

Master Sciences de l'Environnement Terrestre
Spécialités Management de l'Environnement, Valorisation et Analyse
Parcours Environnement, Energies, Bioprocédés

Rapport de stage de Master 2

Maître de stage : Professeur Peter A. Vanrolleghem

Optimisation d'un décanteur primaire :
Caractérisation des vitesses de chute et détermination de la distribution des tailles de
particules contenues dans les eaux usées

Florent Naslin



Tuteur de stage : Maurice Ambrosio

Chaire modelEAU, Université Laval, Québec, du 28 Janvier au 28 Juin 2013

Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier le Professeur Peter A. Vanrolleghem pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe modelEAU.

Je remercie la doctorante Giulia Bachis, le docteur Thibaud Maruéjols et Sylvie Leduc pour leur disponibilité et leurs conseils.

Merci également au responsable du laboratoire d'environnement Monsieur Michel Bisping.

Merci à mon tuteur de l'Université d'Aix-Marseille Monsieur Maurice Ambrosio.

Je tenais également à remercier Yvan Pacheco, stagiaire avec qui j'ai pu améliorer mon niveau d'anglais, pendant toute la durée du stage.

Charte anti-plagiat

Je soussigné Florent Naslin, étudiant en deuxième année de master SET spécialité MAEVA à Aix-Marseille Université, atteste sur l'honneur que le présent mémoire a été écrit de mes mains, que ce travail est personnel et que toutes les sources d'informations externes et les citations d'auteurs ont été mentionnées conformément aux usages en vigueur (nom de l'auteur, nom de l'article, éditeur, lieu d'édition, année, page).

Je certifie par ailleurs que je n'ai ni contrefait, ni copié l'oeuvre d'autrui afin de la faire passer pour la mienne.

Fait à Québec le 03/05/2013.

Signature :

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the left.

D'après <http://communautemarquee.blog-idrac.com/194-2/>

Sommaire

Remerciements

Charte anti-plagiat

1. Introduction générale	1
2. Présentation de l'Université Laval, l'équipe modelEAU et du projet primEAU ... 2	
1. L'Université Laval à Québec.....	2
2. L'équipe modelEAU.....	2
3. Le projet primEAU.....	3
3. Principe de la décantation primaire	4
4. Méthodes et matériel	6
1. Décanteur pilote de la station de Beauport.....	6
2. Méthode d'analyse des matières en suspension (MES).....	7
3. Caractérisation des vitesses de chutes des particules : Méthode ViCAs.....	8
1. Présentation de la méthode.....	8
2. Reproductibilité des expériences.....	11
4. Caractérisation de la distribution des tailles de particules : Méthode FBRM.....	12
1. Présentation de la méthode.....	12
2. Reproductibilité des expériences.....	15
5. Relation entre les vitesses de chute et les cordes des particules.....	16
6. Campagne d'échantillonnage.....	17
1. Plan expérimental.....	17
2. Déroulement d'un échantillonnage.....	19
5. Résultats et discussions	20
1. Présentation des résultats ViCAs et FBRM.....	20
1. Impact de la fonte des neiges sur les expériences ViCAs.....	20
2. Influence du débit.....	21
3. Influence de la charge.....	23
4. Influence de l'ajout de produits chimiques.....	25
2. Relation entre vitesse de chute et taille des particules.....	27
6. Conclusion	31
Synthèse bibliographique	32
Annexes	33
Liste des figures.....	33
Liste des tableaux.....	33
Glossaire.....	34
Annexe A : Mode opératoire de la méthode ViCAs.....	35
Annexe B : Mode opératoire du dosage des MES.....	37
Annexe C : Exemple de feuille de calcul Excel ViCAs.....	38
Annexe D : Protocole d'analyse du FBRM.....	40
Annexe E : Démonstration des équations de la méthode ViCAs.....	42
Annexe F : Calcul des fractions de masse cumulée à partir des données FBRM.....	44
Annexe G : Réalisation des courbes reliant les cordes aux vitesses de chute.....	46
Annexe H : Détermination des masses volumiques des particules.....	47
Résumé	

1. Introduction générale

A l'échelle de la planète, la quantité d'eau présente dans le bassin hydrographique du fleuve Saint-Laurent représente environ 3% de la ressource renouvelable. L'eau douce recouvre environ 10% de la surface totale du Québec, répartie à travers 4500 rivières et 500000 lacs. Ce constat implique une grande responsabilité quant à la préservation de la ressource¹. Depuis 2002, le gouvernement québécois suit une politique de l'eau axée sur la protection de la ressource, la gestion de l'eau dans une optique de développement durable et enfin sur la protection des écosystèmes et de la santé. Au regard des Québécois, l'eau est considérée comme une richesse essentielle. Dans le cadre du traitement des eaux usées, plusieurs problématiques se posent pour améliorer la qualité des effluents en sortie d'usine de traitement.

La Chaire de recherche modelEAU, se propose de répondre à ces problématiques via la réalisation de nombreux projets de recherche en collaboration avec les industriels. Dans ce rapport, il sera question du projet primEAU, en collaboration avec Véolia, John Meunier inc. et l'Université de Montréal. L'objectif principal est d'optimiser un des procédés majeurs présents dans les usines de traitement : les décanteurs primaires. Les outils utilisés par l'équipe modelEAU sont la modélisation, la simulation et les essais expérimentaux.

Ce rapport traite de la caractérisation des particules présentes dans les eaux usées. En effet, les effluents des stations de traitements se présentent comme des mélanges complexes et très variables, qu'il faut pouvoir caractériser afin d'optimiser la conception des ouvrages hydrauliques. Dans ce rapport, il est question de l'étude des vitesses de chutes des particules, ainsi que de leur granulométrie.

L'objectif du stage au sein de la Chaire modelEAU s'inscrit dans le cadre du projet primEAU. En effet, les travaux concernant la modélisation autour du décanteur primaire nécessitent la compréhension de nombreux phénomènes. Par conséquent, il est nécessaire d'effectuer plusieurs expérimentations sur un décanteur pilote.

Dans le cadre de ce rapport, c'est la partie concernant la caractérisation des distributions de vitesses de chute et des tailles de particules des eaux usées qui sera réalisée. Les expérimentations se dérouleront à partir d'échantillons provenant de la station Est des eaux usées de la Ville de Québec et sur des équipements de mesures se situant au laboratoire d'environnement de l'Université Laval. Les mesures sur les particules seront réalisées par des essais ViCAs² pour la caractérisation des vitesses de chutes et des essais FBRM³ pour déterminer la granulométrie. Les principes de ces deux méthodes sont développés dans la section *Méthodes et matériel*.

¹ Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, Faune et Parcs du Québec. Politique nationale de l'eau.

² ViCAs, acronyme de Vitesse de Chute en Assainissement.

³ FBRM, acronyme de Focused Beam Reflectance Measurement.

2. Présentation de l'Université Laval, l'équipe modelEAU et du projet primEAU

1. L'Université Laval à Québec

L'Université Laval devient en 1852 la première Université d'Amérique Francophone. Elle succède alors au "Séminaire de Québec" qui fut fondé en 1663 par Mgr de Montmorency. A l'heure actuelle, elle conserve une image forte de l'empreinte française au Québec.



En 2011, plus de 48 000 étudiants ont suivi une formation parmi les 400 programmes proposés, tous cycles confondus par l'Université. Actuellement, l'Université Laval est classé au 7e rang des universités canadiennes. Elle comporte 17 facultés qui englobent la totalité des domaines scientifiques en matière de recherche et de création. En termes de budget, l'Université Laval représente 308 millions de dollars dont 20% proviennent de fonds privés. L'Université est majoritairement constituée de 10 établissements dans le secteur de la santé et des services sociaux, 37 centres de recherche, 78 chaires de recherche canadienne, 19 chaires de recherche industrielles et 42 chaires en collaboration⁴.

2. L'équipe modelEAU

modelEAU est le nom de la Chaire de recherche du Canada située à l'Université Laval à Québec et gérée par le Professeur Peter Vanrolleghem depuis février 2006. L'équipe est composée de dix étudiants gradués, trois post-doctorants, deux professionnels de recherche ainsi que plusieurs stagiaires venant de multiples horizons. Les thématiques abordées par la Chaire sont l'optimisation des méthodes et des procédés dans les usines de traitement des eaux usées, ainsi que l'amélioration de la qualité de l'eau dans les rivières, les bassins naturels et les réseaux urbains.



Les moyens mis en œuvre pour répondre aux problématiques sont la modélisation et la simulation par le biais de logiciels spécifiques, ainsi que l'ensemble des outils de contrôle, d'automatisation et d'échantillonnage.

L'ensemble des efforts du groupe se répartit suivant plusieurs projets. Ainsi depuis ses débuts, de nombreux programmes sont en cours de réalisation. Parmi eux, il est possible de citer primEAU, alEAU, respirEAU... Dans ce rapport, il sera question du projet primEAU. Ce dernier sera présenté dans la suite.

⁴ L'Université Laval (site web)

3. Le projet primEAU

Le projet primEAU a vu le jour en 2010, ce programme s'articule autour de l'étude et l'optimisation des décanteurs primaires dans le cadre du traitement des eaux usées. Ce projet rassemble plusieurs équipes de travail provenant de l'Université Laval, l'Université de Montréal, les compagnies John Meunier inc. et Veolia Environnement.

La décantation primaire constitue une étape majeure dans une usine de traitement des eaux usées. En effet, cette étape vient se placer juste en aval des opérations de dégrillage, dessablage et déshuilage, qui constituent les étapes de prétraitements. Cette décantation va permettre d'éliminer une grande partie des matières en suspension (MES). Les boues produites sont envoyées vers un digesteur. La figure 1 représente un schéma général d'un procédé de traitement des eaux.

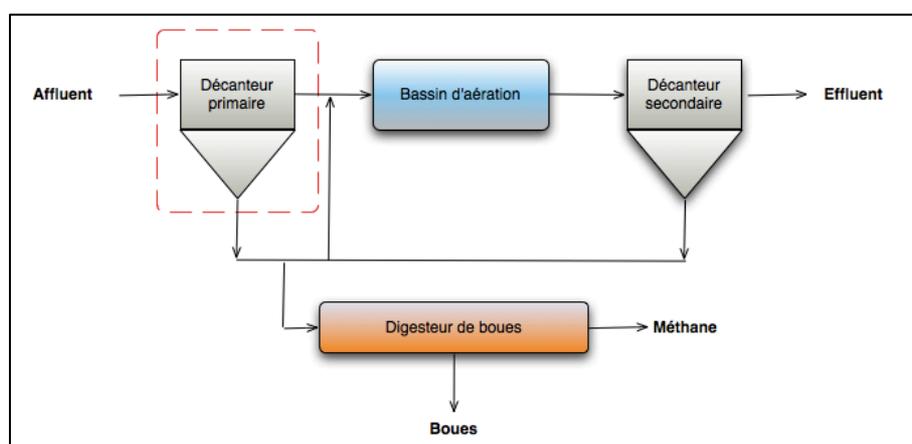


Figure 1 Schéma d'un procédé de traitement des eaux usées

Dans la mesure où l'efficacité d'un décanteur primaire va influencer sur les performances des autres procédés d'assainissement, ce dernier se révèle donc comme un système essentiel dans une usine de dépollution des eaux usées.

L'amélioration de la décantation primaire par une meilleure conception et conduite des appareillages est une problématique à laquelle le projet primEAU doit répondre.

Ainsi, les principaux objectifs de ce projet consistent à :

- Développer les connaissances sur les décanteurs primaires en intégrant la problématique des polluants ordinaires et émergents.
- Modéliser la décantation primaire, par le biais d'outils spécifiques.
- Favoriser la décantation de la matière organique afin d'assurer une meilleure production de biogaz.
- Optimiser les performances des décanteurs primaires afin d'accroître leur intérêt dans les stations d'épuration.

Afin de développer un modèle adapté, il est nécessaire de comprendre les mécanismes physiques, chimiques et biologiques décrivant l'élimination des particules dans un décanteur. De ce fait, un décanteur primaire pilote a été financé par la société John Meunier inc. Ce dernier a été installé dans la station d'épuration Est de la Ville de Québec. Ce pilote est relié au réseau de la ville et permet de réaliser un grand nombre de relevés et d'études indispensables pour la réalisation du projet.

3. Principe de la décantation primaire

Un décanteur primaire est un ouvrage hydraulique permettant d'éliminer une grande partie des MES afin d'alléger la charge organique et inorganique entrant dans le traitement secondaire. La figure 2 représente le schéma général d'un décanteur primaire.

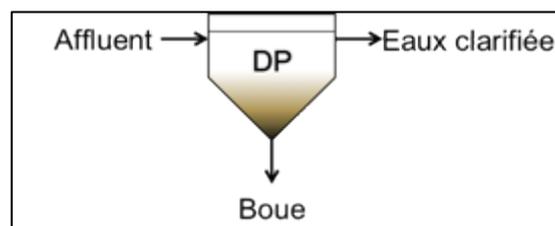


Figure 2 Schéma d'un décanteur primaire (DP)

Le phénomène physique qui dirige la séparation solide/liquide est l'effet de gravité. Ainsi, les particules plus denses que l'eau décantent au pied de l'ouvrage et sont accumulées en formant une boue. Cette dernière est alors envoyée vers les épaisseurs où elle est concentrée, avant de subir de nouveaux traitements. Quant à l'eau clarifiée, elle quitte le décanteur via une surverse et est amenée vers le traitement secondaire.

Le rendement en élimination des MES pour le traitement primaire se situe le plus souvent entre 50 et 80% (Michelbach et Wöhrle, 1994).

Dans les décanteurs, la fraction de particules solides séparées est fonction de leurs caractéristiques de décantation ainsi qu'à la géométrie de l'ouvrage. En effet, dans un fluide, les particules sont soumises à différentes forces qui peuvent les faire sédimer ou pas (poids, poussée d'Archimède et trainée).

Vitesse de sédimentation : Equation de Stokes

La vitesse de chute des particules va dépendre principalement de leur densité, forme, taille et également de la nature du fluide dans lequel elles se trouvent. Des modèles peuvent être utilisés pour évaluer la vitesse de chute des particules. Par exemple, pour des régimes laminaires et des particules de forme sphérique, il est possible d'utiliser le modèle de Stokes, Equation (1):

$$V_s = \frac{(\rho_s - \rho_f)gd^2}{18\mu} \quad (1)$$

Avec:

- V_s : La vitesse de chute des particules ($m.s^{-1}$);
- ρ_s : La masse volumique des particules ($kg.m^{-3}$);
- ρ_f : La masse volumique du fluide ($kg.m^{-3}$);
- g : L'accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$);
- d : Le diamètre des particules (m);
- μ : la viscosité dynamique du fluide (pa.s).

Critère de charge superficielle

Chaque ouvrage de décantation est caractérisé par le critère de charge superficielle noté C_s . C'est le rapport entre le débit admis dans l'ouvrage et sa surface libre, voir l'équation 2.

$$C_s = \frac{Q}{S} \quad (2)$$

Avec :

- C_s : La charge superficielle ($m.h^{-1}$);
- S : La surface libre du décanteur (m^2);
- Q : Le débit d'alimentation ($m^3.h^{-1}$).

Dans le cadre de l'exploitation d'un décanteur, la charge superficielle doit être inférieure ou égale à la vitesse de la classe de particule la plus lente à éliminer. Ainsi, il est fondamental de bien connaître la distribution des vitesses de chute de l'ensemble des particules contenue dans l'affluent à traiter afin de bien dimensionner l'ouvrage.

Principe de la coagulation-floculation

Les eaux usées contiennent des particules de petite taille (de 1 nm à 1 μm). Ces dernières sont désignées sous le nom de « colloïdes ». Ces particules ont la propriété d'avoir des vitesses de chute très faibles (voir nulles), ce qui empêche leur élimination via les ouvrages de décantation.

D'autre part, les colloïdes sont des particules qui se repoussent mutuellement, car elles sont chargées électronégativement. La coagulation-floculation est une technique qui permet d'éliminer les colloïdes en deux étapes.

