de réaction des produits chimiques, en particulier l'hydrolyse du coagulant. Ceci a pour conséquence la formation de floccs faibles (Mpode, 2009). Cette baisse, change

¹⁰ Régulièrement utilisés dans le domaine de l'eau potable.

¹¹ Destinés aux eaux résiduaires, en particulier pour l'élimination physico-chimique du phosphore.

aussi les équilibres chimiques, en particulier ceux entre la forme solide et les formes solubles du coagulant.

Néanmoins, notons que d'autres paramètres tels que la dose du coagulant, la concentration des particules colloïdales, la présence d'anions et cations, l'intensité du mélange et le potentiel Zéta sont tout aussi importants.

I.4. Flocculation

C'est l'étape au cours de laquelle les particules colloïdales ayant déjà été déstabilisées par le coagulant, s'agglutinent lorsqu'elles entrent en contact et forment des floccs. Ces floccs ainsi formés peuvent décanter, flotter ou être filtrés suivant le procédé de rétention choisi. Dans notre cas, ils décanteront.

I.4.1. Théorie

Il existe deux mécanismes de flocculation : la flocculation périe cinétique qui est liée à la température de l'eau, du fait que les particules s'assemblent entre elles lorsqu'elles entrent en contact. Et, la flocculation ortho cinétique provoquée par l'énergie dissipée dans le fluide (Degrémont, 1989). Elle est causée par le brassage de l'eau qui permet d'augmenter les chances de contacts entre les particules. Quelle que soit la technique utilisée, le principe est le même : la flocculation est favorisée par la collision entre particules déstabilisées. Plusieurs facteurs contribuent à la performance du mélange : son intensité, la forme du bassin, la forme et la taille du dispositif de mélange, les pâles et la température de l'eau. Selon Greville, l'intensité du mélange correspond à l'énergie transmise à l'eau par les pâles (Mpode, 2009). Pour mesurer cette intensité, Camp et Stein toujours cité par le même auteur ont introduit le gradient de vitesse G qui est défini par l'équation suivante :

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad \text{Equation 3}$$

G est le gradient de vitesse (s^{-1})

P la puissance réellement dissipée (W)

μ la viscosité dynamique de l'eau (kg/m^*s)

V le volume du bassin de flocculation (m^3).

Dans un système de flocculation, et selon l'American Water Works Association, le gradient de vitesse G varie habituellement de 20 à 75 s^{-1} (Desjardins, 1999). En ce qui concerne la forme du bassin, un bassin circulaire a tendance à promouvoir la formation d'un vortex. Ce

phénomène entraîne une répartition inégale des réactifs dans le réservoir, et pour régler ce problème, les STEP utilisent désormais des bassins en forme carrée ou rectangulaire permettant une bonne uniformité du mélange. En effet, une diminution de la température conduit à une augmentation de la viscosité de l'eau, pour maintenir une bonne dispersion des réactifs ajoutés, il est alors nécessaire d'augmenter la vitesse de rotation des pâles et par conséquent la puissance de mélange.

Il existe différents types de flocculateur, mais dans le cadre de cette étude, un agitateur à pâles est celui qui est utilisé puisqu'il répond aux objectifs de simulation du procédé Actiflo® tel que décrit que nous allons voir.

I.4.2. Flocculation lestée

C'est un procédé visant à optimiser la décantation des floccs résultants de l'addition d'un coagulant. Son fonctionnement est basé sur la fixation du microsable sur les floccs à l'aide du polymère. Le microsable qui a une densité relative supérieure à l'eau (2,6) permet d'augmenter la densité des floccs et ainsi d'accroître leur vitesse de décantation. En 1988, la compagnie Omnium de Traitement et Valorisation (OTV) a commercialisée un procédé basé sur l'exploitation de la flocculation lestée, dénommé Actiflo®. C'est ce dernier qui fonctionne à la STEP de Bruxelles-Nord.

II. Procédé Actiflo® de la STEP

Actiflo® est une technologie de traitement d'eau développée et brevetée par OTV aujourd'hui "Veolia Water Solutions and Technologies", filiale de Veolia.

II.1. Définition et schéma général de fonctionnement d'Actiflo®

Actiflo® est un procédé de clarification très compact et ultra rapide utilisant du microsable qui sert à initier et faciliter la formation de floccs. « *Le microsable agit aussi comme un lest accélérant la décantation des floccs ; ce qui permet de concevoir des clarificateurs au temps de flocculation très court et à vitesse de décantation très élevée* » (Aquiris, 2008). Ainsi l'emprise au sol est 5 à 30 fois plus faible que celle d'autres clarificateurs de capacité comparable. Tel que nous pouvons le voir sur la (figure 5), ce procédé se compose de trois bassins avec agitateurs suivi d'un décanteur lamellaire. Ce dernier comprend un racleur de fond, des lamelles et des goulottes de reprise ; des pompes centrifuge revêtues de caoutchouc

servent à évacuer le microsable et les boues vers les hydrocyclones pour le nettoyage et la récupération du microsable¹². Cela signifie qu' Actiflo® combine la technique du floc lesté et de la décantation lamellaire¹³.

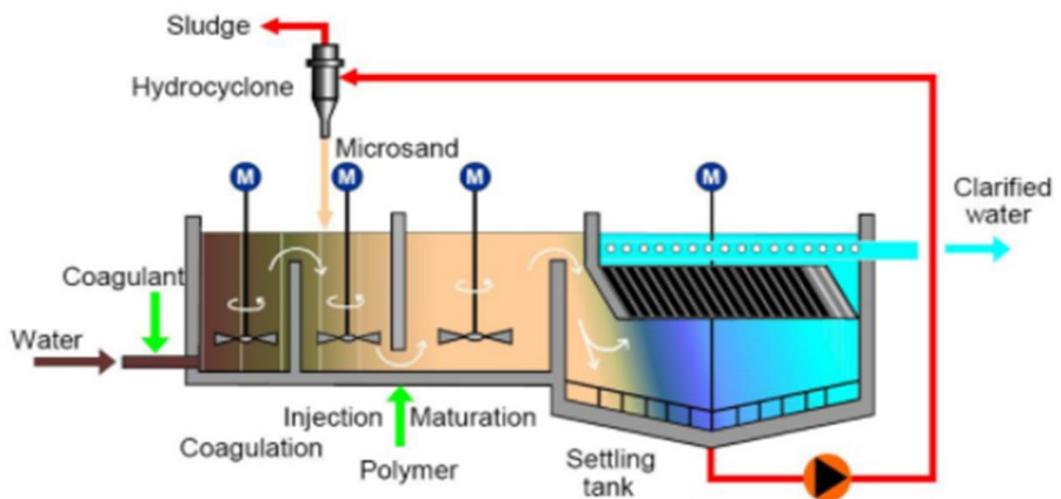


Figure 5: Schéma du système Actiflo® (Veolia, 2008)

Actiflo® est composé de quatre bassins : après l'ajout du coagulant, l'eau brute (EB) est introduite dans le bassin de coagulation où les deux sont vigoureusement mélangés et forment des floccs. L'effluent est ensuite introduit dans le bassin de floculation où on injecte le polymère et du microsable dans des conditions de mélange intensives afin de rattacher les floccs à du microsable à l'aide du polymère. Une quantité supplémentaire de polymère est ajoutée à l'eau dans le bassin de maturation, où un mélange moins vigoureux est appliqué afin de créer des conditions idéales pour la formation de floccs plus robustes et plus denses, caractérisés par des vitesses de décantation très élevées. L'eau flocculée est alors envoyée dans le décanteur lamellaire où les floccs lestés décantent rapidement alors que l'eau clarifiée remonte à travers les lamelles et quittent le décanteur via les goulottes de surface.

Le mélange de boue et le microsable décanté est collecté à l'aide d'un racleur de fond. Il est refoulé vers les hydrocyclones pour séparation à l'aide des pompes centrifuges.

¹²Extraite de : Actiflo® (Décantation lestée) - YouTube

¹³[Decantation \(free.fr\)](http://Decantation.free.fr), consulté le 06/06/2021.

II.2. Application : Actiflo® eaux pluviales de la STEP

Il a été dimensionné pour le traitement des eaux pluviales d'où son appellation. L'opération s'effectue par le biais de l'automatisme, de la télégestion et d'une équipe qui veille à son bon fonctionnement. Le tableau 3 présente la capacité de traitement du process.

II.2.1. Capacité de traitement Actiflo®

CAPACITE PROCESS ET HYDRAULIQUE	
Débit max. traitement pluvial	8.2 m ³ /s
Nombre d'Actiflo®	2
Capacité hydraulique des 2 Actiflo®	8.2 m ³ /s, soit 4.1 chacun
Capacité process des 2 Actiflo®	5.13 m ³ /s, soit 2.6 chacun
Débit bypass par Actiflo®	1.5 m ³ /s

Tableau 3: Données de dimensionnement Actiflo® (Aquiris, 2008)

Il y'a deux Actiflo® identiques sur la station d'épuration, leur démarrage est paramétré en fonction du débit entrant à l'usine. En effet, lorsque celui-ci excède 8.2 m³/s, en temps de pluie, (débit qui n'est plus admissible par le traitement biologique) ; le premier Actiflo® démarre automatiquement. Chacun a une capacité de 4.1 m³/s, cela correspond au débit admissible par le procédé. La capacité process correspond au débit maximum que peut traiter un Actiflo® pour un meilleur taux de traitement et par là garantir le respect des performances exigées telles que mentionnées dans le cahier des charges :

ABATTEMENT GARANTI	
MES	50 %
Ptot ¹⁴	50 %
DCO ¹⁵	30 %
NTK ¹⁶	5 %

Tableau 4: Performances Actiflo® en matière de rejets (Aquiris, 2008)

¹⁴ Correspond au Phosphore total. Il est analysé avec des tests en kit par colorimétrie à l'aide d'un spectrophotomètre, et sa concentration est exprimée en mgP/L.

¹⁵ La demande chimique en oxygène (DCO) est une mesure de toutes les substances consommatrices d'oxygène. Il s'agit de celles qui peuvent être éliminées par le traitement des eaux usées, mais aussi celles qui ne se prêtent pas à un traitement biologique. Ce paramètre est exprimé en masse d'oxygène consommé par rapport au volume d'échantillon.

¹⁶ Le paramètre azote Kjeldahl NTK correspond à la somme de l'azote ammoniacal et de l'azote organique contenus dans l'eau, et qui s'exprime en mg/L.

Selon le Directeur de l'usine par ailleurs responsable du Process, Patrizia PERO, les rendements du procédé sont généralement au-dessus des performances exigées. Raison pour laquelle à chaque fonctionnement, il y'a un débit bypassé après le Mectan (expliqué plus bas). Ce débit respecte la règle de « *bypass sur atteinte du débit maximum d'alimentation* » (Aquiris, 2008). En pratique cela signifie qu'à chaque fois qu'on a un débit en entrée au-dessus du débit maximum de process (2.6 m³/s), le reste est bypassé. Et même avec cette quantité bypassé, le rendement du tableau 4 est toujours atteint.

II.2.2. Opération

Dans les étapes de traitement des eaux de la STEP, Actiflo® se trouve au niveau du prétraitement ; ensuite vient la décantation primaire. Les EB qui entrent après avoir été débarrassées des déchets grossiers et fins arrivent dans les différents bassins développés ci-dessous :

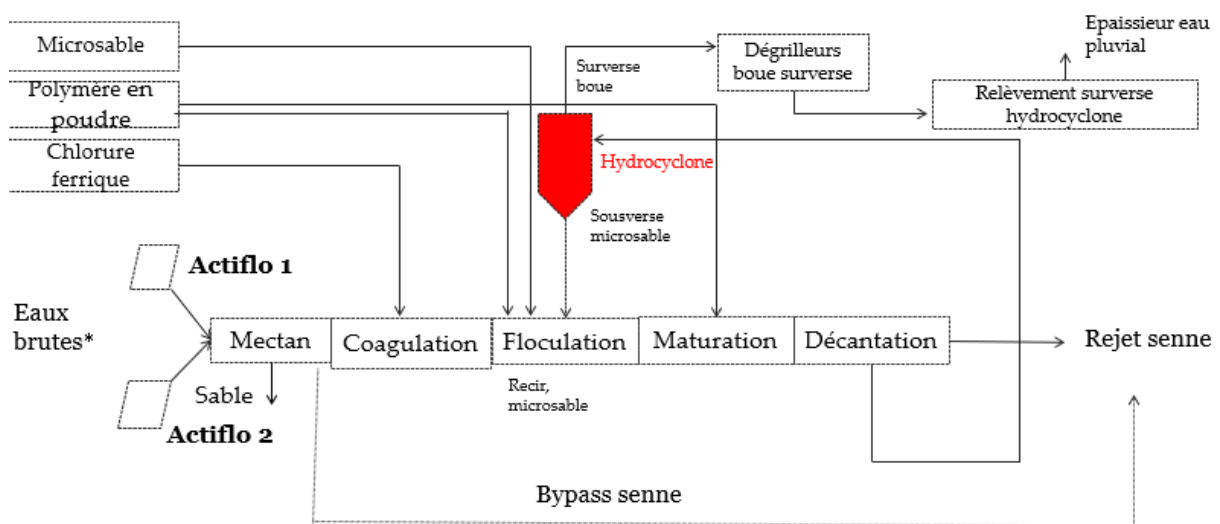


Figure 6: Etapes de traitement des eaux par Actiflo® de la STEP

Le procédé contient donc une étape de dessablage dans le Mectan où les sables contenus dans les eaux sont extraits. Viennent ensuite les étapes de CFD.

La coagulation s'effectue dans le bassin de coagulation où le chlorure ferrique (FeCl₃) injecté est mélangé avec les EB. Un agitateur y assure un mélange rapide. Le FeCl₃ sert à rassembler les particules présentes dans l'EB et permet aussi un abattement du phosphore.

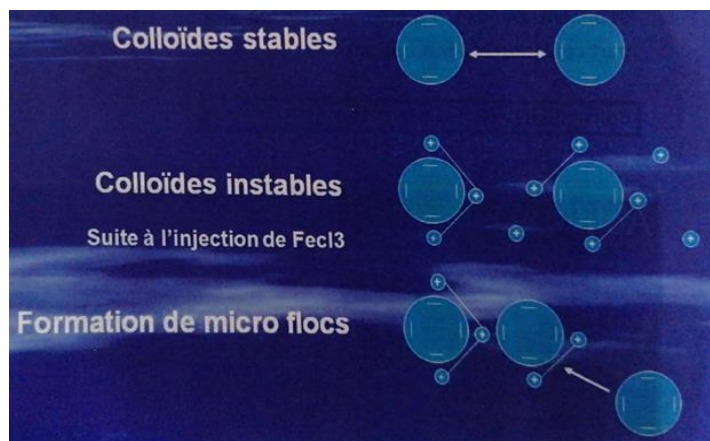


Figure 7: Rôle du FeCl₃ dans la coagulation (Aquiris, 2008)

La floculation lestée s'effectue dans le bassin d'injection, où sont injectés le polymère en poudre et le microsable. Un agitateur y assure également le mélange rapide. Par injection du polymère, on agrège les particules coagulées pour former des floccs.



