



UNIVERSITÉ
LAVAL

UNIVERSITÉ LAVAL
Pavillon Adrien Pouliot
Département Génie Civil et Génie des Eaux
1065 Avenue de la Médecine
G1V 0A6 QUÉBEC, QC, CANADA



INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES
Département de Génie des Procédés
135 Avenue de Ranguel
31400 TOULOUSE, FRANCE

Rapport de Stage de fin de 4^{ème} année

Optimisation d'un décanteur primaire :

Caractérisation des vitesses de chute et
détermination de la distribution des tailles de
particules contenues dans les eaux usées

Julie CIGNA

Responsables de stage :

Maitre de stage : Peter VANROLLEGHEM

Tuteurs : Thibaud MARUEJOULS et Giulia BACHIS

Tuteur INSA : Etienne PAUL

Année 2012-2013

Résumé

Ce stage se déroule dans le cadre du projet *primEAU* réalisé par le groupe de recherche *modelEAU*. Ce projet se fait en collaboration avec les entreprises John Meunier et Veolia et l'Université Laval et de Montréal. Son objectif est d'étudier le comportement des décanteurs primaires en vue de déterminer les conditions optimales et de modéliser par la suite des traitements se situant à l'aval des décanteurs primaires comme les digesteurs des boues par exemple.

Pour ce faire, un pilote de décantation primaire a été installé dans la station d'épuration de Québec. Chaque semaine, plusieurs conditions ont été testées, faisant intervenir le débit d'entrée du pilote, la période d'échantillonnage et l'ajout ou non de produit chimique. Ce nouveau projet *primEAU* a pour but de déterminer la faisabilité d'une possible substitution des produits chimiques de coagulation et floculation conventionnels (alun et polymère) par des produits dits « verts » (tannin). Ces nouveaux produits chimiques seraient biodégradables par les traitements suivants la décantation primaire et entraînent donc moins d'impact sur l'environnement. Ainsi, pour ces différentes conditions opératoires, il est nécessaire de déterminer différents paramètres tels que les MeS, la DCO, l'azote total, la distribution des tailles et des vitesses de chute des particules présentes dans les eaux usées d'entrée du décanteur primaire, de sortie et de boues, etc.

Le but de ce stage a été de se concentrer sur le comportement physique et chimique du décanteur primaire en analysant les matières en suspension, les matières volatiles en suspension, les distributions de tailles et de vitesses de chute des particules présentes dans les eaux usées.

Les différents résultats obtenus pour les différentes expériences réalisées ont montré que l'ajout de produits chimiques améliorait l'abattement en matières en suspension en formant des particules plus volumineuses et denses. De plus, ils ont permis de mettre en avant les bonnes performances d'abattement après ajout du tannin, identiques ou supérieures à l'abattement avec l'ajout d'alun et de polymère. Le tannin semble donc être un produit intéressant pour la coagulation et la floculation des particules présentes dans les eaux usées et vis-à-vis des faibles impacts environnementaux qu'il engendre en comparaison de l'alun et du polymère.

Remerciements

Je remercie, tout d'abord, le professeur Peter Vanrolleghem pour m'avoir donné l'opportunité d'intégrer le groupe de recherche modelEAU et de participer au projet primEAU. Grâce à son aide et sa grande expérience, j'ai pu mener mon projet à terme et développer mes connaissances sur le traitement des eaux usées.

De même, je remercie le professeur Paul Lessard pour son aide quant aux interprétations des résultats obtenus durant ce stage.

Je remercie aussi mes tuteurs de stage, Giulia Bachis et Thibaud Maruejols, pour leur implication et leur aide afin de réaliser à bien ce projet.

Je remercie la professionnelle de recherche Sylvie Leduc pour son aide lors des expériences en laboratoire et sa bonne humeur communicative.

Je remercie Michel Bisping pour sa disponibilité et son aide afin de solutionner les problèmes rencontrés lors des expériences en laboratoire durant ce stage.

Je remercie la stagiaire Claire Lutignier pour son aide lors de la réalisation des expériences et pour sa bonne humeur et sa gentillesse.

Sommaire

I.	Introduction	1
II.	Présentation du groupe de recherche modelEAU et du projet primEAU	2
III.	Projet	3
	1. Présentation du déroulement de ce stage	3
	2. Description des mécanismes ayant lieu lors des expériences réalisées pour le projet primEAU	5
	3. Matériels et Méthodes utilisés dans le cadre du projet primEAU	7
	a. Détermination des MeS et MVeS	8
	b. Détermination des vitesses de chute des particules : protocole ViCAs	9
	c. Détermination de la distribution des tailles des particules : protocole FBRM	11
	d. Couplage vitesses de chute et tailles des particules	14
	4. Résultats obtenus pour les différentes expériences réalisées dans le cadre du projet primEAU	15
	a. Abattement des matières en suspension	15
	b. Vitesses de chute des particules	17
	c. Tailles des particules	20
	d. Couplage vitesses de chute et tailles des particules	25
IV.	Conclusion	28

Table des illustrations

Figure 1 : Plan de campagne du projet primEAU	4
Figure 2: Forces s'exerçant sur une particule	6
Figure 3: Pilote de décanteur primaire du projet primEAU.....	7
Figure 4: Montage permettant l'échantillonnage de l'entrée et de la sortie	7
Figure 5 : Analyses réalisées sur les échantillons prélevés sur le pilote de décantation primaire	8
Figure 6: Schéma de la colonne permettant de réaliser la méthode ViCAs	10
Figure 7 : Masse de particules cumulées décantées en fonction du temps	10
Figure 8 : Courbe donnant $F(V_c)$ en fonction de la vitesse de chute des particules	11
Figure 9 : Schéma de l'installation Lasentec.....	12
Figure 10 : Schéma de la sonde FBRM	12
Figure 11 : Schéma des longueurs de corde mesurées par l'installation FBRM	12
Figure 12 : Courbe représentant l'évolution du nombre de détection par seconde.....	13
Figure 13 : Courbe représentant l'évolution des fractions de masses cumulées.....	13
Figure 14 : Sonde, agitateur et béccher contenant l'échantillon.....	13
Figure 15 : Courbes donnant les distributions de vitesses de chute et de tailles des particules.....	14
Figure 16 : Relation vitesse de chute des particules et taille des particules	14
Figure 17 : Valeurs de densité de particules	15
Figure 18 : Valeurs de MeS obtenues pour les différentes expériences	16
Figure 19 : Diagramme représentant l'abattement des matières en suspension pour les différentes expériences réalisées pour le projet primEAU.....	16
Figure 20 : Zones de mesure des ViCAs des entrées et des sorties par temps sec pour des décanteurs classiques	17
Figure 21 : Courbes ViCAs	18
Figure 22 : Courbes ViCAs	18
Figure 23 : Courbes ViCAs	19
Figure 24 : Courbes ViCAs	19
Figure 25 : Distribution des tailles des particules	20
Figure 26 : Evolution de la fraction massique en fonction des longueurs de cordes des particules	21
Figure 27 : Distribution des tailles des particules	21
Figure 28 : Fraction massique pour une longueur de corde de 100 microns pour différentes expériences	22
Figure 29 : Fraction massique pour une longueur de corde de 100 microns pour différentes expériences	23
Figure 30 : Fraction massique pour une longueur de corde de 100 microns pour différentes expériences	24
Figure 31 : Evolution du nombre de particules vu à la seconde en fonction du temps	24
Figure 32 : Evolution du nombre de particules vu à la seconde en fonction du temps	25
Figure 33 : Couplage des expériences FBRM et ViCAs	26
Figure 34 : Couplage des expériences FBRM et ViCAs	26
Figure 35 : Couplage des expériences FBRM et ViCAs	27

I. Introduction

Pendant plusieurs années, l'eau a été considérée comme une source naturelle gratuite et inépuisable. Cependant, on observe aujourd'hui une diminution importante des réserves d'eau. Ainsi, de nombreux pays voient leurs ressources en eau disponible diminuer à cause des conditions climatiques actuelles et de l'accroissement de la demande en eau (croissance démographique et développement économique). Aujourd'hui, le prélèvement global de l'eau, comprenant les usages domestiques, industriels et agricoles, est de 250 m³ par an et par habitant, en moyenne dans le monde.

Au niveau du Québec, les sources d'eau potable représentent 10% du territoire. Une politique de développement durable a donc été mise en place dès 2002 afin de préserver ces sources d'eau potable et protéger les écosystèmes.

Or, après traitement, l'effluent sortant des stations d'épuration des eaux usées est rejeté en milieu naturel. Dans ce contexte, l'objectif est de trouver des procédés et techniques de traitement permettant d'améliorer de plus en plus la qualité de cet effluent.

Dans le cadre du stage, effectué avec le groupe de recherche modelEAU à Québec, le projet était de répondre à une problématique concernant l'efficacité de traitement des décanteurs primaires des stations d'épuration utilisant un traitement physico-chimique primaire associé à des décanteurs primaires. Une station d'épuration est constituée d'un ensemble de procédés permettant de dépolluer des eaux usées urbaines domestiques. Les eaux usées sont des eaux polluées par une activité humaine (usage domestique et industriel). Sa qualité est contrôlée et dépend du milieu récepteur situé en zone normale ou en zone sensible. Les résidus formés lors du traitement des eaux usées sont récupérés sous la forme de boues. Les stations d'épuration, utilisant des décanteurs primaires, reposent sur un traitement physico-chimique associé.

Cette étude, nommée projet primEAU, a été réalisée en collaboration avec Véolia, John Meunier inc. et l'Université de Montréal, grâce à des outils de modélisation, de simulations et des expériences.

Le but de ce projet est d'étudier le traitement physico-chimique du pilote, et plus précisément le traitement qui a lieu au niveau des décanteurs primaires, afin de trouver des solutions pour améliorer la qualité de l'eau de sortie des décanteurs vis-à-vis des différents paramètres (concentrations en MES, en MVES, en DCO, en azote total, en lipides...).

Ce stage porte sur la caractérisation des vitesses de chute et la détermination de la distribution des tailles de particules contenues dans les eaux usées pour différentes conditions : débits d'alimentation, périodes d'échantillonnage et ajout ou non de produits chimiques (coagulants et flocculants).

Pour cela, nous avons utilisé des échantillons d'eaux usées provenant d'un pilote installé dans la station d'épuration Est de Québec. La caractérisation des vitesses de chutes a été déterminée par la méthode des ViCAs et la distribution des tailles de particules par la méthode FBRM.

II. Présentation du groupe de recherche modelEAU et du projet primEAU

Le groupe de recherche modelEAU est une des Chaires de Recherche du Canada à l'Université Laval à Québec. Il est dirigé par le professeur Peter VANROLLEGHEM depuis 2006.

L'Université Laval est depuis 1852 la première université d'Amérique francophone et est aujourd'hui classée au 7e rang des universités canadiennes. Elle est composée de 17 facultés enseignant l'ensemble des domaines scientifiques pouvant être à l'origine de recherche et de création. Plus précisément, elle est composée d'établissement dans le domaine de la santé et des services sociaux, de centres de recherche, de chaires de recherche (canadienne, industrielle et en collaboration). L'Université Laval a un budget de 308 millions de dollars.

Le groupe de recherche modelEAU emploie deux post-doctorants, deux professionnels de recherche, dix étudiants gradués et plusieurs stagiaires. Il a pour vocation d'optimiser les méthodes et les procédés de traitement industriel des eaux usées et d'améliorer la qualité de l'eau des rivières, des bassins naturels et des réseaux urbains, grâce à des outils de modélisation. Le groupe de recherche est composé de plusieurs équipes travaillant sur différents projets (primEAU, alEAU, respirEAU...). Le travail effectué dans le cadre de ce stage s'inscrit dans le projet primEAU.

Depuis 2010, le projet primEAU s'intéresse à l'étude, la conception et l'optimisation du processus de décantation primaire servant au traitement des eaux usées en station d'épuration. Ses objectifs sont la modélisation du processus de décantation primaire, l'optimisation de l'abattement des diverses pollutions et donc de la performance des décanteurs primaires et l'optimisation de la décantation de la matière organique afin de la valoriser en biogaz. Ce projet se fait en collaboration avec l'entreprise John Meunier inc., l'entreprise Veolia Environnement et l'Université de Montréal.

Le processus de décantation primaire est une étape importante du traitement des eaux usées des stations d'épuration utilisant un traitement physico-chimique primaire associé à une décantation. Il permet essentiellement d'éliminer les particules présentes dans les eaux usées ou matières en suspension (MES). Ainsi, afin d'étudier les comportements physique, chimiques et biologique des décanteurs primaires et donc réaliser des expériences nécessaires à la réalisation du projet primEAU, la société John Meunier inc. a financé un pilote de décanteur primaire, installé dans la station d'épuration Est de Québec.

III. Projet

1. Présentation du déroulement de ce stage

Le but de la campagne de mesure est d'étudier le comportement physique, chimique et biologique des décanteurs primaires afin d'améliorer le traitement de l'affluent usé. De fait, un pilote de décanteur primaire installé dans la station d'épuration Est de Québec sert à réaliser cette étude. Le pilote de décantation peut être alimenté soit par le réseau d'eaux usées soit par le réseau d'eau potable. Dans le premier cas, l'affluent est pompé en entrée des décanteurs primaires de la station. Ce circuit permet donc de réaliser les essais expérimentaux planifiés (Cf. Figure 1). Concernant le deuxième réseau, l'alimentation d'eau potable permet de réaliser des études hydrauliques et de laver le pilote.

Chaque semaine se déroulait d'une façon typique. En effet, le lundi matin, une réunion était organisée afin de présenter les différents résultats obtenus expérimentalement lors de la semaine précédente. Ensuite, si l'expérience de cette nouvelle semaine faisait intervenir un ajout de produit chimique, il était alors nécessaire de récupérer sur le pilote un échantillon d'entrée afin de réaliser des Jar-tests.

En effet, les Jar-tests permettent de déterminer le taux de dosages optimal de coagulant et de floculant à injecter dans l'eau polluée pour effectuer un traitement efficace qualitativement et économiquement. Pour ce faire, le but est de tester différents dosages sur un échantillon d'eaux usées récupéré le jour même du lancement du pilote, afin d'être le plus proche possible de la charge qui traversera le pilote lors de l'expérience. Suite aux Jar-tests, on mesure la turbidité de chaque surnageant. Le taux ayant obtenu la turbidité la plus faible est alors retenu. L'ajout de produit chimique se fait grâce à des pompes volumétriques et sont injectés dans la tuyauterie en amont du pilote. Le débit de produit chimique à injecter est fonction du débit qui alimente le décanteur et du taux déterminé par les Jar-tests.

Le lundi après-midi était réservé pour la préparation du matériel nécessaire pour les différentes manipulations, pour la réalisation des Jar-tests et la mise en fonctionnement du pilote, des pompes à produits chimiques et de la pompe de soutirage des boues. Le mardi était le jour des échantillonnages et de la réalisation des premières expériences. Les expériences restantes étaient alors faites le mercredi. Le jeudi et le vendredi étaient réservés pour la saisie et l'exploitation des résultats ainsi que pour la préparation du power-point de restitution des résultats et la rédaction du rapport de stage.