Premièrement, la coagulation consiste à ajouter une espèce chargée électriquement (par exemple un sel métallique) afin de neutraliser les répulsions électrostatiques des colloïdes. Les espèces chargées se lient aux particules et ces dernières peuvent donc se rencontrer.

La seconde étape est la floculation. Elle consiste à faire prendre en masse les colloïdes, généralement sur un polymère. Cet amas de particules est appelé « floccule ». Sa masse est suffisante pour permettre sa décantation. Ainsi les colloïdes sont éliminés.

4. Méthodes et matériel

Dans cette partie, sont développées les méthodes appliquées, ainsi que le matériel utilisé au cours du stage. Premièrement, le décanteur pilote de la station Est de la Ville est présenté.

Ensuite, la méthode de mesure de la concentration des particules solides dans les eaux usées (MES) est développée. Les paramètres de vitesse de chute et de taille des particules sont évalués respectivement par les méthodes ViCAs et FBRM. Ces deux techniques sont également développées dans cette section.

Finalement, la campagne d'analyse qui a débuté en mars 2013, sera détaillée via la description du plan expérimental et de la méthode d'échantillonnage.

1. Décanteur pilote de la station de Beauport

Dans le cadre du projet primEAU, la société John Meunier inc. a financé un pilote de décanteur primaire. Ce dernier a été installé à la station Est de la Ville de Québec. Il mesure 3,2 m de haut pour un volume total de 4,85 m³, voir la figure 3. Il est utilisé depuis le début du projet pour effectuer de nombreuses expériences.

Le pilote peut être alimenté par deux réseaux différents. Le premier est celui des eaux usées, il permet de réaliser des essais avec un affluent identique à celui qui alimente la station. Pour cela une pompe située en amont des ouvrages de décantation primaire assure l'alimentation du pilote.



Figure 3 Pilote primEAU, station Est de la Ville de Québec

Le second réseau permet d'alimenter le pilote avec de l'eau brute, afin de pouvoir réaliser des tests d'hydraulique ainsi que le nettoyage. Le pilote est également équipé d'un ensemble de capteurs permettant de mesurer en temps réel :

- La température interne;
- Le pH interne;
- La conductivité en entrée et en sortie;
- Le débit en entrée et en sortie;
- La turbidité en entrée, à l'intérieur et en sortie.

En ce qui concerne la gestion des données, une unité centrale assure l'acquisition des informations mesurées par tous les capteurs. Une interface permet de visualiser l'ensemble des mesures réalisées en temps réel. Les valeurs sont enregistrées et envoyées régulièrement sur une boîte courriel, via une connexion internet. Cela permet d'avoir un historique précis et donc une traçabilité de l'ensemble des actions menées sur l'installation.

Quant à la conduite du pilote, l'interface située sur l'unité centrale permet d'assurer la régulation du débit d'alimentation en agissant sur une électrovanne, voir la figure 4. Il est également possible de gérer la pompe permettant de soutirer les boues en pied du décanteur. Le pilote peut être également piloté à distance via une connexion internet et le logiciel VNC Viewer, voir la figure 5.



Figure 4 Pupitre de commande du pilote

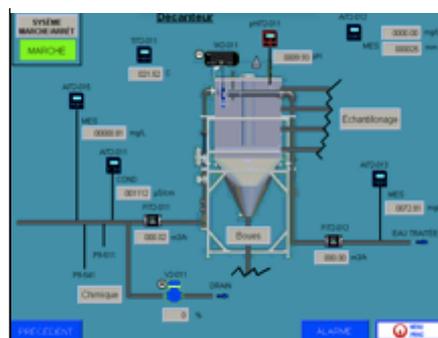


Figure 5 Interface de contrôle du pilote, via le logiciel VNC Viewer

2. Méthode d'analyse des matières en suspension (MES)

Les matières en suspension (MES) sont des particules solides contenues dans l'eau. Elles sont composées de matières organiques et inorganiques. Ces matières peuvent provenir d'effluents d'eaux usées urbains, industriels ou bien de phénomènes naturels comme par exemple, le ruissellement des eaux sur la terre. A de fortes concentrations, les MES peuvent être responsables de la turbidité d'une eau.

Dans le cadre du protocole ViCAs, des mesures de MES sont nécessaires. D'une part, pour déterminer les concentrations initiales et finales de l'échantillon dans la colonne et d'autre part, pour mesurer les masses retenues dans chacune des coupelles.



Figure 6 Banc de filtration des MES

Le protocole d'analyse des MES repose sur une filtration sous vide. En effet, l'utilisation d'un support filtrant à faible porosité couplé à une pompe à vide, permettra de retenir les solides contenus dans un échantillon ou dans une coupelle ViCAs. La figure 6 représente le dispositif permettant de réaliser les filtrations des MES. Après la filtration, les filtres sont séchés puis pesés. La masse des particules se détermine par la variation de masse des filtres entre le début et la fin de la filtration. Pour atteindre la concentration d'un échantillon, il suffit de ramener la masse de particules retenue par le volume de filtrat. Le mode opératoire est détaillé en Annexe B.

3. Caractérisation des vitesses de chutes des particules : Méthode ViCAs

1. Présentation de la méthode

Dans le cadre du traitement des eaux usées, il a été montré qu'une grande partie de la pollution contenue dans ces eaux, se trouvait sous forme de particules en suspension.

Ces particules dont la granulométrie reste relativement fine, peuvent être décantées puis éliminées. Afin de concevoir des équipements adaptés pour décanter ces particules solides, il est nécessaire de bien caractériser les paramètres qui interviennent dans ce phénomène.

Un des critères pertinents permettant de caractériser la décantation des particules est la vitesse de chute (V_c). Les modèles couramment utilisés pour atteindre les V_c sont peu adaptés pour des milieux aussi complexes tels que celui des eaux usées.

En effet, les modèles comme celui de Stokes ou de Newton sont fondés sur des hypothèses trop simplificatrices. Par exemple, ces modèles considèrent que toutes les particules sont sphériques et de même densité. Dans la mesure où les particules solides contenues dans les eaux usées présentent des caractéristiques très variables, ces modèles sont peu fiables pour caractériser les vitesses de chutes.

La méthode ViCAs, acronyme de vitesse de chute en assainissement (Chebbo et Gromaire, 2009) permet de répondre à cette problématique en proposant

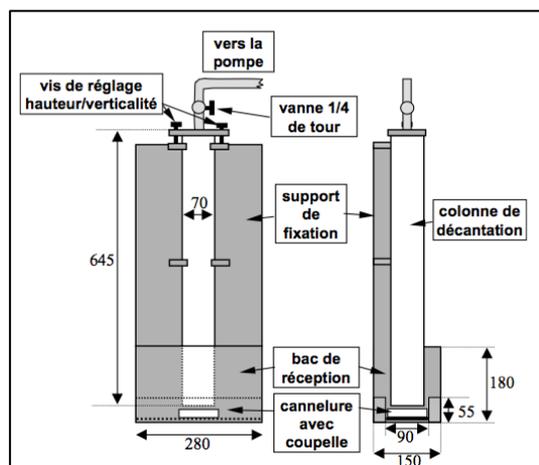


Figure 7 Schéma d'un dispositif ViCAs (Chebbo et al. 2003)

une méthode fonctionnelle pour obtenir la distribution des vitesses de chutes. Cette technique s'appuie sur la réalisation d'essais de décantation des particules contenues dans un échantillon liquide. Ces essais se déroulent à l'aide d'une colonne verticale en PVC, contenant l'échantillon dans des conditions statiques, voir la figure 7.

Dans la colonne, la suspension est considérée comme homogène, ce qui induit l'hypothèse que les particules décantent indépendamment les unes par rapport aux autres sans s'agglomérer et sans diffuser. Cette méthode peut s'appliquer sur toutes les eaux contenant des particules solides en suspension comme les eaux usées sanitaires, pluviales et industrielles.

Le principe de cette méthode repose sur la variation de la masse de particules contenues dans la colonne au cours du temps. En pratique, cela consiste à prélever des masses de particules qui décantent en pied de colonne à intervalles réguliers. Ainsi, il est possible de représenter la masse cumulée de particules décantées en fonction du temps, voir la figure 8.

Après un traitement des données, il est possible de représenter la fraction de masse des particules en fonction des vitesses de chute via les courbes $F(V_c)$. Le modèle qui permet de tracer cette représentation est décrit via l'équation 3, ci-dessous. La démonstration de cette équation est disponible en annexe E.

$$F(V_c) = 100 \left(1 - \frac{S(t)}{M_{dec} + M_{fin}} \right) \quad (3)$$

Avec

- $F(V_c)$: Fraction de masse cumulée des particules en fonction de leur vitesse de chute;
- $S(t)$: Un modèle mathématique permettant de représenter l'évolution de la masse cumulée en fonction du temps de décantation (mg).
- M_{dec} : Le cumul de la masse de solide décantée en cours d'essai (mg);
- M_{fin} : La masse de particules restantes en suspension dans la colonne à la fin de l'essai (mg).

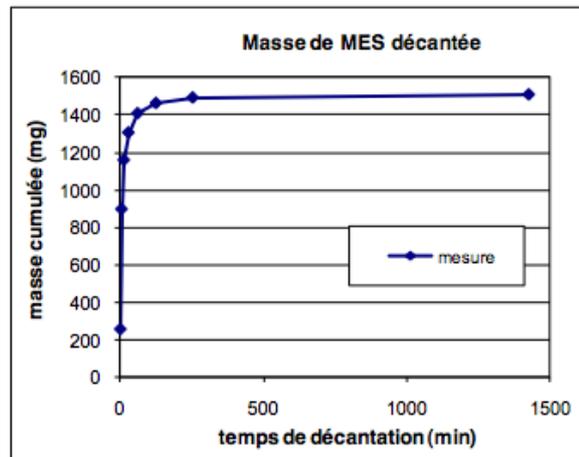


Figure 8 Masse cumulées des solides ayant décantés au cours du temps

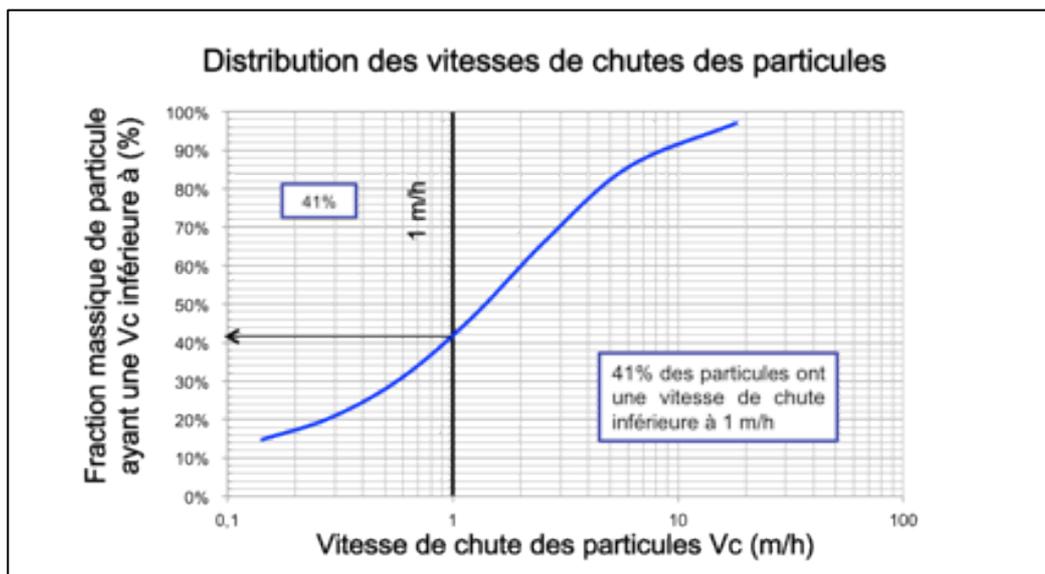


Figure 9 Exemple d'une courbe F(Vc)

Les courbes de F(Vc) prennent l'allure de la figure 9 : la courbe F(Vc) est représentée avec en abscisse, les vitesses de chute des particules en suspension, exprimées en $m.h^{-1}$ sur une échelle logarithmique et en ordonné le pourcentage cumulé des MES qui ont décantées (donc qui ont une vitesse de chute inférieure à Vc). Ainsi, il est possible d'observer que 41% des particules présentes dans l'échantillon ont une vitesse de chute inférieure à $1 m.h^{-1}$.

Détermination des vitesses de chutes

Dans le cadre de la réalisation des expériences ViCAs, une feuille de calcul Excel a été développée par M.C. Gromaire (CEREVE), voir Annexe C. Cette dernière permet d'obtenir les courbes de distribution des vitesses de chute à partir des valeurs de masse de particules prélevées dans chacune des coupelles. La détermination des courbes F(Vc) s'appuie sur la méthode précédemment développée dans la présentation de la méthode (Bertrand-Krajewski (2007)). L'utilisation de la macro « Solveur » est nécessaire et permet d'ajuster la courbe M(t) avec les points expérimentaux. Cet ajustement est basé sur la méthode des moindres carrés.

Fiabilité des expériences

La source principale d'erreur lors d'un essai ViCAs provient de l'expérimentateur. Il est donc difficile de quantifier exactement la précision d'une expérience.

Afin de déterminer la fiabilité d'un essai, des conditions doivent être respectées. Dans le cadre de l'exploitation des données ViCAs, Gromaire et Chebbo (2003) considèrent que l'erreur sur le bilan de matière ne doit pas dépasser +/- 15%. Ils considèrent également que la masse totale de MES décantés, ne doit pas être inférieure à 70% de la masse initiale contenue initialement dans la colonne ($M_{\text{décanté}} > 0,7M_{\text{initiale}}$). Les calculs de bilan de masse sont détaillés en Annexe A.

Si les conditions précédentes ne sont pas respectées, Il est fortement recommandé de renouveler l'essai.

2. Reproductibilité des expériences

Afin de mesurer la reproductibilité des essais ViCAs, une expérience a été réalisée. Cette dernière s'est déroulée sur trois jours d'échantillonnage et d'analyse consécutifs. Ainsi pour chacune des journées, un échantillon d'eau usée est prélevé en entrée et en sortie du décanteur et est analysé. Au total, trois distributions de vitesses de chute par point d'échantillonnage (entrée et sortie) ont pu être reportées et analysées sur un même graphique. La figure 10 représente les courbes moyennes d'entrée et de sortie avec leurs incertitudes respectives.

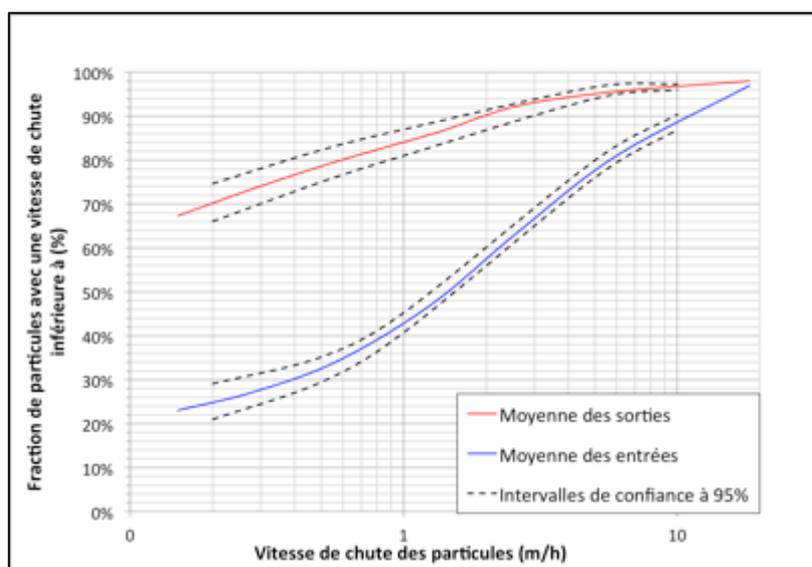


Figure 10 Intervalles de confiance pour les essais ViCAs

Les concentrations en MES à l'entrée des décanteurs au cours des trois jours d'échantillonnages furent respectivement 180, 177 et 175 mg.L⁻¹. Le tableau 1 réunit les intervalles de confiance à 95%.