Figure 8: Rôle du polymère dans la floculation (Aquiris, 2008)

Ces floccs sont ensuite alourdis par le microsable ajouté ; ils décantent et forment des boues primaires.

La quantité de microsable : Elle doit être suffisante car chaque flocc doit être lesté par une quantité suffisante sans quoi il y a risque de perte de floccs à partir d'un certain débit, et du sable qu'ils contiennent.

L'étape après la floculation est le **bassin de maturation** où une partie ou la totalité du polymère est injecté ; les floccs lestés par le sable y grossissent.

Ensuite vient l'étape du **décanteur lamellaire**, où les floccs vont se déposer en partie inférieure. Un raclage vers un puit d'extraction central permet de récupérer les boues

formées. L'eau claire, quant à elle, est recueillie en partie supérieure par un système de goulottes crantées et renvoyée à la Senne.

Afin de limiter la quantité de microsable à injecter, les boues décantées et lestées en sable sont recyclées et envoyées vers les hydrocyclones (en rouge sur la figure 6) via les pompes de recirculation. Ceux-ci assurent la séparation boues / microsable. Les boues, plus légères, partent en surverse et sont évacuées vers les unités de traitement des boues. Le microsable, plus dense, retombe dans la cuve d'injection via la sousverse de l'hydrocyclone et participe à la formation de nouveaux floes.

II.2.3. Avantages et inconvénients du procédé

Comme tout procédé, Actiflo® a des avantages et des inconvénients :

Avantages :

Le plus important est le temps de séjour dans les bassins, celui-ci est de plus ou moins 5 minutes repartit ainsi :

Bassins Actiflo®	Temps de séjour (minutes)
Bassin de coagulation	0.89
Bassin d'injection	1.1
Bassin de maturation	2.29

Tableau 5: temps de séjour traitement Actiflo® dans les différents bassins

Ce temps est nettement moins long que dans un procédé conventionnel. L'utilisation de la floculation lestée requiert donc beaucoup moins d'espace. L'espace requis occupe environ 5 % de l'espace utilisé par un système de CFD conventionnel. Cette technologie permet de produire de l'eau ayant des qualités égales ou supérieures aux eaux produites à l'aide de procédés conventionnels mais en utilisant un espace beaucoup plus petit. Il s'agit aussi d'un procédé très flexible qui se caractérise par une possibilité d'arrêt et de redémarrage fréquents sans incidence sur la qualité du traitement (à titre de rappel, il ne fonctionne normalement qu'en temps de pluie, soit environ 100 jours/an). Grâce à sa compacité, les coûts liés à sa construction sont réduits. En plus du fait qu'elle est complètement automatisée, c'est une solution qui s'adapte à toutes les étapes de filière de traitement d'effluents urbains.

Comme la perfection n'est pas de ce monde, on note quelques inconvénients qui le caractérisent.

Inconvénients du procédé

En dépit des avantages énoncés dans la section précédente, le système Actiflo® présente quelques inconvénients. Il requiert une dépense d'énergie supplémentaire comparativement à la décantation conventionnelle. Cette énergie est nécessaire pour faire fonctionner les agitateurs, la pompe de recirculation et les hydrocyclones. De plus, la présence de pièces mécaniques implique la nécessité d'une maintenance plus régulière des équipements. Il y a des coûts supplémentaires liés à l'achat du microsable (qui d'ailleurs ne recircule pas conformément à la maille de coupure) et aux doses plus élevées de polymère. De surcroît, l'utilisation du microsable constitue en soi l'ajout d'un paramètre à gérer dans le cadre du traitement. Mais aussi et surtout très important dans le cadre de cette recherche, ce procédé produit un grand volume de boue. Le traitement des boues est une étape qui coûte financièrement aux bailleurs des STEP (Jupsin, 2020). Il faut ensuite séparer les boues du microsable car le microsable est nocif pour les installations de traitement des boues (nous y reviendrons dans la partie résultats de ce travail). Et, ce sont les hydrocyclones qui jouent ce rôle de séparation.

B. Etude théorique d'un hydrocyclone

En décrivant les étapes de traitement par Actiflo®, nous avons vu que le mélange de boue et microsable décanté est collecté grâce à un racleur de fond et refoulé vers les hydrocyclones qui assurent leur séparation. Dans cette partie nous allons étudier les processus qui entrent en jeu dans la séparation cyclonique.

III. Séparation centrifuge et hydrocyclone

La force centrifuge est le principe physique sur lequel repose la séparation dans un hydrocyclone.

III.1. Principe de la force centrifuge

La séparation des composés d'un mélange est réalisable par décantation, sous l'action de la gravitation uniquement et nécessite parfois une longue durée pour décanter. Il est donc plus efficace d'utiliser la centrifugation, qui est une technique de séparation des composés

d'un mélange au regard de leur différence de masse en les soumettant à la force centrifuge¹⁷. Dans notre cas, le mélange à séparer est un effluent composé de microsable et de boue ; donc solide-liquide.

La force centrifuge est une force physique inertielle exercée sur un corps qui l'amène à s'éloigner du centre de rotation d'un mouvement circulaire vers les parois. Cette force comme toute autre force est proportionnelle à la masse des corps à l'intérieur du mouvement et leur vitesse ; ses applications sont diverses en l'occurrence ici dans la centrifugation. Dans ce cas, comme les corps lourds (microsable) sont plus attirés par la force centrifuge que les corps légers (eau + boue), les constituants plus lourds du mélange vont se retrouver au fond du récipient.

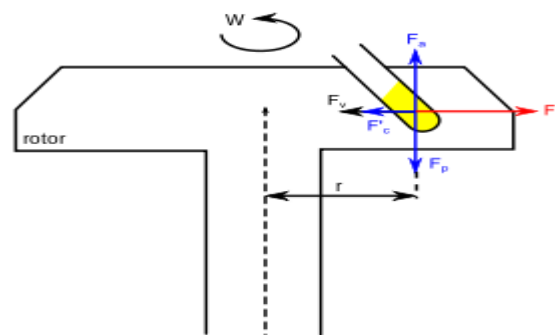


Figure 9 : La force centrifuge et les autres forces d'un composé à centrifuger¹⁸

Au cours de cette opération de séparation, les composés dans le fluide situés à une distance de l'axe de rotation sont soumis à différentes forces :

F_p : Force de pesanteur

F_a : Poussée d'Archimède

F_v : Force de friction

F_c : Force centripète

F_c : Force centrifuge

Soumis à l'accélération de la pesanteur, les particules plus denses que le fluide sédimentent. La séparation centrifuge permet d'augmenter cette vitesse de sédimentation. Ainsi, cette force qui s'exerce par l'accélération à haute vitesse de la solution à dissocier est régie par la Loi de Stokes (déjà expliquée à la page 21).

¹⁷ Centrifugation — Wikipédia (wikipedia.org) consulté le 14 mai 2021.

¹⁸ Centrifugation — Wikipédia (wikipedia.org) consulté le 14 mai 2021.

III.2. Les hydrocyclones de séparation solide-liquide

III.2.1. Définition et histoire

Les hydrocyclones sont des appareils statiques de forme cylindro-conique ou cylindrique (confer figure 10) dans lesquels l'effluent est injecté tangentiellement sous pression dans leur partie cylindrique. De telle sorte que les composés de la pulpe subissent une centrifugation. Les particules grossières se déplacent vers la paroi du cyclone et les particules fines restent dans la zone centrale de l'appareil (Blazy & Joussemet, 1996). Les premières descriptions de ce type d'appareils datent de 1891 avec le premier brevet publié par Bretney (Mohamed Mai Manga, 2011). « *Les premières applications furent alors pour les séparations solide-liquide, mais actuellement les hydrocyclones sont utilisés pour des séparations liquide-liquide, gaz-liquide et même pour la séparation de micro-organismes dans des solutions fermentées* » (Debacq et al., 2019).

III.2.2. Conception d'un hydrocyclone

Les composantes principales d'un hydrocyclone sont présentées à la figure 10 ; il s'agit de :

Entrée de l'hydrocyclone : la section d'entrée est constituée d'une chambre d'alimentation généralement cylindrique par laquelle on assure l'entrée tangentielle de l'effluent à séparer. La conception et le dimensionnement de la section d'entrée est très critique pour réaliser une séparation assez efficace. En effet la génération de l'effet centrifuge et l'intensité des turbulences en dépendent.

Section cylindrique : une section cylindrique est nécessaire dans un hydrocyclone pour assurer une génération correcte du champ centrifuge. En effet, cette section permet d'éviter les cisaillements en aval de l'entrée et de réduire ainsi les pertes de charges.

Section conique : elle joue le rôle d'accélérer le courant tourbillonnaire, ce qui permet d'augmenter les chances de séparer plus de boues.

Surverse de l'hydrocyclone (Vortex) : la fraction la moins dense qui est la boue séparée quitte l'hydrocyclone à travers cette section. Cette fraction légère est constituée principalement de la boue et d'une faible concentration de sable.

Sousverse de l'hydrocyclone (Apex) : Après séparation, le microsable extrait chemine par cet orifice pour repartir dans le bassin d'injection pour une nouvelle formation de floccs.

L'angle de cône : L'angle du cône θ varie de 3 à 180°. Mais dans les cyclones à géométrie classique (ou pointue), exemple des hydrocyclones déshuileur utilisés en pétrochimie, cet angle est compris entre 10 et 20°.

Le revêtement intérieur de l'hydrocyclone : Rappelons qu'un hydrocyclone est alimenté sous pression ; afin d'éviter l'usure de la paroi interne de l'hydrocyclone par les particules, la paroi métallique est protégée par un revêtement en caoutchouc. Avec le temps, le revêtement peut s'user ce qui peut avoir un impact sur la qualité de la classification.

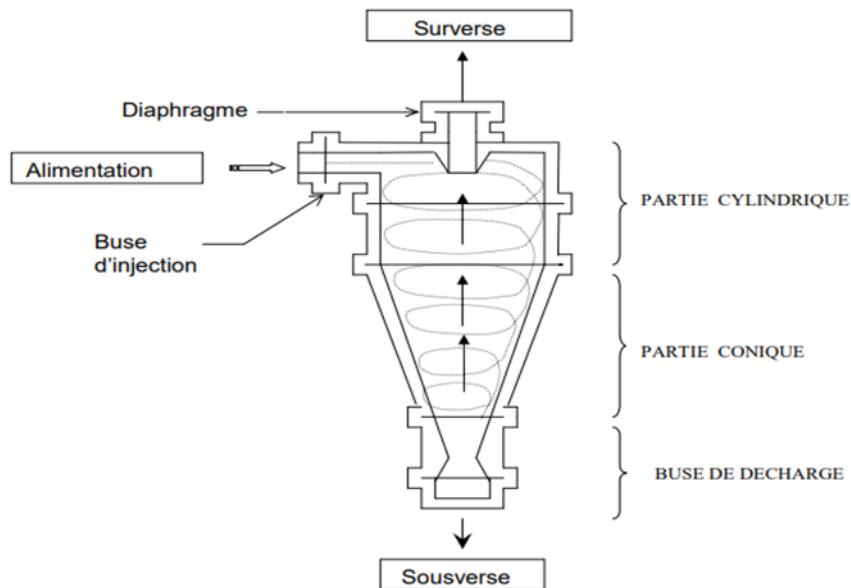


Figure 10: Schéma d'un hydrocyclone (Hanitriniala Fanjatiana, 2003)

IV. Principe et mode opératoire d'un hydrocyclone

IV.1. Opération d'un hydrocyclone

Si on prend le cas où le mélange à séparer est un effluent constitué de boue et de microsable :

L'effluent sous pression est injecté à travers une entrée tangentielle dans le corps du cylindre. Le mélange développe ainsi un système de tourbillon (mouvement rotationnel intense). Dans ce système, le mélange est soumis à la force centrifuge qui tend à le pousser vers les parois du cylindre, ce qui va créer un gradient de vitesse. Ce gradient s'affaiblit en s'approchant du centre du cylindre. Il génère une force qui s'oppose à la force centrifuge. Une particule du mélange est soumise donc à ces deux forces (la force de gravité est négligeable

par rapport à ces forces). Par conséquent elle peut suivre trois trajectoires possibles (Mohamed Mai Manga, 2011).

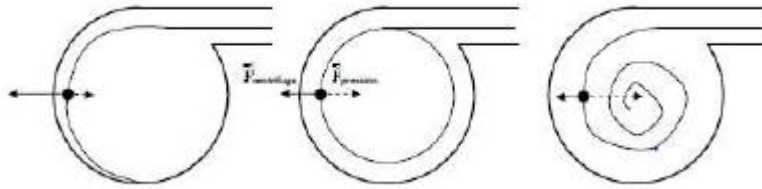


Figure 11 : Différentes trajectoires d'une particule dans un hydrocyclone (Mohamed Mai Manga, 2011)

Donc le microsable qui a une plus grande densité que l'eau (boue) se dirige vers les parois et ainsi prendre la sortie inférieure ; tandis que la boue qui se dirige vers le centre va se coalescer en tournant autour, formant ainsi un autre tourbillon qui va prendre le chemin de la sortie supérieure. Selon Mai Manga, les mécanismes d'écoulement dans les hydrocyclones sont compliqués, de ce fait, une perturbation dans la stabilité du vortex (tourbillon) peut nuire à l'efficacité de séparation.

IV.2. Paramètres caractéristiques d'un hydrocyclone et modèles mathématiques

IV.2.1. Paramètres caractéristiques

La multiplication des applications du cyclone dans le secteur des industries, a amenée les auteurs à développer des modèles mathématiques basés sur leurs expériences. Ce sont ces modèles, qui ont permis de définir et dimensionner les trois caractéristiques essentielles pour une bonne séparation dans les hydrocyclones :

Ces modèles mathématiques permettent de donner

La maille de coupure (d_{50}) : exprimée en micromètre, c'est la dimension des particules ayant une probabilité de 50% de passer à la sousverse de l'hydrocyclone ; ce qui détermine l'efficacité de séparation. Cette dimension permet de trouver le diamètre du cyclone. Avec ce diamètre et en fonction de la géométrie du cyclone, on peut calculer alors :

La capacité de traitement : elle est exprimée en volume de pulpe alimentée qui est la deuxième variable la plus importante d'un cyclone (Blazy & Joussemet, 1996). Ce débit-volume peut être formulé en termes de perte de charge à travers le cyclone toujours d'après ces auteurs. Il en découle que la capacité de traitement d'un cyclone donné est limitée par sa géométrie et donc par son diamètre. Si ce diamètre est insuffisant pour le volume à traiter, on

utilise plusieurs cyclones en parallèle ; cet exemple s'illustre à la STEP par l'existence de 4 hydrocyclones qui sont liés au débit d'Actiflo®.

Les dimensions géométriques de l'hydrocyclone : Il s'agit du diamètre du cylindre (D_c), diamètre d'alimentation (D_e), diamètre de surverse (D_{sr}) et enfin le diamètre de sousverse (D_s). Nous allons voir leur influence dans le deuxième chapitre de ce travail.