Le but des travaux qui sont présentés dans ce rapport est de déterminer les matières en suspension et matières volatiles en suspension, les vitesses de chute et la distribution des tailles de particules contenues dans différents échantillons, pour différentes conditions. En effet, au cours de la journée, l'utilisation d'eau est variable et on observe donc une distribution non constante du débit arrivant en station d'épuration et de la charge. En effet, la nuit le débit est très faible, de même que la charge tandis que le matin le débit et la charge sont importantes. De fait, le traitement peut différer entre les périodes creuses et pleines, afin d'optimiser qualitativement et économiquement le traitement. De fait, lors des différents essais expérimentaux, nous avons étudié l'influence du débit d'alimentation (2, 6 ou 8 m³/h), de l'heure des échantillonnages (6h ou 11h) et de l'ajout de produits chimiques (rien, amidon, alun et polymère ou tannin) (Cf. Figure 1).

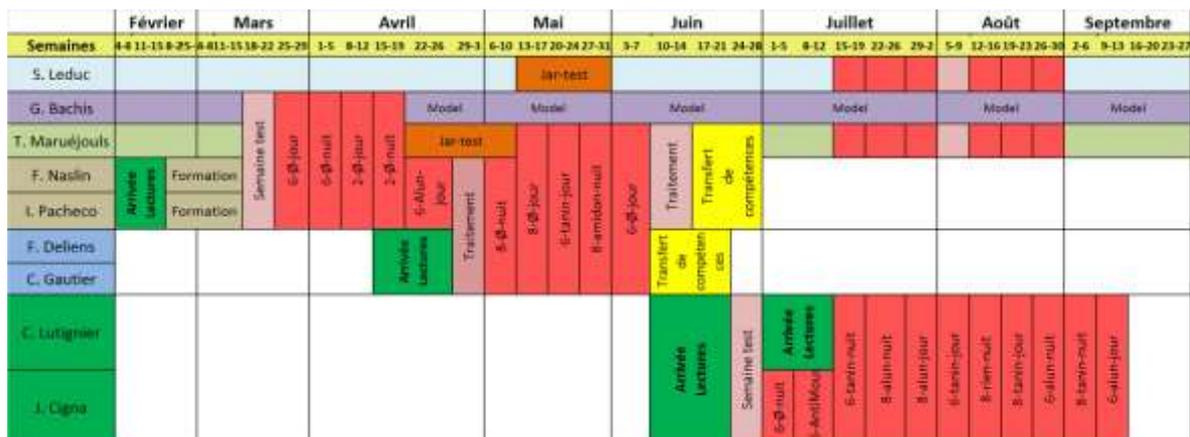


Figure 1 : Plan de campagne du projet primEAU

Concernant le traitement des eaux usées, la station d'épuration Est de Québec suit le fonctionnement suivant :

- **Le prétraitement :**

- **Les dégrilleurs :**

Les dégrilleurs permettent de retenir de gros éléments en faisant passer l'effluent à travers une grille ayant un espacement de 6 mm entre les barreaux. Les déchets sont récupérés à l'aide d'un peigne qui va racler les déchets sur la grille. Ceux-ci passent alors dans une trémie débouchant sur une vis sans fin qui permet de les compacter. Ils sont ensuite évacués dans une benne de stockage.

- **Les dessableurs-déshuileurs-dégraisseurs :**

Les dessableurs-déshuileurs-dégraisseurs permettent d'extraire des sables et des graisses présents dans l'eau par une différence de densité. Ainsi, grâce à un aérateur qui débite des micro-bulles permettant d'accélérer le phénomène, le sable se dépose au fond du bassin alors que les graisses flottent en surface reposant donc sur un processus de flottation. Les sables sont alors récupérés par pompage et les graisses sont raclées en surface. Les graisses ont tendance à entourer les matières colloïdales et donc inhiber l'action des produits chimiques et d'encrasser les décanteurs lamellaires au niveau des plaques et des goulottes de récupération des eaux décantées.

- **Le traitement physico-chimique :**

Afin que les particules les plus fines décantent, le traitement physico-chimique implique l'ajout de produits chimiques qui favorisent leur agglomération.

- **Le coagulateur :**

Il permet, par l'apport d'un coagulant afin de neutraliser les charges négatives des particules présentes dans l'eau et d'inhiber les forces de répulsion qu'elles exercent entre elles afin qu'elles puissent s'agglomérer.

- **Le flocculateur :**

Il permet, par l'ajout d'un polymère, de favoriser l'agglomération des particules déstabilisées lors de la coagulation afin de former des particules plus volumineuse et plus lourdes (les floccs) pour permettre leur décantation.

- **Le décanteur lamellaire :**

Il permet de faire décanter les particules formées lors de la coagulation et de la floculation dans un espace très restreint. En effet, l'eau chargée de particules remonte dans le décanteur et va être mise en contact avec les lamelles qui retiennent ces particules et les aident à décanter vers le fond du décanteur (les

lamelles permettent d'augmenter la surface de décantation). Les particules retenues ont une masse volumique supérieure à celle de l'eau et leur vitesse de chute est supérieure à la vitesse ascensionnelle de l'eau. Les boues décantées en fond de décanteur sont extraites à l'aide d'une pompe vers la filière de traitement des boues.

- **La bio-filtration :**

Elle permet, dans un volume restreint, de traiter des matières polluantes carbonées, en faisant passer l'eau sortant des bassins de décantation à travers un support sur lequel se trouve un dépôt de bactéries (création d'un bio-film sur le support) capables de dégrader cette pollution.

- **Désinfection par ultraviolet :**

La désinfection par ultraviolet est un processus permettant de détruire les microorganismes présents dans l'eau en sortie des bassins biologiques grâce à l'emploi de lampes UV.

2. Description des mécanismes ayant lieu lors des expériences réalisées pour le projet primEAU

La décantation primaire peut être précédée par un traitement physico-chimique. Le traitement physico-chimique est un procédé d'épuration de l'eau. Il caractérise l'ensemble des réactions chimiques permettant d'éliminer les Matières En Suspension (MES) et les matières colloïdales qui décantent difficilement. Cet abattement est associé à l'introduction de réactifs chimiques dans l'eau d'entrée de station, avant son passage dans un décanteur primaire, afin de provoquer sa déstabilisation physico-chimique. Il met en jeu deux mécanismes différents :

- **La coagulation**, associée à une agitation rapide du volume à traiter, permet de déstabiliser les particules en suspension en supprimant les répulsions inter-colloïdales. L'effluent à traiter contient des particules colloïdales naturellement chargées négativement. Elles tendent ainsi à se repousser entre elles : on parle de stabilisation des particules. Le but de la coagulation est donc de neutraliser les charges électriques répulsives des particules colloïdales, afin de favoriser la formation d'un agglomérat. Pour permettre l'adhésion des particules, il faut vaincre la barrière énergétique de répulsion soit en augmentant l'énergie cinétique des particules (en augmentant l'agitation de celles-ci) soit en abaissant la barrière de répulsion. Le coagulant, injecté dans l'eau d'entrée de station, permet de déstabiliser ces particules en suspension dans l'eau en inhibant les forces stabilisatrices des colloïdes et en neutralisant les charges négatives (le coagulant est chargé positivement). Cette réaction nécessite un mélange rapide de l'eau brute lors de l'ajout du coagulateur pour faciliter et optimiser ce contact.

La coagulation influe sur le pH de l'eau brute. En effet plus on ajoute de coagulant dans l'eau brute plus son pH diminue.

De plus, la dose de ce réactif est un paramètre important à prendre en compte pour optimiser le traitement de l'eau à traiter. Une dose de coagulant excessive entraîne une augmentation du coût d'exploitation, tandis qu'un dosage insuffisant conduit à une qualité médiocre de l'eau traitée. La quantité de réactifs ne se détermine pas facilement. La difficulté principale est de déterminer la quantité optimale de réactif à injecter en fonction des caractéristiques de l'eau brute. La détermination du taux de coagulant est effectuée à l'aide d'un essai expérimental appelé « Jar-test ». Cet essai consiste à mettre des doses croissantes de coagulant dans des récipients contenant la même eau brute. Après quelques instants, on procède sur l'eau décantée à une mesure de turbidité afin de déterminer la qualité de l'eau. La dose optimale est donc déterminée en fonction de la qualité de l'eau des différents échantillons.

La température joue aussi un rôle important. En effet, si l'eau à traiter a une température basse alors sa viscosité augmente et crée des difficultés dans le déroulement du processus : la coagulation et la décantation du floc sont ralenties et l'intervalle de pH optimal diminue. Pour éviter ces difficultés, une solution consiste à changer de coagulant en fonction des saisons.

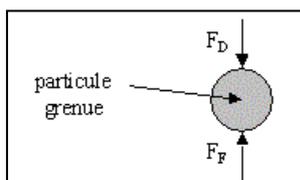
La turbidité est un paramètre à prendre en compte pour assurer le bon fonctionnement du procédé de coagulation. Plus la turbidité de la solution est importante, plus la concentration en particules est importante, il est alors nécessaire d'augmenter la dose de coagulant.

- **La floculation**, associée à une agitation lente du volume à traiter, a pour but de favoriser l'agglomération entre les particules déstabilisées. Ainsi, ces particules s'agglutinent pour former un floc assez lourd pour permettre la décantation des particules. La floculation se fait grâce à la mise en œuvre d'un processus d'adsorption, puis de réticulation conduisant à la formation d'un "floc" tridimensionnel de structure fibreuse à la suite d'une agitation lente du milieu réactionnel. Le floc formé peut alors soit décanter soit flotter selon le procédé de rétention choisi.

Ces deux mécanismes sont alors suivis de la décantation primaire. Le but premier d'un décanteur primaire est d'éliminer les matières en suspension se trouvant dans l'affluent à traiter, grâce à la formation préalable d'un floc séparable de l'eau épurée par un simple phénomène de décantation. L'efficacité de ce procédé est assez élevée puisque qu'il permet d'abattre, en général, entre 50 et 80% des matières en suspension de l'affluent.

Il a, de plus, la capacité d'épaissir les boues formées lors de la décantation afin que celles-ci, une fois extraites du décanteur, aient une teneur en eau la plus faible possible.

Le principe de la décantation repose sur le fait que les floes formés en suspension dans l'eau à la sortie du flocculateur sédimentent sous l'influence de leur poids, leur densité étant supérieure à celle de l'eau, et vont s'accumuler au fond du bassin pour former des boues. L'eau séparée de ces particules est alors récupérée en surface de décanteur. Il existe 2 types de décantation, la décantation des particules grenues et la décantation de particules floculantes. La décantation des particules grenues est caractérisée par le fait que celles-ci conservent leurs propriétés physiques initiales (forme, dimension et densité). La vitesse de chute de la particule est indépendante de la concentration en solides, et augmente jusqu'à ce que la force de décantation (poids) s'équilibre avec les forces de frottement : la vitesse de sédimentation est alors constante (Cf. Figure 2).



Avec : F_D : la force de décantation due à la force de pesanteur
 F_F : les forces de frottement dues au déplacement de l'eau

Figure 2: Forces s'exerçant sur une particule

Pour que la décantation des particules puisse se faire, il faut que la vitesse de l'eau remontant dans le décanteur soit inférieure à la vitesse de sédimentation des particules. Cette vitesse de l'eau est appelée charge hydraulique superficielle ou vitesse de Hazen V_H , facteur important dans le dimensionnement des décanteurs.

$$v_H = \frac{Q}{S}$$

Avec : Q : le débit d'entrée du décanteur en $m^3.h^{-1}$

S : la surface du décanteur en m^2

V_H : vitesse de Hazen ($m.h^{-1}$)

La vitesse de sédimentation des particules est souvent définie par l'équation de Stokes. Elle dépend de la taille des particules et fait comme hypothèse très importante que les particules sont sphériques. Elle dépend aussi de la forme et de la densité des particules présentes dans les eaux usées et de la densité et de la viscosité du fluide les entourant.

$$v_s = \frac{(\rho_s - \rho_f)g d^2}{18 \mu_f}$$

Avec : v_s : la vitesse de chute des particules en $m.s^{-1}$

ρ_s : la masse volumique des particules en $kg.m^{-3}$

ρ_f : la masse volumique du fluide en $kg.m^{-3}$

g : l'accélération de la pesanteur en $m.s^{-2}$

d : le diamètre des particules en m

μ_f : la viscosité dynamique du fluide en $Pa.s$

3. Matériels et Méthodes utilisés dans le cadre du projet primEAU

Afin d'améliorer le traitement au niveau des décanteurs du traitement physico-chimique primaire, le pilote de décanteur primaire, d'un volume de 4,85 m³, a été financé et installé par la société John Meunier inc. dans la station d'épuration Est de Québec (Cf. Figure 3).



Figure 3: Pilote de décanteur primaire du projet primEAU

Plusieurs sondes installées sur le pilote permettent de mesurer différentes données au cours du temps (température, pH et turbidité à l'intérieur du pilote, conductivité, débit et turbidité en entrée et en sortie du pilote). Une unité centrale récolte ensuite ces données, les enregistre et les envoie sur une boîte mail afin de créer un historique des données des différentes expériences réalisées. Elles peuvent aussi être visualisées en temps réel sur une interface positionnée sur le pilote. Le débit d'alimentation est régulé grâce à une électrovanne. Les boues sont soutirées en fond de décanteur grâce à une pompe de manière manuelle ou automatique. Pour finir, l'interface permet d'échantillonner l'entrée du pilote et les boues de manière automatique et la sortie du pilote de manière manuelle en jouant sur l'ouverture et la fermeture simultanée de la vanne de purge et la vanne d'échantillonnage. L'échantillonnage d'entrée et de sortie permet de récupérer 3 chaudières de 15L de chaque grâce à un montage composé de 3 tuyaux. Dans les 6 chaudières obtenues, on prélève alors dans chaque un échantillons de 1L après avoir au préalable bien homogénéisé le volume d'eau.