Tableau 1 Intervalles de confiance à 95 % pour les essais ViCAs en entrée et sortie du décanteur

Type de distribution	Entrée		Sortie	
Nombre d'échantillons	3		3	
F(Vc) en m.h ⁻¹	F moyen (%)	E _{95%} +/- (%)	F moyen (%)	E _{95%} +/- (%)
F(0,2)	25	16	70	6
F(0.5)	32	9	79	5
F(1)	43	5	84	4
F(5)	78	3	95	1
F(10)	89	2	97	1

Il est possible d'observer que les intervalles de confiance augmentent pour les faibles vitesses de chute. En effet, pour des vitesses de chute de 0,2 m.h⁻¹, les erreurs relatives sont de 16% et 6% respectivement pour les distributions d'entrée et de sortie.

Cependant, pour des vitesses de chute plus importantes les erreurs relatives diminuent jusqu'à atteindre des seuils voisins de 1% à 10 m.h^{-1} pour la sortie.

Par conséquent, les essais ViCAs sont considérés comme reproductibles pour des conditions d'échantillonnages similaires. Ces résultats sont également en accord avec les tests d'incertitudes réalisés par Chebbo et Gromaire en 2009.

Les résultats des tests qui suivent ne sont pas le produit de réplicat. En effet, pour des raisons de contraintes matériels et de temps, il est impossible de réaliser plusieurs essais sur le même échantillon.

4. Caractérisation de la distribution des tailles de particules : Méthode FBRM

1. Présentation de la méthode

Dans le cadre de l'optimisation de la décantation primaire, la caractérisation des paramètres clés de la décantation des particules est essentielle. Dans la partie précédente, le paramètre de vitesse de chute a été abordé. Dans cette section, il est question de la distribution de la taille des particules. La connaissance de ce paramètre apparaît comme fondamentale, dans la mesure où il est directement lié à la vitesse de chute. En effet, dans plusieurs équations décrivant la vitesse de chute, le diamètre des particules apparaît comme étant un facteur important (Cf. équation de Stokes, p.5).

La technique qui a été retenue pour réaliser l'ensemble des expériences est la granulométrie laser. Cette technique repose sur la réflexion de la lumière.

L'appareil utilisé est le Lasentec D600R. La méthode FBRM, acronyme de Focused Beam Reflectance Measurement est un outil qui permet d'analyser des particules dans une large gamme allant de $0,05 \mu\text{m}$ à $1000 \mu\text{m}$. De plus, elle peut être utilisée dans tous les liquides sauf ceux qui ne génèrent pas de réflexion spectrale comme les huiles. La figure 11 représente un schéma du poste Lasentec FBRM.

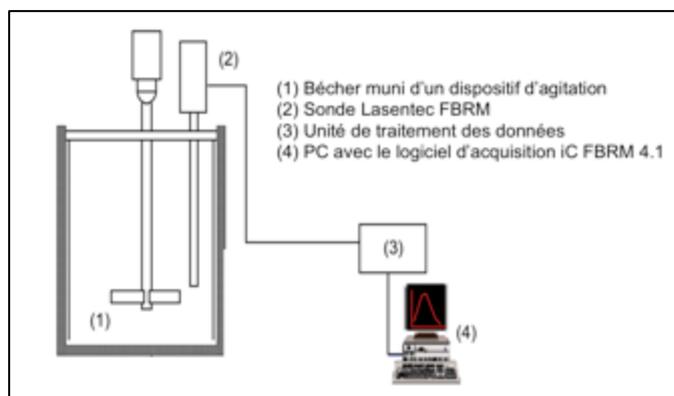


Figure 11 Illustration du poste Lasentec D600R

Cette technique qui permet de réaliser des mesures in situ et en temps réel est récente et connaît de nombreux succès, notamment dans les secteurs pharmaceutiques et pétroliers.

Le principe de fonctionnement de la granulométrie laser s'appuie sur le phénomène de réflexion de la lumière. En effet, lorsqu'une onde lumineuse rencontre un obstacle partiellement opaque, elle est réfléchiée. La lumière réfléchiée par les particules est ainsi captée par une cellule photosensible, puis envoyée à l'unité centrale de l'appareil où le signal est traité.

Le FBRM mesure le temps que va mettre cette lumière pour être réfléchiée d'un bout à l'autre d'une particule. En multipliant ce temps, par la vitesse de balayage de l'appareil, une distance est obtenue. Cette distance est appelée longueur de corde. Elle correspond à la distance entre les deux bords de la particule traversée par le laser.

Sur la figure 12 il est possible de voir comment le laser peut se propager dans le milieu analysé. L'appareil est capable de mesurer une dizaine de milliers de cordes par seconde et génère une distribution complète de ces dernières.

Ainsi, il est possible de représenter le nombre de détections par seconde (#/s), en fonction des différentes classes de longueur de cordes (figure 13).

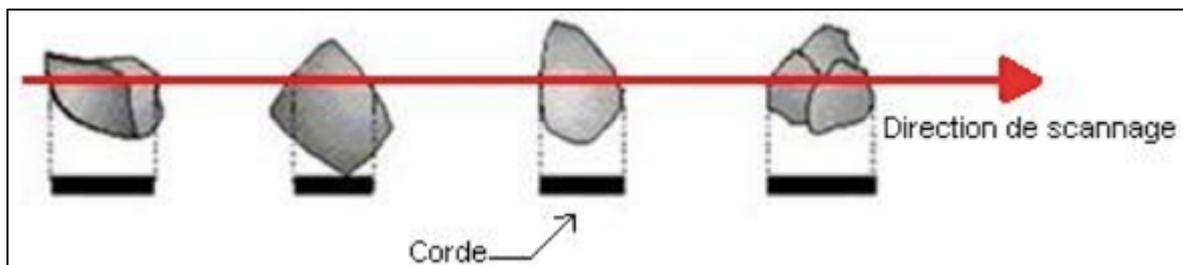


Figure 12 Les cordes mesurées par le FBRM

En revanche, il ne faut en aucun cas associer la distribution de longueur de corde, à la distribution de taille des particules. En effet, elle n'est pas égale, mais reste toutefois statistiquement liée à cette dernière.

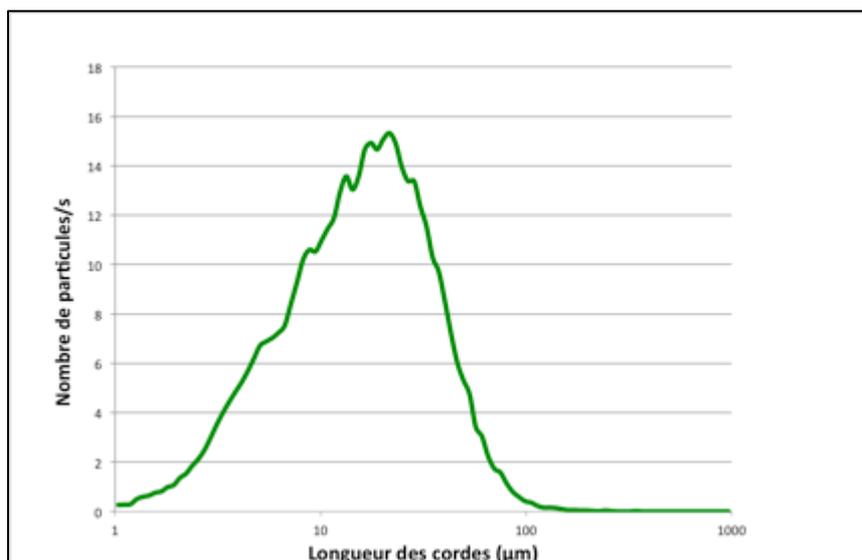


Figure 13 Exemple de distribution des longueurs de corde mesurées sur un échantillon d'eaux usées

Dans le cadre des analyses d'échantillons d'eaux usées, les particules étudiées seront les MES. L'utilisation du Lasentec ne nécessite pas d'utiliser de grand volume d'échantillon. Ainsi, il suffira d'utiliser moins de 300 mL pour pouvoir lancer une analyse.

L'échantillon est placé dans un bécher dans lequel seront introduits la sonde FBRM ainsi qu'un dispositif d'agitation à hélice, voir la figure 14. Le dispositif d'agitation permet de maintenir l'ensemble des particules de façon homogène pendant l'analyse.



Figure 14 L'échantillon, la sonde et le dispositif d'agitation

La source qui émet le laser, ainsi que la cellule permettant de recueillir la lumière réfléchie, se situent à l'intérieur du tube en inox, voir ci-contre la figure 15. La lentille par laquelle le laser est émis tourne à une vitesse fixe. Lorsqu'une particule est scannée par le laser, face à la fenêtre en saphir, elle se met à rétrodiffuser de la lumière jusqu'à ce que le faisceau atteigne son bord. De cette manière, la corde est mesurée. La distribution de la taille des particules peut être directement observée à partir du logiciel iC FBRM 4.1. Un mode opératoire décrivant les manipulations est présenté en Annexe D.

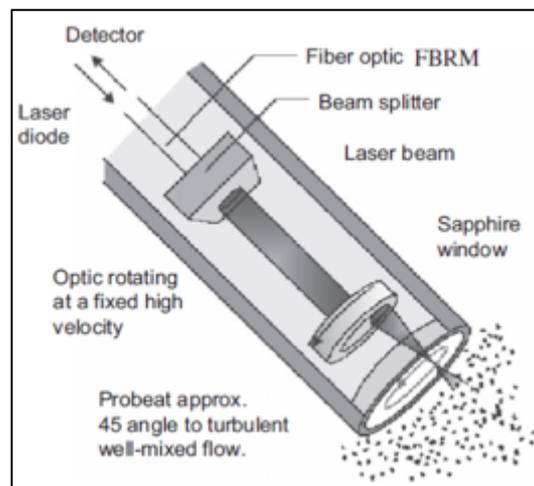


Figure 15 Analyse des particules par le FBRM

Il existe plusieurs moyens pour représenter les distributions de cordes des particules. Dans le cadre de ce travail, ce sera une représentation en fraction de masses cumulées en fonction des cordes $F(\text{cordes})$ qui sera utilisée. En effet, un mode d'acquisition du logiciel permet de mesurer les volumes des particules. Ainsi il est possible, via la densité, de convertir les grandeurs volumiques en grandeur massique. La figure 16 est une représentation de cette distribution.

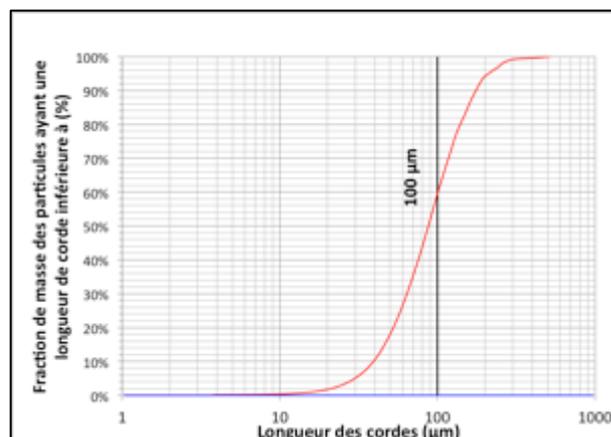


Figure 16 Fraction de masse cumulée en fonction des cordes

L'avantage de ce type de présentation est que les distributions de taille des particules peuvent être comparées aux distributions des vitesses de chute des expériences ViCAs. La réalisation de ces représentations à partir des données brutes mesurées par le Lasentec est développée en annexe F.

2. Reproductibilité des expériences

Cette section aborde la reproductibilité des essais FBRM. Pour cela, des réplicas sont réalisés à partir d'échantillons d'eaux usées prélevées en sortie du décanteur pilote. Les paramètres opératoires sont définis dans le protocole opératoire en Annexe D.

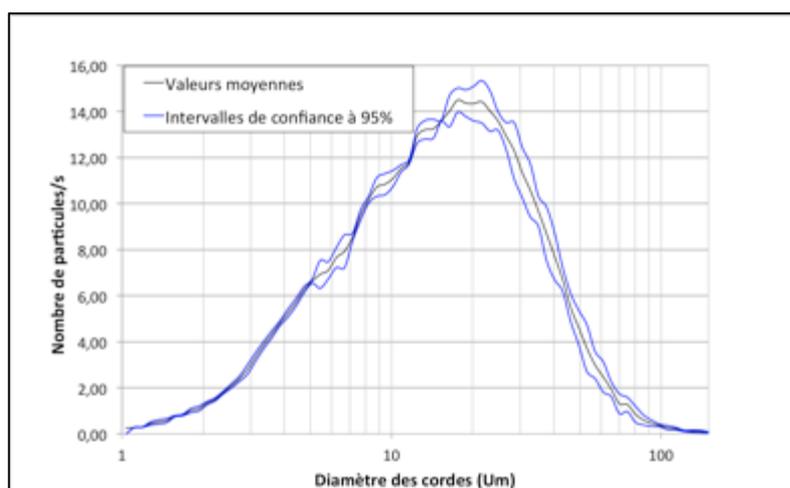


Figure 17 Intervalles de confiance pour les essais FBRM

La figure 17 représente une distribution moyenne de la taille des cordes pour un échantillon contenant des particules dans une gamme allant de 1 à 150 μm . Ces moyennes sont encadrées par leurs intervalles de confiances à 95%. Ces courbes ont été obtenues au moyen de l'analyse de trois sous-échantillons. Le tableau 2 réunit un extrait des intervalles de confiance issu du test pour des cordes de 1, 10, 50, 99 et 150 μm .

Tableau 2 Intervalles de confiance pour les essais FBRM

Type de distribution	Echantillon en sortie du décanteur	
Nombre d'échantillons	3	
Longueur des cordes (μm)	Comptage des particules (#/s)	$E_{95\%}$ +/- (%)
1	0,26	4
10	11,08	3
50	4,60	16
99	0,33	16
150	0,05	8

Dans le cadre des analyses des eaux usées, ces intervalles d'erreurs sont tolérables. Ce constat a pu être également observé à plusieurs reprises sur d'autres tests. Ainsi, les expériences effectuées au cours de la campagne seront réalisées sans réplicas.

5. Relation entre les vitesses de chute et les cordes des particules

L'équation de Stokes (p.5), décrit le diamètre des particules comme un facteur important pour décrire la décantation. Par conséquent, cette partie est consacrée à la détermination expérimentale de la relation entre les vitesses de chute et les cordes des particules. Pour y parvenir, le couplage entre les méthodes ViCAs et FBRM est opéré. Pour établir la relation, il est nécessaire de convertir les données brutes provenant de la distribution de la taille des particules.

Ce traitement des données consiste à ramener chaque longueur de cordes à une fraction de masse cumulée, voir la figure 18. La méthode permettant d'établir les représentations $F(\text{cordes})$ est détaillée en annexe F.

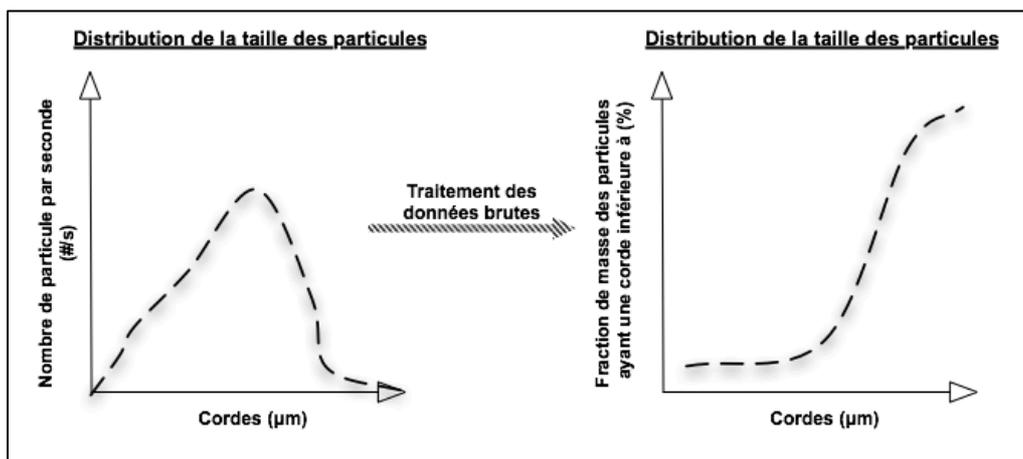


Figure 18 Conversion des données brutes de distribution de la taille des particules

Ces fractions sont identifiées aux fractions de masse de particules provenant des distributions des vitesses de chute des particules (courbes $F=(V_c)$), voir figure 19.

