



# **Caractérisation de la décantabilité des particules de l'affluent et l'effluent d'un dessableur**

**Mémoire**

**Jessy Carpentier**

**Maîtrise en génie des eaux**

Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Jessy Carpentier, 2017

# **Caractérisation de la décantabilité des particules de l'affluent et l'effluent d'un dessableur**

**Mémoire**

**Jessy Carpentier**

Sous la direction de :

Paul Lessard, directeur de recherche  
Peter Vanrolleghem, codirecteur de recherche

## Résumé

Dans une chaîne de traitement des eaux usées, les unités de dessablage permettent d'éliminer les particules nuisibles aux procédés localisés en aval. Malgré leur importance, les unités de dessablage ont peu été étudiées. Les méthodes de caractérisation des particules de l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage sont non-standardisées, rendant difficile l'évaluation des performances de celles-ci. L'objectif de ce mémoire est donc de développer un protocole de caractérisation de la décantabilité des particules d'un affluent et d'un effluent d'unités de dessablage et d'établir un protocole d'évaluation de la performance d'un dessableur.

Afin de développer un protocole de caractérisation de la décantabilité, les principaux paramètres étudiés en laboratoire sont la taille, la vitesse de chute et la densité des particules. Cinq protocoles de caractérisation de la taille des particules ont été comparés. La caractérisation de la vitesse de chute a été réalisée à l'aide du protocole ViCAs et du système d'élutriation.

Le protocole de caractérisation des particules de « grit » retenues consiste à laver les particules humides, les sécher à 105°C et les tamiser. Ce protocole est répétable et représentatif. Il a été observé que les particules sont composées généralement d'un mélange hétérogène de matière inorganique et organique de différentes dimensions. Toutefois, lors des événements pluvieux, les distributions granulométriques sont plus fines et inorganiques comparativement au temps sec. On note aussi que la densité est plus grande pour les fractions plus petites que 600 microns ( $\rho=2,50$ ) comparativement aux fractions plus grossières ( $\rho=1,40$ ).

Seul le système d'élutriation a permis de caractériser de grandes vitesses de chute ( $> 100$  m/h) et peut être utilisé pour l'évaluation de la performance d'un dessableur. Pour être applicable, le protocole ViCAs doit être modifié en utilisant une colonne plus haute.

## Abstract

In wastewater treatment plant, grit chambers eliminate particles that will negatively affect processes downstream. Despite their importance, grit chambers are little studied. The characterization methods of the grit chamber's influent and effluent are not standardized, making it difficult to compare and evaluate the performances reported. The objective of this master thesis was therefore to develop a protocol to characterize the settling properties of particles in an influent and effluent of a grit chamber unit and to establish a protocol to evaluate the grit chamber's performance.

In order to develop a settling characterization protocol, the main parameters studied in the laboratory are the particle size, the particle settling velocity and the particle density. Five particle size characterization protocols were compared. The characterization of the settling velocity was evaluated using the ViCAs protocol and the elutriation system.

The retained characterization protocol for grit chamber particles consists of washing the wet particles, drying them at 105 °C and sieving them. The protocol was found to be repeatable and representative. It has been observed that the particles are generally composed of a heterogeneous mixture of inorganic and organic matter of different sizes. However, during rain events, the particles are smaller and more inorganic compared to dry weather. It was also noted that the density was greater for fractions smaller than 600 microns ( $\rho=2.50$ ) compared to coarser fractions ( $\rho=1.40$ ).

Only the elutriation system allows characterizing high settling velocities ( $> 100$  m/h) and can be used for evaluating the grit chamber's performance. To be applicable, the ViCAs protocol must thus be modified, employing a taller column.

# Remerciements

Je tiens avant tout à remercier mon directeur de recherche, M. Paul Lessard, pour ses conseils et sa disponibilité tout au long de ma maîtrise. Il m'a aidé à atteindre les objectifs que je m'étais posés et permis de me développer en tant qu'ingénieur.

Je remercie également mon codirecteur de recherche, M. P.A. Vanrolleghem, de m'avoir permis de réaliser une maîtrise en génie des eaux à l'Université Laval et de m'avoir intégré dans le groupe modelEAU.

Merci à l'équipe de Aquatech, Société de gestion de l'eau inc., particulièrement M. Jocelyn Noël, pour leur participation active au projet de recherche à la station de traitement des eaux usées de Saint-Nicolas.

Merci à la Ville de Québec pour leur participation au projet de recherche et des services rendus afin de rendre ce projet de recherche possible.

Merci à Queralt Plana pour toutes les heures travaillées ensemble et l'énergie mise dans mon projet de maîtrise qui, sans ton aide, n'aurait pas aussi bien avancé.

Merci à mes collègues de travail : Bernard, Samuel, Gabrielle, Sovanna, Cyril, Thomas et Françoise pour leur support quotidien et leur grande aide au cours de ma maîtrise.

Merci à mes proches : René, Diane, Merrick, Derek, Jean-Guy, Andrée, Stéphanie et tous mes amis pour votre soutien, écoute et vos encouragements. Merci, Grand-Papa, de m'avoir conseillé cette voie dans le traitement des eaux.

Finalement, je souhaiterais remercier l'équipe de Veolia, Aurélien Pauléat et Alain Gadbois, et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) pour le soutien financier et d'aide professionnelle qui a rendu possible les travaux de recherche.

*'It is a capital mistake to theorize  
before one has data. Insensibly one  
begins to twist facts to suit theories,  
instead of theories to suit facts'  
« Sherlock Holmes »*

# Table des matières

|  |      |
|--|------|
| Résumé.....  | iii  |
| Abstract.....  | iv   |
| Remerciements.....   | v    |
| Liste des tableaux.....  | x    |
| Liste des figures.....   | xi   |
| Liste des abréviations et symboles.....  | xiii |
| 1. Contexte.....   | 1    |
| 2. Revue bibliographique.....  | 6    |
| 2.1. Conception des dessableurs.....   | 6    |
| 2.1.1. Conception d'un dessableur aéré.....  | 8    |
| 2.1.2. Conception d'un dessableur à vortex.....  | 10   |
| 2.2. Méthodologie d'échantillonnage des particules de l'affluent et l'effluent d'une unité de dessablage.....  | 11   |
| 2.2.1. Échantillonnage transversal (CCS).....  | 13   |
| 2.2.2. Échantillonnage vertical intégré (VIS).....   | 15   |
| 2.2.3. Échantillonnage multipoint.....   | 16   |
| 2.3. Méthodologie de caractérisation des particules de « grit ».....   | 18   |
| 2.3.1. Caractérisation de la taille des particules par analyse granulométrique.....  | 19   |
| 2.3.2. Caractérisation de la vitesse de chute des particules d'un dessableur.....  | 21   |
| 2.3.3. Caractérisation de la densité spécifique des particules.....  | 29   |
| 2.4. Évaluation de la performance des dessableurs.....   | 30   |
| 2.4.1. Analyse du bilan de masse des particules de « grit » à l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage (liquide/liquide).....                                   | 31   |
| 2.4.2. Analyse du bilan de masse des particules de « grit » à l'affluent ou l'effluent et retenues par l'unité de dessablage (liquide/solide).....                       | 32   |
| 2.4.3. Analyse du bilan de masse de la masse des particules de « grit » retenues dans l'unité de dessablage et dans l'unité de décantation primaire (solide/solide)..... | 33   |
| 2.4.4. Performances des unités de dessablage dans la littérature.....  | 34   |
| 2.5. Conclusion.....   | 36   |
| 3. Objectifs.....  | 37   |
| 4. Matériel et méthodes.....   | 38   |
| 4.1. Sites expérimentaux.....  | 38   |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.1.1. | Ville de Québec (Station Est).....  | 38 |
| 4.1.2. | Ville de Lévis (arrondissement Saint-Nicolas) .....   | 40 |
| 4.2.   | Méthodologie d'échantillonnage .....  | 41 |
| 4.2.1. | Échantillonnage de l'affluent et l'effluent des unités de dessablage .....  | 42 |
| 4.2.2. | Échantillonnage des particules de « grit » retenus par l'unité de dessablage .....  | 44 |
| 4.3.   | Caractérisation des particules de « grit ».....   | 45 |
| 4.3.1. | Distribution de la taille des particules de « grit ».....   | 45 |
| 4.3.2. | Vitesse de chute des particules de « grit » .....   | 50 |
| 4.3.3. | Caractérisation de la performance d'élimination des particules de « grit » de l'unité de dessablage .....                                       | 56 |
| 4.3.4. | Autres analyses .....   | 57 |
| 4.4.   | Planification d'expérience .....  | 59 |
| 5.     | Mise au point du protocole de caractérisation de la taille des particules .....   | 61 |
| 5.1.   | Comparaison des protocoles d'analyse granulométrique .....  | 61 |
| 5.1.1. | Analyse en temps sec et en temps de pluie .....   | 62 |
| 5.2.   | Protocole proposé.....  | 63 |
| 5.2.1. | Répétabilité de l'essai.....  | 64 |
| 6.     | Résultats et discussion .....   | 66 |
| 6.1.   | Caractérisation des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage .....  | 66 |
| 6.1.1. | Caractérisation de la taille des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage .....   | 67 |
| 6.1.2. | Caractérisation de la composition des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage .....  | 69 |
| 6.1.3. | Caractérisation de la densité spécifique des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage.....                                  | 74 |
| 6.1.4. | Caractérisation de la vitesse de chute des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage.....                                    | 77 |
| 6.2.   | Caractérisation des particules de « grit » de l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage de Saint-Nicolas .....                          | 78 |
| 6.2.1. | Caractérisation de la vitesse de chute des particules de « grit » à l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage par élutriation.....      | 79 |
| 6.2.2. | Évaluation de la performance d'élimination des particules de « grit » à l'affluent de l'unité de dessablage par élutriation.....                | 81 |
| 6.2.3. | Caractérisation de la vitesse de chute des particules de « grit » à l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage par protocole ViCAs ..... | 86 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 7.   | Estimation de la vitesse de chute des particules à partir des tamisages .....                        | 89  |
| 7.1. | Méthodologie d'estimation de la vitesse de chute des particules .....                                | 89  |
| 7.2. | Résultats et discussion de l'estimation de la vitesse de chute.....                                  | 90  |
| 8.   | Conclusion .....   | 94  |
| 9.   | Recommandations.....   | 96  |
|      | Bibliographie.....   | 98  |
|      | ANNEXE A : Protocole ViCAs.....  | 102 |
|      | ANNEXE B : Protocole d'élutriation .....   | 130 |
|      | ANNEXE C : Protocole d'analyse granulométrique par tamisage .....                                    | 151 |
|      | ANNEXE D : Caractérisation des particules retenues dans la benne à sable .....                       | 166 |
|      | ANNEXE E : Caractérisation des particules de l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage ..... | 203 |
|      | ANNEXE F : Estimation de la vitesse de chute des particules à l'aide des tamisages .....             | 207 |

# Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1 : Information de conception typique des dessableurs aérés (adapté de Tchobanoglous et coll. (2003)).....                        | 9  |
| Tableau 2 : Information de conception typique des dessableurs à vortex (adapté de Tchobanoglous et coll. (2003)).....                     | 11 |
| Tableau 3 : Dimensions des mailles des tamis utilisés pour l'analyse granulométrique.....   | 48 |
| Tableau 4 : Vitesse d'ascension des colonnes d'élutriation pour un débit de pompage de 1,56 l/min...                                      | 55 |
| Tableau 5 : Essais en laboratoire en fonction de la caractérisation des particules de « grit ».....                                       | 60 |
| Tableau 6 : Conditions d'échantillonnage des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage .....                           | 66 |
| Tableau 7 : Densité des particules retenues par les tamis 4 mesh, 14 mesh et 70 mesh .....  | 74 |
| Tableau 8 : Densité spécifique mesurée et estimée pour la Ville de Québec et Saint-Nicolas.....   | 75 |
| Tableau 9 : Densité spécifique estimée moyenne pour la Ville de Québec et Saint-Nicolas.....  | 76 |
| Tableau 10 : Conditions d'échantillonnage des particules de « grit » à l'affluent et effluent de l'unité de dessablage de St-Nicolas..... | 78 |
| Tableau 11 : Élimination des particules pour chaque colonne d'élutriation (28 septembre 2016) .....                                       | 82 |
| Tableau 12 : Performance d'élimination des particules de « grit » en fonction de la vitesse de chute (28 septembre 2016) .....            | 83 |
| Tableau 13 : Élimination des particules pour chaque colonne d'élutriation (18 septembre 2016) .....                                       | 85 |
| Tableau 14 : Performance d'élimination des particules de « grit » en fonction de la vitesse de chute (18 septembre 2016) .....            | 85 |

# Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : Chaîne de traitement des eaux usées (adaptée de Tchobanoglous et coll. (2003)).....  | 1  |
| Figure 2 : Schéma de la trajectoire des particules dans un dessableur aéré (adaptée de Tchobanoglous et coll. (2003)).....                                  | 8  |
| Figure 3 : Dessableur à vortex (adaptée de Tchobanoglous et coll. (2003)) .....   | 10 |
| Figure 4 : Profil d'écoulement des « grit » en fonction de la vitesse d'écoulement dans le canal (Funk et coll., 2008) .....                                | 13 |
| Figure 5 : Échantillonneur transversal (adaptée de Reddy et Pagilla (2010)).....  | 13 |
| Figure 6 : Positionnement d'un échantillonneur transversal dans le canal (Funk et coll., 2008) .....  | 14 |
| Figure 7 : Échantillonneur vertical intégré (adaptée de Reddy et Pagilla (2010)).....   | 16 |
| Figure 8 : Échantillonneur multipoint, vue de face (adaptée de Reddy et Pagilla (2010)) .....   | 17 |
| Figure 9 : Échantillonneur multipoint, vue de côté (adaptée de Reddy et Pagilla (2010)) .....   | 18 |
| Figure 10 : Relation entre la vitesse de chute, la taille et la densité spécifique d'une particule (Adapté de Reddy et Pagilla (2010)).....                 | 24 |
| Figure 11 : Cône d'Imhoff modifié (adaptée de Sansalone et coll. (2009)).....   | 25 |
| Figure 12 : Colonne de ViCAs (Chebbo et Gromaire, 2009) .....   | 27 |
| Figure 13 : Montage d'un système d'élutriation (adaptée de Krishnappan et coll. (2012)) .....   | 28 |
| Figure 14 : Schémas des points d'échantillonnage pour l'évaluation de la performance d'un dessableur .....  | 31 |
| Figure 15 : Effet de la matière organique sur la vitesse de chute (adapté de Keane et deSilva (2009)).....  | 35 |
| Figure 16 : Station Est de traitement des eaux usées de Québec.....   | 39 |
| Figure 17 : Station de traitement des eaux usées de Saint-Nicolas .....   | 40 |
| Figure 18 : Schéma d'une unité de dessablage.....   | 41 |
| Figure 19 : Échantillonneur Van-Dorn (Hoskins Scientific LTD, 2016) .....   | 42 |
| Figure 20 : Échantillonneur Van-Dorn modifié.....   | 43 |
| Figure 21 : Protocole de caractérisation de la taille des particules sous différents types de prétraitement .....   | 45 |
| Figure 22 : Agglomération des particules de « grit » suite au séchage à 105°C .....   | 47 |
| Figure 23 : Agitateur mécanique ROTAP .....   | 49 |
| Figure 24 : Équipement de tamisage.....   | 49 |
| Figure 25 : Colonne ViCAs (à gauche) et coupelle (à droite) .....   | 51 |
| Figure 26 : Montage du système d'élutriation.....   | 53 |
| Figure 27 : Écoulement dans les colonnes d'élutriation.....   | 54 |
| Figure 28 : Comparaison des distributions granulométriques selon différents protocoles de caractérisation de la taille des particules de Saint-Nicolas..... | 62 |
| Figure 29 : Analyse de la répétabilité par triplicata du protocole d'analyse granulométrique par tamisage sec après pré lavage .....                        | 65 |
| Figure 30 : Courbes granulométriques moyennes en temps sec, en temps de pluie et de fonte de « grit » frais à Saint-Nicolas.....                            | 67 |
| Figure 31 : Courbes granulométriques moyennes en temps sec et en temps de pluie de « grit » frais à la Ville de Québec .....                                | 68 |
| Figure 32 : Composition moyenne de « grit » selon la taille de particule en temps sec et en temps de pluie à Saint-Nicolas.....                             | 70 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 33 : Composition moyenne de « grit » selon la taille de particule en temps sec et en période de fonte à Saint-Nicolas .....                                   | 71 |
| Figure 34 : Composition moyenne de « grit » selon la taille de particule en temps sec et en temps de pluie à la Ville de Québec.....                                 | 72 |
| Figure 35 : Composition moyenne de « grit » selon la taille de particule en temps sec à Saint-Nicolas et à la Ville de Québec .....                                  | 73 |
| Figure 36 : Distribution de la vitesse de chute des particules de « grit » retenues par l'unité de dessablage en temps sec par système d'élutriation .....           | 77 |
| Figure 37 : Distribution de la vitesse de chute des particules de l'affluent de l'unité de dessablage de St-Nicolas par élutriation .....                            | 79 |
| Figure 38 : Comparaison des essais d'élutriation de l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage de Saint-Nicolas .....   | 80 |
| Figure 39 : Masse retenue pour chacune des colonnes d'élutriation pour l'essai du 28 septembre 2016 .....  | 82 |
| Figure 40: Masse retenue pour chacune des colonnes d'élutriation pour l'essai du 18 septembre 2016 .....   | 84 |
| Figure 41 : Distribution de la vitesse de chute par protocole ViCAs pour l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage de Saint-Nicolas (28 septembre 2016)..... | 87 |
| Figure 42 : Distribution de vitesse de chute de l'affluent ajusté et non ajusté par protocole ViCAs.....   | 88 |
| Figure 43 : Distribution moyenne des vitesses de chute estimées à partir de tous les tamisages .....   | 90 |
| Figure 44 : Distribution moyenne des vitesses de chute estimées à partir de tamisage en temps sec et en temps de pluie à Saint-Nicolas .....                         | 91 |
| Figure 45 : Distribution moyenne des vitesses de chute estimées à partir de tamisage en temps sec et en temps de pluie à la Ville de Québec .....                    | 91 |
| Figure 46 : Particules retenues sur tamis de 3,35 mm (à gauche) et sur tamis de 4,75 mm (à droite)..   | 92 |
| Figure 47 : Particules retenues sur tamis de 2,36 mm .....   | 93 |
| Figure 48 : Particules retenues sur tamis de 1,40 mm .....   | 93 |

## Liste des abréviations et symboles

|          |   |
|----------|---|
| $A_p$    | Surface face à l'écoulement ( $m^2$ )             |
| ASTM     | American Standard Test Method                     |
| BRM      | Bioréacteurs à membranes                          |
| CCS      | Échantillonnage transversal                       |
| $C_t$    | Coefficient de trainée                            |
| EPA      | Agence de protection de l'environnement des É. U. |
| $F_G$    | Force gravitationnelle                            |
| $F_t$    | Force de trainée                                  |
| $g$      | Accélération gravitationnelle ( $m/s^2$ )         |
| MeS      | Matière en suspension                             |
| MIeS     | Matière inorganique en suspension                 |
| MVeS     | Matière volatile en suspension                    |
| $M_s$    | Masse de l'échantillon (g)                        |
| $\rho_e$ | Densité de l'eau ( $kg/m^3$ )                     |
| $\rho_p$ | Densité de la particule ( $kg/m^3$ )              |
| $\rho_s$ | Densité spécifique ( $kg/m^3$ )                   |
| PEHD     | Polyéthylène haute densité                        |
| PVC      | Polychlorure de vinyle                            |
| RBS      | Réacteur biologique séquentiel                    |

|       |  |
|-------|--|
| $v_p$ | Vitesse de la particule (m/s)            |
| $V_c$ | Vitesse de chute (m/s)                   |
| $V_p$ | Volume de la particule (m <sup>3</sup> ) |
| $V_s$ | Volume d'échantillon (m <sup>3</sup> )   |
| VIS   | Échantillonnage vertical intégré         |

# 1. Contexte

Le traitement des eaux usées permet de protéger la santé publique en éliminant, réutilisant, transformant ou traitant les polluants et pathogènes présents dans les eaux usées. Les eaux usées proviennent des réseaux d'égouts unitaire et sanitaire, comprenant les eaux domestiques, parasites, de ruissellement et industriels. Les eaux arrivant à la station de traitement comprennent des matières en suspension organiques ou inorganiques, de l'azote, du phosphore et plusieurs autres composants se devant être traités.

La qualité des eaux à la sortie de la station de traitement est dépendante du bon fonctionnement de toutes les parties de la chaîne de traitement, soit le traitement préliminaire, primaire, secondaire et tertiaire (Tchobanoglous et coll., 2003). Une chaîne de traitement conventionnelle des eaux usées est présentée à la Figure 1.

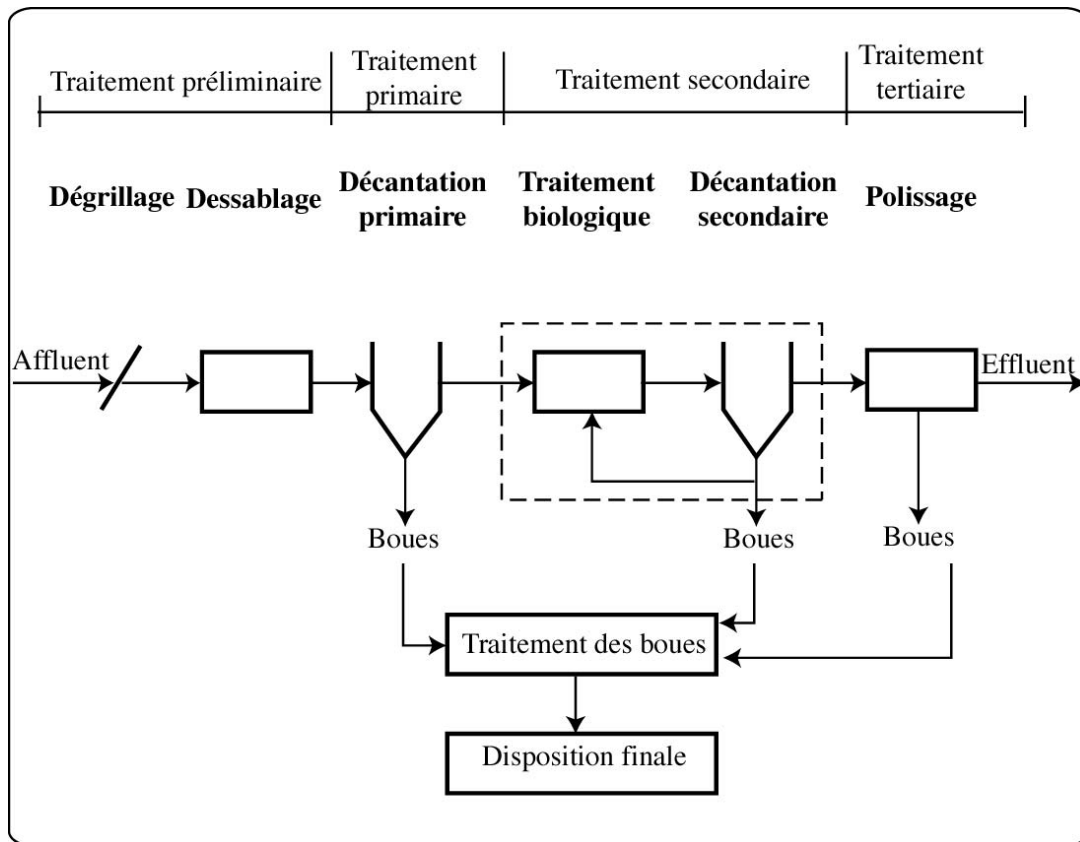


Figure 1 : Chaîne de traitement des eaux usées (adaptée de Tchobanoglous et coll. (2003))

Durant les dernières années, de nombreuses études se sont intéressées au traitement primaire et à la caractérisation de la décantation primaire (Bachis et coll., 2015), mais un intérêt nouveau est présent pour approfondir les connaissances sur les unités de traitement préliminaire (WEF, 2016).

Le traitement préliminaire agit comme protection des installations de traitement en éliminant des déchets, des matières organiques et des matières inorganiques de grandes dimensions. Les unités de dégrillage et de dessablage constituent les principaux éléments du traitement préliminaire. Le dégrilleur est généralement la première unité que rencontrent les eaux usées à la station de traitement. Il permet de séparer physiquement les solides de grandes dimensions présents dans les eaux usées. La taille de particules éliminées par l'unité de dégrillage est régie par les ouvertures du dégrilleur, allant généralement de 1 à 9 mm (dégrilleur fin) ou de 9 à 25 mm (dégrilleur grossier) (Stephenson et coll., 2002). Les dégrilleurs permettent l'élimination des particules de grandes dimensions telles que les papiers, plastiques, chiffons et métaux et de protéger les pompes, les valves, les conduites et autres éléments de se colmater ou de s'endommager (Reddy et Pagilla, 2010). Toutefois, pour assurer la protection des éléments mécaniques de la station de traitement des eaux usées, les particules de plus petites dimensions, particulièrement les particules inorganiques, doivent être séparées des eaux usées (Palgrave, 2003).

Afin d'éliminer des particules de plus petites dimensions que les ouvertures du dégrilleur, les unités de dessablage ont été développées pour récupérer les particules de « grit ». L'élimination des « grit » de l'affluent de la station de traitement des eaux usées est nécessaire, puisque leur accumulation dans le système de traitement peut, entre autres, nuire à l'élimination de la matière organique, colmater les conduites, s'accumuler au fond des bassins d'aération, nuire à la croissance biologique, diminuer la durée de vie des pièces mécaniques due à l'abrasion et occuper des volumes importants dans les digesteurs anaérobiques (Finger et Parrick, 1980; Pitman, 1999; Sherony, 2011). Il est donc indispensable que le traitement préliminaire soit efficace quant à l'élimination des particules de « grit ».

Plusieurs définitions du « grit » ont été proposées, mais l'interprétation varie d'un auteur à un autre. Tchobanoglous et coll. (2003) propose une définition générale des particules de « grit » se basant principalement sur la densité spécifique et la vitesse de décantation des particules organiques et inorganiques des solides présents dans les eaux usées.

*« Grit chambers are designed to remove grit, consisting of sand, gravel, cinders, or other heavy solid materials that have subsiding velocities or specific gravities substantially greater than those of the organic putrescible solids in wastewater» (Tchobanoglous et coll., 2003).*

Selon cette définition, les « grit » sont composés des particules ayant une densité et une vitesse de décantation plus grande que celle de la matière organique. Cette définition considère donc que la matière organique n'est pas retenue par les unités de dessablage.

L'agence de protection de l'environnement (EPA) des États-Unis a elle aussi proposé une définition des « grit ». Cette définition est basée sur la taille des particules et cible principalement les particules inorganiques ayant une grande densité spécifique.

*« Grit is traditionally defined as inorganic particles larger than 0.21 mm (65 mesh<sup>1</sup>) and with a specific gravity greater than 2.65. However, with the recent recognition that smaller particles must be removed to avoid damaging downstream processes, many modern grit removal designs are capable of removing up to 75% of 0.15 mm (100 mesh) material» (EPA, 2003).*

Tout récemment, une autre définition a été proposée (WEF, 2016). Cette dernière définit les particules de « grit » en fonction d'une vitesse de chute.

*« Assuming the grit system is designed to remove 100 µm grit, the sampling method must capture solids with a settling velocity of at least 100 µm clean grit... For this reason, it is recommended that the definition of grit for the purpose of sampling be*

---

<sup>1</sup> Un mesh est le nombre d'ouvertures circulaires dans un pouce carré d'un tamis.

*the settling velocity of the grit particle as it exists in the raw wastewater of the appropriate size that is intended to be removed by the system being sampled. »*

Cette définition, plus générale, prend en compte toutes les particules ayant des vitesses de chute d'une vitesse égale ou supérieure à la vitesse de conception de l'unité de dessablage, incluant les particules organiques.

Cependant, sans égard à la définition des particules de « grit » utilisée, il est difficile de définir les performances des unités de dessablage quant à l'élimination des particules de « grit ». La principale lacune est qu'il n'existe aucune méthode d'échantillonnage et de caractérisation standardisée (Field et O'Connor, 1996; Rife et Botero, 2012). De nombreuses méthodes d'échantillonnage et de caractérisation des « grit » ont été développées par des compagnies privées ce qui résulte à des analyses de performances différentes. Ces méthodes n'étant pas normalisées ou standardisées, il est difficile d'effectuer des comparatifs de performances entre les stations de traitement (Gardner et Deamer, 1996).

De plus, de nombreuses stations de traitement des eaux usées ont observé des performances d'élimination des « grit » largement inférieures aux critères de conception (Andoh et coll.; McNamara et coll., 2014). Afin d'expliquer ces faibles performances, certaines études ont déterminé que la densité spécifique de 2,65, utilisée pour la conception des unités de dessablage est trop grande et ne tient pas compte de l'accumulation de la matière organique sur la matière inorganique laquelle diminue la densité spécifique des particules (Keane et deSilva, 2009).

Afin de comprendre les difficultés liées à la conception et l'évaluation des performances des unités de dessablage, le projet de recherche dessablEAU a pour but de caractériser et modéliser les unités de dessablage des eaux usées dans le but d'améliorer la compréhension du processus de décantation dans les unités de dessablage.

Le chapitre suivant présente une étude bibliographique sur la conception des dessableurs, l'évaluation de performance des unités de dessablage, les méthodologies d'échantillonnage et les méthodologies de caractérisation des particules de « grit ».

## 2. Revue bibliographique

### 2.1. Conception des dessableurs

Les dessableurs sont partie intégrante du système de traitement préliminaire d'une station de traitement des eaux usées. Ils sont conçus pour récupérer des particules de décantation discrète de type 1. Pour ce type de décantation, aucune interaction entre les particules n'est considérée. Le déplacement des particules dans l'eau est déterminé par les forces gravitationnelles, les forces de trainées et les forces d'Archimède (Mihelcic et Zimmerman, 2009). La création de floccs n'est pas considérée à cette étape du traitement (Qasim, 1998).

Puisque la taille des particules a une influence sur les dommages causés sur les éléments mécaniques (Palgrave, 2003), les unités de dessablage sont conçues en fonction de la taille des particules voulant être éliminées. Pour la conception des unités de dessablage, les critères de performance recommandés sont l'élimination de 95% des particules de diamètre plus grand que 300  $\mu\text{m}$ , 85% des particules de diamètre plus grand que 210  $\mu\text{m}$  et de 65% de particules de diamètre plus grand que 150  $\mu\text{m}$  (Tchobanoglous et coll., 2003).

Les critères de conception doivent être respectés aux débits maximaux d'opération, principalement en temps de pluie, puisque des quantités de « grit » plus importantes sont observées et puisque le temps de rétention hydraulique est plus court (Tchobanoglous et coll., 2003). La variation de la charge en particules de « grit » est aussi dépendante du type de réseau d'égout, soit un réseau d'égout unitaire ou un réseau d'égout sanitaire. Un réseau d'égout unitaire est un réseau d'égout qui achemine les eaux usées domestiques, industrielles et pluviales vers la station de traitement des eaux usées, comprenant les eaux de ruissellement des rues lors des événements pluvieux. Le réseau sanitaire reçoit uniquement les eaux usées domestiques ou industrielles (Brière, 2012). Pour le réseau d'égout unitaire, des charges plus importantes de particules de « grit » peuvent être observées puisque les eaux de ruissellement peuvent entraîner des particules provenant des rues, des terrains et des sols environnants.

Le déplacement des sédiments au sein du système d'égouts est régi par les vitesses d'écoulement. Lorsque les vitesses d'écoulement sont plus faibles, particulièrement en temps sec et durant la nuit, les sédiments décantent et se déposent dans le système d'égouts. Lors des périodes de pluies, où les vitesses d'écoulement sont très grandes pour un réseau unitaire, les sédiments ayant décanté dans le réseau sont remis en suspension et entraînés vers la station de traitement des eaux usées (Ashley et coll., 2005). La charge des « grit » reçus à la station de traitement des eaux usées à débit maximal peut être jusqu'à huit fois plus grande que la charge en « grit » en temps sec (He et coll., 2012).

Puisque les particules de sols environnant peuvent s'introduire dans les conduites ayant des défauts structuraux ou par ruissellement, il est important de considérer la taille des particules de sols environnant pour réaliser la conception des unités de dessablage. Lorsque la station de traitement des eaux usées est située dans une région géologique où les tailles de particule sont de très petites dimensions, les critères de performances peuvent être ajustés de façon d'éliminer une plus grande proportion des particules de plus petite dimension (Sherony, 2011). Par exemple, certaines installations sont conçues pour l'élimination de 95% des particules de tailles supérieures à 100  $\mu\text{m}$  (McNamara et coll., 2009b). Cependant, il n'est pas recommandé de concevoir les unités de dessablage pour l'élimination des particules inférieures à 100  $\mu\text{m}$ , puisque plus la taille des particules cibles est petite, plus les coûts de construction et d'opération sont grands (Andoh, 2008; Gardner et Deamer, 1996).

Lorsque les paramètres de conception tels que les débits maximaux de conception et la taille des particules cibles sont connus, il est possible de dimensionner les unités de dessablage. Le type d'unité choisi pour le dessablage dépend de l'empreinte au sol disponible, les pertes de charges maximales admissibles dans le système et des autres équipements de traitement utilisés dans l'usine. Les principaux types de dessableur utilisés sont les dessableurs aérés et les dessableurs à vortex (Qasim, 1998).

### 2.1.1. Conception d'un dessableur aéré

Le dessableur aéré est un bassin de décantation rectangulaire incluant un système d'aération permettant de créer un déplacement des particules en spirales dans le dessableur. L'aération du système est produite par des aérateurs situés d'un seul côté du dessableur aéré, près du fond. L'aération est induite dans le système de façon tangentielle afin d'induire un courant spiralé. L'effet de spirale favorise un déplacement des particules selon une trajectoire hélicoïdale, ce qui augmente le temps de rétention des particules dans l'unité de dessablage et favorise l'entraînement des particules vers le fond. Un schéma du déplacement des particules dans un dessableur aéré est présenté à la Figure 2. Sous l'effet de l'aération, les particules ayant des densités plus faibles, telles que la matière organique, demeurent en suspension tandis que les particules plus lourdes, telles que les particules inorganiques, décantent (Kitching et Denton, 2012; Sawicki, 2004; Tchobanoglous et coll., 2003).

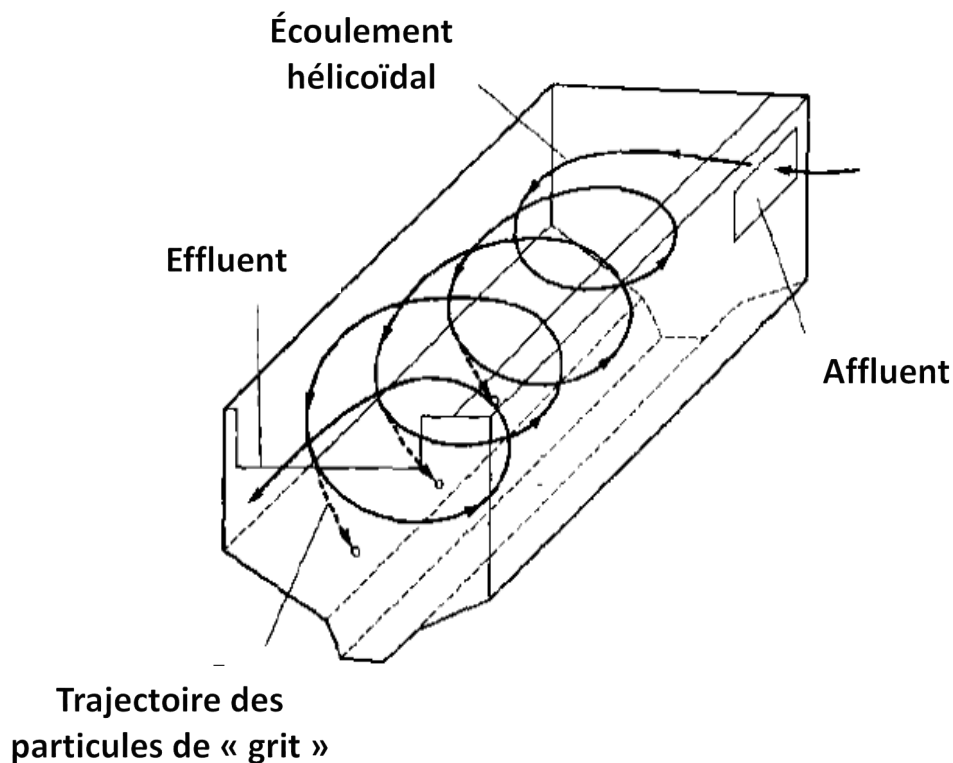


Figure 2 : Schéma de la trajectoire des particules dans un dessableur aéré (adaptée de Tchobanoglous et coll. (2003))

Une fois les particules décantées dans le dessableur, un système de raclage ou de pont roulant entraîne les particules de « grit » vers une pompe conçue pour le soutirage des particules de « grit ». L'activation de la pompe est réalisée selon des cycles temporels ou de débits (Tchobanoglous et coll., 2003). Les particules de « grit » sont ensuite acheminées jusqu'à une unité d'assèchement afin de diminuer la quantité d'eau retenue dans les particules de « grit ».

Lors de la conception des dessableurs aérés, il est nécessaire de définir le temps de rétention à débit maximal, les dimensions et les ratios largeur-profondeur et longueur-largeur des unités de dessablage et le taux d'aération. Les informations de conception typique des dessableurs aérés sont présentées au Tableau 1.

Tableau 1 : Information de conception typique des dessableurs aérés (adapté de Tchobanoglous et coll. (2003))

| Item   | Système international                           |                      |                |
|--|---|----------------------|----------------|
|  | Unités  | Étendue de la valeur | Valeur typique |
| <b>Temps de rétention à débit maximal</b>    | min   | 2-5                  | 3              |
| <b>Dimensions :</b>                          |   |                      |                |
| Profondeur                                   | m   | 2-5                  |                |
| Longueur                                     | m   | 7,5-20               |                |
| Largeur                                      | m   | 2,5-7                |                |
| Ratio largeur – profondeur                   | Ratio   | 1 : 1 à 5 : 1        | 1,5 : 1        |
| Ratio longueur-largeur                       | Ratio   | 3 : 1 à 5 : 1        | 4 : 1          |
| <b>Taux d'aération par unité de longueur</b> | m <sup>3</sup> / m·min                          | 0,2-0,5              |                |
| <b>Quantité de « grit »</b>                  | m <sup>3</sup> / 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> | 0,004-0,20           | 0,015          |

À débit maximal, la charge hydraulique des dessableurs aérés doit être d'environ 70 m<sup>3</sup> / m<sup>2</sup>·h pour atteindre les critères de performances présentés à la section 2.1 (Tchobanoglous et coll., 2003). Le système d'aération permet de réduire la matière organique qui est liée à la matière inorganique, d'aider le mélange des ajouts en floculant et en coagulant au système et de maintenir une efficacité constante de l'élimination des particules de « grit ». Toutefois, d'importants coûts d'opération sont à considérer pour maintenir l'aération dans le système (Sawicki, 2004).

### 2.1.2. Conception d'un dessableur à vortex

Le dessableur à vortex est un bassin conique, composé d'une chambre supérieure et une chambre inférieure, utilisant la force centrifuge et la force gravitationnelle afin de canaliser les particules de « grit » vers le fond de la cuve du dessableur. Pour favoriser la création d'un vortex dans le dessableur, l'affluent arrive de façon tangentielle à la chambre supérieure du dessableur à vortex (2003). De plus, une action mécanique, fournie par des pales insérées dans la cuve, contribue à la formation du vortex et à la décantation des particules entrantes dans le système. Le vortex permet de garder les particules de plus faible densité en suspension tandis que les particules plus lourdes décantent dans la chambre inférieure du dessableur (Kulchawik, 2012).

Les particules de « grit » ayant décanté au fond de la cuve sont pompées jusqu'à une unité d'assèchement afin de diminuer la quantité d'eau retenue dans les particules de « grit ». Les particules ne décantant pas assez rapidement sont rejetées à l'effluent situé à 270° ou 360° de l'entrée afin de maximiser le temps de rétention dans le système. Un schéma du dessableur à vortex est présenté à la Figure 3.

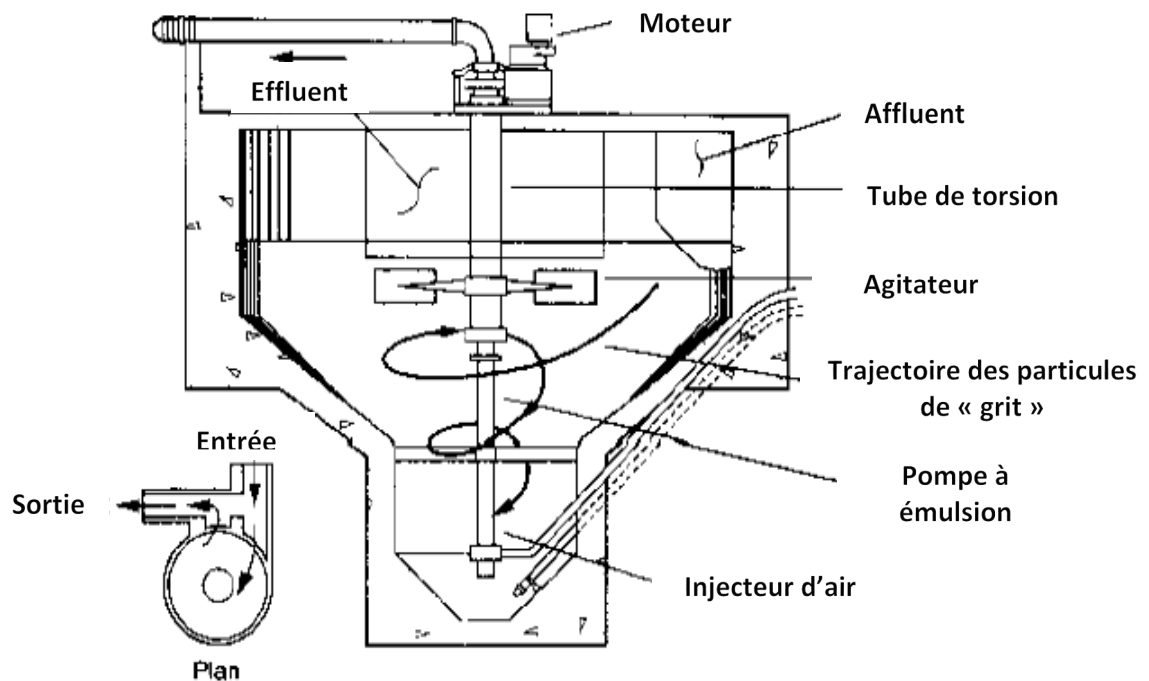


Figure 3 : Dessableur à vortex (adaptée de Tchobanoglous et coll. (2003))

La conception des dessableurs à vortex est réalisée selon des critères de conception développés par les fabricants. Les informations de conception générale des dessableurs à vortex sont présentées au Tableau 2.

Tableau 2 : Information de conception typique des dessableurs à vortex (adapté de Tchobanoglous et coll. (2003))

| Item                                    | Système international |                      |                |
|---|-----------------------|----------------------|----------------|
|   | Unités                | Étendue de la valeur | Valeur typique |
| <b>Temps de rétention à débit moyen</b> | s                     | 20-30                | 30             |
| <b>Diamètre :</b>                       |                       |                      |                |
| Chambre supérieure                      | m                     | 1,2-7,2              |                |
| Chambre inférieure                      | m                     | 0,9-1,8              |                |
| Hauteur                                 | m                     | 2,7-4,8              |                |

En plus des paramètres de conception du dessableur, afin de maximiser les performances d'élimination des particules de « grit » dans le système, il est préférable de conserver un écoulement laminaire à l'affluent du dessableur à vortex. Un écoulement turbulent favorise la remise en suspension des particules et nuit à la décantation des particules (Kulchawik, 2012).

Une fois l'unité de dessablage conçue et construite, il est indispensable de vérifier les performances de l'unité, afin de s'assurer que les performances de conception sont respectées. Pour ce faire, des stratégies d'échantillonnages et de caractérisation des particules de « grit » ont été développées par les industries.

## 2.2. Méthodologie d'échantillonnage des particules de l'affluent et l'effluent d'une unité de dessablage

Une des principales problématiques de l'évaluation des performances des unités de dessablage et de la caractérisation des particules de « grit » est qu'il n'existe aucune méthode d'échantillonnage standard afin d'obtenir un échantillon représentatif de l'affluent et l'effluent d'une unité de dessablage (Rife et Botero, 2012).

La principale difficulté d'échantillonnage des particules de « grit » est que les particules dans les canaux d'entrée et de sortie du dessableur ont des comportements

différents dépendamment de la vitesse d'écoulement. Lorsque la vitesse d'écoulement est faible, les particules plus lourdes demeurent au fond du canal et sont lentement charriées vers l'unité de dessablage, tandis que les particules en suspension sont entraînées avec l'écoulement. Lorsque la vitesse d'écoulement est grande, la répartition des particules est plus homogène et les particules plus lourdes sont remises en suspension (Funk et coll., 2008; O'Connor, 2002). La Figure 4 présente le profil d'écoulement en fonction de la vitesse d'écoulement.

Afin d'obtenir un échantillon représentatif de l'affluent et de l'effluent d'une unité de dessablage, il n'est pas recommandé d'utiliser un échantillonneur automatique. Pour la caractérisation des eaux de ruissellement en temps d'orage, l'utilisation des échantillonneurs automatiques est jugée inadéquate puisque la vitesse de pompage est insuffisante pour récupérer les particules ayant de fortes vitesses de chute (Kim et Sansalone, 2008). De plus, la concentration des échantillons obtenus par échantillonnage automatique est généralement plus faible qu'un échantillonnage ponctuel, celle-ci étant incapable de récupérer les particules ayant de grandes vitesses de chute (Li et coll., 2005).

Les particules ayant de grandes vitesses de chute étant d'intérêt pour l'évaluation des performances d'un dessableur, les consultants ou fournisseurs d'unités de dessablage ont donc produit différentes méthodes d'échantillonnage pour échantillonner de façon représentative l'affluent et l'effluent des unités de dessablage. Ces méthodes varient par les outils d'échantillonnage utilisés, sur les périodes d'échantillonnage, la durée d'échantillonnage ou par le type d'échantillon, soit ponctuel ou continu (Reddy et Pagilla, 2010). Les méthodes d'échantillonnage par échantillonnage transversal (CCS), par échantillonnage vertical intégré (VIS) et par échantillonnage multipoint sont présentées dans les sections suivantes.

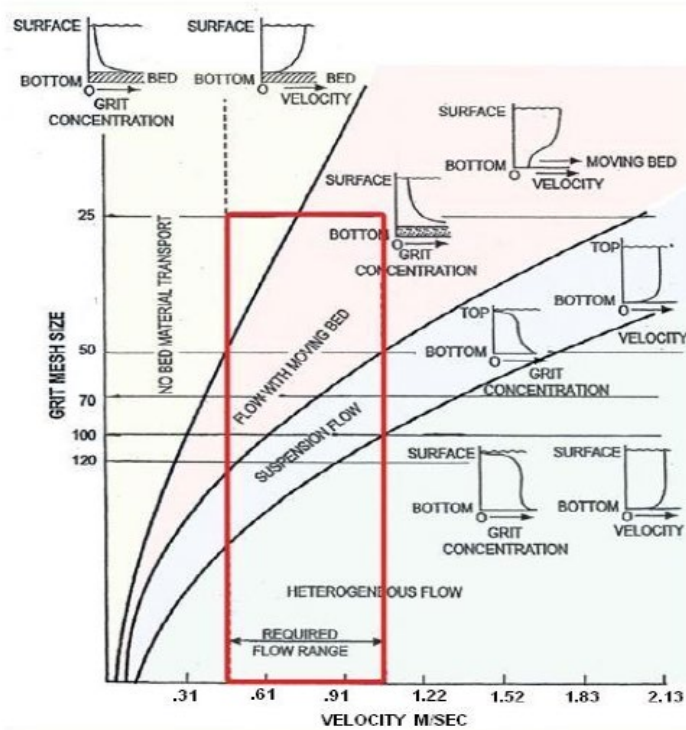


Figure 4 : Profil d'écoulement des « grit » en fonction de la vitesse d'écoulement dans le canal (Funk et coll., 2008)

### 2.2.1. Échantillonnage transversal (CCS)

L'échantillonneur transversal est l'un des outils utilisés pour l'échantillonnage de l'affluent et l'effluent des unités de dessablage. Cet outil permet de récolter des échantillons sur une période de temps continue en un point. L'échantillonneur transversal (Figure 5) est construit à partir d'un tube rigide en PVC d'environ 25 mm de diamètre et est recourbé à son extrémité immergée.



Figure 5 : Échantillonneur transversal (adaptée de Reddy et Pagilla (2010))

L'instrument est fixé afin d'assurer une stabilité et permet de contrôler la position de l'échantillonnage dans le canal. Sa forme permet d'atténuer l'influence du tube dans le canal d'affluent ou effluent du dessableur (Black Dog Analytical, 2016). À la seconde extrémité, un tuyau flexible est connecté à un système de pompage pour réaliser l'échantillonnage. La vitesse de pompage doit être la même que la vitesse d'écoulement dans le canal afin de limiter l'influence de la présence de l'échantillonneur transversal sur l'écoulement. En limitant les interférences à l'écoulement, les particules de « grit » entrent dans l'échantillonneur au lieu de le contourner, ce qui favorise la prise d'échantillons représentatifs. Tel que le présente la Figure 6, l'ouverture de l'échantillonneur transversal doit être face à l'écoulement afin de permettre l'entrée des particules de « grit » dans le tube d'échantillonnage.

Le principal désavantage de cette méthode d'échantillonnage est que l'échantillon n'est récolté qu'en un seul point et n'est pas représentatif de toute la hauteur d'eau. Il est donc nécessaire de répéter l'expérience en plusieurs points sur les plans X et Y. Toutefois, puisque les concentrations en particules de « grit » varient dans le temps et en fonction du débit, cette méthode peut influencer l'intégrité de l'échantillon (Funk et coll., 2008; Reddy et Pagilla, 2010).

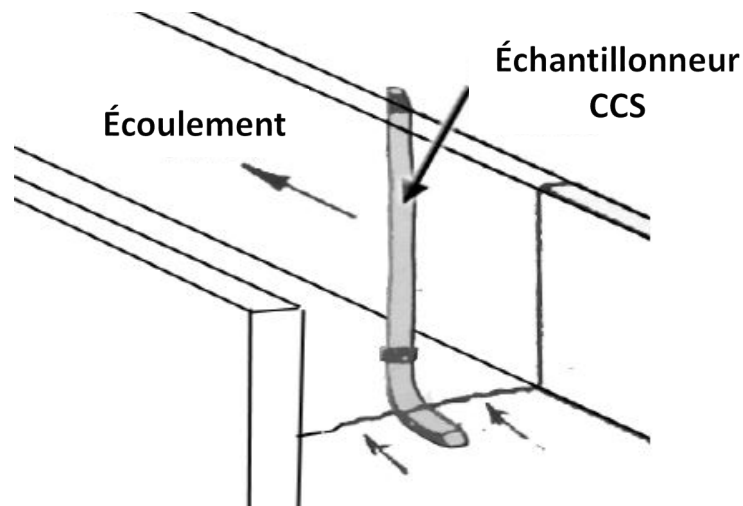


Figure 6 : Positionnement d'un échantillonneur transversal dans le canal (Funk et coll., 2008)

### 2.2.2. Échantillonnage vertical intégré (VIS)

L'échantillonneur vertical intégré est un outil d'échantillonnage permettant d'obtenir un échantillon sur toute la hauteur de la colonne d'eau. L'outil est conçu à l'aide d'un tuyau de PVC de 100mm de diamètre sur lequel une ouverture verticale est ajoutée sur toute la hauteur de la colonne. Afin de pomper de façon continue les particules entrantes dans la colonne, une pompe submersible est installée à l'intérieur de la colonne (Funk et coll., 2008) ou une pompe portable est utilisée (McNamara et coll., 2009a). Il est important que la vitesse d'écoulement dans l'échantillonneur vertical intégré soit égale à la vitesse d'écoulement dans le canal afin de diminuer l'influence de la colonne sur l'écoulement.

La largeur de l'ouverture verticale est dépendante de la vitesse d'écoulement dans le canal d'amenée, la puissance de la pompe et de la profondeur du canal. Cette fente permet d'ajuster les vitesses d'entrée dans l'échantillonneur vertical intégré. De plus, la largeur de la fente doit être suffisamment grande pour laisser passer les plus grosses particules de l'affluent de l'unité de dessablage. La fente verticale se doit d'être face à l'écoulement pour permettre l'échantillonnage des particules de « grit » tel que présenté à la Figure 7. De plus, il est nécessaire que le bout immergé de la colonne soit recouvert d'un bouchon afin d'assurer que toutes les particules passent par la fente (McNamara et coll., 2009a; Reddy et Pagilla, 2010). Afin d'obtenir un échantillon plus représentatif, il est recommandé d'insérer le tube au centre du canal.

Il est à noter que ce système d'échantillonnage permet difficilement de s'ajuster aux variations de débits puisque la taille de la fente doit être ajustée en conséquence. De plus, l'insertion de ce tube dans le canal induit une résistance à l'écoulement ce qui peut influencer les conditions hydrauliques et limiter la quantité de particules de « grit » récoltée par le système (Funk et coll., 2008). Pour ce type de système d'échantillonnage, on fait l'hypothèse que les particules de « grit » qui entrent dans la colonne décantent dans l'échantillonneur et que la succion de la pompe est uniforme et constante le long de l'ouverture de la colonne, et ce, sur toute la durée de la prise d'échantillon (Black Dog Analytical, 2016). La méthode a démontré une marge

d'erreur d'environ 5% lors de l'analyse de performance de certaines stations de traitement des eaux usées (McNamara et coll., 2014).



Figure 7 : Échantillonneur vertical intégré (adaptée de Reddy et Pagilla (2010))

### 2.2.3. Échantillonnage multipoint

L'échantillonnage multipoint a été développé afin d'assurer un échantillonnage représentatif du canal d'affluent et effluent du dessableur sur toute la surface d'écoulement. Tel que présenté, les propriétés des particules de « grit » varient selon la position verticale dans le canal, mais aussi selon la position horizontale. Les pertes de charge induites par les parois du canal favorisent l'accumulation des particules de « grit » aux endroits où les vitesses d'écoulement sont les plus faibles (Funk et coll., 2008). Cette stratégie d'échantillonnage utilise plusieurs ports d'échantillonnage, reliés à une ou plusieurs pompes en opération simultanées. Les ports d'échantillonnage sont répartis de façon à couvrir uniformément le plus de surface possible tel que présenté à la Figure 8. Afin d'échantillonner les particules de « grit » charriés au fond du canal, les ports d'échantillonnage inférieurs doivent être situés entre 2,5 et 7,5 centimètres du fond, les ports d'échantillonnage centraux sont situés à

mi-hauteur du canal et les ports supérieurs sont situés à environ 3 à 15 centimètres de la surface tel que le présente la Figure 9 (Gravette et coll., 2000; Reddy et Pagilla, 2010).

La vitesse de pompage doit être égale à la vitesse d'écoulement afin de limiter l'effet du système de pompage sur l'écoulement dans le canal. Cependant, la principale difficulté de cette stratégie d'échantillonnage est de maintenir un débit de pompage constant et égal pour chacun des points d'échantillonnage. Si les débits de pompage diffèrent d'une pompe à l'autre, il est nécessaire de recueillir les échantillons indépendamment pour chacun des ports d'échantillonnage et ensuite fractionner selon le débit de pompage de chacune des pompes pour obtenir un échantillon représentatif de toute la surface d'écoulement (Black Dog Analytical, 2016). Toutefois, en pratique, aucune pondération n'est réalisée selon la répartition des particules de « grit » en fonction de la hauteur de la colonne d'eau. La partie supérieure ayant un déplacement des « grit » plus rapide que la partie inférieure du canal, elle devrait être ajustée afin d'être représentative de la colonne d'eau en entier (Gardner et Deamer, 1996).