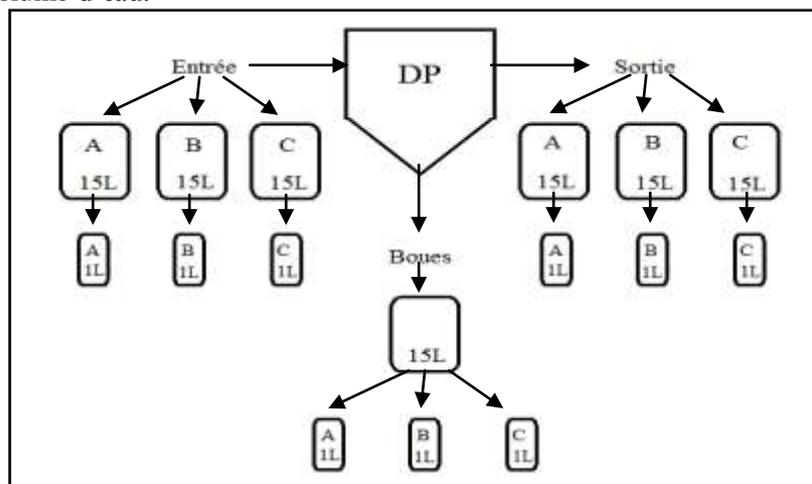


Figure 4: Montage permettant l'échantillonnage de l'entrée et de la sortie

L'échantillon de boues récupéré correspond à deux purges successives prélevées au fond du décanteur de manière automatique grâce à la pompe à boues. On récupère alors 16L que l'on stocke dans une seule chaudière. De même, après avoir au préalable bien homogénéisé les boues, on prélève 3 bouteilles de 1L de ce volume, notées A, B et C (Cf. Figure 4).

Le restant des chaudières A et C d'entrée et de sortie est rejeté dans les égouts tandis que l'on récupère les chaudières B d'entrée et de sortie, la chaudière contenant les boues et les 9 bouteilles échantillonnées. Les 3 chaudières doivent subir différentes analyses telles que la détermination des matières en suspension ou MES, des matières volatiles en suspension ou MVES, des vitesses de chute, des tailles des particules présentes dans l'eau, de la DCO, de la DBO₅, des lipides, de l'azote total... (Cf. Figure 5). On récupère 0,5L des 1L des 9 bouteilles de 1L afin qu'elles soient analysées par l'université de Montréal (présence de micropolluants) tandis que l'on effectue des analyses de MES, MVES, DCO et azote total sur le volume restant.

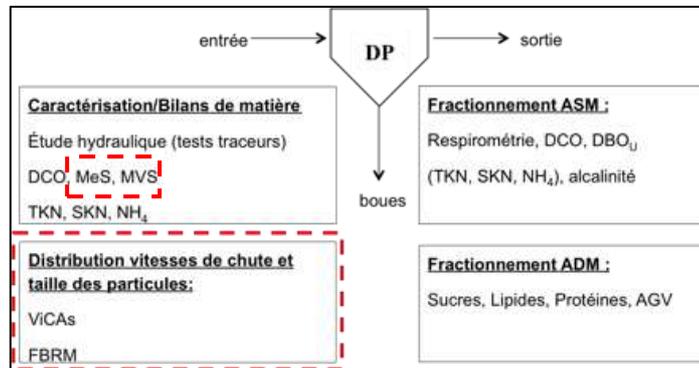


Figure 5 : Analyses réalisées sur les échantillons prélevés sur le pilote de décantation primaire

a. Détermination des MeS et MVeS

Les matières en suspension ou MeS sont des particules solides présentes dans les eaux usées (eaux domestiques, urbaines, industrielles, agricoles et dues aux ruissellements sur les sols). Les matières en suspension représentent la totalité des matières fines minérales, organiques ou colloïdales insolubles qui contribuent à la turbidité de l'eau.

Afin de déterminer l'abattement des MeS et le bilan de masse durant l'expérience et pour l'analyse ViCAs, il est nécessaire de déterminer les MeS des échantillons récupérés.

Pour ce faire, le but est de filtrer un volume d'échantillon V à l'aide de filtres 1,2 µm préalablement lavés, passés à l'étuve à 105°C durant 2 heures, au dessiccateur pendant 30 minutes et pesés à l'aide d'une balance de précision leur masse M₀. La filtration se fait grâce à une pompe à vide. Une fois l'échantillon filtré, le filtre est récupéré et doit rester à l'étuve à 105°C durant 2 heures, au dessiccateur pendant 30 minutes et être pesés à l'aide d'une balance de précision pour obtenir sa masse M₁. Les MeS se déterminent alors grâce à la formule suivante :

$$MeS = \frac{1000 \times (M1 - M0)}{V}$$

Avec : MeS : la concentration en matières en suspension en mg.L⁻¹

V : le volume d'échantillon filtré en mL

M₀ : la masse du filtre propre en mg

M₁ : la masse du filtre et de la masse de particules déposées lors de la filtration en mg

Les matières volatiles en suspension ou MVeS doivent aussi être déterminées. Pour ce faire, entre l'étape du passage à l'étuve et au dessiccateur, il faut passer les filtres au four à 550°C lors de leur lavage. Après, filtration d'un volume V d'échantillon, le filtre est récupéré et doit rester à l'étuve à 105°C durant 2 heures, au dessiccateur pendant 30 minutes et être pesés à l'aide d'une balance de précision pour obtenir sa masse M₁ et il doit être passé 15 minutes au four à 550°C suivi de 30 minutes de dessiccateur et enfin être pesé pour obtenir la masse M₂. Les MVeS se déterminent alors grâce à la formule suivante :

$$MVeS = \frac{1000 \times (M1 - M2)}{V}$$

Avec : **MVeS** : la concentration en matières volatiles en suspension en mg.L⁻¹

V : le volume d'échantillon filtré en mL

M1 : la masse du filtre et de la masse de particules déposées lors de la filtration en mg

M2 : la masse du filtre et de la masse de particules déposées lors de la filtration sans les particules volatiles en mg

Le traitement physico-chimique primaire sert en premier lieu à abattre les matières en suspension dans l'affluent. Dans le milieu industriel, l'abattement des particules totales doit en moyenne atteindre 50% et celui des particules décantables 80 à 90%. De fait, ici, l'objectif de cette étude est de déterminer l'évolution de l'abattement des particules totales en fonction du débit, de l'ajout de produit chimique et des périodes de traitement. Ainsi, chaque semaine d'expérience, les matières en suspension d'entrée et de sortie du pilote ont été mesurées afin de déterminer l'abattement particulaire. L'abattement se définit par la formule suivante :

$$Abatement(\%) = 100 * \frac{MeS_{entrée} - MeS_{sortie}}{MeS_{entrée}}$$

De plus, le bilan de masse est calculé afin de déterminer si la masse de particules entrant dans le pilote correspond à celles sortant au niveau des boues et de la sortie. En d'autres termes, cette information nous permet de savoir si l'échantillonnage peut être considéré comme acceptable. Le bilan de masse est acceptable s'il ne dépasse pas ±15%. Le bilan de masse se définit par la formule suivante :

$$Bilan\ de\ masse\ (\%) = 100 * \frac{Q_{entrée} \times MeS_{entrée} - Q_{sortie} \times MeS_{sortie} - Q_{boues} \times MeS_{boues}}{Q_{entrée} \times MeS_{entrée}}$$

Le débit d'entrée est un paramètre fixé par le planning des différentes expériences à réaliser. Le débit de boues est aussi fixé et est égal à 2% du débit d'entrée. Le débit de sortie est alors calculé en faisant la soustraction entre le débit d'entrée et le débit des boues ou le débit de sortie correspond à 98% du débit d'entrée.

b. Détermination des vitesses de chute des particules : protocole ViCAs

Dans le domaine du traitement des eaux usées, l'objectif est d'éliminer les différentes pollutions présentes dans l'affluent et parmi celles-ci les particules en suspension dans cet affluent. Le processus le plus courant pour les éliminer est la décantation. Ainsi, l'optimisation de ce procédé de traitement nécessite de déterminer le comportement de ces particules lors de leur décantation, et plus précisément il est nécessaire de caractériser leur vitesse de chute. Dans la théorie, les vitesses de chute des particules suivent les modèles de Stokes ou Newton. Cependant, ils ne s'appliquent pas forcément au comportement réel de ces particules dans les décanteurs primaires du fait des hypothèses simplificatrices posées (particules sphériques et densité des particules constante). Or, dans le cas de la décantation des eaux usées, les particules ne sont pas sphériques, n'ont pas la même densité et ne sont pas toutes de forme identique. Ainsi, leur morphologie est variable ainsi que leur volume et densité. De fait, ces deux modèles ne peuvent pas être applicables dans cette étude de caractérisation des vitesses de particules présentes dans les eaux usées.

Ainsi, en 2009, Chebbo et Gromaire ont développé la méthode ViCAs (Vitesse de Chute en Assainissement) permettant de déterminer les vitesses de chute des particules d'un échantillon d'eaux usées sanitaires, pluviales et industrielles.

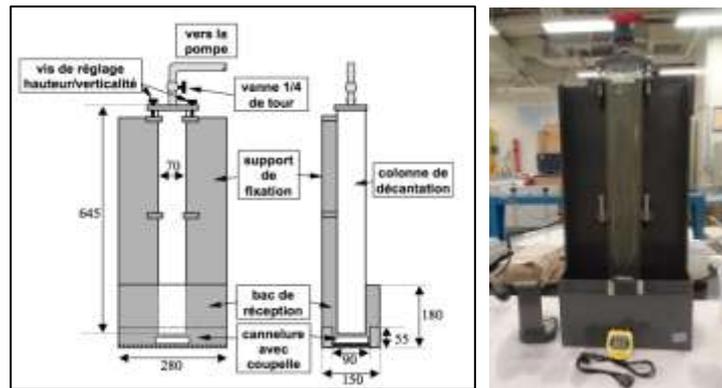


Figure 6 : Schéma de la colonne permettant de réaliser la méthode ViCAs

L'échantillon est aspiré dans une colonne verticale en PVC (Cf. Figure 6) grâce à une pompe à vide et retenu statiquement dans la colonne.

On fait l'hypothèse que l'échantillon présent dans la colonne est homogène en début d'expérience c'est-à-dire que les particules décantent indépendamment les unes des autres, elles ne s'agglomèrent pas et ne diffusent pas. La méthode ViCAs repose alors sur la variation dans le temps de la masse de particules décantées en fond de colonne au cours du temps ou la variation de la masse de particules présente dans la colonne au cours du temps. Pour ce faire, le but est de prélever la masse de particules décantées dans une coupelle en fond de colonne à intervalle de temps régulier. La feuille de calcul développée par le CEREVE et M.C. Gromaire permet alors de représenter la masse cumulée de particules décantées en fonction du temps (Cf. Figure 7), à partir des masses de particules prélevées dans les coupelles au fil du temps. La feuille met en jeu une macro Solveur afin d'ajuster, par la méthode des moindres carrés, la courbe représentant la masse de particules cumulées décantées au cours du temps avec les points obtenus expérimentalement.

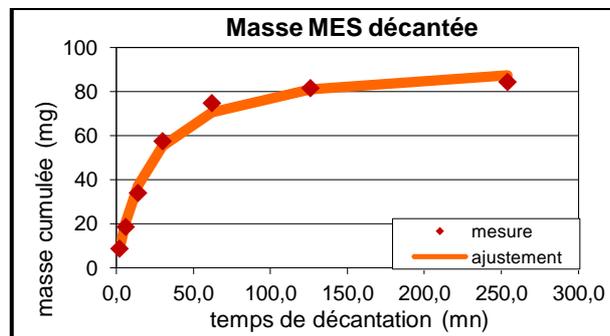


Figure 7 : Masse de particules cumulées décantées en fonction du temps

La feuille de calcul permet, ensuite, de déterminer la fraction de masse de particules en fonction des vitesses de chute :

$$F(Vc) = 100 \times \left(1 - \frac{S(t)}{M_{dec} + M_{fin}} \right)$$

Avec : **F(Vc)** : la fraction de masse cumulée des particules en fonction de leur vitesse de chute en %

S(t) : un modèle mathématique représentant l'évolution de la masse cumulée décantée en fonction du temps en mg

M_{dec} : le cumul de la masse de solide décantée pendant l'expérience en mg

M_{fin} : la masse de particules restantes en suspension dans la colonne à la fin de l'expérience en mg

De fait, on peut ainsi représenter les courbes donnant l'évolution de la fraction de masse des particules cumulée en fonction de leur vitesse de chute (Cf. Figure 8). La vitesse de chute des particules en $m \cdot h^{-1}$ est en échelle logarithmique tandis que la fraction $F(V_c)$ est exprimée en pourcentage de fraction massique de particules ayant une vitesse de chute inférieure à V_c .

Sur la Figure 8, on peut ainsi dire que 72% des particules de l'échantillon ont une vitesse de chute inférieure à $1,6 m \cdot h^{-1}$.

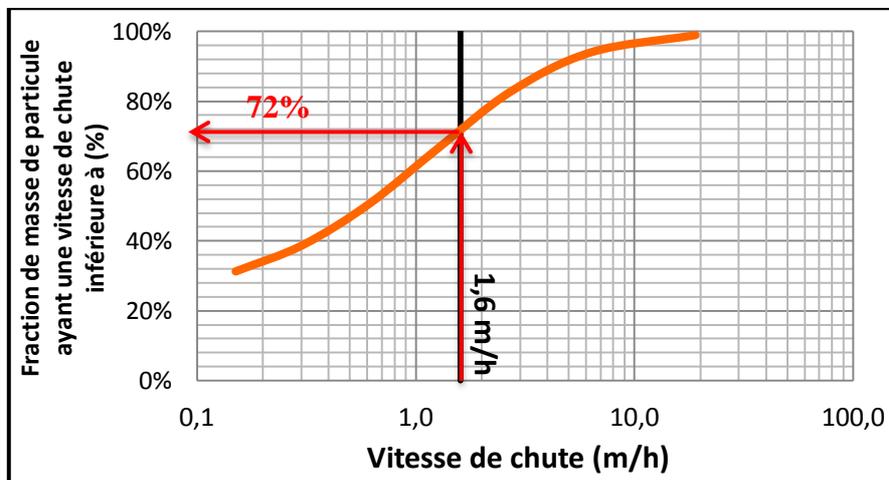


Figure 8 : Courbe donnant $F(V_c)$ en fonction de la vitesse de chute des particules

Quelques paramètres doivent être vérifiés afin de valider l'expérience. Les données ne peuvent être exploitables uniquement si l'erreur sur le bilan de masse est comprise entre $\pm 15\%$. De même, il est nécessaire de s'assurer que la masse décantée doit au minimum correspondre à 70% de la masse initiale de particules présentes dans la colonne. De fait, si ces conditions ne sont pas respectées, il est préférable de ré-effectuer l'expérience.

Le bilan de masse se définit de manière suivante :

$$\text{Bilan de masse (\%)} = 100 \times \frac{M_{\text{initiale}} - (M_{\text{décantée}} + M_{\text{finale}})}{M_{\text{initiale}}}$$

Avec : M_{initiale} : la masse initiale de particules dans la colonne ViCAs en début d'expérience en mg
 $M_{\text{décantée}}$: la somme des masses de particules décantées récupérées dans les coupelles en mg
 M_{finale} : la masse finale de particules dans la colonne ViCAs en fin d'expérience en mg

c. Détermination de la distribution des tailles des particules : protocole FBRM

Le traitement des eaux usées a pour objectif d'éliminer les polluants des eaux usées. Ainsi, l'optimisation des décanteurs primaires nécessite d'étudier les particules présentes dans l'affluent lors de leur décantation. Précédemment, nous nous sommes concentrés sur la détermination de la distribution des vitesses de chute. Or, comme définit précédemment, les modèles théoriques de Stokes ou Newton considèrent que les particules sont sphériques et de formes identiques. Ces hypothèses ne sont pas applicables à la distribution réelle des tailles de particules présentes dans les eaux usées mais la distribution des tailles nous informe qualitativement sur la distribution des vitesses de chute étant donc complémentaire aux ViCAs.