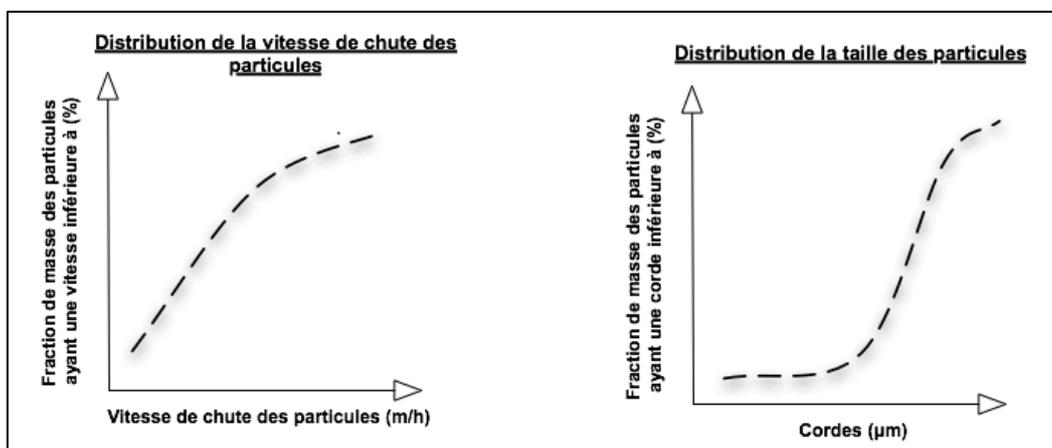


Figure 19 Courbes $F(V_c)$ et $F(\text{cordes})$

En effet, les représentations $F=(cordes)$ et $F=(Vc)$ possèdent un axe en commun, celui des fractions de masse. Par conséquent, les vitesses de chutes des particules sont associées à leurs cordes respectives.

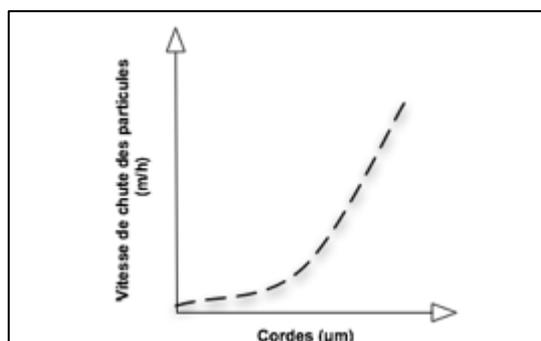


Figure 20 Relation entre les vitesses de chute et les cordes des particules (Cordes= f(Vc))

La figure 20 présente l'allure des courbes reliant les cordes des particules à leur vitesse de chute respective : Cordes=f(Vc). La réalisation de ces représentations est détaillée en annexe G. Dans la section suivante, les relations obtenues à partir des résultats expérimentaux seront présentées et discutées.

6. Campagne d'échantillonnage

Dans le cadre du projet primEAU, une campagne d'échantillonnage est programmée pour l'année 2013. L'objectif principal est l'étude de l'influence de plusieurs paramètres opératoires sur le décanteur pilote. Les résultats des expériences servent de base pour la modélisation et l'optimisation de la décantation primaire. Dans cette partie, le plan expérimental de la campagne et les conditions d'échantillonnage seront développés.

1. Plan expérimental

La campagne d'échantillonnage vise à étudier la décantation primaire à l'aide du pilote de la station Est de la ville de Québec. Pour cela, 3 paramètres sont étudiés :

- Le débit d'alimentation, 3 conditions : 2, 6 et 10 m³.h⁻¹;

La variation du débit d'alimentation permet de mettre en évidence l'influence du temps de séjour hydraulique et la charge hydraulique sur la décantation des particules.

- L'heure d'échantillonnage, 2 conditions : le jour et la nuit;

La charge des particules dans l'affluent varie énormément dans une journée, ainsi, il est important de mesurer l'impact de cette dernière. De ce fait, deux charges caractéristiques du jour et de la nuit seront testées.

- L'ajout de produit chimique, 4 conditions : Aucun produit, Sel d'aluminium (alun), avec polymère produit vert (Tanin seul) et un autre produit vert (amidon cationique seul).

Les produits chimiques utilisés dans les stations pour favoriser les phénomènes de coagulation, floculation et décantation sont également testés. Parmi eux, on peut citer les produits verts, qui présentent des propriétés de biodégradabilité.

L'étude de ces conditions représente en tout 24 expériences différentes (3 x 2 x 4). Pour chacune des expériences, plusieurs paramètres sont analysés, voir la figure 18.

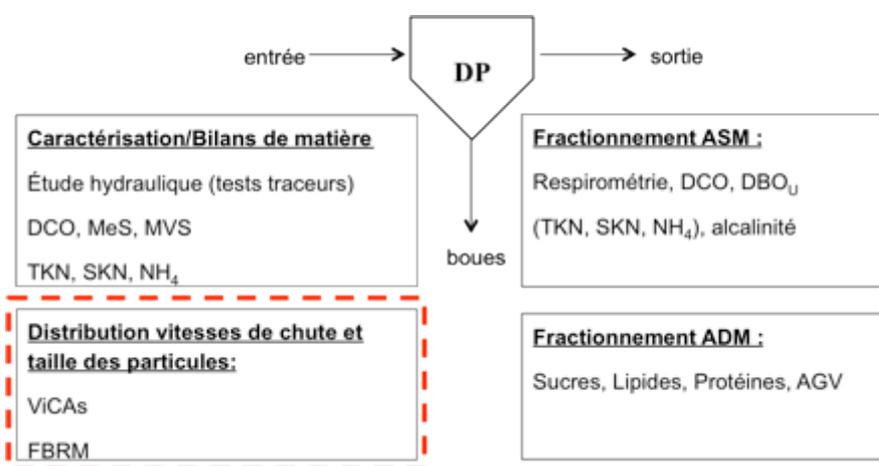


Figure 21: Paramètres physiques, chimiques et biologiques analysés sur le décanteur pilote

Dans le cadre de ce rapport, ce sont uniquement les analyses ViCAs et FBRM qui sont développées. Les autres analyses sont effectuées simultanément par les autres membres de l'équipe au laboratoire d'environnement.

Pour ce qui concerne la caractérisation des vitesses de chute, seulement l'entrée et la sortie du décanteur seront étudiées. En revanche, les analyses réalisées par le FBRM seront portées sur les trois points du système. En effet, l'analyse des boues, en plus de l'entrée et de la sortie, permet de mettre en évidence la présence des grosses particules ayant décantées de la charge d'alimentation.

Cette campagne d'échantillonnage a commencé à la fin du mois de mars et avance au rythme d'une expérience par semaine.

2. Déroulement d'un échantillonnage

A l'échelle d'une semaine, le lundi est réservé à la maintenance du pilote, à sa mise en régime et à la préparation du laboratoire. Le mardi, les échantillons peuvent être prélevés et ramenés au laboratoire pour débiter les analyses.

L'analyse des échantillons doit se faire le plus rapidement possible afin d'éviter tout phénomène de dégradation physico-chimique. En effet, après un certain temps, des phénomènes de floculation peuvent induire d'importantes erreurs sur les tests de vitesse de chute ou de détermination de la taille des particules. C'est pourquoi pour ce type de test, on effectue les analyses dans les 24 heures qui suivent l'échantillonnage. La fin de la semaine est réservée à l'exploitation des résultats, aux traitements des données et à la rédaction.

Mise en régime permanent du décanteur pilote

Pour chacune des semaines de la campagne, une prise d'échantillons sur le décanteur pilote de la station Est est réalisée. Suivant le planning hebdomadaire, l'échantillonnage se déroule chaque mardi matin. Avant de pouvoir prélever les échantillons, le pilote doit être en régime permanent. Le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre du système est évalué à environ trois fois le temps de séjour hydraulique, voir l'équation 4 :

$$T_s = \frac{V_{\text{décanteur}}}{Q} \quad (4)$$

Avec :

- T_s : Temps de séjour hydraulique (h);
- $V_{\text{décanteur}}$: Volume du décanteur pilote ($4,85 \text{ m}^3$);
- Q : Débit d'alimentation du pilote ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

Dans le cadre de la campagne, le cas limite est celui pour lequel le débit est égal à $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, ce qui correspond à un temps de mise en régime d'environ 7 h 30. C'est la raison pour laquelle le démarrage est réalisé le lundi, la veille de l'échantillonnage.

Échantillonnage

Les prélèvements d'échantillons d'eaux usées s'effectuent sur le décanteur pilote de la station Est de Québec. Ces derniers sont prélevés aux trois points caractéristiques du système, c'est à dire l'entrée (affluent) et les sorties (effluent et boues), voir figure 2 , p.5.

Lorsque le pilote est en régime permanent, l'échantillonnage peut commencer. Pour cela, deux personnes doivent être présentes, afin de recueillir simultanément environ 15 L d'échantillons dans des conteneurs de 20 L. Les échantillons sont récupérés via des vannes de purge. En ce qui concerne les boues, une pompe située à la base du décanteur permet de prélever des volumes fixes d'environ 8 litres. L'opération dure environ 10 minutes.

Dans le cadre de la campagne d'analyse, les échantillonnages de "nuit" se font à 6 heures du matin et ceux de "jour", à 10 heures du matin. Une fois l'opération terminée, le pilote est arrêté et purgé. Les échantillons récupérés sont alors ramenés jusqu'au laboratoire d'environnement. Ensuite, ils sont homogénéisés et partagés par l'ensemble des membres de l'équipe afin que chacun puisse réaliser ses expériences. Les analyses sont démarrées le plus rapidement afin de limiter les phénomènes de dégradation.

5. Résultats et discussions

Cette partie est consacrée à la présentation des résultats des expériences ViCAs et FBRM. Dans un premier temps, les résultats de la campagne sont présentés et discutés. Ensuite, les relations entre les vitesses de chute et la taille des particules sont présentées. Le présent rapport ne contiendra pas l'ensemble des résultats de la campagne d'échantillonnage, dans la mesure où cette dernière se déroule jusqu'à l'été 2013. De plus, le fait que le présent rapport doit être déposé avant le 10 juin 2013 implique un nombre limité d'expériences.

1. Présentation des résultats ViCAs et FBRM

Dans le cadre de la campagne d'échantillonnage, les expériences ViCAs et FBRM permettent de mettre en évidence l'influence des paramètres étudiés sur les distributions des vitesses de chutes et des tailles des particules. Par conséquent, l'impact du débit d'alimentation, du type de charge et de l'ajout de produits chimiques est observé et commenté.

Le début de la campagne a été marqué par le phénomène de fonte des neiges. En effet, les charges d'entrées de la station ont présenté des caractéristiques particulières. Ces dernières sont présentées dans le premier paragraphe. Par la suite, les résultats des cinq premières semaines de la campagne d'échantillonnage sont présentés.

1. Impact de la fonte des neiges sur les expériences ViCAs

La campagne d'échantillonnage a débuté au cours de la semaine du 25 mars. A Québec, cette période correspond à la fonte des neiges. Ce phénomène a entraîné d'importantes variations de charge des particules dans les réseaux de captage de la Ville.

Les essais ViCAs effectués sur les échantillons prélevés du 25 mars au 26 avril mettent en évidence l'impact de cette période sur les mesures. La figure 19 représente la variabilité des résultats obtenus, en entrée et en sortie, pour deux expériences et pour deux périodes différentes. L'expérience du 16 avril caractérise des mesures de temps de fonte des neiges, tandis que l'essai du 7 mai, un temps sec.

La figure 22 représente également deux zones en pointillées. Ces zones correspondent à des tendances de mesures par temps sec, réalisées avec le protocole ViCAs par l'équipe modelEAU (Maruejols et al., 2011). Elles permettent de comparer les résultats obtenus par temps de fonte des neiges avec ceux obtenus par temps sec.

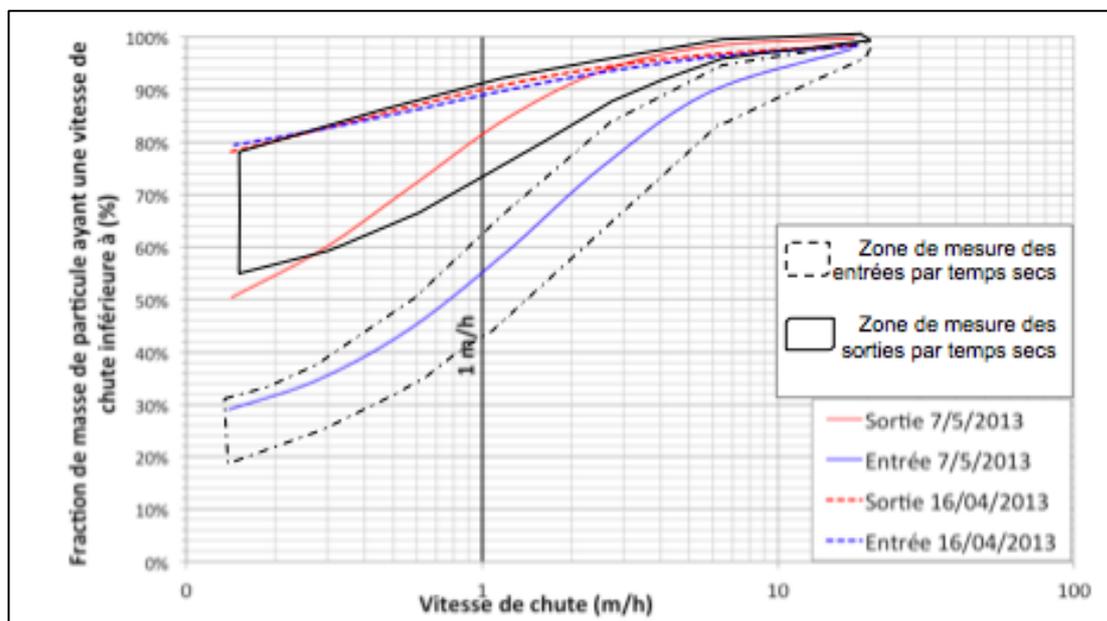


Figure 22: Variabilité des mesures provenant des essais ViCAs pendant la période de fonte

De manière générale, les mesures réalisées par temps sec via le protocole ViCAs présentent deux zones de mesures distinctes, une pour les distributions d'entrée et une autre pour les distributions de sorties. L'expérience du 7 mai (temps sec) reproduit la tendance représentée par les zones de mesure par temps sec.

Or, l'expérience du 16 avril (temps de fonte) révèle un décalage de la courbe d'entrée (courbe en bleu pointillé) vers la zone de sortie. Cette tendance a été observée pour les autres essais réalisés sur la période du 25 mars au 26 avril. Le phénomène de fonte pose problème pour ce type de travail, car la forte variabilité des mesures complique l'observation des paramètres étudiés.

2. Influence du débit

La variation du débit d'alimentation permet d'observer différentes distributions de vitesse de chute. La figure 23 représente les tests ViCAs réalisés de jour pour trois débits différents. On constate que plus le débit d'alimentation est faible plus les courbes sont élevées. Cela signifie qu'en sortie du décanteur, pour de faibles débits, la fraction de particules qui décantent lentement est plus importante. Autrement dit, une plus grande partie des particules a été éliminée. Le tableau 3 résume les caractéristiques des trois expériences.