IV.2.2. Modèles mathématiques

Pour déterminer ces caractéristiques cycloniques, plusieurs modèles ont été développés ; ils sont classés en trois catégories : les modèles empiriques, semi-empiriques et fondamentaux (Mohamed Mai Manga, 2011).

Les modèles fondamentaux basés sur les travaux de Bradley reposent sur la résolution d'équations de la mécanique des fluides et nécessitent la connaissance de l'écoulement fluide à l'intérieur d'un hydrocyclone ;

Les modèles empiriques relient les variables d'entrée aux variables de sortie à partir de mesures expérimentales, ceux-ci sont basés sur des cyclones de très petit diamètre étudiés par Dahlstrom ;

Quant aux modèles semi-empiriques qui sont les plus utilisés, ils dérivent d'un couplage entre les modèles empiriques et fondamentaux. Les plus utilisés sont ceux de Plitt et son équipe car ils offrent une prédiction complète du procédé en fonction de la géométrie des cyclones et des conditions opératoires.

« Comme tous les modèles empiriques reposent sur des constantes de calage déterminées expérimentalement, ils souffrent des problèmes communs à ce type de modélisation. Ainsi, d'après Coelho and Medronho, les prédictions sont généralement correctes dans la gamme de conditions pour lesquelles ils ont été élaborés, mais leur extrapolation à de nouvelles situations doit être envisagée avec précaution » (Davailles, 2011). Cette citation de Davailles pose le problème rencontré à la STEP de Bruxelles-Nord quant aux données de dimensionnement des hydrocyclones. Car, afin de l'adapter à son contexte, plusieurs modifications ont été faites dans le passé ; raison pour laquelle notre étude est plus basée sur les tests expérimentaux liés aux conditions opératoires actuelles que sur les données de dimensionnement.

IV.3. Avantage des hydrocyclones

Les hydrocyclones sont des séparateurs très prisés à cause de leur facilité d'opération et d'entretien, leur faible coût d'investissement. En effet, leur simplicité, compacité et le fait que leur utilisation nécessite moins d'espace leur confert de nombreux avantages en comparaison à d'autres procédés de séparation traditionnels. Pour les hydrocyclones, l'option d'agrandir la capacité est facilement disponible (en ajoutant un hydrocyclone en parallèle). Lors de leur fonctionnement, les hydrocyclones sont insensibles au mouvement et à l'orientation, ils effectuent la séparation en quelques secondes et n'ont pas généralement besoins de produits chimiques. Par contre, les séparateurs classiques sont sensibles à l'orientation, utilisent des produits chimiques très couteux et le temps nécessaire pour la séparation est élevé. De plus, les hydrocyclones nécessitent peu de maintenance. La vitesse du processus de classification à cause de la force centrifuge est aussi une caractéristique appréciée des hydrocyclones. Ces appareils ont trouvé et maintenu leur place dans les circuits de traitement des eaux usées.

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

Cette partie présente la méthodologie et le mode opératoire utilisés pour quantifier la perte en microsable dans les hydrocyclones.

A. Opérationnalité des hydrocyclones de la STEP

Dans cette partie, nous allons étudier le fonctionnement des hydrocyclones de la station, les variables qui déterminent leur fonctionnement et les problèmes auxquels ils font face.

I. Rôle des hydrocyclones dans le processus Actiflo®

I.1. Présentation des hydrocyclones

Afin de limiter la quantité de microsable à injecter dans le système Actiflo® et débarrasser les boues du microsable avant leur traitement dans la « *filière boue* », les boues décantées et lestées en sable se trouvant dans le décanteur lamellaire sont pompées et

envoyées vers les hydrocyclones qui assurent la séparation boues / microsable. Les boues, plus légères, remontent en surverse et sont évacuées vers les unités de traitement des boues tandis que le microsable, plus dense, recircule dans la cuve d'injection via la sousverse de l'hydrocyclone et participe à la formation de nouveaux floccs.

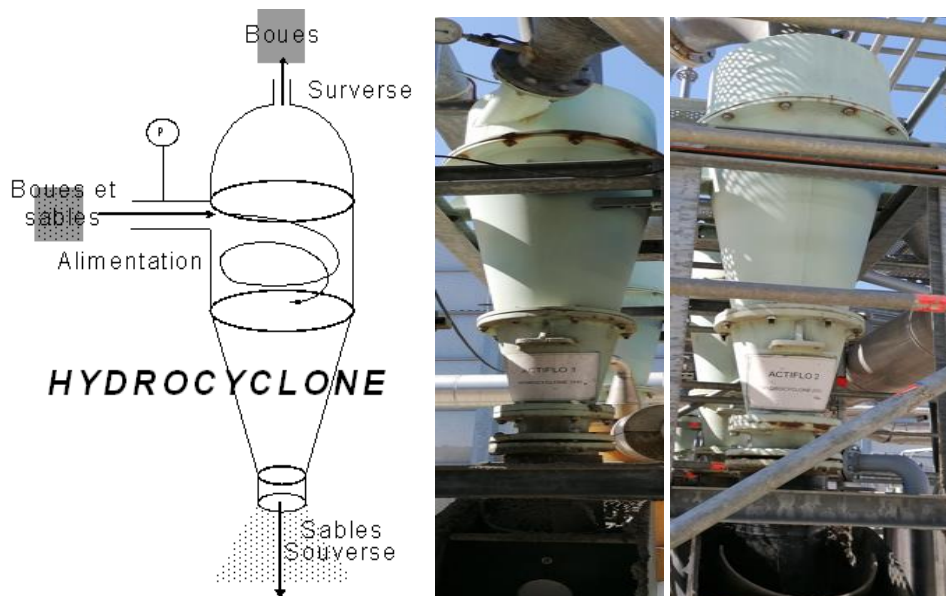


Figure 12: Répartition de la séparation boue/microsable des hydrocyclones de la STEP (Aquiris, 2008)

I.2. Opération

La force centrifuge développée dans l'hydrocyclone permet la séparation entre fractions fines et grossières. Le facteur dominant dans cette séparation est la masse volumique des composantes du produit à traiter (phases liquide et solide). L'hydrocyclone doit être alimenté à débit constant et à pression constante par une pompe de type centrifuge. Sous l'effet de la force centrifuge, il se produit une séparation entre fines et grosses particules de même masse volumique. Les fines s'échappent par la buse de surverse, les grosses se concentrent et sont évacuées à la sousverse. La caractéristique de séparation d_{50} qu'on appelle maille de coupure est la dimension en micromètre à laquelle 95% des grains, plus gros que cette maille, se retrouveront en sousverse ; elle est de 80 μm . Leur dimensionnement est lié à la capacité de traitement du procédé Actiflo® ainsi qu'aux pompes de recirculation par lesquelles l'effluent transite dans les hydrocyclones. Dès lors, lorsque le débit d'eau entrant excède 1.3 m^3/s ; pour une meilleure séparation dans les hydrocyclones, on passe de 1 à 2 boucles de recirculation qui correspondent aux nombres d'hydrocyclones.

Actiflo® 1		Actiflo® 2	
Hydrocyclone 1540	Hydrocyclone 1550	Hydrocyclone 2540	Hydrocyclone 2550

Tableau 6: Répartition hydrocyclones par Actiflo®

Les quatre hydrocyclones sont repartis selon le tableau c'est-à-dire deux par Actiflo®.

I.3. Critères de performance des hydrocyclones

Le fonctionnement et l'efficacité de ces hydrocyclones sont influencés par trois paramètres importants que nous allons expliquer : le débit d'alimentation des hydrocyclones ou débit hydrocyclones, leur pression d'alimentation, les caractéristiques géométriques de l'hydrocyclone. Mais il existe aussi d'autres facteurs comme le dosage des coagulants (bon apport FeCl_3 , polymère et microsable dans les bassins.

I.3.1. Débit d'alimentation des hydrocyclones

Il s'agit en effet du débit des pompes de recirculation. Pour rappel, c'est par leur biais que la boue issue du processus Actiflo® est envoyée dans les hydrocyclones. Ce débit est de $230 \text{ m}^3/\text{h}$; et son rôle est d'assurer au minimum 5% de recirculation pour qu'un excès de boue ne s'accumule pas dans le décanteur. D'autre part, un hydrocyclone ne peut pas bien fonctionner sur une plage de débit et de pression d'alimentation qui varie. Comme on ne doit pas faire varier le débit d'alimentation des hydrocyclones donc le débit des pompes de recirculation, le nombre de boucles de recirculation passe de 1 à 2 quand le débit d'alimentation augmente ; ceci pour assurer l'efficacité de la séparation.

I.3.2. Pression d'alimentation des hydrocyclones

Le respect de pressions et débits d'alimentation spécifiques des hydrocyclones est nécessaire pour placer les hydrocyclones dans des points de fonctionnement garantissant une bonne séparation du sable et de la boue et donc limiter la perte de microsable en surverse des hydrocyclones. Le point de fonctionnement des hydrocyclones peut être caractérisé par sa pression d'entrée. Elle dépend du débit d'entrée mais aussi de la concentration en sable

qui modifie les caractéristiques de la boue (densité, viscosité). Elle est fixée à 1,2 bar et c'est sur elle que régulent les pompes de recirculation prioritairement.

I.3.3. Caractéristiques géométriques des hydrocyclones

Nous utilisons cette image pour mieux visualiser les caractéristiques à décrire :

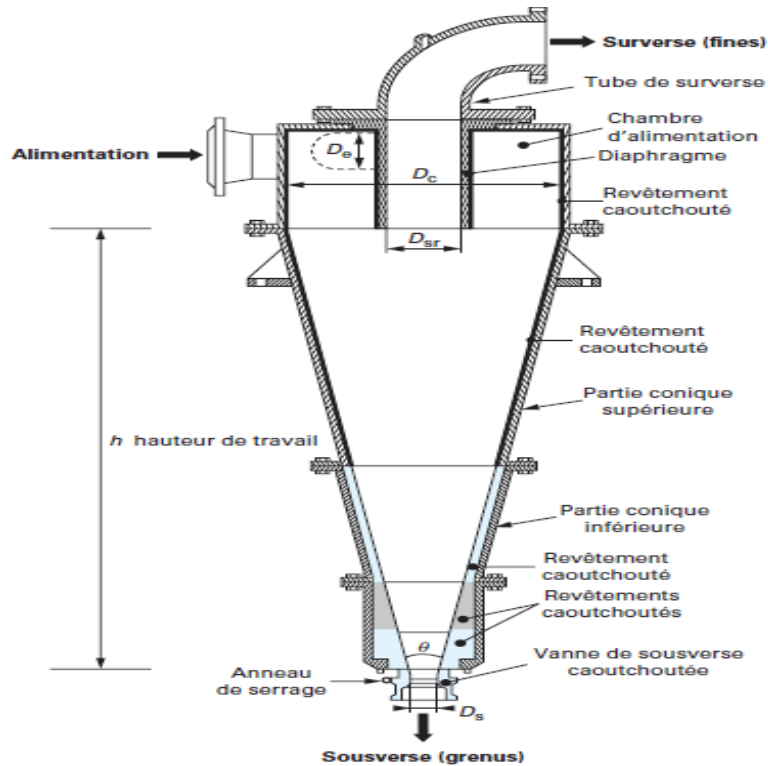


Figure 13: Schéma d'un hydrocyclone montrant ses caractéristiques géométriques principales (Blazy & Joussemet, 1996)

L'influence du diamètre de la partie cylindrique (D_c) : Le choix d'un tel diamètre est justifié par le débit traité par le procédé : jusqu'à 9360 m³/h d'eau traitée. C'est cette partie qui reçoit le tube d'alimentation ; Le diamètre de l'hydrocyclone est choisi en fonction de la dimension de coupure désirée. Ceci étant, la capacité de traitement et la maille de coupure augmente en fonction de ce diamètre.

Le diamètre de la buse d'alimentation (D_e) : Le diamètre de la buse d'alimentation fait référence à l'ouverture de l'orifice de la chambre d'alimentation à travers laquelle la pulpe d'alimentation est introduite. De ce fait, une augmentation de l'ouverture de la buse d'alimentation a pour effet l'augmentation de la capacité de traitement, de la taille de coupure, bien que la qualité de la classification diminue.

Le diamètre de la buse surverse (Dsr) : Encore appelé diaphragme ou vortex. C'est l'ouverture de l'hydrocyclone à travers laquelle les particules fines sont évacuées. Son tube est très rallongé en dessous du tube d'alimentation afin de prévenir le court-circuitage des particules alimentées vers la surverse. Selon Plitt cité par (Mohamed Mai Manga, 2011) les hydrocyclones sont généralement dotés d'une gamme de vortex, ayant un diamètre allant de 20 à 45% du diamètre de l'hydrocyclone et échangeable selon la classification recherchée. Sa dimension influence sur les résultats opératoires, raison pour laquelle son étude est très délicate. En théorie, un plus grand diaphragme donnera une coupure plus grossière et une plus grande proportion de solides à la surverse ; par contre un plus petit diaphragme provoquera une coupure plus fine et moins de solides en surverse. Nous allons mieux l'illustrer dans la partie résultats de notre étude avec la modification apportée à la buse de surverse des hydrocyclones de la station.

Le diamètre de la buse de sousverse (Ds) et son débit : L'apex est l'orifice de l'hydrocyclone à travers lequel les particules grossières sont déchargées à la sousverse. Son diamètre est lié au débit de recirculation de 230 m³/h sous risque de perte de sable en surverse. Le choix de son diamètre influence sur la capacité de traitement de solides et la fraction de solides se retrouvant en sousverse, ainsi que sur la qualité de la classification. Le diamètre optimal de l'apex est souvent difficile à trouver. Une méthode simple consiste à prendre un diamètre d'apex correspondant à (1/5) du diamètre de l'hydrocyclone (Mohamed Mai Manga, 2011).

Le débit de sousverse quand-à lui est consécutif de deux facteurs :

- Le point de fonctionnement de l'hydrocyclone (débit / pression d'alimentation) ;
- La charge en sable dans les boucles de recirculation. Un débit de sousverse suffisant est nécessaire pour permettre l'injection d'une quantité de sable suffisante dans la cuve d'injection de sable.

D'après ce qui précède, il en découle les dimensions suivantes pour les hydrocyclones de la STEP :

Dimension hydrocyclones	D_c	D_e	D_{sr}	D_s
Diamètre en (mm)	600	136	175	100

Tableau 7: Caractéristiques géométriques des hydrocyclones et leur diamètre

II. Problématique de perte en microsable dans les hydrocyclones

A titre de rappel, nous avons vu que la particularité du procédé Actiflo® réside dans l'ajout du microsable dans le bassin d'injection afin de lester les floccs formés par coagulation et floculation, les alourdir et accélérer leur décantation. Une fois décanté, ils sont envoyés dans les hydrocyclones à l'aide des pompes de recirculation. Les hydrocyclones de la STEP ont pour objet la séparation du microsable présent dans les boues pluviales extraites du décanteur à floccs lestés Actiflo®. Le principe a déjà été décrit dans les précédentes sections.