Afin de mesurer cette distribution, le protocole choisi est le protocole FBRM ou Focused Beam Reflectance Measurement. C'est une technique de granulométrie laser permettant de déterminer les tailles de particules comprises entre $0,05 \mu m$ et $1000 \mu m$, grâce à un phénomène de réflexion de la lumière émise par un laser. Cette technique récente est utilisable pour tous les liquides générant une réflexion

spectrale, de fait, on l'a retrouve souvent dans les industries pétrochimiques et pharmaceutiques. Dans le cadre du projet primEAU, l'appareil de laboratoire permettant de déterminer cette distribution est le Lasentec D600R (Cf. Figure 9).

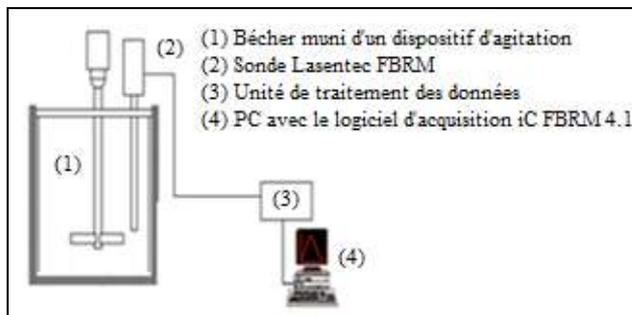


Figure 9 : Schéma de l'installation Lasentec

Comme dit précédemment, cette technique repose sur la réflexion de la lumière. En effet, l'onde lumineuse émise par la sonde Lasentec FBRM (Cf. Figure 10), et plus précisément par une lentille tournant à vitesse constante, est réfléchiée dès lors qu'elle rencontre un obstacle opaque ou partiellement opaque, dans notre cas les particules présentes dans l'eau. En se réfléchissant, la lumière est alors captée par la cellule photosensible, transformée en signal, envoyée à l'unité centrale de Lasentec D600R afin d'y être traitée. On obtient alors en temps réel une distribution de taille des particules observable grâce au logiciel iC FBRM 4.1. La sonde de mesure est composée d'une source émettant le laser ou source lumineuse et la cellule récupérant la lumière réfléchiée, celles-ci installées et protégées à l'intérieur d'un tube en inox (Cf. Figure 10).

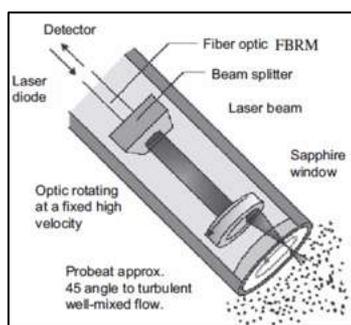


Figure 10 : Schéma de la sonde FBRM

Afin d'obtenir des données intéressantes et exploitables, l'objectif du FBRM (Focused Beam Reflectance Measurement) est de mesurer le temps que met la lumière émise pour être réfléchiée en traversant une particule d'un bout à l'autre. Le temps obtenu est alors multiplié par la vitesse de balayage de l'installation. On obtient alors une distance et plus précisément une longueur de corde (Cf. Figure 11).

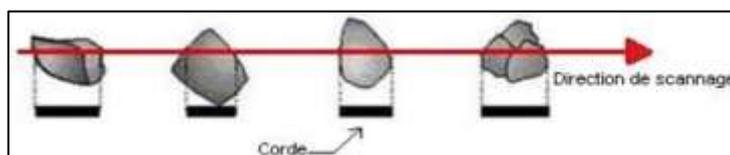


Figure 11 : Schéma des longueurs de corde mesurées par l'installation FBRM

La longueur de corde est la longueur entre deux extrémités de la particule traversée par l'onde lumineuse. Ainsi, comme le montre la Figure 11, pour une même particule, la longueur de corde est variable selon la position de la particule quand le laser la traverse, pour des particules réelles. Cette méthode permet alors de mesurer environ une dizaine de milliers de cordes en une seconde et de fournir la distribution des tailles de corde en temps réel. On peut alors obtenir l'évolution du nombre de détection par seconde (#/s) en fonction de la longueur de cordes (Cf. Figure 12).

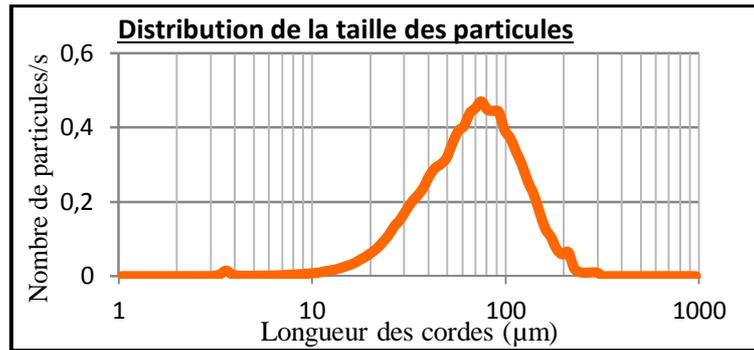


Figure 12 : Courbe représentant l'évolution du nombre de détection par seconde en fonction de la longueur de cordes

Une représentation en fraction de masses cumulées en fonction des longueurs de corde est aussi intéressante dans l'exploitation des résultats (Cf. Figure 13). Sur la Figure 13, on peut ainsi dire que 78% des particules de l'échantillon ont une longueur de corde inférieure à 100 µm.

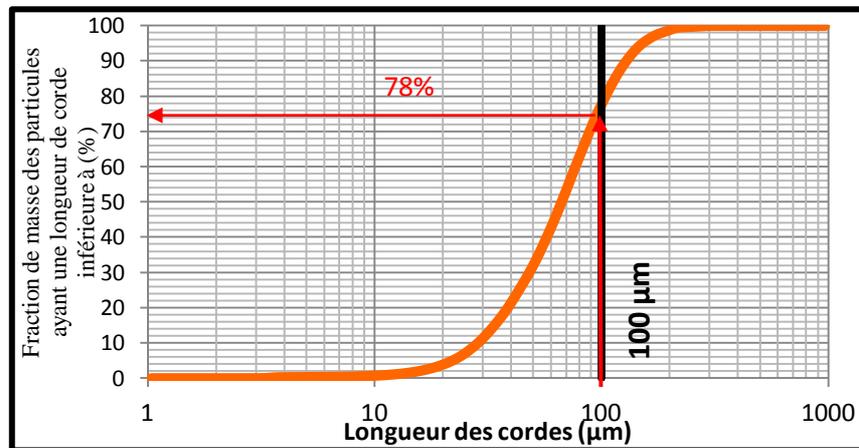


Figure 13 : Courbe représentant l'évolution des fractions de masses cumulées en fonction des longueurs de corde

Concernant nos expériences, le but est donc de mesurer la distribution de taille des particules présentes dans les échantillons d'entrée, de sortie et de boues récoltés au niveau du pilote. Le volume d'échantillon doit être compris entre 200 et 300 mL afin de garantir un bon mélange du volume dans le bécher et éviter les zones mortes. L'échantillon contenu dans le bécher est agité par un agitateur à hélices et la sonde FBRM est plongée dans ce volume (Cf. Figure 14).



Figure 14 : Sonde, agitateur et bécher contenant l'échantillon

d. Couplage vitesses de chute et tailles des particules

Comme le définit l'équation de Stokes, la vitesse de chute des particules sphériques est directement corrélée au diamètre des particules ou plus généralement à leur taille. De fait, l'objectif, ici, est de coupler les vitesses de chute des particules obtenues expérimentalement par la méthode ViCAs et les longueurs de corde des particules obtenues expérimentalement par la méthode FBRM.

Pour ce faire, les données obtenues par l'expérience ViCAs doivent être présentées sous la forme d'une courbe donnant l'évolution de la fraction de masse cumulée des particules $F(V)$ en fonction de leur vitesse de chute (Cf. Figure 8). De même, les données obtenues par l'expérience FBRM doivent être présentées sous la forme d'une courbe donnant l'évolution des fractions de masses cumulées $F(\text{cordes})$ en fonction des longueurs de corde (Cf. Figure 13). La Figure 15 montre des deux évolutions.

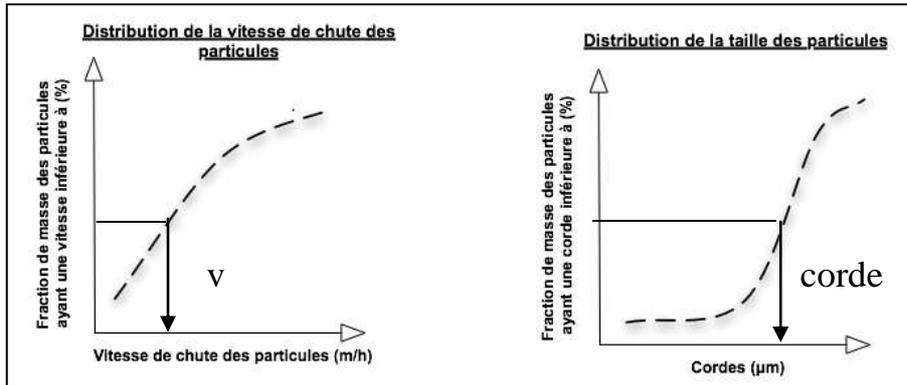


Figure 15 : Courbes donnant les distributions de vitesses de chute et de tailles des particules

De fait, on peut dire que chaque point sur la courbe $F(V)$ correspond au même pourcentage de la courbe $F(\text{cordes})$. Ainsi, on peut obtenir une relation entre la vitesse de chute des particules et leur taille (Cf. Figure 16).

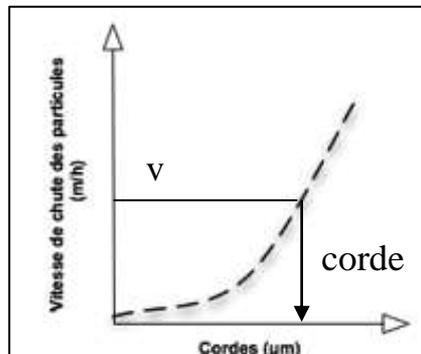


Figure 16 : Relation vitesse de chute des particules et taille des particules

Chaque point expérimental donnant l'évolution ci-dessus est caractérisé par une vitesse de chute et une longueur de corde. S'il l'on fait l'hypothèse que les particules présentes dans l'eau usée sont sphériques, alors la longueur de corde correspondrait à un diamètre de particule. La relation de Stokes donnant l'évolution de la vitesse de chute des particules en fonction du diamètre des particules est applicable pour les particules sphériques.

$$v = \frac{(\rho_p - \rho_f)g d^2}{18 \mu_f}$$

Avec : ρ_p : la masse volumique des particules en kg/m^3 ($\rho_p=1010 \text{ kg/m}^3$ ou $\rho_p=1115 \text{ kg/m}^3$)
 ρ_f : la masse volumique de l'eau en kg/m^3
 g : l'accélération de la pesanteur en m/s^2
 d : le diamètre des particules en m
 μ_f : la viscosité dynamique de l'eau en Pa.s

La masse volumique de l'eau et la viscosité dynamique de l'eau sont déterminées grâce à la relation donnant les évolutions de ces deux grandeurs en fonction de la température de l'eau T (°C) fournies pour le logiciel ProPhy Plus.

$$\rho_f = (0,00001517 * T^3 - 0,005821 * T^2) + (0,01475 * T) + 1000$$

$$\mu_f = (-0,00000000249 * T^3) + (0,0000005597 * T^2) - (0,0000459 * T) + 0,001736$$

Pour les calculs, nous avons considéré que la température de l'eau T était de 20°C en été.

De fait, connaissant la vitesse de chute et le diamètre des particules, on peut déterminer la masse volumique des particules pour chaque point de l'évolution. Sur la Figure 17 suivante, on peut voir les valeurs de densité obtenues pour chaque point en entrée et en sortie de décanteur pour une des expériences réalisées.

Entrée			Sortie		
v (m/h)	d _{cordes} (µm)	ρ (kg/m ³)	v (m/h)	d _{cordes} (µm)	ρ (kg/m ³)
17,4	325	1084	19,1	293	1114
5,7	227	1056	6,3	207	1074
2,3	158	1047	2,7	157	1054
1,0	122	1034	1,2	122	1040
0,5	98	1025	0,6	97	1030
0,3	82	1020	0,3	80	1020
0,1	72	1012	0,2	69	1015

Figure 17 : Valeurs de densité de particules

Théoriquement, la valeur de densité des particules dans l'eau devrait être constante selon l'équation de Stokes. Or, on observe que plus la vitesse de chute et le diamètre des particules diminuent plus la densité diminue que ce soit en entrée ou en sortie du décanteur. Ainsi, dans le cas de l'eau usée trois grandeurs sont des variables : la vitesse de chute, la longueur de corde et la densité particulaire.

Pour finir, on souhaite comparer les évolutions obtenues lors des différentes expériences par des données présentes dans la bibliographie. En effet, il a été montré que les particules présentes dans les eaux usées ont une densité comprise entre 1,010 et 1,115. De fait, afin d'obtenir l'évolution de la vitesse de chute des particules en fonction de la taille des particules, on utilise l'équation de Stokes pour ces deux valeurs de densités. Pour ce faire, pour différentes valeurs de diamètre comprise entre 0 et 500 microns, on calcul la vitesse de chute correspondante grâce à l'équation de Stokes. L'équation de Stokes est applicable pour des particules sphériques. On fait donc l'hypothèse que les particules présentes dans les eaux usées sont sphériques.

$$v = \frac{(\rho_p - \rho_f)g d^2}{18 \mu_f}$$

4. Résultats obtenus pour les différentes expériences réalisées dans le cadre du projet primEAU

a. Abattement des matières en suspension

Les expériences ont été réalisées afin de faire varier 3 paramètres différents, le débit d'entrée du pilote (2, 6 ou 8 m³/h), l'ajout de produit chimique (sans produit chimique, tannin ou alun combiné à du polymère) et la période de traitement (jour ou période pleine et nuit ou période creuse). Les Figures 18 et 19 résument les valeurs de MeS d'entrée et de sortie du pilote ainsi que les abattements obtenus pour chaque expérience réalisée.