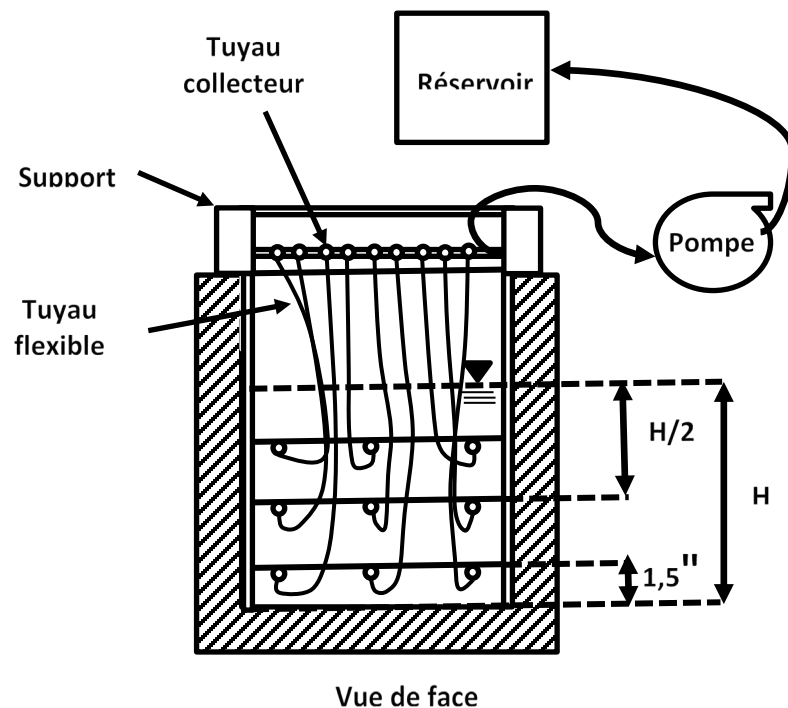


Figure 8 : Échantillonneur multipoint, vue de face (adaptée de Reddy et Pagilla (2010))

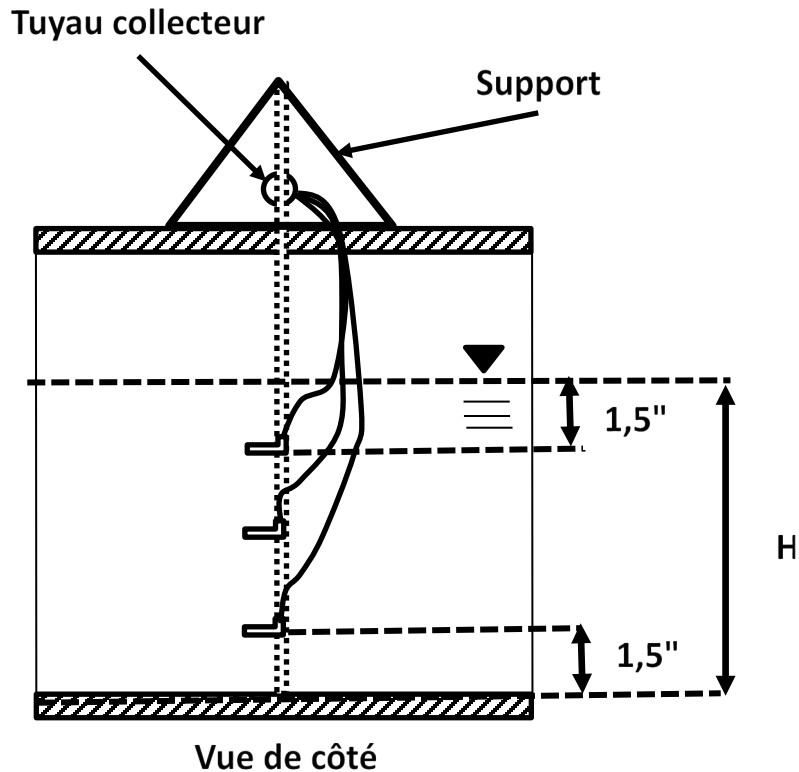


Figure 9 : Échantillonneur multipoint, vue de côté (adaptée de Reddy et Pagilla (2010))

Ces méthodes d'échantillonnage, non standardisées, n'assurent pas la qualité de l'échantillon. Les échantillons recueillis par ces différentes méthodes peuvent ne pas être représentatifs, ce qui influence l'évaluation de la décantabilité des particules de « grit » dans le système. Toutefois, à l'aide des échantillons recueillis à différents points de l'unité de dessablage, différentes méthodologies de caractérisation des particules de « grit » ont été développées en laboratoire.

### 2.3. Méthodologie de caractérisation des particules de « grit »

La caractérisation des particules de « grit » est une étape importante de l'évaluation des performances des unités de dessablage. Les caractéristiques des « grit » influencent leur capacité à décanter dans un dessableur. Les principales caractéristiques d'intérêt pour la caractérisation des particules de « grit » sont

principalement la taille des particules, les vitesses de chute et la densité des particules (Reddy et Pagilla, 2010).

### 2.3.1. Caractérisation de la taille des particules par analyse granulométrique

Les paramètres de conception et d'évaluation de la performance des unités de dessablage sont fonction de la taille des particules et nécessitent une caractérisation adéquate de la distribution de la taille des particules (Tchobanoglous et coll., 2003). La caractérisation de la distribution de la taille des particules permet d'évaluer la taille des particules entrantes, sortantes et retenues dans une unité de dessablage. La caractérisation de la taille des particules de « grit » est principalement réalisée par analyse granulométrique. Cette stratégie est couramment utilisée en géotechnique pour la caractérisation des sols et a été reprise pour la caractérisation des particules de « grit ». Cette analyse est réalisée par tamisage d'un échantillon de sol à travers une série de tamis ayant des orifices de tailles décroissantes. Les particules passant le plus petit tamis sont finalement retenues par un plat, représentant la fraction de particules ayant un diamètre inférieur au plus petit tamis. En connaissant la masse totale de l'échantillon et en mesurant la masse retenue sur chacun des tamis, il est possible de déterminer la distribution de la taille des particules sur une échelle logarithmique, sous forme de courbe cumulative (Holtz et Kovacs, 1991). Toutefois, l'analyse granulométrique a été validée pour la caractérisation des sols ayant de faibles pourcentages de matière organique. Puisque les unités de dessablage éliminent de la matière organique, différentes méthodologies de tamisage ont été développées afin de caractériser la distribution de taille des particules de « grit ». Les méthodes de caractérisation développées sont le tamisage sec et le tamisage humide.

#### 2.3.1.1. *Caractérisation en de la taille des particules en géotechnique*

En géotechnique, l'analyse granulométrique est réalisée, aux États-Unis, selon la norme américaine *ASTM D6913 - 04(2009)e1 Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. Afin de réaliser le tamisage, les échantillons de sols sont préalablement séchés au four à 105°C afin d'éliminer l'humidité présente dans l'échantillon (ASTM -D6913-04). Le tamisage

est par la suite réalisé selon la norme *ASTM C136 - Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Il est possible de tamiser l'échantillon manuellement ou en utilisant un agitateur mécanique. L'agitateur mécanique permet d'assurer une agitation constante et répétable entre les différents essais d'analyse granulométrique. La méthode estime qu'une erreur de  $\pm 0,3\%$  est acceptable pour l'analyse par tamisage. De plus, dans la norme américaine *ASTM C117 - Standard Test Method for Materials Finer than 75- $\mu\text{m}$  (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*, il est possible d'évaluer la fraction des particules ayant un diamètre inférieur à 75  $\mu\text{m}$  par un lavage des particules.

#### 2.3.1.2. *Caractérisation de la taille des particules de « grit » par tamisage sec*

Certains auteurs, conformément à la définition des « grit » proposée par l'EPA, considèrent que les matières organiques retenues par les unités de dessablage ne devraient pas être considérées (EPA, 2003) et proposent de réaliser un tamisage sec après avoir préalablement incinéré l'échantillon à 550°C (Gravette et coll., 2000; Gwinn et coll., 2013; Keane et deSilva, 2009; Samela et DeMicco, 2005). L'incinération des particules à 550°C est réalisée conformément au *Standard Methods for the examination of water and wastewater (Clesceri et coll., 1998)* et permet d'éliminer la matière volatile en suspension (MVeS) correspondant à la matière organique dans l'échantillon. L'analyse granulométrique des particules de « grit » incinérées à 550°C est réalisée selon la norme américaine *ASTM D6913 - 04(2009)e1 Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis* (Reddy et Pagilla, 2010). Lors de l'incinération de l'échantillon à 550°C, l'élimination de la matière organique qui agit comme liant entre les particules permet de défaire les agglomérations de particules. Toutefois, sachant que la fraction en MVeS peut représenter jusqu'à 55% de la masse totale des « grit », l'incinération a un impact sur la distribution granulométrique de l'échantillon de « grit » (McNamara et coll., 2009a; Wilson et coll., 2007), (WEF, 2009). L'analyse de la taille des particules est donc uniquement représentative de la fraction inorganique et ne considère pas l'effet de la matière organique.

### 2.3.1.3. *Caractérisation de la taille des particules de « grit » par tamisage humide*

L'analyse granulométrique des particules de « grit » par tamisage humide a été développée afin de limiter les actions pouvant modifier les caractéristiques des particules entre la prise de l'échantillon et l'opération de tamisage. La présence de matière organique dans l'échantillon influence les résultats de l'analyse granulométrique (Selbig, 2015). Pour la réalisation du tamisage humide, aucun protocole standard n'existe (Reddy et Pagilla, 2010). Le tamisage humide est réalisé sur un échantillon de « grit » n'ayant eu aucun prétraitement ou séchage. Immédiatement après l'échantillonnage, un échantillon de « grit » est tamisé à travers une série de tamis ayant des orifices de tailles décroissantes posées en colonne. Sous l'effet de l'eau, les particules de « grit » se déposent à travers la série de tamis. Lors du tamisage humide, aucun plat n'est utilisé pour récupérer les particules ayant un diamètre inférieur à la plus petite maille de la série de tamis. Les particules de « grit » retenus sur chacun des tamis sont récupérées et séchées à 105°C afin de déterminer la masse sèche. La masse retenue sur chacun des tamis est alors exprimée graphiquement afin de produire une courbe granulométrique.

### 2.3.2. *Caractérisation de la vitesse de chute des particules d'un dessableur*

Pour la conception des unités de décantation, tel que les dessableurs, il a été démontré que la vitesse de chute est d'intérêt (Andoh et Smisson, 1996; McNamara et coll., 2014; Verbanck et coll., 1994). Lors de la caractérisation des vitesses de chute des particules à l'affluent et l'effluent d'un dessableur, les particules ayant de grandes vitesses de chute sont principalement d'intérêt. Cette caractérisation permet de définir quelles particules auront le temps de décanter en peu de temps lors du prétraitement.

La vitesse de chute d'une particule est définie à l'aide de la densité, la forme, la taille de la particule et la viscosité du milieu (Doroodchi et coll., 2008; McGauhey, 1956; White, 2011). Dû à la variabilité des particules présentes dans les eaux usées, il est d'intérêt d'utiliser des appareils permettant d'évaluer la vitesse de chute sans avoir

recours à ces informations sur les particules. Plusieurs protocoles de caractérisation de la vitesse de chute ont été comparés et présentent une grande variabilité entre les résultats de vitesses de chute (Aiguier et coll.; Lucas-Aiguier et coll., 1997).

Pour la caractérisation des « grit », plusieurs protocoles utilisent le principe de sédimentation, utilisant la relation de Stokes et de la taille des particules (Gwinn et coll., 2013; O'Connor, 2002; Reddy et Pagilla, 2010; WEF, 2016). Toutefois, en estimant la vitesse de chute à partir de la taille des particules, les vitesses de chute sont souvent surestimées, puisque d'autres propriétés physiques tel que la densité et la forme des particules ne sont pas considérées. Cette estimation peut mener à une conception inadéquate de l'unité de dessablage et de faibles performances d'élimination des particules de « grit » (Sherony, 2011).

Pour la caractérisation des eaux usées, certains protocoles ont été développés afin de caractériser la distribution des vitesses de chute des particules dans les eaux usées, et ce, indépendamment de la taille des particules. Le protocole ViCAs (Chebbo et Gromaire, 2009) et le protocole de caractérisation des vitesses de chute par système d'élutriation (Krishnappan et coll., 2012) permettent de caractériser les eaux usées en régime statique et dynamique respectivement. Le principe des colonnes de sédimentation, le protocole ViCAs et le système d'élutriation sont présentés aux sections suivantes.

#### *2.3.2.1. Colonne de sédimentation*

En absence de protocole standard de caractérisation de la vitesse de chute des particules de l'affluent et de l'effluent des unités de dessablage, il est possible d'estimer la vitesse de chute en utilisant la loi de Newton et Stokes. Cette loi décrit la relation entre la taille et la vitesse de chute des particules (Stokes, 1850; Tchobanoglous et coll., 2003). Les particules de « grit », qui subissent une sédimentation de type 1, n'ayant aucune interaction entre elles, sont soumises à la force gravitationnelle et la force de traînée. La force gravitationnelle ( $F_G$ ), appliquée sur une particule dans l'eau, est exprimée par la densité de la particule ( $\rho_p$ , kg/m<sup>3</sup>), la

densité de l'eau ( $\rho_e$ , kg/m<sup>3</sup>), l'accélération gravitationnelle ( $g$ , m/s<sup>2</sup>) et le volume de la particule ( $V_p$ , m<sup>3</sup>) et est décrite par l'équation 4 :

$$F_G = (\rho_p - \rho_e) \cdot g \cdot V_p \quad (4)$$

La force de trainée ( $F_t$ ), appliquée sur une particule dans l'eau, dépend de la densité de l'eau ( $\rho_e$ , kg/m<sup>3</sup>), la vitesse de la particule ( $v_p$ , m/s), la surface de la particule face à l'écoulement ( $A_p$ , m<sup>2</sup>) et le coefficient de trainée ( $C_t$ ) et est décrite par l'équation 5 :

$$F_t = \frac{C_t \cdot A_p \cdot \rho_e \cdot v_p^2}{2} \quad (5)$$

Il est possible d'exprimer la vitesse de sédimentation, selon l'hypothèse que les particules sont parfaitement sphériques, par la combinaison de ces deux forces. La loi de Newton et Stokes est décrite par l'équation 6 (Tchobanoglous et coll., 2003) :

$$v_p = \sqrt{\frac{4 \cdot g}{3 \cdot C_t} \cdot d_p \cdot \rho_s} \quad (6)$$

où  $\rho_s$  (kg/m<sup>3</sup>) est la densité spécifique de la particule et  $d_p$  (m) est le diamètre de la particule.

À l'aide de cette relation, il est possible de calculer la vitesse de sédimentation théorique des particules. Tel que le présente la Figure 10 (Reddy et Pagilla, 2010), plus la densité spécifique et la taille de la particule sont grandes, plus la vitesse de sédimentation est grande. Toutefois, le coefficient de trainée influence négativement la vitesse de chute des particules. Ce paramètre est fonction du régime de l'écoulement, soit laminaire ou turbulent défini par le nombre de Reynolds, et de la sphéricité des particules. Lorsque l'écoulement est turbulent, l'estimation de la vitesse de chute est faite selon un processus itératif (White, 2011).

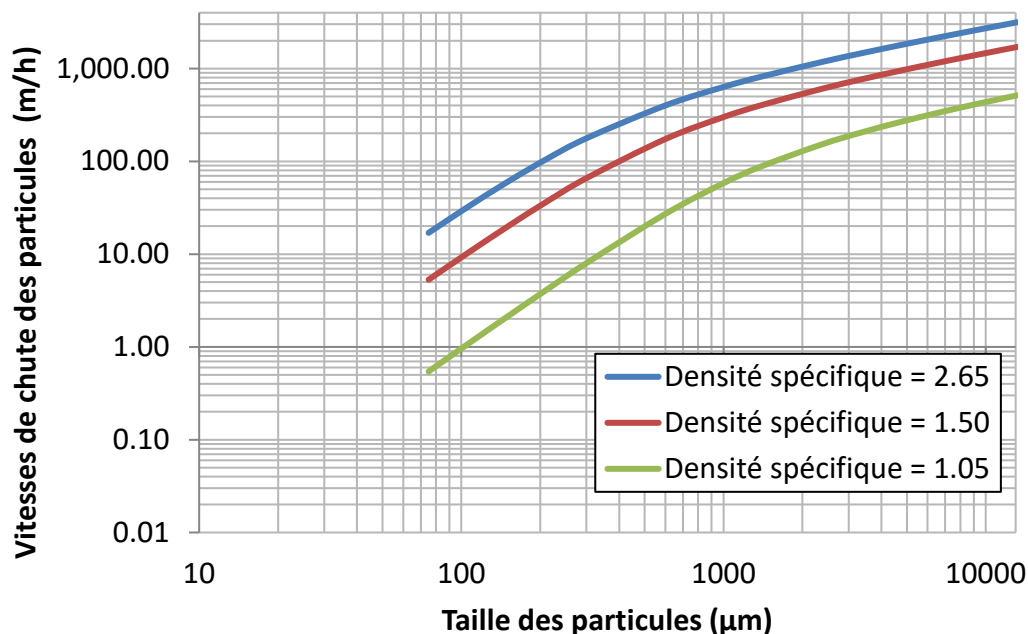


Figure 10 : Relation entre la vitesse de chute, la taille et la densité spécifique d'une particule (Adapté de Reddy et Pagilla (2010))

À l'aide d'une colonne de sédimentation, tel que les cônes d'Imhoff modifié, la colonne développée par l'agence de la protection de l'environnement (EPA) et certaines colonnes développées par les industries, il est possible de calculer une vitesse de chute et de rapporter cette dernière en taille de particule à l'aide de la loi de Newton et Stokes. Le cône d'Imhoff modifié, composé d'une colonne de sédimentation de trois mètres de haut et de 152 millimètres de diamètre et d'un cône d'Imhoff, permet de mesurer le temps requis aux particules pour atteindre le port d'échantillonnage au bas de la colonne, et ce, pour chacune des tailles de particules. La capacité totale de la colonne est de 37,8 L et la concentration maximale ne doit pas dépasser les 100 mg/L afin de limiter les interactions entre les particules. Le cône d'Imhoff modifié est présenté à la Figure 11 (Sansalone et coll., 2009).

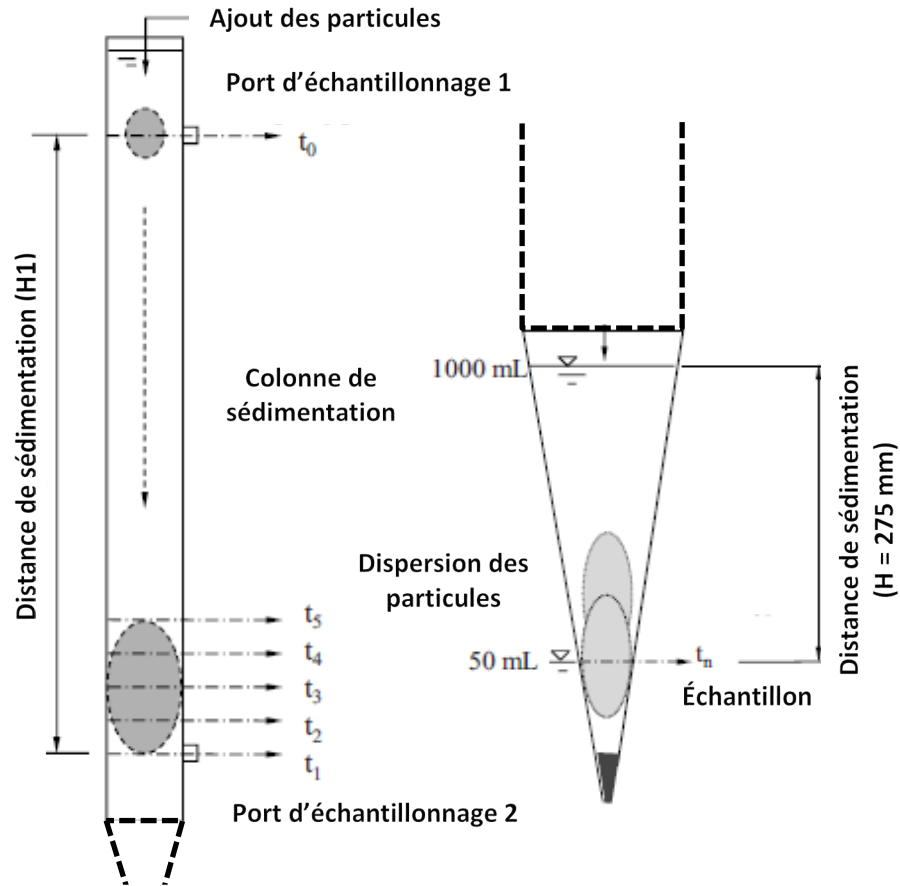


Figure 11 : Cône d'Imhoff modifié (adaptée de Sansalone et coll. (2009))

À l'aide des colonnes de sédimentation, il est possible de comparer la distribution de la taille des particules obtenues par tamisage à celle obtenue à partir de la vitesse de chute. La distribution de taille des particules obtenues à partir de la vitesse de chute correspond à la taille de sable équivalente, selon l'hypothèse que les « grit » ayant décanté sont parfaitement sphériques et possèdent une densité spécifique de 2,65 (Gwinn et coll., 2013; O'Connor, 2002; Wilson et coll., 2007).

### 2.3.2.2. Colonne ViCAs

Le protocole ViCAs (Vitesse de Chute en Assainissement) a été conçu pour estimer la vitesse de chute des particules présentes dans les eaux de ruissellement (Gromaire et Chebbo, 2003). Le protocole ViCAs est basé sur la mesure de la charge en matière en suspension (MeS) qui a décanté pour un certain temps de décantation. La colonne ViCAs a été validée et permet d'obtenir des résultats répétables et précis (Chebbo et Gromaire, 2009). Le protocole a été utilisé afin de caractériser les eaux pluviales (Vallet et coll., 2014), les eaux usées brutes (Maruéjols et coll., 2013) et les eaux de décanteurs primaires (Bachis et coll., 2015; Hadj, 2013).

Afin de réaliser les essais, un échantillon homogène de cinq litres est pompé par succion, en deux ou trois secondes, dans une colonne de 70 cm de hauteur et 7 cm de diamètre. Le protocole ViCAs opère sous l'hypothèse que la charge en matière en suspension (MeS) est répartie initialement de façon homogène dans la colonne de décantation et que les particules décantent indépendamment les unes des autres, et ce, sans former de floccs et sans diffusion (Torres et coll., 2007). Les particules décantées sont recueillies à toutes les périodes de temps  $\Delta t$  prédéfinies à l'aide de coupelles prévues à cet effet. Afin de limiter la variation du volume d'eau dans la colonne, les coupelles sont préalablement remplies avec de l'eau avant d'être insérées sous la colonne à tour de rôle. La colonne ViCAs est présentée à la Figure 12 (Chebbo et Gromaire, 2009).

Le protocole ViCAs présente des incertitudes relatives sur les vitesses de chute mesurées et accepte des tests ayant un bilan de masse de  $\pm 15\%$ . Le bilan de masse est calculé à l'aide de la différence entre la somme des particules recueillies lors de l'essai au différent pas de temps et la masse totale décantée définie par les concentrations initiale et finale de la colonne d'eau.

De plus, les résultats sont sensibles aux conditions d'opérations du protocole. Il a été démontré que la température et la concentration de l'échantillon peuvent influencer les résultats du test par ViCAs. La vitesse de chute des particules augmente avec la température de l'eau, ayant une viscosité de l'eau plus faible et augmente avec la

concentration en MeS de l'échantillon puisque la nature et la forme des particules varient en fonction des habitudes de consommation durant la journée, une concentration plus grande présentant des particules ayant des vitesses de chute plus grandes (Hadj, 2013).

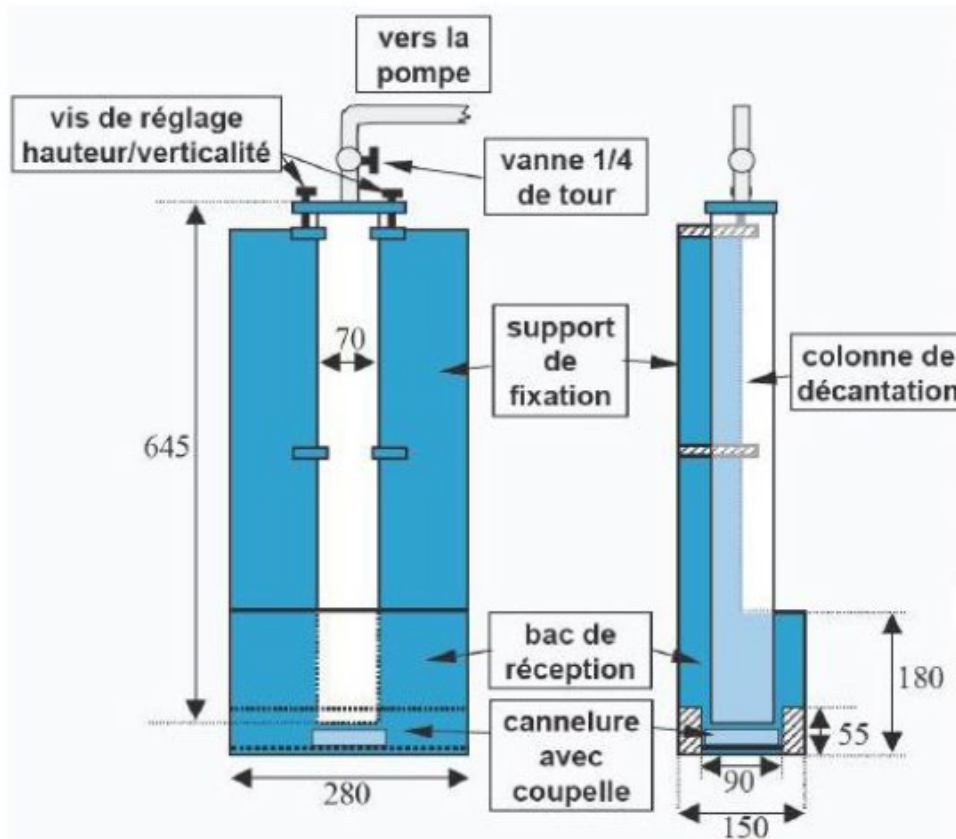


Figure 12 : Colonne de ViCAs (Chebbo et Gromaire, 2009)

### 2.3.2.3. Élutriation

Il a été démontré que les méthodes existantes d'évaluation statique des vitesses de chute de particules connaissent des lacunes quant à la caractérisation des particules ayant de grandes vitesses de chute (O'Connor, 2002). L'élutriation est un système ayant été développé pour caractériser la vitesse de chute des particules des eaux de pluie et des eaux usées selon un régime d'écoulement dynamique. Il a été démontré que l'effet des turbulences, bien souvent négligé, peut avoir des effets considérables

sur les vitesses de chute des particules (Doroodchi et coll., 2008). L'élutriation reproduit les interactions des particules sous l'effet des turbulences lors de la décantation des particules lorsqu'il y a de l'aération (Krishnappan et coll., 2004). L'élutriation est un système fermé qui à l'aide d'une pompe fait passer à débit constant un échantillon d'eaux usées complètement mélangé à travers huit colonnes de diamètre croissant. Le diamètre intérieur des colonnes est respectivement de 25, 34, 49, 70, 105, 143, 197 et 197mm. À l'aide du débit de pompage et de l'aire d'écoulement de chacune des colonnes, il est possible de calculer la vitesse d'écoulement dans chacune des colonnes du système (Marsalek et coll., 2006). Afin d'assurer un régime turbulent, un débit de pompage minimal de 0,5 L/min est nécessaire (Krishnappan et coll., 2004). En ajustant le débit, il est possible de définir les vitesses de chute d'intérêt et de fractionner les particules de l'échantillon en classe de vitesses de chute pour chacune des colonnes (Hettler, 2010; Hettler et coll., 2011). Le montage d'un système d'élutriation est présenté à la Figure 13:

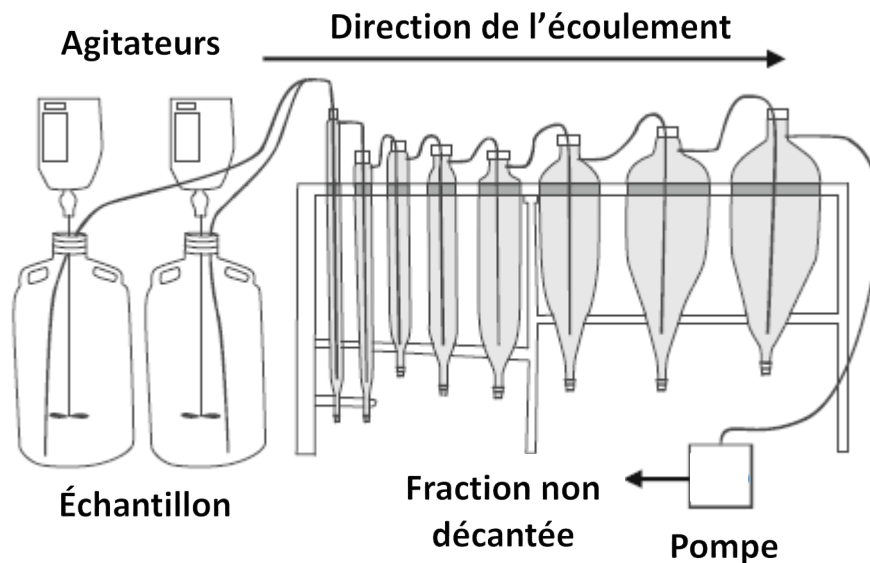


Figure 13 : Montage d'un système d'élutriation (adaptée de Krishnappan et coll. (2012))

Pour chacune des colonnes, les particules ayant une vitesse de chute supérieure à la vitesse d'écoulement ascendante s'accumulent à la base de la colonne et sont récupérées à la fin de l'expérience afin de réaliser un bilan de masse. Les différentes classes peuvent donc être évaluées indépendamment afin de déterminer les

caractéristiques des sédiments retenus (Exall et coll., 2009). Suite à 12 essais, une déviation standard de 10% et un bilan de masse de plus ou moins 16% ont été observés, ce qui est jugé acceptable (Marsalek et coll., 2006). Le bilan de masse est calculé à l'aide de la différence entre la somme des particules recueillies au bas des colonnes et la masse totale décantée définie par les différences de masses entre la concentration initiale et la concentration de la fraction non décantée, le tout divisé par la masse totale décantée.

### 2.3.3. Caractérisation de la densité spécifique des particules

Pour la conception des unités de dessablage, une densité spécifique de 2,65 est couramment utilisée. Toutefois, il est recommandé, lorsque la densité spécifique des particules est inférieure à 2,65 de manière significative, d'utiliser des critères de conception plus contraignants (Tchobanoglous et coll., 2003). Suite à la caractérisation de la densité spécifique des particules d'un dessableur, des densités spécifiques allant de 1,4 à 2,65 ont été observées (Kitching et Denton, 2012; McNamara et coll., 2009a; Sansalone et coll., 2009). La densité spécifique de 2,65 est propre à un sable de silice seulement et n'est pas représentative des autres composants du « grit ». La matière organique ou les silts organiques possèdent une densité spécifique allant de 1,0 jusqu'à 1,4.

Il est possible de mesurer la densité spécifique des particules de « grit » à l'aide d'un pycnomètre selon la norme américaine *ASTM C128-07 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate (Reddy et Pagilla, 2010)*. Un pycnomètre à eau ou à gaz peut être utilisé pour le calcul de la densité spécifique. Il est avantageux d'utiliser un pycnomètre à gaz comparativement au pycnomètre à eau, puisqu'il nécessite un plus petit échantillon, un temps d'analyse plus court et possède une plus grande précision (Sansalone et coll., 2009).

L'analyse par pycnomètre à gaz est réalisée selon la norme américaine *ASTM D5550-14 Standard Test Method for Specific Gravity of Soils by Gas Pycnometer*. Afin de mesurer la densité spécifique, l'échantillon doit être séché à 105°C et laissé au

dessiccateur. L'échantillon est ensuite placé dans une cellule de charge de volume connu et pesé dans le pycnomètre qui est muni d'une balance. Le volume occupé par l'échantillon est calculé à partir du volume de gaz inséré dans la cellule. La densité spécifique est calculée à partir de l'équation 7 :

$$\rho_s = \frac{\left(\frac{M_s}{V_s}\right)}{\rho_e} \quad (7)$$

où  $\rho_s$  est la densité spécifique de l'échantillon ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $M_s$  est la masse de l'échantillon (g),  $V_s$  est le volume de l'échantillon ( $\text{cm}^3$ ) et  $\rho_e$  est la densité de l'eau distillée à 4°C. La densité spécifique mesurée au pycnomètre à gaz, suivant ce protocole standard, présente une précision de  $\pm 0,04\%$  (ASTM D5550-14).

## 2.4. Évaluation de la performance des dessableurs

À l'aide des stratégies d'échantillonnage et de caractérisation, il est possible d'évaluer si l'unité de dessablage est efficace pour l'élimination des particules de « grit ». Afin d'évaluer la performance des unités de dessablage, la principale méthode employée est d'établir un bilan de masse des intrants et extrants de l'unité. Toutefois, aucune méthode normalisée ou standardisée n'existe afin d'évaluer la performance d'élimination des particules de « grit » et de nombreuses définitions de performance sont présentement utilisées dans la pratique. Il est donc difficile d'effectuer des comparatifs de performance entre les stations de traitement (Funk et coll., 2008; Gardner et Deamer, 1996; Samela et DeMicco, 2005). L'évaluation de la performance se fait principalement par le biais de l'analyse du bilan de masse des particules de « grit ». En échantillonnant à différentes positions de l'unité de dessablage, il est possible de définir le pourcentage d'élimination des particules de « grit » entrantes dans le système. Le calcul du bilan de masse peut se faire selon trois différentes méthodes : (1) l'analyse du bilan de masse des particules de « grit » à l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage (liquide/liquide), (2) l'analyse du bilan de masse des particules de « grit » à l'affluent et/ou l'effluent et retenues par l'unité de dessablage (liquide/solide), ou (3) l'analyse du bilan de masse de la masse des particules de « grit » retenues dans l'unité de dessablage et dans l'unité de

décantation primaire (solide/solide) (Gardner et Deamer, 1996; Reddy et Pagilla, 2010).

#### 2.4.1. Analyse du bilan de masse des particules de « grit » à l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage (liquide/liquide)

La méthode jugée la plus performante pour l'évaluation de la performance des unités de dessablage est l'analyse du bilan de masse des particules de « grit » à l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage (Gardner et Deamer, 1996). Cette méthode consiste à échantillonner de manière représentative, par le biais de différents outils d'échantillonnage, les particules de « grit » présentes dans les eaux usées de l'affluent et l'effluent du dessableur. Un schéma des points d'échantillonnage est présenté à la Figure 14.

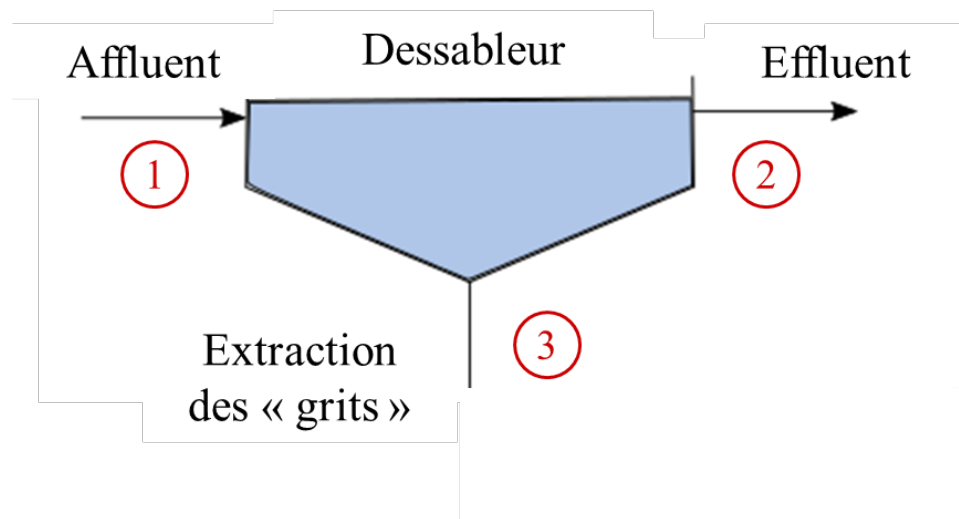


Figure 14 : Schémas des points d'échantillonnage pour l'évaluation de la performance d'un dessableur

Il est ainsi possible de mesurer la concentration et de définir la masse de « grit » entrante et sortante du système, respectivement le point 1 et 2 de la Figure 4. L'erreur sur le bilan de masse, correspondant à l'élimination des particules de « grit », est calculée à partir de l'équation 1 (Andoh et coll.; McNamara et coll., 2009a) :

$$\% \text{ Élimination du « grit »} = \frac{\text{Masse de « grit » à l'affluent} - \text{Masse de « grit » à l'effluent}}{\text{Masse de « grit » à l'affluent}} \times 100 \quad (1)$$

Puisque les critères de performance de l'unité de dessablage sont exprimés en fonction de la taille des particules, il est nécessaire de connaître la quantité et la taille des particules de « grit » entrante dans le système. Pour la conception des unités de dessablage, les critères de performance recommandés sont d'éliminer 95% des particules plus grandes que 300 µm, 85% des particules plus grandes que 210 µm et 65% de particules plus grandes que 150 µm (Tchobanoglous et coll., 2003).

#### 2.4.2. Analyse du bilan de masse des particules de « grit » à l'affluent ou l'effluent et retenues par l'unité de dessablage (liquide/solide)

Afin d'analyser les performances de l'unité de dessablage il est aussi possible de réaliser une analyse du bilan de masse des particules de « grit » à l'affluent ou l'effluent et retenues par l'unité de dessablage (liquide/solide). L'une des principales difficultés pour l'évaluation de l'efficacité des dessableurs est qu'il est difficile de prendre des échantillons représentatifs de l'affluent (WEF, 2009). Il est donc proposé de mesurer la concentration en « grit » à l'effluent et de mesurer la masse de « grit » retenue par l'unité de dessablage afin de mesurer l'efficacité du dessableur, respectivement les points 2 et 3 sur la Figure 4 (Gravette et coll., 2000). Le pourcentage d'élimination des particules de « grit » est calculé à partir de l'équation 2 :

$$\% \text{ Élimination du « grit »} = \frac{\text{Masse de « grit » retenue}}{\text{Masse de « grit » à l'effluent} + \text{Masse de « grit » retenue}} \times 100 \quad (2)$$

La masse de « grit » à l'effluent est mesurée de manière représentative à l'aide de différents outils d'échantillonnage. La masse de « grit » retenue est mesurée lors de la disposition des particules de « grit » par extraction des particules de « grit » retenues dans un dessableur.

##### 2.4.2.1. Analyse de la performance par « grit » endémique

Il est aussi possible de réaliser une analyse de la performance à l'aide des particules de « grit » endémique. Le « grit » endémique correspond à un sable, ayant une distribution de taille des particules et une densité prédéfinies, qui est injectée à l'affluent de l'unité de dessablage en concentration contrôlée. Ce dernier est

uniquement composé de particules inorganiques sphériques diluées à l'aide de l'effluent de la station de traitement des eaux usées. Puisque la quantité de « grit » endémique ajoutée au système est connue, il est possible de mesurer la quantité de « grit » endémique ayant été éliminée par le dessableur et de définir la performance du système. Toutefois, cette approche est très coûteuse pour les industries et nécessite une planification importante de l'analyse de la performance. De plus, les particules de « grit » endémique ne sont pas représentatives des particules de « grit » présentes dans les eaux usées (Couture et coll.; Osei et coll.; Reddy et Pagilla, 2010; Sober et coll., 2012).

#### 2.4.3. Analyse du bilan de masse de la masse des particules de « grit » retenues dans l'unité de dessablage et dans l'unité de décantation primaire (solide/solide)

Certains auteurs, conformément à la définition des particules de « grit » proposée par l'EPA, considèrent que seulement les matières inorganiques retenues par les unités de dessablage composent les « grit » et que la totalité des matières inorganiques décante dans le dessableur et le décanteur primaire (Gravette et coll., 2000; Gwinn et coll., 2013; Keane et deSilva, 2009; Samela et DeMicco, 2005). Il est donc possible de réaliser l'analyse de performance des unités de dessablage en vérifiant la masse de « grit » présente dans les boues du décanteur primaire et la masse de particules de « grit » retenues dans les unités de dessablage. En brûlant les boues du décanteur primaire à 550°C, la fraction représentant la matière organique est éliminée, laissant seulement les particules inorganiques d'intérêt. En connaissant les charges moyennes de « grit » retenues par l'unité de dessablage pour une durée de temps donnée et en mesurant la concentration de « grit » présent dans les boues du décanteur primaire, il est donc possible de vérifier l'efficacité de l'unité de dessablage. L'erreur sur le bilan de masse est calculée à partir de l'équation 3 :

$$\% \text{ Erreur bilan de masse} = \frac{\text{Masse de « grit » extrait}}{\text{Masse « grit » extrait} + \text{Masse « grit » boues décanteurs primaires}} \times 100 \quad (3)$$

#### 2.4.4. Performances des unités de dessablage dans la littérature

L'efficacité d'élimination des particules de « grit » est jusqu'à 2,8 fois inférieure aux critères d'élimination assurés par les fabricants (Reddy et Pagilla, 2010). De nombreuses stations de traitement présentent un taux d'élimination des particules de « grit » inférieur à 50%, et ce, pour différents types de dessableur (Andoh et coll.; Kulchawik, 2012; McNamara et coll., 2014).

Les faibles performances observées aux différentes unités de dessablage peuvent être dues aux stratégies d'échantillonnage et de caractérisation des particules de « grit » qui sont non-standardisés et qui influencent les mesures de la masse de « grit » aux différents points de l'unité de dessablage. Les faibles performances des unités de dessablage peuvent aussi en partie être expliquées par l'influence de la matière organique sur les particules inorganiques. La matière organique attachée à la matière inorganique diminue la densité spécifique de la particule diminuant ainsi sa vitesse de chute. Tel que le présente la Figure 15, pour une même taille, les particules de « grit », influencées par la matière organique, décantent moins rapidement qu'une particule exempte de matière organique. Ces particules ont des vitesses de chute comparables à des particules de sable de plus petite dimension (de Silva et Bates, 2004; Hobson et coll., 2005; Keane et deSilva, 2009).

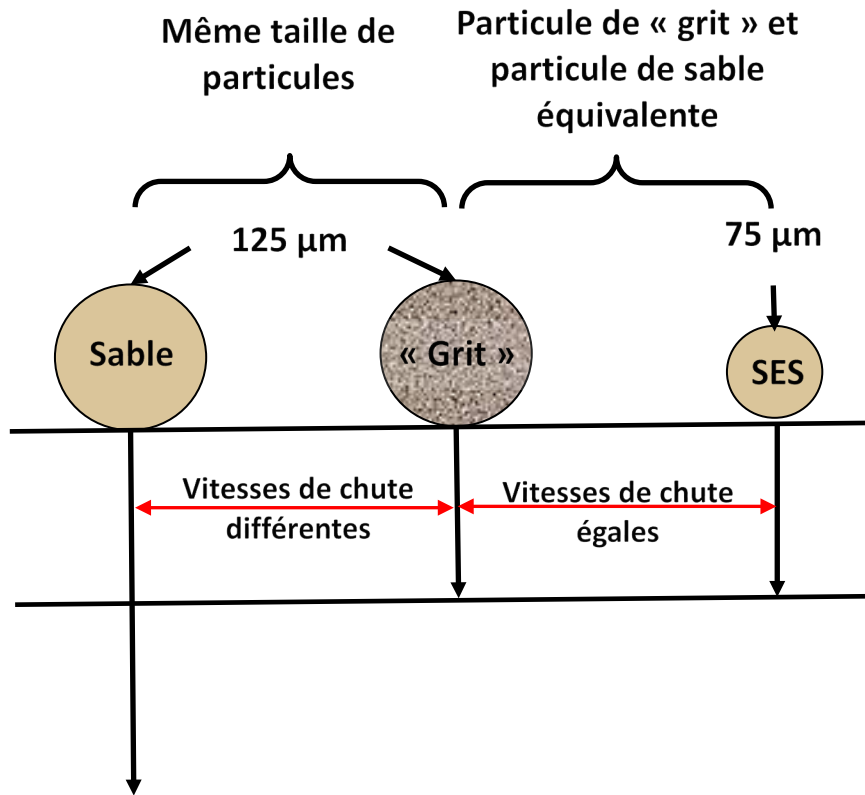


Figure 15 : Effet de la matière organique sur la vitesse de chute (adapté de Keane et deSilva (2009))

En utilisant la taille des particules pour la conception des unités de dessablage, la vitesse de chute des particules est surestimée puisque l'effet de la matière organique n'est point considéré lors de la conception. Il serait donc préférable de réaliser la conception des unités de dessablage en fonction de la vitesse de chute afin d'atteindre de meilleures performances d'élimination des particules de « grit » (Gwinn et coll., 2013; Sherony, 2011; Verbanck et coll., 1994). De plus, les résultats des essais de performance sont influencés par la méthode d'échantillonnage employée. Il est donc indispensable d'obtenir un échantillon représentatif pour réaliser la caractérisation des particules de « grit » et évaluer les performances de manière adéquate.

## 2.5. Conclusion

Des difficultés importantes quant à la conception et l'évaluation des performances des unités de dessablage existent dû à un manque de connaissances et de compréhension de la décantabilité des particules présentes à l'affluent et l'effluent des unités de dessablage. Lors de l'évaluation des performances, les stratégies d'échantillonnage proposées n'assurent pas la prise d'échantillon représentatif, répétable, simple et utile. Les performances des unités de dessablage calculées diffèrent d'une méthode d'échantillonnage à une autre et il est difficile de comparer les performances des stations entre elles.

De plus, les stratégies de caractérisation de la décantabilité de l'affluent et de l'effluent d'une unité de dessablage sont axées sur la taille des particules par tamisage, nécessitant des opérations importantes afin d'estimer leurs vitesses de chute. L'évaluation de la taille des particules présente des résultats divergeant dépendamment de la méthode de tamisage et le prétraitement (lavage, séchage) utilisés, amenant à des conclusions différentes quant aux propriétés de décantation des particules de « grit ». De plus, ces protocoles de caractérisation de la taille de particules doivent être améliorés et standardisés.

Par contre, certains protocoles utilisés pour la caractérisation des vitesses de chute dans les eaux usées peuvent être d'intérêt pour la caractérisation des « grit ». Ces protocoles permettent de définir les propriétés de décantation des particules, et ce, indépendamment des propriétés physiques des particules. En utilisant des protocoles standardisés, répétables et représentatifs, il serait alors possible de comparer l'efficacité des stations de traitement entre elles.

### 3. Objectifs

L'objectif de ce projet de maîtrise qui s'inscrit dans le projet dessable*EAU*, décrit précédemment (p.4), est de développer un protocole standard de caractérisation de la qualité de l'eau autour d'un dessableur. Aucune stratégie standard ou normalisée n'est présentement appliquée pour la caractérisation de la qualité de l'eau d'un dessableur, amenant à des analyses de performances erronées ou non-comparables entre les unités de dessablage. Le cadre de cette maîtrise est défini en deux sous-objectifs :

- Développer un protocole de caractérisation de la décantabilité de l'affluent et l'effluent des unités de dessablage.
  - Développer un protocole de caractérisation de la taille des particules de « grit ».
  - Développer un protocole de caractérisation de la distribution de la vitesse de chute des particules de « grit » par élutriation.
  - Développer un protocole de caractérisation de la distribution de la vitesse de chute des particules de « grit » par colonne ViCAs.
- Établir un protocole d'évaluation des performances d'un dessableur.

## 4. Matériel et méthodes

La caractérisation de la qualité de l'eau d'un dessableur a été réalisée à plusieurs sites de la région de Québec selon différentes méthodes de caractérisation. Ces méthodes ont ensuite été comparées et évaluées afin d'établir un protocole standard de caractérisation de la décantabilité des particules à l'affluent et l'effluent d'un dessableur et d'évaluation de la performance de l'unité de dessablage.

Les sites expérimentaux, les méthodes d'échantillonnage et les méthodes de caractérisation de la taille des particules et des vitesses de chute sont détaillés dans la présente section.

### 4.1. Sites expérimentaux

Afin de vérifier les caractéristiques des particules entrantes et sortantes des unités de dessablage de différents types de dessableur, l'étude *dessableEAU* a été réalisée sur diverses stations de traitement des eaux usées de la région de Québec. Les sites retenus pour la caractérisation des dessableurs sont la Station Est de la Ville de Québec, comprenant un dessableur aéré et la station de la Ville de Lévis, arrondissement de Saint-Nicolas, comprenant un dessableur à vortex. L'analyse des unités de dessablage a été réalisée sous diverses conditions météorologiques, de débit et d'opération afin d'observer une variabilité des caractéristiques de décantation des particules.

#### 4.1.1. Ville de Québec (Station Est)

La Station Est de la Ville de Québec (Figure 16) a été conçue pour assurer le traitement des eaux usées des arrondissements Est de la Ville de Québec, totalisant environ 270 000 habitants. La station d'épuration est munie d'un traitement préliminaire par dégrillage et dessablage, un traitement primaire par décantation lamellaire, d'un traitement secondaire par biofiltration et d'un traitement tertiaire de désinfection par UV pendant la saison estivale. En moyenne, 231 000 m<sup>3</sup> d'eaux usées sont traités par jour.



*Figure 16 : Station Est de traitement des eaux usées de Québec*

La Station Est de la Ville de Québec, est alimentée par un réseau d'égout composé d'environ 30% de réseau unitaire et de 70% de réseau séparatif ou pseudo séparatif. Le réseau d'assainissement de la Station Est est muni de 10 bassins de rétention, pour un volume total de 111 000 m<sup>3</sup>, permettant ainsi de limiter les impacts des déversements sur le milieu récepteur en temps de pluie.

La Station Est de la Ville de Québec est munie de dégrilleurs grossiers d'ouverture de 19mm et de cinq dessableurs aérés de 25 mètres de longueur, 6 mètres de largeur et 4 mètres de profondeur. Le traitement préliminaire possède une capacité maximale de 30 000 m<sup>3</sup>/h. La charge superficielle maximale des unités de dessablage est de 40 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h, pour un temps de rétention de 6 minutes à débit maximal. Les unités de dessablage de la Ville de Québec sont munies d'un système de raclage mécanique permettant d'accumuler les particules en suspension ayant décanté dans une chambre de pompage. Selon des cycles automatisés, les « grit » sont pompés vers une unité d'assèchement des particules de « grit » opérant en continu. Les unités de traitement préliminaire de la Station Est évacuent environ 12 tonnes de particules de « grit » par jour.

#### 4.1.2. Ville de Lévis (arrondissement Saint-Nicolas)

La station d'épuration des eaux usées de Saint-Nicolas (Figure 17), un arrondissement de la Ville de Lévis, a été construite en 1997. La station d'épuration a été conçue pour traiter les eaux usées des villes de Charny, Saint-Nicolas et Saint-Rédempteur selon un procédé de type réacteur biologique séquentiel (RBS). La station permet de desservir une population de 36 000 habitants, correspondant à un débit moyen de 18 760 m<sup>3</sup> d'eaux usées par jour et jusqu'à 95 485 m<sup>3</sup>/d en temps de pluie. Les eaux acheminées à la station d'épuration sont principalement des eaux domestiques et des eaux d'infiltration.



*Figure 17 : Station de traitement des eaux usées de Saint-Nicolas*

La station d'épuration est munie d'un traitement préliminaire, comprenant deux unités de dégrillage et de dessablage. Les dégrilleurs grossiers ont des espacements entre les barreaux de 12,7 mm et enlèvent les matières les plus grossières des eaux usées brutes. Les eaux usées sont ensuite acheminées à l'unité de dessablage par un canal rectangulaire de 950 mm de largeur. Les deux unités de dessablage sont de type vortex de modèle Mectan (Véolia Water Technologies), chacun conçu pour traiter des débits maximaux de 50 944 m<sup>3</sup>/d. À débit moyen, les dessableurs sont conçus pour éliminer entre 0,2 et 1,0 m<sup>3</sup>/d de « grit ».

Les dessableurs à vortex ont 4,2 mètres de diamètre et sont munis d'un agitateur mécanique permettant la création d'un vortex. Les « grit » sont ensuite acheminés

vers une vis à sable par pompage. Les périodes de soutirage des « grit » sont coordonnées à l'aide d'une minuterie programmée aux 6h ou 8h dépendamment de la période de l'année. La vis à sable est alors activée pour une période de 30 minutes et permet la séparation des particules de « grit » et de l'eau. Les particules sont ensuite acheminées au site d'enfouissement sanitaire. À la sortie des dessableurs, un canal Parshall de 18 pouces (450 mm) de largeur permet d'assurer le maintien des conditions hydrauliques d'opération spécifiques aux dessableurs, en maintenant une vitesse et une hauteur d'eau suffisantes causées par l'étranglement du canal.

## 4.2. Méthodologie d'échantillonnage

Une méthodologie d'échantillonnage simple et peu coûteuse a été développée afin d'obtenir un échantillon représentatif des particules de « grit » entrantes (1), sortantes (2) et retenues (3) par l'unité de dessablage tel que présenté à la Figure 18.

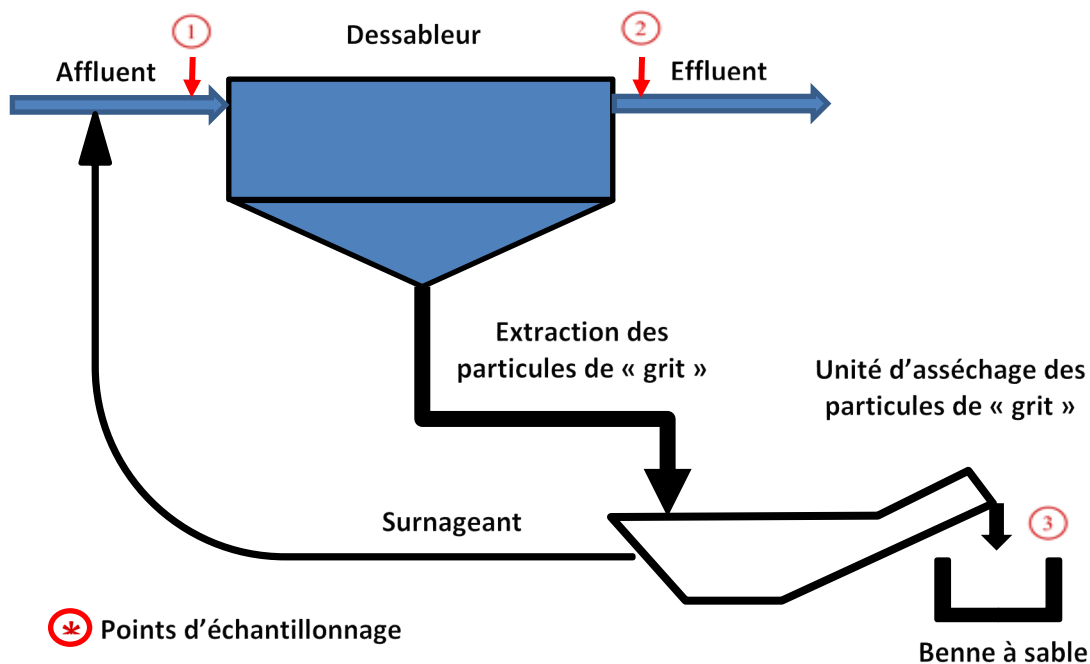


Figure 18 : Schéma d'une unité de dessablage

La méthodologie d'échantillonnage se divise en deux parties, la première concerne l'échantillonnage dans le canal d'affluent (1, Figure 18) et dans le canal de sortie du dessableur (2, Figure 18), des particules de « grit » se situant dans la phase liquide.

La deuxième partie concerne l'échantillonnage des particules de « grit » retenues par le dessableur (3, Figure 18), position (3).

#### 4.2.1. Échantillonnage de l'affluent et l'effluent des unités de dessablage

L'échantillonnage de l'affluent et l'effluent des unités de dessablage a été réalisé uniquement à la station de traitement des eaux usées de Saint-Nicolas. À l'aide d'un échantillonneur Van Dorn modifié de capacité de 8,2 L, des échantillons d'eaux usées ont été échantillonnés. Le Van Dorn est un outil d'échantillonnage ayant été développé pour prélever des échantillons ponctuels en profondeur, plus de deux mètres, tel que des eaux de lac (Agriculture et agroalimentaire Canada).

L'appareil est composé d'un cylindre en PVC muni de joints d'étanchéité en caoutchouc semi-rigide, d'une corde de nylon de 30 mètres et de deux clapets reliés à un système permettant de contrôler la fermeture de ces derniers. La fermeture des clapets est réalisée par l'activation d'un bouton presseur dû à un poids attaché à la corde de nylon et relâché par l'utilisateur de l'appareil. Le cylindre du Van Dorn de 8,2 L est de 150 mm de diamètre et 480 mm de long. Le Van Dorn est présenté à la Figure 19.