Tableau 3 Caractéristiques des flux d'entrée et de sortie du pilote pour les essais du test du débit

Dates des expériences	09/04/13	16/04/13	26/03/13
Débit d'alimentation ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	2	4	6
$[\text{MES}]_{\text{Entrée}}$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	171	148	185
$[\text{MES}]_{\text{Sortie}}$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	63	72	123
Abattement des MES (%)	63	51	33

Ce constat permet de mettre en évidence une élimination plus importante des particules, pour de faibles débits. Par exemple, pour un débit de $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 88% des particules ont une vitesse inférieure à $1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, contre 84% et 79% pour les débits de $4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et $6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

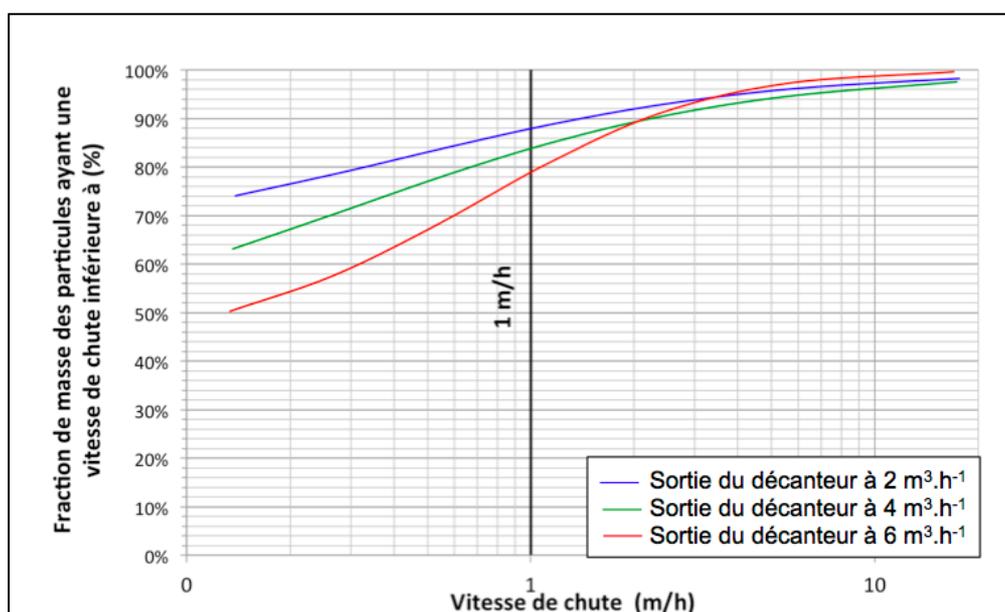


Figure 23: Influence du débit d'alimentation en sortie du décanteur

Ces observations sont logiques dans le sens où plus le débit d'alimentation est faible, plus le temps de séjour des particules dans le pilote est long. Par conséquent, les particules qui possèdent de faibles vitesses de chutes ont davantage de temps pour décantier. De plus, les valeurs d'abattement des MES viennent confirmer cette explication, dans la mesure où le taux d'élimination des particules augmente avec la diminution du débit. En effet, les valeurs d'abattelements sont de 33, 51 et 63% respectivement pour les débits à 6, 4 et $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Dans le cadre de la décantation primaire, il existe un optimum pour le débit d'alimentation. En effet, la réduction du débit d'alimentation implique pour des performances d'abattelements identiques, des ouvrages de décantation plus grands ou plus nombreux. Un compromis est alors nécessaire entre le choix du débit d'alimentation et le dimensionnement des ouvrages hydraulique.

Ces résultats sont également intéressants pour la modélisation. En effet, ces derniers pourront être comparés aux prédictions théoriques estimées par les modèles. Par conséquent, les résultats expérimentaux serviront de références pour évaluer la pertinence des modèles.

3. Influence de la charge

Dans une usine de traitement des eaux usées, la charge polluante entrante est très variable à l'échelle d'une journée. En effet, les habitants ne consomment pas l'eau de façon constante. Dans le cadre de la campagne d'échantillonnage, deux conditions de charges sont testées, une de nuit pour simuler une charge réduite et une de jour pour simuler une charge élevée.

Dans les premières semaines de la campagne, deux expériences mettent en évidence les différences entre les deux conditions de charge. Ces dernières ont été réalisées avec un débit d'alimentation de $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et sans ajout de produit chimique.

Tableau 4 Caractéristiques des flux d'entrée et de sortie du pilote pour les essais du test de la charge

Type	Charge de jour	Charge de nuit
Dates des expériences	09/04/13	16/04/13
Débit d'alimentation	$2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	
$[\text{MES}]_{\text{Entrée}} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	171	47
$[\text{MES}]_{\text{Sortie}} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	63	34
Abattement des MES (%)	63	27

Dans le tableau 4 il est possible d'observer la grande différence de concentrations entre les deux essais. La charge de jour possède une concentration de $171 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, contre seulement $47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ pour celle de nuit. Ces valeurs de concentrations distinctes correspondent tout à fait à ces types de charges.

La figure 24 représente les essais ViCAs correspondant aux deux expériences. A cause de l'impact de la fonte des neiges, on constate que les distributions de vitesse d'entrées sont très hautes, ce qui ne reflète pas les mesures réalisées par temps sec.

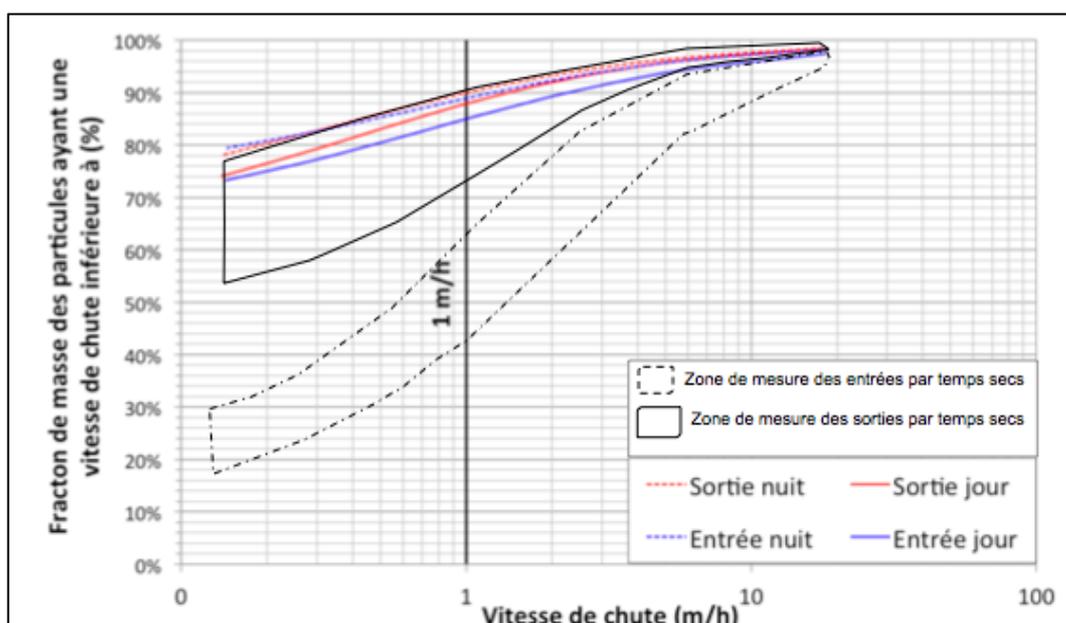


Figure 24: Essais ViCAs : Influence du type de charge dans le décanteur pilote

Les distributions d'entrée et de sortie, associées à l'essai de nuit sont superposées pour les expériences ViCAs et FBRM, voir les figures 24 et 25. Cela signifie que les distributions granulométriques et les profils de vitesses de chute sont identiques.

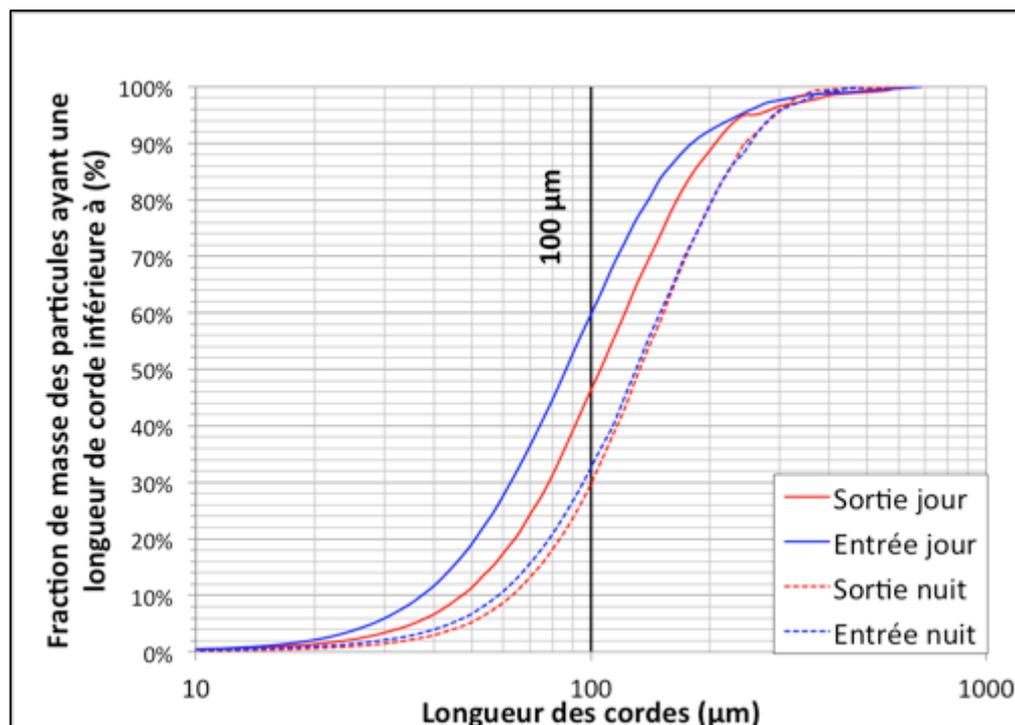


Figure 25: Essais FBRM : Influence de la charge dans le décanteur pilote

D'autre part, on observe des différences significatives pour l'expérience de jour. En effet, on constate que les distributions granulométriques pour l'entrée et la sortie présentent une différence de 14% pour une longueur de corde de 100µm.

Une observation intéressante est à souligner. On constate sur la figure 25 que les deux types de charges présentent de plus grosses particules en sortie qu'en entrée. Par exemple, pour l'expérience de jour, on observe que 46 % des particules présentent une longueur de corde inférieure à 100 µm en sortie, contre 60 % en entrée. Ce constat semble illogique, car les grosses particules devraient décanter plus facilement dans le décanteur. Cependant, il est possible d'avoir dans la charge d'alimentation des particules de grosse taille et qui possèdent une densité faible. De ce fait, ces dernières ne peuvent être retenues dans le décanteur et se concentrent dans la sortie. Ces particules peuvent correspondre à de la matière organique légère par exemple le papier.

Ce constat a été réalisé pour chacune des expériences sans ajout de produit chimique et révèle que les charges d'alimentation présentent des densités très hétérogènes. Si on compare les deux expériences, on déduit qu'une eau avec une forte concentration en MES a tendance à mieux décanter qu'une eau faiblement concentrée. En effet, on constate un abattement de 63% pour la charge de jour, contre 27% pour celle de nuit. Cette différence s'explique par le fait que la formation de floc est statistiquement plus favorable, lorsque dans une charge, la concentration des particules est plus élevée.

En effet, si dans un même volume, le nombre de particules en mouvement est plus grand, alors ces dernières ont plus de chances de se rencontrer et de former des floccs.

La campagne d'échantillonnage prévoit d'autres tests de charge, en faisant varier les conditions de débit et d'ajout de produit chimique. Ainsi, il sera possible de mesurer l'influence de ces différents facteurs sur la décantation des fortes et faibles charges.

4. Influence de l'ajout de produits chimiques

Afin de favoriser l'élimination des particules de petite taille qui n'ont pas le temps de décanter, des produits chimiques sont utilisés. Ces produits permettent le regroupement des particules entre elles, afin qu'elles chutent plus rapidement : c'est le phénomène de coagulation-floculation.

Dans le cadre de la campagne d'échantillonnage, quatre conditions d'ajout sont testées : un sel d'aluminium (alun avec un polymère), un produit biodégradable (tanin seul), un autre produit biodégradable (amidon cationique seul) et aucun ajout de produit chimique. Dans la mesure où la plupart de ces expériences sont planifiées pour la fin du mois de mai, les résultats des tests associés ne pourront être inclus dans ce rapport. Néanmoins, une expérience avec l'alun peut être présentée. Il est important de préciser que le produit est injecté après le point d'échantillonnage de l'entrée du décanteur. Par conséquent, l'échantillon d'entrée associé à l'expérience avec ajout d'alun ne contient pas de produit chimique.

La figure 26 représente les distributions de vitesse de chute de deux expériences réalisées sur le décanteur pilote. Dans les deux cas, les tests ont été réalisés avec un débit d'alimentation de $6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et une charge de jour. Les courbes en pointillés représentent les distributions de vitesse de chute en entrée et en sortie, pour l'essai avec injection d'alun et de polymère dans le décanteur. Ce résultat est comparé avec un test sans ajout de produit chimique, représenté par les courbes en trait plein. Le tableau 5 réunit les caractéristiques des deux expériences.

Tableau 5 Caractéristiques des flux du pilote pour les essais du test de l'ajout de produit chimique

Type	Sans ajout de produit	Ajout de produit
Dates des expériences	27/03/13	23/04/13
Débit d'alimentation	$6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	
$[\text{MES}]_{\text{Entrée}} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	145	196
$[\text{MES}]_{\text{Sortie}} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	91	123
Abattement des MES (%)	37	33

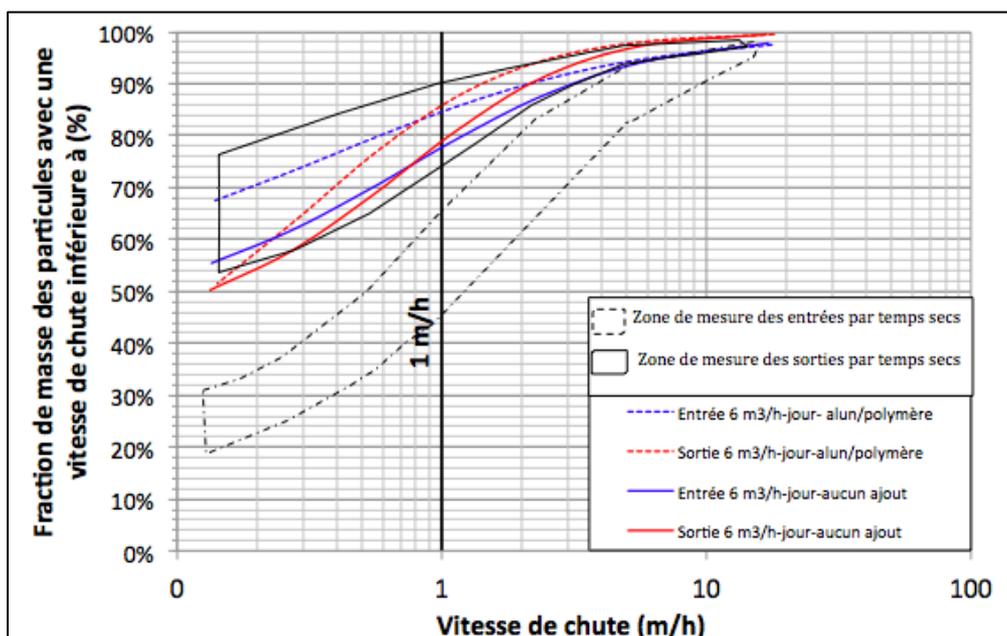


Figure 26: Essais ViCAs : Influence de l'injection d'alun et de polymère dans le décanteur pilote

Sur la figure 26 pour une vitesse de $1 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$, on observe un écart d'environ 8 % entre les deux courbes de sortie. Il est donc difficile d'observer l'impact de l'ajout des produits chimiques. En effet, des tests en laboratoire ont permis de voir que les points d'injection étaient mal positionnés et ne favorisaient pas une bonne mise en contact des produits avec l'eau usée.

De plus, on observe encore une fois, le décalage des distributions d'entrées par rapport à la zone de mesures par temps sec. On suppose que ce déplacement est également causé par le phénomène de fonte des neiges. En effet, ces deux expériences ont été réalisées sur la période de mars et avril.