MeS (mg/L)				
Période	Débit (m3/h)	Produit chimique	Entrée	Sortie
Jour	6	Rien	178	80
		Tannin	216	53
		Alun	251	120
	8	Rien	208	76
		Tannin	238	68
		Alun	242	78
Nuit	6	Rien	176	84
		Tannin	176	53
		Alun	237	39
	8	Rien	159	133
		Tannin	158	70
		Alun	178	87

Figure 18 : Valeurs de MeS obtenues pour les différentes expériences

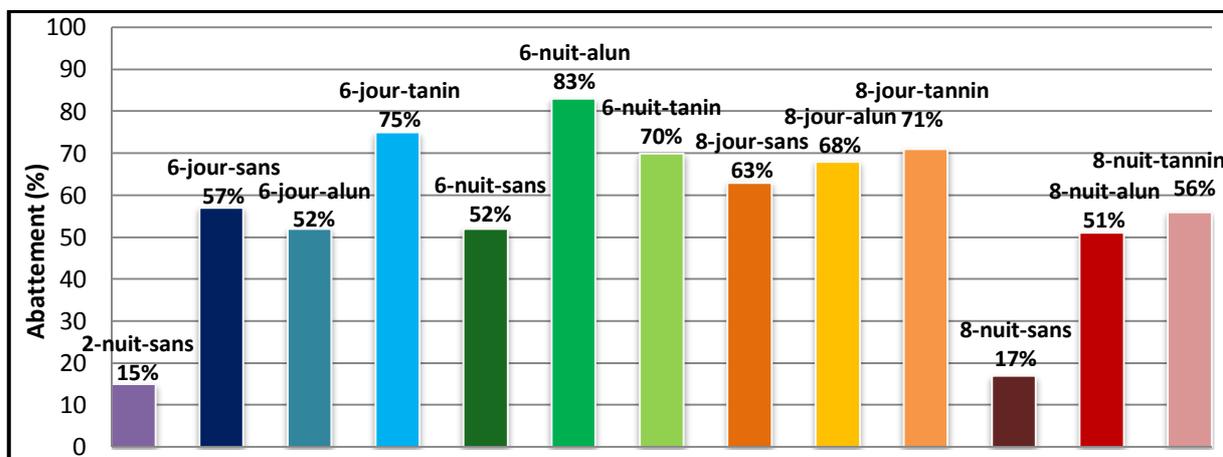


Figure 19 : Diagramme représentant l'abattement des matières en suspension pour les différentes expériences réalisées pour le projet primEAU.

Influence du débit

Concernant les matières en suspensions, on constate que les valeurs obtenues en entrée du pilote ne sont pas constantes d'une semaine à l'autre. En effet, elles dépendent de la pollution présente dans les eaux usées au moment de l'échantillonnage. Or, celle-ci évolue en fonction de l'activité domestique (douches, bains, préparation des repas, lavages...). Notons, de plus, que les études sur le débit de 2 m³/h ont été abandonnées car un des souhaits de la campagne était de travailler à des charges hydrauliques importantes.

Pour les échantillonnages de jour, on constate que les abattements sont supérieurs pour un débit de 8 m³/h, pour des conditions identiques en produit chimique. Par contre, pour les échantillonnages de nuit, on constate que les abattements sont supérieurs pour un débit de 6 m³/h, pour des conditions identiques en produit chimique. Ceci est contre-intuitif car le temps de séjour dans le décanteur est plus court avec un débit élevé. Mais le débit fait aussi varier la composition des particules transportées par l'eau usée.

Influence de la période de traitement

On constate que l'abattement est plus important en période pleine qu'en période creuse pour débit et ajout de produit chimique identiques. Cette conclusion n'est applicable pour les conditions 6-alun. En effet, on constate que l'abattement est plus important la nuit que le jour. Ce résultat s'explique par le fait que les concentrations en alun et polymère injectées étaient différentes et plus importantes la nuit. D'après la Figure 18, on constate que la charge de l'affluent la nuit est plus faible que le jour. C'est-à-dire que les MES en entrée du pilote sont plus importantes lors d'un échantillonnage à 11h qu'à 6h. Hormis les

deux expériences 6-alun, il semblerait qu'en période creuse, le nombre de particules volumineuses et denses, en d'autres termes le nombre de particules décantables, est plus faible en période pleine. L'écart entre les MES en entrée et celle en sortie est donc plus faible en période creuse qu'en période pleine.

Influence de l'ajout de produit chimique

Pour les différentes expériences réalisées, on peut dire que l'ajout de produit chimique dans l'affluent permet d'améliorer l'abattement en MeS. L'ajout de produit chimique se fait directement dans la canalisation à l'entrée du pilote. Ainsi, le temps de contact et l'homogénéisation ne sont pas optimaux. Or, pour mettre en œuvre un processus de coagulation et floculation optimal des particules, il est nécessaire d'installer deux réacteurs/mélangeurs en série, le premier consacré à la coagulation et le deuxième à la floculation. Les conclusions suivantes devront donc prendre en compte le fait que les conditions n'étaient peut-être pas optimales. Concernant le tannin, on observe que, pour 3 expériences sur 4, l'abattement en MeS est supérieur à 70%, pour une concentration injectée identique pour les 4 expériences. Dans le cas de l'alun couplé au polymère, l'abattement est en majorité plus faible qu'avec l'ajout de tannin sauf dans le cas de l'expérience 6-nuit-alun où la concentration d'alun a été surdosée. De fait, le tannin, produit écologique, paraît être intéressant au niveau de l'abattement des matières en suspension.

b. Vitesses de chute des particules

Comme évoqué précédemment, la distribution des vitesses de chute de particules est un paramètre essentiel dans l'étude des décanteurs primaires. La méthode ViCAs a été choisie pour déterminer ces vitesses de chute.

Dans le cadre des différentes expériences ViCAs réalisées, des zones de mesure ont été tracées pour l'entrée (en rouge sur la Figure 20) et la sortie (en bleu sur la Figure 20) de décanteurs classiques par temps sec. Les courbes ViCAs obtenues pendant le stage vont maintenant être interprétées par rapport à ces zones visibles sur la Figure 20.

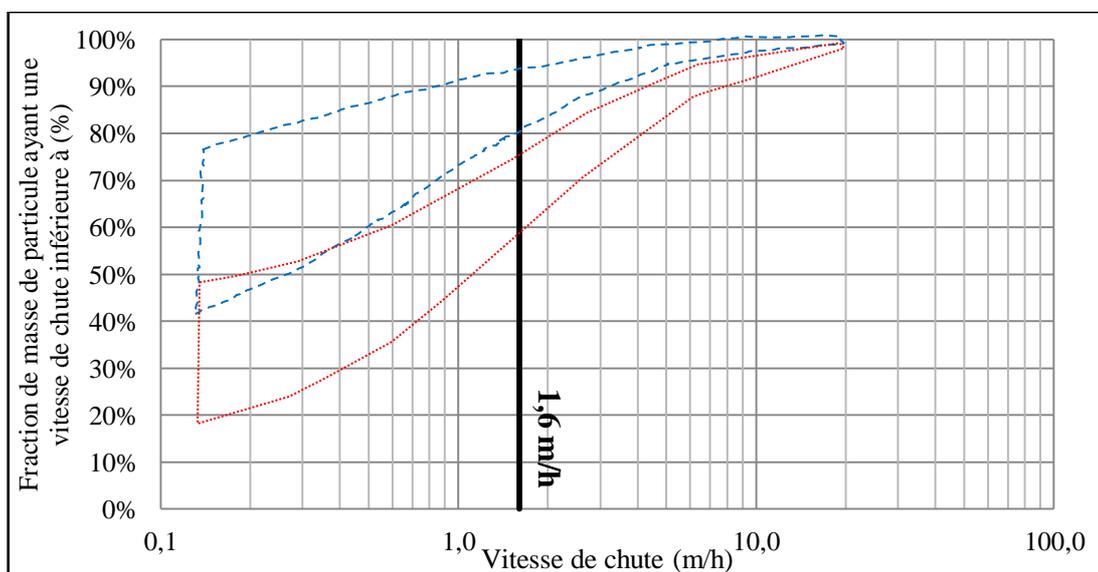


Figure 20 : Zones de mesure des ViCAs des entrées et des sorties par temps sec pour des décanteurs classiques

Influence du débit

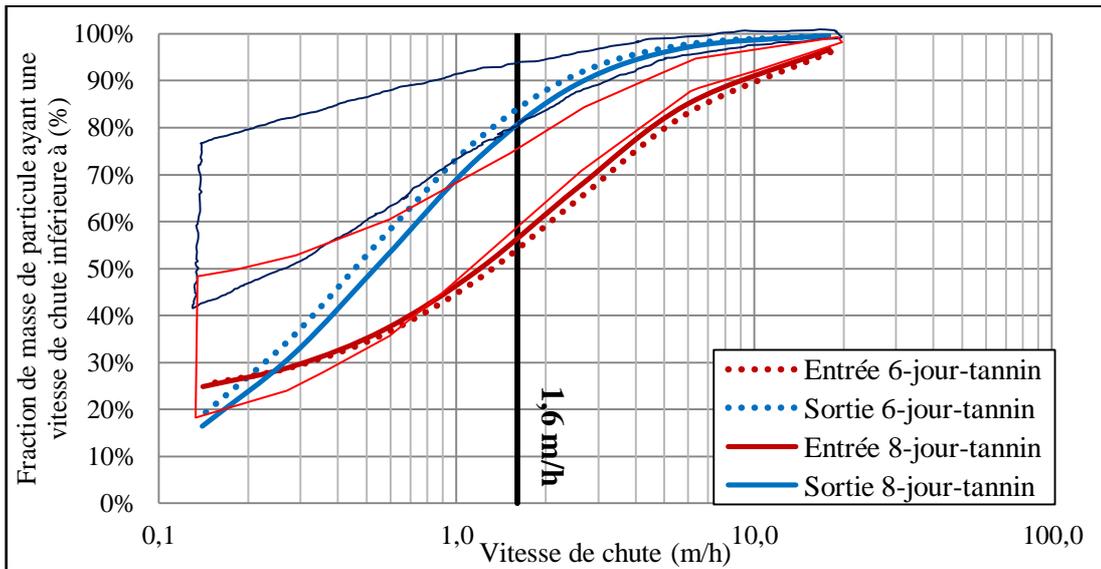


Figure 21 : Courbes ViCAs

La Figure 21 met en évidence les évolutions obtenues pour deux expériences de jour en présence de tannin mais à débit d'alimentation différent. Les évolutions des deux entrées étant identiques, ces deux expériences sont comparables. On constate que 80% en masse des particules ont une vitesse inférieure à 1,6 m/h pour un débit d'alimentation de 8 m³/h alors que, pour un débit de 6 m³/h, 84% des particules ont une vitesse inférieure à 1,6 m/h. Les particules ont des vitesses inférieures dans l'échantillon de sortie pour un débit de 6 m³/h que pour un débit de 8 m³/h. Donc, plus le débit est faible plus la fraction en masse de particules décantables ayant une vitesse de chute supérieure à 0,1 m/h est faible.

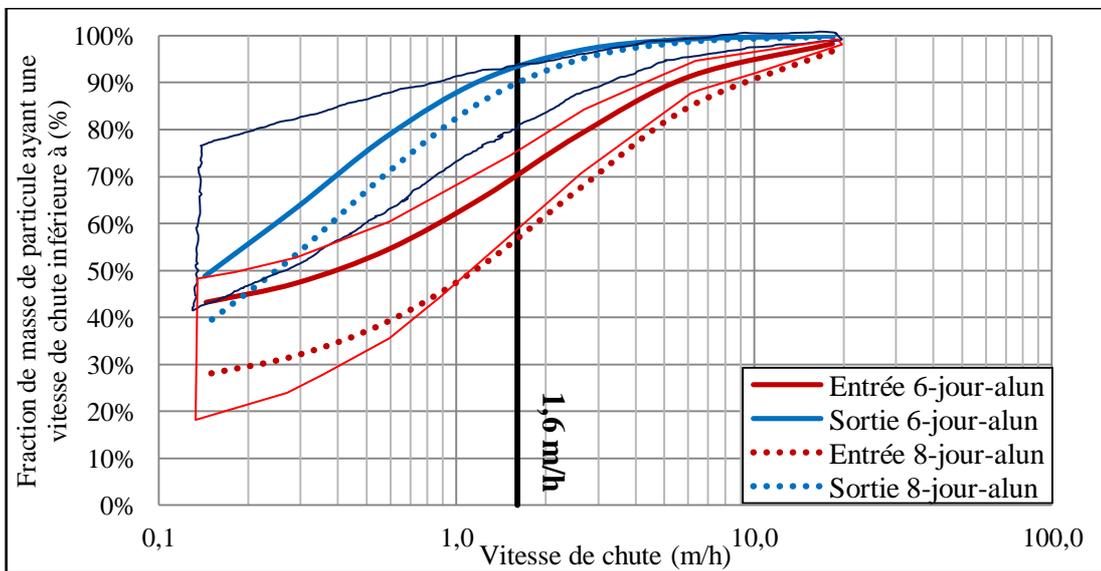


Figure 22 : Courbes ViCAs

Concernant les expériences réalisées avec ajout d'alun et polymère, on constate que les entrées des deux expériences différentes ne suivent pas la même évolution et que, donc, ces expériences ne sont pas comparables. Il est donc impossible de donner des conclusions quant à l'influence du débit en présence d'alun, hormis le fait que, quelque soit le débit, l'évolution de la vitesse de chute en fonction de la fraction massique est identique au niveau de la sortie pour des particules ayant une vitesse supérieure à 3 m/h. Ainsi, on retrouve la même masse de particules pour des débits de 6 et 8 m³/h pour des particules à forte vitesse de chute donc potentiellement volumineuses et denses.

Influence de la période de traitement

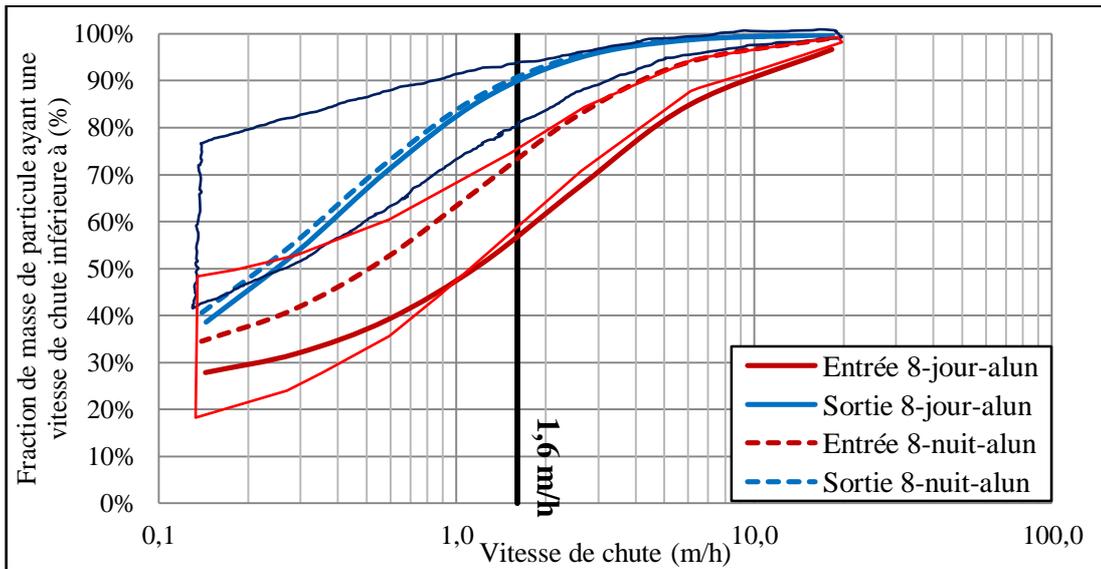


Figure 23 : Courbes ViCAs

Sur la Figure 23, on observe les résultats des expériences ViCAs en entrée et en sortie de pilote obtenus pour une expérience de 8 m³/h-échantillonnage de jour-avec ajout d'alun et polymère. On observe que les sorties ont la même évolution où 90% en masse de particules ont une vitesse de chute inférieure à 1,6 m/h. Par contre, on voit que les entrées ont une évolution différente. Pour un échantillonnage de jour, 56% en masse de particules ont une vitesse de chute inférieure à 1,6 m/h. Alors que, pour un échantillonnage de nuit, 73% en masse de particules ont une vitesse de chute inférieure à 1,6 m/h. De fait, la nuit, les particules ont une vitesse de chute plus faible que le jour. Ainsi, en comparant la différence entre l'entrée et la sortie, on observe que, le jour, le pilote a permis d'éliminer plus de particules à faibles et fortes vitesses de chute que la nuit.