Avec une maille de coupure d'environ 80 μ , on devrait avoir un rendement de séparation de 95%. Concrètement cela veut dire que sur une quantité d'effluent qui entre dans un hydrocyclone, 95% de microsable doit se retrouver en sousverse et après séparation, seulement 5% en surverse. Mais tel n'est plus le cas : on se retrouve avec des proportions élevées de sable en surverse et une faible quantité de recirculation en sousverse. (La figure 14) rend bien compte de ce phénomène.

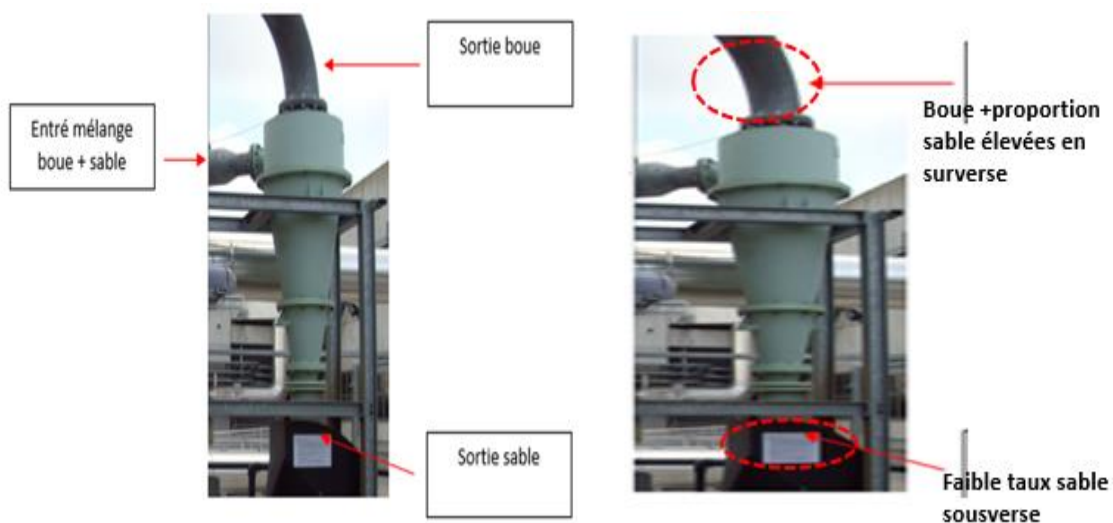


Figure 14: Visualisation phénomène perte microsable dans les hydrocyclones

Ceci étant, la perte en microsable que nous étudions dans ce travail est le dysfonctionnement hydraulique des hydrocyclones qui ne fonctionnent plus correctement selon le cahier de charges établi au départ. Ceci se matérialise par un faible taux de recirculation de microsable en sousverse et une forte concentration de sable en surverse des hydrocyclones. Le tableau qui va suivre montre l'évolution de la perte de sable dans les hydrocyclones entre 2015 et 2021 :

Années	Nombre microsable commandé	mm³ d'eau traitée	Taux sable surverse (g/m³)
2015	20	5.6	3.6
2016	40	4.9	8.2
2017	40	3.5	11.4
2018	140	5.9	23.7
2019	140	8.8	15.9
2020	140	4.7	29.8

Tableau 8: évolution des pertes en sable des hydrocyclones de la STEP

On note une augmentation de la quantité de perte en sable (colonne 4) ; ce qui a un impact sur l'augmentation de la quantité de sable commandé qui entre 2015 et 2020 s'est multiplié par 7. Un autre paramètre très important et qui d'ailleurs amène l'exploitant Aquiris à se pencher sur ce problème, est le fait que le sable qui part avec les boues pluviales à la filière de traitement des boues, est très nocif pour les installations de traitement de boue telles que les épaisseurs, stockeurs, digesteurs, Cambi et Athos. Du fait d'une part que le sable est abrasif et cause l'usure rapide des installations et d'autre part que ces appareils cités sont dimensionnés pour réduire le volume de boue (liquide), le sable qui est un solide, perturbe les opérations.

D'où la nécessité d'optimiser les hydrocyclones pour améliorer les performances hydrauliques/sable d'Actiflo®. Ceci se fera par le biais des tests sur le fonctionnement du procédé afin de quantifier les pertes de sable par hydrocyclones, voir les facteurs qui influencent ces pertes et agir sur ces facteurs limitants.

B. Test sur Actiflo® pour quantifier les pertes en microsable dans les hydrocyclones

III. Méthodologie utilisée pour les tests

III.1. Objectifs des tests

Dans la première section de ce chapitre, parmi les paramètres qui influencent l'efficacité de la séparation dans les hydrocyclones, nous avons expliqué le rôle du débit et la pression d'alimentation du cyclone (I.3.1 et I.3.2), mais aussi et surtout des caractéristiques géométriques de l'appareil (I.3.3). Le débit et la vitesse sont liés aux pompes de recirculation et si leur influence sur le problème est démontrée, ce sont des pièces mécaniques à changer. Mais, en ce qui concerne les dimensions de l'hydrocyclone, nous ne pouvons qu'intervenir sur le diamètre des buses de surverse et sousverse. Les buses de sousverse ayant déjà été modifiées dans le cadre d'autres tests, notre étude s'est basée uniquement sur les buses de surverse. Le tableau qui suit montre les modifications qui avaient déjà été apportées à ces deux paramètres en 2008 du fait que les diamètres initialement prévus ne permettaient pas d'atteindre un débit de recirculation acceptable sans risque de perte de sable en surverse :

	Diamètre buse sousverse (mm)	Diamètre buse surverse (mm)
Initialement	75	250
Au 31/07/2008	100	175

Tableau 9: Modification apportée aux buses de sousverse et surverse des 4 hydrocyclones (Aquiris, 2008)

Sur la base donc des paramètres actuels, l'objectif des tests sera de quantifier la perte en microsable par hydrocyclones par le calcul du taux de sable en surverse et sousverse de l'hydrocyclone. Ensuite après réduction de la taille des buses de surverse ; nous referons les mêmes tests pour évaluer les pertes. Ces tests permettront aussi d'évaluer l'importance des facteurs de performance sur les hydrocyclones, apprécier l'efficacité de chaque hydrocyclone et au besoin d'en rectifier le fonctionnement (débit entrant, débit d'alimentation, pression etc.).

III.2. Protocole utilisé pour le test

Les tests se sont déroulés sur plusieurs jours entre le mois de février et Avril, en fonctionnement « normal » d'Actiflo® par temps sec et temps de pluie. Car bien que le procédé ne fonctionne qu'en temps de pluie, il est possible de brider le débit du traitement biologique pour l'envoyer sur Actiflo® dans l'optique d'avoir le maximum de débit souhaité. C'est ce qui a été fait la plupart du temps compte tenu du fait que nous souhaitons aussi étudier les hydrocyclones individuellement. Les étapes énumérées ci-dessous ont été respectés dans le cadre des tests ; ceci afin d'intégrer tous les paramètres de fonctionnement liés au procédé :

- ✚ Choix de l'Actiflo® à démarrer. Pour une meilleure analyse de données, les tests se sont faits avec 1 Actiflo® à la fois et, 1 voire 2 hydrocyclones en fonctionnement ;
- ✚ Faire le test à trois débits $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit minimum de traitement), $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$ et $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit maximum de traitement) ;
- ✚ Démarrer Actiflo® et patienter 45 minutes le temps que tous les paramètres se mettent en place (taux traitement réactifs), vérifier également le débit des pompes de recirculation ($230 \text{ m}^3/\text{h}$) ;
- ✚ Préparer les équipements et aller sur site prélever les échantillons ;
- ✚ Pour chaque débit, prélever 3 échantillons à 10 minutes d'intervalle afin d'avoir une valeur représentative des données.

III.3. Equipements

Ce sont les équipements de sécurité indispensables pour la protection des personnes lors des différents prélèvements et analyses : il s'agit des équipements de protection individuelle (EPI) tels que le casque et lunettes de sécurité, l'ensemble de travail, les gants. Ils sont obligatoires pour tout déplacement sur site. Des équipements de prélèvements : éprouvette taille d'un litre, les flacons numérotés. Et enfin, des équipements d'analyse au laboratoire tels que la blouse, les lunettes de protection et les gants.

IV. Opération

IV.1. Démarrage Actiflo®

C'est une étape importante car le traitement et l'efficacité de la séparation dans les hydrocyclones en dépendent. Contrôler le pH et la turbidité : les indications concernant ces deux paramètres sont expliquées plus bas.

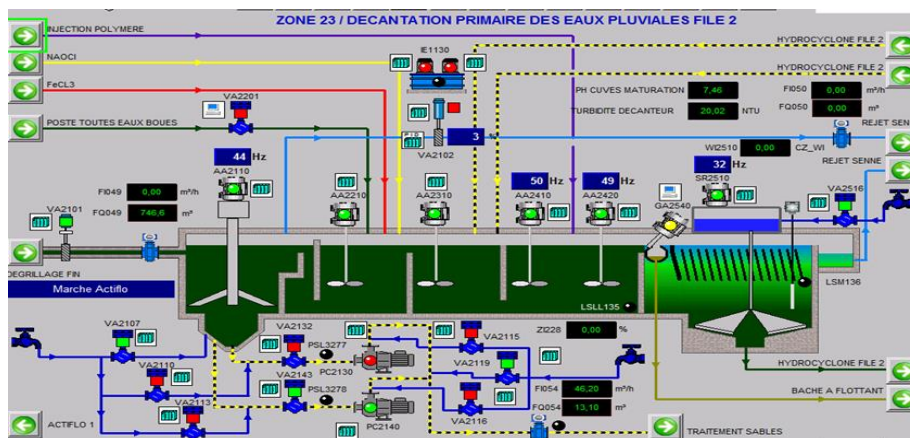


Figure 15: Phase de démarrage Actiflo® via l'automate

IV.2. Dosages réactifs

Trois réactifs sont nécessaires pour le bon fonctionnement de l'Actiflo® :

- Le chlorure ferrique
- Le polymère
- Le microsable

IV.2.1. Chlorure ferrique et le polymère

Leur rôle a été expliqué dans la deuxième partie du chapitre 1. Le FeCl_3 est injecté dans la cuve de coagulation par le biais d'une pompe doseuse. Pour ce qui est du polymère en poudre, son injection dans le bassin de floculation et de maturation est assurée également par une pompe doseuse. La station dispose d'une centrale polymère Actiflo® où s'effectue la préparation du polymère : un mélange constitué de la poudre et l'eau est réalisé à l'aide d'un agitateur ; après maturation, on a la concentration de polymère. Le taux de traitement de ces deux réactifs est à paramétrer en fonction de la charge en DCO en entrée d'usine. Celui applicable est repris dans le (tableau 10). En gras, le taux de référence. Lors du démarrage de l'Actiflo®, on s'assure toujours que le taux de polymère soit de 1.5 g/m^3 et le taux de FeCl_3 à 50 g/m^3 . Ceci s'explique par le fait que la charge en DCO est toujours plus forte en début de

pluie ; une fois l'Actiflo® stabilisé, et en fonctionnement depuis plus d'une heure, on adapte le taux de traitement d'après le (tableau 10) et en fonction de la turbidité et le pH.

Concentration DCO (mg/l)	Taux FeCl ₃ (g/m ³)	Taux polymère (g/m ³)
< 200	≅ 30	0.8 – 1
Entre 200 et 350	≅ 40	1 – 1.2
Entre 350 et 500	45 – 50	≅ 1.5
> 500	55 – 60	≅ 1.6

Tableau 10 : Concentration FeCl₃ et polymère en fonction de la DCO (Aquiris, 2008)

IV.2.2. Microsable

Le taux de microsable nécessaire pour un bon traitement, varie avec le débit en entrée de l'Actiflo®. Pour connaître le taux de sable, il est nécessaire d'effectuer régulièrement des prélèvements en sousverse des hydrocyclones après 45 minutes de fonctionnement ; ensuite on rapporte la quantité relevée sur site au débit d'eau traité par Actiflo®. Un graphique représenté à la (figure 16) permet de lire le taux de sable et de voir s'il est nécessaire de rajouter ou pas.

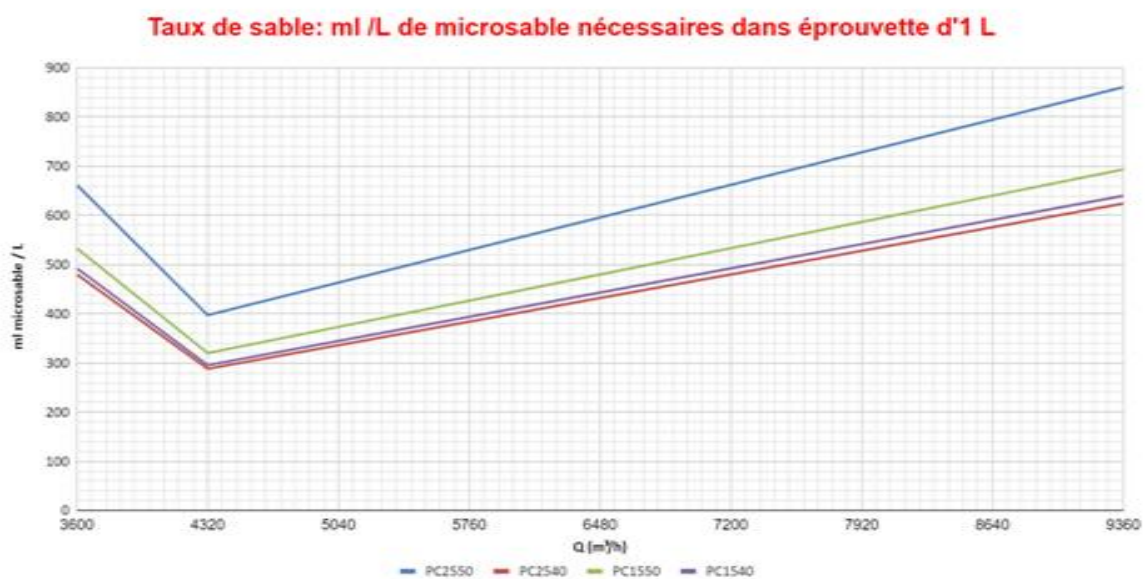


Figure 16: Variation taux de sable en fonction du débit et des hydrocyclones (Aquiris, 2008)

L'ordonnée représente la quantité de microsable recommandée après décantation d'1 Litre ; ce qui permet de voir si on a une quantité de sable suffisante pour la floculation lestée.

L'abscisse est le débit d'eau qui entre dans Actiflo® en m³/h (entre 3600 et 9360 m³/h, soit entre 1 et 2.6 m³/s). Sachant que 1 m³/s correspond au débit minimal admissible et le 2.6m³/s, le débit maximum que peut traiter le process ;

Les courbes en différentes couleurs représentent les quatre hydrocyclones. La quantité de sable dont la granulométrie est comprise entre 80 et 300 µm¹⁹, est évaluée par le calcul du taux de sable (TS). Comme les réactifs (FeCl₃ et Polymère), le sable doit être injecté en quantité proportionnelle au débit traité. Un bon taux de sable dans Actiflo® doit être supérieur à 3kg/m³. Les formules permettant le calcul du TS seront développées plus bas.