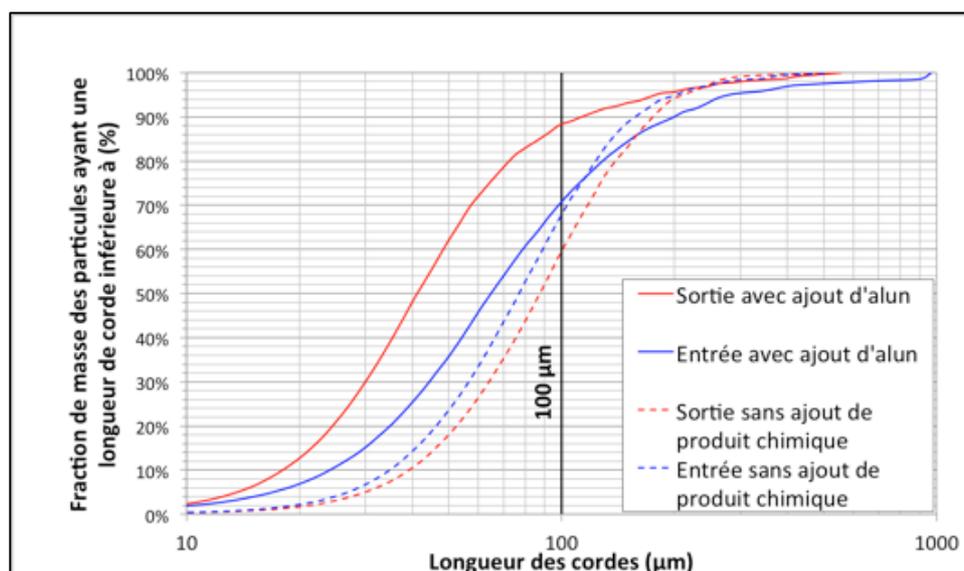


Figure 27: Essais FBRM : Influence de l'injection d'alun et de polymère dans le décanteur pilote

Sur la figure 27, on observe les fractions de masse des particules en fonction de la taille des cordes. Par exemple, si on observe les courbes de sortie, on constate pour l'expérience avec ajout de produit que 88% de la masse des particules possèdent des cordes d'une longueur inférieure à 100 μm , contre 60% pour l'expérience sans ajout. Cela met en lumière un impact des produits sur les particules. Ces derniers sont donc capables de favoriser la décantation des grosses particules plus légères.

Contrairement aux expériences sans ajout de produit chimique, les essais FBRM relatifs à l'ajout des produits présentent une inversion dans les courbes de distribution entre l'entrée et la sortie. En effet, la courbe de sortie expose cette fois-ci une fraction de petites particules plus importante que pour la courbe d'entrée. Ce constat signifie que les produits impactent non seulement les particules par les phénomènes de coagulation et de floculation, mais sont également capables d'accroître la densité des particules légères qui ont du mal à décanter.

Au regard des performances d'abattement en MES, il est difficile de dire que l'ajout d'alun dans le système a été efficace. En effet, on observe une efficacité d'abattement de 33% dans le cas de l'ajout de produit contre 37% pour l'essai sans ajout. Par conséquent, il est difficile de qualifier cet essai comme concluant dans la mesure où les produits n'ont pas démontré leur efficacité.

A partir de la mi-mai, les autres produits chimiques seront testés. Ces expériences permettront la comparaison entre les différents produits chimiques dans le décanteur pilote.

2. Relation entre vitesse de chute et taille des particules

Dans cette partie, les relations Cordes = $f(V_c)$, sont présentées pour trois expériences et comparées au modèle théorique de Stokes.

La figure 28 présente les résultats observés pour les entrées (traits pointillés) et les sorties (traits continus) de trois des expériences de la campagne d'échantillonnage. Les courbes bleues et violettes correspondent à des essais réalisés sans aucun ajout de produit chimique dans le décanteur pilote.

Les courbes jaunes correspondent à l'expérience réalisée avec l'ajout d'alun et de coagulant. Ces résultats concordent avec ceux présentés par Imen Bel Hadj dans son mémoire de maîtrise (2013).

Quant aux courbes rouge et noire, elles correspondent aux vitesses de chute théoriques évaluées par le modèle de Stokes pour des particules sphériques et deux densités différentes : $d = 1,15$ pour la courbe noire et $d = 1,01$ pour la courbe rouge. Ces deux courbes représentent un intervalle qui inclue les résultats expérimentaux.

Les paramètres utilisés pour le modèle de Stokes sont :

- Des masses volumiques pour les particules⁵ de 1010 et 1150 kg.m^{-3} ;
- Une masse volumique pour l'eau de 1000 kg.m^{-3} ;
- Une viscosité dynamique pour l'eau de 10^{-3} pa.s ;
- Une accélération de la pesanteur de $9,81 \text{ m.s}^{-2}$.

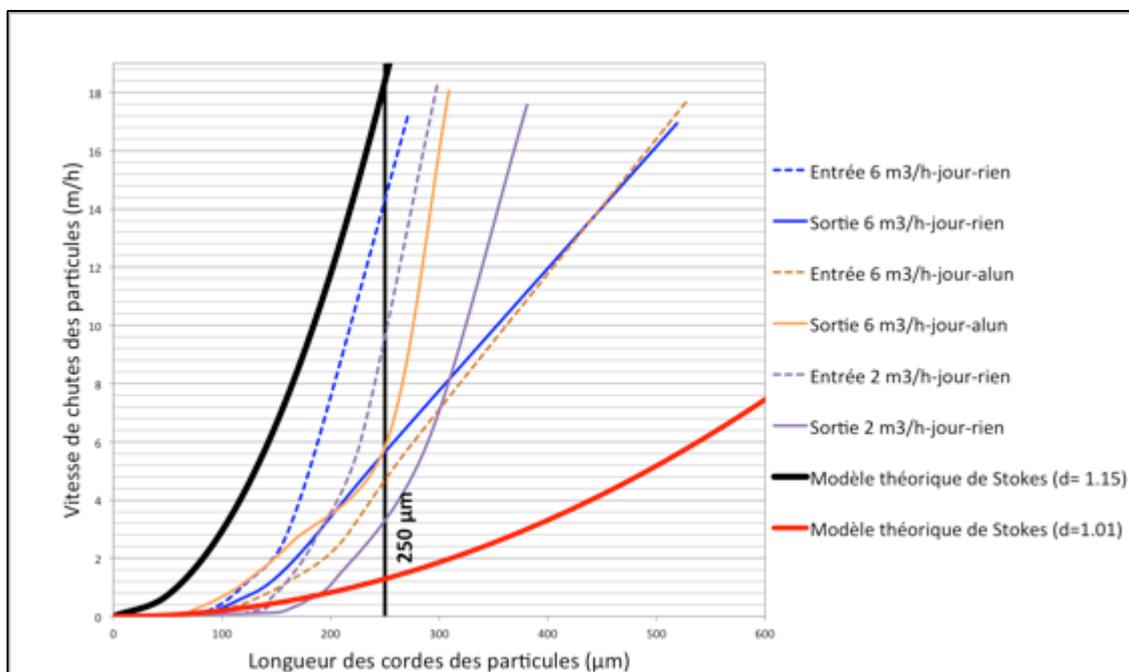


Figure 28 Courbes expérimentales $V_c=f(\text{Cordes})$ et comparaison avec le modèle de Stokes

Dans un premier temps, on observe une variabilité entre les expériences. Pour une longueur de corde de $250 \mu\text{m}$, on constate que les vitesses des particules sont très différentes d'un résultat à un autre. Cette observation s'explique par le fait que la densité moyenne des particules pour chaque expérience varie en fonction de la nature de la charge. En effet, si la masse volumique demeure constante, on supposerait que les relations pourraient se confondre (aux incertitudes expérimentales près), ce qui n'est pas le cas.

⁵ Cette valeur concorde avec la gamme de densité des MES contenues dans les eaux usées (entre ≈ 1 et $1,52$), proposé par Grommaire et Mertz (1998).

Dans le cas des expériences sans ajout de produit chimique, on remarque que les courbes d'entrée présentent, pour une corde équivalente, des vitesses de chute plus élevées qu'en sortie. Par exemple, pour l'expérience à $2 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, pour une longueur de corde de $250 \text{ }\mu\text{m}$, on obtient une vitesse de chute de $9,6 \text{ m.h}^{-1}$ en entrée, contre $3,2 \text{ m.h}^{-1}$ en sortie. Cette différence s'explique par le fait que la densité moyenne des particules qui sortent du décanteur est plus faible qu'en entrée. De ce fait, elles présentent des vitesses de chute plus faibles et ont des difficultés à être retenues dans le décanteur.

En ce qui concerne l'expérience avec l'ajout d'alun (courbes en jaune), on observe une toute autre tendance. En effet, cette fois-ci, on observe une courbe d'entrée moins dense que celle en sortie. Pour une taille de corde de $250 \text{ }\mu\text{m}$ on obtient une vitesse de chute de $4,8 \text{ m.h}^{-1}$ en entrée, contre 6 m.h^{-1} en sortie. Cette observation s'oppose aux tendances observées sur les essais sans ajout de produit chimique et s'explique par l'effet de l'alun sur les particules. En effet, pendant le processus de coagulation et de floculation, l'aluminium sous forme d'hydroxyde se lie aux particules via des interactions électrostatiques de type liaison hydrogène. Par conséquent, quand les particules sortent du décanteur, leur densité moyenne n'est plus la même qu'en entrée : elle a augmenté. Ce qui explique que pour des tailles similaires, les particules contenues dans l'effluent présentent des vitesses de chutes plus élevées que dans l'affluent.

Malgré la variabilité des résultats, il est possible de constater que les relations expérimentales présentent des similitudes avec le modèle de Stokes. En effet, on observe que les relations expérimentales et les courbes du modèle théorique présentent des allures de fonction de puissance.

A partir du modèle de Stokes, il est possible d'évaluer les masses volumiques associées aux résultats expérimentaux. En effet, pour chacun des couples Vitesse de chutes/Taille des cordes, une masse volumique est estimée. Un exemple de calcul est disponible en annexe H. Le tableau 6, ci-dessous représente les valeurs moyennes obtenues pour les trois expériences présentées.

Tableau 6 Masses volumiques moyennes en entrée et en sortie du décanteur pilote

Expériences	Masse volumique moyenne (kg.m^{-3})	
	Entrée	Sortie
$6 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ - jour- sans ajout	1056	1030
$2 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ - jour- sans ajout	1042	1025
$6 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ - jour- avec ajout	1026 ⁶	1049

Ces valeurs concordent avec les résultats exposés sur la figure 28, dans la mesure où les sorties présentent des densités plus faibles qu'en entrée, sauf dans le cas de l'expérience avec ajout d'alun et de coagulant.

Ce tableau montre également que les densités moyennes des particules dans les différentes expériences sont variables et que ces dernières impactent fortement le paramètre de vitesse de chute.

⁶ Cette densité correspond aux MES avant l'ajout d'alun et de coagulant.

En effet, si on compare les résultats des entrées des expériences sans ajout de produit chimique, à 250 μm , un écart de densité de 14 kg.m^{-3} implique une différence de vitesse de chute de $4,6 \text{ m.h}^{-1}$, ce qui est non négligeable.

Les relations reliant la vitesse de chute des particules à leurs cordes, permettent de mesurer la variabilité des essais en conditions réelles. Ainsi, il est constaté que les charges d'alimentation du décanteur contiennent des particules dont la densité moyenne est variable d'un essai à un autre. Au regard des résultats, il est important de souligner le caractère hétérogène de la densité des particules dans le décanteur pilote. En effet, l'écart de densité entre les relations d'entrée et de sortie est très significatif.

De plus, ces relations permettent également de mesurer l'impact de l'ajout de produit chimique sur les caractéristiques de décantation des particules. Les prochains résultats de la campagne d'échantillonnage devraient pouvoir confirmer ces observations.

6. Conclusion

L'objectif de ce stage s'inscrit dans le cadre d'une campagne d'échantillonnage qui a débuté au printemps 2013. Le pilote de décantation primaire situé à la station Est de la Ville de Québec, en est l'outil central.

Le travail présenté dans ce rapport présente les résultats obtenus lors des cinq premières semaines d'analyses. Il s'articule autour de la caractérisation des vitesses de chute et de la taille des particules contenues dans les eaux usées. Les protocoles ViCAs et FBRM ont été utilisés pour mesurer l'influence de différents paramètres tels que le débit d'alimentation, l'ajout de produit chimique et le type de charge sur le pilote. Ces techniques sont particulièrement adaptées pour analyser les MES dans les eaux usées et l'ensemble des résultats servira de base pour la modélisation.

Un couplage entre les deux protocoles a permis d'établir des relations expérimentales reliant les vitesses de chutes aux tailles des particules. Les résultats obtenus concordent avec le modèle théorique de Stokes et ont pu mettre en évidence l'hétérogénéité des densités des charges d'alimentation. La densité est donc un critère essentiel pour la caractérisation du décanteur

Les caractéristiques de vitesse de chutes et de taille des particules constituent des paramètres physiques clés de la décantation. L'ensemble des résultats obtenus servira de base à la modélisation des ouvrages de décantation primaire. Par conséquent, ce travail constitue une réponse aux objectifs du projet primEAU.

Ce stage fut une bonne initiation au monde de la recherche. La participation aux travaux de l'équipe modelEAU m'ont amené à progresser sur plusieurs plans comme celui de la rigueur, la communication et la présentation du travail. J'ai pu également approfondir mes connaissances dans le domaine du génie des eaux.

Synthèse bibliographique

L'eau. La vie. L'avenir.

Bibliothèque nationale du Québec (2002).

Bel Hadj I.

Caractérisation de la taille des particules et de leur vitesse de chute en décantation primaire
Mémoire de maîtrise, Université Laval, (2013), 20-125.

Berrouard E.

Caractérisation de la décantabilité des eaux pluviales
Mémoire de maîtrise, Université Laval, (2010), 23-38.

Chancelier J-P., Chebbo G. et Lucas-Aiguier E.

Estimation of settling velocities.

Wat. Res., (1998), 32(11), 3461-3471.

Chebbo G. et Gromaire M.-C.

ViCAs-An operating protocol to measure the distributions of suspended solid settling velocities within urban drainage samples

J. Environ. Eng., (2009), 135, 768-775.

Chebbo G., Gromaire M.-C. et Lucas E.

Protocole ViCAs : mesure de la vitesse de chute de MES dans les effluents urbains.

TSM, (2003), 12, 39-49.

De Clercq B., Lant P. et Vanrolleghem P.

Focused beam reflectance technique for in situ particle sizing in wastewater treatment settling tanks.

J. Chem. Technol. Biotechnol., (2004), 79, 610-618.

Gromaire-Mertz M.-C.

La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire, caractéristiques et origines

Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, (1998), 60.

Levine A., Tchobanoglous G. et Asano T.

Characterization of the size distribution of contaminants in water: treatment and reuse implications.

J. Wat. Pollut. Control Fed., (1985), 57, 805-816.

Maruejols T., Lessard P., Wipliez B., Pelletier G. et Vanrolleghem P.

Characterization of the potential impact of retention tank emptying on wastewater primary treatment: a new element for CSO management

Wat.Sci. Tech., (2011), 64.9, 1902-1905.

Michelbach S. et Wohrle C.

Settleable solids from combined sewers: settling, stormwater treatment, and sedimentation rates in rivers.

Wat.Sci. Tech., (1994), 29(1-2), 95-102.

Torres A., Hasler M. et Bertrand-Krajewski J.-L.

Hétérogénéité spatiale et événementielle des vitesses de chute des sédiments décantés dans un bassin de retenue d'eau pluvial.

TSM, (2007), 11, 27-34.