Influence de l'ajout de produit chimique

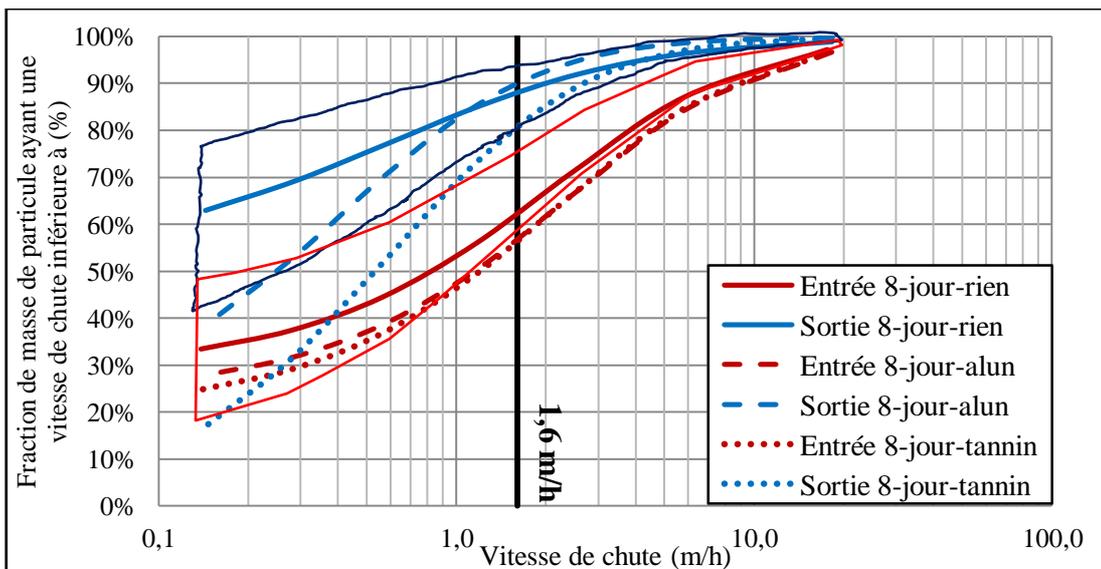


Figure 24 : Courbes ViCAs

Sur la Figure 24 sont représentées différentes évolutions obtenues en entrée et sortie du pilote pour des expériences à 8 m³/h et un échantillonnage de jour sans ajout de produit chimique, avec ajout d'alun et polymère et avec ajout de tannin. Dans un premier temps, on observe que les entrées suivent la

même évolution car l'ajout de produit chimique se fait après le point d'échantillonnage d'entrée de pilote. De fait, on obtient une évolution ViCAs pour de l'eau usée sans ajout de produit chimique. Au niveau des sorties, on observe, tout d'abord, que l'ajout de produit chimique entraîne une chute de la fraction de masse en particule pour des vitesses inférieures à 1,6 m/h. Cela signifie qu'il y a eu élimination des particules à faible vitesse de chute. En effet, l'ajout de produit chimique permet de former des floccs ou assemblage de particules plus volumineux et plus denses. De fait, les particules à faible vitesse de chute deviennent des particules à forte vitesse de chute et décantent. De plus, les évolutions d'entrée faisant intervenir l'alun et le polymère et le tannin sont identiques, il est donc possible de comparer ces trois expériences. On constate, de fait, sur les évolutions de sortie de pilote que l'ajout de tannin permet d'éliminer plus de colloïdes ou particules à faible vitesse de chute en masse que l'ajout d'alun et polymère. Ainsi, les particules en sortie avec ajout de tannin ont des vitesses de chute plus importantes que celles avec ajout d'alun et polymère. En effet, 80% en masse de particules ont une vitesse de chute inférieure à 1,6 m/h avec ajout de tannin contre 88% avec ajout d'alun et polymère. Pour finir, on constate que l'ajout de tannin fait qu'il y a moins de particules à faible vitesse de chute en sortie qu'en entrée de décanteur. Cette observation est de même visible pour l'expérience à un débit de 6 m³/h en échantillonnage de jour en présence de tannin visible sur la Figure 21.

c. Tailles des particules

Outre les vitesses de chute des particules, la distribution des tailles de particules est aussi un paramètre important dans l'étude des décanteurs primaires. La méthode FBRM a été choisie pour déterminer ces vitesses de chute.

Sur les Figures 25 et 26, on observe deux représentations qu'il est possible de tracer. La première représente l'évolution du nombre de particules en fonction de la longueur des cordes dans des échantillons d'entrée, de sortie et de boues du pilote et la deuxième représente l'évolution cumulative de la fraction de masse des particules en fonction de la longueur des cordes.

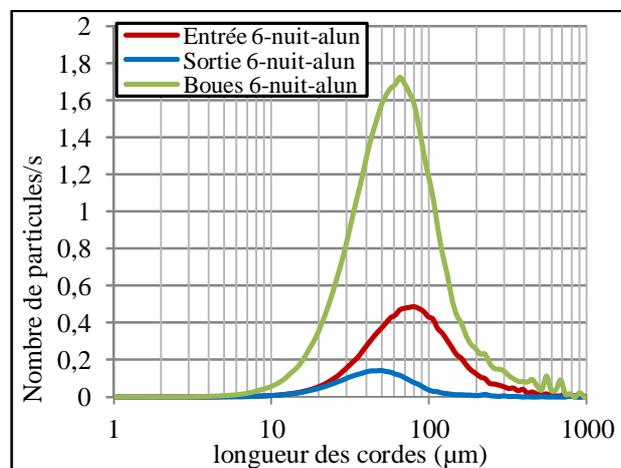


Figure 25 : Distribution des tailles des particules

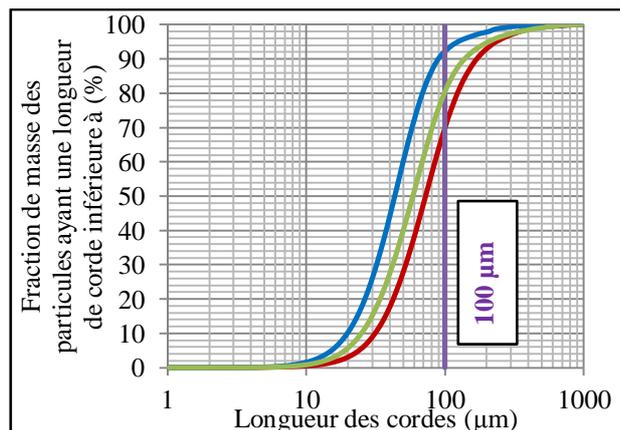


Figure 26 : Evolution de la fraction massique en fonction des longueurs de cordes des particules

Ces exemples d'évolution ont été obtenus pour une expérience réalisée à un débit d'alimentation de $6 \text{ m}^3/\text{h}$, pour un échantillonnage de nuit et avec ajout d'alun et polymère. La Figure 25 montre que les trois courbes ont une évolution gaussienne. De plus, on observe que pour l'entrée le pic se situe à 80 microns, pour la sortie à 50 microns et pour les boues à 65 microns. Ainsi, en moyenne, les particules en entrée ont une longueur de corde plus importante que les particules présentes dans les boues puis dans la sortie. Au niveau de la sortie, on constate aussi que les longueurs de corde sont comprises entre 7 et 120 microns alors que, au niveau de l'entrée et des boues, elles sont comprises entre 7 et 1000 microns. Ainsi, il y a élimination des particules ayant des longueurs de corde comprises entre 120 et 1000 microns en sortie de pilote. La Figure 26 montre que, en entrée, 68% en masse des particules ont une longueur de corde inférieure à 100 microns contre 78% dans les boues et 92% en sortie. De fait, cette figure montre aussi que les particules en entrée ont une longueur de corde plus importante que les particules présentes dans les boues puis dans la sortie.

En plus des deux évolutions précédentes, il est aussi intéressant de tracer la différence entre les évolutions d'entrée et de sortie du pilote visible sur la Figure 27 correspondant à l'abattement des particules dans le décanteur primaire. Cette évolution peut être comparée à celle des boues. En effet, en régime permanent et sans accumulation de matière, l'abattement des particules entre l'entrée et la sortie correspond aux particules présentes dans les boues.

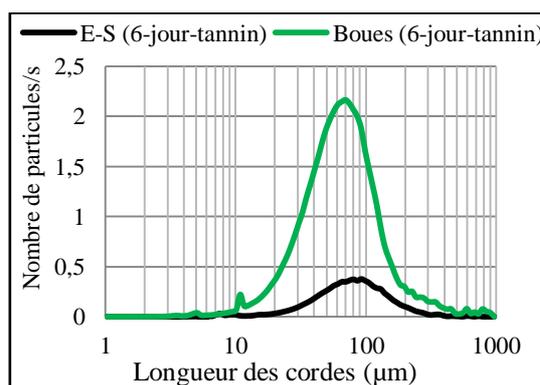


Figure 27 : Distribution des tailles des particules

Les deux courbes tracées sur la Figure 27 sont obtenues avec les résultats de l'expérience avec un débit de $6 \text{ m}^3/\text{h}$, un échantillonnage de jour et un ajout de tannin. On observe, sur la Figure 27, que le pic de la différence entre l'entrée et la sortie se situe à 100 microns alors que celui des boues se situe à 70 microns. Ainsi, en moyenne, les particules correspondant à l'abattement entre l'entrée et la sortie ont une longueur de cordes supérieure aux particules présentes dans les boues. Or l'ajout de tannin forme, à partir des particules à faible longueur de corde, des particules à longueur de corde plus importante. Ainsi, en théorie, le pic des boues devrait se situer à une longueur de corde plus importante que celui de la différence entre entrée et sortie. Ce fait est visible pour toutes les expériences réalisées durant ce stage

(Cf. Figures 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 de l'Annexe). Cela peut être dû à un cisaillement des particules, phénomène peu probable en l'absence de trémie dans le décanteur primaire, ou une homogénéisation non parfaite des boues lors des prélèvements dans la chaudière pour réaliser les expériences en laboratoire car les particules de taille et densité importante décantent très rapidement.

Influence du débit

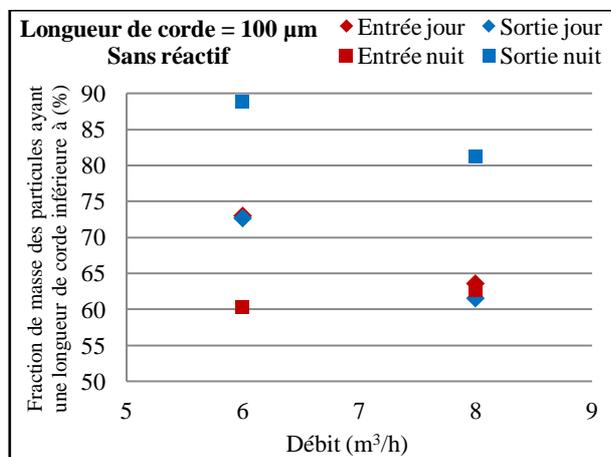


Figure 28 : Fraction massique pour une longueur de corde de 100 microns pour différentes expériences

Afin de déterminer l'influence du débit sur la taille des particules, pour différentes expériences, la valeur de fraction de masse des particules à été relevée pour une longueur de corde égale à 100 microns. Sur la Figure 28, pour des expériences sans ajout de produit chimique, on observe, pour un échantillonnage de nuit, que les entrées pour un débit de 6 m³/h et 8 m³/h ont une fraction environ similaire. De fait, ces deux expériences sont comparables. En sortie, la fraction en masse pour un débit de 6 m³/h est supérieure à celle pour un débit de 8 m³/h. Ainsi, les particules ont des longueurs de corde plus faibles à 6 m³/h qu'à 8 m³/h. De fait, lors de l'expérience à un débit de 6 m³/h, il y a eu une meilleure élimination des particules à grande longueur de corde qu'à débit de 8 m³/h. Pour un échantillonnage de jour, on constate que les deux entrées ont des fractions trop différentes pour pouvoir comparer les deux expériences. Néanmoins, dans ce cas, pour un débit de 6 m³/h et 8 m³/h, on constate que la fraction de sortie est moins élevée que celle d'entrée. Autrement dit, les particules en sortie ont une longueur de corde plus importante que celles d'entrée. Ce fait doit être dû à l'erreur lors de la mesure des longueurs de corde par le protocole FBRM et lors de l'échantillonnage et des prélèvements d'eau dans les chaudières pour les expériences.

Dans le cas de l'ajout de tannin et d'alun et polymère, on constate que les fractions des entrées sont totalement différentes. Donc les expériences ne sont pas comparables entre elles (Cf. Figures 8 et 9 de l'Annexe).

Afin de pouvoir, néanmoins, étudier l'influence du débit en présence de produit chimique, il est intéressant d'observer de nouveau les évolutions tracées précédemment, représentant l'évolution d'entrée moins l'évolution de sortie. Les Figures 1 et 3 de l'Annexe mettent en évidence les expériences avec ajout de tannin et un échantillonnage de jour. On constate que les deux évolutions gaussiennes sont presque identiques pour un débit de 6 m³/h et 8 m³/h. Ce phénomène est de même visible sur les Figures 2 et 4 de l'Annexe pour des expériences avec ajout de tannin et un échantillonnage de nuit et sur les Figures 5 et 6 de l'Annexe pour des expériences avec ajout d'alun et de polymère et un échantillonnage de jour et le débit (pour des débits proches) semble ne pas avoir d'influence sur les évolutions FBRM donc sur l'abattement des tailles de particules. De fait, énergétiquement, il est préférable de travailler à débit plus faible. Cependant, le débit à l'entrée des stations d'épuration n'est pas régulé. On est donc assujetti des fluctuations du débit.