La surveillance de ces trois réactifs est une étape importante à contrôler quand Actiflo® fonctionne. Les sondes de mesure de la turbidité et du pH permettent aussi de rendre compte de leur état, et si besoin, on ajuste les réactifs en fonction de ces paramètres.

Pour rappel le pH est mesuré dans les cuves de maturation, il doit être compris entre 6 et 8 ; inférieur à 6 il y a trop d'acidité qui a pour effet de déstabiliser les floccs qui peuvent se casser. Cette acidité vient du fait que l'eau de pluie est sensible à une baisse de pH due au FeCl₃. L'action à mener dans ce cas est de baisser le taux de traitement du chlorure ferrique. Quand à la turbidité, elle est mesurée sur l'eau traitée en sortie d'Actiflo® ; et doit être inférieure à 25 NTU (Unité Néphélométries). Au démarrage d'Actiflo® il est normal d'avoir un pic, mais environ après 30 minutes de fonctionnement la turbidité doit baisser. Généralement, une turbidité élevée est synonyme de perte de floccs : on peut agir soit par augmentation du taux de polymère, soit par ajout de microsable.

IV.3. Prélèvement échantillons sur site

Avant d'aller sur site, il faut vérifier que le débit d'entrée est maîtrisé : pas plus de 2.6 m³/s, vérifier aussi la correspondance entre le nombre de pompe de recirculation et le débit traversant :

- Un débit d'1 m³/s correspond à une pompe ;
- A partir de 1.3 m³/s, passer à deux pompes de recirculation.

¹⁹ Granulométrie également vérifiée par une analyse au laboratoire sur la granulométrie du sable utilisé.

Sur site, le premier indicateur de bon fonctionnement des Actiflo[®], est l'aspect de l'eau traitée. C'est ce qu'on regarde en premier au niveau des décanteurs. L'eau doit être translucide, incolore. Si les floccs partent en surverse du décanteur, une grande quantité de sable est susceptible de partir avec eux, il faut alors agir rapidement.

Ensuite mesurer le taux de sable en sousverse. Il permet de voir la quantité de sable se trouvant dans l'Actiflo[®]. Pour ce faire à l'aide d'une éprouvette d'1 L, prélever l'échantillon laisser décanter 10 minutes et faire la lecture telle qu'expliqué à la (figure 16). Cette opération doit être faite 3 fois, si la concentration est inférieure à 800 ml/1L ; alors rajouter du sable dans l'Actiflo[®].



Figure 17: Echantillon TS sousverse pour lecture quantité sable Actiflo[®]

Enfin vient l'étape la plus importante pour nous qui consiste à prélever l'échantillon de boue en surverse de l'hydrocyclone ; ceci se fait via un picage sur la conduite où chemine les boues. Ce prélèvement permet de s'assurer de deux choses :

De la qualité de la boue : une bonne boue doit être dense et opaque ; trop claire elle témoigne soit d'une absence de traitement (de l'eau ne fait que recirculer) soit, en cas de bon traitement, que le débit de recirculation est trop important (de l'eau propre est entraînée avec les boues). Dans ce cas, la consigne à suivre est d'ajuster le nombre d'hydrocyclones en marche. Au contraire, une boue trop dense peut témoigner d'un temps de séjour des boues trop important dans le décanteur ; dans ce cas, augmenter le nombre d'hydrocyclones en marche.



Figure 18: Différentes textures des boues de la surverse des hydrocyclones
 Répéter le même mode opératoire pour les deux autres débits 1.8 et 2.6 m³/s

IV.4. Analyse des échantillons laboratoire

Le but des analyses est de déterminer la quantité de matière minérale MM (sable) qui se trouve dans l'échantillon de boue prélevé. Pour y arriver on détermine d'abord la quantité de matière sèche (MS), ensuite le pourcentage (%) de matière volatile (MV) et enfin, on déduit le % de matière minérale (MM) en fonction des MV.

Exprimée en (g), les MS d'un échantillon de boue sont la masse de solides obtenue à la suite du processus du séchage à 105 °C pendant au moins 12h de temps dans une étuve.

Les MV désignent la proportion calcinée au four à 550°C pendant au moins 4h. Elles sont exprimées en pour cent par rapport à la MS.

Matériel utilisé : balance Sartorius et son logiciel associé Sartoconnect + utilisation du logiciel Evisense.

Mode opératoire :

- + Numéroter la petite capsule aluminium ;
- + Noter toutes les références (dates, dispositions échantillons dans la feuille Excel ;
- + Peser une coupelle propre à vide ;
- + Homogénéiser l'échantillon et verser maximum 50 g dans la coupelle ;
- + Mettre dans l'étuve pendant au moins 12h à 105°C,
- + Après, sortir le mélange et peser à l'aide de la balance

MS

- ✚ La valeur MS se calcule automatiquement ;
- ✚ Mettre la coupelle dans l'étuve à 550°C pendant 12h ;
- ✚ Après ce temps, sortir, laisser refroidir et peser ;
- ✚ La valeur des MV se calcule également automatiquement

} MV

La valeur des MS s'obtient alors en g/l qu'il faudra convertir en g/m³.

Avec le pourcentage de MV déterminé, la formule : **100-MV** permet de déterminer la quantité de MM. Ces données nous permettront de calculer la perte en microsable en surverse dont la formule est donnée ci-dessous.

IV.5. Formule calcul Taux de sable

Elles proviennent du concepteur des hydrocyclones DOOR OLIVER EIMCO.

Le Taux de sable (TS) ou perte de microsable en surverse (TS surverse) des hydrocyclones est la quantité de sable qui se retrouve dans les boues de surverse selon la formule :

$$\begin{array}{c}
 \textit{TS surverse (g/m}^3\textit{)} \\
 = \\
 \textit{Quantité de MS (g/m}^3\textit{)} * \textit{MM} / 100
 \end{array}
 \longrightarrow \text{Equation 4}$$

Taux de sable sousverse

La quantité de sable qui se trouve dans Actiflo® est évaluée par le calcul du taux de sable. Pour connaître le taux de sable, nous avons effectué des prélèvements de sousverse des hydrocyclones. Ces prélèvements permettent de connaître la concentration en sable de la sousverse qui, rapportée au débit de sousverse, donne la quantité de sable injectée. Cette quantité rapportée au débit entrant donne le taux de sable de la sousverse :

$$\begin{array}{c}
 TS \text{ sousverse } \left(\frac{kg}{m^3} \right) \\
 = \\
 \frac{N_{hydrocyclones} \times Q_{sousverse}(m^3/h) \times C_{sousverse}(ml/l) * D_{apparente_sable}(kg/l)}{Q_{entrée}(m^3/h)}
 \end{array}$$

Equation 5

Base de calcul :

- Un ou deux hydrocyclones sont en fonctionnement ;
- Concentration ml/1L de sable décanté dans l'éprouvette, on relève la quantité de sable uniquement ;
- Débit de sousverse à 20 m³/h ;
- Débit d'alimentation 3600 m³/h ; 6480 m³/h ou 9360 m³/h.

CHAPITRE III : RESULTATS ET RECOMMANDATIONS

Dans la première partie de ce travail, nous avons étudié le fonctionnement du procédé Actiflo[®], et le rôle des hydrocyclones dans le processus. Ensuite, nous avons expliqué la problématique de perte en microsable en surverse des hydrocyclones et décrit les étapes qui nous ont permis de quantifier les pertes. A présent, nous allons présenter les résultats obtenus lors des tests et faire des propositions sur l'optimisation du procédé.

A. Quantification de la perte de sable par les hydrocyclones

Cette section présente les résultats obtenus des tests effectués sur Actiflo[®] afin de quantifier la perte en microsable dans les hydrocyclones.

I. Résultats des tests avec un diamètre de buse de 175 mm

I.1. Vérification de la représentativité des échantillons

Il s'agit de la représentativité des échantillons prélevés, ainsi pour chaque débit, le même échantillon a été prélevé trois fois, puis analysé de la même façon. Pour obtenir les

résultats de la quantité de perte de sable pour chaque débit, nous avons fait la moyenne des trois analyses tel que reprises dans le tableau suivant :

Taux de sable surverse hydrocyclone (g/m ³)					
Débit (m ³ /s)	Echantillons				
	E1	E2	E3	Moyenne	Ecart-type
1	2,01	1,42	1,56	1,66	0,23
1,8	2,63	2,3	2,64	2,52	0,15
2,6	2,66	2,79	2,74	2,73	0,05
Taux de sable souverse hydrocyclone (g/m ³)					
1	5	4,15	5	4,72	0,38
1,8	2,3	3,2	2,3	2,6	0,40
2,6	1,61	1,93	1,93	1,82	0,14

Tableau 11: Liste des échantillons analysés

Ce tableau est extrait du fichier qui comporte toutes les données brutes relevées lors des tests et les calculs réalisés. L'objectif du tableau est de montrer que les échantillons prélevés sont représentatifs du débit traité par Actiflo® ; car un écart considérable entre les trois échantillons analysés par débit, pourrait remettre en cause le résultat. Ceci nous a permis de valider les résultats qui vont suivre.

I.2. Synthèse des tests réalisés

Pendant les trois mois de suivi, 19 tests ont été réalisés par temps sec et de pluie tels que reportés ci-dessous :

Actiflo® 1 ou 2	Nom hydrocyclone	Diamètre de la buse surverse et sousverse (mm)	Nombre de tests	Diamètre de la buse de surverse et sousverse (mm)	Nombre de tests
1	PC 1540	175 et 100	3	160 et 100	0
1	PC 1550	175 et 100	2	160 et 100	4
2	PC 2540	175 et 100	3	175 et 100	0
2	PC 2550	175 et 100	2	160 et 100	5

Tableau 12: Nombre de tests réalisés par hydrocyclones et par diamètre de buse surverse/sousverse

La colonne rouge représente les caractéristiques des buses de surverse et sousverse telles que nous les avons trouvées à la station, et la colonne verte les modifications apportées au diamètre de la buse de surverse. Quelques précisions doivent être fournies sur le mode de fonctionnement de l'hydrocyclone assurant la classification par granulométrie. Une fois que les dimensions de l'appareil sont fixées, les seuls moyens de réglage sont d'une part le débit et pression d'alimentation et, d'autre part le diamètre de la buse de sousverse et surverse. A titre de rappel, aucun changement n'a été fait sur les buses de sousverse car elles avaient déjà été modifiées de 75 à 100 mm dans le cadre d'autres travaux d'optimisation. Donc nous avons effectué des tests avec les caractéristiques des hydrocyclones telles qu'elles étaient (diamètre de buse de la surverse en rouge sur le tableau) ; ensuite en fonction des résultats obtenus, le diamètre de la buse de surverse de trois hydrocyclones a été réduite et, d'autres tests ont été réalisés. Sur le tableau, les cases avec le chiffre zéro signifient que nous n'avons pas fait de tests là dessus. Commençons d'abord par étudier les résultats des premiers tests avec un diamètre de surverse de 175 mm.

I.3. Synthèse des résultats obtenus sur les hydrocyclones avec un diamètre de la buse de 175 mm

I.3.1. Hydrocyclone 2540 d'Actiflo® 2

Les quatre hydrocyclones ont les mêmes caractéristiques, reprises dans le tableau suivant :

Buse de surverse	175 mm
Buse de sousverse	100 mm
Débit d'alimentation de l'hydrocyclone	230 m ³ /h
Pression d'alimentation	1.20 bar

Tableau 13: Paramètres de fonctionnement des hydrocyclones

Nous avons effectué trois tests dont les résultats sont représentés dans le tableau qui suit :

Taux sable surverse (g/m ³)				
Débit (m ³ /s)	17-févr	19-févr	03-mars	Moyenne
1	1,66	1,58	2,82	2,02
1,8	2,53	1,78	4,49	2,93
2,6	2,73	1,95	4,25	2,98
Taux sable sousverse (kg/m ³)				
1	4,72	1,25	2,5	2,83
1,8	2,6	2,09	0,86	1,85
2,6	1,83	1,29	0,33	1,15

Tableau 14: résultats perte en sable hydrocyclone 2540

Le graphique qui va suivre permet une meilleure interprétation de ces résultats :

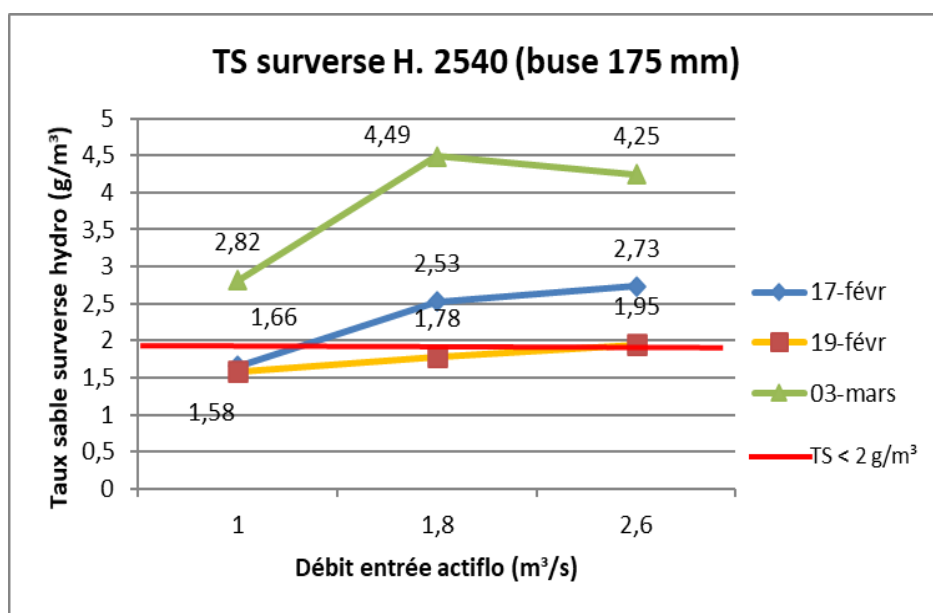


Figure 19: graphique représentant les moyennes de pertes en sable en surverse de l'hydrocyclone 2540 en fonction du débit d'entrée

Trois tests ont été effectués pour cet hydrocyclone tels que représentés par les trois traits bleu, jaune et vert. En matière de perte en sable en surverse des hydrocyclones, la consigne stipule qu'elle doit être inférieure à 2 g/m³ d'eau traitée au débit maximum d'Actiflo® c'est-à-dire 2.6 m³/s ; ce qui est figuré par le trait rouge horizontal sur le graphique. L'abscisse de cette figure correspond aux trois débits pour lesquels nous avons fait des tests ; et l'ordonnée présente les résultats du taux de sable en surverse en fonction de ces débits. La première observation que l'on peut faire est que la quantité de sable en surverse est fonction du débit d'entrée d'Actiflo® : plus le débit augmente, plus la perte est importante ; comme illustration, le 03 mars par exemple, on passe de 2.82 g/m³ de perte avec un débit de 1 m³/s, à 4.49 g/m³ dès que le débit atteint 1.8 m³/s. Ce qui n'est pas normal car en théorie, le débit

ne devrait pas influencer la perte en sable qui doit être de 2 g/m^3 au débit maximum traité. Ceci d'autant plus que pour chaque test, on a régulièrement réalisé des analyses de taux de sable sur éprouvette (nous l'avons expliqué plus haut) et lorsque celui-ci était bas, on rajoutait immédiatement du sable. En dehors du 19 février où on a une quantité de perte inférieure à la consigne ; les deux autres tests nous montrent des résultats supérieurs à la consigne et en se référant à la moyenne des résultats du (tableau 14) ; on peut affirmer que cet hydrocyclone perd du sable. Quelques grammes de sable perdus par mètre cube, si on les rapporte aux mètres cube d'eau traitée, cela donne une masse importante de sable perdue. Ce qui a pour conséquence une forte concentration de sable dans les boues pluviales, qui est néfaste pour les installations car le sable est abrasif. Essayons de comparer ce résultat avec le taux de sable en sousverse pour voir ce qu'il en est :