Annexes

Liste des figures

Figure 1 Schéma d'un procédé de traitement des eaux usées.....	3
Figure 2 Schéma d'un décanteur primaire (DP).....	4
Figure 3 Pilote primEAU, station Est de la Ville de Québec.....	6
Figure 4 Pupitre de commande du pilote.....	7
Figure 5 Interface de contrôle du pilote, via le logiciel VNC Viewer.....	7
Figure 6 Banc de filtration des MES.....	7
Figure 7 Schéma d'un dispositif ViCAs (Chebbo et al. 2003).....	8
Figure 8 Masse cumulée des solides ayant décantés au cours du temps.....	9
Figure 9 Exemple d'une courbe $F(V_c)$	10
Figure 10 Intervalles de confiance pour les essais ViCAs.....	11
Figure 11 Illustration du poste Lasentec D600R.....	12
Figure 12 Les cordes mesurées par le FBRM.....	13
Figure 13 Exemple de distribution des longueurs de corde mesurées sur un échantillon d'eaux usées.....	13
Figure 14 L'échantillon, la sonde et le dispositif d'agitation.....	14
Figure 15 Analyse des particules par le FBRM.....	14
Figure 16 Fraction de masse cumulée en fonction des cordes.....	14
Figure 17 Intervalles de confiance pour les essais FBRM.....	15
Figure 18 Conversion des données brutes de distribution de la taille des particules.....	16
Figure 19 Courbes $F(V_c)$ et $F(\text{cordes})$	16
Figure 20 Relation entre les vitesses de chute et les cordes des particules ($\text{Cordes} = f(V_c)$).....	17
Figure 21: Paramètres physiques, chimiques et biologiques analysés sur le décanteur pilote.....	18
Figure 22: Variabilité des mesures provenant des essais ViCAs pendant la période de fonte.....	21
Figure 23: Influence du débit d'alimentation en sortie du décanteur.....	22
Figure 24: Essais ViCAs : Influence du type de charge dans le décanteur pilote.....	23
Figure 25: Essais FBRM : Influence de la charge dans le décanteur pilote.....	24
Figure 26: Essais ViCAs : Influence de l'injection d'alun et de polymère dans le décanteur pilote.....	26
Figure 27: Essais FBRM : Influence de l'injection d'alun et de polymère dans le décanteur pilote.....	26
Figure 28 Courbes expérimentales $V_c = f(\text{Cordes})$ et comparaison avec le modèle de Stokes.....	28
Figure 29 Dispositif ViCAs.....	35
Figure 30 Pompe à vide.....	35
Figure 31 Raccord reliant la tête de la colonne et la pompe.....	35
Figure 32 De gauche à droite, filtres en fibre de verre, supports filtrants et filtre dans sa coupelle.....	37
Figure 33 De gauche à droite, l'étuve, le dessiccateur et la balance.....	37
Figure 34 Interface d'acquisition du logiciel iC FBRM.....	41
Figure 35 Exemple de courbes $F = f(\text{cordes})$	45
Figure 36 Mise en relation des données ViCAs et FBRM.....	46

Liste des tableaux

Tableau 1 Intervalles de confiance à 95 % pour les essais ViCAs en entrée et sortie du décanteur.....	11
Tableau 2 Intervalles de confiance pour les essais FBRM.....	15
Tableau 3 Caractéristiques des flux d'entrée et de sortie du pilote pour les essais du test du débit.....	22
Tableau 4 Caractéristiques des flux d'entrée et de sortie du pilote pour les essais du test de la charge.....	23
Tableau 5 Caractéristiques des flux du pilote pour les essais du test de l'ajout de produit chimique.....	25
Tableau 6 Masses volumiques moyennes en entrée et en sortie du décanteur pilote.....	29
Tableau 7 Détermination des fractions de masse cumulée.....	44

Glossaire

- ADM : Anaerobie Digestion Model.
- AGV : Acides Gras Volatils.
- ASM : Activated Sludge Model.
- Cordes(V_c) : Courbes représentatives de la taille des cordes en fonction des vitesses de chute.
- DBO : Demande Biologique en Oxygène, critère permettant d'évaluer la partie biodégradable de la pollution contenue dans les eaux usées.
- DCO : Demande Chimique en Oxygène, critère permettant d'évaluer la charge polluante contenue dans les eaux usées.
- DP : Décanteur primaire.
- FBRM : Focused Beam Reflectance Measurement.
- F(cordes) : Courbes représentatives des fractions de masses cumulées en fonction de la taille des cordes.
- F(V_c) : Courbes représentatives des fractions de masses cumulées en fonction des vitesses de chute.
- MES : Matière En Suspension.
- MVS : Matière Volatile en Suspension, correspond à la fraction de matière organique contenue dans les particules.
- NH_4 : Azote Ammoniacal
- SKN : Azote Kjeldahl Soluble.
- TKN : Azote Total Kjeldahl (azote organique).
- Turbidité : Clarté d'une solution, peut être associé à sa concentration en MES.
- V_c : Vitesse de chute des particules.
- ViCAs : Vitesse de Chute en Assainissement.

Annexe A : Mode opératoire de la méthode ViCAs

Dans cette section, un résumé du protocole ViCAs est développé. Le matériel nécessaire pour la réalisation de l'expérience est le suivant :

- Un dispositif ViCAs, voir figure 29;
- Une feuille de résultats ViCAs;
- Une pompe à vide et un tuyau de raccordement, voir les figures 30 et 31;
- Un chronomètre;
- Des filtres en fibre de verre de porosité $1,2 \mu\text{m}$ conditionnés pour l'analyse des MES;
- Un b cher de 5L avec une spatule pour homog niser l'échantillon.

Dans un premier temps, la concentration initiale C_0 de l'échantillon est déterminée. De ce fait, une analyse en triplicata est réalisée en suivant le protocole des MES, développé dans la suite du rapport.

Les manipulations consistent dans un premier temps à charger un échantillon homogène d'environ 4,5L, dans la base du dispositif ViCAs. Pour cela, le b cher et la spatule sont utilisés. La pompe à vide permet de relever l'échantillon dans la colonne, via une connexion en tête du dispositif, voir la figure 31. Une fois l'échantillon à l'intérieur de la colonne, le chronomètre est déclenché et dans le même temps, on place la première coupelle à la base de la colonne ce qui permet de collecter les premières particules.

Afin de favoriser la réussite de l'essai, il est impératif de réaliser ces étapes le plus rapidement possible. En effet, dès lors que l'on cesse d'homog niser l'échantillon, les grosses particules commencent à décanter. Il est donc recommandé d'être assisté pour le démarrage de l'essai afin de favoriser la qualité de résultats.

Pendant un essai, sept masses de particules sont recueillies à l'aide des coupelles aux intervalles de 2, 6, 14, 30, 62, 126 et 254 minutes. Les changements de coupelles doivent se faire le plus soigneusement possible, en limitant les perturbations dans le dispositif. Le contenu de chaque coupelle est filtré suivant le protocole des MES. A la fin de la manipulation, l'échantillon demeurant dans la colonne est collecté et analysé en triplicata, afin de déterminer sa concentration finale C_f en MES.



Figure 29 Dispositif ViCAs



Figure 30 Pompe à vide



Figure 31 Raccord reliant la tête de la colonne à la pompe

Après avoir atteint l'ensemble des masses des coupelles et la concentration initiale et finale, les valeurs sont reportées dans une feuille de calcul ViCAs sur Excel, voir Annexe C.

Bilan de matière

La feuille de calcul Excel intègre également un outil permettant de réaliser un bilan matière. A partir des concentrations initiales et finales de l'échantillon, ainsi que des masses prélevées au moyen des coupelles, il est possible d'évaluer l'erreur sur le bilan et donc la fiabilité de l'expérience. Le bilan de masse se définit selon l'équation 5 (Chebbo et al., 2003a) :

$$E = \frac{M_{\text{initiale}} - (M_{\text{décanté}} + M_{\text{finale}})}{M_{\text{initiale}}} \times 100 \quad (5)$$

Avec :

- E : L'erreur sur le bilan de matière (%);
- M_{initiale} : La masse initiale de particules présentes dans la colonne ViCAs au début de l'expérience (mg);
- $M_{\text{décanté}}$: La somme des masses décantées et collectées dans chacune des coupelles du ViCAs (mg);
- M_{finale} : La masse finale de particules présentes dans la colonne ViCAs au terme de l'expérience (mg).

Ces masses se déterminent à partir des concentrations en MES de l'échantillon et de la géométrie de la colonne. Par exemple, pour déterminer M_{initiale} , il suffit d'appliquer la relation 6 :

$$M_{\text{initiale}} = C_0 \times V_{\text{colonne}} = \frac{C_0 H \pi R^2}{1000} \quad (6)$$

Avec :

- C_0 : La concentration en MES de l'échantillon (mg.L^{-1}), déterminée par une méthode développée dans la suite du rapport;
- V : Le volume de la colonne (L);
- H : La hauteur de liquide dans la colonne (cm);
- R : Le rayon de la colonne (cm).

En ce qui concerne la $M_{\text{décanté}}$, elle se calcule avec l'équation 7 :

$$M_{\text{décanté}} = \sum_{i=1}^n m_i \quad (7)$$

Avec m_i : La masse recueillie dans une coupelle (mg) et n le nombre de coupelles.

Annexe B : Mode opératoire du dosage des MES

La détermination de la concentration en MES se déroule en plusieurs étapes. Le matériel nécessaire pour la réalisation du protocole est :

- Filtres en fibre de verre avec une porosité de 1,2 μm , voir figure;
- Coupelles en aluminium pour contenir les filtres;
- Pissette d'eau distillée;
- Banc de filtration complet (rampe, supports, fiole de garde et pompe à vide);
- Etuve à 105 °C;
- Dessiccateur;
- Balance de précision (+/- 0,1 mg).

a/ Le conditionnement

Avant de filtrer les MES, les filtres en fibre de verre doivent être conditionnés. Pour cela, ils sont disposés sur les supports du banc de filtration, voir la figure 32.



Figure 32 De gauche à droite, filtres en fibre de verre, supports filtrants et filtre dans sa coupelle

Après avoir disposé un peu d'eau distillée pour asseoir le filtre sur le support, la pompe à vide est démarrée. Un volume d'eau distillée d'environ 30 mL est ajouté. Une fois la filtration terminée, le filtre est retiré du support et est déposé dans une coupelle en aluminium. Le filtre est séché dans une étuve pendant au moins 2h à 105°C voir la figure 33, puis placé dans un dessiccateur pendant 30 minutes, afin de les refroidir. Une fois l'opération terminée, le filtre et la coupelle doivent être pesés sur la balance de précision, afin d'obtenir la masse à vide de l'ensemble m_0 . Le filtre est ainsi prêt pour être utilisé pour les MES.

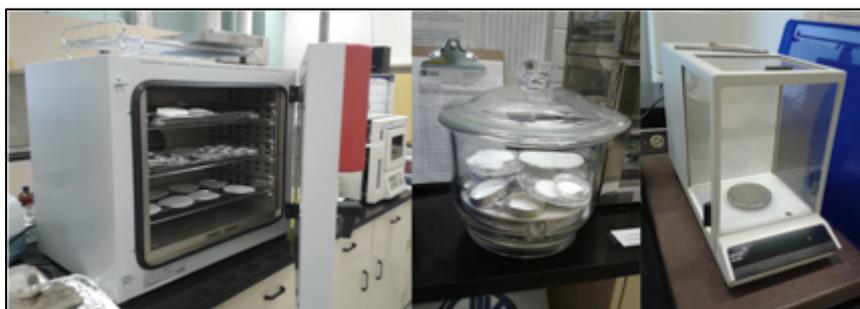


Figure 33 De gauche à droite, l'étuve, le dessiccateur et la balance

b/ Filtration des MES

Pour déterminer la concentration en MES il suffit de filtrer un volume V d'échantillon homogène, à l'aide du banc de filtration et des filtres préalablement conditionnés. Une fois l'opération terminée, la coupelle et le filtre chargé en particules solides sont placés à l'étuve à 105°C pendant 2 heures, puis au dessiccateur pendant 30 minutes. Finalement, l'ensemble est pesé sur la balance de précision pour atteindre la masse m_1 .

Il est ensuite possible de déterminer la concentration en MES en appliquant la relation suivante :

$$[MES] = \frac{(m_1 - m_0)}{V} \quad (8)$$

Avec :

- $[MES]$: La concentration en MES (mg.L^{-1});
- m_1 : La masse du filtre dans sa coupelle après filtration (mg);
- m_0 : La masse du filtre après conditionnement dans sa coupelle avant filtration (mg);
- V : Volume d'échantillon filtré (mL).

Annexe C : Exemple de feuille de calcul Excel ViCAs

Protocole VICAS Mesure des vitesses de chute des RUTP					Protocole de mesure VICAS développé par le CERVE Méthode de calcul adaptée à partir de Bertrand-Krajewski (2001) Feuille de calcul développée par M.C. Gromaire (CERVE) tel: 01.64015.67.60 Mel: gromaire@cereve.enpc.fr					
Informations échantillon		Informations colonne			<input type="button" value="Nouvelle feuille"/> <input type="button" value="Calcul"/>					
Référence	Entrée DP	Hauteur de chute (cm)		58,8						
Date prélèvement	07/05/13	Rayon (cm)		3,5						
Conservation	Température ambiante									
Début d'analyse	7h46									
Fin d'analyse	12h00									
Etat initial					concentration initiale		masse initiale dans la colonne			
	Volume (ml)	m0 (mg)	m1 (mg)	m2 (mg)	[MES] mg/l	[MVS] mg/l	MES (mg)	MVS (mg)		
Echantillon 1	86,0	1048,6	1060,7		140,7		318			
Echantillon 2	84,0	1093,8	1105,7		141,7					
Echantillon 3	90,0	1115,7	1128,3		140,0					
Etat final					concentration finale		masse finale dans la colonne			
	Volume (ml)	m0 (mg)	m1 (mg)	m2 (mg)	[MES] mg/l	[MVS] mg/l	MES (mg)	MVS (mg)		
Echantillon 1	133,0	1126,9	1131,0		30,8		73			
Echantillon 2	138,0	1112,2	1116,7		32,6					
Echantillon 3	135,0	1097,8	1102,3		33,3					
Décantation					masse décantée par pas de temps		masse décantée cumulée			
Δt (min)	Temps (min)	m0 (mg)	m1 (mg)	m2 (mg)	MES (mg)	MVS (mg)	MES (mg)	MVS (mg)		
2	2,0	1063,3	1108,7		45,4		45,4			
4	6,0	1137,3	1162,6		25,3		70,7			
8	14,0	1091,8	1150,9		59,1		129,8			
16	30,0	1098,2	1139,8		41,6		171,4			
32	62,0	1095,2	1115,7		20,5		191,9			
64	126,0	1121,8	1132,5		10,7		202,6			
128	254,0	1107,5	1125,2		17,7		220,3			

Annexe D : Protocole d'analyse du FBRM

Dans cette section, un résumé du protocole FBRM sur le Lasentec D600R est détaillé. Le matériel nécessaire pour la réalisation de l'expérience est :

- Une sonde FBRM D600R
- Une unité centrale pour la sonde
- Un ordinateur avec le logiciel iC FBRM pour l'acquisition des données
- Un dispositif d'agitation pour maintenir l'homogénéité de l'échantillon
- Un bécher d'environ 500 mL
- Une arrivée d'air comprimé pour alimenter la sonde
- Une pissette d'eau distillée

La réalisation des essais FBRM sur le Lasentec D600 ne nécessite pas une grande quantité d'échantillons. En effet, environ 200-300 mL suffit pour l'analyse. Avant de débuter une expérience, la sonde subit un préchauffage d'environ 30 minutes.

Protocole :

Pour débuter un essai, il faut commencer par ouvrir le logiciel iC FBRM depuis l'ordinateur du poste. Après avoir ouvert une nouvelle expérience, un test permet de mesurer l'état de propreté de la sonde. Pour cela, il est nécessaire de remplir un bécher avec de l'eau distillée et de suivre les étapes proposées par le logiciel. Si la sonde n'est pas suffisamment propre, un nettoyage doit être effectué avec un papier non abrasif et un produit non corrosif, avant de poursuivre les opérations.

Après cette étape, l'interface d'acquisition permet de configurer les paramètres de la sonde. Les paramètres utilisés sont :

- 2 m/s pour la vitesse de balayage de la sonde,
- "Fine" pour le choix du filtre électronique.