Influence de la période de traitement

Afin d'étudier l'influence de la période de traitement, les évolutions représentant l'évolution d'entrée moins l'évolution de sortie sont ici choisies. Sur les Figures 1 et 2 de l'Annexe et sur les Figures 3 et 4 de l'Annexe sont représentées respectivement les résultats obtenus pour les expériences à débit 6 m³/h et ajout de tannin et à débit de 8 m³/h et ajout de tannin. On constate, en les comparant, que, pour un échantillonnage de jour, les évolutions sont plus tassées et étalées que pour l'échantillonnage de nuit. Ainsi, la distribution de taille est plus importante en jour mais pour un nombre de particules vues à la seconde en pondéré moins important. Sur les Figures 6 et 7 de l'Annexe, correspondant aux expériences à débit de 8 m³/h et avec ajout d'alun et de polymère, on constate que l'évolution est similaire. La période de traitement n'a donc pas d'influence sur les évolutions FBRM ou sur l'abattement des tailles de particules.

Influence de l'ajout de produit chimique

Sur la Figure 29 sont représentés les résultats obtenus pour l'expérience à un débit de 6 m³/h et un échantillonnage de jour. On constate que les fractions d'entrée sont similaires et donc les expériences sont comparables. Dans un premier temps, on voit que la fraction en sortie de pilote est identique à celle d'entrée en l'absence de produit chimique : les tailles des particules en entrée et en sortie sont donc identiques. Ensuite, l'ajout d'alun et de polymère permet d'obtenir une fraction plus importante en sortie que l'ajout de tannin. De fait, les particules en sortie ont une taille plus importante quand on injecte du tannin à l'eau à traiter. En effet, les différentes expériences réalisées ont permis d'observer que l'ajout de tannin permettait de former des particules de taille assez importante et homogène ressemblant sensiblement à des sphères tandis que l'ajout d'alun et de polymère permet de former des flocs plus poreux, de très petites tailles dans les échantillons de sortie. Cette observation est de plus mise en évidence sur la Figure 30.

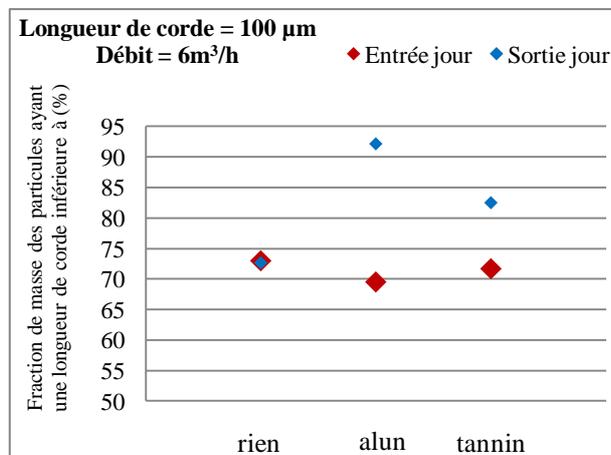


Figure 29 : Fraction massique pour une longueur de corde de 100 microns pour différentes expériences

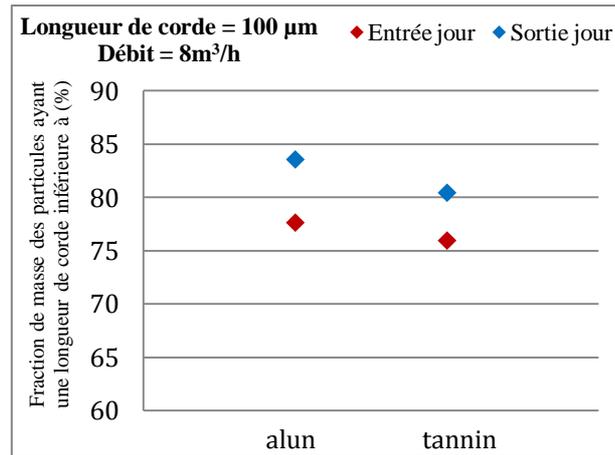


Figure 30 : Fraction massique pour une longueur de corde de 100 microns pour différentes expériences

Une expérience supplémentaire a aussi été réalisée afin de déterminer le comportement dynamique en termes de taille de particules lors de l'ajout de produit chimique (alun, alun et polymère ou tannin) dans un échantillon d'eau d'entrée. La dose de produit injecté est identique à la dose déterminée par Jar-test et injectée lors de l'expérience. On obtient les évolutions visibles sur les Figures 31 et 32.

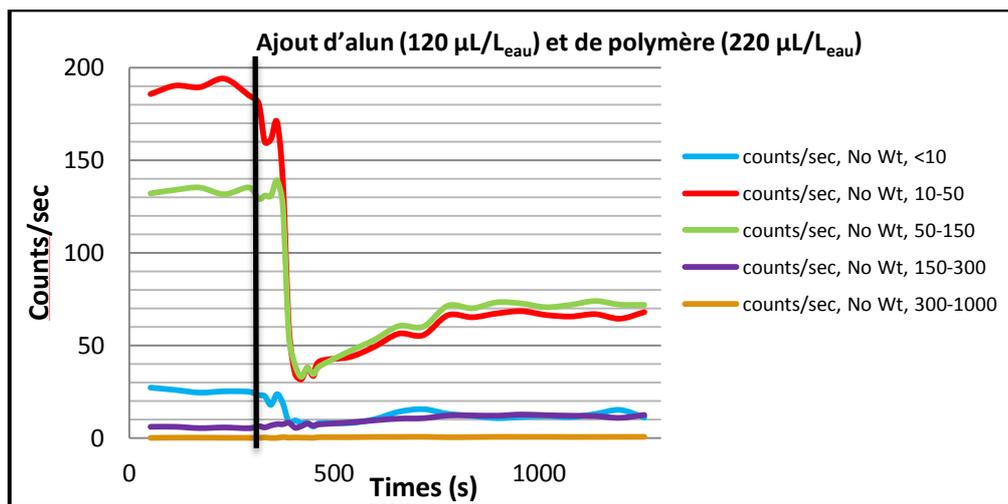


Figure 31 : Evolution du nombre de particules vu à la seconde en fonction du temps

Sur la Figure 31, on constate que l'ajout d'alun puis de polymère entraîne une diminution du nombre de particules ayant une longueur de corde inférieure à 150 microns et une augmentation du nombre de particules ayant une longueur de corde comprise entre 150 et 1000 microns. En effet, le phénomène de coagulation puis de floculation permet de former des floccs de taille plus importante à partir de petites particules.

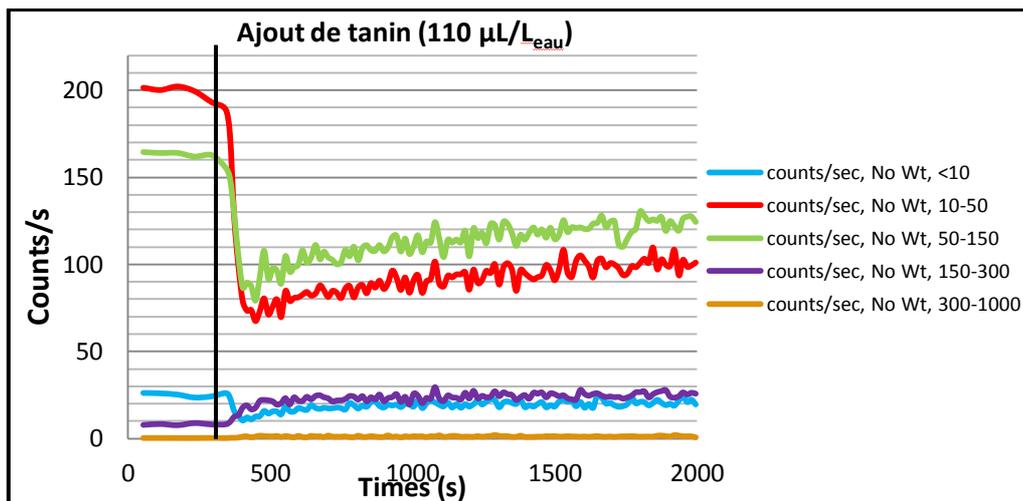


Figure 32 : Evolution du nombre de particules vu à la seconde en fonction du temps

De même que pour l'alun et le polymère, sur la Figure 32, on constate que l'ajout de tannin entraîne une diminution du nombre de particules ayant une longueur de corde inférieure à 150 microns et une augmentation du nombre de particules ayant une longueur de corde comprise entre 150 et 1000 microns.

Si l'on compare la Figure 31 et la Figure 32, on constate que la diminution du nombre de particules, pour des longueurs de corde inférieures à 150 microns, est légèrement plus importante avec ajout d'alun et polymère qu'avec ajout de tannin.

d. Couplage vitesses de chute et tailles des particules

Après avoir étudié les vitesses de chute des particules et la distribution des tailles de particules séparément, l'objectif est de réaliser un couplage de ces deux grandeurs afin de mettre en évidence une grandeur importante dans l'étude physique de la décantation, la densité des particules.

Influence du débit

Afin de comparer deux ou plusieurs expériences entre elles comme précédemment, il est nécessaire que les évolutions en entrée de pilote, obtenues pour ces différentes expériences, soient identiques. Sur la Figure 33, l'expérience réalisée de jour et avec l'ajout de tannin a été choisie pour déterminer l'influence du débit sur la densité des particules de l'échantillon. On constate que, pour un débit à 6 m³/h et 8 m³/h, les deux évolutions d'entrée sont similaires donc les deux expériences sont comparables. On constate que les évolutions des sorties sont, de même, identiques. De fait, dans ce cas, quelque soit le débit d'alimentation du pilote, la densité des particules en sortie est identique en sortie si celle en entrée est aussi identique. De fait, dans ce cas, il est plus intéressant de travailler à débit plus faible afin de limiter la consommation énergétique de la pompe d'alimentation. Cependant, comme nous l'avons dit précédemment, le débit à l'entrée des stations d'épuration n'est pas régulé. On est donc assujetti des fluctuations du débit.

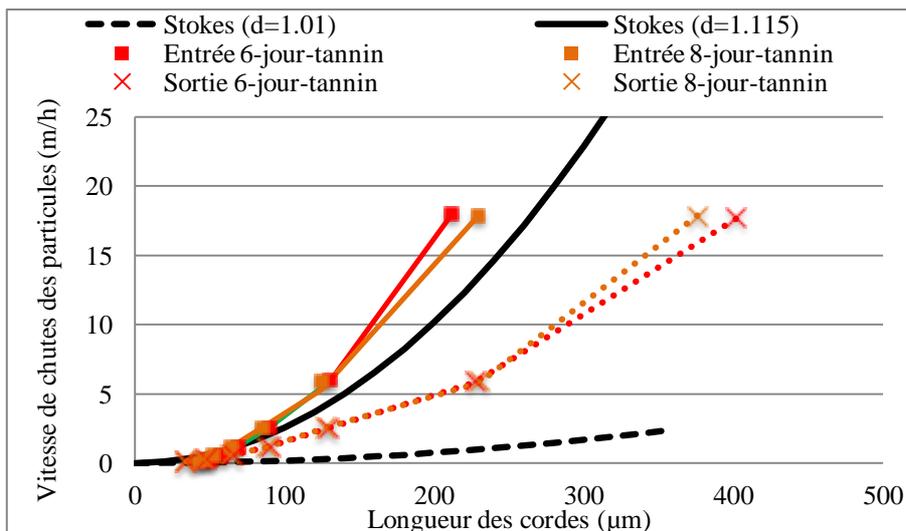


Figure 33 : Couplage des expériences FBRM et ViCAs

Influence de la période de traitement

Afin d'étudier l'influence de la période de traitement, les expériences choisies ont été réalisées à un débit de 8 m³/h et avec l'ajout d'alun pour un échantillonnage de jour et de nuit. Sur la Figure 34, on constate que les évolutions des entrées sont différentes, en effet, la densité des particules est plus faible la nuit que le jour. Néanmoins, on constate que la différence de densité entre l'entrée et la sortie est beaucoup plus importante de jour que de nuit. De fait, le traitement de jour permet d'abattre plus les particules de forte densité.

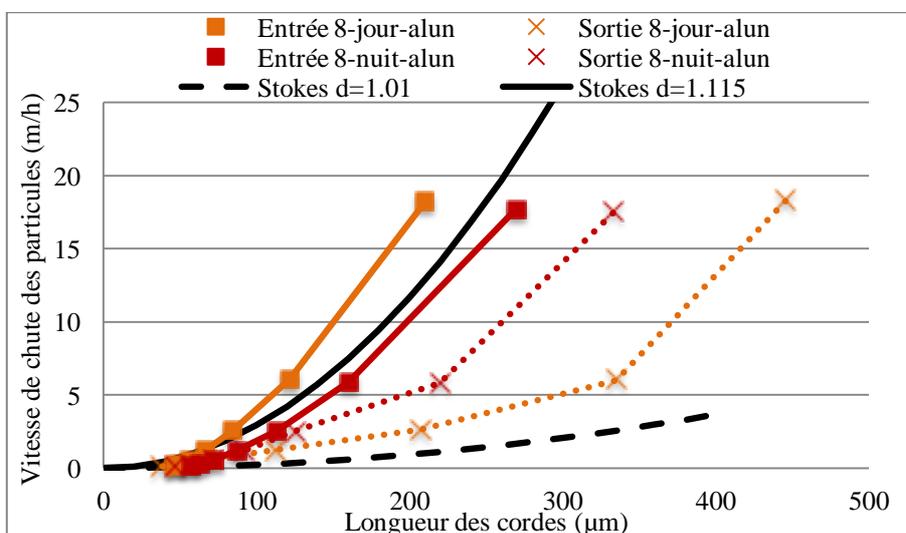


Figure 34 : Couplage des expériences FBRM et ViCAs

Influence de l'ajout de produit chimique

L'influence d'ajout de produit chimique est étudiée ici à partir des expériences réalisées à un débit de 8 m³/h et pour un échantillonnage de jour, avec ajout d'alun et polymère ou tannin car les évolutions d'entrée sont similaires. Sur la Figure 35, on constate que, pour une même longueur de corde, au niveau de la sortie du pilote, la vitesse de chute des particules en présence de tannin est supérieure à celle en présence d'alun et polymère. Ainsi, la densité des particules est plus importante avec ajout de tannin.