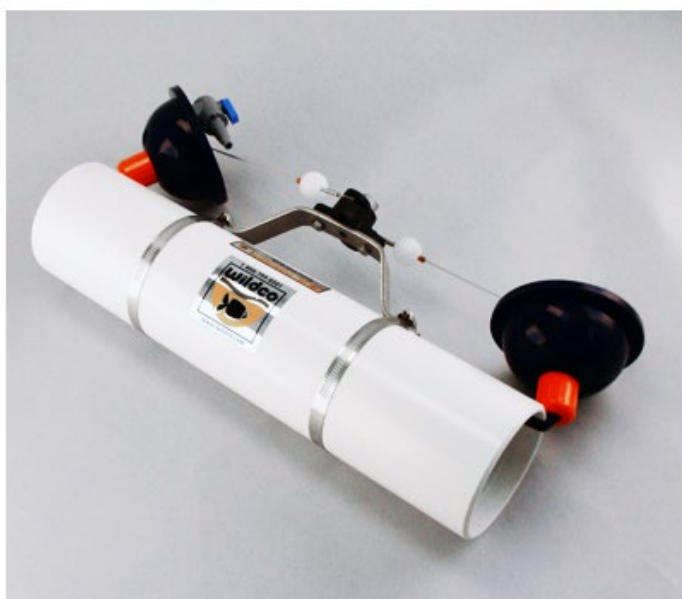


Figure 19 : Échantillonneur Van-Dorn (Hoskins Scientific LTD, 2016)

Pour la prise d'échantillon, l'échantillonneur Van Dorn n'étant manipulé que par une corde, il était instable, et ce, même à de faibles vitesses d'écoulement. La corde positionnée au centre de l'appareil entraînait une rotation du Van Dorn sous la force d'écoulement, menant à une incapacité à l'orienter dans le sens de l'écoulement dans le canal d'affluent et d'effluent. L'appareil a donc été modifié afin d'améliorer son contrôle et d'empêcher la rotation. Des perches télescopiques de quatre mètres ont été fixées de chaque côté du Van Dorn afin d'assurer à l'utilisateur la maniabilité de l'appareil. Le Van Dorn modifié est présenté à la Figure 20.



*Figure 20 : Échantillonneur Van-Dorn modifié*

Pour la prise d'échantillon, l'échantillonneur Van Dorn est déposé au fond, au centre du canal de façon à ce que les ouvertures de l'échantillonneur soient dans le sens de l'écoulement. En déposant le Van Dorn dans le canal, il a été possible d'échantillonner les particules roulantes charriées au fond du canal. De plus, le cylindre du Van Dorn étant de 150 mm de diamètre, il a été possible à la station de traitement des eaux usées de Saint-Nicolas d'échantillonner sur toute la hauteur de la colonne d'eau à l'affluent et à l'effluent, permettant d'obtenir un échantillon représentatif, et ce, considérant l'hétérogénéité de la distribution des particules des « grit » dans un axe vertical.

Pour la réalisation de la caractérisation de l’affluent et l’effluent du dessableur, entre 5 et 30 litres d’échantillons étaient nécessaires. Lorsque le volume nécessaire dépassait la capacité de l’appareil, des échantillons composites ont été réalisés, provenant d’un échantillonnage répété en un même point. Des chaudières en polyéthylène haute densité (PEHD) de capacité d’un peu plus de 20L ont été utilisées pour le transport des échantillons du site d’échantillonnage jusqu’au laboratoire de l’Université Laval. Les échantillons ont été conservés à température pièce pour toute la durée du trajet (30 minutes) et les essais de caractérisation ont été réalisés dans les 24h.

#### 4.2.2. Échantillonnage des particules de « grit » retenus par l’unité de dessablage

L’échantillonnage des particules de « grit » retenus par le dessableur est réalisé après l’opération d’assèchement. Suite à cette étape, les particules sont acheminées dans une benne prévue à cet effet. L’échantillonnage des particules de « grit » s’est fait à l’aide d’une pelle et d’une chaudière de 20L en PEHD pour faciliter le transport. Afin de récupérer un échantillon de « grit » ayant les propriétés les plus représentatives des particules purgées par le dessableur, les particules de « grit » les plus fraîches ont été échantillonnées.

À Saint-Nicolas, il a été possible d’enclencher manuellement l’activation du processus d’extraction de l’unité de dessablage afin de récupérer un échantillon de « grit » le plus frais possible. Lorsque cette opération n’était pas possible, il a été jugé préférable d’échantillonner les particules de « grit » positionnés sur le dessus dans la benne de 8 m<sup>3</sup>. Ce faisant, les caractéristiques des particules de « grit » sont représentatives des particules retenues par l’unité de dessablage entre deux cycles de purge. Les particules de « grit » qui demeurent longtemps dans la benne à sable sont plus susceptibles de dégager des odeurs et il est possible que la matière organique présente dans les particules de « grit » se soit dégradée.

À la Ville de Québec, l’extraction des particules de « grit » est réalisée en alternance entre les cinq dessableurs aérés et elles sont rejetées de façon continue dans les bennes à sable.

### 4.3. Caractérisation des particules de « grit »

Les particules de « grit » sont principalement caractérisées par deux caractéristiques, soit la taille des particules et la vitesse de chute des particules. Ces deux caractéristiques sont les plus étudiées dans la pratique. De plus, d'autres analyses pertinentes, tel que l'analyse de la densité, des matières en suspension (MeS), des matières volatiles en suspension (MVeS) et des matières inorganiques en suspension (MIeS) ont été réalisées.

#### 4.3.1. Distribution de la taille des particules de « grit »

L'analyse de la taille des particules a été réalisée sur les particules de « grit » retenues par les unités de dessablage et a été réalisée selon différents protocoles de tamisage, avec ou sans prétraitement de l'échantillon de « grit », tel que le présente la Figure 21. Au total, cinq méthodologies d'analyse granulométrique ont été étudiées.

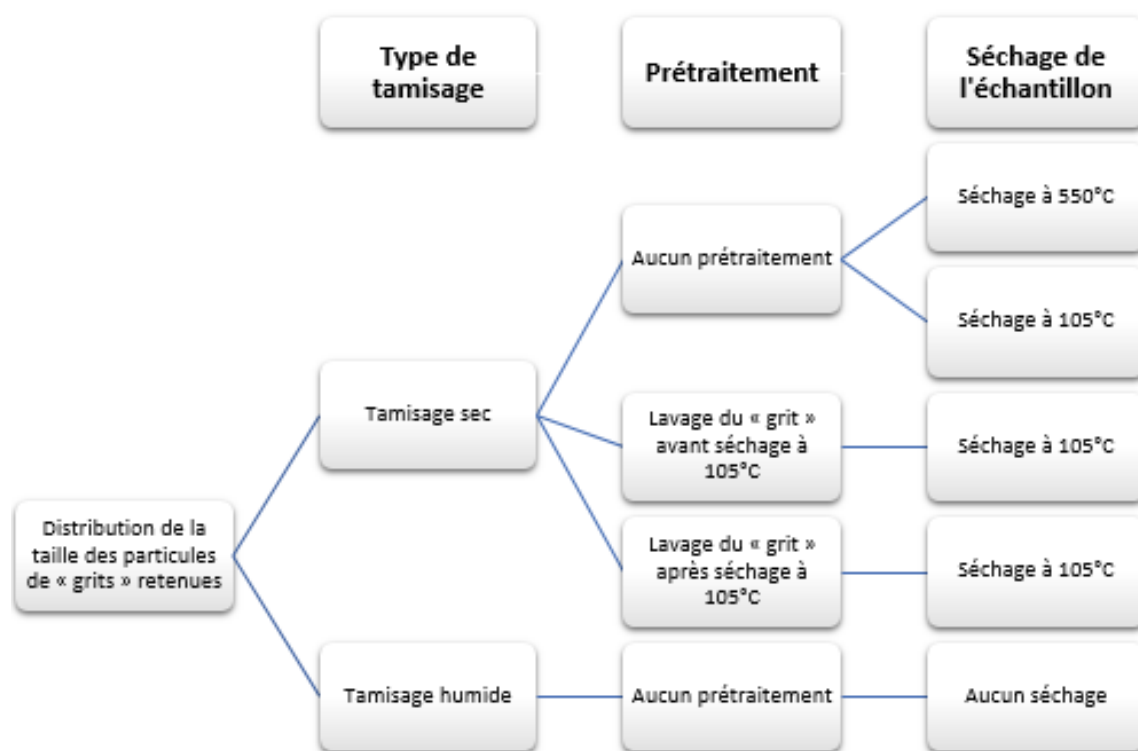


Figure 21 : Protocole de caractérisation de la taille des particules sous différents types de prétraitement

#### 4.3.1.1. Séchage de l'échantillon

Afin de réaliser le tamisage sec, les échantillons de « grit » ont été préalablement séchés au four à 105°C pour une période d'au moins 24h ± 8h afin d'éliminer l'humidité qui était présente dans l'échantillon (ASTM -D6913-04). Pour l'analyse de la distribution des particules inorganiques, les échantillons ont été par la suite incinérés à 550°C conformément au *Standard Methods for the examination of water and wastewater (Clesceri et coll., 1998)* pour une durée d'une heure afin d'éliminer les matières organiques volatiles et préserver uniquement les particules inorganiques et les cendres. Pour l'analyse granulométrique par tamisage humide aucun séchage n'a été réalisé.

#### 4.3.1.2. Prétraitement de l'échantillon

Le prétraitement consiste à nettoyer les particules de « grit » sur un tamis 75 µm à l'aide d'un tuyau connecté au robinet. La pression d'eau doit être la plus faible possible pour permettre aux particules de rouler sur le tamis sans changer leurs caractéristiques. L'opération est réalisée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus aucune coloration dans l'eau passant le tamis (environ 5 minutes). Le prétraitement peut être réalisé une fois l'échantillon séché à 105°C pendant environ 24h ou à l'état humide sur les particules de « grit » fraîchement échantillonnées. Suite au prétraitement, les échantillons sont séchés à 105°C durant environ 24h. Il a été jugé nécessaire de prétraiter l'échantillon puisque des agglomérations ont été observées suite à l'opération de séchage à 105°C (Figure 22). Le prétraitement doit limiter les agglomérations et obtenir une distribution granulométrique plus représentative de la taille des particules.



Figure 22 : Agglomération des particules de « grit » suite au séchage à 105°C

#### 4.3.1.3. Analyse granulométrique par tamisage sec

L'analyse granulométrique des échantillons de « grit » a été réalisée au département de génie des mines de l'Université Laval. Celui-ci possède tous les équipements nécessaires à la réalisation des analyses. Les essais ont été effectués selon la norme américaine *ASTM D6913 - 04(2009) e1 Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*.

Les particules de « grit » ont été tamisées selon la norme *ASTM C136 - Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. L'échantillon a été pesé et tamisé en deux étapes. La première étape consistait à tamiser l'échantillon sur la série de tamis #1 et à peser chacune des fractions retenues sur chacun des tamis de la série de tamis #1. La série de tamis #1 est composée de sept tamis de diamètre décroissant et d'un plat permettant de récupérer la totalité des particules ayant un diamètre inférieur aux mailles du tamis le plus petit de la série. La seconde étape consistait à tamiser les particules ayant été récupérées dans le plat de la première série de tamis et à les transférer sur la série de tamis #2. Les dimensions des mailles des tamis et les différentes séries de tamis utilisés pour l'analyse granulométrique sont présentées au Tableau 3.

Tableau 3 : Dimensions des mailles des tamis utilisés pour l'analyse granulométrique

| Série de tamis #1         |                                      | Série de tamis #2         |                                      |
|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Taille des mailles (mesh) | Taille des mailles ( $\mu\text{m}$ ) | Taille des mailles (mesh) | Taille des mailles ( $\mu\text{m}$ ) |
| 0.525 pouce               | 13 200                               | 18                        | 1 000                                |
| 0.375 pouce               | 9 500                                | 30                        | 600                                  |
| 3                         | 6 700                                | 50                        | 300                                  |
| 4                         | 4 750                                | 70                        | 212                                  |
| 6                         | 3 350                                | 100                       | 150                                  |
| 8                         | 2 360                                | 140                       | 106                                  |
| 14                        | 1 400                                | 200                       | 75                                   |
| Plat                      | 0                                    | Plat                      | 0                                    |

Les dimensions des mailles sont généralement définies en mesh, unité de mesure couramment utilisée en géotechnique, correspondant au nombre d'ouvertures sphérique dans un pouce carré.

Chacune des séries de tamis a été agitée pendant 15 minutes par un agitateur mécanique ROTAP. L'agitateur mécanique permet d'assurer une agitation constante tout au long du tamisage et permet d'obtenir des résultats répétables et de faible variabilité entre les différents essais d'analyse granulométrique. L'agitateur mécanique ROTAP et les équipements de tamisage sont présentés à la Figure 23 et Figure 24 respectivement.



Figure 23 : Agitateur mécanique ROTAP



Figure 24 : Équipement de tamisage

#### 4.3.1.4. Analyse granulométrique par tamisage humide

L'analyse granulométrique des « grit » par tamisage humide a été réalisée au département de génie civil et de génie des eaux. Pour la réalisation du tamisage humide, il n'y a aucun protocole standard et les opérations de tamisage ont été réalisées en s'inspirant du protocole développé par la compagnie Grit Solution (*Reddy et Pagilla, 2010*).

Immédiatement après l'échantillonnage, un total de 100 g de « grit » frais et humide ont été tamisés sur une colonne composée de la totalité des tamis de la série de tamis #1 et #2, excluant les plats. Afin de réaliser l'évaluation de la taille des particules sous toutes leurs faces, les particules ont été soumises à une pression d'eau, la plus faible possible, pour permettre aux particules de se déplacer sur la face du tamis. Afin de permettre l'évacuation de l'eau, aucun plat n'a été utilisé, ce qui a pour effet de lessiver les particules de diamètre inférieur au plus petit tamis utilisé (75  $\mu\text{m}$ ) durant les opérations de tamisage.

Les « grit » retenus sur chacun des tamis ont été récupérés et séchés à 105°C afin de déterminer la masse sèche. De plus, trois échantillons de 10 g de « grit » frais ont été séchés à 105°C afin de déterminer le taux d'humidité présent dans l'échantillon. Les « grit » de chacune des fractions ont été pesés. Pour le calcul du bilan de masse du tamisage humide, le taux d'humidité déduit du triplicata a été soustrait à la masse totale de « grit » frais utilisés pour le tamisage afin de déterminer la masse totale de « grit » secs. Le bilan a été défini à partir de la différence entre la masse initiale et la somme des particules récupérées sur chacune des fractions et finalement divisée par la masse initiale. Des bilans de masse de  $\pm 15\%$  ont été observés pour la méthode. Le pourcentage de masse retenue sur chacun des tamis en fonction de la taille des particules est alors exprimé graphiquement (échelle logarithmique) sous forme de courbe cumulative afin d'exprimer une distribution granulométrique.

#### 4.3.2. Vitesse de chute des particules de « grit »

La caractérisation de la distribution de la vitesse de chute des particules d'un dessableur a été réalisée sur l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage selon deux

protocoles. Les distributions ont été mesurées à l'aide du protocole ViCAs et le système d'élutriation. Les résultats ont été comparés et utilisés afin d'évaluer la décantabilité des particules, évaluer les performances des unités de dessablage et établir la meilleure stratégie pour la caractérisation de la vitesse de chute des particules de « grit » dans un dessableur.

#### 4.3.2.1. *Protocole ViCAs*

En laboratoire, un échantillon homogène de 4,5L est pompé dans une colonne de décantation en plexiglas de 70 cm de hauteur et de 7 cm de diamètre (voir Figure 24). Sous l'effet de la gravité, les particules ayant décanté ont été recueillies manuellement en bas de la colonne à l'aide d'une coupelle en plastique (Figure 25) à des temps (t) prédéfinis. Afin de limiter les variations du volume d'eau dans la colonne, les coupelles ont été préalablement remplies avec de l'eau avant d'être insérées sous la colonne. Les temps de cueillette ont été définis à 1, 3, 5, 10, 20, 35, 60 minutes pour caractériser les particules ayant de grandes vitesses de chute.



Figure 25 : Colonne ViCAs (à gauche) et coupelle (à droite)

Le contenu de chacune des coupelles a ensuite été filtré et déposé dans une coupelle d'aluminium associée. La filtration a été réalisée conformément au *Standard Methods for the examination of water and wastewater (Clesceri et coll., 1998)*. La filtration consiste à filtrer un volume d'échantillon d'environ 30 ml à travers un filtre en fibre

de verre de 47mm de diamètre, et ayant des pores de 1,5 µm, retenant les particules de dimensions supérieures. Les filtres ont ensuite été séchés à 105°C et pesés afin d'analyser la concentration en MeS, MIeS et MVes.

Des filtrations ont aussi été réalisées en triplicata sur la concentration initiale et la concentration finale de l'échantillon afin de définir le pourcentage de masse décantée pour un temps (t) et établir le bilan de masse de l'essai. Un bilan de masse de ±15% pour le protocole ViCAs pour l'évaluation de l'affluent et l'effluent d'une unité de dessablage a été jugé acceptable dû aux nombreuses sources d'erreurs de l'essai. Les principales sources d'erreurs sont la difficulté d'obtenir un échantillon homogène avant l'aspiration dans la colonne, le positionnement des coupelles au bas de la colonne, le déplacement des coupelles lors d'un changement de coupelle et la synchronisation du changement de coupelle au temps (t) (Hadj, 2013).

Afin d'évaluer la distribution de la vitesse de chute des particules, il est possible de produire un graphique des masses cumulées en fonction du temps, présentant l'évolution de la masse cumulée des solides ayant décanté dans l'échantillon  $M(t)$ . Puisque l'échantillon a été réparti de façon homogène dans la colonne lors de l'étape de pompage, le contenu de la coupelle est composé de particules provenant de toute la colonne. La masse  $M(t)$  ayant été retenu dans la coupelle pour un temps (t) inclus toutes les particules ayant des vitesses de chute supérieure à  $H/t$ , où  $H$  est la hauteur de la colonne, mais inclus aussi toutes les particules ayant de vitesses de chute inférieures à  $H/t$  décantant d'une hauteur inférieure à  $H$  (Chebbo et Gromaire, 2009). La masse décantée de la colonne dans les coupelles est exprimée par l'équation (8).

$$M(t) = S(t) + t \frac{dM(t)}{dt} \quad (8)$$

où  $M(t)$  est la masse cumulée des particules au bas de la colonne après un temps (t),  $S(t)$  est la masse cumulée des particules ayant des vitesses de chute supérieures à  $H/t$  au bas de la colonne et  $t \frac{dM(t)}{dt}$  représente les particules ayant des vitesses de chute inférieures à  $H/t$ , mais ayant pu décanter durant le temps (t). Toutefois, afin de

mesurer la distribution de la vitesse de chute, il est nécessaire d'isoler  $S(t)$  tel que présente l'équation (9).

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

En connaissant  $S(t)$  pour chacune des vitesses de chute correspondant au temps (t), il est possible de produire une fonction cumulative représentant la distribution de la vitesse de chute de l'échantillon. Le protocole ViCAs est présenté en Annexe A.

#### 4.3.2.2. Système d'élutriation

Le système d'élutriation a été développé pour la caractérisation de la vitesse de chute des eaux de ruissellement (Hettler et coll., 2011) et des eaux usées des débordements d'égouts unitaires (Krishnappan et coll., 2004). Le protocole d'élutriation a été adapté afin d'évaluer les vitesses de chute de l'affluent, l'effluent et le soutirage d'une unité de dessablage. Le montage du système d'élutriation est présenté à la Figure 26.

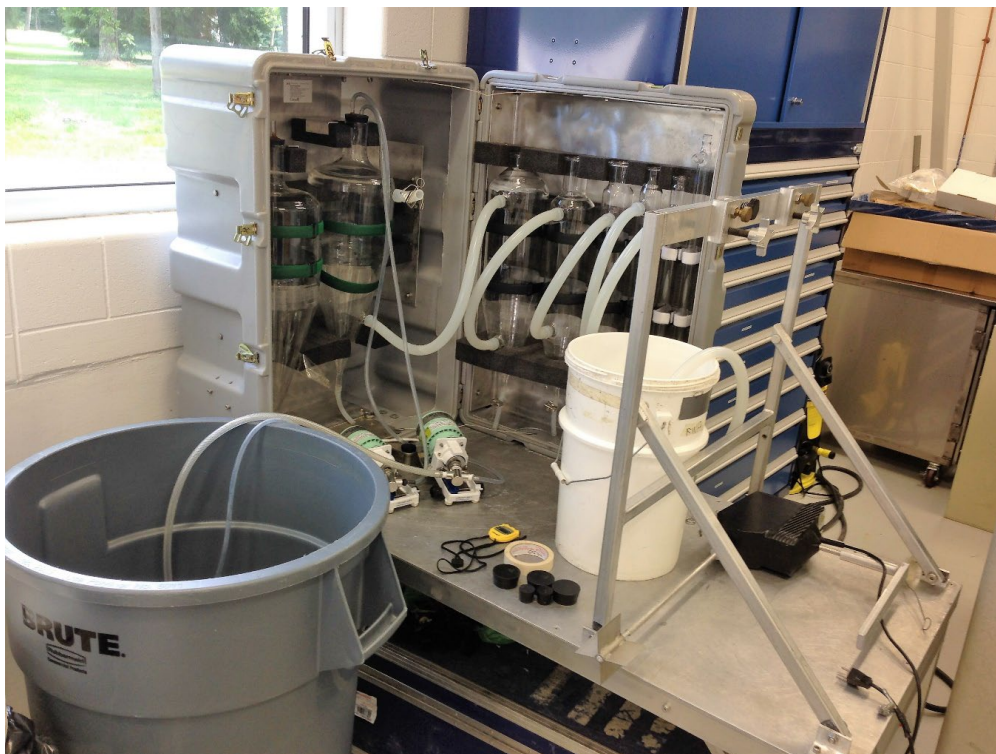


Figure 26 : Montage du système d'élutriation

En laboratoire, des échantillons homogènes de 15L, mélangés en continu à l'aide d'un agitateur mécanique, ont été pompés par deux pompes céramiques de type "Q" PUMP de marque CeramPump®. Les pompes ont été positionnées en parallèle et à débit constant dans un système fermé composé de huit colonnes d'élutriation de diamètre croissant. La vitesse de rotation de l'agitateur mécanique a été établie à 100 rotations par minute. Une vitesse de rotation de 100 RPM a permis d'assurer l'homogénéisation de l'échantillon malgré la présence de particules ayant de fortes vitesses de chute.

Seulement six des huit colonnes d'élutriation ont été utilisées. Le diamètre intérieur des six colonnes d'élutriation est respectivement de 34, 49, 70, 105, 143 et 197 mm. Une colonne de 25 mm de diamètre n'a pas été utilisée puisque le diamètre à l'entrée de la colonne était inférieur à 13 mm. Les particules de « grit » pouvant avoir des diamètres de plus de 13 mm, correspondant à l'ouverture des dégrilleurs, n'auraient pu entrer dans la colonne. De plus, une seconde colonne de 197 mm n'a pas été utilisée puisqu'elle est conçue pour récupérer les particules flottantes ; ceci étant de peu d'intérêt pour la caractérisation des dessableurs. Les colonnes ont été connectées en série de façon que l'échantillon passe du haut vers le bas d'une colonne à une autre tel que le présente la Figure 27.



Figure 27 : Écoulement dans les colonnes d'élutriation

Le débit de pompage pour l'essai d'élutriation a été établi à 1,56 L/min, assurant un écoulement permettant la caractérisation des particules de « grit » ayant des vitesses de chute suffisantes. À l'aide du débit de pompage et de l'aire d'écoulement de chacune des colonnes, la vitesse d'ascension dans chacune des colonnes a été calculée (Tableau 4).

Tableau 4 : Vitesse d'ascension des colonnes d'élutriation pour un débit de pompage de 1,56 l/min

| Diamètre de la colonne (mm) | Vitesse d'ascension (m/h) |
|-----------------------------|---------------------------|
| 34                          | 103                       |
| 43                          | 50                        |
| 70                          | 24                        |
| 105                         | 11                        |
| 143                         | 6                         |
| 197                         | 3                         |

La durée minimale de l'essai a été définie à trois fois le temps de rétention hydraulique du système. Pour un débit de 1,56 l/min, le temps de rétention hydraulique est de 15 minutes. La durée minimale de l'essai d'élutriation a été établie à 45 minutes. Pour chacune des colonnes, les particules ayant une vitesse de chute supérieure à la vitesse d'écoulement ascendante se sont accumulées à la base de la colonne. Les particules ont été récupérées, à la fin de l'expérience, en transvidant le contenu de chacune des colonnes dans des récipients prévus à cet effet afin de réaliser des analyses de la matière en suspension par filtration. La filtration a été réalisée conformément au *Standard Methods for the examination of water and wastewater (Clesceri et coll., 1998)*.

Les résultats de MeS obtenus ont permis de faire un bilan de masse afin de vérifier la validité de l'essai et de produire une distribution de la vitesse de chute des particules. Pour le calcul du bilan de masse, il a été nécessaire de mesurer la concentration initiale et finale de l'échantillon par des triplicatas de filtration. Environ deux litres d'échantillon initial et final ont été récupérés pour ces filtrations. Les volumes initial

et final étant connus, il a donc été possible de mesurer la masse totale de particules ayant passé dans le système. Le bilan de masse est exprimé par l'équation (10).

$$\text{Erreur de bilan de masse (\%)} = \frac{M_{ini} - (M_{dec} + M_{fin})}{M_{ini}} \cdot 100 \quad (10)$$

où  $M_{ini}$  est la masse initiale (mg),  $M_{fin}$  est la masse finale et  $M_{dec}$  est la sommation des masses décantées dans les colonnes d'élutriation. Un bilan de masse inférieur à 20% a été jugé acceptable pour l'essai d'élutriation. Les principales sources d'erreur de l'expérience ont été identifiées et sont principalement les mesures du volume initial et final de l'expérience et les mesures de concentration finale et initiale de l'échantillon. La mesure de concentration initiale est particulièrement difficile puisqu'il est nécessaire d'homogénéiser un échantillon comprenant des particules ayant de fortes vitesses de chute, ce qui rend difficile la remise en suspension des particules.

La distribution de la vitesse de chute des particules a été définie à l'aide des classes de vitesses de chute délimitée par les vitesses d'ascension des colonnes d'élutriation. En fonction de la masse décantée dans la colonne par rapport à la masse initiale, il a été possible de déterminer le pourcentage de masse correspondant à des vitesses de chute supérieures à la vitesse d'ascension de la colonne d'élutriation. Le calcul du pourcentage de masse retenue a été répété pour toutes les colonnes et a permis de produire des distributions de vitesse de chute des particules. Le protocole du système d'élutriation est présenté en Annexe B.

#### 4.3.3. Caractérisation de la performance d'élimination des particules de « grit » de l'unité de dessablage

Afin d'évaluer les performances de l'unité de dessablage, des essais d'élutriation ont été réalisés sur l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage. La performance de l'unité de dessablage a été établie pour chacune des vitesses de chute des particules exprimées par les colonnes d'élutriation. La différence entre la masse de particules retenues à l'affluent et l'effluent de chacune des colonnes a été utilisée. La masse retenue à chacune des colonnes est divisée par le volume d'échantillon total afin de pouvoir comparer les résultats entre eux même si le volume d'échantillon est différent

entre l'affluent et l'effluent. La performance d'élimination des particules en fonction des vitesses de chute est présentée par l'équation (11).

$$Elim. colonne i (\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{M_{colonne_i AFF}}{V_{AFF}} - \frac{M_{colonne_i EFF}}{V_{EFF}} \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{M_{colonne_i AFF}}{V_{AFF}}} * 100 \quad (11)$$

où  $Elim.colonne_i$  est le pourcentage d'élimination des particules ayant des vitesses de chute supérieures à celles de la colonne  $i$ ,  $M_{colonne_i AFF}$  est la masse de particules retenues dans une colonne pour l'essai d'élutriation sur l'affluent (mg),  $M_{colonne_i EFF}$  est la masse de particules retenues dans une colonne pour l'essai d'élutriation sur l'effluent (mg) et  $V_{AFF}$  et  $V_{EFF}$  sont le volume d'échantillon pour les essais d'élutriation sur l'affluent et l'effluent respectivement.

Pour chacune des colonnes, à l'aide de la vitesse d'ascension de la colonne et de la Loi de Stokes, des tailles de particules de sable propres équivalentes ont été calculées. Ce faisant, pour chacune de tailles équivalentes un pourcentage d'élimination a été associé et comparé aux critères de conception de l'unité de dessablage.

#### 4.3.4. Autres analyses

Afin de caractériser les particules de « grits », des analyses de la densité des particules et de la composition des particules ont été réalisées. La composition des particules est définie par des analyses de la matière volatile en suspension et de la matière inorganique en suspension.

##### 4.3.4.1. Densité

Afin de déterminer la décantabilité des particules de « grit », l'analyse de la densité sur différentes tailles de particules a été réalisée. Pour ce faire, la densité spécifique a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre à l'hélium, localisé au département de génie des mines de l'Université Laval. Le modèle de pycnomètre à l'hélium utilisé est le AccuPyc® II 1340 de la compagnie Micromeritics.

L'analyse par pycnomètre à gaz a été réalisée selon la norme américaine *ASTM D5550-14 Standard Test Method for Specific Gravity of Soils by Gas Pycnometer*.

Pour la mesure de densité spécifique, l'échantillon de « grit » a été préalablement séché à 105°C pendant au moins 24h afin d'éliminer l'humidité présente dans l'échantillon. L'échantillon a ensuite été tamisé afin de séparer les particules en fonction de leur taille respective et faciliter l'analyse de la densité spécifique de différentes classes de particules. Les classes de particules ayant été retenues pour l'analyse de densité au pycnomètre sont les particules de 4,75 mm à 6,7 mm, de 1,4 mm à 2,36 mm et de 0,212 mm à 0,300 mm. Afin de réaliser l'analyse de densité spécifique, un échantillon de chacune des fractions, d'environ 9 cm<sup>3</sup>, a été placé dans une cellule de charge de volume de 10 cm<sup>3</sup>. L'échantillon a été pesé dans le pycnomètre étant muni d'une balance de précision de 0,0001 g. Finalement, l'hélium a été injecté dans la cellule de charge afin de combler les vides de la cellule. Connaissant le volume d'hélium injecté, il est donc possible de mesurer le volume réel de l'échantillon et de calculer la densité spécifique.

#### 4.3.4.2. *Composition en MeS, MVeS, MIeS*

L'analyse de la composition a été réalisée sur les particules filtrées lors des essais ViCAs et d'élutriation. Les filtres ont été séchés à 105°C et pesés afin de mesurer la masse en MeS. Par la suite, ces mêmes filtres ont été brûlés à 550°C pendant une heure et pesés, afin de mesurer la masse en matière inorganique (MIeS) retenue sur le filtre. Finalement, la fraction de matière volatile en suspension (MVeS) a pu être calculée par la différence entre les MeS et les MIeS, correspondant à la matière organique.

De plus, l'analyse de la composition a été réalisée sur les particules de « grit » retenues par les unités de dessablage. Lors des opérations de tamisage, environ 5 g de chacune des fractions retenues sur les tamis ont été pesées et brûlées à 550°C afin d'évaluer la matière volatile en suspension (MVeS), correspondant à la fraction organique, et la matière inorganique en suspension (MIeS), correspondant à la fraction inorganique des particules. La composition des échantillons de « grit » a été comparée en fonction des différentes conditions météorologiques, et ce, pour chacun des types de dessableur. Aussi, connaissant la fraction de matière inorganique et organique, une approximation de la densité a été réalisée en utilisant une densité

spécifique respectivement de 2,65 kg/m<sup>3</sup> et 1,1 kg/m<sup>3</sup> pour chacune des fractions. L'approximation de la densité a été réalisée pour chacune des tailles de particules retenues par les tamis.

#### **4.4. Planification d'expérience**

La planification d'expérience a été réalisée de façon à répondre à l'objectif principal et aux sous-objectifs, en limitant le nombre d'expériences nécessaires à la caractérisation de la décantabilité des particules de « grit ». La planification d'expérience a été faite pour la caractérisation de la taille des particules, les mesures de composition et de densité, ainsi que pour la caractérisation de la vitesse de chute. Les analyses en laboratoire pour chacune des caractéristiques des particules de « grit » évaluées sont présentées au Tableau 5. Les analyses en laboratoire ont été réalisées en temps sec, en temps de pluie et en temps de fonte des neiges, afin de vérifier l'influence des conditions météorologiques. Un temps sec a été défini lorsqu'il y avait absence ou des précipitations de pluie inférieure à 5 mm dans les 24 h précédant l'échantillonnage. Un temps de pluie est défini lorsqu'il y avait des précipitations de pluie supérieure à 5 mm dans les 24 h avant l'échantillonnage.

Lors des analyses granulométriques par tamisage, des analyses de la composition en MVeS et en MIeS ont été réalisées. L'évaluation de la densité des particules par pycnomètre à l'hélium a été réalisée à deux reprises, une fois pour le dessableur aéré et une fois pour le dessableur à vortex, et ce, en temps sec.

La caractérisation de la vitesse de chute des particules de l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage de la Ville de Lévis, par protocole ViCAs et par élutriation, a été réalisée en temps sec à débit faible et en débit de pointe. Aucune analyse par protocole ViCAs ou élutriation n'a été réalisée en temps de pluie. De plus, des essais d'élutriation ont été réalisés sur des particules de « grit » retenues par l'unité de dessablage afin de vérifier les vitesses de chute de ces particules.

Tableau 5 : Essais en laboratoire en fonction de la caractérisation des particules de « grit »

| <b>Caractérisation des particules de « grit »</b> |                              |                         |                               |
|---|------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| <b>Tests</b>                                      | <b>Taille des particules</b> | <b>Vitesse de chute</b> | <b>Composition et densité</b> |
| Tamissage sec                                     | X                            |                         |                               |
| Tamissage humide                                  | X                            |                         |                               |
| ViCAs   |                              | X                       |                               |
| Élutriation                                       |                              | X                       |                               |
| MleS/MVeS   |                              |                         | X                             |
| Pycnomètre  |                              |                         | X                             |

## **5. Mise au point du protocole de caractérisation de la taille des particules**

La taille des particules de « grit » est la principale variable utilisée pour la conception des unités de dessablage. La caractérisation de la taille des particules par analyse granulométrique est la méthode la plus utilisée par l'industrie pour caractériser les particules de « grit » dans une unité de dessablage. Un protocole de caractérisation de la taille des particules de « grit » se doit d'être représentatif, répétable, sans risque et ayant des faibles erreurs de bilan de masse.

Au total, cinq méthodologies d'analyse granulométrique ont été étudiées et comparées afin de développer un protocole de caractérisation standardisé représentatif de la taille des particules de « grit ». Les protocoles étudiés sont l'analyse granulométrique des cendres, des particules de « grit » humide, des particules de « grit » séchées à 105°C, des particules de « grit » séchées à 105°C avec lavage des particules humides et des particules de « grit » séchées à 105°C avec lavage des particules sèches. Lors de la caractérisation de la taille des particules, une attention particulière a été portée sur la durée des essais, la fiabilité des résultats et les erreurs de mesure des protocoles utilisés. Les protocoles de caractérisation de la taille des particules ont été réalisés sur des échantillons de « grit » retenus par les unités de dessablage et appliqués pour des échantillons pris en temps sec et en temps de pluie, et ce, pour les dessableurs aérés et les dessableurs à vortex.

### **5.1. Comparaison des protocoles d'analyse granulométrique**

Afin de comparer les distributions granulométriques, le tamisage humide a été établi comme étant la distribution de référence puisque ce dernier influence peu les propriétés des particules n'ayant aucun prétraitement ou séchage. Toutefois, cette méthode non standardisée présente des erreurs de bilan de masse de  $\pm 15\%$ , étant nettement supérieure à l'erreur de bilan de masse observée par l'utilisation des protocoles couramment utilisés en géotechnique acceptant des erreurs maximales de  $\pm 0,3\%$ .

### 5.1.1. Analyse en temps sec et en temps de pluie

Pour la ville de Saint-Nicolas, la comparaison des protocoles en temps sec a été réalisée à deux reprises, présentant des différences importantes entre les distributions granulométriques. Les distributions granulométriques des MeS récoltés en temps sec à Saint-Nicolas le 13/07/2016, à l'aide des protocoles de caractérisation par tamisage sec des cendres, par tamisage humide, par tamisage sec après séchage à 105°C, par tamisage sec après séchage à 105°C avec prétraitement des « grit » sec et par tamisage sec après séchage à 105°C avec prétraitement des « grit » humides sont présentées à la Figure 28.

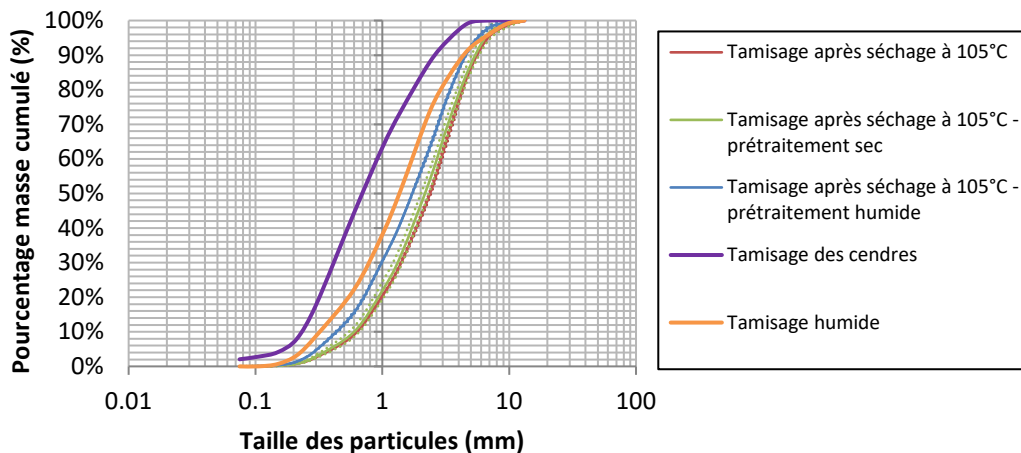


Figure 28 : Comparaison des distributions granulométriques selon différents protocoles de caractérisation de la taille des particules de Saint-Nicolas

L'effet de l'incinération sur la taille des particules de « grit » est important. En effet, une proportion des particules de faible dimension beaucoup plus importante est observée lorsque les particules de « grit » sont incinérées avant le tamisage. L'incinération à 550°C élimine les matières volatiles en suspension (MVeS) correspondant à la fraction organique des échantillons et le tamisage ne considère donc pas la matière organique dans l'analyse de la taille des particules.

Le tamisage humide, sans incinération ou séchage des particules, limite les interactions sur les particules et ne modifie pas la taille de celles-ci. Le tamisage humide sans prétraitement des MeS présente une distribution de la taille des particules plus représentative des particules de « grit » ayant décanté dans le

dessableur. Pour le protocole de tamisage humide, des erreurs de bilan de masse allant jusqu'à 15% ont été observées. De plus, pour ce protocole, la réalisation de l'analyse granulométrique requiert une durée de 2h et présente des risques à la santé dus à la manipulation des échantillons de « grit » frais.

Les distributions granulométriques après séchage à 105°C présentent les distributions ayant les fractions les plus importantes en particules de grandes dimensions. L'agglomération des particules a pour effet de surestimer les particules de grandes dimensions. Sous l'effet du lavage, les courbes granulométriques surestiment plus faiblement la taille des particules que lorsqu'il n'y a pas de lavage, et ce, de façon plus considérable pour le lavage des particules de « grit » humide. La caractérisation de la taille des particules par l'analyse granulométrique par tamisage sec après séchage à 105°C avec prétraitement des « grit » humide présente de façon générale les résultats ressemblant le plus à ceux observés lors du tamisage humide. Des différences entre les distributions granulométriques similaires sont observées en temps de pluie.

Des résultats similaires, en temps sec et en temps de pluie, sont observés pour les particules de « grit » de la Ville de Québec. Toutefois, les différences sont moins importantes. La distribution de la taille des particules par tamisage humide présente une proportion plus importante de particules de plus petite dimension et se rapproche donc des résultats obtenus par tamisage des cendres. Il demeure que la caractérisation de la taille des particules par l'analyse granulométrique par tamisage sec après séchage à 105°C avec prétraitement des « grit » humides présente de façon générale les résultats ressemblant le plus à ceux observés lors du tamisage humide. Il est donc recommandé d'utiliser cette procédure pour la caractérisation de la taille des particules, puisque cette dernière présente de meilleurs bilans de masse et présente moins de risques à la santé.

## **5.2. Protocole proposé**

Le protocole standardisé de caractérisation de la taille des particules proposé est l'analyse granulométrique par tamisage sec d'échantillon séché à 105°C avec

prétraitement par lavage. Ce protocole permet d'assurer des mesures répétées, reproductibles, fiables et limitant les risques biologiques. L'intégralité du protocole de caractérisation par analyse granulométrique proposé est présentée en Annexe C.

#### 5.2.1. Répétabilité de l'essai

La répétabilité de l'analyse granulométrique a été vérifiée sur le protocole recommandé, tamisage sec après séchage à 105°C avec prétraitement des « grit » humide, afin d'évaluer si des variations des résultats sont observées entre les tamisages sur un même échantillon. Pour ce faire, une analyse granulométrique a été réalisée en triplicata sur un échantillon de « grit » frais échantillonné en temps sec le 13 juillet 2016. Entre 400g et 530g d'échantillon sec ont été utilisés pour le tamisage. Les résultats obtenus pour l'analyse granulométrique d'un échantillon en triplicata sont présentés à la Figure 29. Les distributions granulométriques sont très près les unes des autres et les différences sont difficiles à observer graphiquement.

Puisque la méthode proposée est jugée valable si l'erreur sur le bilan de masse est inférieure à 0,3%, les différences entre les distributions granulométriques sont très petites. La déviation standard maximale observée étant inférieure à 0,4%, le protocole présente une très bonne répétabilité. Les différences sont principalement observées pour les particules ayant des diamètres supérieurs à 1,4mm. Les fractions supérieures à 1,4 mm sont en effet plus susceptibles à l'agglomération lors des étapes de séchage au four à 105°C.

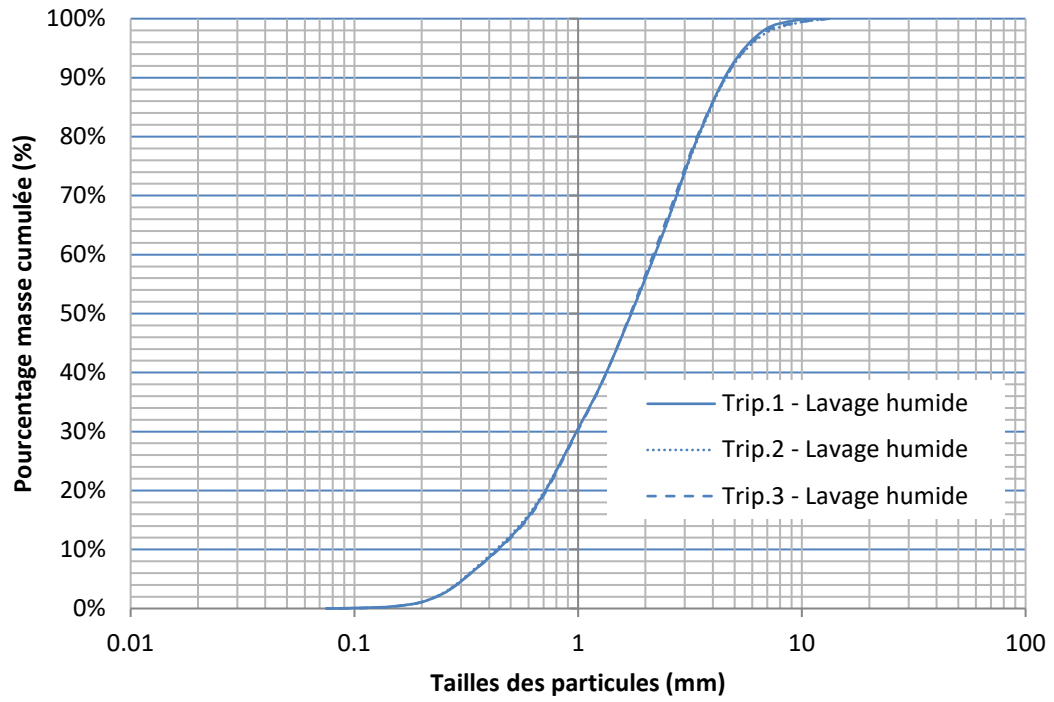


Figure 29 : Analyse de la répétabilité par triplicata du protocole d'analyse granulométrique par tamisage sec après pré-lavage

## 6. Résultats et discussion

Afin d'établir un protocole de caractérisation de la décantabilité des particules de l'affluent et de l'effluent d'une unité de dessablage, et d'établir un protocole d'évaluation des performances d'un dessableur, il est nécessaire de bien caractériser la taille et la composition des particules, ainsi que la vitesse de chute des particules. Cette caractérisation a été réalisée sur les particules de « grit » retenues par les unités de dessablage ainsi que sur l'affluent et l'effluent des unités de dessablage.

### 6.1. Caractérisation des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage

La caractérisation de la taille des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage a été réalisée aux sites de la station de traitement de Saint-Nicolas et de la Station Est de la Ville de Québec à Beauport. Les conditions d'échantillonnage, les masses tamisées et la composition totale en MIEs sont présentés au Tableau 6.

Tableau 6 : Conditions d'échantillonnage des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage

| Date       | Heure | STEP       | Météo | Pluie<br>dernière 24 h<br>(mm) | Masse tamisée<br>(g) | MIEs<br>(%) |
|------------|-------|------------|-------|--------------------------------|----------------------|-------------|
| 2016-04-01 | 14:00 | St-Nicolas | Fonte | 35                             | 337,8                | 88          |
| 2016-04-08 | 14:00 | St-Nicolas | Pluie | 18                             | 164,4                | 45          |
| 2016-04-27 | 10:00 | St-Nicolas | Sec   |                                | 196,4                | 19          |
| 2016-05-05 | 09:00 | St-Nicolas | Sec   |                                | 341,4                | 19          |
| 2016-05-12 | 09:00 | St-Nicolas | Sec   |                                | 426,5                | 10          |
| 2016-05-18 | 07:00 | St-Nicolas | Sec   |                                | 511,4                | 11          |
| 2016-06-17 | 08:00 | St-Nicolas | Sec   |                                | 385,0                | 24          |
| 2016-07-13 | 09:00 | St-Nicolas | Sec   |                                | 533,1                | -           |
| 2016-10-12 | 09:30 | St-Nicolas | Sec   |                                | 424,9                | 42          |
| 2016-10-18 | 11:30 | St-Nicolas | Pluie | 12                             | 350,1                | 29          |
| 2016-10-21 | 10:00 | St-Nicolas | Pluie | 25                             | 492,9                | 58          |
| 2016-05-16 | 07:00 | Beauport   | Pluie | 18                             | 483,5                | 65          |
| 2016-05-24 | 10:20 | Beauport   | Sec   |                                | 282,4                | 14          |
| 2016-07-20 | 09:30 | Beauport   | Sec   |                                | 345,0                | -           |
| 2016-09-21 | 11:00 | Beauport   | Sec   |                                | 422,3                | 41          |
| 2016-10-18 | 10:45 | Beauport   | Pluie | 8                              | 396,9                | 80          |
| 2016-10-21 | 09:30 | Beauport   | Pluie | 25                             | 543,8                | 90          |

Les échantillons ont été prélevés en temps sec et en temps de pluie pour chacune des stations de traitement des eaux usées. À Saint-Nicolas, sept échantillons ont été prélevés en temps sec, trois échantillons en temps de pluie et un échantillon en temps de période de fonte des neiges. À Beauport, trois échantillons ont été prélevés en temps sec et trois échantillons en temps de pluie. Pour tous les essais, les erreurs de bilan de masse étaient inférieures à 0,3%. Les données de taille de particules par tamisage sec après séchage à 105°C avec prétraitement des « grit » humides et de la composition en matière organique et inorganique des particules retenues dans la benne à sable sont présentés en Annexe D.

### 6.1.1. Caractérisation de la taille des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage

Les moyennes des analyses granulométriques en temps sec, en temps de pluie et en période de fonte des neiges, pour les unités de dessablage de Saint-Nicolas sont présentées à la Figure 30. À l'aide de la moyenne et de l'écart-type, il a été possible de représenter une référence de distributions granulométriques, correspondant à la moyenne plus ou moins un écart-type.

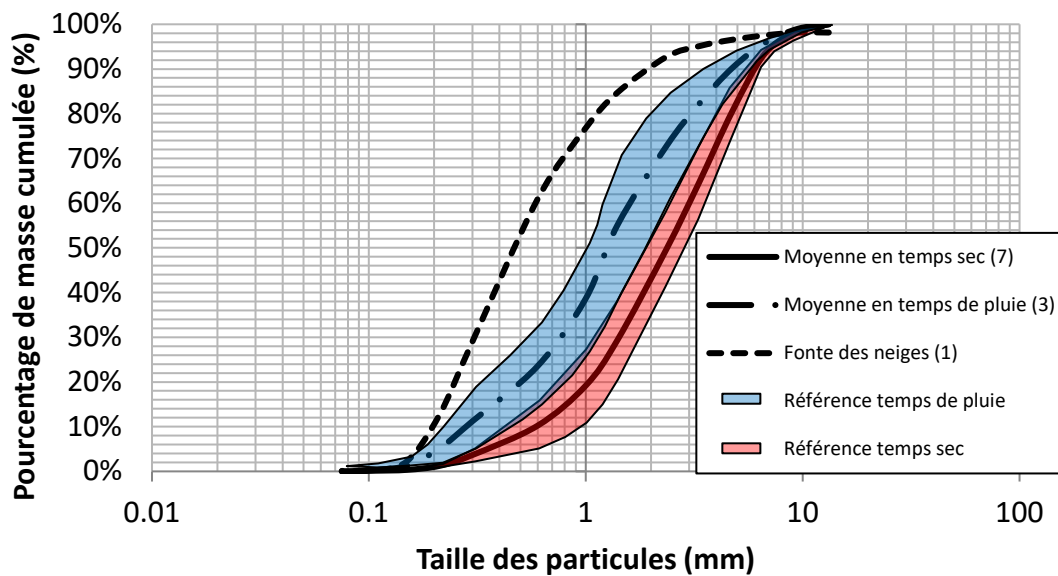


Figure 30 : Courbes granulométriques moyennes en temps sec, en temps de pluie et de fonte de « grit » frais à Saint-Nicolas

En temps sec, les distributions granulométriques obtenues ont tendance à être plus grossières que les courbes granulométriques en temps de pluie ou en temps de fonte. Une plus grande proportion de particules de grandes dimensions est observée lors de périodes de temps sec. En temps de pluie, les particules récupérées dans l'unité de dessablage sont de plus petite dimension, ce qui est représenté par un déplacement de la distribution granulométrique vers la gauche comparativement en temps sec. En période de fonte, il n'a été possible de caractériser la taille des particules qu'une seule fois. Lors de cette caractérisation, il a été possible d'observer que les sables et graviers abrasifs utilisés pour le déglçage des routes sont entraînés à la station de traitement des eaux usées. Ces particules sont de petite dimension et influencent les caractéristiques des particules retenues par les unités de dessablage. On observe un effet très prononcé présentant très peu de particules de grandes dimensions comparativement en temps sec et en temps de pluie.

Pour les unités de dessablage de la Ville de Québec, les moyennes des analyses granulométriques en temps sec et en temps de pluie présentent des tendances similaires à celle de la station de Saint-Nicolas en temps sec et en temps de pluie (Figure 31).

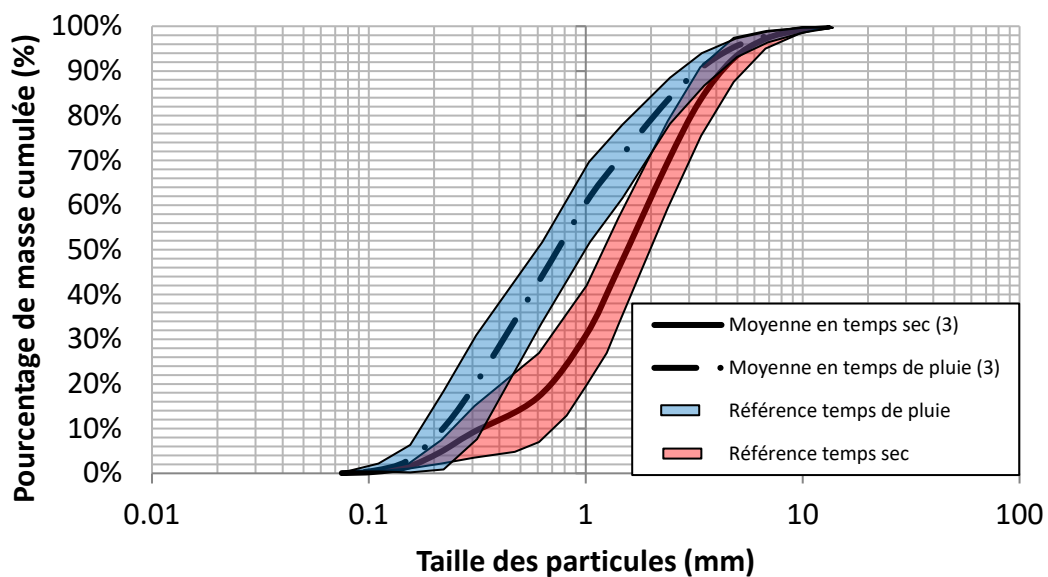


Figure 31 : Courbes granulométriques moyennes en temps sec et en temps de pluie de « grit » frais à la Ville de Québec

Une proportion plus importante de particules de grande dimension aurait été attendue lors des événements pluvieux en comparaison en temps sec. Le temps de rétention hydraulique étant inversement proportionnel au débit à l'entrée de la station, les particules de « grit » ont moins de temps pour décanter lors des événements pluvieux ou sont resuspendues dû aux vitesses d'écoulement plus importantes. Dans ces conditions, les particules ayant des vitesses de chute suffisamment grandes peuvent décanter tandis que les particules ayant de faibles vitesses de chute se retrouvent à l'effluent. En se basant sur la Loi de Stokes, les particules de plus petites dimensions auraient donc plus de difficulté à décanter dans les unités de dessablage que les grandes particules puisqu'elles ont des vitesses de chute plus faibles. Il se peut qu'une proportion plus grande de particules de petite dimension soit entraînée des réseaux d'égouts lors des événements pluvieux, tel que le gravier et le sable présents sur les routes, augmentant la proportion de particules de petite dimension.

#### 6.1.2. Caractérisation de la composition des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage

Sur les particules retenues sur chacun des tamis, une analyse de la composition en MIEs et en MVEs a été réalisée. Les moyennes des compositions mesurées en temps sec et en temps de pluie ont été comparées afin de mieux comprendre l'effet des événements pluvieux sur la composition des particules. La composition moyenne des « grit », selon la taille des tamis, en temps sec et en temps de pluie à Saint-Nicolas est présentée à la Figure 32.

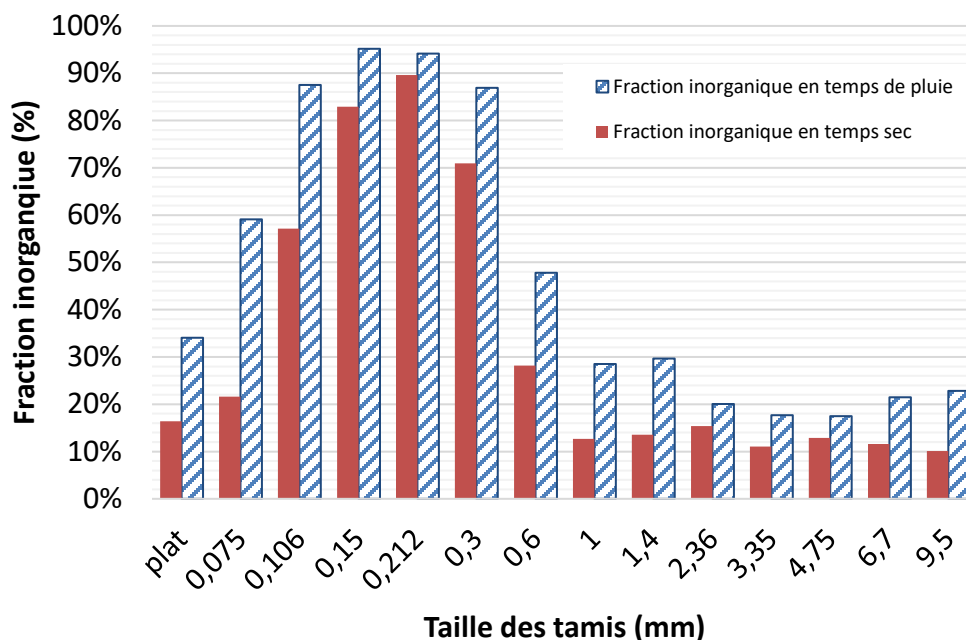


Figure 32 : Composition moyenne de « grit » selon la taille de particule en temps sec et en temps de pluie à Saint-Nicolas

À Saint-Nicolas, une légère différence entre la composition moyenne en temps sec et en temps de pluie est observée. En temps de pluie, la composition des particules est plus inorganique pour toutes les tailles de particules. En mesurant la masse de particules inorganiques pour chacun des tamis, il a été possible d'observer que la fraction inorganique en temps sec et de pluie représente respectivement en moyenne 21 % et 44 % de la masse totale des particules retenues par les unités de dessablage. La fraction organique totale est donc d'environ deux fois plus grande en temps sec qu'en temps de pluie.

En période de fonte, les sables et graviers abrasifs utilisés pour le déglçage des routes sont entraînés à la station de traitement des eaux usées ce qui influence grandement la composition des particules retenues par les unités de dessablage. La composition moyenne des « grit », selon la taille des tamis, en temps sec et en temps de fonte à Saint-Nicolas est présentée à la Figure 33.