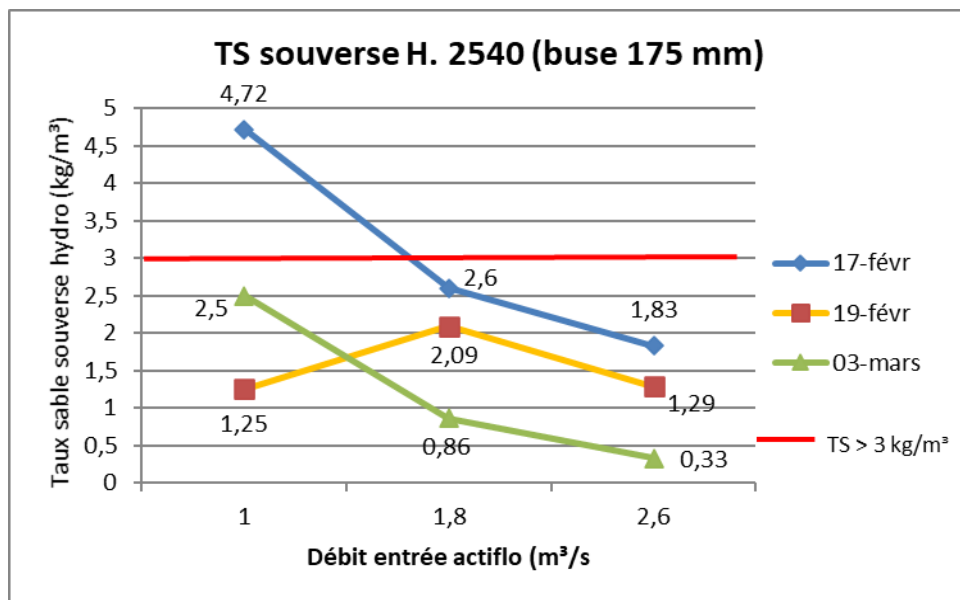


Figure 20: Graphique représentatif TS sousverse hydrocyclone 2540

Pour ce qui est de la sousverse de l'hydrocyclone, le taux de sable calculé doit être supérieur à 3 kg/m^3 . Tel n'est pas le cas pour cet hydrocyclone où en dehors du 17 février avec un débit d' $1 \text{ m}^3/\text{s}$ où on a eu un pic de $4,72 \text{ kg/m}^3$, le TS en sousverse est relativement faible pour cet hydrocyclone. Notons que le pic était dû au fait qu'au lieu d'1 hydrocyclone en fonctionnement, on en avait démarré 2 par inadvertance (donc ce résultat n'est pas pris en compte). Ce faible taux de recirculation a pour conséquence l'augmentation du taux de consommation de microsable sur l'Actiflo® 2 ; par exemple, pour le test effectué le 3 mars, on a été obligé d'ajouter jusqu'à 2 big-bags de microsable ; ce qui est énorme pour seulement 1 h de fonctionnement.

I.3.2. Hydrocyclone 2550 d'Actiflo® 2

Pour cet hydrocyclone, avec le diamètre de buse de surverse de surverse de 175 mm, nous avons réalisés deux tests dont les résultats de la quantité de sable en surverse et sousverse sont montrés dans le tableau suivant :

Débit (m ³ /s)	Moyenne TS surverse (g/m ³)	Moyenne TS sousverse (kg/m ³)
1	3,2	1,6
1,8	5,27	0,69
2,6	6,53	0,33

Tableau 15: Résultats des pertes en sable en surverse et TS en sousverse de l'hydrocyclone 2550

D'où le graphique qui va suivre, qui permet une meilleure lecture :

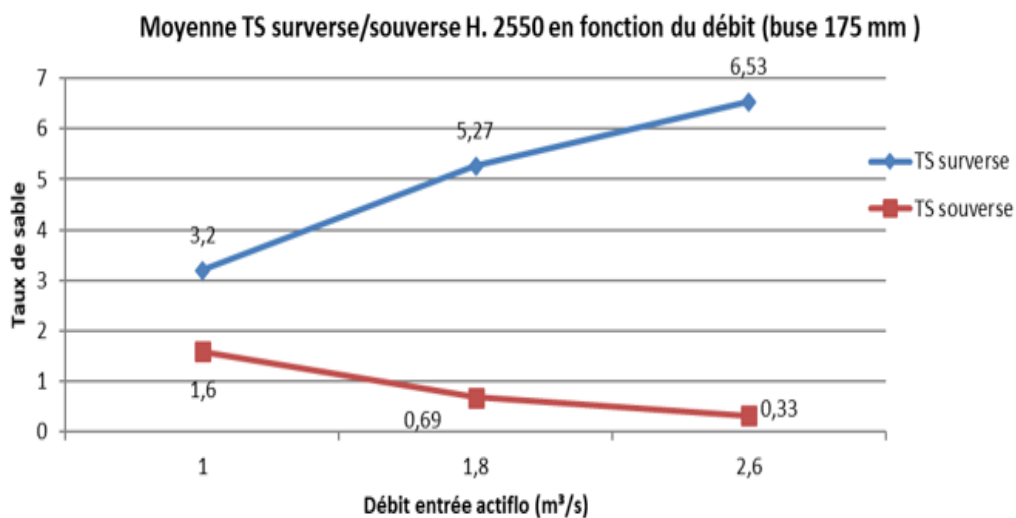


Figure 21: Moyenne des pertes en microsable en surverse et TS en sousverse de l'hydrocyclone 2550

Par rapport à l'hydrocyclone 2540, on remarque que cet hydrocyclone du même Actiflo®, perd plus de sable en surverse : déjà avec 1 m³/s, on est à 3.2 g/m³ de perte, cela augmente jusqu'à 6.53 g/m³ avec un débit de 2.6 m³/s soit environ 4.50 g/m³ de sable au-dessus de la consigne. Cette forte présence de sable en surverse a bien évidemment une conséquence sur le taux de recirculation en sousverse qui d'après la (figure 21) est presque inexistante. Fort de ce constat, on est obligé de rajouter à chaque test avec cet hydrocyclone, jusqu'à 2 bigs-bags de microsable pour que l'Actiflo® fonctionne normalement. Ce qui est

énorme pour seulement 1 heure de fonctionnement. Nous avons aussi remarqué une forte concentration de solides autres que du sable en sousverse de cet hydrocyclone :

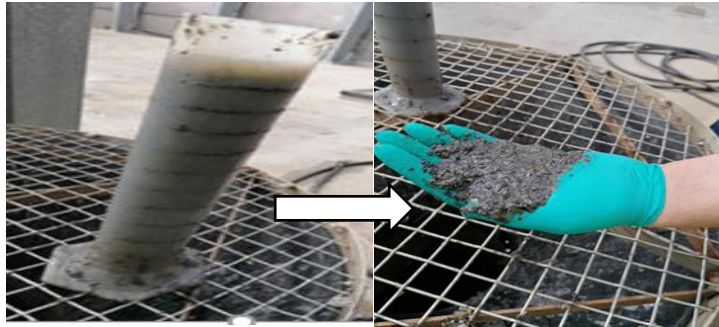


Figure 22: Photo montrant la forte concentration de solides autres que du sable en sousverse de l'hydrocyclone 2550

A première vue, cette photo prise en sousverse, laisserait penser qu'il s'agit en partie de sable dans l'éprouvette ; mais tel n'est pas, le cas, l'on est plutôt en présence de déchets divers.

I.3.3. Hydrocyclone 1540 d'Actiflo®1

Les résultats des tests sont représentés dans le tableau suivant :

Débit entrée (m ³ /s)	Taux de sable en surverse (g/m ³)	Taux de sable en sousverse (kg/m ³)
1	2,79	1,42
1,8	3,79	1,45
2,6	3,22	0,82

Tableau 16: Résultats des pertes de sable en surverse et TS en sousverse de l'hydrocyclone 1540

D'où le graphique suivant :

Moyenne Ts surverse/sousverse H. 1540 en fonction du Q (buse 175 mm)

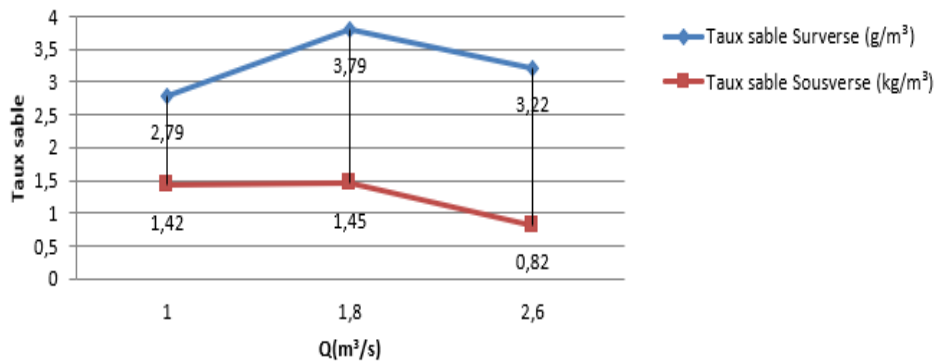


Figure 23: Moyenne des pertes de microsable en surverse et TS en sousverse hydrocyclone 1540

Par rapport aux hydrocyclones de l'Actiflo® 2, les pertes en sable pour cet hydrocyclone appartenant à Actiflo® 1 sont moins importants, environ 1.5 g/m³ au-dessus de la consigne.

I.3.4. Hydrocyclone 1550 d'Actiflo® 1

Débit (m³/s)	TS en surverse (g/m³)	TS en sousverse (kg/m³)
1	2,1	2,57
1,8	3,07	0,97
2,6	4,62	1,11

Tableau 17 : Résultats des pertes de sable en surverse et TS en sousverse de l'hydrocyclone 1550

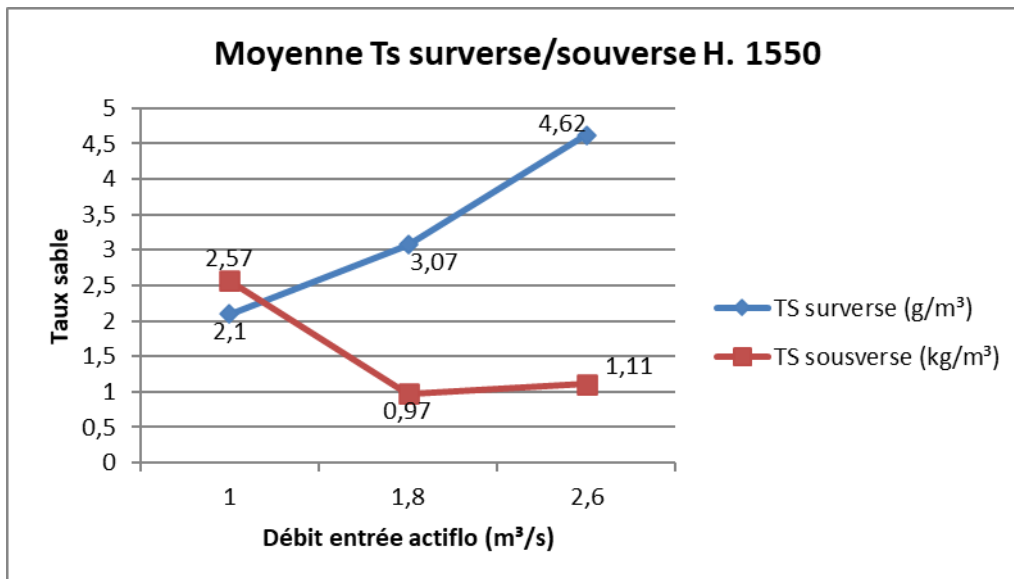


Figure 24: Moyenne des pertes de microsable en surverse et TS en sousverse hydrocyclone 1550

Cet hydrocyclone par rapport au 1540 perd encore plus de sables. On remarque aussi qu'en fonction du débit, les pertes augmentent. Par contre le taux de recirculation en sousverse est très faible, et diminue aussi fortement en fonction du débit.

I.4. Récapitulatif des résultats

La série des premiers tests que nous avons effectués afin de quantifier les pertes en sable en surverse des quatre hydrocyclones, nous a permis de déterminer la quantité de sable perdue par les quatre hydrocyclones. D'après les résultats qui précèdent ; il est évident que la taille de buse de surverse actuelle (175 mm) ne permet pas d'atteindre les objectifs de séparation escomptés. Dans la majorité des tests effectués, on a obtenu des valeurs au-dessus de la normale (confer figure 26).

La deuxième interprétation que l'on peut faire est le fait que pour les quatre hydrocyclones : l'augmentation du débit et donc de la vitesse d'injection diminue le pouvoir de séparation des appareils, ce qui se traduit aussi par une diminution du diamètre de coupure. Pour les hydrocyclones de l'Actiflo® 2 (2540 et 2550) : on est en présence d'une très forte concentration de solides en sousverse, qui montre que le cyclonage est trop surchargé. Ce qui crée une perte en sable par la surverse. Ce phénomène entraîne une décharge en boudin par opposition à la décharge en parapluie qui est la plus recommandée (confer figure 25).

Lorsqu'on injecte une plus grande quantité de solide dans l'hydrocyclone, en augmentant la concentration ou le débit d'alimentation, la partie conique se remplit et bloque l'entrée d'air. La décharge se fait alors sous forme de boudin. Bien que d'après le constructeur le phénomène de boudinage observé ne peut être considéré comme un problème pour les hydrocyclones Door Oliver Eimco que nous étudions ; il est quand même admis que la décharge en boudin est le problème opérationnel des hydrocyclones le plus connu et le plus cité par les chercheurs (Mohamed Mai Manga, 2011). Ce phénomène survient lorsque la quantité de solides augmente dans la sousverse jusqu'au point où l'apex devient complètement bouché par un flux de pulpe, caractérisé par un mouvement ralenti avec une concentration en solides très élevée.



Figure 25 : exemple d'une décharge en parapluie (à gauche) et en boudin (à droite)
(Davailles, 2011)

Enfin le graphique qui va suivre fait une comparaison sur la quantité de sable en surverse des quatre hydrocyclones ; et il apparaît que le 2550 est celui pour lequel on a de plus de pertes soit 6.53 g/m^3 au lieu des 2 g/m^3 recommandés. C'est donc sur celui-ci qu'il faut agir rapidement.