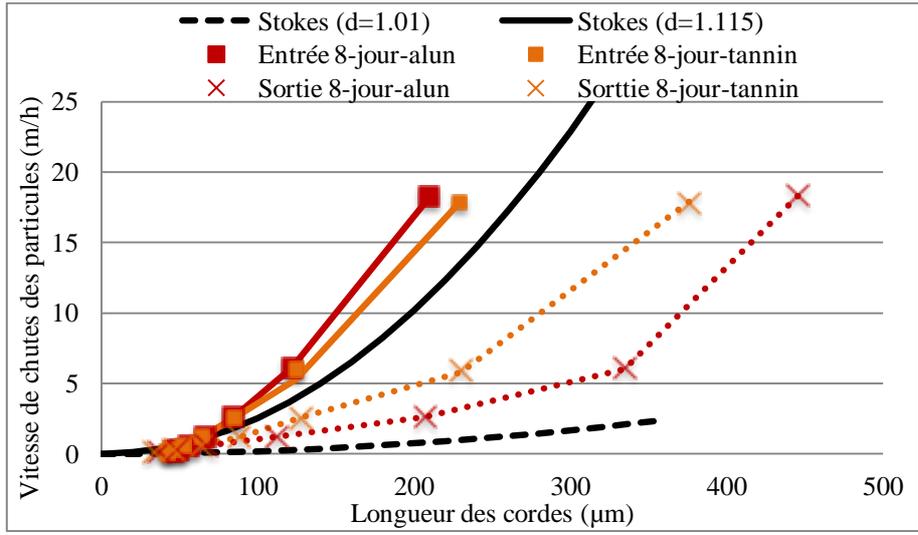


Figure 35 : Couplage des expériences FBRM et ViCAs

IV. Conclusion

Ce stage m'a permis de développer mon expérience dans le domaine du traitement des eaux usées et d'acquérir de nouvelles connaissances sur la décantation primaire. En effet, j'ai pu apprendre des nouvelles techniques de mesure des vitesses de chute des particules ainsi que des tailles des particules. J'ai, de plus, pu découvrir l'organisation et la façon de travail d'un centre de recherche. Pour finir, j'ai pu développer ma faculté d'adaptation et ma réactivité sur le terrain lors de problèmes rencontrés.

L'objectif des stations d'épuration est de traiter les eaux polluées par une activité humaine quelle soit domestique, agricole ou industrielle. En sortie de station, l'eau est alors rejetée en milieu naturel. Ainsi, sa qualité doit être contrôlée de manière très stricte et sans arrêt améliorée. De fait, l'enjeu environnemental est de trouver des procédés et techniques de traitement permettant d'améliorer de plus en plus la qualité de cet effluent. Ce projet de trois mois, effectué avec le groupe de recherche *modelEAU* à Québec, était de répondre à une problématique concernant l'efficacité de traitement des décanteurs primaires et plus précisément, il a eu pour but d'étudier le comportement des particules présentes dans les eaux usées dans un décanteur primaire pour différentes conditions. Cette étude, nommée projet *primEAU*, a été réalisée en collaboration avec Véolia, John Meunier inc. et l'Université de Montréal, grâce à des outils de modélisation, de simulations et des expériences.

Le sujet de ce rapport porte sur la caractérisation des vitesses de chute et détermination de la distribution des tailles de particules contenues dans les eaux usées pour différentes conditions : débits d'alimentation, périodes d'échantillonnage et ajout ou non de produits chimiques (coagulants et floculants). L'objectif premier a été, en effet, de savoir s'il était possible de substituer des produits chimiques de coagulation et floculation conventionnels (alun et polymère) par des produits dits « verts » (tannin) qui seraient par la suite biodégradable par les traitements suivants la décantation primaire (digesteurs à boues) et qui entraînent donc moins d'impact sur l'environnement.

Pour ce faire, un pilote de décantation primaire a été installé dans la station d'épuration de Québec. Chaque semaine, plusieurs conditions ont été testées, faisant intervenir le débit d'entrée du pilote, la période d'échantillonnage et l'ajout ou non de produit chimique. Pour ces différentes conditions opératoires, on a pu déterminer différents paramètres tels que les MeS, la DCO, l'azote total, la distribution des tailles et la vitesse de chute des particules présentes dans les eaux usées d'entrée du décanteur primaire, de sortie et de boues, etc.

Dans le cadre de ce projet, la caractérisation des vitesses de chutes a été déterminée par la méthode des ViCAs et la distribution des tailles de particules par la méthode FBRM.

Les différents résultats obtenus pour les différentes expériences réalisées ont montrées que l'ajout de produits chimiques améliorait l'abattement en matières en suspension en formant des particules plus volumineuses et denses. De plus, ils ont permis de mettre avant les bonnes performances d'abattement des matières en suspension avec l'ajout de tannin qui étaient supérieures à celles obtenues avec l'alun et le polymère. De plus, au niveau des expériences ViCAs, on a pu constater que l'ajout de tannin permettait d'éliminer plus de matières colloïdales que l'ajout d'alun et de polymère. Ainsi, on constate, sur les résultats des expériences FBRM et du couplage FBRM/ViCAs, que les particules en sortie de pilote sont plus volumineuses et plus denses avec l'ajout de tannin qu'avec l'ajout d'alun et polymère. Le tannin semble donc être un produit intéressant pour le processus de coagulation et floculation des particules présentes dans les eaux usées et vis-à-vis des faibles impacts environnementaux qu'il engendre en comparaison de l'alun et du polymère. Pour finir, concernant le débit d'alimentation du pilote, les différents résultats ont montré qu'il n'y a pas d'influence du débit, pour des débits proches tels que 6 et 8 m³/h, sur les résultats obtenus quand il y a ajout de produit chimique. De fait, afin de minimiser les consommations énergétiques et donc les impacts sur l'environnement, il sera recommandé de travailler à débit plus faible. Cependant, cela est impossible car le débit en entrée de station d'épuration des eaux usées varie dans la journée en fonction des usages et n'est pas régulé. On est donc assujéti des fluctuations du débit à moins de rajouter un bassin tampon à l'entrée de station et d'installer une régulation de débit.

Annexe

Figures complémentaires

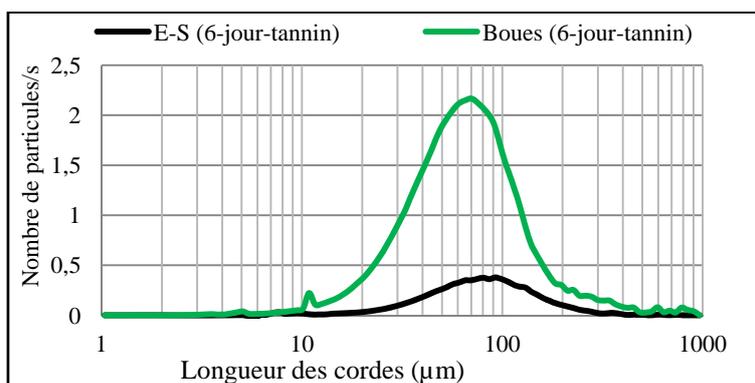


Figure 1 : Distribution des tailles des particules

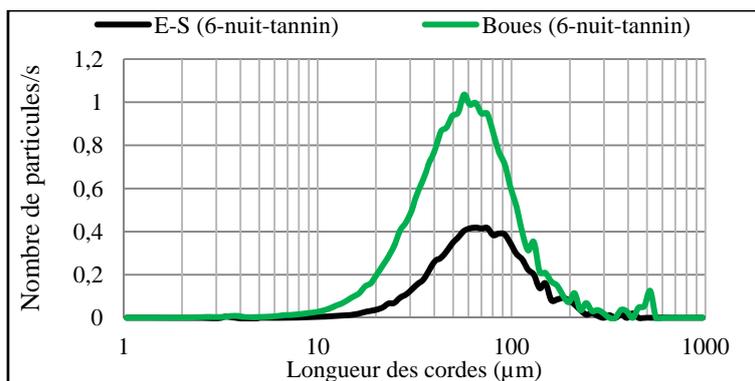


Figure 2 : Distribution des tailles des particules

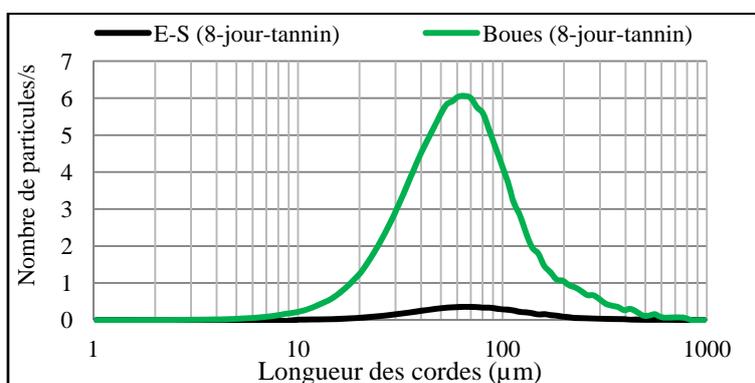


Figure 3 : Distribution des tailles des particules

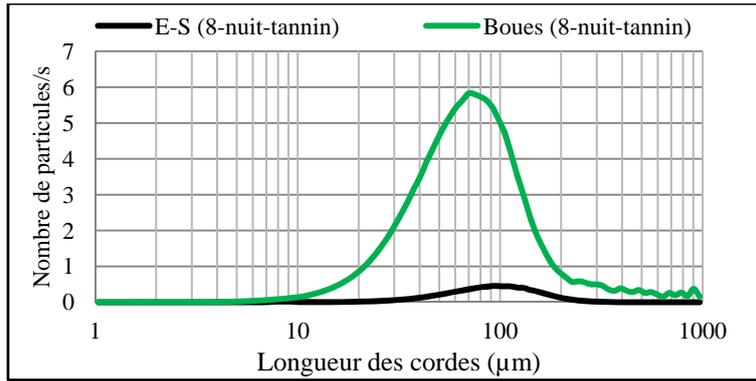


Figure 4 : Distribution des tailles des particules

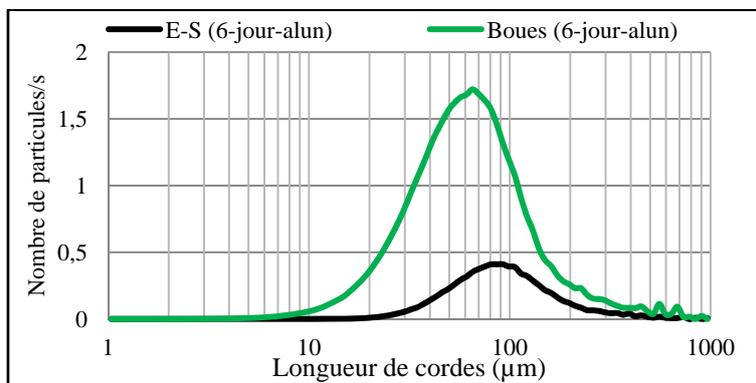


Figure 5 : Distribution des tailles des particules

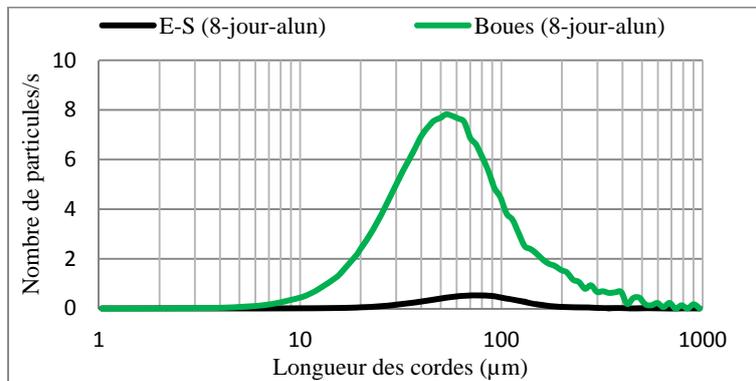


Figure 6 : Distribution des tailles des particules

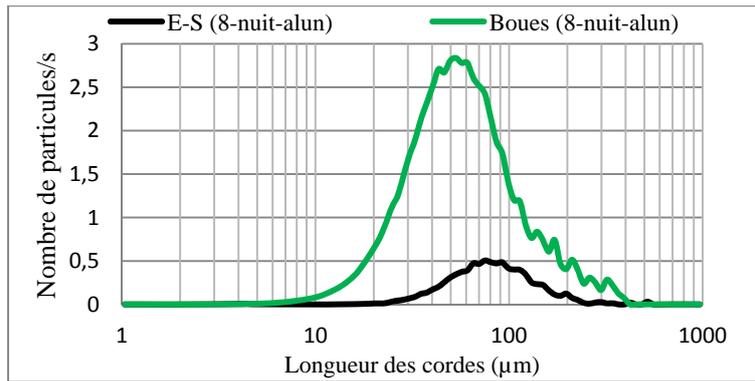


Figure 7 : Distribution des tailles des particules

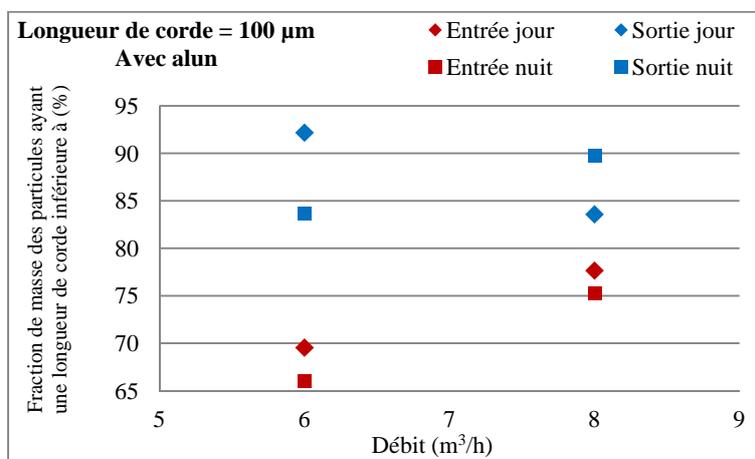


Figure 8 : Fraction massique pour une longueur de corde de 100 microns pour différentes expériences

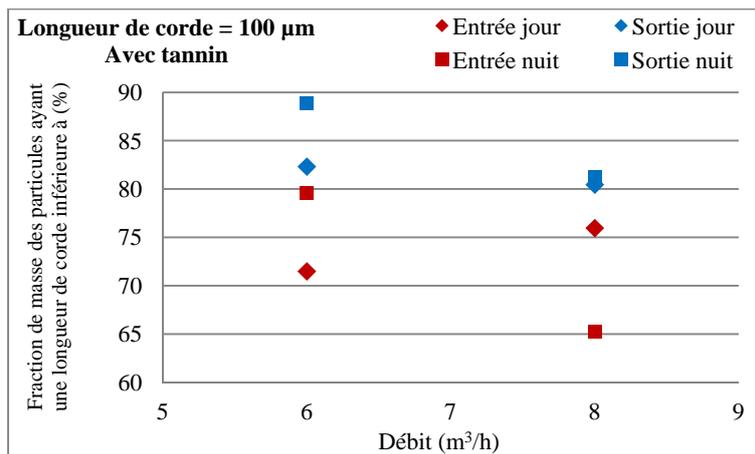


Figure 9 : Fraction massique pour une longueur de corde de 100 microns pour différentes expériences