La vitesse du mobile d'agitation est réglée manuellement via un sélecteur de vitesse sur le moteur à 200 tours/min. Ces paramètres ont été retenus dans le cadre de l'analyse des eaux usées par Imen Bel Hadj (2013).

Une fois les paramètres enregistrés, l'échantillon d'eau usée est placé sur le support de la sonde. L'acquisition des données débute. L'enregistrement des cordes est suivi en temps réel grâce à l'interface (figure 34).

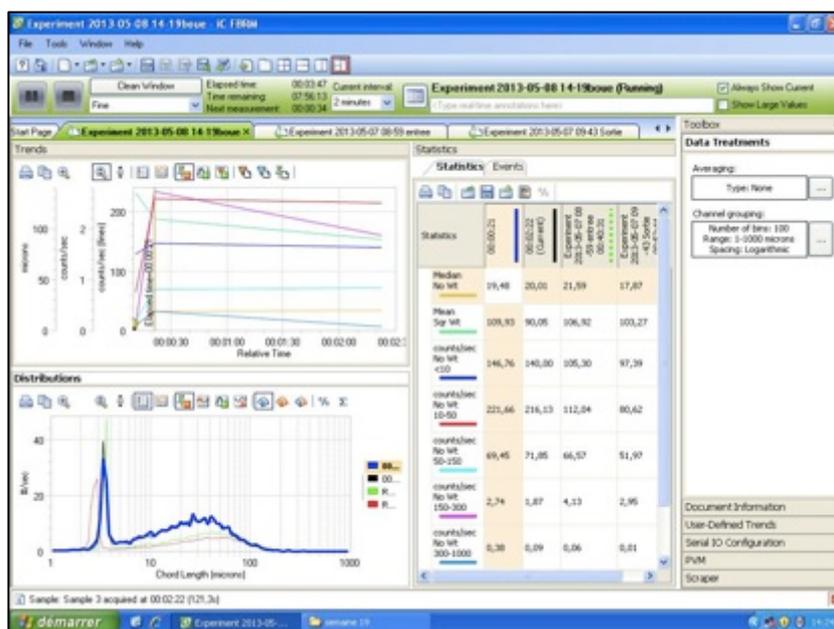


Figure 34 Interface d'acquisition du logiciel iC FBRM

La sonde va alors réaliser les mesures de différentes classes granulométriques de particules afin de générer une distribution complète de leur taille dans une gamme allant de 0 à 1000 μm . L'acquisition des données s'achève lorsqu'il n'y a plus de variation dans les mesures. Les données acquises sont exportées sur Excel afin de pouvoir être traitées. Les distributions des particules sont représentées sous la forme de graphiques.

Annexe E : Démonstration des équations de la méthode ViCAs

Une étude a permis de mettre en évidence un modèle mathématique permettant de représenter l'évolution de la masse cumulée en fonction du temps (Chebbo, 1992; Chancelier et al., 1998), soit l'équation 9 :

$$S(t) = M(t) - t \frac{\partial M}{\partial t} \quad (9)$$

Avec :

- $M(t)$: La masse de solides cumulés en pied de colonne de $t=0$ à t (mg);
- $S(t)$: La masse de solides décantées entre $t=0$ et t ayant une vitesse de chute supérieure à H/t avec H la hauteur d'eau dans la colonne (mg);
- $t \frac{\partial M}{\partial t}$: La masse de solide décantée entre $t=0$ et t ayant une vitesse de chute inférieure à H/t . Ce terme représente l'ensemble des particules qui avant la décantation se trouvaient à une hauteur inférieure à H (mg).

L'objectif est d'atteindre la distribution des vitesses de chute des particules. De ce fait il est nécessaire d'obtenir la courbe $S(t)$ pour la transformer en courbe $F(V_c)$. Cette courbe représente la fraction des particules (%) qui auront une vitesse de chute inférieure à une vitesse V_c donnée en $(m.h^{-1})$.

Pour réaliser cette transformation, il faut effectuer un ajustement de $M(t)$, puis résoudre l'équation $S(t)$. Bertrand-Krajewski (2001), propose un ajustement de $M(t)$ en utilisant 3 paramètres :

$$M(t) = \frac{b}{1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d} \quad (10)$$

Avec : $b > 0$, $c > 0$ et $d \in]0,1[$

En remplaçant $M(t)$ par (10) dans (9), Il est possible de résoudre $S(t)$.

En dérivant $M(t)$ par le temps:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{b}{1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d} \right) = b \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d} \right) = b \cdot \frac{-\left(-d \left(\frac{c}{t^2}\right) \left(\frac{c}{t}\right)^{d-1}\right)}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)^2} = \frac{bd \left(\frac{c}{t}\right) \left(\frac{1}{t}\right) \left(\frac{c}{t}\right)^{d-1}}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)^2}$$

Soit,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{bd \left(\frac{1}{t}\right) \left(\frac{c}{t}\right)^d}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)^2} \quad (11)$$

Dans (9), on introduit (10) et (11), soit :

$$S(t) = M(t) - t \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{b}{1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d} - t \left(\frac{bd \left(\frac{1}{t}\right) \left(\frac{c}{t}\right)^d}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)^2} \right)$$

$$S(t) = \frac{b}{1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d} - \frac{bd \left(\frac{c}{t}\right)^d}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)^2} = \frac{b \left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)^2} - \frac{bd \left(\frac{c}{t}\right)^d}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)^2}$$

$$S(t) = \frac{b \left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right) - bd \left(\frac{c}{t}\right)^d}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)^2} = \frac{b \left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d - d \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)^2}$$

Donc:

$$S(t) = \frac{b \left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d (1 - d)\right)}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)^2}$$

Finalement, on peut écrire l'expression de F(Vc) suivant l'équation 7:

$$F(Vc) = 100 \left(1 - \frac{S(t)}{Mdec + Mfin}\right) \quad (12)$$

Avec

- F(Vc) : Fraction de masses de cumulées des particules (mg);
- Mdec : Le cumul de la masse de solides décantées en cours d'essai (mg);
- Mfin : La masse de particules restantes en suspension dans la colonne à la fin de l'essai (mg).

Annexe F : Calcul des fractions de masse cumulée à partir des données FBRM

La réalisation des courbes de fraction de masses cumulées en fonction des cordes des particules nécessite un traitement de données.

Cette annexe présente la technique utilisée pour réaliser cette conversion. Le tableau 7 ci-dessous, réunit un extrait du traitement des données réalisé sous Excel. Le détail des calculs est présenté à la suite du tableau. Les hypothèses admises pour réaliser la conversion sont:

- Toutes les particules sont considérées comme sphériques;
- Les particules possèdent toutes la même masse volumique.

Tableau 7 Détermination des fractions de masse cumulées

A	B	C	D	E
Longueur des cordes	Comptage des particules en volume	Volume cumulé	Masse cumulée	Masse cumulée
μm	(nombre de sphères de volume $V_i \times V_i$)/seconde			%
7,6782	0,0064	0,0724	0,0724	1
8,2273	0,0074	0,0798	0,0798	1
8,8157	0,0085	0,0883	0,0883	2
9,4462	0,0101	0,0984	0,0984	2
10,1218	0,0117	0,1101	0,1101	2
10,8457	0,0126	0,1227	0,1227	2
11,6214	0,0152	0,1379	0,1379	2
12,4526	0,0187	0,1566	0,1566	3
13,3432	0,0214	0,178	0,178	3
Valeurs intermédiaires non représentées				
393,7848	0,054	5,4965	5,4965	97
421,9481	0,0207	5,5172	5,5172	97
684,3196	0,0543	5,5715	5,5715	98
902,1089	0,024	5,5955	5,5955	99
966,6272	0,0809	5,6764	5,6764	100

Colonne A et B :

Les colonnes A et B représentent les données brutes issues des mesures réalisées via la technique FBRM. La colonne B attribue à chaque corde de la colonne A, une mesure qui dénombre le nombre de particules de volume V_i multiplié par leur volume respectif V_i détecté par unité de temps.

Colonne C :

La colonne C représente le cumul des volumes totaux issus de la colonne B. Chacune des lignes de la colonne C somme toute les lignes supérieures avec la valeur inscrite dans la colonne B.

Colonne D :

Cette colonne permet de convertir les volumes cumulés de la colonne C, en masses cumulées via la masse volumique. Dans le cadre de cette conversion, la densité des particules est considérée comme constante. La valeur de la densité utilisée pour ces calculs est $d=1$. Grommaire-Mertz (1998) évaluent la densité des particules contenues dans les eaux usées se situant entre ≈ 1 et 1,52. En effet, la densité des particules varie en fonction du rapport entre la matière organique et la matière minérale qui peut varier d'un site à un autre.

Dans tous les cas, la conversion des masses cumulées en fraction est identique quelque soit la densité choisie. En effet, les fractions sont des rapports de masses cumulées, par conséquent les densités peuvent se simplifier mathématiquement.

Colonne E :

Cette colonne désigne pour chaque longueur de corde, la fraction de masse cumulée associée. Les valeurs de cette colonne débutent à 0 pour la plus petite corde mesurée et finie à 1 pour la corde la plus élevée. Les valeurs sont ainsi représentées en pourcentage (%). Ces fractions s'obtiennent en ramenant chaque entrée de la colonne D, à la valeur maximale de masse cumulée, soit la valeur correspondante à la dernière ligne de la colonne D.

Représentation graphique

Pour établir les courbes $F(\text{cordes})$, il suffit de tracer les fractions de masses cumulées obtenues dans la colonne E en fonction de la longueur des cordes mesurées de la colonne A. La figure 35 ci-dessous représente un exemple de résultat.

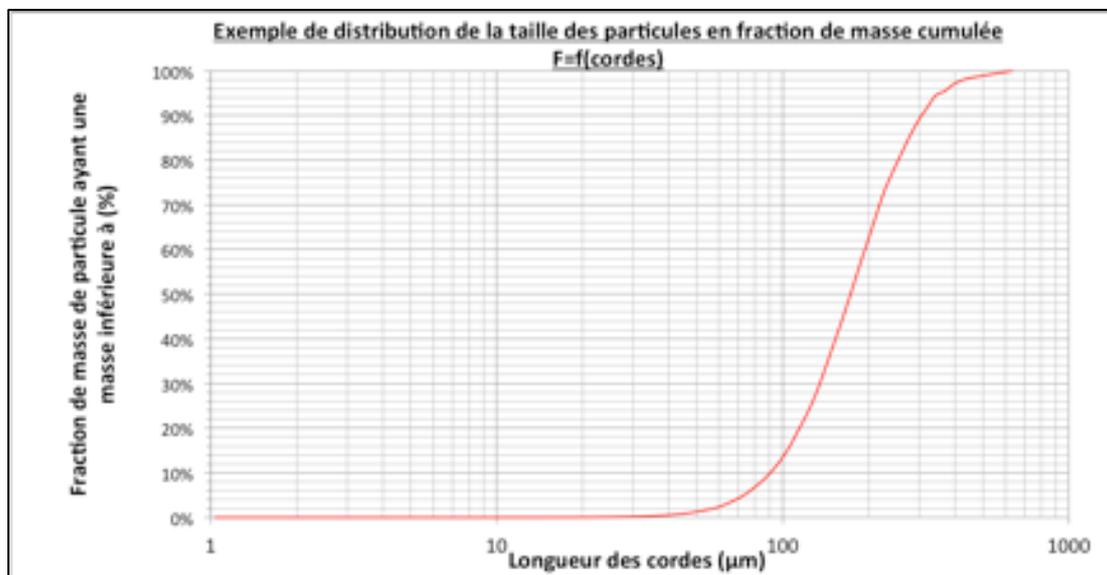


Figure 35 Exemple de courbes $F=f(\text{cordes})$

Annexe G : Réalisation des courbes reliant les cordes aux vitesses de chute

Après avoir converti les données brutes du FBRM en fraction de masses cumulées, il est possible de confronter les vitesses de chutes aux tailles des particules. En effet, les courbes $F(V_c)$ et $F(\text{cordes})$, possèdent un axe en commun, celui des fractions de masse.

Pour établir la relation entre les deux paramètres, il suffit d'interpoler les valeurs de cordes associées aux fractions de masses cumulées provenant des expériences ViCAs, voir la figure 36. Les interpolations se font à partir des courbes $F(\text{cordes})$.

Vitesse de chute (V_c) (m/h)	Fraction de masse cumulé F (%)	Cordes (μm)
18,5	98,3%	422
6,2	96,2%	380
2,6	93,4%	335
1,2	90,0%	300
0,6	86,2%	279
0,3	82,5%	255
0,2	79,4%	245
0	0	0

Valeurs issues des expériences ViCAs Axe en commun entre les courbes F (V_c) et F(cordes) Données interpolées via les courbes F(cordes)

Figure 36 Mise en relation des données ViCAs et FBRM

Annexe H : Détermination des masses volumiques des particules

A partir des couples Vc et cordes, il est possible de déterminer la masse volumique théorique des particules pour chacun des points, via le modèle de Stokes.

Par exemple, si pour une vitesse de 18,5 m.h⁻¹, on obtient une longueur de corde de 422 μm, on peut calculer la masse volumique des particules associée à partir de la relation de Stokes :

$$V_s = \frac{(\rho_s - \rho_f)gd^2}{18\mu} \Leftrightarrow \rho_s - \rho_f = \frac{18 \cdot \mu \cdot V_s}{gd^2} \Leftrightarrow \rho_s = \frac{18 \cdot \mu \cdot V_s}{gd^2} + \rho_f$$

Avec :

- $\rho_f = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$;
- $\mu = 10^{-3} \text{ pa.s}$;
- $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$.

$$\rho_s = \frac{18 \cdot 10^{-3} \cdot 18,5}{3600 \cdot 9,81 \cdot (422 \cdot 10^{-6})^2} + 1000 = 1053 \text{ kg.m}^{-3}$$

Pour l'ensemble des couples Vc/cordes, les masses volumiques théoriques sont comprises dans une gamme allant de 1005 à 1110 kg.m⁻³.

Résumé

Depuis 2009, la Chaire de recherche modelEAU de l'Université Laval à Québec et ses partenaires industriels, John Meunier inc. et Véolia Environnement, participent au projet de recherche primEAU. Ce projet s'articule autour de l'optimisation des procédés de décantation primaire, dans le cadre du traitement des eaux usées. Depuis le début de l'année 2013, une campagne de mesure a été planifiée afin d'obtenir les données physiques, chimiques et biologiques nécessaires à la modélisation. Cette campagne consiste à évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur un décanteur pilote situé à la station Est des eaux usées de Québec.

Le présent rapport traite de la caractérisation de la distribution des vitesses de chute et de la distribution de la taille des particules qui sont des paramètres clés de la décantation. Dans la mesure où les particules solides contenues dans les eaux usées présentent des caractéristiques très variables, les modèles couramment utilisés ne peuvent être utilisés pour la caractérisation.

Le couplage des méthodes d'analyse permet donc d'observer la relation entre la vitesse de chute et la taille des particules dans les eaux usées. Ces expériences permettent également de mettre en évidence l'influence des paramètres étudiés sur le décanteur pilote.

Mots clés : Traitements des eaux usées, décantation primaire, ViCAs, FBRM, MES.

Abstract

Since 2009, the modelEAU Research Chair at Université Laval in Quebec and its industrial partners, John Meunier Inc. and Veolia Environnement, participate in the research project called primEAU. This project focuses on the optimization process of primary clarifiers in wastewater treatment plants. In the beginning of 2013, a measurement campaign was planned to obtain the physical, chemical as well as biological data required for modelling. This campaign allows evaluating the influence of several parameters on a pilot plant clarifier located at the East wastewater treatment plant in Quebec.

This report deals with the characterization of the particle settling velocity distribution and the particle size distribution, which are key parameters in the settling process. Because the characteristics of solid particles contained in wastewater are highly unstable, commonly used models cannot be used for characterization.

The association of these methods of analysis allows observing the relationship between the settling velocity and size of the particles in the wastewater. These experiences also help to highlight the influence of the studied parameters on the pilot clarifier.

Key words : Wastewater treatment, primary clarification, ViCAs, FBRM, TSS.