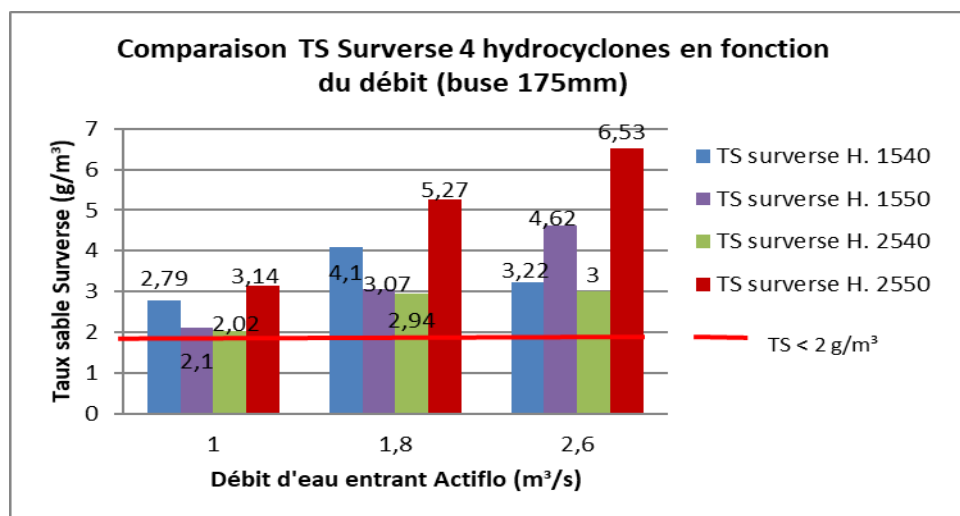


Figure 26: Comparaison TS en surverse des 4 hydrocyclones en fonction du débit

II. Résultats des tests avec un diamètre de la buse de 160 mm

Un hydrocyclone est composé de parties interchangeables, ce qui permet de modifier la configuration et d'ajuster les performances de séparation : c'est ce que nous avons fait sur la base des résultats non satisfaisants obtenus. La buse de surverse de trois hydrocyclones a été modifiée de 175 à 160 mm comme illustré ci-dessous :



Figure 27: Modification diamètre buse surverse de 175 à 160 mm

Le choix de cette taille se justifie par le fait que les diamètres initialement prévus par le concepteur des hydrocyclones (Door Oliver) ne permettaient pas d'atteindre un débit de recirculation acceptable sans risque de perte de sable en surverse. Ils se sont avérés être trop grands pour la partie surverse et trop petit pour la partie sousverse. Raison pour laquelle, en phase expérimentale en 2008, un premier changement avait déjà été opéré tel que mentionné plus haut (passage des buses de sousverse de 75 à 100 mm). A titre de rappel, un plus grand diaphragme donnera une coupure plus grossière et une plus grande proportion de solides à la surverse ; par contre un plus petit diaphragme provoquera une coupure plus fine et moins de solides en surverse. Les résultats des tests intégrant cette modification seront présentés dans la suite de ce travail.

II.1. Résultats des tests avec un diamètre de buse de 160 mm

Trois hydrocyclones ont subi des modifications de leur buse de surverse (le 2550, 1540 et 1550). Cependant, nous n'avons pu effectuer de tests que sur les hydrocyclones 2550 et 1550.

II.1.1. Comportement de l'hydrocyclone 2550 après modification de la buse de surverse

Tel que mentionné dans le (tableau 12), nous avons effectué cinq tests après modifications. Cependant, seulement trois ont été pris en compte, et les deux autres n'ont pas été considérés (nous expliquerons la raison plus tard). Les résultats des trois tests valables sont représentés dans le graphique qui suit :

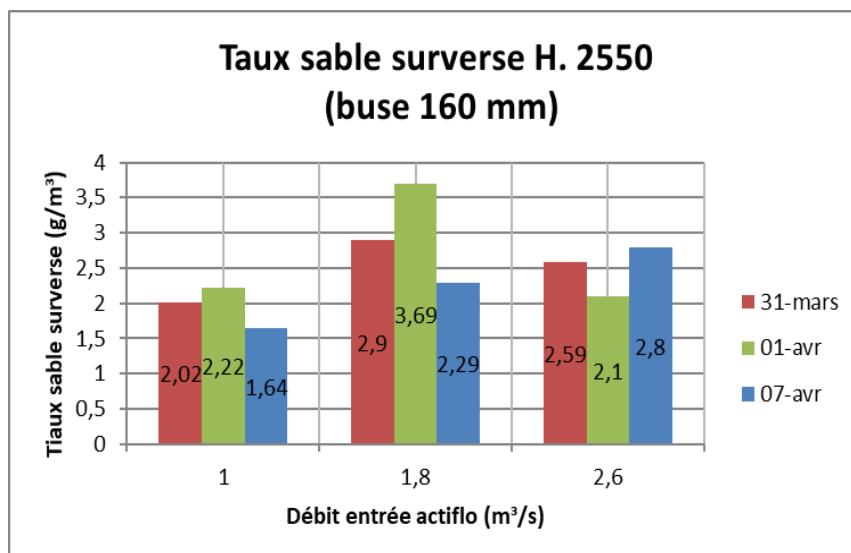


Figure 28: Résultat des tests avec une buse de surverse de 160 mm sur l'hydrocyclone 2550

Ce graphique nous présente les trois tests effectués sur l'hydrocyclone 2550 après modification de sa buse de surverse. En dehors du 1^{er} avril où on remarque un pic de 3.69 g/m³ avec un débit d'1.8 m³/s ; ces résultats sont acceptables dans l'ensemble. Essayons de les comparé avec les premiers tests :

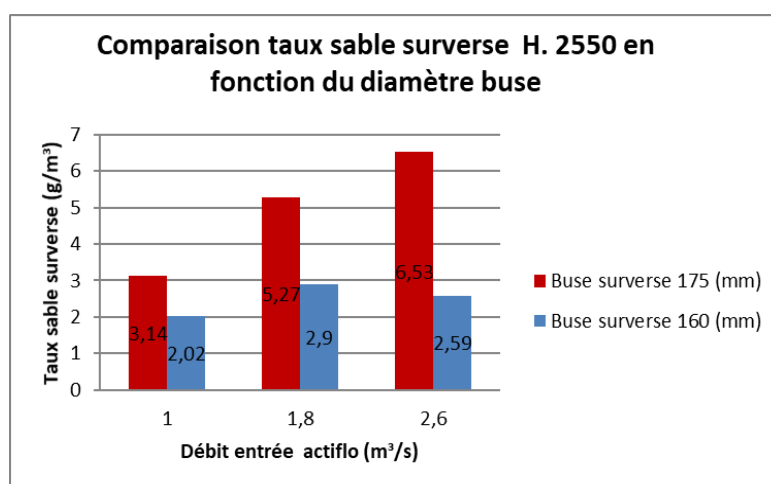


Figure 29: comparaison TS en surverse de l'hydrocyclone 2550 en fonction du débit et en fonction du diamètre de la buse de surverse

D'après ce qui précède, on peut dire que la réduction de la taille de la buse a eu un effet sur la diminution de la quantité de sable en surverse. A chaque débit, on a eu une amélioration ; certes on est encore légèrement au-dessus du taux visé (< 2 g/m³), mais le résultat obtenu est déjà satisfaisant. La photo qui suit illustre ce résultat :



Figure 30: Echantillon de sable et de boue prélevé sur l'hydrocyclone 2550

Au contraire de ce qui a été vu plus haut lorsqu'on a présenté les échantillons de sable et boue prélevé sur l'hydrocyclone équipé de la buse de surverse de 175 mm ; ici, on distingue simplement le sable se trouvant en sousverse et la boue en surverse.

II.1.2. Comportement de l'hydrocyclone 1550 après modification de la buse de surverse

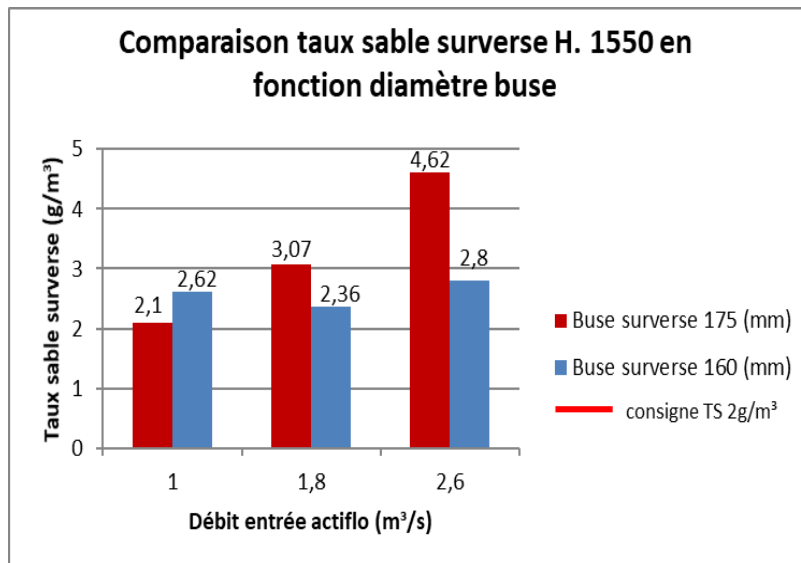


Figure 31: comparaison des TS en surverse de l'hydrocyclone 1550 en fonction du débit et du diamètre de la buse de surverse

Nous constatons également une amélioration des pertes en sable avec la buse de 160 mm ; ce qui est particulièrement visible sur le graphique à partir d'un débit de 1.8 m³/s. Comme ce fut le cas pour le résultat obtenu avec l'hydrocyclone 2550, on est toujours légèrement au-dessus du taux visé. Cependant les tests effectués nous ont permis de déceler qu'en dehors des buses ; d'autres paramètres, que nous allons expliquer par la suite,

contribuent aussi à la mauvaise séparation dans les hydrocyclones et par là, provoquent des pertes en microsable.

II.2. Présentation des autres facteurs influençant la perte de sable en surverse

En présentant la problématique de perte de sable en surverse des hydrocyclones ; nous avons abordé l'influence des paramètres tels que le débit et la pression d'alimentation sur la séparation cyclonique. Nous avons dit que le respect de pression et débit d'alimentation spécifique est nécessaire pour placer les hydrocyclones dans des points de fonctionnement garantissant une bonne séparation du sable et de la boue sans entrainement d'une quantité de sable de plus de $2g/m^3$ en surverse. Ainsi, comme le montre la figure qui suit, le système de supervision enregistre une forte variation du débit et la pression d'alimentation au cours du test effectué sur l'hydrocyclone 2550 le 26 mars ; il apparaît une énorme variation du débit et la pression d'alimentation.

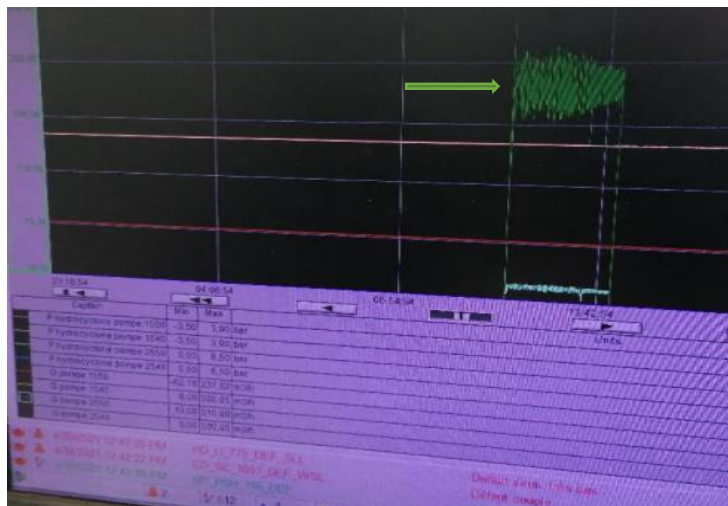


Figure 32: Variation débit d'alimentation hydrocyclone 2550 en fonctionnement

La variation observée allait de 190 à 260 m^3/h , par conséquent, il y'a pas eu séparation ce jour : l'échantillon prélevé en surverse était constitué de sable qui était alors absente en sousverse. Un autre fait montrant l'effet de ces paramètres sur la perte en sable est que, pour les quatre tests de l'hydrocyclone 1550 avec comme diamètre de buse de surverse de 160 mm, la pompe de cet hydrocyclone ne débitait pas correctement. Au lieu de 230 m^3/h , son débit oscillait entre 190 et 210 m^3/h . C'est la raison qui explique que les résultats pour cet hydrocyclone après modification ne sont pas aussi significatifs que pour l'hydrocyclone 2550.

II.3. Influence des problèmes liés à l'opérationnalité des hydrocyclones

Mohamed Mai Manga dans son mémoire de Maitrise en génie de la métallurgie, a travaillé sur les différentes anomalies d'un hydrocyclone en fonctionnement. De ce travail, il en ressort deux problèmes que peuvent rencontrer les hydrocyclones affectant la séparation cyclonique : pour notre étude, il s'agit particulièrement de la décharge en boudin (que nous constatons dans notre cas) et l'usure du revêtement de l'hydrocyclone.

La paroi interne d'un hydrocyclone est protégée par un revêtement en caoutchouc, qui avec le temps, à cause de l'abrasion des particules, s'use ce qui peut avoir un impact sur la classification. Dans certains cas, un morceau du revêtement peut même se détacher pour bloquer partiellement ou totalement l'apex. L'impact de l'usure du revêtement sur la classification a un effet sur l'augmentation de la concentration de solides en sousverse ; ce qui a été observé sur l'hydrocyclone 2550 pendant la période de test.

B. Recommandations

Dans la première partie de chapitre, nous avons montré les résultats médiocres obtenus à l'issue des premiers tests effectués sur les hydrocyclones avec les buses de surverse d'un diamètre de 175 mm. Ensuite après diminution du diamètre de ces buses sur deux hydrocyclones (2550 et 1550) de 175 à 160 mm, nous avons refait une deuxième série de tests dont les résultats ont présenté une bonne amélioration, surtout en ce qui concerne l'hydrocyclone 2550. Cependant, au cours de ces tests, nous avons relevé certains paramètres qui influencent négativement la perte en surverse et dont il est nécessaire d'optimiser pour essayer de régler le problème. N'ayant pas eu assez de temps au cours du stage pour aller au bout des tests, cette section a pour but de faire quelques recommandations afin d'optimiser davantage la séparation dans les quatre hydrocyclones et de ce fait, réduire les pertes en sable.

III. Au niveau des hydrocyclones

III.1. Agir sur les buses

III.1.1. Réduire de nouveau de 10 mm le diamètre de la buse de surverse

La première mesure prise pour diminuer le diamètre de la buse de surverse de 10 mm a eu un effet sur la réduction des pertes en sable en surverse tel que démontré à travers la (figure 29), où on est passé de plus ou moins 40 à 10 g/m³ de perte, sans perte de boue en sousverse. Je recommande alors de réduire encore la taille de buse de 10 mm et refaire les tests pour évaluer l'effet de cette réduction.