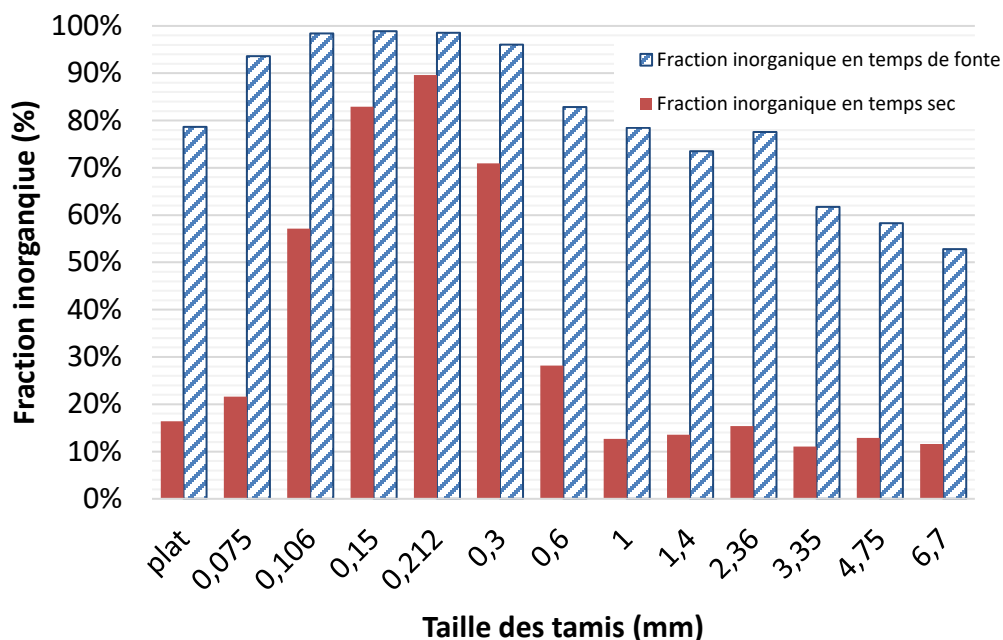


Figure 33 : Composition moyenne de « grit » selon la taille de particule en temps sec et en période de fonte à Saint-Nicolas

Les particules retenues sont très inorganiques comparativement au temps sec. Toutes les tailles de particules présentent une fraction inorganique supérieure à 50% et les particules de diamètre entre 75 µm à 300 µm présentent une fraction inorganique supérieure à 90%. De plus, la fraction inorganique présente 88% de la masse totale retenue par l'unité de dessablage, représentant une proportion quatre fois plus grande qu'en temps sec.

Pour les dessableurs de la Ville de Québec, l'effet des conditions météorologiques sur la composition de l'affluent est plus important que pour l'unité de dessablage de Saint-Nicolas. La composition moyenne des particules de « grit », selon la taille des tamis, en temps sec et en temps de pluie à la Ville de Québec est présentée à la Figure 34.

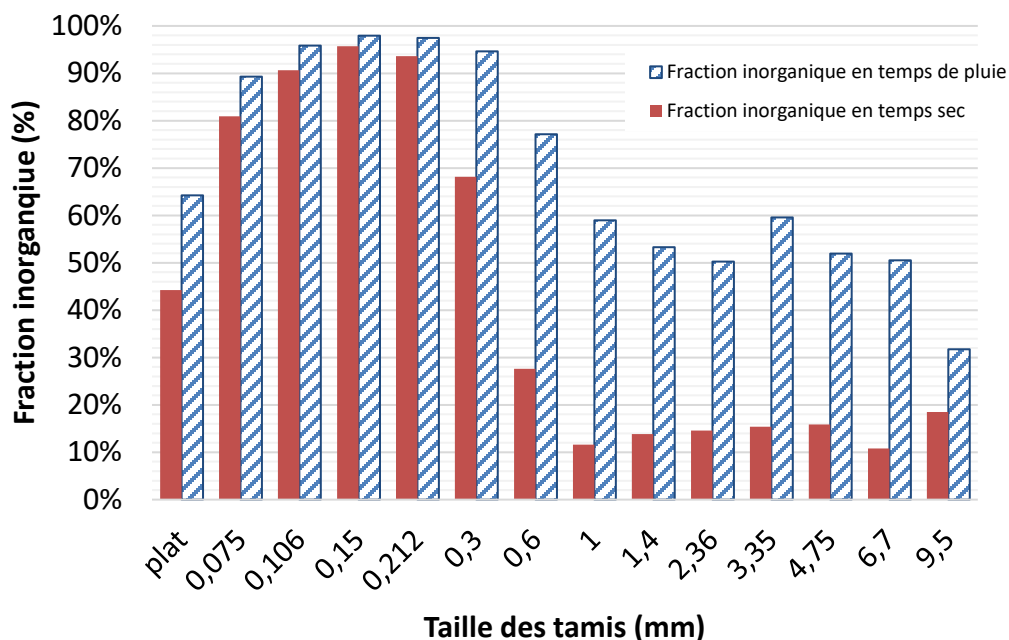


Figure 34 : Composition moyenne de « grit » selon la taille de particule en temps sec et en temps de pluie à la Ville de Québec

En temps de pluie, la composition des particules est plus inorganique pour toutes les tailles de particules. La fraction inorganique en temps sec et de pluie représente respectivement en moyenne 28 % et 78 % de la masse totale des particules retenues par les unités de dessablage. Ayant un réseau majoritairement unitaire, l'effet des précipitations sur la composition des particules retenues par l'unité de dessablage aéré de la Ville de Québec est plus important. Les particules de sable et gravier des routes et des terrains sont entraînées par les eaux de ruissellement jusqu'à la station de traitement des eaux usées. De plus, les particules ayant de grandes vitesses de chute pouvant avoir décanté dans les conduites du réseau d'égout ne coulant pas à pleine capacité peuvent être resuspendues et entraînées jusqu'à l'unité de dessablage.

Les résultats obtenus en temps sec pour la Ville de Québec et pour Saint-Nicolas ont été comparés. La composition moyenne des « grit », selon la taille des tamis, en temps sec à la Ville de Québec et à Saint-Nicolas est présentée à la Figure 35.

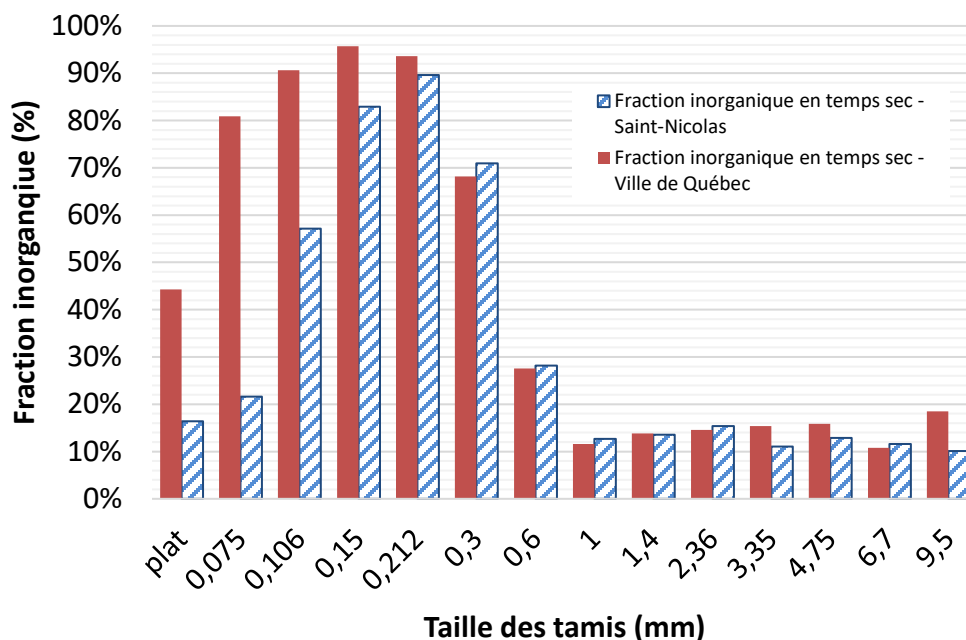


Figure 35 : Composition moyenne de « grit » selon la taille de particule en temps sec à Saint-Nicolas et à la Ville de Québec

L'analyse de la composition des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage a permis de déterminer que les particules de petites dimensions (106  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$ ) sont très inorganiques (jusqu'à environ 90 % inorganique), tandis que les particules de plus grandes dimensions (>300  $\mu\text{m}$ ) présentent une fraction inorganique beaucoup plus faible, et ce, pour les deux stations de traitement des eaux usées. Dans la littérature, des observations similaires ont été réalisées, présentant pour les fractions plus fines (< 600  $\mu\text{m}$ ) une fraction inorganique supérieure à 90%, tandis que pour les particules plus grossières (> 600  $\mu\text{m}$ ) la fraction inorganique correspond à environ 30% (Borges et coll., 2015).

Certaines différences entre les compositions des particules sont observées entre les dessableurs aérés (Québec) et ceux à vortex (Saint-Nicolas). Les particules de plus petites dimensions (<300  $\mu\text{m}$ ) présentent des différences importantes dans leur composition, étant plus inorganiques pour la Ville de Québec que pour Saint-Nicolas. Toutefois, il est difficile d'associer ces différences au type de dessableur, puisque plusieurs autres facteurs peuvent influencer les résultats : le type de réseau, la longueur du réseau, les habitudes de vie, la présence d'industries, etc.

La composition des particules peut en partie expliquer les résultats observés sur la taille des particules en fonction des conditions météorologiques. Les particules de plus grandes dimensions, étant plus organiques que les petites particules, ont peut-être plus de difficulté à décanter dans l'unité de dessablage. La fraction inorganique et organique joue un rôle important sur la densité et les propriétés de décantation des particules de « grit ». Ceci pourrait expliquer en partie pourquoi l'on retrouve moins de grandes particules plus organiques dans les particules retenues par l'unité de dessablage en temps de pluie.

### 6.1.3. Caractérisation de la densité spécifique des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage

La densité spécifique des particules a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre à l'hélium pour les particules de « grit » retenues par les unités de dessablage. La densité et la composition en MIEs des particules retenues par les tamis de 4 mesh (4,75 mm à 6,7 mm), 14 mesh (1,4 mm à 2,36 mm) et 70 mesh (0,212 mm à 0,300 mm) sont présentées au Tableau 7.

Tableau 7 : Densité des particules retenues par les tamis 4 mesh, 14 mesh et 70 mesh

| Tamis (Mesh) | Ville de Québec    |        | Saint-Nicolas      |        |
|--------------|--------------------|--------|--------------------|--------|
|              | Densité spécifique | % MIEs | Densité spécifique | % MIEs |
| <b>4</b>     | 1.28               | 16     | 1.52               | 26     |
| <b>14</b>    | 1.33               | 13     | 1.50               | 26     |
| <b>70</b>    | 2.65               | 97     | 2.57               | 97     |

Les particules de plus petites dimensions, très inorganiques, présentent une densité spécifique semblable à celle observée dans la littérature pour un sable propre, soit 2,65. Pour les particules de plus grande dimension, les particules retenues sur les tamis de 4 mesh et 14 mesh, la densité est beaucoup plus faible et environne 1,3 pour la Ville de Québec et 1,5 pour Saint-Nicolas. Toutefois, ayant des fractions inorganiques différentes, il est difficile de comparer les particules de « grit » retenues par chacune des stations.

Pour faciliter la comparaison des densités, à l'aide des résultats de densité spécifique obtenue au pycnomètre à l'hélium, une approximation de la densité spécifique de la fraction organique et inorganique a été réalisée à l'aide des mesures de composition des particules de « grit ». En utilisant une densité spécifique de 2,65 et 1,1 pour la fraction inorganique et organique respectivement, les densités spécifiques mesurées au pycnomètre ont été retrouvées. L'estimation de la densité spécifique a été calculée à l'aide de l'équation 12.

$$\text{Densité spécifique estimée} = \text{MieS} (\%) * 2,65 + (1 - \text{MieS} (\%)) * 1,10 \quad (12)$$

où MieS (%) représente la fraction de matière inorganique de la particule de « grit ». Le Tableau 8 présente les densités spécifiques mesurées et estimées à l'aide de la fraction inorganique et organique.

Tableau 8 : Densité spécifique mesurée et estimée pour la Ville de Québec et Saint-Nicolas

| Tamis (Mesh) | Ville de Québec            |                            |                | Saint-Nicolas              |                            |                |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------|
|              | Densité spécifique mesurée | Densité spécifique estimée | Différence (%) | Densité spécifique mesurée | Densité spécifique estimée | Différence (%) |
| <b>4</b>     | 1.28                       | 1.35                       | 5              | 1.52                       | 1.50                       | -1             |
| <b>14</b>    | 1.33                       | 1.30                       | -2             | 1.50                       | 1.50                       | 0              |
| <b>70</b>    | 2.65                       | 2.60                       | -2             | 2.57                       | 2.60                       | 1              |

En utilisant ces valeurs de densité spécifique, il est possible d'approximer la densité des particules de « grit » retenues dans les unités de dessablage à  $\pm 5\%$ . La densité spécifique a été approximée pour toutes les tailles de particules définies par les tamis en temps sec, en temps de pluie pour les deux stations. De plus, l'estimation de la densité spécifique a aussi été réalisée en temps de fonte des neiges pour la station de Saint-Nicolas. Les résultats de densité estimée pour chacune des conditions, à l'aide des compositions moyennes, sont présentés au Tableau 9.

Tableau 9 : Densité spécifique estimée moyenne pour la Ville de Québec et Saint-Nicolas

| Tamis (mm)   | Ville de Québec                         |  | Saint-Nicolas                           |  |  |
|--------------|---|--|---|--|--|
|              | Densité spécifique estimée en temps sec | Densité spécifique estimée en temps de pluie | Densité spécifique estimée en temps sec | Densité spécifique estimée en temps de pluie | Densité spécifique estimée en temps de fonte |
| <b>13.2</b>  | -                                       | -  | -                                       | -  | 2,64   |
| <b>9.50</b>  | 1,39                                    | 1,59   | 1,26                                    | 1,45   | -  |
| <b>6.70</b>  | 1,27                                    | 1,88   | 1,28                                    | 1,43   | 1,92   |
| <b>4.75</b>  | 1,35                                    | 1,91   | 1,30                                    | 1,37   | 2,00   |
| <b>3.35</b>  | 1,34                                    | 2,02   | 1,27                                    | 1,37   | 2,06   |
| <b>2.36</b>  | 1,33                                    | 1,88   | 1,34                                    | 1,41   | 2,30   |
| <b>1.40</b>  | 1,31                                    | 1,93   | 1,31                                    | 1,56   | 2,24   |
| <b>1.00</b>  | 1,28                                    | 2,01   | 1,30                                    | 1,54   | 2,32   |
| <b>0.60</b>  | 1,53                                    | 2,30   | 1,54                                    | 1,84   | 2,38   |
| <b>0.30</b>  | 2,16                                    | 2,57   | 2,20                                    | 2,45   | 2,59   |
| <b>0.212</b> | 2,55                                    | 2,61   | 2,49                                    | 2,56   | 2,63   |
| <b>0.150</b> | 2,58                                    | 2,62   | 2,38                                    | 2,58   | 2,63   |
| <b>0.106</b> | 2,50                                    | 2,59   | 1,99                                    | 2,46   | 2,63   |
| <b>0.075</b> | 2,35                                    | 2,48   | 1,43                                    | 2,02   | 2,55   |
| <b>Plat</b>  | 1,79                                    | 2,10   | 1,35                                    | 1,63   | 2,32   |

Tel qu'observé précédemment, les conditions météorologiques ont une influence sur la composition des particules de « grit » retenues par l'unité de dessablage et affectent directement la densité des particules. En temps de pluie, la densité spécifique estimée est plus grande pour toutes les tailles de particules. L'effet est plus prononcé sur les particules de grandes dimensions. En temps de fonte des neiges, les particules sont très denses, pouvant être expliquées par des forces de cisaillement plus élevées qui favorisent la résuspension des particules dans les conduites, ainsi que la présence de sable abrasif étant lessivé des rues et entraîné par la fonte des neiges.

#### 6.1.4. Caractérisation de la vitesse de chute des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage

La caractérisation de la vitesse de chute des particules de « grit » retenues par les unités de dessablage a été réalisée à l'aide du protocole d'élutriation. L'analyse de la vitesse de chute des particules retenues par l'unité de dessablage permet de déterminer la vitesse de chute minimale d'une particule pour qu'elle décante dans l'unité de dessablage. Sur l'échantillon du 12 octobre 2016, en temps sec, de la station de traitement des eaux usées de Saint-Nicolas, un échantillon total de 21,5g de « grit » frais a été soumis à une évaluation de la vitesse de chute par système d'élutriation (Figure 36).

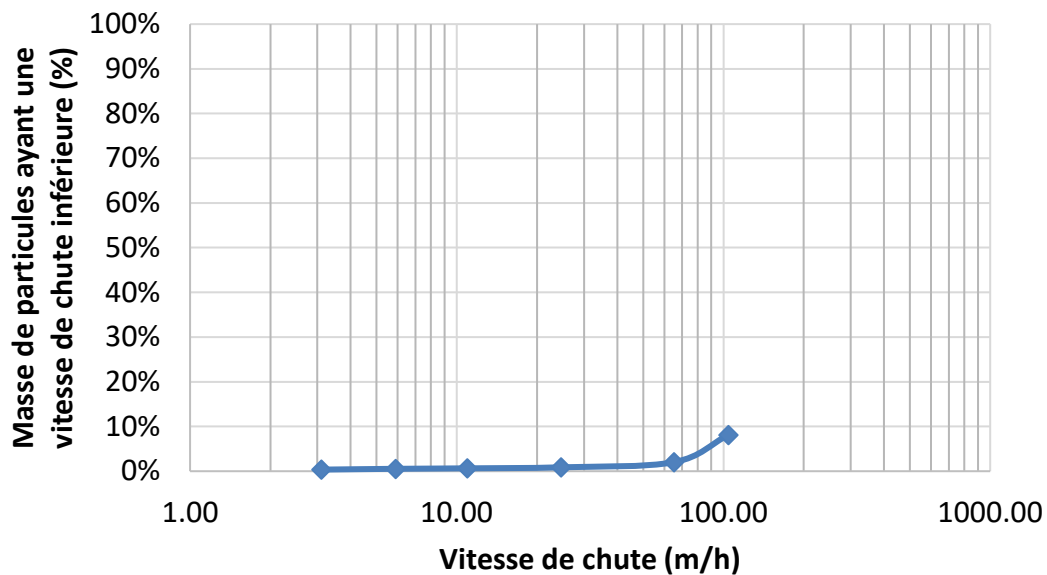


Figure 36 : Distribution de la vitesse de chute des particules de « grit » retenues par l'unité de dessablage en temps sec par système d'élutriation

La distribution des vitesses de chute par système d'élutriation a permis d'observer qu'environ 90% de particules retenues par l'unité de dessablage en temps sec ont des vitesses de chute supérieures à 100 m/h, correspondant à une particule de sable propre de 210  $\mu\text{m}$  (Loi de Stokes). Toutefois, un débit de pompage du système d'élutriation plus important serait nécessaire afin d'observer de façon plus détaillée les vitesses de chute des particules retenues par l'unité de dessablage et faciliter les comparaisons entre les distributions de vitesses de chute.

## 6.2. Caractérisation des particules de « grit » de l’affluent et l’effluent de l’unité de dessablage de Saint-Nicolas

Afin d’élaborer un protocole d’analyse de la décantabilité des particules de l’affluent et l’effluent d’un dessableur, des essais de caractérisation de la distribution de la vitesse de chute des particules ont été réalisés. Pour ce faire, l’utilisation du système d’élutriation et du protocole ViCAs a été mise de l’avant afin d’établir les vitesses de chute directement, sans avoir recours aux informations sur la taille des particules ou de composition. Sur les particules de l’affluent et l’effluent de l’unité de dessablage, aucune analyse de la taille des particules n’a été réalisée. Une analyse granulométrique par tamisage aurait nécessité environ 500 litres d’échantillon pour collecter la quantité de MeS nécessaire pour la réalisation de l’essai. La caractérisation de la distribution des vitesses de chute des particules a été réalisée en temps sec sous différentes conditions de débit. Les conditions d’échantillonnage sont présentées au Tableau 10. Toutefois, il est nécessaire de mentionner que la représentativité de l’échantillonnage n’a pas été évaluée et que les résultats de caractérisation des particules de l’affluent et l’effluent sont issues sous toute réserve d’un échantillonnage adéquat.

Tableau 10 : Conditions d’échantillonnage des particules de « grit » à l’affluent et effluent de l’unité de dessablage de St-Nicolas

| Date       | Heure | STEP       | Météo | Débit à l’entrée (m <sup>3</sup> /h) | Volume d’échantillon (L) | Agitation (RPM) | Élutriation |          | ViCAs    |          |
|------------|-------|------------|-------|--------------------------------------|--------------------------|-----------------|-------------|----------|----------|----------|
|            |       |            |       |                                      |                          |                 | Affluent    | Effluent | Affluent | Effluent |
| 2016-08-04 | 8:30  | St-Nicolas | Sec   | 735                                  | 20                       | 60              | X           |          |          |          |
| 2016-08-10 | 8:30  | St-Nicolas | Sec   | 706                                  | 20                       | 60              | X           |          |          |          |
| 2016-08-16 | 9:00  | St-Nicolas | Sec   | 777                                  | 20                       | 100             | X           |          |          |          |
| 2016-09-18 | 9:00  | St-Nicolas | Sec   | 839                                  | 15                       | 100             | X           | X        | X        | X        |
| 2016-09-28 | 9:00  | St-Nicolas | Sec   | 571                                  | 15                       | 100             | X           | X        | X        | X        |
| 2016-10-04 | 15:00 | St-Nicolas | Sec   | 460                                  | 15                       | 100             | X           | X        | X        | X        |

Au total, six échantillons à l’affluent et trois à l’effluent ont été prélevés en temps sec à la station de Saint-Nicolas. Cinq des six échantillons de l’affluent ont été prélevés

en débit de pointe. L'analyse de la distribution de la vitesse de chute a été réalisée par le système d'élutriation pour tous les échantillons, tandis que le protocole ViCAs a été utilisé pour les trois derniers échantillons. L'évaluation de la performance des unités de dessablage a pu être réalisée à l'aide du protocole d'élutriation en comparant l'affluent à l'effluent de l'unité de dessablage. Les résultats obtenus en laboratoire pour les différents essais par protocole ViCAs et d'élutriation sont présentés en Annexe E.

### 6.2.1. Caractérisation de la vitesse de chute des particules de « grit » à l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage par élutriation

La caractérisation de la vitesse de chute de l'affluent et l'effluent des unités de dessablage a été réalisée à l'aide du protocole d'élutriation avec un débit de pompage de 1,56 L/min. À ce débit il est possible de caractériser les particules ayant des vitesses de chute comprises entre 3 m/h et 105 m/h. Les résultats de caractérisation obtenus pour l'affluent de l'unité de dessablage sont présentés à la Figure 37.

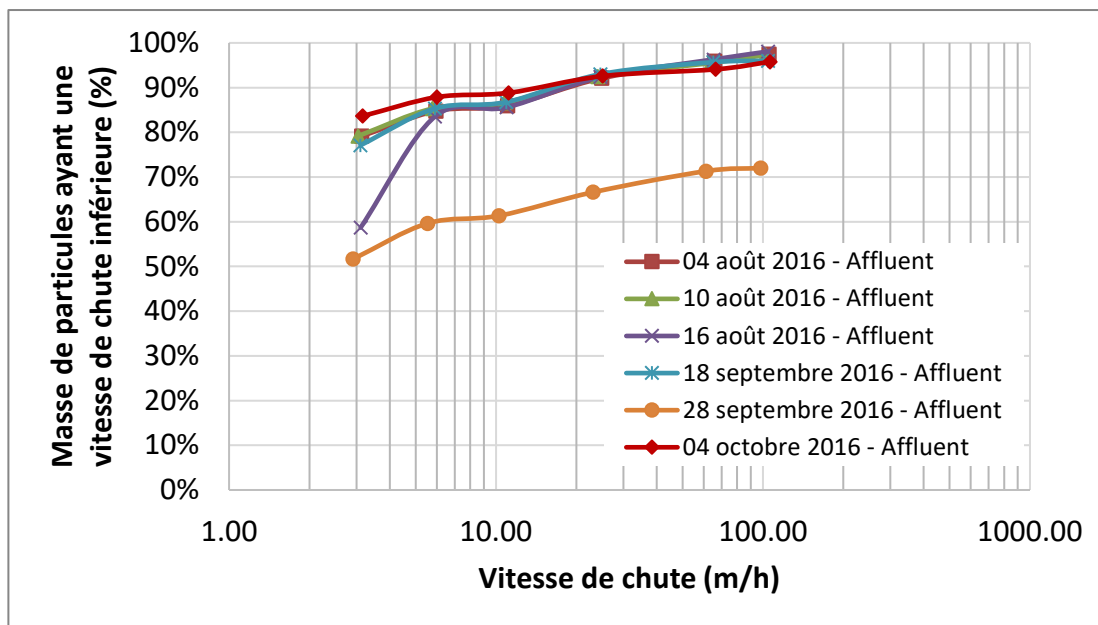


Figure 37 : Distribution de la vitesse de chute des particules de l'affluent de l'unité de dessablage de St-Nicolas par élutriation

Les distributions de vitesse de chute et les concentrations en MeS de l'affluent sont semblables pour les conditions d'opération en débit de pointe. En général, les distributions de vitesse de chute présentent une proportion de particules ayant des

vitesse de chute inférieures à 6 m/h d'environ 85%. De plus, environ 95% des particules ont des vitesses de chute inférieures à 105 m/h. Toutefois, lors de l'échantillonnage du 04 octobre 2016, une quantité importante de particules inorganiques ayant de grandes vitesses de chute, tel que du sable et du gravier, a été récupérée. Ces particules ont un effet direct sur les résultats de la distribution de la vitesse de chute, représentant environ 25% de la masse totale de l'échantillon. La représentativité de la stratégie d'échantillonnage peut donc avoir un effet direct sur la caractérisation des particules.

La caractérisation de l'effluent de l'unité de dessablage a aussi été réalisée sur trois échantillons. Les résultats obtenus entre l'affluent et l'effluent ont été comparés afin d'observer l'effet de l'unité de dessablage sur la distribution de la vitesse de chute des particules (Figure 38).

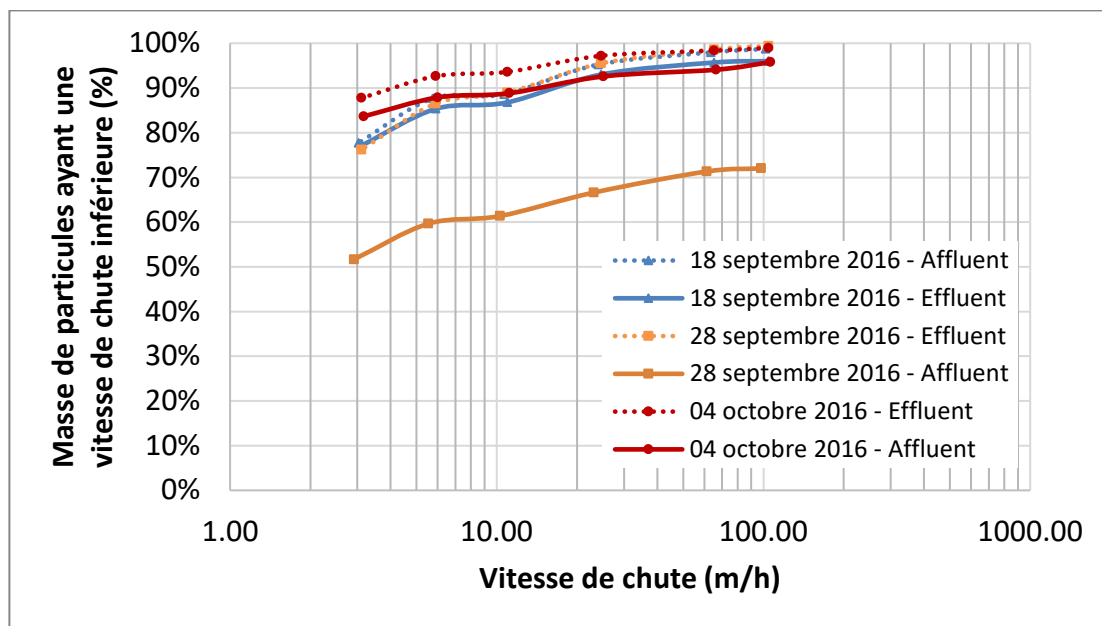


Figure 38 : Comparaison des essais d'élutriation de l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage de Saint-Nicolas

De faibles différences sont observées entre les distributions de la vitesse de chute des particules de l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage. Les distributions de vitesse de chute sont situées plus hauts graphiquement pour l'effluent, présentant une distribution de vitesse de chute plus faible, ce qui était attendu. Il est aussi possible d'observer que les distributions de vitesse de chute de l'affluent et l'effluent

sont parallèles. Le parallélisme des distributions est observé puisque des différences absolues sont principalement observées pour les vitesses de chute supérieures à 105 m/h. Le dessableur a donc un effet plus important sur les particules ayant de très grandes vitesses de chute ( $> 105$  m/h).

#### 6.2.2. Évaluation de la performance d'élimination des particules de « grit » à l'affluent de l'unité de dessablage par élutriation

L'analyse de la performance est dépendante de la qualité et de la représentativité de l'échantillonnage. Un échantillonnage inadéquat aura des influences directes sur les caractéristiques des particules évaluées. Utilisant une méthode d'échantillonnage non standardisé et qui peut être non représentative, aucune conclusion sur les performances réelles de l'unité de dessablage ne peut être faite.

Le protocole d'élutriation permet de caractériser la vitesse de chute des particules, mais permet aussi d'évaluer les performances de l'unité de dessablage pour l'élimination des particules de « grit » présentes à l'affluent de l'unité de dessablage. À l'aide des masses retenues dans chacune des colonnes d'élutriation pour les essais sur l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage, il est possible de comparer la masse de particules retenues par chacune des colonnes. Ayant le même volume pour les essais de l'affluent et l'effluent les valeurs de masse absolue ont été utilisées. L'analyse de la performance a donc été réalisée pour les essais du 18 septembre 2016, 28 septembre 2016 et du 4 octobre 2016. Afin de mesurer les performances, une comparaison des masses retenues par les différentes colonnes d'élutriation à l'affluent et l'effluent a été réalisée. La masse retenue pour chacune des colonnes d'élutriation avec un volume de 15L pour l'essai du 28 septembre 2016 est présentée à la Figure 39.

La comparaison des masses retenues pour chacune des colonnes pour l'essai du 28 septembre 2016 présente une différence importante entre la masse retenue pour la colonne de 34 mm de diamètre et une plus faible différence pour les autres colonnes. Cette différence importante est expliquée par une proportion importante de particules de grandes vitesses de chute qui ont été échantillonnées à l'affluent de l'unité de dessablage, du sable et du gravier principalement.

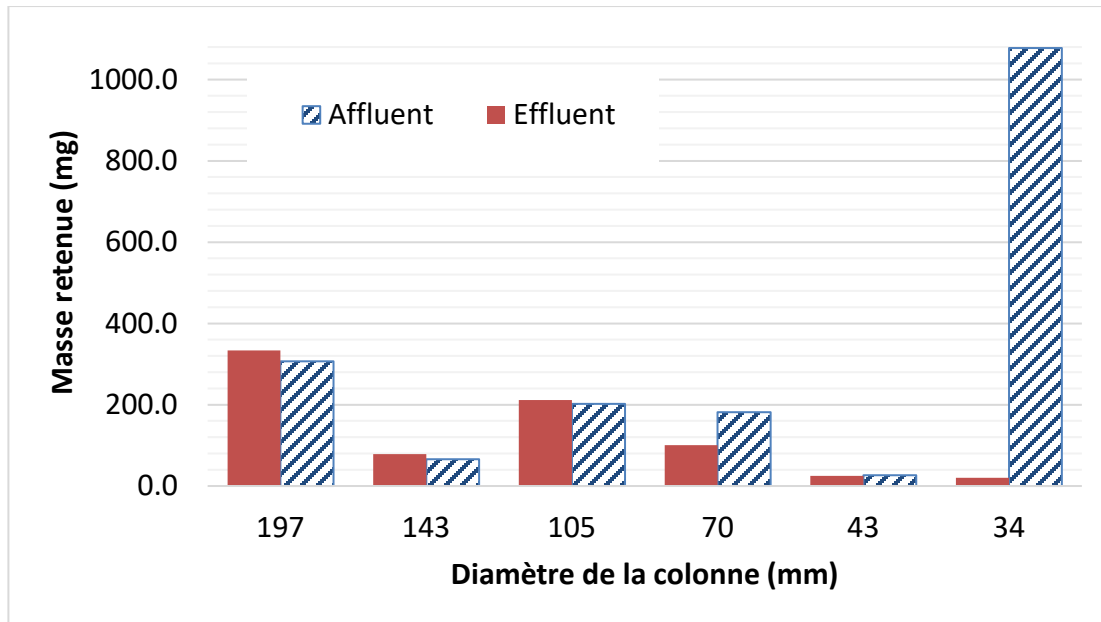


Figure 39 : Masse retenue pour chacune des colonnes d'élutriation pour l'essai du 28 septembre 2016

En comparant la masse retenue à l'affluent et l'effluent pour les différentes colonnes d'élutriation, il est possible de mesurer le pourcentage d'élimination des particules pour chaque colonne. L'élimination des particules pour chaque colonne de l'essai du 28 septembre 2016 est présentée au Tableau 11.

Tableau 11 : Élimination des particules pour chaque colonne d'élutriation (28 septembre 2016)

| Diamètre de la colonne (mm) | Masse à l'affluent (mg) | Masse à l'effluent (mg) | Élimination des particules (%) |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 34                          | 1077,5                  | 20,0                    | 98%                            |
| 43                          | 26,6                    | 24,7                    | 7%                             |
| 70                          | 181,4                   | 100,5                   | 45%                            |
| 105                         | 202,3                   | 211,7                   | -5%                            |
| 143                         | 65,9                    | 78,7                    | -19%                           |
| 197                         | 306,7                   | 333,7                   | -9%                            |

Une élimination importante des particules retenues par la colonne de 34mm est observée, présentant l'utilité de l'unité de dessablage pour l'élimination des particules ayant de fortes vitesses de chute. Des éliminations moins importantes sont observées pour les colonnes de diamètre inférieur. Des éliminations négatives sont observées

pour les trois dernières colonnes, présentant un effet très limité de l'unité de dessablage sur les particules ayant des vitesses de chute plus faibles.

En pratique, la performance des unités de dessablage est mesurée à l'aide du pourcentage d'élimination des particules de diamètre plus grand qu'une taille fixe. Par exemple, pour la conception des unités de dessablage, les critères de performance recommandés sont l'élimination de 95% des particules de diamètre plus grand que 300  $\mu\text{m}$ , 85% des particules de diamètre plus grand que 210  $\mu\text{m}$  et de 65% des particules de diamètre plus grand que 150  $\mu\text{m}$  (Tchobanoglous et coll., 2003). Se basant sur cette définition, la performance d'élimination des particules a été calculée pour chacune des vitesses de chute définies par les colonnes d'élutriation, représentant une taille de sable de diamètre équivalent. La taille de particule de sable équivalente a été calculée à l'aide de la vitesse de chute de chacune des colonnes d'élutriation et de la Loi de Stokes, utilisant une sphéricité de 1,00 et une densité spécifique de 2,65. Les performances calculées pour l'essai du 28 septembre 2016 sont présentées au Tableau 12.

Tableau 12 : Performance d'élimination des particules de « grit » en fonction de la vitesse de chute (28 septembre 2016)

| Diamètre de la colonne (mm) | Vitesse d'ascension (m/h) | Taille de particule de sable équivalente ( $\mu\text{m}$ ) | Performance d'élimination (%) |
|-----------------------------|---------------------------|--|-------------------------------|
| 34                          | 103                       | 210  | 98%                           |
| 43                          | 50                        | 135  | 96%                           |
| 70                          | 24                        | 91   | 89%                           |
| 105                         | 11                        | 59   | 76%                           |
| 143                         | 6                         | 43   | 72%                           |
| 197                         | 3                         | 31   | 59%                           |

La performance d'élimination est supérieure au pourcentage d'élimination des particules pour une colonne individuelle, sauf pour la première. Ayant une fraction plus importante de particules de grande vitesse de chute la performance d'élimination des particules des colonnes de plus petit diamètre est alors bonifiée, ce qui fait que cette définition de la performance est difficile à utiliser.

Pour les essais du 18 septembre 2016 et du 04 octobre 2016, la même analyse a été réalisée. Ayant des courbes similaires d’affluent et d’effluent, seulement les résultats du 18 septembre 2016 sont présentés. La masse retenue pour chacune des colonnes d’élutriation avec un volume de 15L pour l’essai du 18 septembre 2016 est présentée à la Figure 40.

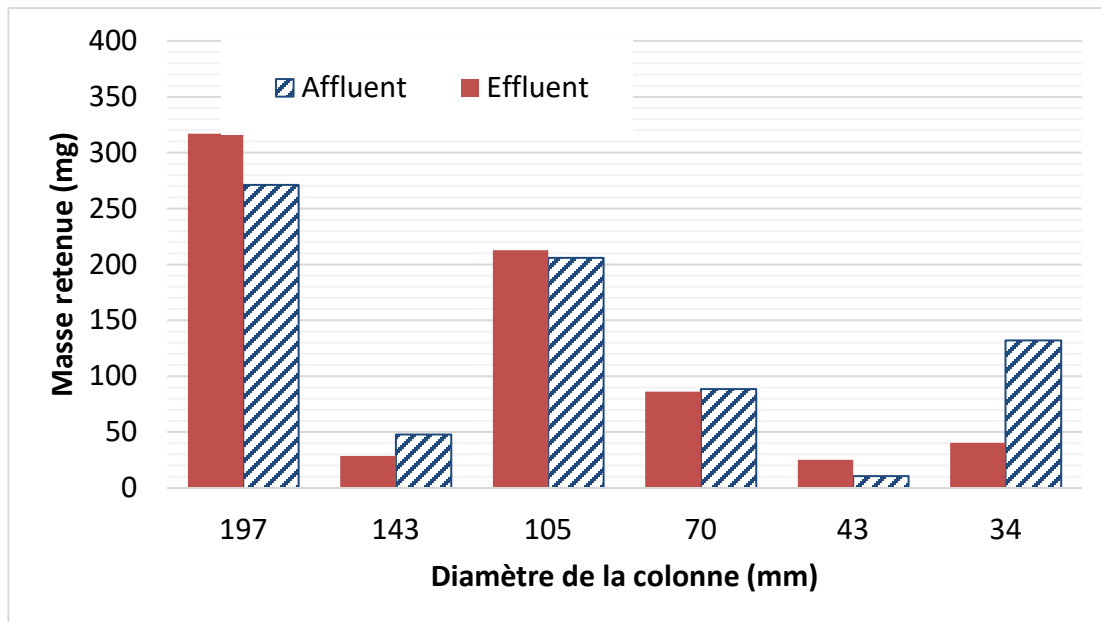


Figure 40: Masse retenue pour chacune des colonnes d’élutriation pour l’essai du 18 septembre 2016

Comparativement à l’essai du 28 septembre 2016, la masse de particules retenues dans la colonne de 34 mm de diamètre à l’affluent est beaucoup moins importante. Lors de l’échantillonnage seulement une faible proportion de particules de sables et de gravier a été récupérée. Pour les autres colonnes, les caractéristiques de l’affluent et de l’effluent sont très similaires entre les deux essais présentés. Pour cet essai, ayant un échantillon moins chargé à l’affluent, un effet direct sur les résultats de distribution de vitesse de chute et sur la performance de l’unité de dessablage est observé. L’élimination des particules pour chaque colonne de l’essai du 18 septembre 2016 est présentée au Tableau 13.

Tableau 13 : Élimination des particules pour chaque colonne d'élutriation (18 septembre 2016)

| Diamètre de la colonne (mm) | Masse à l'affluent (mg) | Masse à l'effluent (mg) | Élimination des particules (%) |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 34                          | 131,9                   | 40,4                    | 69%                            |
| 43                          | 10,5                    | 25,1                    | -139%                          |
| 70                          | 88,6                    | 86,2                    | 3%                             |
| 105                         | 205,9                   | 212,7                   | -3%                            |
| 143                         | 47,9                    | 28,7                    | 40%                            |
| 197                         | 271,1                   | 316,9                   | -17%                           |

Même s'il y a moins de masse de particules retenue dans la colonne de 34mm, l'élimination des particules la plus importante est observée pour cette colonne. De plus, une élimination négative de -139% est observée pour la colonne de 43mm. Toutefois, ayant une faible masse de particules retenues dans cette colonne les résultats ont un effet moins important sur les performances de l'unité de dessablage. Les performances calculées pour l'essai du 18 septembre 2016 sont présentées au Tableau 14.

Tableau 14 : Performance d'élimination des particules de « grit » en fonction de la vitesse de chute (18 septembre 2016)

| Diamètre de la colonne (mm) | Vitesse d'ascension (m/h) | Taille de particule de sable équivalente (µm) | Performance d'élimination (%) |
|-----------------------------|---------------------------|---|-------------------------------|
| 34                          | 103                       | 210   | 69%                           |
| 43                          | 50                        | 135   | 54%                           |
| 70                          | 24                        | 91  | 34%                           |
| 105                         | 11                        | 59  | 17%                           |
| 143                         | 6                         | 43  | 19%                           |
| 197                         | 3                         | 31  | 6%                            |

De faibles performances de l'unité de dessablage sont observées pour cet essai comparativement à l'essai du 28 septembre 2016. Les résultats sont fortement influencés par la masse éliminée pour les premières colonnes de l'essai d'élutriation. Se basant sur les critères de conception proposés par Tchobanoglous et coll. (2003), l'unité de dessablage ne répondrait pas aux exigences d'élimination des particules ayant des vitesses de chute équivalentes à un sable propre de 210 µm. De plus, en

utilisant les définitions actuelles de performance des unités de dessablage, considérant la décantabilité des particules supérieures à une taille fixe, les résultats peuvent être facilement biaisés par une proportion plus importante de particules ayant de très fortes vitesses de chute. Les performances d'élimination sont meilleures pour l'essai du 28 septembre 2016 que pour l'essai du 18 septembre 2016 puisqu'une proportion plus importante de particules de grandes vitesses de chute était présente à l'affluent. Toutefois, en absolu, les performances sont semblables pour les différentes colonnes d'élutriation des deux essais. Cette définition de la performance favorise les affluents fortement chargés en particules ayant de grandes vitesses de chute, puisque l'élimination de ces particules contribue à la performance d'élimination des particules ayant une vitesse de chute plus faible.

### 6.2.3. Caractérisation de la vitesse de chute des particules de « grit » à l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage par protocole ViCAs

La caractérisation de la vitesse de chute des particules de « grit » de l'affluent et de l'effluent de l'unité de dessablage a été mesurée par protocole ViCAs, utilisant une colonne de 70 cm, duquel il est possible d'analyser les particules ayant des vitesses de chute entre 0,6 m/h et 40 m/h. Les distributions de vitesses de chute de l'affluent et de l'effluent ont été comparées afin d'évaluer les caractéristiques des particules entrantes et sortantes de l'unité de dessablage. L'analyse de la vitesse de chute de l'affluent et l'effluent de l'échantillon du 28 septembre 2016, comprenant une importante fraction de particules ayant de grandes vitesses de chute, sont présentés à la Figure 41.

De faibles différences entre les distributions de vitesse de chute entre l'affluent et l'effluent sont observées pour l'essai du 28 septembre 2016. Les vitesses de chute sont un peu moins importantes pour l'effluent que l'affluent de l'unité de dessablage, tel qu'il était attendu. Toutefois, pour les essais du 18 septembre 2016 et du 04 octobre 2016, aucune différence n'est observée. L'unité de dessablage étant conçu généralement pour l'élimination de particules ayant des vitesses de chute supérieures

à 32,4 m/h il est difficile d'observer des différences graphiquement. Les distributions de vitesses de chute du 18 septembre 2016 et du 04 octobre 2016 sont en Annexe E.

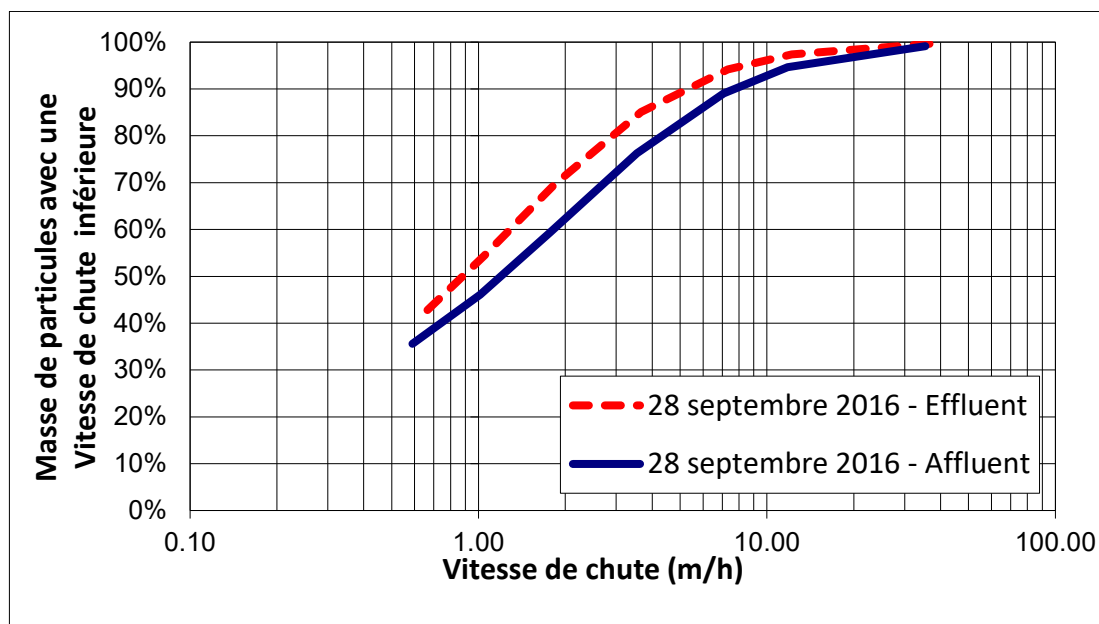


Figure 41 : Distribution de la vitesse de chute par protocole ViCAs pour l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage de Saint-Nicolas (28 septembre 2016)

Les distributions de vitesses de chute mesurées à l'aide du protocole ViCAs présentent que 100% de particules ont des vitesses de chute inférieures à 40 m/h. Cependant, tel qu'observé avec l'essai d'élutriation, certaines particules ont de très fortes vitesses de chute. Lors de l'étape de remplissage de la colonne ViCAs, il a été observé que de nombreuses particules de sable et gravier demeurent dans la chaudière. Afin de considérer ces particules, il serait nécessaire de mesurer la masse de particules restantes dans la chaudière afin de considérer ces particules comme étant des particules ayant décanté dans la première coupelle. Ces particules, qui ne se remettent pas en suspension, ne sont pas considérées lors de la mesure de la concentration initiale ce qui fait en sorte que les bilans de masse semblent bons malgré ces particules demeurées dans la chaudière. Afin d'observer l'effet de ces particules sur le protocole ViCAs, une concentration de 60 mg/l de ces particules a été considérée et ajoutée à la concentration initiale. La concentration de 60 mg/l correspond à la concentration de particules rester dans la chaudière lors de l'essai d'élutriation effectué le 28 septembre 2016. La masse correspondant à ces particules

a été ajoutée à la coupelle du premier pas de temps. L'effet de cette masse sur le graphique de distribution de vitesse de chute est présenté à la Figure 42.

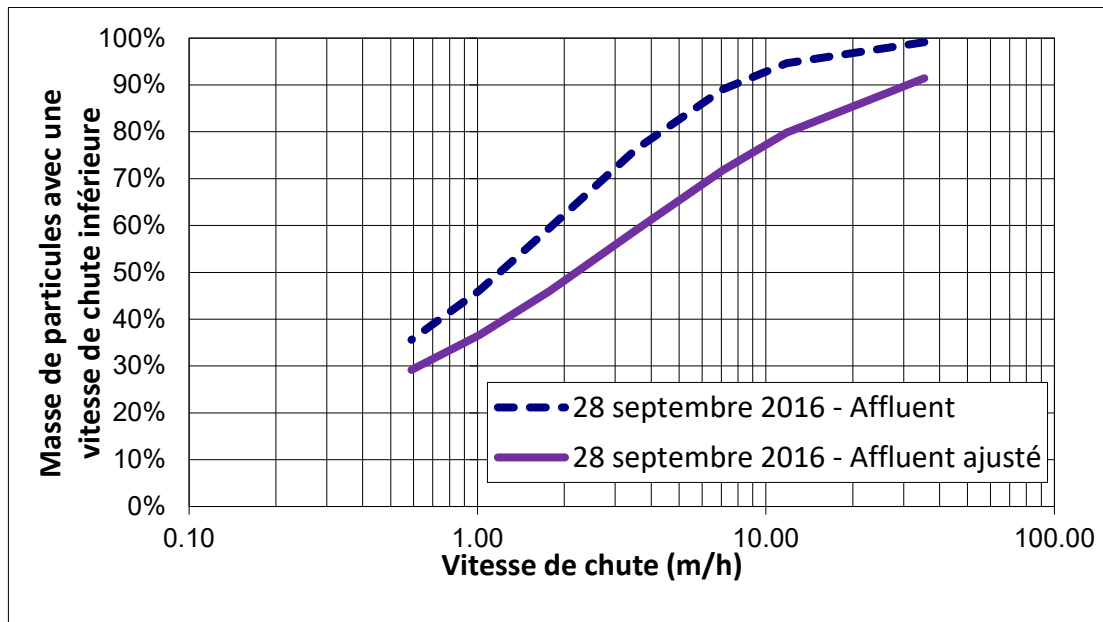


Figure 42 : Distribution de vitesse de chute de l'affluent ajusté et non ajusté par protocole ViCAs

En ajustant la distribution de vitesse de chute, on observe que la distribution ne débute pas à 100% et qu'une proportion des particules possède des vitesses de chute supérieures à 40 m/h. Considérer la masse retenue dans la chaudière pourrait donc permettre une meilleure caractérisation des fortes vitesses de chute par protocole ViCAs.

Dans l'optique d'utiliser le protocole ViCAs pour l'évaluation des performances des unités de dessablage, il serait préférable de modifier la colonne ViCAs afin de pouvoir mesurer des vitesses de chute supérieures à 100 m/h. Utilisant une colonne de 200 mm de hauteur il serait possible de mesurer les vitesses de chute allant jusqu'à 120 m/h, permettant d'avoir des informations importantes sur les caractéristiques des particules de « grit » ayant de fortes vitesses de chute. Toutefois, il sera tout de même nécessaire de mesurer la masse de particules demeurant dans la chaudière lors de l'étape de remplissage de la colonne ViCAs.

## **7. Estimation de la vitesse de chute des particules à partir des tamisages**

Un des principaux intérêts de la caractérisation des particules de « grit » retenues est de pouvoir estimer les vitesses de chute à partir des essais de tamisage. Elle permet d'approximer les vitesses de chute sans avoir recours à la caractérisation de cette dernière en utilisant des protocoles tels que les ViCAs ou l'élutriation. En utilisant la Loi de Stokes, il est possible d'utiliser les informations de la taille des particules afin d'estimer la vitesse de chute. Toutefois, il est essentiel de prendre en compte le fait que la densité n'est pas celle du sable puisque celle-ci est fortement influencée par la fraction organique. Une évaluation de la densité est donc primordiale.

### **7.1. Méthodologie d'estimation de la vitesse de chute des particules**

Afin d'estimer la vitesse de chute des particules, les analyses granulométriques et de la composition réalisées sur les particules de « grit » retenues en benne ont été utilisées. Pour chacune des tailles de particules retenues par les tamis, 14 au total, la vitesse de chute a été calculée utilisant la loi de Stokes pour une densité allant de 1,00 à 2,65, une sphéricité de 1 et une température de l'eau de 20°C. Puisque la Loi de Stokes est un calcul itératif pour un écoulement turbulent, un total de trois itérations ont été réalisées. Les calculs de la vitesse de chute à l'aide de la loi de Stokes sont en Annexe F.

Pour chacun des tamisages avec prétraitement par lavage des particules de « grit » humide, la densité des particules retenues sur chaque tamis a été estimée à l'aide de la composition en MIeS et MVeS, tel que présenté à la section 6.1.3. En connaissance de la taille des particules et de la densité des particules d'un tamis, la vitesse de chute a été déterminée et associée à la masse retenue sur le tamis correspondant, sous l'hypothèse que toutes les particules retenues sur un même tamis ont la même composition. La distribution moyenne de la vitesse de chute de tous les essais a donc été produite afin d'observer les caractéristiques de vitesses de chute des particules.

Les conditions de temps sec et de temps de pluie ont aussi été comparées pour les stations de Saint-Nicolas et de la Ville de Québec.

## 7.2. Résultats et discussion de l'estimation de la vitesse de chute

À l'aide de l'estimation de la vitesse de chute par la loi de Stokes, il est possible d'observer que les vitesses de chute estimées pour les particules de « grit » retenues par les unités de dessablage sont très élevées. Les vitesses de chute estimées se situent entre 10 m/h et 1800 m/h. La distribution des vitesses de chute moyenne de tous les échantillonnages de « grit » dans les bennes de Saint-Nicolas et de la Ville de Québec, pour un total de 15 échantillons, est présentée à la Figure 43.

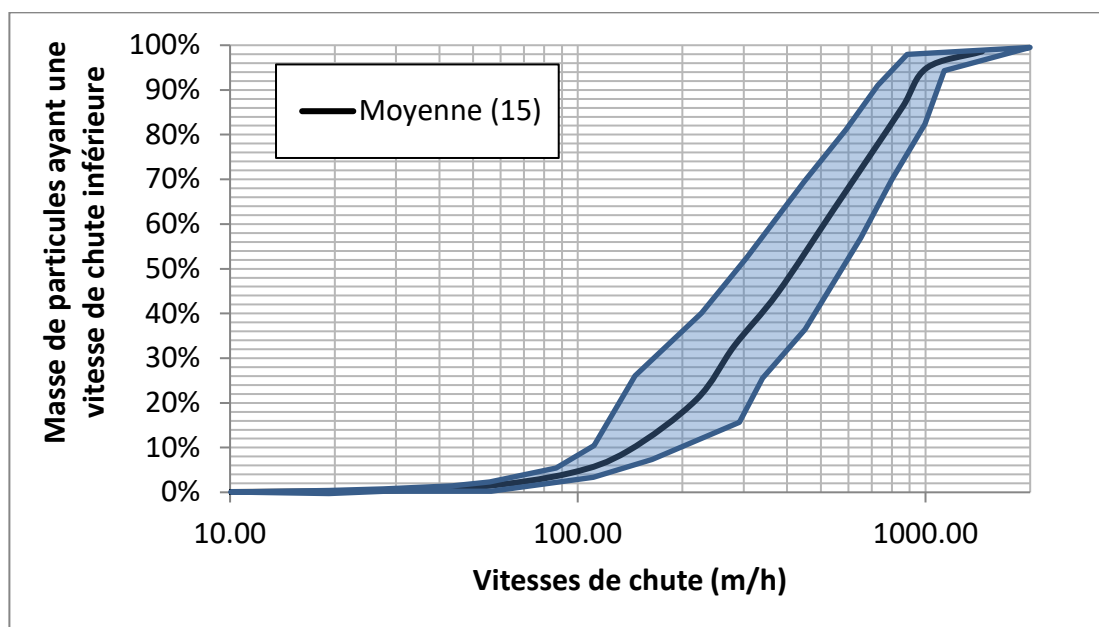


Figure 43 : Distribution moyenne des vitesses de chute estimées à partir de tous les tamisages

Les variations sont plus grandes pour les vitesses de chute supérieures à 100 m/h, correspondant où la masse des particules retenues sur les tamis est plus importante. La zone de référence correspond à la moyenne  $\pm$  une fois l'écart-type. Toutefois, comparativement à l'analyse des distributions granulométriques des particules de « grit » retenues dans la benne, les conditions météorologiques influencent peu les propriétés de vitesse de chute des particules, puisque la densité compense pour la variation de la taille des particules. La moyenne des distributions de vitesse de chute

en temps sec et en temps de pluie pour Saint-Nicolas et la Ville de Québec sont présentées à la Figure 44 et à la Figure 45 respectivement.