III.1.2. Contrôler régulièrement les buses de sousverse et surverse

Je recommande aussi de faire un contrôle régulier de la surverse/sousverse en faisant des tests tels ceux que nous avons effectué. Car, la présence d'un objet (bois ou autres par exemple) dans l'hydrocyclone peut perturber le cyclonage. De la même manière, il faut vérifier la concentration en boues car si elle est trop importante et que le parapluie en sousverse disparaît, on aura de pertes de sable en surverse. Nous avons vu que le microsable est abrasif et donc, cause l'usure des matériaux ; ceci étant il faut contrôler régulièrement le débit de sousverse car c'est sa buse qui s'use plus rapidement. Quelques mm d'usure suffisent à changer le rapport de débit sousverse/surverse et à modifier l'écoulement dans le cyclone. Les concepteurs des hydrocyclones préconisent de faire ce contrôle de buses, 1 à 2 fois par an, et au besoin de les changer.

III.2. Fiabiliser les pompes de recirculation

Il s'agit des pompes de recirculation de boue et de microsable qui alimentent les hydrocyclones. Nous avons vu que Le respect de pressions et débits d'alimentation spécifiques des hydrocyclones est nécessaire pour placer les hydrocyclones dans des points de fonctionnement garantissant une bonne séparation du sable et de la boue sans entrainement de plus d'une quantité de sable de 2g/m³ d'eau brute en surverse. Ils sont fixés respectivement à 230 m³/h pour le débit des pompes et 1.20 bar pour la pression. Cependant, au cours de nos tests, nous nous sommes rendu compte que ces paramètres n'étaient pas maintenus. Pour ce qui est de l'hydrocyclone 2550, nous avons vu que l'instabilité de la pompe d'alimentation au cours d'un test effectué le 26 mars était la conséquence du

dysfonctionnement constaté. Quand-aux pompes des hydrocyclones 1540 et 1550, leur débit était faible (entre 180 et 210 m³/h), donc en dessous de la valeur nominale ; et finalement, elles ont dû être remplacées. Nous préconisons donc de vérifier régulièrement ces pompes et de s'assurer que le débit et la pression sont corrects.

IV. Agir sur certains paramètres de fonctionnement Actiflo®

Nous avons observé qu'à chaque démarrage d'Actiflo®, le procédé rencontre certains problèmes qui entravent son bon fonctionnement. Nous avons repris quelques-uns de ces problèmes consignés sur une liste de demande d'intervention (DI) :

DI	Titre	Principal	Date
000018065	Diminution du débit de la pompe hydrocyclone 1540	CZ-PC-1540	27/04/2021 07:17:44
000018046	la pompe hydrocyclone 1550 fuit	CZ-PC-1550	23/04/2021 21:44:21
000018045	Bâche à boues Actiflo à curer	CZ-PC-1720	23/04/2021 14:44:37
000017972	Le racleur actiflo 1 est bloqué	CZ-SR-1510	11/04/2021 11:49:14
000017970	Fuite sur une bride hydrocyclone	CZ-PC-1550	11/04/2021 10:44:11
000017857	Sonde pH Actiflo 2 tire droit	CZ-AI-025	26/03/2021 13:10:20
000017807	dégrilleur Actiflo 1	CZ-SD-1110	19/03/2021 05:51:14
000017798	déf process	CZ-PC-2550	18/03/2021 11:47:34
000017796	Pb débitmètre pompe Hydrocyclone 1550	CZ-FI-45	18/03/2021 08:51:27
000017790	La pompe hydrocyclone ne débite pas	CZ-PC-1540	16/03/2021 22:03:47
000017783	Le palan Actiflo ne descend plus	CZ-TP-1800	16/03/2021 12:21:21
000017777	pompe à sable Bouché	CZ-PC-1140	15/03/2021 11:43:09
000017766	Défaut process récurrent	CZ-PC-2550	15/03/2021 08:08:53
000017765	Dégrilleur actiflo inacquitable	CZ-SD-1110	13/03/2021 14:15:56
000017742	fuite sur la pompe hydrocyclone 1550	CZ-PC-1550	10/03/2021 12:26:38
000017734	Débit sur pompe CZ-PC-1540 Actiflo trop faible	CZ-PC-1540	09/03/2021 16:44:44
000017707	fuite arrosage herse décanteur actiflo 2	CZ-SR-2510	05/03/2021 13:27:15
000017696	dégrilleur actiflo CZ-SD-1110 inacquitable	CZ-SD-1110	04/03/2021 19:20:12
000017664	Curage bâche à boues Actiflo	CZ-PC-1720	26/02/2021 12:12:07
000017604	dégrilleur actiflo CZ-SD-1110 inacquitable	CZ-SD-1110	19/02/2021 04:41:26

Figure 33: Problèmes rencontrés avec le procédé Actiflo®

Plusieurs dysfonctionnements repris sur cette liste impactent plus ou moins le fonctionnement du procédé. Il s'agit par exemple du débit de la pompe déjà mentionné plus haut, la pompe à sable, les racleurs etc. Il faut vérifier les composants du procédé dont les installations datent de 2008. Effectuer la maintenance nécessaire ou changer les pièces défectueuses. D'une manière générale les actions suivantes doivent être menées pour optimiser Actiflo® :

Une mesure réelle des réactifs consommés doit être effectuée et analysée en vue de l'optimisation du dosage. De manière hebdomadaire : un entretien de l'instrumentation en place (nettoyage et étalonnage des sondes, capteur de hauteur de voile de boue) est fortement conseillé. Cette maintenance est particulièrement importante lorsque les

informations délivrées par les capteurs sont utilisées en asservissement. De plus, le contrôle du bon fonctionnement des postes de préparation du polymère : débit d'eau et de la vis, concentration de la solution mère, bon fonctionnement de l'éventuel aspirateur de polymère est à réaliser.

Le poste « Préparation du polymère » doit être optimisé pour son exploitation aisée, sa surveillance et sa maintenance. Plusieurs fois au cours des tests, Actiflo® a eu du mal à démarrer à cause de ce paramètre.

La mesure du taux de sable en sousverse des hydrocyclones n'est pas toujours aisée ; car parfois l'éprouvette est remplie de déchets plus que de sable ; et, certains opérateurs ne tiennent pas compte de cet aspect, ils considèrent qu'il y'a assez de sable dans Actiflo® et du coup n'en rajoute pas. Il est donc important de reformer les opérateurs à la lecture du taux de sable.

Le revêtement des lamelles peut également se détériorer et faciliter alors l'accrochage des boues. Suite à cette difficulté, un changement régulier de tous les blocs de lamelles doit être réalisé. Les lamelles des décanteurs doivent actuellement être changées car elles sont déjà bien affaissées, surtout pour Actiflo® 1.

Enfin, le nettoyage manuel du bloc lamellaire au jet d'eau sous pression est indispensable. Les constructeurs prescrivent toujours des lavages mensuels mais un lavage plus fréquent est nécessaire pour éviter les fuites de floc et limiter la formation d'algues en surface des blocs. De plus un étalonnage du débit des pompes (polymère, chlorure ferrique, recirculation) doit se faire régulièrement pour obtenir un asservissement cohérent. Cet étalonnage est particulièrement important pour les pompes susceptibles de s'user fortement (recirculation des boues sableuses ou pompage de chlorure ferrique).

En fin de cycle Actiflo® : laisser fonctionner les pompes de recirculation (30-45 min) pour que le retour en sable du décanteur soit constant et éviter qu'il s'accumule au niveau des pompes et les use prématurément.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de contribuer à l'optimisation du procédé de traitement physico chimique des eaux pluviales Actiflo® de la station d'épuration de Bruxelles Nord. Cette optimisation, a été réalisée au moyen des tests expérimentaux sur les hydrocyclones afin de quantifier les pertes en sable au niveau des surverses et bien sûr, de trouver le moyen de les réduire.

Pour bien mener cette recherche, on a tout d'abord étudié le principe théorique de fonctionnement de l'Actiflo® ; c'est un procédé qui regroupe à la fois les techniques de traitement des eaux usées par coagulation, floculation et décantation, avec des vitesses de décantation de 60 à 150 m/h. Sa compacité fait de lui le procédé idéal pour répondre aux contraintes d'espaces disponibles, avec des temps de séjour très court. Il est mis en œuvre à la station, pour le traitement des eaux pluviales dont les débits sont très importants, allant jusqu'à 9360 m³/h, tout en respectant les normes les plus strictes avec des abattements qui vont au-delà de ce qui est préconisé par les normes de sortie. Tout ce dont nous venons de décrire est possible grâce à l'ajout de microsable qui sert à alourdir la pollution particulaire et colloïdale déjà agglomérée par l'étape de coagulation-floculation, qui se décante alors rapidement et facilement. Ensuite, nous avons montré le rôle des hydrocyclones dans le processus ; qui sont des appareils séparant le microsable de la boue issue d'Actiflo®. Les facteurs affectant les performances des hydrocyclones nous ont permis d'expliquer la problématique de perte en sable dans ceux-ci, qui est, le dysfonctionnement hydraulique qui réduit les performances d'Actiflo® de la station.

Ainsi, les différents tests effectués au cours des trois mois de suivi des Actiflo® suivant un protocole bien défini, nous ont permis premièrement de quantifier les pertes en sable par les hydrocyclones. Au cours de ces tests, l'accent était mis sur la surverse car c'est là que se situent les pertes en sable. Il en est ressorti que les quatre hydrocyclones étudiés avec les caractéristiques suivantes (diamètre de buse de surverse 175mm et diamètre buse sousverse 100 mm) perdent tous du sable en surverse ; ce qui a un impact sur le taux de recirculation de sable en sousverse des hydrocyclones, qui est faible et entraîne une forte consommation de microsable par Actiflo qui s'est multipliée par 7 entre 2015 et 2020. Nous avons aussi vu que la présence de sable en surverse des boues pluviales, est nocive pour les installations de traitement des boues car le sable est abrasif et cause une usure rapide des pièces métalliques.

Il est apparu que l'hydrocyclone 2550 est celui parmi les quatre qui fonctionne le moins bien, avec une concentration de sable en surverse de 6.53 g/m^3 , alors que la consigne impose 2 g/m^3 . Deuxièmement, à l'issue de ces tests, nous avons recommandé en concertation avec les exploitants de la station de réduire la taille des buses de surverse de 10 mm, elle est donc passée de 175 à 160 mm. Les tests sur les hydrocyclones 2550 et 1550 nous montrent une amélioration de la quantité de sable perdu en surverse : on est passé pour l'hydrocyclone 2550 de 6.53 à 2.59 g/m^3 de perte, sans pertes de boues en sousverse. Ce qui veut dire que la modification a eu un effet très bénéfique.

Nous n'avons pas eu le temps de réaliser le même test pour les quatre hydrocyclones avec cette taille de buse de surverse ; nous recommandons donc de finaliser les tests pour les deux hydrocyclones restants (1540 et 2540). Ensuite, on pourra encore tenter de réduire la taille de la buse à 150 mm ; cela permettra sans doute de ramener les pertes à la concentration souhaitée, les tests devront donc être réalisés en ce sens.

Afin de minimiser la perte de sable, le réglage des cônes équipant les hydrocyclones n'est pas possible. Par contre, l'exploitant peut gérer le bon fonctionnement de l'appareil (suivi des pressions, des débits recirculés), le taux et les apports de sable dans l'ouvrage. Ces derniers doivent être réguliers et sans à-coups. Il est à noter que la répétabilité de la mesure du taux de sable au sein de l'ouvrage n'est pas toujours évidente.

Par ailleurs, les tests effectués nous ont aussi montré certains facteurs qui influencent la perte en sable : il s'agit du débit des pompes de recirculation qui est pour certains hydrocyclones trop instables et pour d'autres trop faible. On recommande donc de fiabiliser les pompes des hydrocyclones 2540 et 2550, et remplacer celles des hydrocyclones 1540 et 1550.

Les hydrocyclones n'étant pas une unité isolée, mais liés au fonctionnement d'Actiflo®, il est important d'optimiser Actiflo® dans son ensemble afin de contrôler tous les paramètres pouvant influencer les pertes de sable en surverse des hydrocyclones. Il s'agit entre autres de la stabilisation des trois réactifs (FeCl_3 , polymère et microsable), remplacer les lamelles des décanteurs qui se sont affaissées. Il est nécessaire également de vérifier la boucle de recirculation avec la vitesse de raclage et le débit de pompage (recirculation) afin d'assurer un retour de sable constant, tant en phase de démarrage qu'en phase d'augmentation du débit de pluies.

Les contraintes de temps ne nous ont pas permis de faire le maximum de tests sur tous les hydrocyclones. Qu'à cela ne tienne, un suivi régulier au travers des tests et des réajustements des paramètres sus-cités sont indispensables pour optimiser Actiflo®.

BIBLIOGRAPHIE

1. Aquiris. (2008). *Présentation du procédé Actiflo*.
2. Blazy, P., & Joussemet, R. (1996). Classification hydraulique en dimensions
Classification par sédimentation. *Technique de l'ingénieur*, 33(0), 1–12.
3. CARDOT, C. (2010). *Les traitements de l'eau : Procédés physico-chimiques et biologiques*.
4. Conseil Européen. (1991). Directive 91/271/CEE du Conseil, du 21 mai 1991, relative au traitement des eaux urbaines résiduaires. *Directive 91/271/CEE Du Conseil, Du 21 Mai 1991, Relative Au Traitement Des Eaux Urbaines Résiduaires*.
5. Davailles, A. (2011). *Effet de la concentration en solide sur les performances de séparation d'un hydrocyclone (simulations numériques et expériences de références)*.
<https://www.theses.fr/2011INPT0112%0Ahttp://oatao.univ-toulouse.fr/6958/1/davailles.pdf%0Ahttp://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001768/>
6. Debacq, M., Debacq, M., & Cgp, L. (2019). *Séparations mécaniques fluide / solide To cite this version : HAL Id : cel-02284553*.
7. Degrémont. (1989). *Memento Technique de l'Eau, Neuvième édition, Tome 1*.
8. Desjardins, C. (1999). *Simulation et étude en laboratoire de la floculation lestée (Actiflo) à l'aide d'une procédure modifiée de JAR TEST*.
9. Jupsin, H. (2020). *Epuration des eaux usées, cours Master 2 en Sciences et Gestion de l'Environnement à finalité Gestion Intégrée des Ressources en Eau*.
10. Mohamed Mai Manga. (2011). *Caractérisation de l'opération d'un hydrocyclone en présence d'anomalies*.

11. Mpode, F. (2009). *Suivi de systemes de decantation à floccs lestés*. 137.
12. Rejsek, F. (2002). *Analyse des eaux : Aspects réglementaires et techniques*.
13. Sauvignet, P., & Tisserand, B. (2007). *Utilisation combinée de l' Actiflo et de la désinfection UV pour le traitement des eaux d' orage*. 43–52.
14. Société Bruxelloise de Gestion de l'Environnement. (2012). *Le traitement des eaux usées en région de Bruxelles-capitale*.
15. Veolia. (2008). *Brochure présentation Actiflo* (p. 10).
16. [Centrifugation — Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrifugation).
17. [Decantation \(free.fr\)](http://free.fr).
18. [Historique | Aquiris](#).
19. [Loi de Stokes — Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Stokes).
20. Objectif 6 : Garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable – Développement durable (un.org)