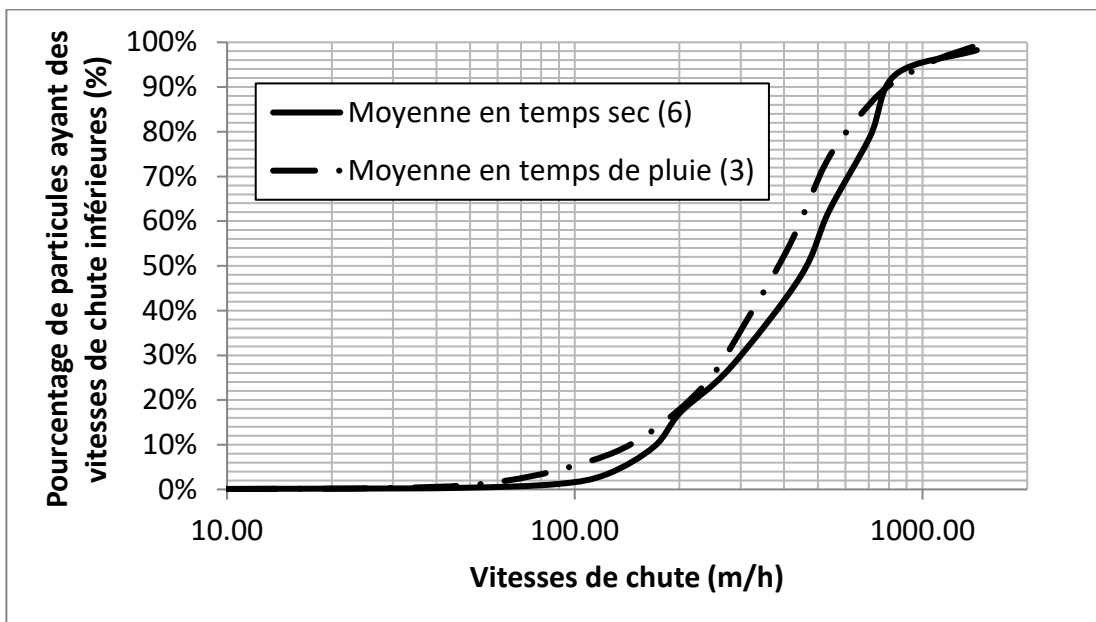


Figure 44 : Distribution moyenne des vitesses de chute estimées à partir de tamisage en temps sec et en temps de pluie à Saint-Nicolas

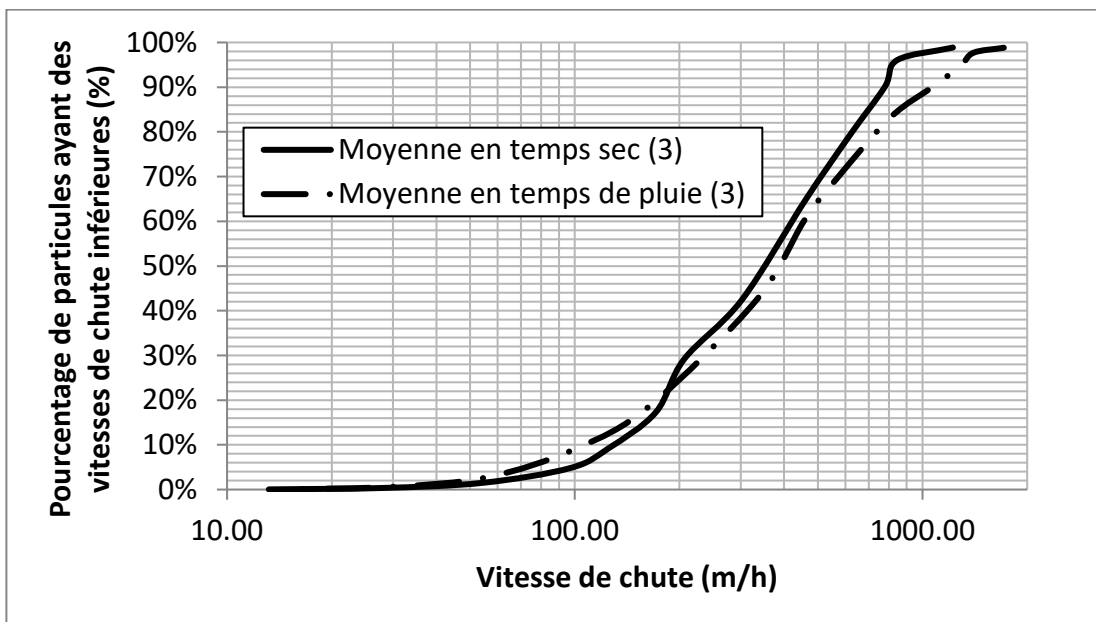


Figure 45 : Distribution moyenne des vitesses de chute estimées à partir de tamisage en temps sec et en temps de pluie à la Ville de Québec

Les différences entre les évènements, pluvieux ou secs, sont peu importantes pour les deux stations de traitement des eaux usées. Les particules décantant en temps de pluie et en temps sec ont les mêmes propriétés en utilisant le modèle de sédimentation de Stokes. Des vitesses de chute plus forte à l'affluent étaient attendues en temps de pluie puisque le temps de rétention hydraulique et la performance du dessableur sont moins grands. En utilisant la loi de Stokes pour l'estimation des vitesses de chute, les particules de plus grandes dimensions, même pour une très faible densité, décantent plus rapidement que les particules plus denses de plus petite dimension. Cependant, il a été observé lors des analyses granulométriques que les particules plus grossières ( $> 600 \mu\text{m}$ ) ne sont pas sphériques (Figure 46, Figure 47, Figure 48), tandis que les particules plus fines semblent sphériques. L'estimation pourrait donc être améliorée par l'analyse de la sphéricité des particules. La sphéricité des particules influence directement la vitesse de chute des particules. Ne considérant pas ce paramètre il se peut que les vitesses de chute soient surestimées par la loi de Stokes, et ce, principalement en temps sec où les particules de grandes dimensions sont présentes en plus grande proportion.



Figure 46 : Particules retenues sur tamis de 3,35 mm (à gauche) et sur tamis de 4,75 mm (à droite)



*Figure 47 : Particules retenues sur tamis de 2,36 mm*



*Figure 48 : Particules retenues sur tamis de 1,40 mm*

## 8. Conclusion

Afin d'évaluer la décantabilité des particules, un protocole standardisé de caractérisation de la taille des particules a été développé et permet d'obtenir des résultats ayant une très bonne répétabilité et de faibles erreurs de mesure tout en limitant les risques à la santé associés au tamisage des particules de « grit » non séchées.

La caractérisation des particules de « grit » retenues dans la benne donne des informations importantes sur la décantabilité de ces particules. Il est ainsi possible de déterminer les propriétés des particules de « grit » présentes dans le réseau. La caractérisation de la taille des particules et de l'analyse de la composition en matière inorganique a permis de conclure que les propriétés des particules de « grit » varient selon les conditions de temps sec et de temps de pluie. Durant les événements pluvieux, les particules de « grit » sont plus fines et ont une fraction inorganique plus importante que les particules de « grit » retenues en temps sec.

De plus, la fraction inorganique diffère selon la taille des particules. Elle est plus grande pour les particules de petites dimensions ( $<0,6 \mu\text{m}$ ) et plus petites pour les particules grossières ce qui influence directement la densité des particules. Toutefois, l'analyse de ces particules, en l'absence d'information importante quant aux particules présentes à l'affluent de l'unité de dessablage, ne permet pas de conclure sur les performances de l'unité de dessablage. De plus, sans cette information, il est impossible de comparer les performances des unités de dessablage entre différentes stations de traitement des eaux usées puisque les propriétés des « grits » sont dépendantes du type de réseau, des industries environnantes, des habitudes de vie, etc.

La caractérisation des vitesses de chute de l'affluent et de l'effluent de l'unité de dessablage est possible à l'aide du système d'élutriation et du protocole ViCAs. Le système d'élutriation permet de caractériser de grandes vitesses de chute et peut être utilisé pour l'évaluation de la performance des unités de dessablage quant à l'élimination des particules de « grit ». L'utilisation du protocole ViCAs est limitée

par la hauteur de la colonne de 70 cm permettant de caractériser les particules ayant des vitesses de chute inférieures à 40 m/h. Utilisant ce protocole peu de différences sont observables entre l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage.

La principale limite observée pour l'utilisation des protocoles de caractérisation des particules en suspension de l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage est l'utilisation d'une méthode d'échantillonnage non standardisée qui peut être non représentative. Les caractéristiques observées peuvent donc varier et mener à une caractérisation non représentative. En conséquence, la qualité de l'échantillonnage aura un grand impact sur les performances observées à l'unité de dessablage.

L'estimation de la vitesse de chute des particules par la loi de Stokes, à partir des données de tamisage et une estimation de la densité basée sur la fraction inorganique des particules tamisées a été faite. Selon cette estimation, plus de 90% des particules retenues par les unités de dessablage ont des vitesses de chute supérieures à 100 m/h. Les vitesses de chute estimées par la Loi de Stokes ne considèrent pas les propriétés physiques des particules (sphéricité) ce qui peut surestimer les vitesses de chute, surtout pour les particules de grandes dimensions qui ne sont pas sphériques.

Afin d'améliorer la qualité des résultats, il serait intéressant de développer une méthode d'échantillonnage standardisée et représentative de l'affluent et de l'effluent de l'unité de dessablage. De plus, un plus grand nombre d'échantillons sur un horizon de 1 an permettrait de mieux caractériser les particules et d'identifier l'effet des saisons sur les propriétés des particules de « grit ». Finalement, utilisant le protocole d'évaluation de la performance par élutriation, il serait possible pour les industries d'évaluer les performances des unités de dessablage, et ce, en utilisant les vitesses de chute des particules.

## 9. Recommandations

Afin d'améliorer le protocole de caractérisation de la décantabilité des particules de « grit » et la méthodologie d'évaluation des performances des unités de dessablage, des limites dans la méthodologie de caractérisation sont toujours présentes et pourraient être modifiées.

- Il est recommandé de réaliser une évaluation des capacités d'échantillonner représentativement l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage à l'aide du Van Dorn modifié. Il est recommandé de développer une méthode d'échantillonnage représentatif et standardisé pouvant être répétable et utilisable sous différentes conditions d'opérations, et ce, à différentes stations de traitement des eaux usées.
- La caractérisation de la taille des particules retenues dans les bennes à sable doit être poursuivie afin d'observer si des différences sont observables entre les différentes saisons et les répercussions que ces informations peuvent avoir sur la conception d'une unité de dessablage.
- Afin d'améliorer la caractérisation des vitesses de chute des particules, il est recommandé d'ajouter la masse retenue dans la chaudière lors de l'étape de remplissage de la colonne ViCAs afin de considérer les particules qui ne peuvent entrer dans la colonne de sédimentation due à leur trop grande vitesse de chute. Cet ajustement permettrait d'obtenir des distributions de vitesse de chute plus représentatives.
- Afin d'observer des vitesses de chute plus grandes, il est recommandé d'utiliser une colonne ViCAs de plus grande dimension, au minimum 2m, afin d'observer de plus grandes vitesses de chute (>120 m/h) et permettre une meilleure comparaison de l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage.
- Afin de caractériser plus aisément les particules retenues dans la benne à sable par le système d'élutriation, il est recommandé d'augmenter le débit de

pompage afin d'observer des vitesses de chute supérieures à 150 m/h dans la première colonne.

- Pour améliorer la qualité de l'estimation de la vitesse de chute des particules par la Loi de Stokes, il est recommandé de déterminer la sphéricité des particules de « grit » en fonction des différentes tailles de particules afin d'ajuster les distributions de vitesse de chute. Afin d'estimer la sphéricité, il est possible de mesurer le diamètre le plus grand, le plus court et intermédiaire (Catacosinos, 1965).

# Bibliographie

- AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. 2014. *Équipement d'échantillonnage* [Online]. Available: <http://www.agr.gc.ca/fra/science-et-innovation/pratiques-agricoles/eau/protection-des-bassins-hydrographiques/echantillonnage-de-l-eau/equipement-dechantillonnage/?id=1371491557817> [Accessed 12 décembre 2015].
- AIGUIER, E., CHEBBO, G., BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L., HEDGES, P. & TYACK, N. 1995. Methods for determining the settling velocity profiles of solids in storm sewage. Proceedings of the 1995 IAWQ International Specialized Conference on Sewer Solids - Characteristics, Movement, Effects and Control, September 6-8 1995, Dundee, UK. 117-125.
- ANDOH, R. Y. G. 2008. Busting the grit chamber sizing myth. *Water and Wastes Digest*, 48, 14.
- ANDOH, R. Y. G., HIDES, S. P. & SAUL, A. J. 2002. Improving water quality using hydrodynamic vortex separators and screening systems. Proceedings of the Ninth International Conference on: Urban Drainage, September 8-13, 2002, 2002, Portland, OR, United States. 1-16.
- ANDOH, R. Y. G. & SMISSON, R. P. M. 1996. The practical use of wastewater characterisation in design. *Water Science and Technology*, 33, 127-134.
- ASHLEY, R., BERTRAND-KRAJEWSKI, J., HVITVED-JACOBSEN, T. & VERBANCK, M. 2005. *Solids in Sewers: Characteristics, Effects and Control of Sewer Solids and Associated Pollutants*, IWA Publishing, London, UK. pp. 360
- BACHIS, G., MARUÉJOULS, T., TIK, S., AMERLINCK, Y., MELCER, H., NOPENS, I., LESSARD, P. & VANROLLEGHEM, P. A. 2015. Modelling and characterization of primary settlers in view of whole plant and resource recovery modelling. *Water Science and Technology*, 72, 2251-2261.
- BLACK DOG ANALYTICAL. 2016. Available: <https://www.blackdoganalytical.com/grit-samplers.html> [Accessed 22 juin 2016].
- BORGES, N., CAMPOS, J. & PABLOS, J. 2015. Characterization of residual sand removed from the grit chambers of a wastewater treatment plant and its use as fine aggregate in the preparation of non-structural concrete. *Water Practice and Technology*, 10, 164-171.
- BRIÈRE, F. G. 2012. *Distribution et collecte des eaux*, Presses inter Polytechnique, Montréal, Qc, Canada. pp. 571
- CATACOSINOS, P. A. 1965. Tables for the determination of sphericity and shape of rock particles. *Journal of Sedimentary Research*, 35, 354-365.
- CHEBBO, G. & GROMAIRE, M. C. 2009. VICAS-an operating protocol to measure the distributions of suspended solid settling velocities within urban drainage samples. *Journal of Environmental Engineering*, 135, 768-775.
- CLESCERI, L., GREENBERG, A. & EATON, A. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, DC, USA. pp.
- COUTURE, M., STEELE, A., BRUNEAU, M., GADBOIS, A. & HOHMAN, B. 2009. Achieving greater efficiency for 360 rotational grit removal technology using empirical data and CFD analysis. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2009, October 10-14 2009, Orlando, FL, USA. 773-783.
- DE SILVA, V. & BATES, B. R. 2004. Fine grit removal challenges in wastewater treatment plants. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2004, October 2-6 2004, New Orleans, LA, USA. 258-264.
- DOROODCHI, E., EVANS, G., SCHWARZ, M., LANE, G., SHAH, N. & NGUYEN, A. 2008. Influence of turbulence intensity on particle drag coefficients. *Chemical Engineering Journal*, 135, 129-134.
- EPA 2003. *Wastewater Technology Fact Sheet : Screening and Grit Removal*, United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC, USA. pp.

- EXALL, K., MARSALEK, J. & KRISHNAPPAN, B. 2009. Hydraulic fractionation of conventional water quality constituents in municipal dry-and wet-weather flow samples. *Journal of the Water Science and Technology*, 59, 1159-1167.
- FIELD, R. & O'CONNOR, T. P. 1996. Swirl technology: Enhancement of design, evaluation, and application. *Journal of Environmental Engineering*, 122, 741-748.
- FINGER, R. E. & PARRICK, J. 1980. Optimization of grit removal at a wastewater treatment plant. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 52, 2106-2116.
- FUNK, R. R., KELLY, J. & MRKVICKA, R. S. 2008. Grit removal system evaluation—comparison of testing methodologies. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2008, October 18-22 2008, Chicago, IL, USA. 1688-1697.
- GARDNER, P. & DEAMER, A. 1996. An evaluation of methods for assessing the removal efficiency of a grit separation device. *Journal of the Water Science and Technology*, 33, 269-275.
- GRAVETTE, B., STREHLER, A., FINGER, D. & PALEPU, S. 2000. Troubleshooting a grit removal system. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2000, October 15-18 2000, Anaheim, CA, USA. 332-369.
- GROMAIRE, M. & CHEBBO, G. 2003. Mesure de la vitesse de chute des particules en suspension dans les effluents urbains, protocole VICAS, manuel de l'utilisateur. *CEREVE Marne-la-Vallée, France*.
- GWINN, A., OSEI, K., FINK, J. & ANDOH, R. 2013. Development and calibration of a grit settling column. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2013, October 5-9 2013, Chicago, IL, USA. 2391-2399.
- HADJ, I. B. 2013. *Caractérisation de la taille des particules et de leur vitesse de chute en décantation primaire*. Mémoire de recherche, Université Laval, Québec, Qc, Canada. pp. 249
- HE, Q., HU, C. & XU, Z. 2012. Temporal distribution of grit in the combined sewer system of the typical mountainous city. Proceedings of the International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resources Management (GIWRM), October 19-21 2012. Gansu, China, 1-4.
- HETTLER, E. N. 2010. *A modified elutriation device to measure particle settling velocity in urban stormwater runoff*. PhD Thesis, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA. pp. 167
- HETTLER, E. N., GULLIVER, J. S. & KAYHANIAN, M. 2011. An elutriation device to measure particle settling velocity in urban runoff. *Science of the Total Environment*, 409, 5444-5453.
- HOBSON, K. L., TWITCHELL, L. A. & PANGELINA, H. 2005. An innovative grit removal process for the city of council bluffs WWTP provides finer grit removal at low head losses. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2005, October 29 - November 2 2005, Washington, DC, USA. 312-324.
- HOLTZ, R. D. & KOVACS, W. D. 1991. *Introduction à la géotechnique*, Presses inter Polytechnique, Montréal, QC, Canada. pp. 808
- HOSKINS SCIENTIFIC LTD. 2016. *Horizontal PVC Alpha Water Sampler* [Online]. Available: [http://www.hoskin.ca/catalog/index.php?main\\_page=product\\_info&cPath=1\\_57\\_397\\_399&products\\_id=1128&zenid=llsjnohu1ekd58pas36jd9s707](http://www.hoskin.ca/catalog/index.php?main_page=product_info&cPath=1_57_397_399&products_id=1128&zenid=llsjnohu1ekd58pas36jd9s707) [Accessed 12 décembre 2016].
- KEANE, J. J. & DESILVA, V. 2009. Dealing with fine grit at WWTPs. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2009, October 10-14 2009, Orlando, FL, USA. 6149-6159.
- KIM, J.-Y. & SANSALONE, J. J. 2008. Event-based size distributions of particulate matter transported during urban rainfall-runoff events. *Water Research*, 42, 2756-2768.
- KITCHING, S. & DENTON, C. 2012. Characterisation of grit to develop an integrated plant solution. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2012, September 29 - October 3 2012, New Orleans, LA, USA. 626-633.
- KRISHNAPPAN, B., EXALL, K., MARSALEK, J., ROCHFORD, Q., KYDD, S., BAKER, M. & STEPHENS, R. 2012. Variability of settling characteristics of solids in dry and wet weather flows in combined sewers: implications for CSO treatment. *Water, Air & Soil Pollution*, 223, 3021-3032.

- KRISHNAPPAN, B. G., MARSALEK, J., EXALL, K., STEPHENS, R. P., ROCHFORD, Q. & SETO, P. 2004. A water elutriation apparatus for measuring settling velocity distribution of suspended solids in combined sewer overflows. *Water Quality Research Journal of Canada*, 39, 432-438.
- KULCHAWIK, R. J. 2012. Critical grit removal design considerations for retrofits and additions at existing facilities. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2012, September 29 - October 3 2012, New Orleans, LA, USA. 588-610.
- LI, Y., LAU, S.-L., KAYHANIAN, M. & STENSTROM, M. K. 2005. Particle size distribution in highway runoff. *Journal of Environmental Engineering*, 131, 1267-1276.
- LUCAS-AIGUIER, E., CHEBBO, G., BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L., GAGNE, B. & HEDGES, P. 1997. Analysis of the methods for determining the settling characteristics of sewage and stormwater solids. Proceedings of the 2nd IAWQ International Conference on the Sewer as a Physical, Chemical and Biological Reactor, May 25-28, 1997, Aalborg, Denmark. 53-60.
- MARSALEK, J., KRISHNAPPAN, B., EXALL, K., ROCHFORD, Q. & STEPHENS, R. 2006. An elutriation apparatus for assessing settleability of combined sewer overflows (CSOs). *Water Science & Technology*, 54, 223-230.
- MARUÉJOULS, T., VANROLLEGHEM, P. A., PELLETIER, G. & LESSARD, P. 2013. Characterisation of retention tank water quality: Particle settling velocity distribution and retention time. *Water Quality Research Journal of Canada*, 48, 321-332.
- MCGAUHEY, P. 1956. Theory of sedimentation. *Journal American Water Works Association*, 48, 437-448.
- MCNAMARA, B., SHERONY, M. & HERRICK, P. 2014. Relative performance of grit removal systems. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2014, September 27 - October 1 2014, New Orleans, LA, USA. 4919-4929.
- MCNAMARA, B. F., GRIFFITHS, J. & BOOK, D. 2009a. True grit. A grit removal efficiency investigation at five wastewater treatment plants. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2009, October 10-14 2009a, Orlando, FL, USA. 6160-6169.
- MCNAMARA, B. F., KOCHABA, T., GRIFFITHS, J. & BOOK, D. 2009b. Grit vs. grit. A pilot evaluation comparing two grit removal technologies. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2009, October 10-14 2009b, Orlando, FL, USA. 784-793.
- MIHELICIC, J. R. & ZIMMERMAN, J. B. 2009. *Environmental Engineering: Fundamentals, Sustainability, Design*, Wiley, New York, USA. pp. 695
- O'CONNOR, T. P. 2002. *Testing Solids-settling Apparatuses for Design and Operation of Wet-weather Flow Solids/liquid Separation Processes*, US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Washington, DC, USA. pp. 160
- OSEI, K., MODY, A. & ANDOH, R. 2010. Field Assessment of Grit Removal Systems. World environmental and Water Resources Congress, Providence, RI, USA. 12-16.
- PALGRAVE, R. 2003. *Troubleshooting Centrifugal Pumps and Their Systems*, Elsevier Science Ltd, New York, USA. pp. 384
- PITMAN, A. 1999. Management of biological nutrient removal plant sludges—Change the paradigms? *Water Research*, 33, 1141-1146.
- QASIM, S. R. 1998. *Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation*, CRC Press, New York, USA. pp. 1128
- REDDY, M. P. & PAGILLA, K. 2010. *Integrated Methods for Wastewater Treatment Plant Upgrading and Optimization*, Alexandria, VA, USA. pp. 314
- RIFE, J. C. & BOTERO, L. 2012. Last of the neglected treatment processes: Rewriting the manual of practice No. 8 Section on grit removal. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2012, September 29 - October 3 2012, New Orleans, LA, USA. 581-587.
- SAMELA, D. & DEMICCO, F. J. 2005. The Voraxial® grit separator a new technology for the 21st century. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2005, October 29 - November 2 2005, Washington, DC, USA. 335-349.

- SANSALONE, J., LIN, H. & YING, G. 2009. Experimental and field studies of type I settling for particulate matter transported by urban runoff. *Journal of Environmental Engineering*, 135, 953-963.
- SAWICKI, J. M. 2004. Aerated grit chambers hydraulic design equation. *Journal of Environmental Engineering*, 130, 1050-1058.
- SELBIG, W. R. 2015. Characterizing the distribution of particles in urban stormwater: Advancements through improved sampling technology. *Urban Water Journal*, 12, 111-119.
- SHERONY, H. 2011. A fresh look at an old problem. Design criteria for effective grit removal. *New England Water Environment Association Journal*, Spring.
- SOBER, J., KRAMER, S., RAY, J. & COLE, B. 2012. A side by side comparison of grit removal technologies: Mechanically induced vortex vs. stacked tray. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2012, September 29 - October 3 2012, New Orleans, LA, USA. 576-580.
- STEPHENSON, J., GALL, B., MROCZEK, C., NEWBIGGING, M. & PARKER, J. 2002. Assessment of technologies for screening, floatable control and screenings handling. *Water Intelligence Online*, 1, 320.
- STOKES, G. G. 1850. *On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums*, Pitt Press, Cambridge, UK. pp. 86
- TCHOBANOGLIOUS, G., BURTON, F. L., STENSEL, H. D. & EDDY, M. 2003. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*, McGraw-Hill, New York, USA. pp. 1819
- TORRES, A., HASLER, M. & BERTRAND-KRAJEWSKI, J. 2007. Hétérogénéité spatiale et événementielle des vitesses de chute des sédiments décantés dans un bassin de retenue d'eau pluviale. *Techniques Sciences Methodes-Genie Urbain Genie Rural*, 27-34.
- VALLET, B., MUSCHALLA, D., LESSARD, P. & VANROLLEGHEM, P. 2014. A new dynamic water quality model for stormwater basins as a tool for urban runoff management: Concept and validation. *Urban Water Journal*, 11, 211-220.
- VERBANCK, M. A., ASHLEY, R. M. & BACHOC, A. 1994. International workshop on origin, occurrence and behaviour of sediments in sewer systems: Summary of conclusions. *Water Research*, 28, 187-194.
- WEF 2009. *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants MOP 8, Fifth Edition*, McGraw-hill, Alexandria, VA, USA. pp. 3034
- WEF 2016. *Guidelines for Grit Sampling and Characterization*, Water Environment Federation, Alexandria, VA, USA. pp. 125
- WHITE, F. M. 2011. *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, New York, USA. pp. 862
- WILSON, G., TCHOBANOGLIOUS, G. & GRIFFITHS, J. 2007. *The Grit Book. Understanding Wastewater Grit*, Eutek Systems Inc., Hillsboro, OR, USA. pp. 98

## **ANNEXE A : Protocole ViCAs**



## Protocole ViCAs

|                                |                                    |
|--------------------------------|------------------------------------|
| NOM DE L'APPAREIL              | ViCAs                              |
| MODÈLE                         | Standard                           |
| N° DE SÉRIE                    | RV1 / RV2 / RV3 / V1 / V2 / V3     |
| PRÉCISION ET REPRODUCTIBILITÉ  | -                                  |
| DATE DE MISE EN FONCTIONNEMENT | Été 2008                           |
| DISTRIBUTION                   | -                                  |
| SITWEB                         | -                                  |
| PROFESSEUR RESPONSABLE         | Paul Lessard et Peter Vanrolleghem |

|                           | RÉALISATION             | RÉVISION                       | APPROBATION |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------|
| <b>NOM</b>                | Bastien Wipliez         | Jessy Carpentier               |             |
| <b>FONCTION</b>           | Étudiant en génie civil | Étudiant à la maîtrise         |             |
| <b>DATE</b>               | 01-09-10                | 04-04-17                       |             |
| <b>SIGNATURE</b>          |                         |                                |             |
| GESTION DES MODIFICATIONS |                         |                                |             |
| RÉVISION                  | DATE                    | DESCRIPTION DE LA MODIFICATION |             |
| 01                        | 01-09-10                | Émission du SOP                |             |
|                           |                         |                                |             |
|                           |                         |                                |             |

# Table des matières

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 1.  | Introduction .....                        | 105 |
| 2.  | Domaine d'application .....               | 106 |
| 3.  | Principe et théorie .....                 | 106 |
| 4.  | Spécifications .....                      | 109 |
| 5.  | Prélèvement et conservation.....          | 110 |
| 6.  | Appareillage .....                        | 110 |
| 7.  | Protocole analytique.....                 | 111 |
| 8.  | Calculs et expression des résultats ..... | 116 |
| 9.  | Fiabilité .....                           | 120 |
| 10. | Références .....                          | 121 |
| 11. | Annexes.....                              | 122 |



## 1. Introduction

Les campagnes de mesure effectuées depuis le début des années 1970 sur les rejets urbains de temps de pluie ont clairement montré que de nombreux polluants se trouvaient en majorité sous forme particulaire. Les particules transportées en suspension sont également apparues comme facilement décantables, en dépit de leur granulométrie relativement fine (de 30 à 40  $\mu\text{m}$ ). Afin de mieux caractériser ces rejets et de pouvoir dimensionner les ouvrages de traitement par décantation, la connaissance de la distribution des particules en suspension par classes de vitesse de chute constitue un élément essentiel.

Du fait de la complexité des phénomènes en jeu et de la variété des densités, formes et dimensions des particules en suspension dans les effluents urbains, il est déconseillé d'évaluer la vitesse de chute de ces particules à partir de la seule donnée granulométrique ou des caractéristiques du bassin versant. La mesure directe des distributions de vitesses de chute sur des échantillons représentatifs du site étudié est donc nécessaire. Cette mesure peut être effectuée au moyen du protocole ViCAs, développé par Chebbo et Gromaire (2003).

Le ViCAs est un essai qui permet de mesurer les vitesses de chute de particules dans une colonne en condition statique. Il permet de donner un aperçu du comportement de particules au sein d'une eau, ainsi que d'avoir une idée sur leur composition.

L'acronyme ViCAs signifie Vitesse de Chute en Assainissement.

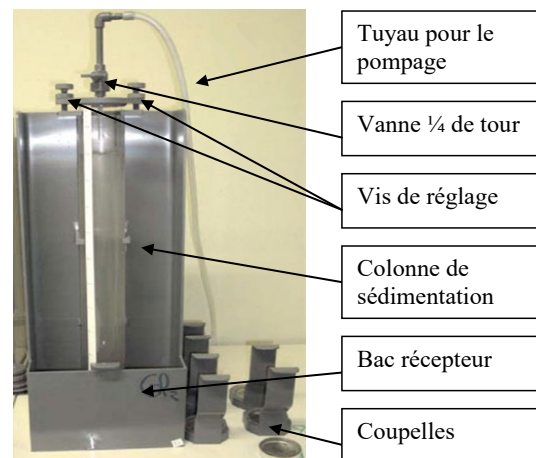


Figure 1 : Matériel pour l'essai

## 2. Domaine d'application

L'essai est réalisé sur tous types d'eaux possédant des sédiments en suspension : eaux usées sanitaires, pluviales, industrielles...

## 3. Principe et théorie

### 3.1 Principe général

Le protocole ViCAs est fondé sur le principe de la suspension homogène (Figure 2).

Au début de la mesure, les solides sont répartis uniformément sur toute la hauteur de sédimentation. Ensuite, les particules sont supposées décanter de manière indépendante les unes des autres, sans former d'agrégats et sans diffusion.

Les solides ayant décanté pendant un intervalle de temps prédéfini sont récupérés dans le fond de la colonne de sédimentation.

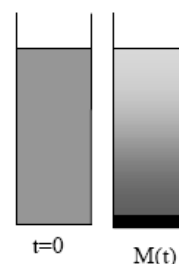


Figure 2 : Principe de la suspension homogène

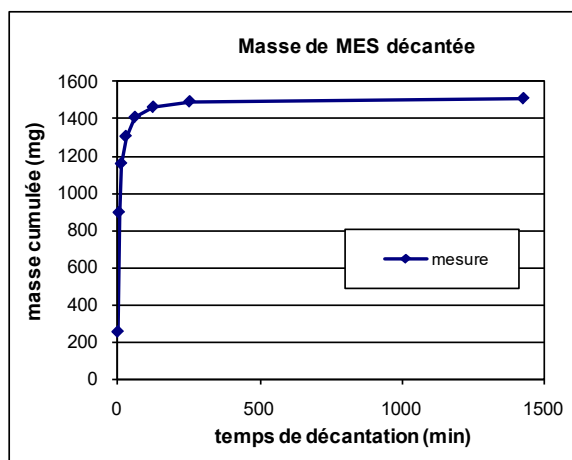


Figure 49 : Courbe de la masse cumulée des solides ayant décantés en fonction du temps

Leur masse ainsi récupérée est pesée, ce qui permet de déterminer l'évolution de la masse cumulée  $M(t)$  du dépôt en fonction du temps  $t$  (Figure 3).

Dans la pratique, la courbe de la masse cumulée des solides ayant décanté est constituée de  $n$  points, avec  $n$  compris entre 7 et 12, correspondant aux  $n$  prélèvements effectués après différentes durées de décantation.

Les particules étant initialement distribuées de façon homogène sur toute la hauteur de la colonne, elles ne chutent pas toutes sur une même distance. De ce fait,  $M(t)$  ne correspond pas à une catégorie des particules homogènes.

## 3.2 Théorie

### 3.2.1 Introduction

Une analyse théorique (Chebbo, 1992; Chancelier et al., 1998) montre que la courbe  $M(t)$  peut s'écrire :

$$M(t) = S(t) + t \frac{dM(t)}{dt} \quad (\text{eq. 1})$$

Avec :

- $M(t)$  : masse cumulée de particules décantées au pied de la colonne entre  $t=0$  et  $t$ ,
- $S(t)$  : masse de particules décantées entre  $t=0$  et  $t$  ayant une vitesse de chute supérieure à  $H/t$ , où  $H$  est la hauteur d'eau dans la colonne,
- $t \frac{dM(t)}{dt}$  : masse de particules décantées au temps  $t$  avec une vitesse de chute inférieure à  $H/t$  (et donc situées initialement à une distance  $d$ , au plan de mesure inférieure à  $H$ ), où  $H$  est la hauteur de décantation maximale (hauteur d'eau dans la colonne).

### 3.2.2 Objectifs

Il faut déterminer la courbe  $S(t)$  et la transformer en courbe  $F(V_s)$ , indiquant le pourcentage cumulé  $F$  (en %) de la masse totale de particules ayant une vitesse de chute inférieure à  $V_s$  (en m/h). Il faut ajuster numériquement les valeurs mesurées  $M(t_i)$  selon une fonction continue  $M(t)$ , puis résoudre analytiquement l'équation 1.

La fonction  $M(t)$  doit vérifier les critères suivants :

- Masse décantée nulle à  $t=0$ , c'est à dire  $M(t=0) = 0$  ou  $\lim M(t) = 0$  quand  $t$  tend vers 0
- Masse décantée croissante en fonction du temps,  $dM(t)/dt > 0$
- Pente de la courbe décroissante en fonction du temps,  $d^2M(t)/dt^2 < 0$
- Nombre de paramètres d'ajustement inférieur ou égal à 4 pour conserver des expressions simples et permettre un ajustement satisfaisant même avec un nombre limité de points  $M(t_i)$ .

### 3.2.3 Résolution

Le principe de la méthode a initialement été introduit par Saint Pierre et al. (1995), avec l'utilisation d'une fonction  $M(t)$  obtenue par régression logarithmique. Cependant la

fonction logarithmique ne permettait pas un ajustement suffisamment précis des valeurs mesurées  $M(t_i)$ . Cette méthode, et en particulier le choix de la fonction  $M(t)$ , ont par la suite été développés par Bertrand-Krajewski (2001). Après avoir testé plusieurs dizaines d'expressions mathématiques pour la courbe  $M(t)$ , Bertrand-Krajewski (2001) a retenu l'expression suivante :

$$M(t) = \frac{b}{1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d} \quad (\text{eq. 2})$$

Avec  $b$ ,  $c$  et  $d$  trois paramètres numériques tels que  $b > 0$ ,  $c > 0$  et  $d \in ]0,1[$ .

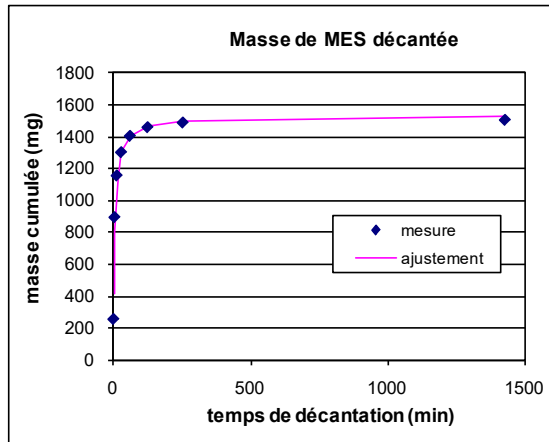


Figure 50 : Exemple d'ajustement de  $M(t)$

Un exemple de la courbe ajustée obtenue est donné sur la figure 4.

Les paramètres  $b$ ,  $c$  et  $d$  sont déterminés par la méthode des moindres carrés, au moyen du solveur Excel.

On obtient  $S(t)$  :

$$S(t) = M(t) - t \frac{dM(t)}{dt} = \frac{b \left(1 + (1-d) \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d\right)^2} \quad (\text{eq. 3})$$

D'où :

$$F(V_s) = 100 \left(1 - \frac{S(t)}{M_{dec} + M_{fin}}\right) \text{ où } V_s = \frac{H}{t} \quad (\text{eq. 4})$$

### 3.2.4 Résultat final

Les résultats de mesure des distributions de vitesse de chute sont présentés conformément aux recommandations du groupe de travail sur les solides en réseau d'assainissement du IWA/IAHR Joint Committee on Urban Drainage (Hedges et Chebbo, 1995). La vitesse de chute, notée  $V_s$  (settling velocity) est exprimée en m/h et est positive pour les vitesses orientées vers le bas (sens de la chute des particules).

Les résultats de mesure sont représentés par une « Courbe de distribution des vitesses de chute »  $F(V_s)$  où :

- Les vitesses de chute  $V_s$  en m/h sont en abscisse sur une échelle logarithmique de base 10 croissante vers la droite.
- Le pourcentage en masse cumulée  $F$  des particules ayant une vitesse de chute  $V_s$  inférieure à une valeur donnée est en ordonnée sur une échelle linéaire de 0 à 100 %.

La Figure 5 donne un exemple de courbe  $F(V_s)$  correspondant à ces recommandations.

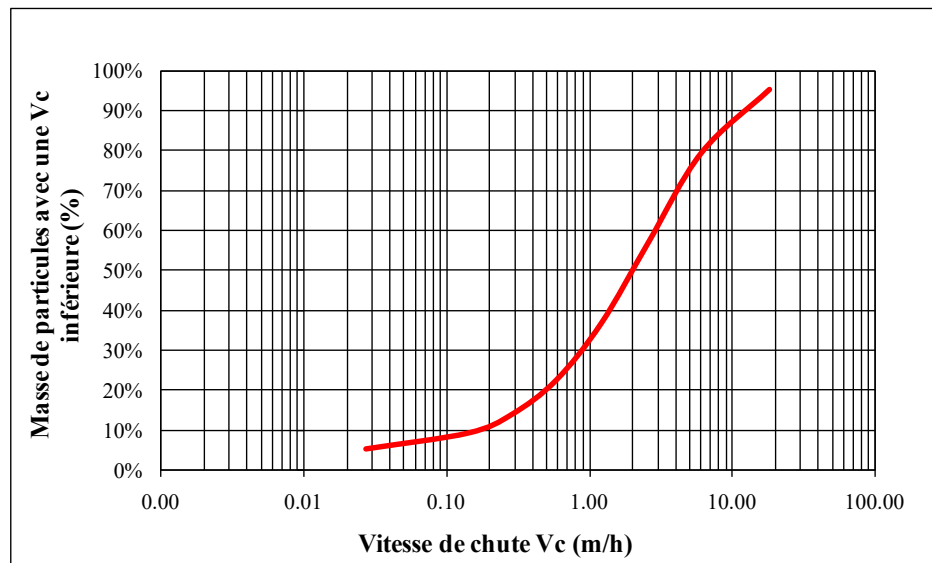


Figure 51 : Exemple de courbe de distribution des vitesses de chute  $F(V_s)$

## 4. Spécifications

- Il est indispensable que toutes les dates de prélèvement, de fractionnement et d'analyse des MES et MVS soient enregistrées dans la feuille d'analyse. Ces données sont fondamentales pour juger de la qualité des mesures réalisées : les caractéristiques des MES évoluent avec le temps. Lorsque les délais sont trop importants (>24h) l'influence de cette évolution sur les résultats de la mesure des vitesses de chute rend difficile les comparaisons et les interprétations ultérieures.

- Il faut diluer l'échantillon si la concentration initiale est supérieure à 1000mg/L. Pour réaliser la dilution, il faut séparer l'échantillon lors du prélèvement, de façon à avoir 5 litres

d'un côté, et 15 litres de l'autre. Il faut ensuite en récolter 5 litres de surnageant, après 24h de décantation, et s'en servir pour réaliser la dilution.

## 5. Prélèvement et conservation

- L'essai peut être réalisé à partir d'un échantillon composite de plusieurs échantillons similaires (exemple : récolte de 5 bouteilles de 1 litre sur 10 minutes).
- Lors du prélèvement, retirer les matières en suspension qui pourrait fausser l'essai et, au besoin, filtrer l'échantillon directement.
- L'échantillon doit être stocké à 4°C pendant la conservation avant la réalisation de l'essai.
- Les analyses doivent être faites dans les 24h maximum suivant le prélèvement, pour éviter des phénomènes de floculation.

## 6. Appareillage

### 6.1 Matériel ViCAs

- 1 colonne ViCAs avec son support et ses 2 coupelles associées
- 1 élastique (maintien de la colonne en place),
- 1 chronomètre (mesure des pas de temps),
- 1 feuille ViCAs (inscription des informations)

La figure 6 montre le matériel ViCAs en place.



Figure 52 : Matériel d'essai ViCAs

## 6.2 Matériel pour le remplissage de la colonne

- 1 bécher de 5 litres
- 1 spatule (homogénéisation)
- 1 pompe à huile
- 1 tuyau de raccordement
- 1 erlenmeyer de filtration de 1000 ml (protection de la pompe),



Figure 53 : Matériel ViCAs avec système de remplissage

La figure 7 montre le matériel ViCAs avec le système de remplissage en place.

## 6.3 Matériel de mesure de MES/MVS

Se reporter au SOP-005 pour la présentation du matériel à utiliser pour la mesure de MES et MVS.

# 7. Protocole analytique

## 7.1 Description générale

L'échantillon à analyser est versé dans un bac de réception et aspiré par dépression à l'intérieur d'une colonne. Celle-ci est ensuite maintenue sous vide pendant toute la durée de l'essai. Les particules décantées pendant les périodes de temps  $\Delta t$  sont recueillies dans des coupelles placées sous la colonne et de même diamètre que celle-ci. Les coupelles, préalablement remplies d'eau potable, sont immergées dans la cannelure du bac de mélange et positionnées alors à tour de rôle sous la colonne. A la fin d'une certaine période, le contenu des coupelles est filtré pour ensuite réaliser des mesures de MES et de MVS sur les solides récupérés.

## 7.2 Préparation préalable

- Vérifier le positionnement de la colonne
  - Bas de la colonne au dessus de la cannelure du bac récepteur
  - Espace suffisant pour permettre la libre circulation des coupelles dans le bac récepteur.
  - Réglage de la hauteur et de la verticalité à l'aide des 2 vis de réglage en haut de la colonne et d'un niveau à bulle.

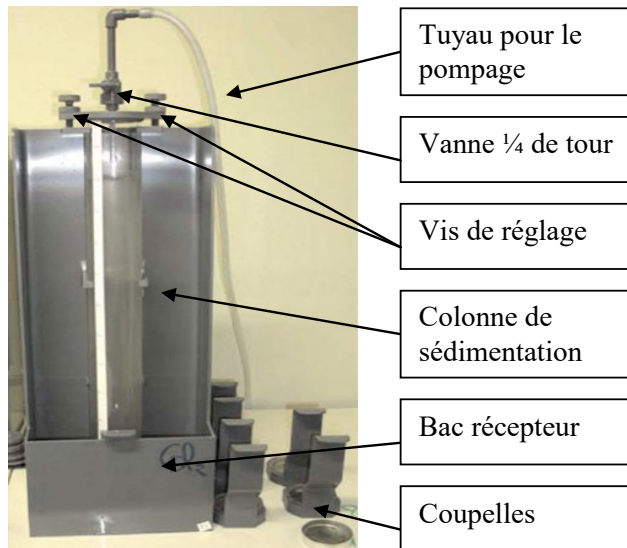


Figure 54 : Présentation du matériel VICAs

- Préparer les portes-coupelles
  - Placer une coupelle dans le bac récepteur,
  - Remplir l'autre coupelle d'eau potable, il servira à effectuer le changement de coupelle plus rapidement puisque le premier pas de temps est très rapproché.
- Préparation de l'échantillon
  - Homogénéiser l'échantillon à l'aide de la spatule et récolter 5 litres dans le béccher approprié.
  - Homogénéiser de nouveau et prélever 1 échantillon de 500 mL qui servira à déterminer la concentration initiale en MES dans la colonne.
- Préparation de la feuille d'essai
  - Noter les informations nécessaire sur la feuille d'essai, elles sont indispensables pour l'analyse ultérieure.

## 7.3 Remplissage de la colonne

Remarques :

- La phase de remplissage nécessite un peu d'entraînement car elle est très rapide.
- Pour une meilleure réussite de l'essai, il est préférable d'être 2 personnes pour réaliser cette étape.
- Un volume d'échantillon insuffisant où une fermeture trop tardive de la vanne  $\frac{1}{4}$  de tour conduira à l'aspiration d'air dans la colonne (remous, retour d'eau vers la pompe). Le remplissage devra alors être recommencé.
- A noter que la mise en place d'un dispositif de protection de type flacon de Woulff est indispensable.



Figure 55 : Versement de l'échantillon



Figure 56 : Fermeture de la vanne  $\frac{1}{4}$  de tour

Ainsi :

- Homogénéiser l'échantillon de 4.5 litres avant de le verser rapidement dans le bac récepteur.
- Aspirer le liquide dans la colonne (2 à 5 secondes) puis fermer la vanne  $\frac{1}{4}$  de tour.
- Arrêter la pompe

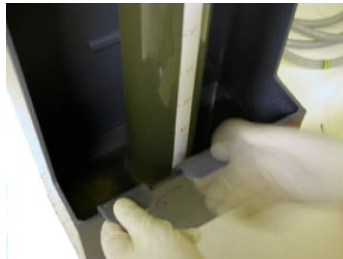
## 7.4 Démarrage de la décantation

- Mettre en place immédiatement après fermeture de la vanne  $\frac{1}{4}$  de tour la première coupelle : placer doucement la coupelle dans le bac récepteur, puis la faire glisser jusqu'à sous le pied de la colonne.
- Démarrer le chronomètre puis débrancher le matériel de pompage.
- Mettre en place un ruban adhésif pour obtenir la hauteur d'eau finale dans la colonne à la fin de l'essai (il peut y avoir une variation de hauteur due aux changements de coupelles).

## 7.5 Changement des coupelles



**Figure 57 : Mise en place de la nouvelle coupelle**



**Figure 58 : Déplacement de l'ancienne coupelle**

- 10 secondes avant l'échéance, introduire doucement dans la cannelure une coupelle remplie d'eau.

- Faire glisser doucement ensuite les deux coupelles jusqu'à positionner la nouvelle sous la colonne et retirer l'ancienne coupelle.

- Utiliser le bécher de 1000 ml comme récipient de sécurité pour réaliser le déplacement de l'échantillon récolté dans la coupelle jusqu'au banc de filtration.

### Remarque :

- Le changement des coupelles s'effectue à 2 min, 6 min, 14 min, 30 min, 1h02, 2h06, 4h14 et > 22h pour un total de 8 coupelles.

- L'étape est délicate car il ne faut pas perdre le contenu et il faut limiter au maximum les turbulences liées au mouvement des coupelles dans le bas de la colonne.

- Si le changement de coupelle n'a pas été fait exactement au temps prédéterminé, noter l'instant exact de remplacement de la coupelle.

## 7.6 Détermination de la concentration finale

La concentration finale dans la colonne correspond à récolter le volume total de la colonne pour en analyser le contenu. Cette étape permet d'assurer la validité de l'essai en comparant la concentration initiale avec les masses récoltées dans les coupelles.



**Figure 59 : Bouchage de la colonne**

- Une fois le dernier prélèvement réalisé, boucher l'extrémité de la colonne à l'aide d'un bouchon.



**Figure 60 : Prélèvement de la colonne**



**Figure 61 : Déversement de la colonne**

- Retirer la colonne de son support et verser le contenu de la colonne dans le pichet de 5 L.
- Homogénéiser et prélever un échantillon de 500 mL, qui servira à déterminer la concentration finale.

## **7.7 Analyse en MES et MVES**

Se reporter au SOP-005 pour l'analyse des MES et MVS des concentrations initiales et finales et des échantillons récoltés dans les coupelles.

## 8. Calculs et expression des résultats

### 8.1 Vérification du bilan de masse

Un calcul de bilan de masse est effectué afin d'estimer les pertes (ou les gains) de solides au cours de la manipulation et donc d'évaluer la qualité de la mesure.

Soit :

- $C_{ini}$  (mg/l) la concentration initiale de l'échantillon,
- $C_{fin}$  (mg/l) la concentration finale,
- $m_i$  (mg) la masse de solide récupérée dans la coupelle  $i$  entre les temps  $t_{i-1}$  et  $t_i$ ,
- $H$  (cm) la hauteur d'eau dans la colonne et,
- $R$  (cm) le rayon de la colonne.

D'où :

- Masse initiale  $M_{ini}$  (mg) :

$$M_{ini} = \frac{C_{ini}H\pi R^2}{1000} \quad (\text{eq. 5})$$

- Masse finale  $M_{fin}$  (mg) :

$$M_{fin} = \frac{C_{fin}H\pi R^2}{1000} \quad (\text{eq. 6})$$

- Masse décantée cumulée  $M_{dec}$  (mg) :

$$M_{dec} = \sum_i m_i \quad (\text{eq. 7})$$

- Pourcentage d'erreur  $E$  (%) sur le bilan de masse :

$$E = \frac{M_{ini} - (M_{dec} + M_{fin})}{M_{ini}} \quad (\text{eq. 8})$$



## 8.2.2 Calcul de la distribution des vitesses de chute

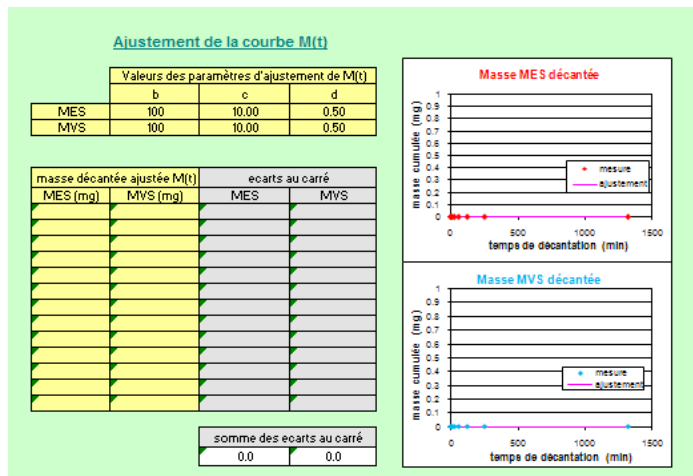


Figure 63 : Ajustement de la courbe M(t)

La figure 17 indique l'espace alloué sur la feuille Excel pour réaliser l'ajustement de la courbe conformément aux calculs précédents.

Les valeurs des paramètres d'ajustement entrées (b, c, d) sont des valeurs par défaut. Les cases à modifier sont les 2 cases blanches à l'aide du solveur Excel

Les paramètres b, c et d sont ajustés à l'aide du solveur de façon à minimiser la somme des écarts au carré, en respectant les contraintes suivantes :  $b \leq M_0$ ,  $b > 0$ ,  $c > 0$ ,  $d < 1$  et  $d > 0$ .

Aussi, la valeur  $M_0$  de la contrainte  $b \leq M_0$  (masse initiale dans la colonne) est à modifier selon : MES (cellule I14), MVS (cellule J14)

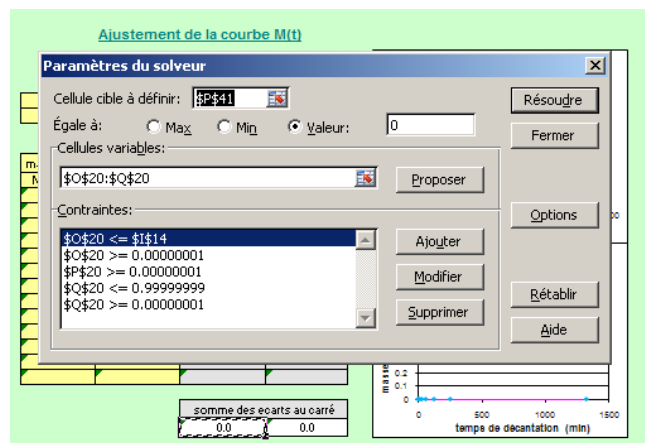


Figure 64 : Résolution avec le solveur Excel

De même, les contraintes b, c et d pour les MES appartiennent aux cellules O20, P20 et Q20. Pour les MVS, les contraintes appartiennent aux cellules O21, P21 et Q21.

Il est important finalement de vérifier que les « cellules variables » du solveur sont bien les cellules correspondantes soit aux MES soit aux MVS.

Ainsi, après avoir cliqué sur « résoudre », cliquer sur « ok » pour « garder la solution du solveur » et observer les courbes obtenues.

Deux graphiques (MES en rouge, MVS en bleu) permettent de visualiser, en fonction du temps de décantation, les masses décantées cumulées M(t) issues de la mesure (points

bleus et rouges) et la fonction M(t) ajustée (courbe rose). Il est bon de vérifier ces courbes d'ajustement.

### 8.2.3 Résultat final

Une fois l'étape d'ajustement terminée, la représentation graphique de la courbe F(V), donnant le pourcentage en masse des particules ayant une vitesse de chute inférieure à V est donnée pour les MES et les MVS à côté du tableau de résultats.

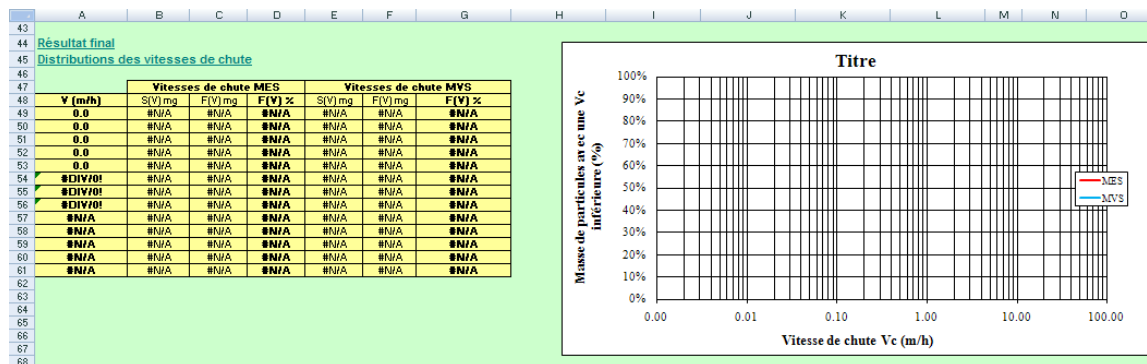


Figure 65 : Résultat final du calcul sous Excel

A noter que les calculs s'effectuent automatiquement, selon les formules théoriques discutées précédemment.

## 9. Fiabilité

### 9.1 Manipulation

Une manipulation soigneuse permet d'atteindre des erreurs sur le bilan de masse inférieures à 10%. Une erreur supérieure à 15% rend la mesure non valide.

### 9.2 Reproductibilité

Des tests de reproductibilité ont été réalisés pour pouvoir confirmer les résultats obtenus pour un seul essai ViCAs. Cependant, malgré certains duplicata réussis, certains ne le sont pas. L'étude du manuel de l'essai ViCAs et de rapports (Berrouard, 2010, Bousquet, 2009, Vaudevire, 2009) faisant état de l'interprétation du protocole et du manuel permettent de dire que la réussite de l'essai est dépendante de la méticulosité de la personne à respecter le protocole et à manipuler le matériel. L'importance est surtout mise sur les étapes de changement de coupelles sous la colonne et de filtration des masses récupérées. La figure 20 montre les résultats d'un test de reproductibilité effectué sur une eau usée de temps sec récoltée à la station d'épuration Est de la ville de Québec, après le dégrilleur.

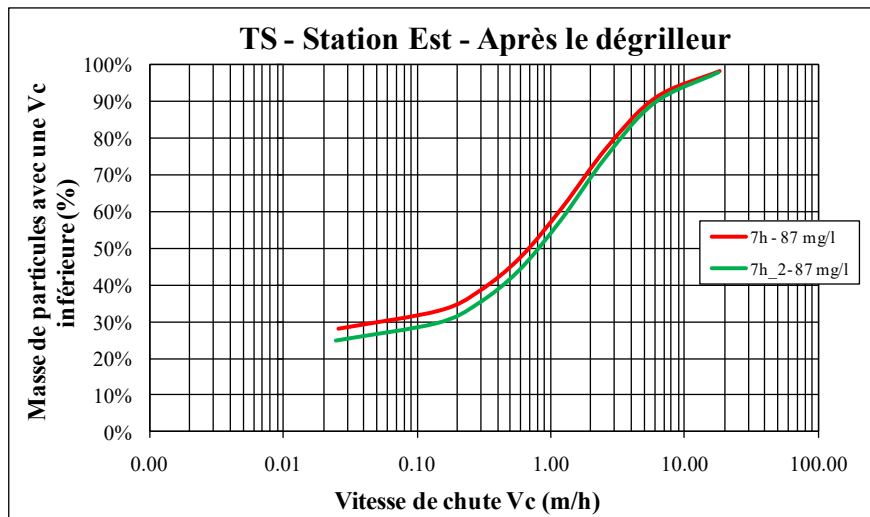


Figure 66 : Test de reproductibilité ViCAs

Ainsi, la réalisation d'un duplicata est dépendante du choix de la personne qui réalise l'essai et la réussite de l'essai est dépendante de sa méticulosité à respecter le protocole.

## 10. Références

Ces documents se trouvent sur le disque partagé modelEAU et dans le tiroir 42-A du laboratoire d'environnement (PLT 1970).

**Berrouard E.**, *Caractérisation de la décantabilité des eaux pluviales*, Mémoire de maîtrise, 2010.

**Bousquet B.**, *Rapport de stage*, 2009.

**Clark et al.** (2009), *Peristaltic Pump Autosamplers for Solids Measurement in Stormwater Runoff*, *Water Environ Res.*, 81(2):192-200.

**Gromaire M.C., Chebbo G.**, *Mesure de la vitesse de chute des particules en suspension dans les effluents urbains - Protocole VICAS*, Manuel de l'utilisateur, CERREVE, École nationale des ponts et chaussées, ENGREF, Paris XII, 35p.

**Gromaire M.C., Chebbo G.**, *Feuille Excel de calcul des vitesses de chute - Protocole VICAS*.

**Vaudevire E.**, *Rapport de stage*, 2009.

## **11. Annexes**

Annexe n°1 : Exemple d'essai ViCAs réalisé

Annexe n°2 : Exemple d'une feuille de données

Annexe n°3 : Essai de conservation

Annexe n°4 : Essai de comparaison d'un échantillon composite et non-composite



**Annexe n°2 : Exemple d'une feuille de données**

**Mesures prises en laboratoire - VICAS**

Informations sur l'échantillon

|                                |                |
|--------------------------------|----------------|
| Lieu de prélèvement :          |                |
| Date et heure de prélèvement : |                |
| Date et heure d'analyse :      |                |
| Conservation :                 |                |
| Préleveur :                    | Manipulateur : |
| Volume total :                 |                |

Informations sur la colonne

|                         |             |
|-------------------------|-------------|
| Numéro:                 |             |
| Hauteur de chute (cm) : | Variation : |

Concentration Initiale

| Essai | N° filtre | Volume (ml) | $m_0$ (mg) | $m_1$ (mg) | - |
|-------|-----------|-------------|------------|------------|---|
| 1     |           |             |            |            |   |
| 2     |           |             |            |            |   |
| 3     |           |             |            |            |   |

Concentration Finale

| Essai | N° filtre | Volume (ml) | $m_0$ (mg) | $m_1$ (mg) | - |
|-------|-----------|-------------|------------|------------|---|
| 1     |           |             |            |            |   |
| 2     |           |             |            |            |   |
| 3     |           |             |            |            |   |

Essai de décantation

| n° | $\Delta t$ | $\Sigma \Delta t$ | N° filtre | $m_0$ (mg) | $m_1$ (mg) |
|----|------------|-------------------|-----------|------------|------------|
| 1  | 2          | 2                 |           |            |            |
| 2  | 4          | 6                 |           |            |            |
| 3  | 8          | 14                |           |            |            |
| 4  | 16         | 30                |           |            |            |
| 5  | 32         | 62                |           |            |            |
| 6  | 64         | 126               |           |            |            |
| 7  | 128        | 254               |           |            |            |
| 8  |            |                   |           |            |            |

Remarque : \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### **Annexe n°3 : Essai de conservation**

Afin de constater l'importance du délai d'analyse sur la modification du comportement des particules des échantillons, un essai de conservation a été réalisé, à l'aide de l'essai ViCAs. Le protocole ViCAs précise qu'il faut réaliser l'essai avant 24h. Cependant, la concentration en MES et l'importance de la fraction organique jouent sur les phénomènes de floculation qui pourraient modifier les vitesses de sédimentation enregistrées.

Ainsi, un spécimen de 25 litres a été récupéré à l'entrée de la station d'épuration Est de la ville de Québec, après le dégrilleur, et fractionné en trois sous volumes. Cet échantillon a été récolté en temps sec, à 7h, le mardi 15 juin 2010. Le premier essai a été réalisé dès l'arrivée au laboratoire, soit environ 45 minutes après l'échantillonnage. Ce premier essai a été réalisé en duplicata pour permettre d'obtenir une confirmation de la valeur au temps  $t = 0$ , mais aussi pour avoir une confirmation de l'allure de la courbe. Le second essai a débuté après 10 h d'attente et le troisième essai a débuté après 24 h d'attente. Pendant la période d'attente, les 2 sous volumes ont été stockés au réfrigérateur à 4°C. Le but étant de prouver l'influence du temps de conservation, il n'a pas été jugé utile de réaliser l'essai dans d'autres conditions (température ambiante, couvercle ouvert,...). En effet, l'intérêt de cet essai est avant tout d'assurer la conformité des résultats pour des échantillons analysés après une nuit de stockage au frais par exemple. Il est bon de noter aussi qu'avant chaque essai, l'échantillon a été remélangé délicatement pour remettre les particules en suspension, en essayant de ne pas casser les éventuels floccs formés. La figure 21 ci-dessous montre les résultats obtenus.

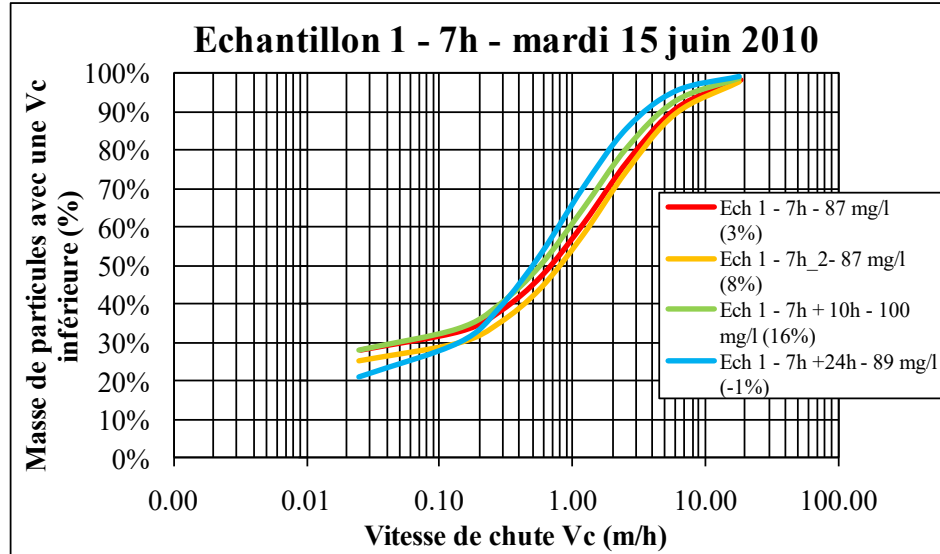


Figure 67 : Essai de conservation ViCAs – Échantillon 1

Il est possible de voir que l'effet du temps d'attente est peu notable pour un échantillon de ce type et donc qu'il est possible de stocker un échantillon jusqu'à 24h sans observer une grande différence. Cependant, il faut prendre en considération que l'échantillon analysé est peu chargé (87 mg/L de MES) et a peut-être moins laissé place à de l'éventuelle floculation.

Aussi, afin de pouvoir confirmer cette analyse, un autre échantillonnage a été réalisé, le mardi 6 juillet 2010 à 7h, dans des conditions quasiment similaires. En effet, le premier échantillon a été pris en temps sec tandis que le deuxième en temps d'infiltration (lendemain d'une pluie). La figure 22 montre les résultats obtenus pour le 2ème échantillonnage.

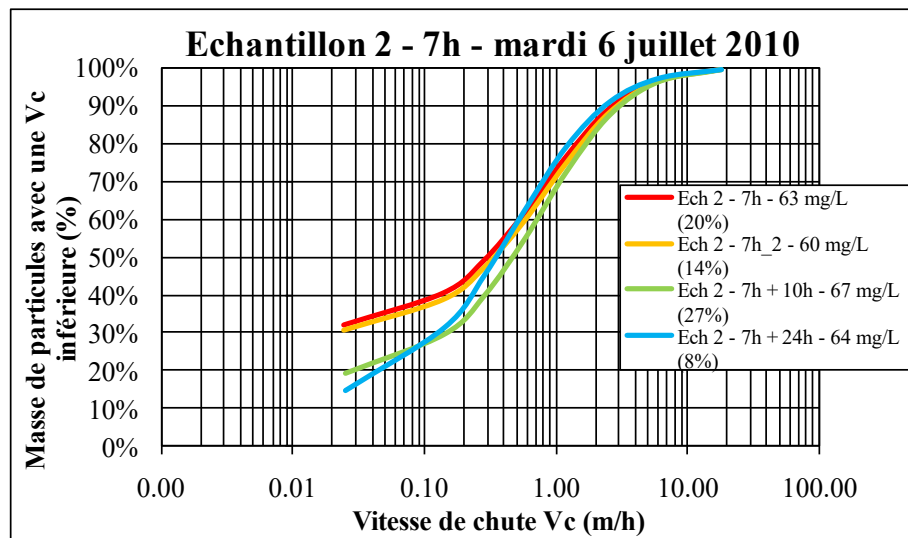


Figure 68 : Essai de conservation ViCAs – Échantillon 2

Il est possible de voir que l'effet du temps d'attente est le même que pour le 1<sup>er</sup> échantillon, cependant, la concentration étant similairement faible, il serait judicieux de réaliser un autre test de conservation avec un échantillon plus chargé pour peut-être observer une différence.

La comparaison des 2 échantillons est présentée sur la figure 23.

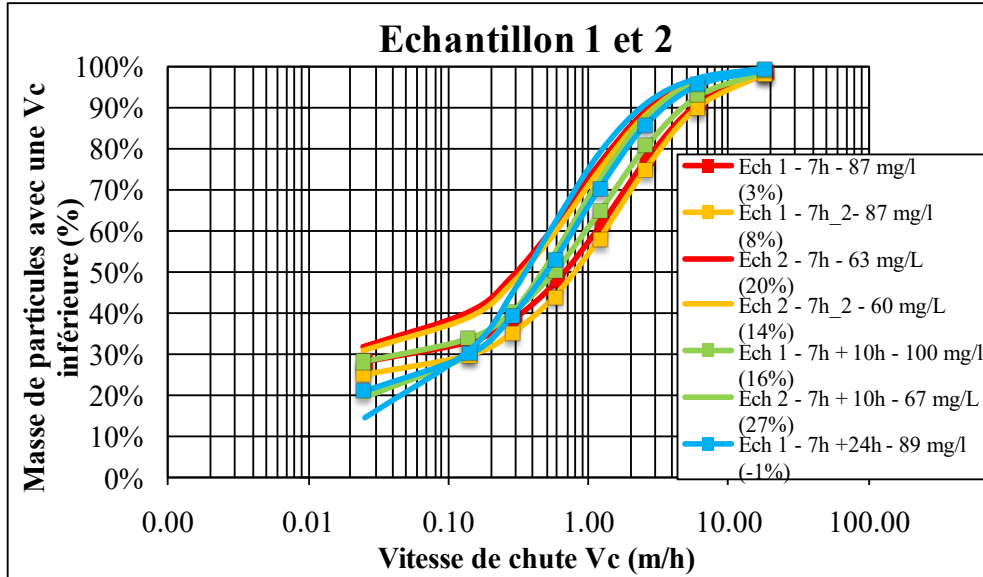


Figure 69 : Essai de conservation ViCAs – Échantillon 1 et 2

#### Annexe n°4 : Essai de comparaison d'un échantillon composite et non-composite

Les échantillonnages d'eaux usées sont aujourd'hui réalisés pour la plupart à l'aide d'échantillonneurs automatiques à pompes péristaltiques (Sigma 900,...) qui vont pomper un certain volume d'échantillon au travers d'un tuyau d'un certain diamètre. Une étude menée par Clark (2009) démontre que ce type d'échantillonnage limite la succion des particules jusqu'à une taille supérieure à 250  $\mu\text{m}$ . De plus, cette étude précise aussi que les grosseurs de particules aspirées diminuent selon la hauteur, à partir de 2.5m. Aussi, dans certains cas, il est possible que des échantillonnages manuels soient réalisés, qui sera appelé ici un échantillon « non-composite ».

Un autre point concerne le fait que la capacité des bouteilles de réception des eaux usées des échantillonneurs automatiques soient de volumes limités (souvent 1 litre), l'échantillonnage est donc fractionné sur plusieurs bouteilles. Or, dans certains cas, les essais réalisés sur des échantillons requièrent un volume de plus d'1 litre, il convient donc de réaliser un échantillon combiné de plusieurs bouteilles, qui sera appelé ici un échantillon « composite ».

L'essai ViCAs a été utilisé pour comparer la décantation des différentes particules pour des eaux usées unitaires, lors d'un débordement en temps de pluie. L'échantillon composite correspond à un volume de 10 litres prélevés manuellement

dans un contenant. L'échantillon non-composite correspond au mélange de 6 bouteilles d'environ 1 litre, échantillonnées sur un total de 10 minutes. La figure 24 montre les résultats obtenus.

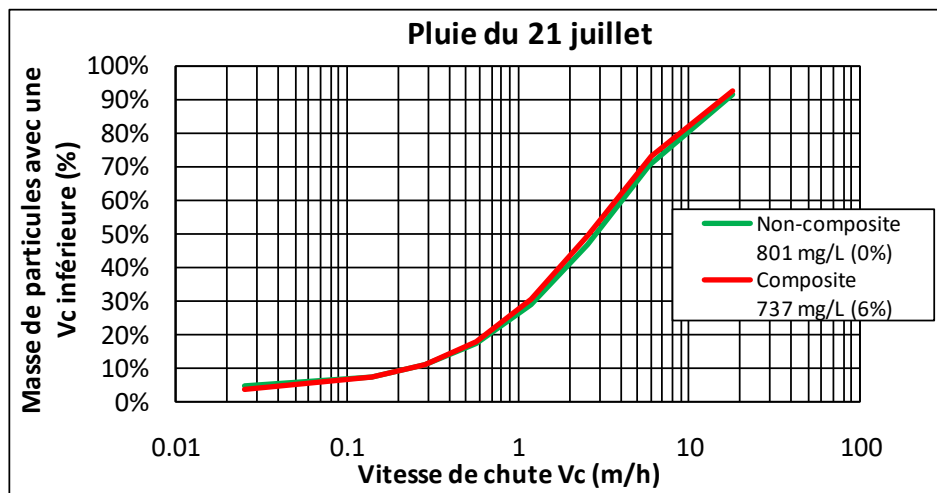


Figure 70 : Comparaison d'un échantillon composite et non-composite

Ainsi, il est possible de voir que les vitesses de chute des particules sont semblables entre un échantillon composite et non-composite.

## **ANNEXE B : Protocole d'élutriation**



## SOP – Élutriation

|                                 |                    |
|---------------------------------|--------------------|
| NOM DE L'APPAREIL               | <b>Élutriation</b> |
| MODEL                           |                    |
| N° SERIAL                       |                    |
| PRÉCISION ET REPRODUCTIBILITÉ   |                    |
| DATE DE POSTE EN FONCTIONNEMENT |                    |
| DISTRIBUTION                    |                    |
| WEBSITE                         |                    |
| PROFESSEUR RESPONSABLE          | Peter Vanrolleghem |

|                                  | <b>RÉALISATION</b>  | <b>RÉVISION</b>                       | <b>APPROBATION</b> |
|----------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------|
| <b>NOM</b>                       | Jessy Carpentier /<br>Françoise Tardif /<br>Philippe Morais | Queralt Plana                         | Peter Vanrolleghem |
| <b>FONCTION</b>                  | Étudiant à la maîtrise /<br>Auxiliaire de recherche         | Étudiante au doctorat                 | Professeur         |
| <b>DATE</b>                      | 08/08/2016  | 17/08/2016                            | 02/04/2017         |
| <b>SIGNATURE</b>                 |   |                                       |                    |
| <b>GESTION DES MODIFICATIONS</b> |   |                                       |                    |
| <b>RÉVISION</b>                  | <b>DATE</b>   | <b>DESCRIPTION DE LA MODIFICATION</b> |                    |
| 01                               |   | Édition du SOP                        |                    |
|                                  |   |                                       |                    |

# Table des matières

|   |     |
|---|-----|
| 1. Introduction.....                                      | 133 |
| 2. Domaine d'application .....                            | 133 |
| 3. Principe et théorie.....                               | 134 |
| 4. Fiabilité .....  | 134 |
| 5. Prélèvement et conservation .....                      | 135 |
| 6. Appareillage.....                                      | 135 |
| 6.1 Matériel.....   | 135 |
| 6.2 Équipement .....                                      | 137 |
| 7. Protocole analytique .....                             | 138 |
| 7.1 Conditions d'opération.....                           | 138 |
| 7.2 Mise en marche du système.....                        | 138 |
| 8. Calculs et expression des résultats .....              | 141 |
| 8.1 Saisie des résultats (feuille Excel) .....            | 141 |
| 8.2 Vérification du bilan de masse.....                   | 143 |
| 8.3 Calcul de la distribution des vitesses de chute ..... | 143 |
| 9. Références .....                                       | 146 |
| 10. ANNEXE.....   | 147 |
| 10.1 Effet de la conservation des échantillons.....       | 147 |
| 10.2 Effet de l'agitation .....                           | 148 |
| 10.3 Effet du volume d'échantillon initial.....           | 149 |

# 1. Introduction

Pour les unités de décantation tel que les dessableurs et les décanteurs primaires, il a été démontré que la vitesse de chute est d'intérêt pour la conception (Andoh et Smisson, 1996; McNamara et coll., 2014; Verbanck et coll., 1994). La vitesse de chute d'une particule est définie à l'aide de la densité, la forme, la taille de la particule et la viscosité du milieu (Doroodchi et coll., 2008; McGauhey, 1956; White, 2011). Dû à la variabilité des particules présentes dans les eaux usées, il est d'intérêt d'utiliser des appareils permettant d'évaluer la vitesse de chute sans avoir recours à ces informations sur les particules.

Pour la caractérisation des vitesses de chute, plusieurs protocoles utilisent le principe de sédimentation, utilisant la relation de Stokes et de la taille des particules (Gwinn et coll., 2013; O'Connor, 2002; Reddy et Pagilla, 2010). Toutefois, en estimant la vitesse de chute à partir de la taille des particules, les vitesses de chute sont souvent surestimées. Pour la caractérisation des eaux usées, certains protocoles ont été développés afin de caractériser la distribution des vitesses de chute des particules, et ce, indépendamment la taille des particules en utilisant des colonnes de sédimentations statiques, négligeant les interactions de particules.

L'élutriation est un système ayant été développé pour caractériser la vitesse de chute des particules des eaux de pluie et des eaux usées selon un régime d'écoulement dynamique. Il a été démontré que l'effet des turbulences, bien souvent négligé, peut avoir des effets considérables sur les vitesses de chute des particules (Doroodchi et coll., 2008). L'élutriation reproduit les interactions des particules sous l'effet des turbulences lors de la décantation des particules (Krishnappan et coll., 2004).

# 2. Domaine d'application

L'élutriation est un système ayant été développé pour caractériser la vitesse de chute des particules des eaux de ruissellement selon un régime d'écoulement dynamique. L'essai peut être réalisé sur tous types d'eaux possédant des sédiments en suspension. Le protocole a été

par la suite adapté pour la caractérisation des vitesses de chute des eaux usées des décanteurs primaires et des unités de dessablage.

### **3. Principe et théorie**

L'élutriation est un système fermé qui à l'aide d'une pompe fait passer à débit constant un échantillon d'eaux usées complètement mélangé à travers huit colonnes de diamètre croissant. Le diamètre intérieur des colonnes est respectivement de 25, 34, 49, 70, 105, 143, 197 et 197mm. À l'aide du débit de pompage et de l'aire d'écoulement de chacune des colonnes, il est possible de calculer la vitesse d'écoulement dans chacune des colonnes du système (Marsalek et coll., 2006). Afin d'assurer un régime turbulent, un débit de pompage minimal de 0,5 L/min est nécessaire (Krishnappan et coll., 2004). En ajustant le débit, il est possible de définir les vitesses de chute d'intérêt et de fractionner les particules de l'échantillon en classes de vitesses de chute pour chacune des colonnes (Hettler et coll., 2011).

Pour chacune des colonnes, les particules ayant une vitesse de chute supérieure à la vitesse d'écoulement ascendante s'accumulent à la base de la colonne et sont récupérées par filtration à la fin de l'expérience afin de réaliser un bilan de masse. Les particules sont donc réparties en différentes classes en fonction de leur vitesse de chute permettant de mesurer la distribution des vitesses de chute des particules. Aussi, les différentes classes peuvent donc être évaluées indépendamment afin de déterminer les caractéristiques des sédiments retenus, tel que la fraction organique et inorganique (Exall et coll., 2009).

### **4. Fiabilité**

L'essai d'élutriation a été développé principalement pour la caractérisation des eaux pluviales. Suite à 12 essais sur les eaux pluviales, une déviation standard de 10% et un bilan de masse de  $\pm 16\%$  ont été observés, ce qui est jugé acceptable par Marsalek et coll. (2006).

Afin d'observer des résultats acceptables, il est nécessaire de recueillir suffisamment de matières au bas de chacune des colonnes pour la filtration. Pour une même eau, plus le volume est grand plus de particules sont recueillies au bas de chacune des colonnes. Toutefois,

la quantité de matière au bas de la colonne est limitée, ce qui peut induire des erreurs si une trop grande quantité de matière au bas des colonnes est présente, nuisant à la décantation des particules.

## **5. Prélèvement et conservation**

Pour les eaux usées municipales, environs 20L d'eau est nécessaire pour obtenir une quantité de matière suffisante pour la filtration. Il est préférable de réaliser l'essai immédiatement après l'échantillonnage ou de le réfrigérer à 4°C afin de limiter les interactions entre les particules et la formation de floccs. Pour l'évaluation des « grits », il a été démontré que la réfrigération de l'échantillon pendant 24h n'influence pas les propriétés de l'échantillon et présente les mêmes résultats que si l'essai avait été réalisé le jour même. L'effet de la conservation de l'affluent et l'effluent d'un desableur est présenté en Annexe.

## **6. Appareillage**

### **6.1 Matériel**

L'équipement est dispendieux et fragile, il s'agit de colonnes en verre fait sur mesure et de longs cylindres à petit diamètre fait de verre. Le matériel nécessaire présenté est celui permettant de réaliser un essai d'élutriation avec le système d'élutriation d'Environnement Canada, le matériel nécessaire est présenté à la Figure 1.

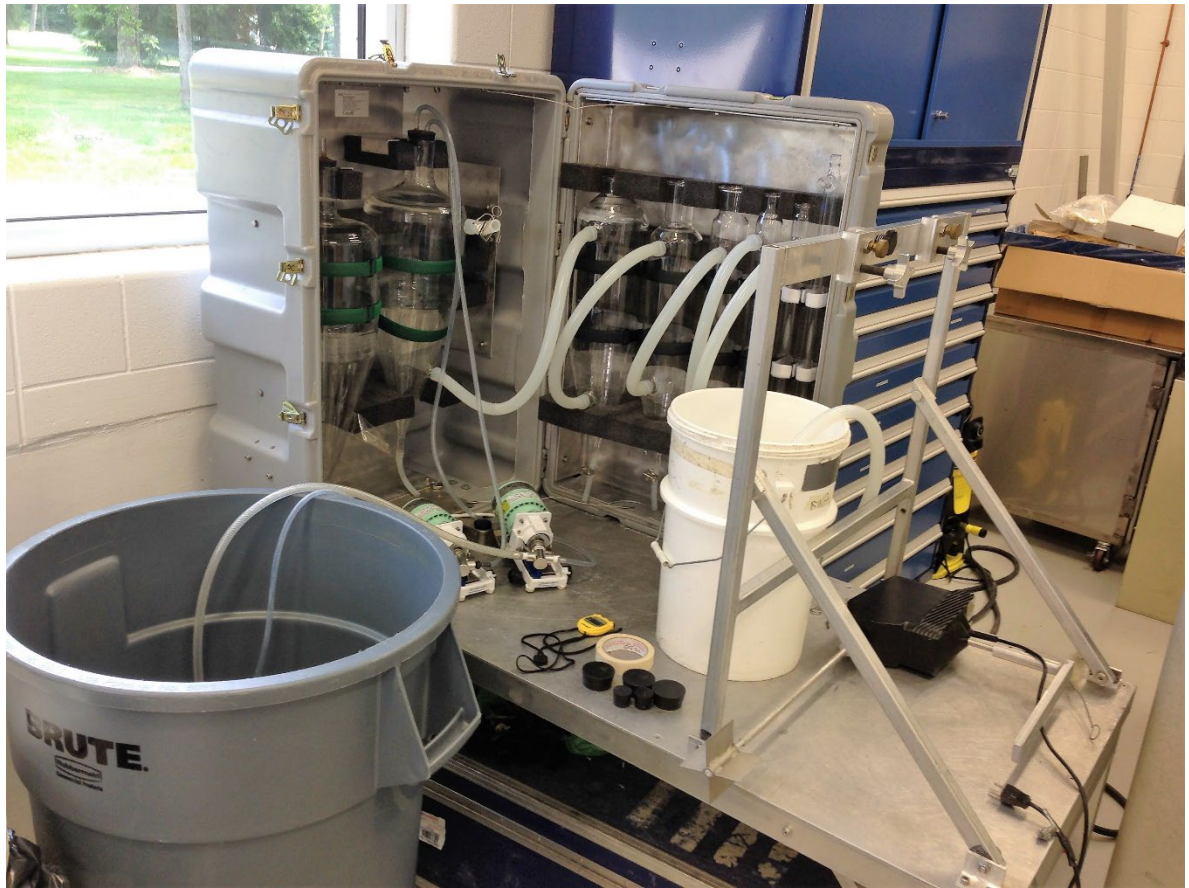


Figure 1 : Matériel pour essai d'élutriation

**Liste du matériel :**

- 8 bouchons dont 1 avec un tube à l'intérieur
- 1 ou 2 pompes céramiques à débit variable (selon les vitesses désirées)
- Pincés à tube Tygon
- Tube Tygon
- 8 colonnes de verre de diamètres différents : 25 mm, 34 mm, 43 mm, 70 mm, 105 mm, 143 mm, 197 mm, 197 mm
- Support à bouteille
- Agitateur
- «Duck tape»
- Spatule
- Contenant de 200L
- 8 contenants appropriés pouvant contenir le volume de chaque colonne respectivement

## 6.2 Équipement

Les volumes de chaque colonne et de leurs tuyaux correspondant ainsi que les volumes d'eau récupérés pour chaque colonne pour le système d'éluatriation d'Environnement Canada sont présentés au Tableau 1. Le montage d'un système d'éluatriation est présenté à la Figure 2.

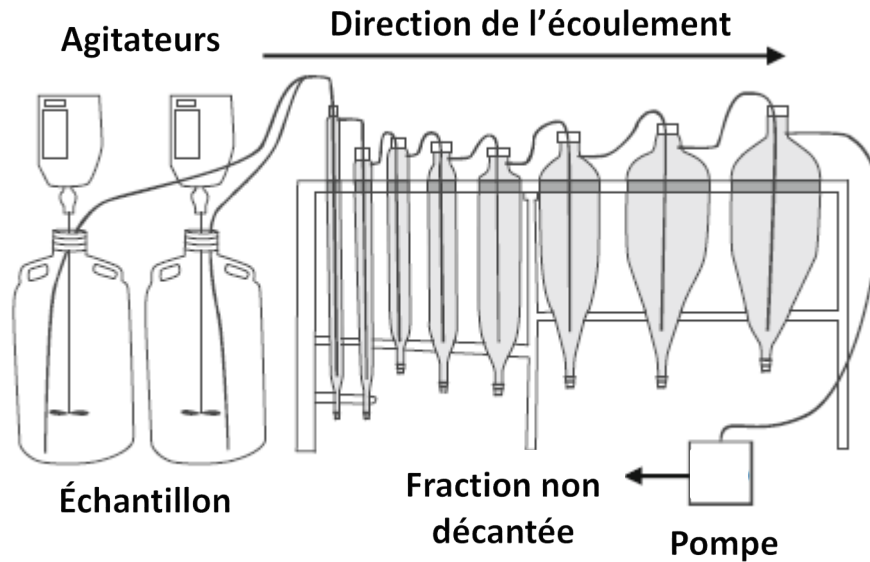


Figure2: Montage d'un système d'éluatriation adapté de (Krishnappan et coll., 2012)

Tableau 15: Volumes des colonnes du système d'éluatriation et les volumes totaux du système d'éluatriation

| Diamètre [mm] | Volume des colonnes [ml] | Volumes des tuyaux correspondant à chaque colonne [ml] | Volumes totaux [ml] |
|---------------|--------------------------|--|---------------------|
| 25            | 330                      | -  | 330                 |
| 34            | 600                      | 395  | 995                 |
| 49            | 950                      | 195  | 1145                |
| 70            | 1920                     | 163  | 2083                |
| 105           | 3540                     | 157  | 3697                |
| 143           | 6550                     | 188  | 6738                |
| 197           | 10250                    | 232  | 10482               |
| 197           | 10250                    | -  | 10250               |

## 7. Protocole analytique

### 7.1 Conditions d'opération

La température de l'échantillon doit être à température pièce afin de limiter l'influence de la densité de l'eau sur les résultats.

Le temps d'opération est déterminé par le volume de l'échantillon divisée par le débit auquel il faut ajouter deux fois le temps de rétention afin de s'assurer que toutes les particules aient le temps de sortir du système. Il faut aussi prévoir le temps de récupérer et d'analyser les échantillons.

### 7.2 Mise en marche du système

Avant l'expérience

- Fermer les pinces Tygon au bas des colonnes.
- Préparer les colonnes nécessaires en les remplissant d'eau potable de manière à ce qu'il n'y ait pas d'air entre l'eau et le bouchon. Veillez à ce que les bouchons soient très bien fermés.
- Ajuster le débit de la (des) pompe(s) pour que le débit cumulé soit celui désiré.
- Vérifier l'étanchéité en regardant s'il y a des bulles qui circulent. Normalement, il ne devrait pas y en avoir. S'il y en a, essayez de trouver la source. Il y a trois sources potentielles : la pince en bas d'une colonne, le bouchon ou les tubes de connections.
- Placer les tuyaux sortants de la (des) pompe(s) dans le contenant pouvant recueillir un volume minimum équivalent au volume total des colonnes utilisées multiplié par 3.
- Remplir un bécher de 1L de l'échantillon initial homogène pour la mesure de la concentration en MeS initiale.
- Préparer des récipients pour recueillir l'intérieur de chaque colonne à la fin de l'expérience. Les volumes sont spécifiés plus haut.
- Mesurer le volume d'échantillon requis pour l'essai d'éluatriation et mettre le tout dans une chaudière de 20 L prévue à cet effet.

- Installer la chaudière contenant l'échantillon à analyser afin que l'hélice de l'agitateur soit en mesure de bien agiter l'échantillon, environ à 2-3 cm du fond de la chaudière.
- Placer l'agitateur dans la chaudière contenant l'échantillon et le mettre en marche en s'assurant de ne pas créer de vortex trop puissant pouvant altérer les particules (environ 100 RPM). Il est préférable de ne pas placer l'agitateur au centre de la chaudière pour laisser un espace suffisant pour le tuyau d'alimentation.
- Placer rapidement le tube d'alimentation dans la chaudière contenant l'échantillon et le maintenir en place en fond de la chaudière.
- Estimer le temps que cela prendra pour pomper l'échantillon avec l'équation suivante :  $Temps\ d'opération = TRH * 3$ .

Pendant l'expérience

- Activer la(les) pompe(s) simultanément ainsi que le chronomètre. Maintenir le tuyau d'alimentation dans la chaudière afin d'éviter l'aspiration d'air ou l'enroulement autour de l'agitateur.
- Pour les premières minutes (2-3 min), il est nécessaire de tenir le tuyau d'alimentation afin que la buse d'entrée se retrouve au fond.
- Une fois que le niveau de l'échantillon est assez bas (5L), le tuyau d'alimentation est fixé sur la chaudière avec du ruban adhésif « Duck tape ».
- Toujours vérifier qu'il ne manque pas d'eau dans le réservoir contenant l'échantillon d'eau. Afin d'aspirer le plus de particules, l'eau potable est rajoutée par « batch » de 5L dès que le niveau d'eau est bas, environ 3 L, pour ne pas pomper d'air et ainsi de suite pendant toute la durée de l'essai.
- À trois reprises, soit au début, au milieu et à la fin de l'essai, vérifier le débit cumulatif de la (des) pompe(s) grâce à un cylindre gradué de 1000ml et un chronomètre.

Après l'expérience

- Arrêter la pompe à la fin de l'essai, soit après trois fois le temps de séjour, et mettre des pinces sur les tuyaux tygons à l'entrée et à la sortie pour prévenir les échanges entre les colonnes.
- Récolter le contenu de chaque colonne dans leur récipient respectif de dimension approprié.

- Remplir un bécher de 1L de l'échantillon final, ayant préalablement homogénéisé à l'aide d'une spatule, pour la mesure de la concentration finale en MeS.
- Bien brasser l'échantillon de chaque colonne avant de faire les filtrations afin de remettre en suspension toutes les particules pour obtenir les MeS.
- Faire les mesures des MeS (se référer au SOP-005-TSS) avec des filtres de 0,45µm préalablement conditionnés.
  - Pour les colonnes 1 et 2, filtrer tout le contenu d'une seule colonne sur un filtre (ou deux si le filtre se bouche) lorsque le volume total de la colonne le permet (normalement la première et la deuxième colonne lors des essais avec le pilote, car elles ne contiennent pas un très grand volume).
  - Pour les autres colonnes, faire un triplicata de la concentration en MeS sur le contenu de toutes les colonnes, ainsi que pour l'échantillon initial et final.
  - Filtrer le contenu de la chaudière utilisée pour l'expérience afin de récupérer toutes les particules n'ayant pu entrer dans le système d'élutriation. Ces particules seront ajoutées à la masse des particules ayant des vitesses de chute supérieures à la première colonne.
- L'eau usée doit être jetée dans les contenants biorisques appropriés.

#### Nettoyage

- Remettre de l'eau et la faire circuler après l'expérience puisqu'il n'est pas possible de frotter les parois. Utiliser un boyau d'arrosage pour faire passer l'eau à travers toutes les colonnes. Rejeter ensuite l'eau en continu dans le drain.
- Utiliser un bactéricide pour éliminer les bactéries. Rincer et vider au moins deux fois après l'utilisation de ce produit. L'utilisation d'un acide (Extran) peut endommager les pompes et ne doit pas être utilisé.

Pour l'analyse de la décantabilité des particules d'un dessableur « grits », certaines modifications sont à prendre en considération.

- Seulement les colonnes 2 à 7 sont nécessaires.
- Ajuster le débit à 1,56L/minute.
- Ajuster la rotation de l'agitateur mécanique à 100 RPM. L'effet de l'agitation est présenté en Annexe.

## 8. Calculs et expression des résultats

Un fichier Excel a été développée pour exprimer les vitesses de chute observées par le système d'élutriation. Le fichier permet de vérifier le bilan de masse de l'essai, présenter graphiquement la distribution des vitesses de chute des particules à l'aide des résultats des essais de filtration réalisés.

### 8.1 Saisie des résultats (feuille Excel)

L'ensemble des calculs ainsi que le tracé de la courbe de distribution des vitesses de chute sont réalisés au moyen d'une feuille de calcul Excel : « Modèle Élutriation v1.0 ». Les données à saisir sont représentées par des cases blanches dans le fichier et les calculs sont effectués automatiquement dans la feuille. Un exemple de la feuille de calcul est présenté à la Figure 2.

Dans le fichier Excel, chacune des colonnes est analysée séparément afin de faciliter l'interprétation des résultats. Les résultats des mesures en MeS et MVeS, M0, M1 et M2 pour chacune des colonnes doivent être inscrites dans le chiffrier afin de réaliser l'analyse du bilan de masse et de la distribution de la vitesse de chute des particules. La masse M0 correspond à la masse initiale du filtre utilisée, la masse M1 correspond à la masse obtenue après le séchage à 105°C (MES) et la masse M2 correspond à la masse obtenue après le séchage à 550°C (MVeS). À noter qu'il n'est pas nécessaire de rentrer l'information M2 si l'analyse en MVeS n'a pas été effectuée, ceci n'influencera pas les calculs. En entête, les informations de volume utilisé, durée de l'essai en minutes et le calcul de débit doivent être entrées dans le fichier.

|    | A                    | B           | C       | D       | E       | F             | G                      | H                     | I          | J |
|----|----------------------|-------------|---------|---------|---------|---------------|------------------------|-----------------------|------------|---|
| 2  |                      |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 3  | Date prélevement     |             |         |         |         |               | <b>Calcul de débit</b> |                       |            |   |
| 4  | Volume d'eau (L)     |             |         |         |         |               | débit (ml/min)         | l                     | sec        |   |
| 5  | Temps (minutes)      |             |         |         |         |               | #DIV/0!                |                       |            |   |
| 6  | Matte totale (mg)    |             | #DIV/0! |         |         |               | #DIV/0!                |                       |            |   |
| 7  | Bilan de matte (%)   |             | #DIV/0! |         |         |               | #DIV/0!                |                       |            |   |
| 8  | Matte récupérée (mg) |             | #DIV/0! |         |         |               | #DIV/0!                |                       |            |   |
| 9  |                      |             |         |         |         |               | #DIV/0!                |                       |            |   |
| 10 |                      |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 11 | <b>Etat initial</b>  | Volume (ml) | m0 (mg) | m1 (mg) | m2 (mg) | Vr (m/h)      |                        | [MES] mg/l            | [MVS] mg/l |   |
| 12 | Echantillon 1        |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 13 | Echantillon 2        |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 14 | Echantillon 3        |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 15 | Total                | 20000       | #DIV/0! | #DIV/0! |         |               | #DIV/0!                | #DIV/0!               |            |   |
| 16 |                      |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 17 | <b>Colonne 1</b>     | Volume (ml) | m0 (mg) | m1 (mg) | m2 (mg) | Vr (m/h)      |                        | concentration colonne |            |   |
| 18 | Echantillon 1        |             |         |         |         | #DIV/0!       |                        | [MES] mg/l            | [MVS] mg/l |   |
| 19 | Echantillon 2        |             |         |         |         | diamètre (mm) |                        |                       |            |   |
| 20 | Echantillon 3        |             |         |         |         | 25,0          |                        |                       |            |   |
| 21 | Total                | 330         | #DIV/0! | #DIV/0! |         |               | #DIV/0!                | #DIV/0!               |            |   |
| 22 |                      |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 23 | <b>Colonne 2</b>     | Volume (ml) | m0 (mg) | m1 (mg) | m2 (mg) | Vr (m/h)      |                        | concentration colonne |            |   |
| 24 | Echantillon 1        |             |         |         |         | #DIV/0!       |                        | [MES] mg/l            | [MVS] mg/l |   |
| 25 | Echantillon 2        |             |         |         |         | diamètre (mm) |                        |                       |            |   |
| 26 | Echantillon 3        |             |         |         |         | 34,0          |                        |                       |            |   |
| 27 | Total                | 995         | #DIV/0! | #DIV/0! |         |               | #DIV/0!                | #DIV/0!               |            |   |
| 28 |                      |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 29 | <b>Colonne 3</b>     | Volume (ml) | m0 (mg) | m1 (mg) | m2 (mg) | Vr (m/h)      |                        | concentration colonne |            |   |
| 30 | Echantillon 1        |             |         |         |         | #DIV/0!       |                        | [MES] mg/l            | [MVS] mg/l |   |
| 31 | Echantillon 2        |             |         |         |         | diamètre (mm) |                        |                       |            |   |
| 32 | Echantillon 3        |             |         |         |         | 43,0          |                        |                       |            |   |
| 33 | Total                | 1145        | #DIV/0! | #DIV/0! |         |               | #DIV/0!                | #DIV/0!               |            |   |
| 34 |                      |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 35 | <b>Colonne 4</b>     | Volume (ml) | m0 (mg) | m1 (mg) | m2 (mg) | Vr (m/h)      |                        | concentration colonne |            |   |
| 36 | Echantillon 1        |             |         |         |         | #DIV/0!       |                        | [MES] mg/l            | [MVS] mg/l |   |
| 37 | Echantillon 2        |             |         |         |         | diamètre (mm) |                        |                       |            |   |
| 38 | Echantillon 3        |             |         |         |         | 70,0          |                        |                       |            |   |
| 39 | Total                | 2083        | #DIV/0! | #DIV/0! |         |               | #DIV/0!                | #DIV/0!               |            |   |
| 40 |                      |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 41 | <b>Colonne 5</b>     | Volume (ml) | m0 (mg) | m1 (mg) | m2 (mg) | Vr (m/h)      |                        | concentration colonne |            |   |
| 42 | Echantillon 1        |             |         |         |         | #DIV/0!       |                        | [MES] mg/l            | [MVS] mg/l |   |
| 43 | Echantillon 2        |             |         |         |         | diamètre (mm) |                        |                       |            |   |
| 44 | Echantillon 3        |             |         |         |         | 105,0         |                        |                       |            |   |
| 45 | Total                | 3697        | #DIV/0! | #DIV/0! |         |               | #DIV/0!                | #DIV/0!               |            |   |
| 46 |                      |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 47 | <b>Colonne 6</b>     | Volume (ml) | m0 (mg) | m1 (mg) | m2 (mg) | Vr (m/h)      |                        | concentration colonne |            |   |
| 48 | Echantillon 1        |             |         |         |         | #DIV/0!       |                        | [MES] mg/l            | [MVS] mg/l |   |
| 49 | Echantillon 2        |             |         |         |         | diamètre (mm) |                        |                       |            |   |
| 50 | Echantillon 3        |             |         |         |         | 143,0         |                        |                       |            |   |
| 51 | Total                | 6738        | #DIV/0! | #DIV/0! |         |               | #DIV/0!                | #DIV/0!               |            |   |
| 52 |                      |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 53 | <b>Colonne 7</b>     | Volume (ml) | m0 (mg) | m1 (mg) | m2 (mg) | Vr (m/h)      |                        | concentration colonne |            |   |
| 54 | Echantillon 1        |             |         |         |         | #DIV/0!       |                        | [MES] mg/l            | [MVS] mg/l |   |
| 55 | Echantillon 2        |             |         |         |         | diamètre (mm) |                        |                       |            |   |
| 56 | Echantillon 3        |             |         |         |         | 197,0         |                        |                       |            |   |
| 57 | Total                | 10482       | #DIV/0! | #DIV/0! |         |               | #DIV/0!                | #DIV/0!               |            |   |
| 58 |                      |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 59 | <b>Etat final</b>    | Volume (ml) | m0 (mg) | m1 (mg) | m2 (mg) | Vr (m/h)      |                        | concentration finale  |            |   |
| 60 | Echantillon 1        |             |         |         |         |               |                        | [MES] mg/l            | [MVS] mg/l |   |
| 61 | Echantillon 2        |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 62 | Echantillon 3        |             |         |         |         |               |                        |                       |            |   |
| 63 | Total                | #DIV/0!     | #DIV/0! | #DIV/0! |         |               | #DIV/0!                | #DIV/0!               |            |   |

Figure 3 : Feuille Excel pour Éutriation

## 8.2 Vérification du bilan de masse

Afin d'exprimer les résultats de l'essai d'élutriation sous forme de distribution de vitesse de chute, il est nécessaire de calculer le bilan de masse. Ce calcul est effectué afin d'estimer les pertes ou gains de solides au cours des manipulations et d'évaluer la qualité des mesures. La masse initiale est définie à l'aide du volume initial et de la concentration initiale, définie lors de la filtration.

Soit :

- $C_{ini}$  (mg/l) la concentration initiale de l'échantillon,
- $C_{fin}$  (mg/l) la concentration finale,
- $V_{ini}$  (l) Volume initial de l'échantillon,
- $V_{fin}$  (l) Volume final de l'échantillon,
- $m_i$  (mg) la masse de solide récupérée dans la colonne  $i$ ,

D'où :

Masse initiale  $M_{ini}$  (mg) : 
$$M_{ini} = V_{ini} \cdot C_{ini}$$

Masse Finale  $M_{fin}$  (mg) : 
$$M_{fin} = V_{fin} \cdot C_{fin}$$

Masse décantée  $M_{dec}$  (mg) : 
$$M_{dec} = \sum_i m_i$$

Pourcentage d'erreur  $E$  (%) : 
$$E = \frac{M_{ini} - (M_{dec} + M_{fin})}{M_{ini}} \cdot 100$$

Un bilan de masse inférieur à  $\pm 16\%$  est jugée acceptable pour l'essai d'élutriation.

## 8.3 Calcul de la distribution des vitesses de chute

Les vitesses d'écoulement de chacune des colonnes sont calculées automatiquement une fois les mesures de débits sont entrées dans le fichier Excel. Les vitesses d'écoulement de

chacune des colonnes correspondent aux classes de vitesses de chute utilisées pour la caractérisation des particules en suspension.

La distribution de la vitesse de chute est calculée en fonction des masses retenues dans chacune des colonnes d'élu-triation. Connaissant la masse de particules insérée dans le système, à l'aide du volume et la concentration d'échantillon utilisé pour l'essai, il est possible de calculer la proportion de particules ayant été retenue au bas d'une colonne. Dans le fichier Excel les résultats sont exprimés sous forme de tableau pour les MeS et MVeS. Un exemple des résultats obtenus de la masse des particules retenues dans chacune des colonnes et de la proportion cumulative dans le fichier Excel est présenté à la Figure 4.

| titre   | Vz (m/h) | MES (mg) | MVS(mg) | MES cumuler (%) | MVS cumulé (%) | Volume (ml) |
|---------|----------|----------|---------|-----------------|----------------|-------------|
| initial | 0,0      | 4461,6   | 2614,5  | ---             | ---            | 15000,0     |
| 25mm    | 193,09   | 0,0      | 0,0     | 100%            | 100%           | 330,0       |
| 34 mm   | 104,39   | 35,8     | 85,8    | 98%             | 97%            | 395,0       |
| 43 mm   | 65,27    | 87,5     | 76,0    | 96%             | 95%            | 1144,8      |
| 70 mm   | 24,63    | 193,4    | 164,3   | 92%             | 89%            | 2083,4      |
| 105 mm  | 10,95    | 334,6    | 221,8   | 86%             | 82%            | 3697,1      |
| 143 mm  | 5,90     | 102,2    | 62,5    | 83%             | 80%            | 6738,5      |
| 197 mm  | 3,11     | 1222,5   | 720,9   | 59%             | 56%            | 10482,5     |
| finale  | 0,0      | 2890,7   | 1693,9  | 0%              | 0%             | 71,1        |
| total   | -        | 4926,7   | 3025,3  |                 |                | 25542,3     |

Figure 471: Masse des particules retenues dans chacune des colonnes et proportion cumulative

À l'aide de ces résultats, il est possible d'exprimer graphiquement les résultats pour les matières en suspension et les matières volatiles en suspension. La représentation graphique est sous forme de courbe cumulative, donnant le pourcentage en masse des particules ayant une vitesse de chute inférieure à une vitesse donnée. La représentation graphique des résultats, pour l'affluent d'un dessableur et une vitesse de pompage de 1,56 l/min est présentée à la Figure 5.

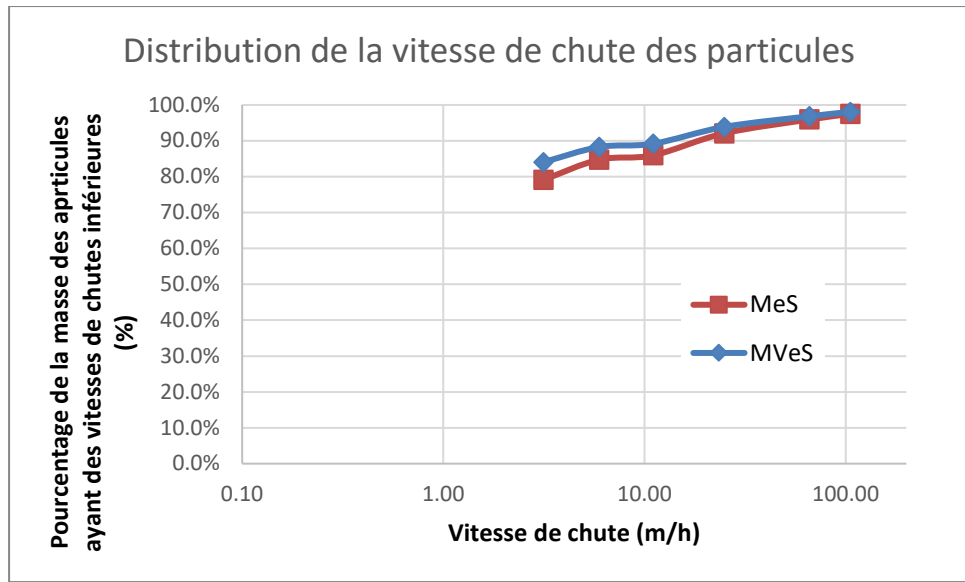


Figure 572: Représentation graphique des résultats de l'affluent d'un dessableur pour une vitesse de pompage de 1,56 L/min

## 9. Références

- ANDOH, R. Y. G. & SMISSON, R. P. M. 1996. The practical use of wastewater characterisation in design. *Water Science and Technology*, 33, 127-134.
- DOROODCHI, E., EVANS, G., SCHWARZ, M., LANE, G., SHAH, N. & NGUYEN, A. 2008. Influence of turbulence intensity on particle drag coefficients. *Chemical Engineering Journal*, 135, 129-134.
- EXALL, K., MARSALEK, J. & KRISHNAPPAN, B. 2009. Hydraulic fractionation of conventional water quality constituents in municipal dry-and wet-weather flow samples. *Journal of the Water Science and Technology*, 59, 1159-1167.
- GWINN, A., OSEI, K., FINK, J. & ANDOH, R. 2013. Development and calibration of a grit settling column. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2013, October 5-9 2013, Chicago, IL, USA. 2391-2399.
- HETTLER, E. N., GULLIVER, J. S. & KAYHANIAN, M. 2011. An elutriation device to measure particle settling velocity in urban runoff. *Science of the Total Environment*, 409, 5444-5453.
- KRISHNAPPAN, B., EXALL, K., MARSALEK, J., ROCHFORT, Q., KYDD, S., BAKER, M. & STEPHENS, R. 2012. Variability of settling characteristics of solids in dry and wet weather flows in combined sewers: implications for CSO treatment. *Water, Air & Soil Pollution*, 223, 3021-3032.
- KRISHNAPPAN, B. G., MARSALEK, J., EXALL, K., STEPHENS, R. P., ROCHFORT, Q. & SETO, P. 2004. A water elutriation apparatus for measuring settling velocity distribution of suspended solids in combined sewer overflows. *Water Quality Research Journal of Canada*, 39, 432-438.
- MARSALEK, J., KRISHNAPPAN, B., EXALL, K., ROCHFORT, Q. & STEPHENS, R. 2006. An elutriation apparatus for assessing settleability of combined sewer overflows (CSOs). *Water Science & Technology*, 54, 223-230.
- MCGAUHEY, P. 1956. Theory of sedimentation. *Journal American Water Works Association*, 48, 437-448.
- MCNAMARA, B., SHERONY, M. & HERRICK, P. 2014. Relative performance of grit removal systems. Proceedings of the Water Environment Federation WEFTEC 2014, September 27 - October 1 2014, New Orleans, LA, USA. 4919-4929.
- O'CONNOR, T. P. 2002. *Testing Solids-settling Apparatuses for Design and Operation of Wet-weather Flow Solids/Liquid Separation Processes*, US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Washington, DC, USA. pp. 160
- REDDY, M. P. & PAGILLA, K. 2010. *Integrated Methods for Wastewater Treatment Plant Upgrading and Optimization*, Alexandria, VA, USA. pp. 314
- VERBANCK, M. A., ASHLEY, R. M. & BACHOC, A. 1994. International workshop on origin, occurrence and behaviour of sediments in sewer systems: Summary of conclusions. *Water Research*, 28, 187-194.
- WHITE, F. M. 2011. *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, New York, USA. pp. 862

## **10. ANNEXE**

### **Mise au point du protocole d'élutriation pour la caractérisation de la décantabilité des particules de l'affluent et l'effluent d'un dessableur**

Pour l'analyse de la décantabilité des particules dans une unité de dessablage, différentes caractéristiques du protocole d'élutriation ont été testées en laboratoire. Afin d'améliorer le protocole, l'effet de la conservation des échantillons, l'effet de l'agitation et l'effet du volume d'échantillon initial ont été analysés.

#### **10.1 Effet de la conservation des échantillons**

L'analyse de l'effet de la conservation des échantillons consiste à vérifier si la distribution de la vitesse de chute des particules est influencée par le délai entre l'échantillonnage et la réalisation de l'essai. Pour ce faire, trois essais d'élutriation ont été réalisés sur un même échantillon. Le premier essai a été réalisé une heure après l'échantillonnage, ce qui correspond au temps moyen de déplacement et de préparation de l'essai. Le second a été réalisé 4h plus tard après le premier essai en conservant l'échantillon à température pièce. Le dernier essai a été réalisé 24h après le premier, et ce, en conservant l'échantillon en chambre froide à 4 °C. L'échantillon a été sorti 2h avant la réalisation de l'essai afin de permettre à l'échantillon d'être à température pièce. Les résultats des essais sont présentés à la Figure 6.

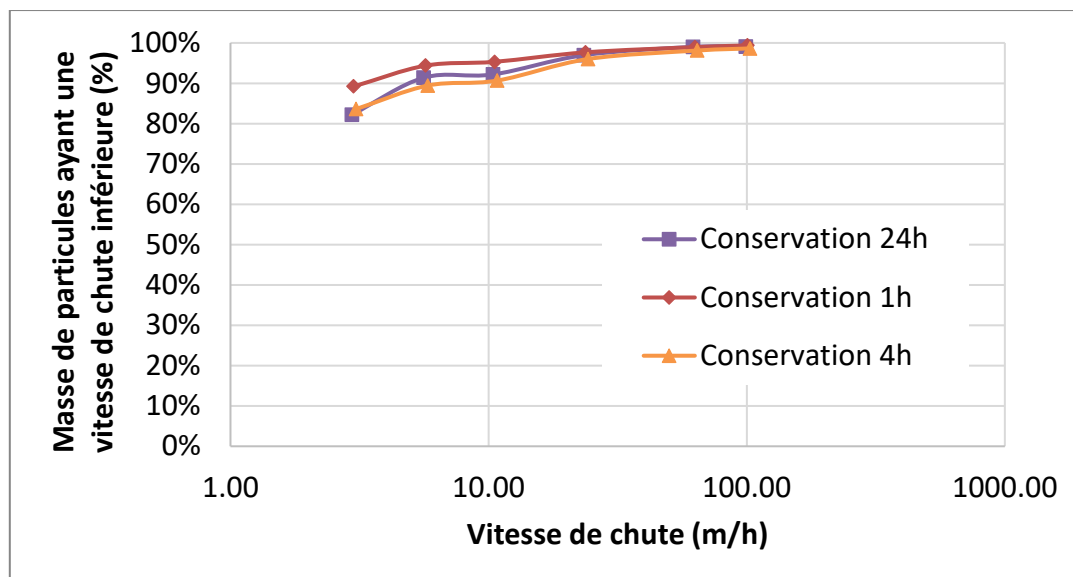


Figure 673: Distribution de la vitesse de chute des particules en fonction du temps de conservation de l'échantillon

L'effet de la conservation est très faible sur les particules ayant de fortes vitesses de chute (>10 m/h). Les différences observées sont faibles (2-3%) et sont principalement dû à une quantité plus importante de papier hygiénique dans les deux dernières portions de l'échantillon.

## 10.2 Effet de l'agitation

Pour la caractérisation de l'effet de l'agitation, deux essais ont été réalisés sur un même échantillon. Un essai a été réalisé à faible vitesse de rotation 40 RPM, vitesse maximale sans causer la création d'un vortex dans une chaudière en PVC standard et un second essai à 100 RPM, vitesse de rotation créant un vortex. Les résultats des deux essais sont présentés à la Figure 7.

La comparaison des courbes de distribution de vitesse de chute des particules pour différentes d'agitation est peu concluante. Cependant, lors de l'essai d'élutriation à 100 RPM, 50% moins de particules sont demeurés dans la chaudière de PVC. À 40 RPM, la vitesse de rotation est insuffisante pour resuspendre une importante fraction des particules ayant de grandes vitesses de chute. Il est donc recommandé d'utiliser une vitesse d'agitation de 100 RPM.

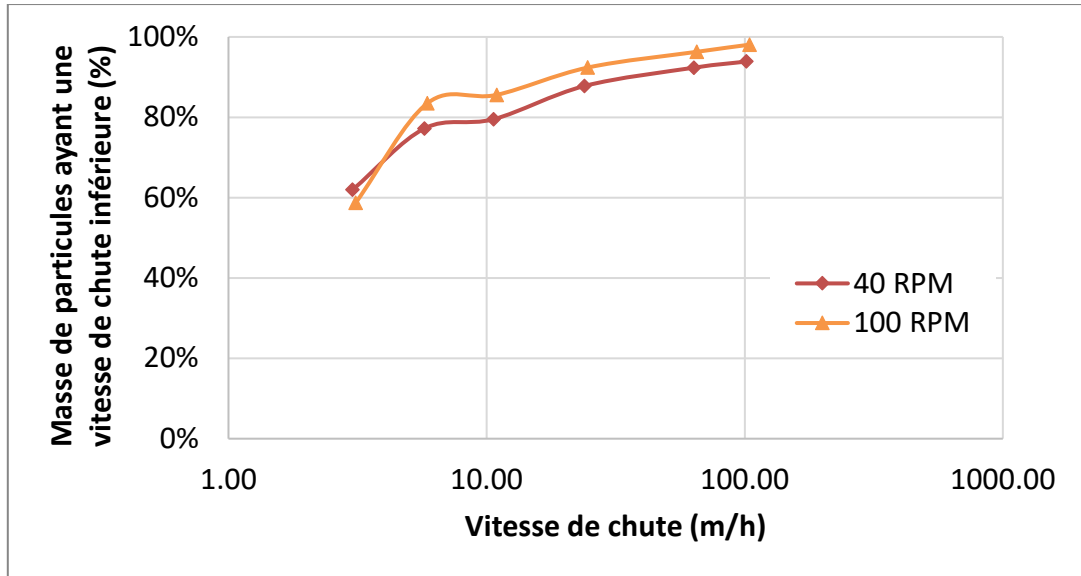


Figure 7 : Distribution de la vitesse de chute des particules en fonction de l'intensité d'agitation

### 10.3 Effet du volume d'échantillon initial

La caractérisation de l'effet du volume d'échantillon initial a été réalisé à l'aide de trois essais. Le volume initial des trois essais était respectivement de 10L, 20L et 30L. Lorsque le volume est plus grand, une plus grande quantité de particules en suspension sont présentes dans le système. Les résultats des trois essais d'éluatriation sont présentés à la Figure 8.

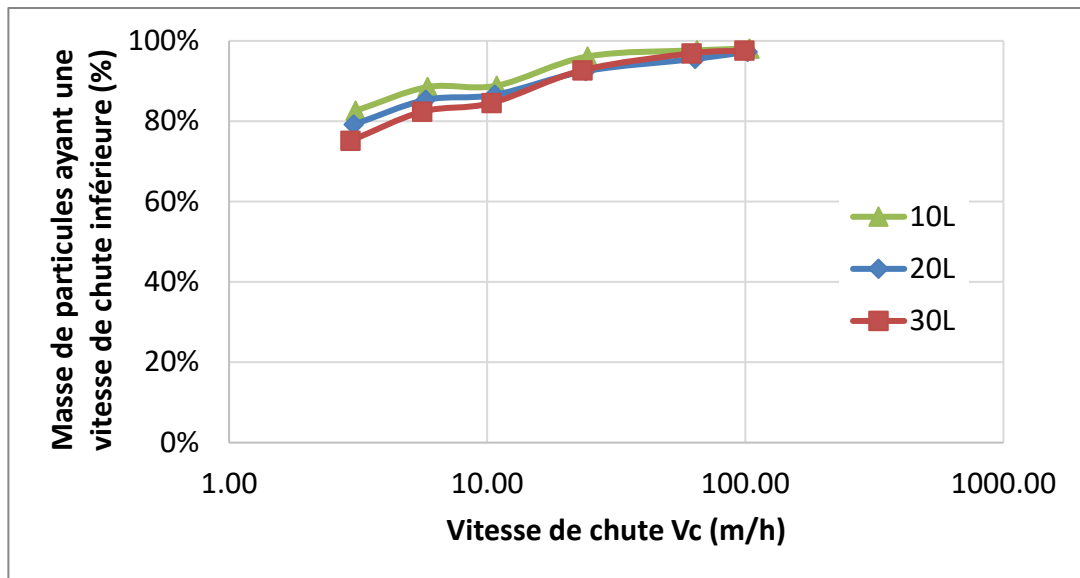


Figure 874: Distribution de la vitesse de chute en fonction du volume initial

De faibles variations ont été observées entre les trois essais, présentant un pourcentage plus élevé de particules ayant des vitesses de chute inférieure lorsque le volume initial est plus grand. Toutefois, lorsque le volume est grand, plus de particules se déplacent dans les colonnes et pourrait favoriser l'entraînement des particules de plus faibles vitesses de chute au bas des colonnes. De plus, un plus grand volume nécessite une durée d'essai de plus grande durée et un échantillonnage plus important. À l'inverse, un volume trop faible peut rendre difficile l'analyse de matière en suspension (MeS) puisque les particules ne sont pas suffisantes au bas des colonnes.

## **ANNEXE C : Protocole d'analyse granulométrique par tamisage**



## SOP- Analyse granulométrique par tamisage

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| NOM DE L'APPAREIL               | <b>Analyse granulométrique par tamisage</b> |
| MODEL                           |   |
| N° SERIAL                       |   |
| PRÉCISION ET REPRODUCTIBILITÉ   |   |
| DATE DE POSTE EN FONCTIONNEMENT |   |
| DISTRIBUTION                    |   |
| WEBSITE                         |   |
| PROFESSEUR RESPONSABLE          | Peter Vanrolleghem                          |

|                                  | <b>RÉALISATION</b>     | <b>RÉVISION</b>                       | <b>APPROBATION</b> |
|----------------------------------|------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| <b>NOM</b>                       | Jessy Carpentier       | Queralt Plana                         | Peter Vanrolleghem |
| <b>FONCTION</b>                  | Étudiant à la maîtrise | Étudiante au doctorat                 | Professeur         |
| <b>DATE</b>                      | 21/04/2016             | 18/08/2016                            | 04/04/2017         |
| <b>SIGNATURE</b>                 |                        |                                       |                    |
| <b>GESTION DES MODIFICATIONS</b> |                        |                                       |                    |
| <b>RÉVISION</b>                  | <b>DATE</b>            | <b>DESCRIPTION DE LA MODIFICATION</b> |                    |
| 01                               |                        | Édition du SOP                        |                    |
|                                  |                        |                                       |                    |

# Table des matières

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 1.  | Introduction .....  | 154 |
| 2.  | Domaine d'application .....   | 155 |
| 3.  | Principe et théorie.....  | 155 |
| 4.  | Fiabilité.....  | 156 |
| 5.  | Prélèvement et conservation.....  | 156 |
| 6.  | Matériel et équipement .....  | 157 |
| 6.1 | Prétraitement de l'échantillon.....   | 158 |
| 6.2 | Tamissage de l'échantillon (Figure 2) .....                                   | 158 |
| 7.  | Protocole analytique.....   | 160 |
| 7.1 | Prétraitement de l'échantillon (Pour analyse des particules de « grit »)..... | 160 |
| 7.2 | Tamissage de l'échantillon.....   | 161 |
| 7.3 | Commentaires .....  | 162 |
| 8.  | Calculs et expression des résultats .....                                     | 162 |
| 9.  | Références .....  | 165 |



## 1. Introduction

Dans les eaux usées, les sédiments et les polluants particuliers sont rarement de taille homogène, influençant leur capacité à décanter dans le système de traitement des eaux usées. La caractérisation de la taille des particules permet d'évaluer la décantabilité des particules et l'effet des particules sur le système de traitement.

La caractérisation de la taille des particules est principalement d'intérêt pour les systèmes de décantation de type 1, tel que les unités de dessablage et les décanteurs primaires. Pour ce type de décantation, aucune interaction entre les particules n'est considérée. Le déplacement des particules dans l'eau est déterminé par les forces gravitationnelles, les forces de trainées et les forces d'Archimède (Mihelcic et Zimmerman, 2009). La vitesse de chute de ces particules est couramment approximée à l'aide de la loi de Stokes, se basant sur la taille des particules dans les eaux usées.

Pour la caractérisation de la taille des particules, il est possible de définir des distributions de taille des particules à l'aide de la masse ou du volume des particules ou par comptage. L'analyse granulométrique par tamisage permet d'établir la distribution de la taille des particules en fonction de la masse et de la taille des particules. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut être utilisée pour une grande gamme de taille des particules, permettant de définir une distribution de la taille des particules  $< 5 \mu\text{m}$ , correspondant aux tailles de particules d'intérêt des dessableurs et décanteurs primaires.

## **2. Domaine d'application**

L'analyse granulométrique est couramment utilisée en géotechnique pour la caractérisation de la distribution de la taille des particules d'un sols (Holtz et Kovacs, 1991).

Dans le domaine du traitement des eaux usées, plusieurs études utilisent l'analyse granulométrique afin de déterminer la distribution de la taille des particules (Reddy et Pagilla, 2010).

## **3. Principe et théorie**

L'analyse granulométrique est réalisée par tamisage d'un échantillon particulaire à travers une série de tamis ayant des orifices de tailles décroissantes. En connaissant la masse totale de l'échantillon et en mesurant la masse retenue sur chacun des tamis, il est possible de déterminer la distribution de la taille des particules sur une échelle logarithmique, et sous forme de courbe cumulative (Holtz et Kovacs, 1991). La distribution granulométrique permet de vérifier si la distribution de la taille des particules est uniforme ou non, c'est-à-dire, si la taille des particules est la même pour toutes les particules ou si la taille des particules est variable pour un échantillon.

L'analyse granulométrique des particules de « grit » et des sols est réalisée selon la norme américaine ASTM D6913 (Reddy et Pagilla, 2010). Afin de réaliser le tamisage, les échantillons sont préalablement séchés au four à 105°C afin d'éliminer l'humidité présente dans l'échantillon (ASTM -D6913-04). Le tamisage à sec est réalisé selon la norme ASTM C136. Il est possible de tamiser l'échantillon à la main ou par l'utilisation d'un agitateur mécanique. L'agitation des particules permet de vérifier si les particules ont un diamètre inférieur à la maille du tamis sur lequel elles sont déposées, et ce, sous toutes leurs faces. L'agitateur mécanique permet d'assurer une agitation constante et répétable entre les

différents essais d'analyse granulométrique. La norme ASTM C136 estime qu'une erreur de  $\pm 0,3\%$  sur le bilan de masse est acceptable pour l'analyse par tamisage.

## 4. Fiabilité

Selon la norme ASTM C136, un bilan de masse est jugé acceptable si ce dernier est inférieur à  $0,3\%$ .

Afin d'avoir des résultats acceptables, il est important que les tamis ne soient pas surchargés. La norme ASTM D6913-04, présente la charge maximale sur chacun des tamis (en g). La charge maximale est présentée dans le Tableau 1 :

Tableau 1 : Limites de charges sur les tamis standard (ASTM D6913-04)

| Alternative Sieve Designation | Standard Sieve Designation | Number of Grain Layers on Given Sieve | Maximum Mass Retained on 200-mm (8-in.) Diameter Sieve, g <sup>A</sup> | Maximum Mass Retained on 305-mm (12-in.) Diameter Sieve, g | Maximum Mass Retained on 370- by 580-mm (14.6- by 22.8-in.) Sieve, g |
|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--|--|--|
| 3 in.                         | 75 mm                      | 0.8                                   | 2 700  | 6 100  | 18 000   |
| 2 in.                         | 50 mm                      | 0.9                                   | 2 000  | 4 500  | 13 000   |
| 1-½-in.                       | 37.5 mm                    | 0.9                                   | 1 500  | 3 400  | 10 000   |
| 1 in.                         | 25 mm                      | 1                                     | 1 100  | 2 500  | 7 000  |
| ¾ in.                         | 19.0 mm                    | 1                                     | 900  | 2 000  | 6 000  |
| ⅝ in.                         | 9.5 mm                     | 1.25                                  | 550  | 1 200  | 3 600  |
| No. 4                         | 4.75 mm                    | 1.5                                   | 325  | 730  | 2 000  |
| No. 10                        | 2.00 mm                    | 2                                     | 180  | 410  | 1 000  |
| No. 20                        | 850 µm                     | 3                                     | 115  | 260  | 800  |
| No. 40                        | 425 µm                     | 4                                     | 75   | 170  | 500  |
| No. 60                        | 250 µm                     | 5                                     | 60   | 140  | 400  |
| No. 100                       | 150 µm                     | 6                                     | 40   | 90   | 300  |
| No. 140                       | 106 µm                     | 6                                     | 30   | 70   | 200  |
| No. 200                       | 75 µm                      | 6                                     | 20   | 50   | 100  |

<sup>A</sup> For sieve sizes other than those listed above, determine the surface area of the sieve(s) cloth being used in m<sup>2</sup> and divide this number by 0.028 m<sup>2</sup> (the approximate surface area of a 200-mm or 8-in. diameter sieve). Then multiply this area ratio by the masses listed in this column to form a column of acceptable masses for the different sieve area of interest. Round these values, so the significant digits are similar to those presented.

## 5. Prélèvement et conservation

Afin de réaliser l'analyse granulométrique par tamisage, les échantillons doivent être séchés à 105°C pour un minimum de 24h  $\pm$  4h afin de s'assurer qu'il n'y ait plus d'humidité dans l'échantillon. La présence d'humidité peut biaiser les résultats de l'analyse granulométrique.

Pour l'analyse granulométrique des particules de « grit », le prélèvement des échantillons doit se faire au point le plus proche possible de la purge du

dessableur. Il est important de s'assurer que l'échantillon recueillis est le plus frais possible afin d'éviter un changement des propriétés des particules. La fraction des particules de « grit » qui n'est pas utilisée pour le tamisage doit être conservée au réfrigérateur à 4°C. Les particules de « grit » doivent être prétraités dans les 24h suite à la prise de l'échantillon.

## 6. Matériel et équipement

L'analyse granulométrique par tamisage est réalisée en trois principales phases. La première consiste au prétraitement de l'échantillon, nécessaire au conditionnement de l'échantillon. Le prétraitement de l'échantillon permet d'éviter l'agglomération des particules entre elles, ce qui influence les résultats de l'analyse granulométrique. La seconde consiste à l'opération de tamisage en laboratoire à l'aide d'un agitateur mécanique (Rotap) (Figure 1). La troisième consiste au traitement des données à partir des mesures réalisées en laboratoire.



Figure 175 : Agitateur mécanique ROTAP

## **Prétraitement de l'échantillon**

- Tamis 75  $\mu\text{m}$
- Récipient en métal de dimension suffisante pour récupérer la totalité de l'échantillon à analyser
- Cuillère de plastique de grande dimension
- Plaque en plastique de couleur blanche
- Papier parchemin
- Étuve à 105°C
- Tuyau connecté au robinet

## **Tamissage de l'échantillon (Figure 2)**

- 14 tamis séparé en deux séries (voir Tableau 2)
- 2 plats pour tamis
- 2 couvercles pour tamis
- Agitateur mécanique (Rotap)
- Bol de dimension suffisante pour contenir la totalité de l'échantillon de 300-500g.
- Balance électronique de précision 0,01 g
- Papier carton brun (1m X 1m)
- Pinceau pour tamis
- Brosse pour tamis
- Spatule



Figure 276 : Équipement de tamisage

Tableau 2 : Séries de tamis utilisé pour le tamisage

| Série de tamis #1             |   | Série de tamis #2             |   |
|-------------------------------|---|-------------------------------|---|
| Taille des mailles<br>(mesh*) | Taille des mailles<br>( $\mu\text{m}$ ) | Taille des mailles<br>(mesh*) | Taille des mailles<br>( $\mu\text{m}$ ) |
| .525 pouce                    | 13 200                                  | 18                            | 1 000                                   |
| 0.375 pouce                   | 9 500                                   | 30                            | 600                                     |
| 3                             | 6 700                                   | 50                            | 300                                     |
| 4                             | 4 750                                   | 70                            | 212                                     |
| 6                             | 3 350                                   | 100                           | 150                                     |
| 8                             | 2 360                                   | 140                           | 106                                     |
| 14                            | 1 400                                   | 200                           | 75                                      |
| Plat                          | 0                                       | Plat                          | 0                                       |

\*Un mesh est le nombre d'ouverture dans un pouce carré

## 7. Protocole analytique

### 7.1 Prétraitement de l'échantillon (Pour analyse des particules de « grit »)

1. Installer une plaque de plastique blanche au fond de l'évier sans boucher ou empêcher l'eau de s'évacuer.
2. Mettre une portion de 100g d'échantillon de « grit » frais à l'aide de la cuillère de plastique prévue à cet effet dans le tamis de 75  $\mu\text{m}$ .
3. Nettoyer les particules à l'aide d'un tuyau connectée au robinet. La pression d'eau doit être le plus faible possible pour permettre aux particules de rouler sur le tamis.
4. Recouvrir le récipient de métal de papier parchemin et verser le contenu du tamis lorsqu'il n'y a plus aucune coloration dans l'eau passant le tamis. La planche de plastique blanche permet de mieux observer les variations de couleurs durant le lavage.
5. Répéter les étapes 2 à 4 jusqu'à ce qu'il y ait environ 600-800g d'échantillon dans le récipient de métal.
6. Insérer l'échantillon lavé dans l'étuve à 105°C pour l'étape de séchage. Le papier parchemin aide à éviter que les particules se collent aux parois du récipient.
7. Laisser sécher l'échantillon pour une durée de  $24 \pm 4\text{h}$  ou jusqu'à ce que l'échantillon soit sec. L'air sortant de l'étuve doit être évacué afin de diminuer les odeurs émises par le séchage des particules de « grit ».

## 7.2 Tamisage de l'échantillon

8. Verser le contenu du récipient de métal au centre d'un papier carton brun de 1m X 1m.
9. Prendre un coin du papier brun et l'apporter jusqu'à son côté opposé et faire de même en sens inverse.
10. Répéter avec les deux autres coins.
11. Répéter les étapes 2 et 3 (20x).
12. Peser le bol vide qui contiendra l'échantillon et tarer la balance.
13. Récupérer toutes les particules, incluant les particules fines sur le papier carton brun à l'aide du pinceau et les mettre dans le bol. Peser la masse totale de l'échantillon.
14. Installer et ajuster sur l'agitateur mécanique Rotap la première série de tamis, les plus grossiers, comprenant les tamis avec un plat et un couvercle.
15. Verser la totalité de l'échantillon dans la série de tamis. À l'aide du pinceau récupérer toutes les particules fines ayant pu coller aux parois du bol.
16. Ajuster la durée de brassage à 15 minutes sur le Rotap.
17. Retirer les tamis à la fin du brassage et installer et ajuster la deuxième série de tamis avec un couvercle et un plat.
18. Verser le contenu du plat de la première série de tamis dans la deuxième série de tamis en récupérant toutes les particules fines ayant pu coller aux parois du plat à l'aide du pinceau.
19. Ajuster la durée de brassage à 15 minutes sur le Rotap.

20. Peser chacune des fractions retenues sur chacun des tamis de la première série. Afin de récupérer toutes les particules qui peuvent être prises entre les mailles des tamis, il est recommandé d'utiliser une brosse prévue à cet effet afin de les déloger.

21. Identifier chacune des fractions et leur tamis correspondant.

22. Répéter les étapes 20, 21 et 22 pour la deuxième série de tamis.

### **7.3 Commentaires**

Le tamisage d'un échantillon de « grit » permet de séparer physiquement les particules selon des classes de tailles de particules. Ce faisant, il est possible de réaliser des essais sur chacune des fractions retenues afin d'évaluer le pourcentage de matière volatile et inorganique.

Pour ce faire, il est nécessaire de conserver une portion de chacune des fractions et de les transférer dans des coupelles en aluminium. Pour les fractions grandement organiques, il est important de ne pas mettre plus de 3-4 g de matériel pour l'évaluation de la fraction en matière volatile et inorganique.

## **8. Calculs et expression des résultats**

### **8.1 Distribution de la taille des particules**

L'ensemble des calculs ainsi que le tracé de la courbe de distribution de la taille des particules sont réalisés au moyen d'une feuille de calcul Excel : « Granulométrie V1.0 ». Les données à saisir sont représentées par des cases bleutés dans le fichier et les calculs sont effectués automatiquement dans la feuille. La feuille de calcul est présentée à la Figure 3.

|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| <b>Masse initiale(g)</b> | <b>337,8</b> |
|--------------------------|--------------|

| Sieve<br># | Microns  |       | GRANULOMÉTRIE           |                            |                            |                             |   |
|------------|----------|-------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---|
|            | um       | mm    | Masse<br>retenue<br>(g) | Masse<br>cumulative<br>(g) | Pourcentage<br>retenu<br>% | Pourcentage<br>passant<br>% | Pourcentage<br>retenu<br>cumulatif<br>% |
|            | 0.53 in. | 13200 | 13,2                    | 6,2                        | 6,2                        | 1,85%                       | 98,15%                                  |
| 3/8 in.    | 9500     | 9,5   | 0,0                     | 6,2                        | 0,00%                      | 98,15%                      | 1,85%                                   |
| 3          | 6700     | 6,7   | 2,1                     | 8,4                        | 0,63%                      | 97,52%                      | 2,48%                                   |
| 4          | 4750     | 4,75  | 3,3                     | 11,6                       | 0,96%                      | 96,56%                      | 3,44%                                   |
| 6          | 3350     | 3,35  | 4,8                     | 16,4                       | 1,42%                      | 95,13%                      | 4,87%                                   |
| 8          | 2360     | 2,36  | 8,0                     | 24,4                       | 2,39%                      | 92,75%                      | 7,25%                                   |
| 14         | 1400     | 1,4   | 27,0                    | 51,5                       | 8,02%                      | 84,73%                      | 15,27%                                  |
| 18         | 1000     | 1     | 26,7                    | 78,2                       | 7,92%                      | 76,81%                      | 23,19%                                  |
| 30         | 600      | 0,6   | 53,6                    | 131,7                      | 15,89%                     | 60,92%                      | 39,08%                                  |
| 50         | 300      | 0,3   | 107,6                   | 239,3                      | 31,92%                     | 29,00%                      | 71,00%                                  |
| 70         | 212      | 0,212 | 54,8                    | 294,2                      | 16,26%                     | 12,74%                      | 87,26%                                  |
| 100        | 150      | 0,15  | 35,2                    | 329,4                      | 10,44%                     | 2,30%                       | 97,70%                                  |
| 140        | 106      | 0,106 | 6,8                     | 336,2                      | 2,02%                      | 0,28%                       | 99,72%                                  |
| 200        | 75       | 0,075 | 0,6                     | 336,8                      | 0,18%                      | 0,10%                       | 99,90%                                  |
| plat       | <75      | 0,075 | 0,3                     | 337,1                      | 0,10%                      | 0,00%                       | 100,00%                                 |

100,0%

|                        |               |
|------------------------|---------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>337,1</b>  |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>-0,22%</b> |

Figure 377 : Feuille de calcul des essais granulométriques par tamisage

À partir des résultats de masse cumulée en fonction de la taille des particules, il est possible de produire une courbe de distribution de la taille des particules. La distribution de la taille des particules est présentée selon une courbe avec échelle logarithmique. La Figure 4 présente un exemple d'une distribution de la taille des particules pour un échantillon de « grit » en benne par temps sec.

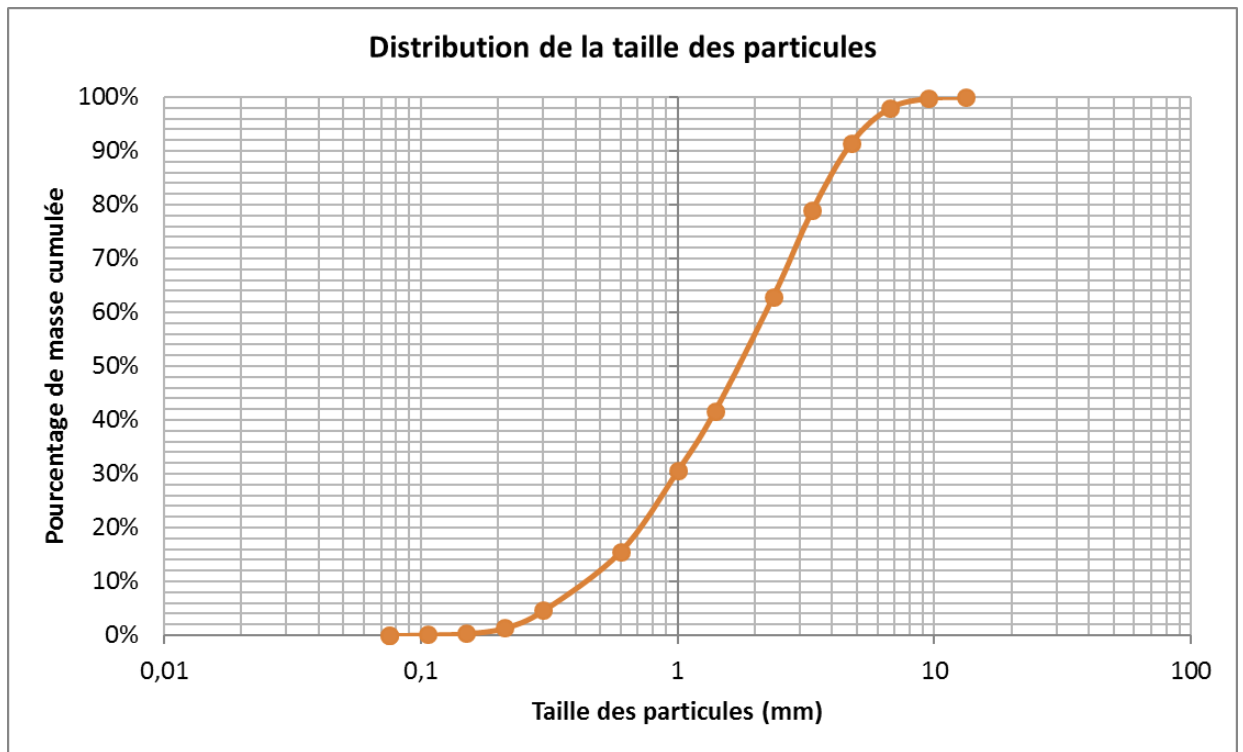


Figure 478 : Distribution de la taille des particules pour un échantillon de « grit » en benne par temps sec

## 9. Références

- HOLTZ, R. D. & KOVACS, W. D. 1991. *Introduction à la géotechnique*, Presses inter Polytechnique, Montréal, QC, Canada. pp. 808
- MIHELICIC, J. R. & ZIMMERMAN, J. B. 2009. *Environmental Engineering: Fundamentals, Sustainability, Design*, Wiley, New York, USA. pp. 695
- REDDY, M. P. & PAGILLA, K. 2010. *Integrated Methods for Wastewater Treatment Plant Upgrading and Optimization*, Alexandria, VA, USA. pp. 314

## **ANNEXE D : Caractérisation des particules retenues dans la benne à sable**

## Caractérisation de la taille et de la composition des particules

Saint-Nicolas

Date 01-avr-16

**Masse initiale (g)**      **337,8**

| Sieve    | Microns |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|---------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um      | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200   | 13,2  | 6,2           | 6,2              | 1,85%              | 98,15%              | 1,85%                        |
| 3/8 in.  | 9500    | 9,5   | 0,0           | 6,2              | 0,00%              | 98,15%              | 1,85%                        |
| 3        | 6700    | 6,7   | 2,1           | 8,4              | 0,63%              | 97,52%              | 2,48%                        |
| 4        | 4750    | 4,75  | 3,3           | 11,6             | 0,96%              | 96,56%              | 3,44%                        |
| 6        | 3350    | 3,35  | 4,8           | 16,4             | 1,42%              | 95,13%              | 4,87%                        |
| 8        | 2360    | 2,36  | 8,0           | 24,4             | 2,39%              | 92,75%              | 7,25%                        |
| 14       | 1400    | 1,4   | 27,0          | 51,5             | 8,02%              | 84,73%              | 15,27%                       |
| 18       | 1000    | 1     | 26,7          | 78,2             | 7,92%              | 76,81%              | 23,19%                       |
| 30       | 600     | 0,6   | 53,6          | 131,7            | 15,89%             | 60,92%              | 39,08%                       |
| 50       | 300     | 0,3   | 107,6         | 239,3            | 31,92%             | 29,00%              | 71,00%                       |
| 70       | 212     | 0,212 | 54,8          | 294,2            | 16,26%             | 12,74%              | 87,26%                       |
| 100      | 150     | 0,15  | 35,2          | 329,4            | 10,44%             | 2,30%               | 97,70%                       |
| 140      | 106     | 0,106 | 6,8           | 336,2            | 2,02%              | 0,28%               | 99,72%                       |
| 200      | 75      | 0,075 | 0,6           | 336,8            | 0,18%              | 0,10%               | 99,90%                       |
| plat     | <75     | 0,075 | 0,3           | 337,1            | 0,10%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |               |
|------------------------|---------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>337,1</b>  |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>-0,21%</b> |

Saint-Nicolas - composition

|      |           |
|------|-----------|
| Date | 01-avr-16 |
|------|-----------|

| MeS     | MVeS   | MleS   | MleS | MVeS | Densité<br>estimée | Masse<br>MleS par<br>fraction |
|---------|--------|--------|------|------|--------------------|-------------------------------|
| (mg)    | (mg)   | (mg)   | %    | %    |                    | (mg)                          |
| 6251,4  | 56,0   | 6195,4 | 99%  | 1%   | 2,64               | 6,17                          |
| 2122,0  | 1001,4 | 1120,6 | 53%  | 47%  | 1,92               | 1,12                          |
| 3368,0  | 1404,1 | 1963,9 | 58%  | 42%  | 2,00               | 1,90                          |
| 4864,6  | 1862,4 | 3002,2 | 62%  | 38%  | 2,06               | 2,96                          |
| 8083,7  | 1813,8 | 6269,9 | 78%  | 22%  | 2,30               | 6,24                          |
| 5766,3  | 1529,3 | 4237,0 | 73%  | 27%  | 2,24               | 19,86                         |
| 6700,2  | 1444,4 | 5255,8 | 78%  | 22%  | 2,32               | 20,94                         |
| 10725,8 | 1836,5 | 8889,3 | 83%  | 17%  | 2,38               | 44,40                         |
| 8255,9  | 325,7  | 7930,2 | 96%  | 4%   | 2,59               | 103,36                        |
| 7913,8  | 116,7  | 7797,1 | 99%  | 1%   | 2,63               | 54,00                         |
| 4231,6  | 46,9   | 4184,7 | 99%  | 1%   | 2,63               | 34,81                         |
| 5059,2  | 79,1   | 4980,1 | 98%  | 2%   | 2,63               | 6,69                          |
| 596,7   | 38,0   | 558,7  | 94%  | 6%   | 2,55               | 0,56                          |
| 261,1   | 55,8   | 205,3  | 79%  | 21%  | 2,32               | 0,27                          |
|         |        |        |      |      | <b>Total :</b>     | <b>297,11</b>                 |
|         |        |        |      |      | <b>% MleS</b>      | <b>88%</b>                    |

Saint-Nicolas

Date 08-avr-16

**Masse initiale (g)** 164,4

| Sieve    | Microns |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|---------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um      | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200   | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500    | 9,5   | 1,6           | 1,6              | 0,97%              | 99,03%              | 0,97%                        |
| 3        | 6700    | 6,7   | 3,8           | 5,4              | 2,31%              | 96,72%              | 3,28%                        |
| 4        | 4750    | 4,75  | 10,3          | 15,7             | 6,25%              | 90,47%              | 9,53%                        |
| 6        | 3350    | 3,35  | 15,0          | 30,7             | 9,10%              | 81,37%              | 18,63%                       |
| 8        | 2360    | 2,36  | 15,9          | 46,6             | 9,65%              | 71,72%              | 28,28%                       |
| 14       | 1400    | 1,4   | 30,3          | 76,9             | 18,39%             | 53,34%              | 46,66%                       |
| 18       | 1000    | 1     | 23,3          | 100,2            | 14,14%             | 39,20%              | 60,80%                       |
| 30       | 600     | 0,6   | 24,3          | 124,5            | 14,75%             | 24,45%              | 75,55%                       |
| 50       | 300     | 0,3   | 26,2          | 150,7            | 15,90%             | 8,56%               | 91,44%                       |
| 70       | 212     | 0,212 | 9,0           | 159,7            | 5,46%              | 3,09%               | 96,91%                       |
| 100      | 150     | 0,15  | 4,0           | 163,7            | 2,43%              | 0,67%               | 99,33%                       |
| 140      | 106     | 0,106 | 0,6           | 164,3            | 0,36%              | 0,30%               | 99,70%                       |
| 200      | 75      | 0,075 | 0,3           | 164,6            | 0,18%              | 0,12%               | 99,88%                       |
| plat     | <75     | 0,075 | 0,2           | 164,8            | 0,12%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>164,8</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,27%</b> |

Saint-Nicolas - composition

|      |           |
|------|-----------|
| Date | 08-avr-16 |
|------|-----------|

| MeS    | MVeS   | MleS   | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|--------|--------|--------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)   | (mg)   | (mg)   | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -      | -      | -      | -    | -    |                 | -                       |
| 1553,2 | 1198,8 | 354,4  | 23%  | 77%  | 1,45            | 0,37                    |
| 3041,8 | 2526,5 | 515,3  | 17%  | 83%  | 1,36            | 0,64                    |
| 2919,0 | 2519,9 | 399,1  | 14%  | 86%  | 1,31            | 1,41                    |
| 3259,5 | 2688,5 | 571,0  | 18%  | 82%  | 1,37            | 2,63                    |
| 4128,6 | 3306,7 | 821,9  | 20%  | 80%  | 1,41            | 3,17                    |
| 3279,6 | 2398,5 | 881,1  | 27%  | 73%  | 1,52            | 8,14                    |
| 4087,4 | 3260,5 | 826,9  | 20%  | 80%  | 1,41            | 4,71                    |
| 5460,3 | 2127,7 | 3332,6 | 61%  | 39%  | 2,05            | 14,83                   |
| 7728,2 | 428,1  | 7300,1 | 94%  | 6%   | 2,56            | 24,75                   |
| 4086,4 | 154,7  | 3931,7 | 96%  | 4%   | 2,59            | 8,66                    |
| 3816,4 | 190,7  | 3625,7 | 95%  | 5%   | 2,57            | 3,80                    |
| 556,0  | 100,8  | 455,2  | 82%  | 18%  | 2,37            | 0,49                    |
| 182,2  | 105,3  | 76,9   | 42%  | 58%  | 1,75            | 0,13                    |
| 167,4  | 117,0  | 50,4   | 30%  | 70%  | 1,57            | 0,06                    |
|        |        |        |      |      | <b>Total :</b>  | <b>73,78</b>            |
|        |        |        |      |      | <b>% MleS</b>   | <b>45%</b>              |

Saint-Nicolas

Date 27-avr-16

**Masse initiale (g)** 196,4

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 1,8           | 1,8              | 0,91%              | 99,09%              | 0,91%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 9,9           | 11,7             | 5,03%              | 94,06%              | 5,94%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 29,6          | 41,3             | 15,03%             | 79,02%              | 20,98%                       |
| 6        | 3350  | 3,35  | 36,5          | 77,8             | 18,54%             | 60,49%              | 39,51%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 30,2          | 108,0            | 15,34%             | 45,15%              | 54,85%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 38,9          | 146,9            | 19,76%             | 25,39%              | 74,61%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 19,0          | 165,9            | 9,65%              | 15,74%              | 84,26%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 14,8          | 180,7            | 7,52%              | 8,23%               | 91,77%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 9,4           | 190,1            | 4,77%              | 3,45%               | 96,55%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 4,0           | 194,1            | 2,03%              | 1,42%               | 98,58%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 1,8           | 195,9            | 0,91%              | 0,51%               | 99,49%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 0,4           | 196,3            | 0,20%              | 0,30%               | 99,70%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,3           | 196,6            | 0,15%              | 0,15%               | 99,85%                       |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,3           | 196,9            | 0,15%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>196,9</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,25%</b> |

Saint-Nicolas – composition

|      |           |
|------|-----------|
| Date | 27-avr-16 |
|------|-----------|

| MeS            | MVeS   | MleS   | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|----------------|--------|--------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)           | (mg)   | (mg)   | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -              | -      | -      | -    | -    |                 | -                       |
| 1342,8         | 1174,7 | 168,1  | 13%  | 87%  | 1,29            | 0,23                    |
| 2457,4         | 2134,0 | 323,4  | 13%  | 87%  | 1,30            | 1,30                    |
| 1882,6         | 1676,2 | 206,4  | 11%  | 89%  | 1,27            | 3,25                    |
| 3270,0         | 2936,5 | 333,5  | 10%  | 90%  | 1,26            | 3,72                    |
| 2144,4         | 1909,7 | 234,7  | 11%  | 89%  | 1,27            | 3,31                    |
| 3552,4         | 3073,4 | 479,0  | 13%  | 87%  | 1,31            | 5,25                    |
| 2185,9         | 1910,9 | 275,0  | 13%  | 87%  | 1,29            | 2,39                    |
| 3608,2         | 2616,4 | 991,8  | 27%  | 73%  | 1,53            | 4,07                    |
| 3829,7         | 624,4  | 3205,3 | 84%  | 16%  | 2,40            | 7,87                    |
| 3514,1         | 385,1  | 3129,0 | 89%  | 11%  | 2,48            | 3,56                    |
| 1511,6         | 275,2  | 1236,4 | 82%  | 18%  | 2,37            | 1,47                    |
| 402,9          | 183,8  | 219,1  | 54%  | 46%  | 1,94            | 0,22                    |
| 282,6          | 232,7  | 49,9   | 18%  | 82%  | 1,37            | 0,05                    |
| 203,3          | 176,4  | 26,9   | 13%  | 87%  | 1,31            | 0,04                    |
| <b>Total :</b> |        |        |      |      |                 | <b>36,72</b>            |
| <b>% MleS</b>  |        |        |      |      |                 | <b>19%</b>              |

Saint-Nicolas

Date 05-mai-16

**Masse initiale (g)** **341,4**

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 10,7          | 10,7             | 3,13%              | 96,87%              | 3,13%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 22,6          | 33,3             | 6,62%              | 90,25%              | 9,75%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 56,4          | 89,7             | 16,52%             | 73,73%              | 26,27%                       |
| 6        | 3350  | 3,35  | 54,6          | 144,3            | 15,99%             | 57,75%              | 42,25%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 45,6          | 189,9            | 13,35%             | 44,39%              | 55,61%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 60,8          | 250,7            | 17,80%             | 26,59%              | 73,41%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 32,2          | 282,9            | 9,43%              | 17,16%              | 82,84%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 26,0          | 308,9            | 7,61%              | 9,55%               | 90,45%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 19,1          | 328,0            | 5,59%              | 3,95%               | 96,05%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 8,7           | 336,7            | 2,55%              | 1,41%               | 98,59%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 3,6           | 340,3            | 1,05%              | 0,35%               | 99,65%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 0,7           | 341,0            | 0,20%              | 0,15%               | 99,85%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,5           | 341,5            | 0,15%              | 0,00%               | 100,00%                      |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,0           | 341,5            | 0,00%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>341,5</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,03%</b> |

Saint-Nicolas - composition

|      |           |
|------|-----------|
| Date | 05-mai-16 |
|------|-----------|

| MeS    | MVeS   | MleS   | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|--------|--------|--------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)   | (mg)   | (mg)   | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -      | -      | -      | -    | -    |                 | -                       |
| 1354,7 | 1207,9 | 146,8  | 11%  | 89%  | 1,27            | 1,16                    |
| 1521,7 | 1350,8 | 170,9  | 11%  | 89%  | 1,27            | 2,54                    |
| 2208,6 | 1925,3 | 283,3  | 13%  | 87%  | 1,30            | 7,23                    |
| 2538,5 | 2284,1 | 254,4  | 10%  | 90%  | 1,26            | 5,47                    |
| 2364,6 | 2052,3 | 312,3  | 13%  | 87%  | 1,30            | 6,02                    |
| 1916,6 | 1706,7 | 209,9  | 11%  | 89%  | 1,27            | 6,66                    |
| 1647,0 | 1477,0 | 170,0  | 10%  | 90%  | 1,26            | 3,32                    |
| 2042,0 | 1686,0 | 356,0  | 17%  | 83%  | 1,37            | 4,53                    |
| 1887,9 | 428,1  | 1459,8 | 77%  | 23%  | 2,30            | 14,77                   |
| 3045,8 | 244,3  | 2801,5 | 92%  | 8%   | 2,53            | 8,00                    |
| 1518,3 | 226,9  | 1291,4 | 85%  | 15%  | 2,42            | 3,06                    |
| 742,9  | 290,9  | 452,0  | 61%  | 39%  | 2,04            | 0,43                    |
| 490,9  | 386,0  | 104,9  | 21%  | 79%  | 1,43            | 0,11                    |
| 0,0    | 0,0    | 0,0    |      |      | 0,00            |                         |
|        |        |        |      |      | <b>Total :</b>  | <b>63,31</b>            |
|        |        |        |      |      | <b>% MleS</b>   | <b>19%</b>              |

Saint-Nicolas

Date 12-mai-16

**Masse initiale (g)** 426,5

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 6,5           | 6,5              | 1,52%              | 98,48%              | 1,52%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 22,4          | 28,9             | 5,24%              | 93,24%              | 6,76%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 68,6          | 97,5             | 16,05%             | 77,19%              | 22,81%                       |
| 6        | 3350  | 3,35  | 77,4          | 174,9            | 18,11%             | 59,08%              | 40,92%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 69,4          | 244,3            | 16,24%             | 42,84%              | 57,16%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 94,9          | 339,2            | 22,20%             | 20,64%              | 79,36%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 45,1          | 384,3            | 10,55%             | 10,08%              | 89,92%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 24,9          | 409,2            | 5,83%              | 4,26%               | 95,74%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 10,2          | 419,4            | 2,39%              | 1,87%               | 98,13%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 4,6           | 424,0            | 1,08%              | 0,80%               | 99,20%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 2,1           | 426,1            | 0,49%              | 0,30%               | 99,70%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 0,7           | 426,8            | 0,16%              | 0,14%               | 99,86%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,6           | 427,4            | 0,14%              | 0,00%               | 100,00%                      |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,0           | 427,4            | 0,00%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>427,4</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,21%</b> |

Saint-Nicolas - composition

Date 12-mai-16

| MeS            | MVeS   | MleS   | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|----------------|--------|--------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)           | (mg)   | (mg)   | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -              | -      | -      | -    | -    |                 | -                       |
| 1548,3         | 1384,9 | 163,4  | 11%  | 89%  | 1,26            | 0,69                    |
| 2728,4         | 2508,8 | 219,6  | 8%   | 92%  | 1,22            | 1,80                    |
| 1337,1         | 1247,1 | 90,0   | 7%   | 93%  | 1,20            | 4,62                    |
| 3301,9         | 3062,4 | 239,5  | 7%   | 93%  | 1,21            | 5,61                    |
| 1442,2         | 1302,9 | 139,3  | 10%  | 90%  | 1,25            | 6,70                    |
| 1666,2         | 1539,8 | 126,4  | 8%   | 92%  | 1,22            | 7,20                    |
| 2357,1         | 2208,3 | 148,8  | 6%   | 94%  | 1,20            | 2,85                    |
| 2486,6         | 2222,7 | 263,9  | 11%  | 89%  | 1,26            | 2,64                    |
| 2624,8         | 1494,7 | 1130,1 | 43%  | 57%  | 1,77            | 4,39                    |
| 2131,8         | 353,6  | 1778,2 | 83%  | 17%  | 2,39            | 3,84                    |
| 1402,4         | 401,8  | 1000,6 | 71%  | 29%  | 2,21            | 1,50                    |
| 505,3          | 288,8  | 216,5  | 43%  | 57%  | 1,76            | 0,30                    |
| 410,1          | 356,2  | 53,9   | 13%  | 87%  | 1,30            | 0,08                    |
| 0,0            | 0,0    | 0,0    |      |      |                 | 0,00                    |
| <b>Total :</b> |        |        |      |      |                 | <b>42,22</b>            |
| <b>% MleS</b>  |        |        |      |      |                 | <b>10%</b>              |

Ville de Québec

Date 16-mai-16

**Masse initiale (g)** 483,5

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 1,2           | 1,2              | 0,25%              | 99,75%              | 0,25%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 6,7           | 7,9              | 1,39%              | 98,36%              | 1,64%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 10,0          | 17,9             | 2,07%              | 96,29%              | 3,71%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 17,2          | 35,1             | 3,56%              | 92,73%              | 7,27%                        |
| 6        | 3350  | 3,35  | 26,9          | 62,0             | 5,57%              | 87,15%              | 12,85%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 34,2          | 96,2             | 7,09%              | 80,07%              | 19,93%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 58,0          | 154,2            | 12,02%             | 68,05%              | 31,95%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 28,9          | 183,1            | 5,99%              | 62,06%              | 37,94%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 57,1          | 240,2            | 11,83%             | 50,23%              | 49,77%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 87,3          | 327,5            | 18,09%             | 32,14%              | 67,86%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 62,6          | 390,1            | 12,97%             | 19,17%              | 80,83%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 60,1          | 450,2            | 12,45%             | 6,71%               | 93,29%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 25,1          | 475,3            | 5,20%              | 1,51%               | 98,49%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 7,1           | 482,4            | 1,47%              | 0,04%               | 99,96%                       |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,2           | 482,6            | 0,04%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |               |
|------------------------|---------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>482,6</b>  |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>-0,19%</b> |

Ville de Québec - composition

Date 16-mai-16

| MeS            | MVeS   | MleS   | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|----------------|--------|--------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)           | (mg)   | (mg)   | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -              | -      | -      | -    | -    |                 | -                       |
| 1080,6         | 628,0  | 452,6  | 42%  | 58%  | 1,75            | 2,81                    |
| 1539,3         | 1005,7 | 533,6  | 35%  | 65%  | 1,64            | 3,47                    |
| 1319,6         | 886,0  | 433,6  | 33%  | 67%  | 1,61            | 5,65                    |
| 2217,6         | 1561,9 | 655,7  | 30%  | 70%  | 1,56            | 7,95                    |
| 1274,0         | 904,9  | 369,1  | 29%  | 71%  | 1,55            | 9,91                    |
| 1727,3         | 1268,7 | 458,6  | 27%  | 73%  | 1,51            | 15,40                   |
| 1733,7         | 1183,0 | 550,7  | 32%  | 68%  | 1,59            | 9,18                    |
| 1825,0         | 839,8  | 985,2  | 54%  | 46%  | 1,94            | 30,82                   |
| 1585,7         | 188,7  | 1397,0 | 88%  | 12%  | 2,47            | 76,91                   |
| 3393,9         | 128,2  | 3265,7 | 96%  | 4%   | 2,59            | 60,24                   |
| 1638,5         | 40,8   | 1597,7 | 98%  | 2%   | 2,61            | 58,60                   |
| 3290,5         | 103,7  | 3186,8 | 97%  | 3%   | 2,60            | 24,31                   |
| 2271,3         | 110,9  | 2160,4 | 95%  | 5%   | 2,57            | 6,75                    |
| 201,7          | 66,6   | 135,1  | 67%  | 33%  | 2,14            | 0,13                    |
| <b>Total :</b> |        |        |      |      |                 | <b>312,14</b>           |
| <b>% MleS</b>  |        |        |      |      |                 | <b>65%</b>              |

Saint-Nicolas

Date 18-mai-16

**Masse initiale (g)** 511,4

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 7,0           | 7,0              | 1,37%              | 98,63%              | 1,37%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 29,3          | 36,3             | 5,73%              | 92,91%              | 7,09%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 79,6          | 115,9            | 15,56%             | 77,35%              | 22,65%                       |
| 6        | 3350  | 3,35  | 92,7          | 208,6            | 18,12%             | 59,23%              | 40,77%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 82,4          | 291,0            | 16,10%             | 43,13%              | 56,87%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 119,9         | 410,9            | 23,43%             | 19,70%              | 80,30%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 48,5          | 459,4            | 9,48%              | 10,22%              | 89,78%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 29,4          | 488,8            | 5,75%              | 4,48%               | 95,52%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 12,3          | 501,1            | 2,40%              | 2,07%               | 97,93%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 6,4           | 507,5            | 1,25%              | 0,82%               | 99,18%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 2,9           | 510,4            | 0,57%              | 0,25%               | 99,75%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 0,7           | 511,1            | 0,14%              | 0,12%               | 99,88%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,6           | 511,7            | 0,12%              | 0,00%               | 100,00%                      |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,0           | 511,7            | 0,00%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>511,7</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,06%</b> |

Saint-Nicolas - composition

|      |           |
|------|-----------|
| Date | 18-mai-16 |
|------|-----------|

| MeS    | MVeS   | MleS   | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|--------|--------|--------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)   | (mg)   | (mg)   | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -      | -      | -      | -    | -    |                 | -                       |
| 1478,1 | 1382,7 | 95,4   | 6%   | 94%  | 1,20            | 0,45                    |
| 1277,4 | 1211,6 | 65,8   | 5%   | 95%  | 1,18            | 1,51                    |
| 2645,6 | 2413,4 | 232,2  | 9%   | 91%  | 1,24            | 6,99                    |
| 2502,5 | 2323,5 | 179,0  | 7%   | 93%  | 1,21            | 6,63                    |
| 2568,9 | 2390,3 | 178,6  | 7%   | 93%  | 1,21            | 5,73                    |
| 2713,3 | 2502,9 | 210,4  | 8%   | 92%  | 1,22            | 9,30                    |
| 1674,7 | 1555,0 | 119,7  | 7%   | 93%  | 1,21            | 3,47                    |
| 2574,2 | 2165,2 | 409,0  | 16%  | 84%  | 1,35            | 4,67                    |
| 2821,1 | 1205,9 | 1615,2 | 57%  | 43%  | 1,99            | 7,04                    |
| 2750,6 | 369,6  | 2381,0 | 87%  | 13%  | 2,44            | 5,54                    |
| 1987,5 | 424,3  | 1563,2 | 79%  | 21%  | 2,32            | 2,28                    |
| 660,5  | 343,4  | 317,1  | 48%  | 52%  | 1,84            | 0,34                    |
| 513,1  | 421,3  | 91,8   | 18%  | 82%  | 1,38            | 0,11                    |
| 0,0    | 0,0    | 0,0    |      |      | 0,00            | 0,00                    |
|        |        |        |      |      | <b>Total :</b>  | <b>54,05</b>            |
|        |        |        |      |      | <b>% MleS</b>   | <b>11%</b>              |

Ville de Québec

Date 24-mai-16

**Masse initiale (g)** 282,4

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 4,5           | 4,5              | 1,59%              | 98,41%              | 1,59%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 7,8           | 12,3             | 2,76%              | 95,65%              | 4,35%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 22,1          | 34,4             | 7,81%              | 87,84%              | 12,16%                       |
| 6        | 3350  | 3,35  | 35,2          | 69,6             | 12,44%             | 75,40%              | 24,60%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 48,1          | 117,7            | 17,00%             | 58,40%              | 41,60%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 75,2          | 192,9            | 26,58%             | 31,81%              | 68,19%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 38,8          | 231,7            | 13,72%             | 18,10%              | 81,90%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 30,7          | 262,4            | 10,85%             | 7,25%               | 92,75%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 10,5          | 272,9            | 3,71%              | 3,53%               | 96,47%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 4,2           | 277,1            | 1,48%              | 2,05%               | 97,95%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 3,3           | 280,4            | 1,17%              | 0,88%               | 99,12%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 1,6           | 282,0            | 0,57%              | 0,32%               | 99,68%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,9           | 282,9            | 0,32%              | 0,00%               | 100,00%                      |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,0           | 282,9            | 0,00%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>282,9</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,18%</b> |

Ville de Québec - composition

Date 24-mai-16

| MeS            | MVeS   | MleS   | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|----------------|--------|--------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)           | (mg)   | (mg)   | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -              | -      | -      | -    | -    |                 | -                       |
| 1338,3         | 1078,4 | 259,9  | 19%  | 81%  | 1,40            | 0,87                    |
| 1495,4         | 1362,6 | 132,8  | 9%   | 91%  | 1,24            | 0,69                    |
| 2108,8         | 1817,2 | 291,6  | 14%  | 86%  | 1,31            | 3,06                    |
| 3084,3         | 2733,0 | 351,3  | 11%  | 89%  | 1,28            | 4,01                    |
| 1225,7         | 1096,4 | 129,3  | 11%  | 89%  | 1,26            | 5,07                    |
| 2116,0         | 1932,3 | 183,7  | 9%   | 91%  | 1,23            | 6,53                    |
| 3016,9         | 2852,6 | 164,3  | 5%   | 95%  | 1,18            | 2,11                    |
| 2131,4         | 1937,0 | 194,4  | 9%   | 91%  | 1,24            | 2,80                    |
| 1905,7         | 899,4  | 1006,3 | 53%  | 47%  | 1,92            | 5,54                    |
| 3738,0         | 296,5  | 3441,5 | 92%  | 8%   | 2,53            | 3,87                    |
| 2626,4         | 132,7  | 2493,7 | 95%  | 5%   | 2,57            | 3,13                    |
| 1360,5         | 208,3  | 1152,2 | 85%  | 15%  | 2,41            | 1,36                    |
| 868,8          | 259,4  | 609,4  | 70%  | 30%  | 2,19            | 0,63                    |
| 0,0            | 0,0    | 0,0    |      |      | 0,00            | 0,00                    |
| <b>Total :</b> |        |        |      |      |                 | <b>39,68</b>            |
| <b>% MleS</b>  |        |        |      |      |                 | <b>14%</b>              |

Saint-Nicolas

Date 17-juin-16

**Masse initiale (g)** 385,0

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 7,9           | 7,9              | 2,05%              | 97,95%              | 2,05%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 21,7          | 29,6             | 5,63%              | 92,33%              | 7,67%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 48,0          | 77,6             | 12,44%             | 79,88%              | 20,12%                       |
| 6        | 3350  | 3,35  | 56,1          | 133,7            | 14,54%             | 65,34%              | 34,66%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 55,3          | 189,0            | 14,34%             | 51,00%              | 49,00%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 74,6          | 263,6            | 19,34%             | 31,66%              | 68,34%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 39,8          | 303,4            | 10,32%             | 21,34%              | 78,66%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 38,0          | 341,4            | 9,85%              | 11,49%              | 88,51%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 30,6          | 372,0            | 7,93%              | 3,55%               | 96,45%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 9,5           | 381,5            | 2,46%              | 1,09%               | 98,91%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 3,0           | 384,5            | 0,78%              | 0,31%               | 99,69%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 0,7           | 385,2            | 0,18%              | 0,13%               | 99,87%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,5           | 385,7            | 0,13%              | 0,00%               | 100,00%                      |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,0           | 385,7            | 0,00%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>385,7</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,18%</b> |

Saint-Nicolas - composition

|      |            |
|------|------------|
| Date | 17-juin-16 |
|------|------------|

| MeS            | MVeS   | MleS   | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|----------------|--------|--------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)           | (mg)   | (mg)   | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -              | -      | -      | -    | -    |                 |                         |
| 3412,8         | 610,5  | 2802,3 | 82%  | 18%  | 2,37            |                         |
| 2228,3         | 1853,7 | 374,6  | 17%  | 83%  | 1,36            | 3,65                    |
| 2835,5         | 2494,5 | 341,0  | 12%  | 88%  | 1,29            | 5,77                    |
| 1746,3         | 1473,2 | 273,1  | 16%  | 84%  | 1,34            | 8,77                    |
| 2517,5         | 2089,6 | 427,9  | 17%  | 83%  | 1,36            | 9,40                    |
| 4047,1         | 3410,2 | 636,9  | 16%  | 84%  | 1,34            | 11,74                   |
| 4172,9         | 3553,9 | 619,0  | 15%  | 85%  | 1,33            | 5,90                    |
| 2312,2         | 1494,1 | 818,1  | 35%  | 65%  | 1,65            | 13,45                   |
| 2482,3         | 606,0  | 1876,3 | 76%  | 24%  | 2,27            | 23,13                   |
| 2890,7         | 282,9  | 2607,8 | 90%  | 10%  | 2,50            | 8,57                    |
| 2668,1         | 378,6  | 2289,5 | 86%  | 14%  | 2,43            | 2,57                    |
| 517,6          | 213,3  | 304,3  | 59%  | 41%  | 2,01            | 0,41                    |
| 373,7          | 284,5  | 89,2   | 24%  | 76%  | 1,47            | 0,12                    |
| 0,0            | 0,0    | 0,0    |      |      |                 | 0,00                    |
| <b>Total :</b> |        |        |      |      |                 | <b>93,49</b>            |
| <b>% MleS</b>  |        |        |      |      |                 | <b>24%</b>              |

Saint-Nicolas –Triplicata1

Date 13-juillet-16

**Masse initiale (g)** 429,4

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 1,1           | 1,1              | 0,26%              | 99,74%              | 0,26%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 7,9           | 9,0              | 1,83%              | 97,91%              | 2,09%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 27,9          | 36,9             | 6,47%              | 91,44%              | 8,56%                        |
| 6        | 3350  | 3,35  | 53,8          | 90,7             | 12,48%             | 78,96%              | 21,04%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 69,0          | 159,7            | 16,01%             | 62,96%              | 37,04%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 91,6          | 251,3            | 21,25%             | 41,71%              | 58,29%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 48,2          | 299,5            | 11,18%             | 30,53%              | 69,47%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 64,4          | 363,9            | 14,94%             | 15,59%              | 84,41%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 47,3          | 411,2            | 10,97%             | 4,62%               | 95,38%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 13,9          | 425,1            | 3,22%              | 1,39%               | 98,61%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 4,4           | 429,5            | 1,02%              | 0,37%               | 99,63%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 1,1           | 430,6            | 0,26%              | 0,12%               | 99,88%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,5           | 431,1            | 0,12%              | 0,00%               | 100,00%                      |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,0           | 431,1            | 0,00%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>431,1</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,40%</b> |

Saint-Nicolas –Triplicata2

Date 13-juillet-16

**Masse initiale (g)** 400,8

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 3,0           | 3,0              | 0,75%              | 99,25%              | 0,75%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 8,1           | 11,1             | 2,01%              | 97,24%              | 2,76%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 24,8          | 35,9             | 6,17%              | 91,07%              | 8,93%                        |
| 6        | 3350  | 3,35  | 50,0          | 85,9             | 12,43%             | 78,64%              | 21,36%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 63,6          | 149,5            | 15,82%             | 62,82%              | 37,18%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 84,9          | 234,4            | 21,11%             | 41,71%              | 58,29%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 45,1          | 279,5            | 11,22%             | 30,49%              | 69,51%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 58,6          | 338,1            | 14,57%             | 15,92%              | 84,08%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 44,7          | 382,8            | 11,12%             | 4,80%               | 95,20%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 13,6          | 396,4            | 3,38%              | 1,42%               | 98,58%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 4,3           | 400,7            | 1,07%              | 0,35%               | 99,65%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 1,1           | 401,8            | 0,27%              | 0,07%               | 99,93%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,3           | 402,1            | 0,07%              | 0,00%               | 100,00%                      |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,0           | 402,1            | 0,00%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>402,1</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,32%</b> |

Saint-Nicolas –Triplicata3

Date 13-juillet-16

**Masse initiale (g)** 533,1

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 3,7           | 3,7              | 0,69%              | 99,31%              | 0,69%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 9,3           | 13,0             | 1,74%              | 97,57%              | 2,43%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 34,3          | 47,3             | 6,42%              | 91,15%              | 8,85%                        |
| 6        | 3350  | 3,35  | 63,0          | 110,3            | 11,79%             | 79,36%              | 20,64%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 83,7          | 194,0            | 15,66%             | 63,70%              | 36,30%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 117,5         | 311,5            | 21,99%             | 41,71%              | 58,29%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 61,1          | 372,6            | 11,43%             | 30,28%              | 69,72%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 79,8          | 452,4            | 14,93%             | 15,34%              | 84,66%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 57,2          | 509,6            | 10,70%             | 4,64%               | 95,36%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 17,3          | 526,9            | 3,24%              | 1,40%               | 98,60%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 5,7           | 532,6            | 1,07%              | 0,34%               | 99,66%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 1,5           | 534,1            | 0,28%              | 0,06%               | 99,94%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,3           | 534,4            | 0,06%              | 0,00%               | 100,00%                      |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,0           | 534,4            | 0,00%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>534,4</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,24%</b> |

Ville de Québec –  
 Triplicata1

Date 20-juillet-16

|                           |              |
|---------------------------|--------------|
| <b>Masse initiale (g)</b> | <b>345,0</b> |
|---------------------------|--------------|

| Sieve    |       |           | Masse retenu<br>e | Masse cumulativ<br>e | Pourcentag<br>e retenu | Pourcentag<br>e passant | Pourcentag<br>e retenu<br>cumulatif |
|----------|-------|-----------|-------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| #        | um    | mm        | (g)               | (g)                  | %                      | %                       | %                                   |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2      | 0,0               | 0,0                  | 0,00%                  | 100,00%                 | 0,00%                               |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5       | 0,0               | 0,0                  | 0,00%                  | 100,00%                 | 0,00%                               |
| 3        | 6700  | 6,7       | 2,2               | 2,2                  | 0,64%                  | 99,36%                  | 0,64%                               |
| 4        | 4750  | 4,75      | 6,1               | 8,3                  | 1,76%                  | 97,60%                  | 2,40%                               |
| 6        | 3350  | 3,35      | 25,5              | 33,8                 | 7,38%                  | 90,22%                  | 9,78%                               |
| 8        | 2360  | 2,36      | 48,0              | 81,8                 | 13,88%                 | 76,34%                  | 23,66%                              |
| 14       | 1400  | 1,4       | 87,5              | 169,3                | 25,31%                 | 51,03%                  | 48,97%                              |
| 18       | 1000  | 1         | 57,0              | 226,3                | 16,49%                 | 34,54%                  | 65,46%                              |
| 30       | 600   | 0,6       | 61,2              | 287,5                | 17,70%                 | 16,84%                  | 83,16%                              |
| 50       | 300   | 0,3       | 26,3              | 313,8                | 7,61%                  | 9,23%                   | 90,77%                              |
| 70       | 212   | 0,21<br>2 | 16,3              | 330,1                | 4,72%                  | 4,51%                   | 95,49%                              |
| 100      | 150   | 0,15      | 11,6              | 341,7                | 3,36%                  | 1,16%                   | 98,84%                              |
| 140      | 106   | 0,10<br>6 | 3,3               | 345,0                | 0,95%                  | 0,20%                   | 99,80%                              |
| 200      | 75    | 0,07<br>5 | 0,6               | 345,6                | 0,17%                  | 0,03%                   | 99,97%                              |
| plat     | <75   | 0,07<br>5 | 0,1               | 345,7                | 0,03%                  | 0,00%                   | 100,00%                             |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>345,7</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,20%</b> |

Ville de Québec–  
Triplicata2

Date 20-juillet-16

|                           |              |
|---------------------------|--------------|
| <b>Masse initiale (g)</b> | <b>301,4</b> |
|---------------------------|--------------|

| Sieve    |       |           | Masse retenu<br>e | Masse cumulativ<br>e | Pourcentag<br>e retenu | Pourcentag<br>e passant | Pourcentag<br>e retenu<br>cumulatif |
|----------|-------|-----------|-------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| #        | um    | mm        | (g)               | (g)                  | %                      | %                       | %                                   |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2      | 0,5               | 0,5                  | 0,17%                  | 99,83%                  | 0,17%                               |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5       | 0,6               | 1,1                  | 0,20%                  | 99,64%                  | 0,36%                               |
| 3        | 6700  | 6,7       | 1,2               | 2,3                  | 0,40%                  | 99,24%                  | 0,76%                               |
| 4        | 4750  | 4,75      | 5,9               | 8,2                  | 1,96%                  | 97,28%                  | 2,72%                               |
| 6        | 3350  | 3,35      | 21,5              | 29,7                 | 7,13%                  | 90,16%                  | 9,84%                               |
| 8        | 2360  | 2,36      | 41,8              | 71,5                 | 13,85%                 | 76,30%                  | 23,70%                              |
| 14       | 1400  | 1,4       | 75,4              | 146,9                | 24,99%                 | 51,31%                  | 48,69%                              |
| 18       | 1000  | 1         | 49,7              | 196,6                | 16,47%                 | 34,84%                  | 65,16%                              |
| 30       | 600   | 0,6       | 53,5              | 250,1                | 17,73%                 | 17,10%                  | 82,90%                              |
| 50       | 300   | 0,3       | 23,1              | 273,2                | 7,66%                  | 9,45%                   | 90,55%                              |
| 70       | 212   | 0,21<br>2 | 14,5              | 287,7                | 4,81%                  | 4,64%                   | 95,36%                              |
| 100      | 150   | 0,15      | 10,3              | 298,0                | 3,41%                  | 1,23%                   | 98,77%                              |
| 140      | 106   | 0,10<br>6 | 2,9               | 300,9                | 0,96%                  | 0,27%                   | 99,73%                              |
| 200      | 75    | 0,07<br>5 | 0,6               | 301,5                | 0,20%                  | 0,07%                   | 99,93%                              |
| plat     | <75   | 0,07<br>5 | 0,2               | 301,7                | 0,07%                  | 0,00%                   | 100,00%                             |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>301,7</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,10%</b> |

Ville de Québec –  
 Triplicata3

Date 20-juillet-16

|                           |              |
|---------------------------|--------------|
| <b>Masse initiale (g)</b> | <b>287,0</b> |
|---------------------------|--------------|

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 1,3           | 1,3              | 0,45%              | 99,55%              | 0,45%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 0,9           | 2,2              | 0,31%              | 99,23%              | 0,77%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 4,8           | 7,0              | 1,67%              | 97,56%              | 2,44%                        |
| 6        | 3350  | 3,35  | 19,4          | 26,4             | 6,76%              | 90,80%              | 9,20%                        |
| 8        | 2360  | 2,36  | 38,3          | 64,7             | 13,34%             | 77,46%              | 22,54%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 75,6          | 140,3            | 26,33%             | 51,13%              | 48,87%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 48,1          | 188,4            | 16,75%             | 34,38%              | 65,62%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 52,0          | 240,4            | 18,11%             | 16,27%              | 83,73%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 21,5          | 261,9            | 7,49%              | 8,78%               | 91,22%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 12,7          | 274,6            | 4,42%              | 4,35%               | 95,65%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 9,0           | 283,6            | 3,13%              | 1,22%               | 98,78%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 2,7           | 286,3            | 0,94%              | 0,28%               | 99,72%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,6           | 286,9            | 0,21%              | 0,07%               | 99,93%                       |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,2           | 287,1            | 0,07%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>287,1</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,03%</b> |

Ville de Québec

Date 21-sept-16

**Masse initiale (g)** 422,3

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 2,9           | 2,9              | 0,69%              | 99,31%              | 0,69%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 11,9          | 14,8             | 2,82%              | 96,50%              | 3,50%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 17,8          | 32,6             | 4,22%              | 92,28%              | 7,72%                        |
| 6        | 3350  | 3,35  | 37,1          | 69,7             | 8,79%              | 83,50%              | 16,50%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 50,8          | 120,5            | 12,03%             | 71,47%              | 28,53%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 78,1          | 198,6            | 18,49%             | 52,97%              | 47,03%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 54,6          | 253,2            | 12,93%             | 40,04%              | 59,96%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 53,6          | 306,8            | 12,69%             | 27,35%              | 72,65%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 52,4          | 359,2            | 12,41%             | 14,94%              | 85,06%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 31,1          | 390,3            | 7,36%              | 7,58%               | 92,42%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 23,0          | 413,3            | 5,45%              | 2,13%               | 97,87%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 7,4           | 420,7            | 1,75%              | 0,38%               | 99,62%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 1,3           | 422,0            | 0,31%              | 0,07%               | 99,93%                       |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,3           | 422,3            | 0,07%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>422,3</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,00%</b> |

Ville de Québec – composition

|      |            |
|------|------------|
| Date | 21-sept-16 |
|------|------------|

| MeS            | MVeS   | MleS   | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|----------------|--------|--------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)           | (mg)   | (mg)   | %    | %    |                 | (mg)                    |
| 0,0            | 0,0    | 0,0    |      |      |                 |                         |
| 1577,1         | 1299,2 | 277,9  | 18%  | 82%  | 1,37            | 0,51                    |
| 1393,8         | 1216,1 | 177,7  | 13%  | 87%  | 1,30            | 1,52                    |
| 2587,4         | 2124,9 | 462,5  | 18%  | 82%  | 1,38            | 3,18                    |
| 3633,5         | 2929,4 | 704,1  | 19%  | 81%  | 1,40            | 7,19                    |
| 3797,5         | 3092,2 | 705,3  | 19%  | 81%  | 1,39            | 9,43                    |
| 3467,1         | 2807,8 | 659,3  | 19%  | 81%  | 1,39            | 14,85                   |
| 3085,8         | 2536,4 | 549,4  | 18%  | 82%  | 1,38            | 9,72                    |
| 5687,4         | 3067,3 | 2620,1 | 46%  | 54%  | 1,81            | 24,69                   |
| 6627,5         | 1096,3 | 5531,2 | 83%  | 17%  | 2,39            | 43,73                   |
| 3604,2         | 174,7  | 3429,5 | 95%  | 5%   | 2,57            | 29,59                   |
| 4591,1         | 161,3  | 4429,8 | 96%  | 4%   | 2,60            | 22,19                   |
| 2819,2         | 97,1   | 2722,1 | 97%  | 3%   | 2,60            | 7,15                    |
| 1178,3         | 98,6   | 1079,7 | 92%  | 8%   | 2,52            | 1,19                    |
| 299,0          | 166,7  | 132,3  | 44%  | 56%  | 1,79            | 0,13                    |
| <b>Total :</b> |        |        |      |      |                 | <b>175,09</b>           |
| <b>% MleS</b>  |        |        |      |      |                 | <b>41%</b>              |

Saint-Nicolas

Date 12-oct-16

**Masse initiale (g)** 424,9

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 6,3           | 6,3              | 1,48%              | 98,52%              | 1,48%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 18,1          | 24,4             | 4,25%              | 94,27%              | 5,73%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 34,5          | 58,9             | 8,10%              | 86,17%              | 13,83%                       |
| 6        | 3350  | 3,35  | 53,7          | 112,6            | 12,61%             | 73,56%              | 26,44%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 61,0          | 173,6            | 14,32%             | 59,24%              | 40,76%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 82,0          | 255,6            | 19,25%             | 39,99%              | 60,01%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 45,6          | 301,2            | 10,71%             | 29,28%              | 70,72%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 49,3          | 350,5            | 11,58%             | 17,70%              | 82,30%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 50,3          | 400,8            | 11,81%             | 5,89%               | 94,11%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 17,7          | 418,5            | 4,16%              | 1,74%               | 98,26%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 6,0           | 424,5            | 1,41%              | 0,33%               | 99,67%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 0,9           | 425,4            | 0,21%              | 0,12%               | 99,88%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,2           | 425,6            | 0,05%              | 0,07%               | 99,93%                       |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,3           | 425,9            | 0,07%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>425,9</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,24%</b> |

Saint-Nicolas - composition

|      |           |
|------|-----------|
| Date | 12-oct-16 |
|------|-----------|

| MeS            | MVeS   | MleS   | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|----------------|--------|--------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)           | (mg)   | (mg)   | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -              | -      | -      | -    | -    |                 |                         |
| 6328,1         | 1714,6 | 4613,5 | 73%  | 27%  | 2,23            | 4,59                    |
| 3702,1         | 3147,5 | 554,6  | 15%  | 85%  | 1,33            | 2,71                    |
| 6800,6         | 5039,5 | 1761,1 | 26%  | 74%  | 1,50            | 8,93                    |
| 4480,9         | 3761,7 | 719,2  | 16%  | 84%  | 1,35            | 8,62                    |
| 6151,9         | 4016,3 | 2135,6 | 35%  | 65%  | 1,64            | 21,18                   |
| 5014,2         | 3714,4 | 1299,8 | 26%  | 74%  | 1,50            | 21,26                   |
| 8714,9         | 6543,5 | 2171,4 | 25%  | 75%  | 1,49            | 11,36                   |
| 8565,6         | 3245,6 | 5320,0 | 62%  | 38%  | 2,06            | 30,62                   |
| 9952,9         | 1137,7 | 8815,2 | 89%  | 11%  | 2,47            | 44,55                   |
| 7045,5         | 245,1  | 6800,4 | 97%  | 3%   | 2,60            | 17,08                   |
| 6006,2         | 321,3  | 5684,9 | 95%  | 5%   | 2,57            | 5,68                    |
| 910,8          | 200,8  | 710,0  | 78%  | 22%  | 2,31            | 0,70                    |
| 215,1          | 138,5  | 76,6   | 36%  | 64%  | 1,65            | 0,07                    |
| 285,5          | 229,5  | 56,0   | 20%  | 80%  | 1,40            | 0,06                    |
| <b>Total :</b> |        |        |      |      |                 | <b>177,42</b>           |
| <b>% MleS</b>  |        |        |      |      |                 | <b>42%</b>              |

Ville de Québec

Date 18-oct-16

**Masse initiale (g)** 396,9

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 2,4           | 2,4              | 0,61%              | 99,39%              | 0,61%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 4,7           | 7,1              | 1,19%              | 98,21%              | 1,79%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 5,6           | 12,7             | 1,41%              | 96,80%              | 3,20%                        |
| 6        | 3350  | 3,35  | 9,9           | 22,6             | 2,50%              | 94,30%              | 5,70%                        |
| 8        | 2360  | 2,36  | 19,4          | 42,0             | 4,90%              | 89,40%              | 10,60%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 41,7          | 83,7             | 10,52%             | 78,88%              | 21,12%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 41,4          | 125,1            | 10,45%             | 68,43%              | 31,57%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 93,9          | 219,0            | 23,69%             | 44,74%              | 55,26%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 118,3         | 337,3            | 29,85%             | 14,89%              | 85,11%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 36,7          | 374,0            | 9,26%              | 5,63%               | 94,37%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 18,1          | 392,1            | 4,57%              | 1,06%               | 98,94%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 3,6           | 395,7            | 0,91%              | 0,15%               | 99,85%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,4           | 396,1            | 0,10%              | 0,05%               | 99,95%                       |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,2           | 396,3            | 0,05%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>425,9</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,24%</b> |

Ville de Québec - composition

|      |           |
|------|-----------|
| Date | 18-oct-16 |
|------|-----------|

| MeS            | MVeS   | MleS    | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|----------------|--------|---------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)           | (mg)   | (mg)    | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -              | -      | -       | -    | -    |                 |                         |
| 2285,5         | 1639,3 | 646,2   | 28%  | 72%  | 1,54            | 0,68                    |
| 2860,6         | 1681,3 | 1179,3  | 41%  | 59%  | 1,74            | 1,94                    |
| 4901,8         | 3180,9 | 1720,9  | 35%  | 65%  | 1,64            | 1,97                    |
| 4749,1         | 1863,5 | 2885,6  | 61%  | 39%  | 2,04            | 6,02                    |
| 5592,3         | 3466,8 | 2125,5  | 38%  | 62%  | 1,69            | 7,37                    |
| 7118,8         | 3561,4 | 3557,4  | 50%  | 50%  | 1,87            | 20,84                   |
| 5966,4         | 2035,6 | 3930,8  | 66%  | 34%  | 2,12            | 27,28                   |
| 4403,9         | 670,0  | 3733,9  | 85%  | 15%  | 2,41            | 79,61                   |
| 11205,3        | 312,2  | 10893,1 | 97%  | 3%   | 2,61            | 115,00                  |
| 6363,6         | 146,1  | 6217,5  | 98%  | 2%   | 2,61            | 35,86                   |
| 11558,0        | 188,3  | 11369,7 | 98%  | 2%   | 2,62            | 17,81                   |
| 2679,0         | 71,3   | 2607,7  | 97%  | 3%   | 2,61            | 3,50                    |
| 437,2          | 35,8   | 401,4   | 92%  | 8%   | 2,52            | 0,37                    |
| 149,6          | 53,4   | 96,2    | 64%  | 36%  | 2,10            | 0,13                    |
| <b>Total :</b> |        |         |      |      |                 | <b>318,37</b>           |
| <b>% MleS</b>  |        |         |      |      |                 | <b>80%</b>              |

Saint-Nicolas

Date 18-oct-16

**Masse initiale (g)** 350,1

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 3,7           | 3,7              | 1,06%              | 98,94%              | 1,06%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 15,8          | 19,5             | 4,51%              | 94,43%              | 5,57%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 28,3          | 47,8             | 8,08%              | 86,36%              | 13,64%                       |
| 6        | 3350  | 3,35  | 39,2          | 87,0             | 11,19%             | 75,17%              | 24,83%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 48,3          | 135,3            | 13,78%             | 61,39%              | 38,61%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 72,9          | 208,2            | 20,80%             | 40,58%              | 59,42%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 51,1          | 259,3            | 14,58%             | 26,00%              | 74,00%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 42,7          | 302,0            | 12,19%             | 13,81%              | 86,19%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 27,1          | 329,1            | 7,73%              | 6,08%               | 93,92%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 12,8          | 341,9            | 3,65%              | 2,43%               | 97,57%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 6,6           | 348,5            | 1,88%              | 0,54%               | 99,46%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 1,3           | 349,8            | 0,37%              | 0,17%               | 99,83%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,4           | 350,2            | 0,11%              | 0,06%               | 99,94%                       |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,2           | 350,4            | 0,06%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>350,4</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,09%</b> |

Saint-Nicolas - composition

|      |           |
|------|-----------|
| Date | 18-oct-16 |
|------|-----------|

| MeS            | MVeS   | MleS    | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|----------------|--------|---------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)           | (mg)   | (mg)    | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -              | -      | -       | -    | -    |                 |                         |
| 2285,5         | 1639,3 | 646,2   | 28%  | 72%  | 1,54            | 0,68                    |
| 2860,6         | 1681,3 | 1179,3  | 41%  | 59%  | 1,74            | 1,94                    |
| 4901,8         | 3180,9 | 1720,9  | 35%  | 65%  | 1,64            | 1,97                    |
| 4749,1         | 1863,5 | 2885,6  | 61%  | 39%  | 2,04            | 6,02                    |
| 5592,3         | 3466,8 | 2125,5  | 38%  | 62%  | 1,69            | 7,37                    |
| 7118,8         | 3561,4 | 3557,4  | 50%  | 50%  | 1,87            | 20,84                   |
| 5966,4         | 2035,6 | 3930,8  | 66%  | 34%  | 2,12            | 27,28                   |
| 4403,9         | 670,0  | 3733,9  | 85%  | 15%  | 2,41            | 79,61                   |
| 11205,3        | 312,2  | 10893,1 | 97%  | 3%   | 2,61            | 115,00                  |
| 6363,6         | 146,1  | 6217,5  | 98%  | 2%   | 2,61            | 35,86                   |
| 11558,0        | 188,3  | 11369,7 | 98%  | 2%   | 2,62            | 17,81                   |
| 2679,0         | 71,3   | 2607,7  | 97%  | 3%   | 2,61            | 3,50                    |
| 437,2          | 35,8   | 401,4   | 92%  | 8%   | 2,52            | 0,37                    |
| 149,6          | 53,4   | 96,2    | 64%  | 36%  | 2,10            | 0,13                    |
| <b>Total :</b> |        |         |      |      |                 | <b>101,93</b>           |
| <b>% MleS</b>  |        |         |      |      |                 | <b>29%</b>              |

Ville de Québec

Date 21-oct-16

**Masse initiale (g) 543,8**

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 0,5           | 0,5              | 0,09%              | 99,91%              | 0,09%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 7,1           | 7,6              | 1,31%              | 98,60%              | 1,40%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 14,5          | 22,1             | 2,67%              | 95,93%              | 4,07%                        |
| 6        | 3350  | 3,35  | 33,9          | 56,0             | 6,23%              | 89,70%              | 10,30%                       |
| 8        | 2360  | 2,36  | 51,7          | 107,7            | 9,51%              | 80,19%              | 19,81%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 95,5          | 203,2            | 17,56%             | 62,63%              | 37,37%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 64,1          | 267,3            | 11,79%             | 50,84%              | 49,16%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 99,6          | 366,9            | 18,31%             | 32,53%              | 67,47%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 124,1         | 491,0            | 22,82%             | 9,71%               | 90,29%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 37,7          | 528,7            | 6,93%              | 2,78%               | 97,22%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 12,2          | 540,9            | 2,24%              | 0,53%               | 99,47%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 2,0           | 542,9            | 0,37%              | 0,17%               | 99,83%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 0,6           | 543,5            | 0,11%              | 0,06%               | 99,94%                       |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,3           | 543,8            | 0,06%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>543,8</b> |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>0,00%</b> |

Ville de Québec - composition

|      |           |
|------|-----------|
| Date | 21-oct-16 |
|------|-----------|

| MeS            | MVeS   | MleS    | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|----------------|--------|---------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)           | (mg)   | (mg)    | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -              | -      | -       | -    | -    |                 |                         |
| 594,9          | 445,6  | 149,3   | 25%  | 75%  | 1,49            | 0,13                    |
| 7172,6         | 1744,9 | 5427,7  | 76%  | 24%  | 2,27            | 5,39                    |
| 14262,3        | 1729,1 | 12533,2 | 88%  | 12%  | 2,46            | 12,74                   |
| 10998,0        | 1279,0 | 9719,0  | 88%  | 12%  | 2,47            | 29,96                   |
| 8980,3         | 1451,4 | 7528,9  | 84%  | 16%  | 2,40            | 43,34                   |
| 7540,4         | 1252,5 | 6287,9  | 83%  | 17%  | 2,39            | 79,64                   |
| 8220,7         | 1701,0 | 6519,7  | 79%  | 21%  | 2,33            | 50,84                   |
| 10476,3        | 773,7  | 9702,6  | 93%  | 7%   | 2,54            | 92,24                   |
| 14191,0        | 188,9  | 14002,1 | 99%  | 1%   | 2,63            | 122,45                  |
| 10490,3        | 159,1  | 10331,2 | 98%  | 2%   | 2,63            | 37,13                   |
| 10282,8        | 207,3  | 10075,5 | 98%  | 2%   | 2,62            | 11,95                   |
| 1891,2         | 127,1  | 1764,1  | 93%  | 7%   | 2,55            | 1,87                    |
| 538,4          | 102,1  | 436,3   | 81%  | 19%  | 2,36            | 0,49                    |
| 303,7          | 117,2  | 186,5   | 61%  | 39%  | 2,05            | 0,18                    |
| <b>Total :</b> |        |         |      |      |                 | <b>488,34</b>           |
| <b>% MleS</b>  |        |         |      |      |                 | <b>90%</b>              |

Saint-Nicolas

Date 21-oct-16

**Masse initiale (g)** 492,9

| Sieve    |       |       | Masse retenue | Masse cumulative | Pourcentage retenu | Pourcentage passant | Pourcentage retenu cumulatif |
|----------|-------|-------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| #        | um    | mm    | (g)           | (g)              | %                  | %                   | %                            |
| 0.53 in. | 13200 | 13,2  | 0,0           | 0,0              | 0,00%              | 100,00%             | 0,00%                        |
| 3/8 in.  | 9500  | 9,5   | 5,0           | 5,0              | 1,02%              | 98,98%              | 1,02%                        |
| 3        | 6700  | 6,7   | 12,9          | 17,9             | 2,62%              | 96,37%              | 3,63%                        |
| 4        | 4750  | 4,75  | 11,6          | 29,5             | 2,36%              | 94,01%              | 5,99%                        |
| 6        | 3350  | 3,35  | 17,6          | 47,1             | 3,57%              | 90,44%              | 9,56%                        |
| 8        | 2360  | 2,36  | 24,9          | 72,0             | 5,06%              | 85,38%              | 14,62%                       |
| 14       | 1400  | 1,4   | 69,0          | 141,0            | 14,01%             | 71,37%              | 28,63%                       |
| 18       | 1000  | 1     | 101,3         | 242,3            | 20,57%             | 50,80%              | 49,20%                       |
| 30       | 600   | 0,6   | 90,6          | 332,9            | 18,40%             | 32,41%              | 67,59%                       |
| 50       | 300   | 0,3   | 66,1          | 399,0            | 13,42%             | 18,98%              | 81,02%                       |
| 70       | 212   | 0,212 | 44,4          | 443,4            | 9,02%              | 9,97%               | 90,03%                       |
| 100      | 150   | 0,15  | 35,9          | 479,3            | 7,29%              | 2,68%               | 97,32%                       |
| 140      | 106   | 0,106 | 11,3          | 490,6            | 2,29%              | 0,39%               | 99,61%                       |
| 200      | 75    | 0,075 | 1,5           | 492,1            | 0,30%              | 0,08%               | 99,92%                       |
| plat     | <75   | 0,075 | 0,4           | 492,5            | 0,08%              | 0,00%               | 100,00%                      |

100,0%

|                        |               |
|------------------------|---------------|
| <b>Masse finale(g)</b> | <b>492,5</b>  |
| <b>Bilan de masse</b>  | <b>-0,08%</b> |

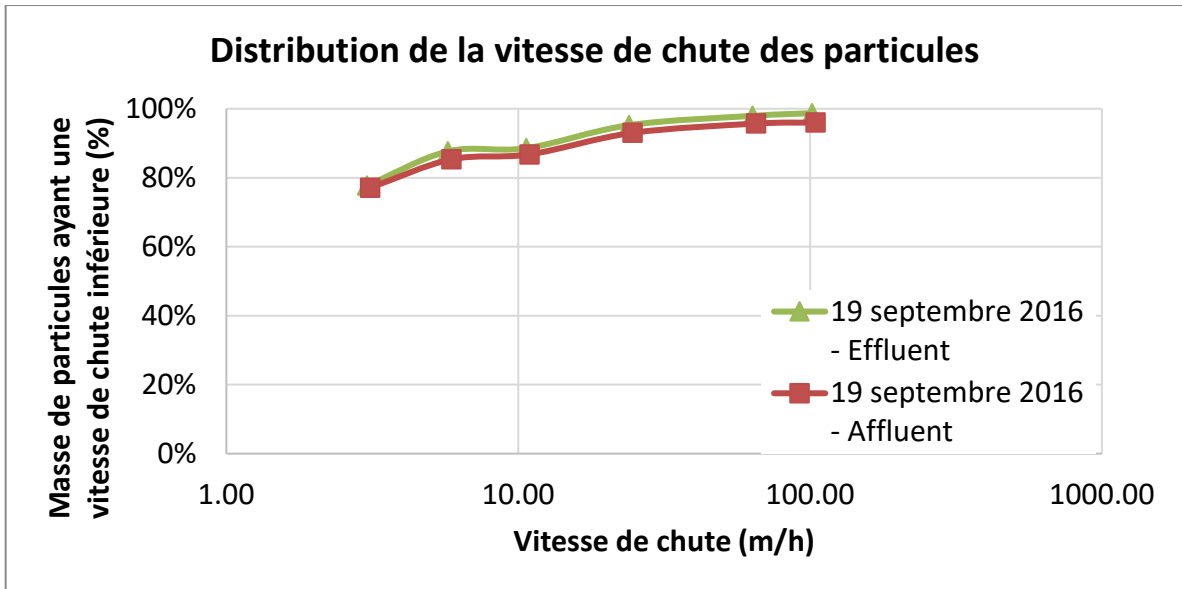
Saint-Nicolas - Composition

|      |           |
|------|-----------|
| Date | 21-oct-16 |
|------|-----------|

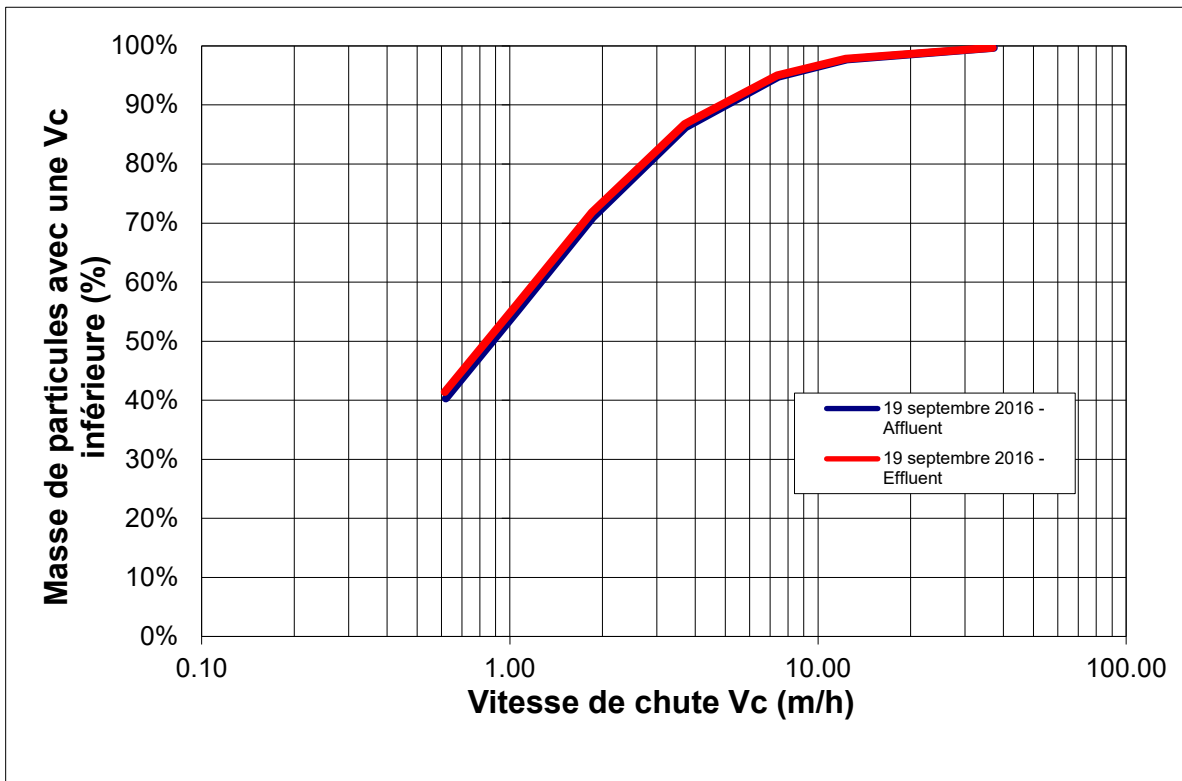
| MeS            | MVeS   | MleS    | MleS | MVeS | Densité estimée | Masse MleS par fraction |
|----------------|--------|---------|------|------|-----------------|-------------------------|
| (mg)           | (mg)   | (mg)    | %    | %    |                 | (mg)                    |
| -              | -      | -       | -    | -    |                 |                         |
| 5024,7         | 3461,4 | 1563,3  | 31%  | 69%  | 1,58            | 1,56                    |
| 3367,5         | 2761,1 | 606,4   | 18%  | 82%  | 1,38            | 2,32                    |
| 5314,3         | 4145,7 | 1168,6  | 22%  | 78%  | 1,44            | 2,55                    |
| 4611,5         | 3752,4 | 859,1   | 19%  | 81%  | 1,39            | 3,28                    |
| 4242,1         | 3284,3 | 957,8   | 23%  | 77%  | 1,45            | 5,62                    |
| 5662,2         | 3040,1 | 2622,1  | 46%  | 54%  | 1,82            | 31,95                   |
| 5607,9         | 3270,9 | 2337,0  | 42%  | 58%  | 1,75            | 42,22                   |
| 8247,6         | 4289,9 | 3957,7  | 48%  | 52%  | 1,84            | 43,48                   |
| 9532,3         | 528,1  | 9004,2  | 94%  | 6%   | 2,56            | 62,44                   |
| 11475,2        | 447,0  | 11028,2 | 96%  | 4%   | 2,59            | 42,67                   |
| 13167,3        | 371,5  | 12795,8 | 97%  | 3%   | 2,61            | 34,89                   |
| 5016,1         | 215,4  | 4800,7  | 96%  | 4%   | 2,58            | 10,81                   |
| 1382,7         | 211,8  | 1170,9  | 85%  | 15%  | 2,41            | 1,27                    |
| 402,9          | 209,1  | 193,8   | 48%  | 52%  | 1,85            | 0,19                    |
| <b>Total :</b> |        |         |      |      |                 | <b>285,25</b>           |
| <b>% MleS</b>  |        |         |      |      |                 | <b>58%</b>              |

## **ANNEXE E : Caractérisation des particules de l'affluent et l'effluent de l'unité de dessablage**

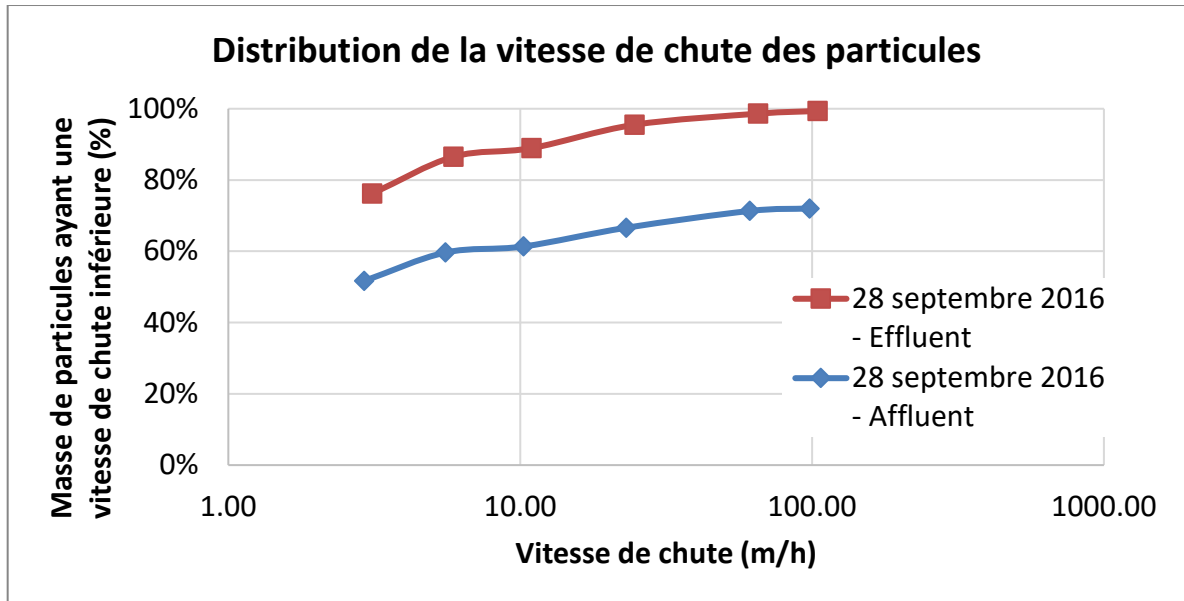
Saint-Nicolas - 19 septembre 2016 – Distribution de vitesse de chute par élutriation



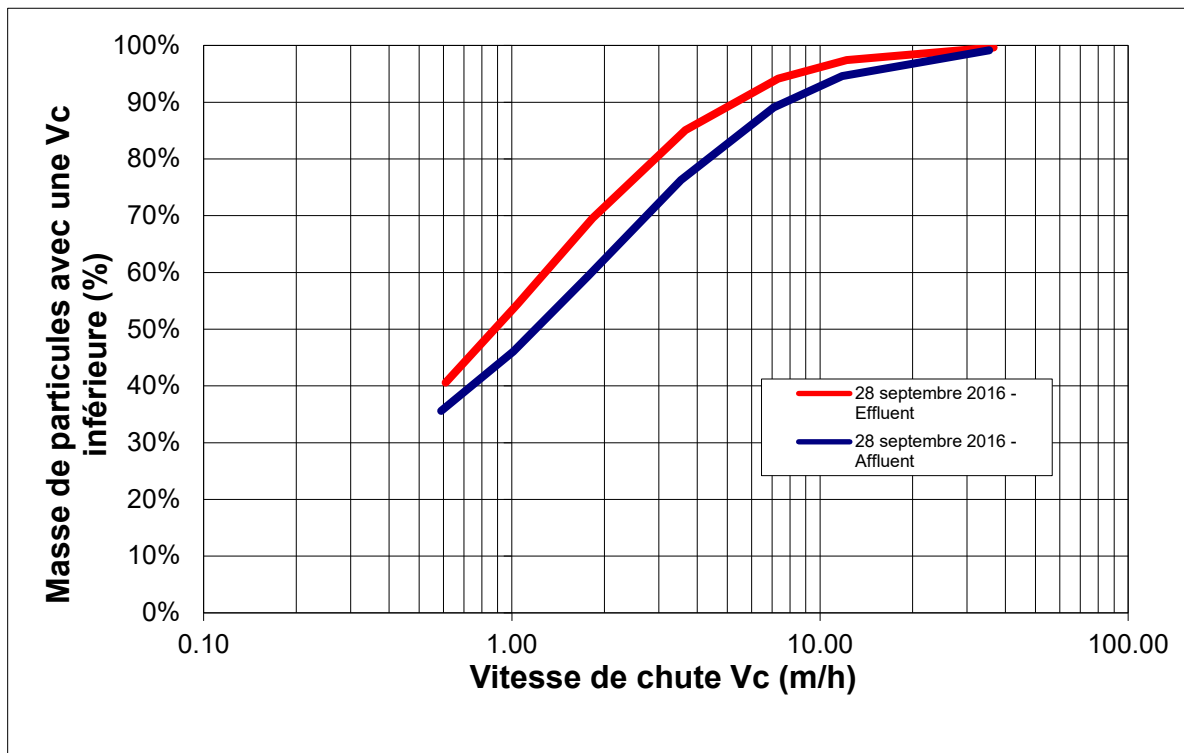
Saint-Nicolas - 19 septembre 2016 – Distribution de vitesse de chute par ViCas



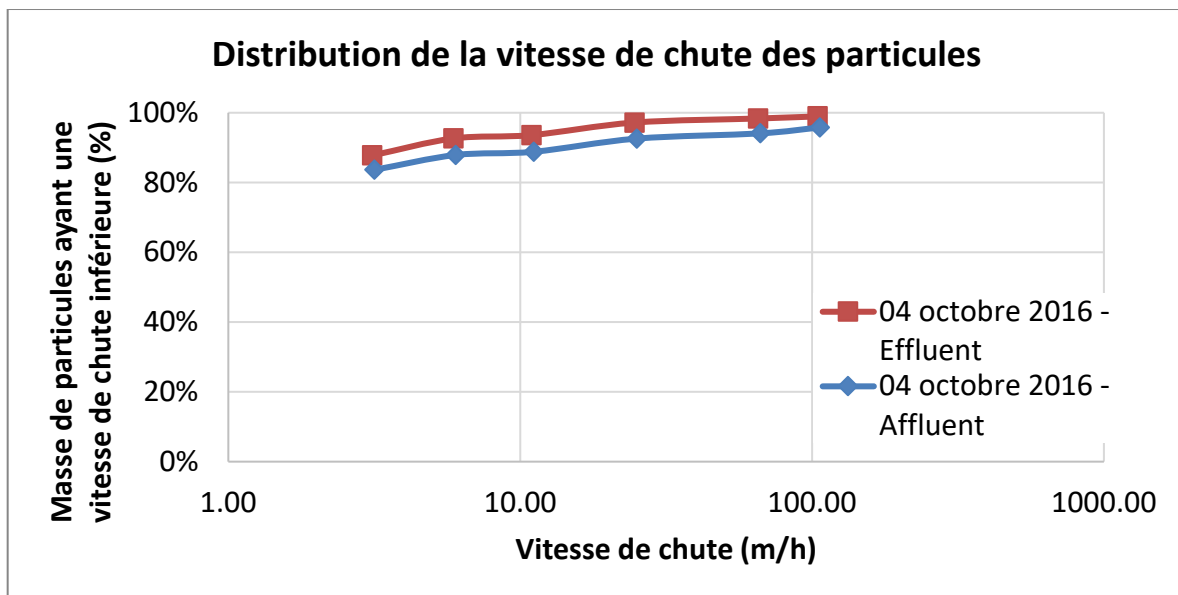
Saint-Nicolas - 28 septembre 2016 – Distribution de vitesse de chute par élutriation



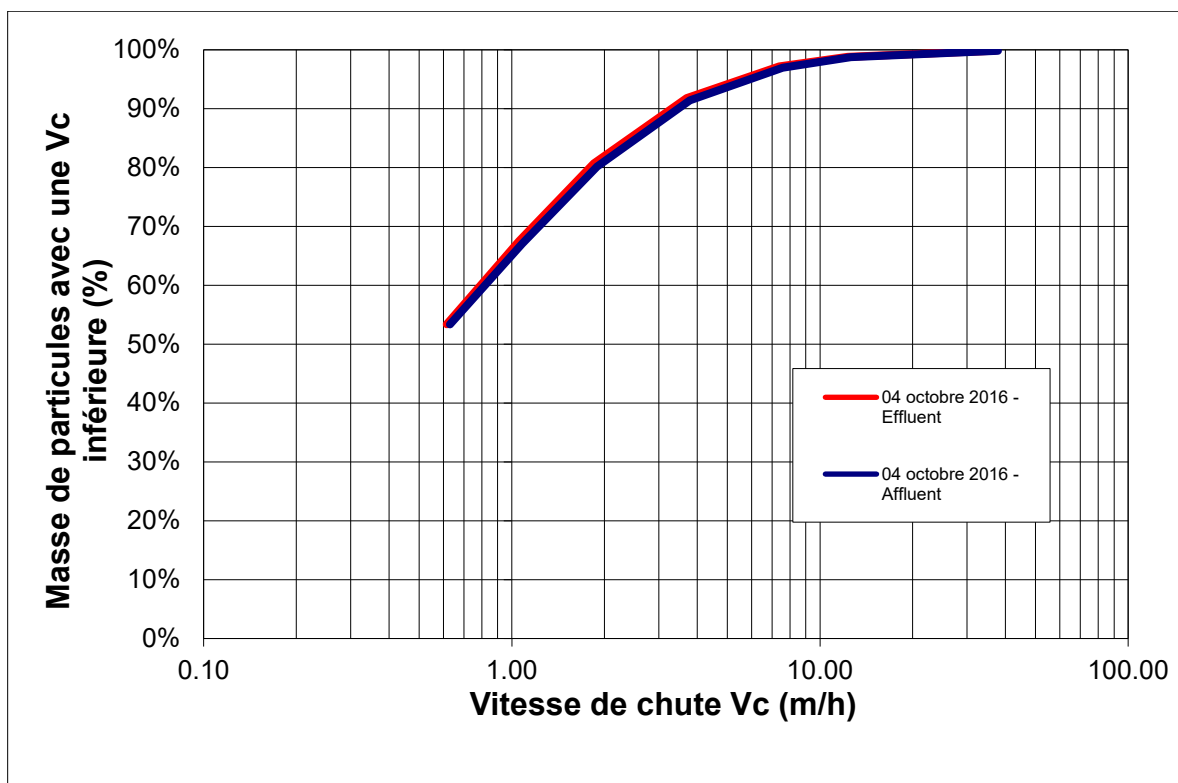
Saint-Nicolas - 19 septembre 2016 – Distribution de vitesse de chute par ViCas



**Saint-Nicolas - 04 octobre 2016 – Distribution de vitesse de chute par élutriation**



**Saint-Nicolas - - 04 octobre 2016 – Distribution de vitesse de chute par ViCas**



## **ANNEXE F : Estimation de la vitesse de chute des particules à l'aide des tamisages**

**Saint-Nicolas**

| Date                  | 01-avr-16         |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 3147,1            | 98,2%   |
| 3                     | 1579,8            | 97,5%   |
| 4                     | 1364,9            | 96,6%   |
| 6                     | 1130,3            | 95,1%   |
| 8                     | 1012,0            | 92,7%   |
| 14                    | 679,7             | 84,7%   |
| 18                    | 528,1             | 76,8%   |
| 30                    | 339,0             | 60,9%   |
| 50                    | 158,1             | 29,0%   |
| 70                    | 95,6              | 12,7%   |
| 100                   | 53,3              | 2,3%  |
| 140                   | 28,5              | 0,3%  |
| 200                   | 14,8              | 0,1%  |

**Saint-Nicolas**

| Date                  | 08-avr-16         |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 1341,5            | 99,0%   |
| 3                     | 958,5             | 96,7%   |
| 4                     | 712,7             | 90,5%   |
| 6                     | 616,0             | 81,4%   |
| 8                     | 518,0             | 71,7%   |
| 14                    | 390,1             | 53,3%   |
| 18                    | 277,4             | 38,6%   |
| 30                    | 246,2             | 24,4%   |
| 50                    | 154,1             | 8,5%  |
| 70                    | 93,1              | 3,1%  |
| 100                   | 50,3              | 0,7%  |
| 140                   | 23,5              | 0,3%  |
| 200                   | 6,9               | 0,1%  |

**Saint-Nicolas**

| Date                  | 27-avr-16         |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 1084,7            | 99,1%   |
| 3                     | 882,7             | 94,1%   |
| 4                     | 644,9             | 79,0%   |
| 6                     | 509,4             | 60,5%   |
| 8                     | 393,1             | 45,1%   |
| 14                    | 282,6             | 25,4%   |
| 18                    | 202,3             | 15,7%   |
| 30                    | 173,6             | 8,2%  |
| 50                    | 141,8             | 3,5%  |
| 70                    | 88,0              | 1,4%  |
| 100                   | 45,8              | 0,5%  |
| 140                   | 16,8              | 0,3%  |
| 200                   | 3,7               | 0,2%  |

**Saint-Nicolas**

| Date                  | 05-mai-16         |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 985,4             | 96,9%   |
| 3                     | 800,6             | 90,2%   |
| 4                     | 712,7             | 73,7%   |
| 6                     | 509,4             | 57,7%   |
| 8                     | 437,8             | 44,4%   |
| 14                    | 251,2             | 26,6%   |
| 18                    | 178,2             | 17,2%   |
| 30                    | 133,5             | 11,6%   |
| 50                    | 123,2             | 4,0%  |
| 70                    | 88,0              | 1,4%  |
| 100                   | 45,8              | 0,4%  |
| 140                   | 18,5              | 0,1%  |
| 200                   | 4,2               | 0,0%  |

**Saint-Nicolas**

| Date                  | 12-mai-16         |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 985,4             | 98,5%   |
| 3                     | 710,0             | 93,2%   |
| 4                     | 570,2             | 77,2%   |
| 6                     | 448,5             | 59,1%   |
| 8                     | 393,1             | 42,8%   |
| 14                    | 217,1             | 20,6%   |
| 18                    | 152,2             | 10,1%   |
| 50                    | 94,6              | 4,3%  |
| 30                    | 84,1              | 1,9%  |
| 70                    | 82,8              | 0,8%  |
| 100                   | 39,7              | 0,3%  |
| 140                   | 13,4              | 0,1%  |
| 200                   | 2,8               | 0,0%  |

**Ville de Québec**

| Date                  | 16-mai-16         |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 1750,9            | 98,4%   |
| 3                     | 1331,0            | 96,3%   |
| 4                     | 1038,2            | 92,7%   |
| 6                     | 792,6             | 87,2%   |
| 8                     | 622,5             | 80,1%   |
| 14                    | 390,1             | 68,0%   |
| 18                    | 322,3             | 62,1%   |
| 30                    | 258,4             | 50,2%   |
| 50                    | 146,0             | 32,1%   |
| 70                    | 93,1              | 19,2%   |
| 100                   | 51,8              | 6,7%  |
| 140                   | 27,7              | 1,5%  |
| 200                   | 14,4              | 0,0%  |

**Saint-Nicolas**

| Date                  | 18-mai-16         |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 875,9             | 98,6%   |
| 3                     | 710,0             | 92,9%   |
| 4                     | 644,9             | 77,4%   |
| 6                     | 448,5             | 59,2%   |
| 8                     | 344,1             | 43,1%   |
| 14                    | 217,1             | 19,7%   |
| 18                    | 152,2             | 10,2%   |
| 30                    | 123,2             | 4,5%  |
| 50                    | 107,3             | 2,1%  |
| 70                    | 85,4              | 0,8%  |
| 100                   | 42,8              | 0,3%  |
| 140                   | 15,1              | 0,1%  |
| 200                   | 3,7               | 0,0%  |

**Ville de Québec**

| Date                  | 24-mai-16         |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 1261,4            | 98,4%   |
| 3                     | 800,6             | 95,7%   |
| 4                     | 712,7             | 87,8%   |
| 6                     | 564,8             | 75,4%   |
| 8                     | 393,1             | 58,4%   |
| 14                    | 251,2             | 31,8%   |
| 18                    | 152,2             | 18,1%   |
| 50                    | 98,2              | 7,2%  |
| 30                    | 94,6              | 3,5%  |
| 70                    | 90,5              | 2,1%  |
| 100                   | 50,3              | 0,9%  |
| 140                   | 24,3              | 0,3%  |
| 200                   | 10,9              | 0,0%  |

**Saint-Nicolas**

| Date                  | 17-juin-16        |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 2374,3            | 98,0%   |
| 3                     | 958,5             | 92,3%   |
| 4                     | 712,7             | 79,9%   |
| 6                     | 616,0             | 65,3%   |
| 8                     | 479,2             | 51,0%   |
| 14                    | 311,8             | 31,7%   |
| 18                    | 224,8             | 21,3%   |
| 30                    | 196,4             | 11,5%   |
| 50                    | 129,2             | 3,6%  |
| 70                    | 88,0              | 1,1%  |
| 100                   | 47,3              | 0,3%  |
| 140                   | 17,6              | 0,1%  |
| 200                   | 4,2               | 0,0%  |

**Ville de Québec**

| Date                  | 21-sept-16        |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 1185,1            | 99,3%   |
| 3                     | 892,3             | 96,5%   |
| 4                     | 845,0             | 92,3%   |
| 6                     | 676,1             | 83,5%   |
| 8                     | 531,1             | 71,5%   |
| 14                    | 353,0             | 53,0%   |
| 18                    | 259,5             | 40,0%   |
| 30                    | 244,1             | 27,4%   |
| 50                    | 155,6             | 14,9%   |
| 70                    | 103,6             | 7,6%  |
| 100                   | 58,4              | 2,1%  |
| 140                   | 31,5              | 0,4%  |
| 200                   | 15,5              | 0,1%  |

**Saint-Nicolas**

| Date                  | 12-oct-16         |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 2293,9            | 98,5%   |
| 3                     | 968,4             | 94,3%   |
| 4                     | 952,8             | 86,2%   |
| 8                     | 699,9             | 71,8%   |
| 6                     | 627,9             | 59,2%   |
| 14                    | 404,8             | 40,0%   |
| 18                    | 300,3             | 29,3%   |
| 30                    | 295,0             | 17,7%   |
| 50                    | 160,1             | 5,9%  |
| 70                    | 103,6             | 1,7%  |
| 100                   | 56,8              | 0,3%  |
| 140                   | 25,8              | 0,1%  |
| 200                   | 6,9               | 0,1%  |

**Ville de Québec**

| Date                  | 18-oct-16         |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 1499,8            | 99,4%   |
| 3                     | 1447,2            | 98,2%   |
| 6                     | 1146,0            | 95,7%   |
| 4                     | 1096,5            | 94,3%   |
| 8                     | 729,7             | 89,4%   |
| 14                    | 576,4             | 78,9%   |
| 18                    | 494,8             | 68,4%   |
| 30                    | 358,9             | 44,7%   |
| 50                    | 173,1             | 14,9%   |
| 70                    | 103,6             | 5,6%  |
| 100                   | 58,4              | 1,1%  |
| 140                   | 31,5              | 0,2%  |
| 200                   | 15,5              | 0,1%  |

**Saint-Nicolas**

| Date                  | 18-oct-16         |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3/8 in.               | 1270,6            | 98,9%   |
| 3                     | 1229,6            | 94,4%   |
| 4                     | 786,2             | 86,4%   |
| 6                     | 627,9             | 75,2%   |
| 8                     | 491,8             | 61,4%   |
| 14                    | 324,9             | 40,6%   |
| 18                    | 280,4             | 26,0%   |
| 30                    | 210,6             | 13,8%   |
| 50                    | 137,4             | 6,1%  |
| 70                    | 98,0              | 2,4%  |
| 100                   | 56,8              | 0,5%  |
| 140                   | 28,7              | 0,2%  |
| 200                   | 9,4               | 0,1%  |

**Ville de Québec**

| Date                  | 21-oct-16         |   |
|-----------------------|-------------------|---|
| Taille des particules | Vitesses de chute | Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure |
| mesh                  | m/h               | %   |
| 3                     | 1890,1            | 98,7%   |
| 3/8 in.               | 1427,3            | 98,6%   |
| 4                     | 1678,2            | 95,9%   |
| 6                     | 1363,5            | 89,7%   |
| 8                     | 1072,9            | 80,2%   |
| 14                    | 746,9             | 62,6%   |
| 18                    | 561,2             | 50,8%   |
| 30                    | 384,3             | 32,5%   |
| 50                    | 177,4             | 9,7%  |
| 70                    | 106,4             | 2,8%  |
| 100                   | 58,4              | 0,5%  |
| 140                   | 30,5              | 0,2%  |
| 200                   | 14,0              | 0,1%  |

**Saint-Nicolas**

| <b>Date</b>                  | <b>21-oct-16</b>         |  |
|------------------------------|--------------------------|--|
| <b>Taille des particules</b> | <b>Vitesses de chute</b> | <b>Masse des particules ayant des vitesses de chute inférieure</b> |
| <b>mesh</b>                  | <b>m/h</b>               | <b>%</b>   |
| <b>3/8 in.</b>               | 1569,1                   | 99,0%  |
| <b>3</b>                     | 1039,4                   | 96,4%  |
| <b>4</b>                     | 900,4                    | 94,0%  |
| <b>6</b>                     | 676,1                    | 90,4%  |
| <b>8</b>                     | 568,1                    | 85,4%  |
| <b>14</b>                    | 537,4                    | 71,4%  |
| <b>18</b>                    | 389,4                    | 50,8%  |
| <b>30</b>                    | 254,7                    | 32,4%  |
| <b>50</b>                    | 168,8                    | 19,0%  |
| <b>70</b>                    | 103,6                    | 10,0%  |
| <b>100</b>                   | 58,4                     | 2,7%   |
| <b>140</b>                   | 31,5                     | 0,4%   |
| <b>200</b>                   | 14,5                     | 0,1%   |