

# **Caractérisation du comportement des polluants particulaires dans les réseaux d'assainissement**

**Mémoire**

**Asma Hafhouf**

Sous la direction de :

Peter Vanrolleghem, Directeur de recherche

Paul Lessard, Codirecteur de recherche

## Résumé

La pollution des eaux dans les réseaux unitaires et sanitaires peut être affectée par le changement du comportement hydraulique dans ces derniers. Les Matières en Suspension (MeS) sont considérées comme un indicateur majeur de cette pollution. C'est dans ce contexte que cette étude s'inscrit. Son objectif principal consiste à caractériser le comportement des polluants particuliers dans les réseaux d'assainissement sous différentes conditions hydrauliques.

Afin d'atteindre les objectifs de la recherche, des tests de MeS, MVeS (Matières Volatiles en suspension) et ViCAs (Vitesse de Chute en Assainissement) ont été effectués sur des eaux unitaires et sanitaires de la Ville de Québec. De plus, une base de données a été fournie par la Ville de Québec qui a permis d'étudier le comportement hydraulique.

Les résultats obtenus en termes de comportement hydraulique en temps de pluie confirment que le débit varie avec les caractéristiques des événements pluvieux dans le réseau unitaire. Également, une augmentation importante de débit a été observée en réseau sanitaire vieillissant à la suite de pluies.

En termes de qualité de l'eau, l'évolution de la concentration en MeS et MVeS est similaire à l'évolution du débit en temps sec. En temps de pluie, des profils décroissants de MeS sont obtenus pour quelques événements où la concentration la plus forte peut être associée au premier flot.

Les variations en termes d'hydraulique du système ont affecté les vitesses de chute des particules observées. En effet, ces vitesses augmentent avec le débit (la vitesse d'écoulement). D'autre part, l'augmentation de la fraction organique des particules coïncide avec une diminution de leurs vitesses de chute.

En conclusion, cette étude a permis une meilleure compréhension des processus affectant le comportement des particules dans les réseaux d'assainissement ce qui contribuera à l'amélioration et la prévision de la qualité de l'eau.

## **Abstract**

Water pollution in combined and sanitary sewers can be affected by changes in hydraulic behaviour in sewer systems. The Total Suspended Solids (TSS) are considered a major indicator of this type of pollution. It is in this context that this study fits. Its main objective is to characterize the behaviour of particulate pollutants in sewer systems under different hydraulic conditions.

In order to achieve the research objectives, analyses of TSS, VSS (Volatile Suspended Solids) and ViCAs (Settling velocity in sewage) were performed with combined and sanitary water samples from Québec City. In addition, a database was provided by the city to study the hydraulic behaviour.

The results obtained in terms of the hydraulic behaviour in wet weather show that the variation of the flow rate depends on the characteristics of the rain in the combined sewer system. Also, an important increase in flow in the old sanitary sewer was observed in wet weather.

In terms of water quality, the evolution of the concentration of TSS and VSS in dry weather follows the evolution of the flow. In wet weather, decreasing TSS profiles are obtained for some events where high concentrations can be associated to first flush.

These variations of the system hydraulics and concentrations of TSS and VSS also affected the particle settling velocity distribution measured with the ViCAs protocol. In fact, the settling velocity increases with the flow (flow velocity). On the other hand, an increase in the organic fraction coincides with a decrease in the settling velocity.

In conclusion, this study has provided a better understanding of the processes affecting the behaviour of particles in sewer systems, which will contribute to the improvement and the prediction of water quality.

# Table des matières

Résumé .....	ii
Abstract.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux .....	xii
Liste des abréviations et symboles .....	xiii
Remerciements .....	xiv
<b>1. Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1. Contexte d'étude.....	1
1.2. Objectifs .....	4
<b>2. Revue de littérature .....</b>	<b>5</b>
2.1. Systèmes de drainage urbains.....	5
2.2. Hydraulique dans le réseau d'assainissement.....	8
2.2.1. Temps sec .....	8
2.2.2. Temps de pluie .....	9
2.3. Qualité de l'eau en termes de polluants particuliers .....	9
2.3.1. Temps sec .....	10
2.3.2. Temps de pluie .....	13
2.4. Transport des polluants.....	16
2.4.1. Origine et nature des particules .....	16
2.4.2. Transport des particules dans les réseaux d'assainissement.....	18
2.5. Vitesse de chute des particules .....	19
2.6. Conclusion.....	24
<b>3. Matériel et méthodes .....</b>	<b>25</b>

3.1. Cas d'étude .....	25
3.1.1. Localisation et caractéristiques.....	25
3.1.2. Fonctionnement des chambres de contrôle.....	27
3.1.2.1. Fonctionnement de la chambre de contrôle St-Sacrement .....	27
3.1.2.2. Fonctionnement de la chambre de contrôle Sacré-Cœur.....	29
3.2. Protocole d'échantillonnage .....	31
3.2.1. Matériel.....	32
3.2.2. Échantillonnage en temps sec.....	34
3.2.3. Échantillonnage en temps de pluie .....	35
3.2.3.1. Prévisions des événements pluvieux .....	35
3.2.3.2. Déroulement de l'échantillonnage en temps de pluie.....	36
3.2.3.3. Données Pluviométriques .....	37
3.3. Analyses en laboratoire .....	38
3.3.1. Composition en MeS et MVeS.....	38
3.3.2. Distribution de la vitesse de chute des particules .....	39
3.4. Estimation de débit .....	40
<b>4. Résultats et Discussion .....</b>	<b>44</b>
4.1. Événements pluvieux étudiés .....	44
4.2. Comportement hydraulique des sites étudiés .....	46
4.2.1. Hydraulique en temps sec.....	46
4.2.1.1. Chambre de contrôle St-Sacrement .....	46
4.2.1.2. Réseau sanitaire Duberger.....	47
4.2.1.3. Chambre de contrôle Sacré-Cœur.....	48
4.2.2. Hydraulique en temps de pluie .....	49
4.2.2.1. Événement du 11-07-17 .....	49
4.2.2.2. Événement du 04-10-17 .....	50
4.2.2.3. Événement du 15-10-17 .....	53

4.2.2.4. Événement du 24-10-17 .....	55
4.2.3. Conclusion sur le comportement hydraulique .....	57
4.3. Qualité de l'eau dans les sites étudiés .....	57
4.3.1. Évolution de la concentration en MeS, MVeS .....	57
4.3.1.1. En temps sec .....	57
4.3.1.2. En temps de pluie .....	62
4.3.1.2.1. Événement du 11-07-17 .....	62
4.3.1.2.2. Événement du 04-10-17 .....	63
4.3.1.2.3. Événement du 15-10-17 .....	64
4.3.1.2.4. Événement du 24-10-17 .....	67
4.3.2. Conclusion sur la qualité de l'eau dans les sites étudiés .....	69
4.4. Distribution de la vitesse de chutes des particules .....	70
4.4.1. Comparaison de la distribution de la vitesse de chute des particules entre les trois sites étudiés en temps sec .....	70
4.4.1.1. Entre 05h-09h (Faible concentration).....	70
4.4.1.2. Entre 11h-14h (concentration élevée).....	71
4.4.2. Influence de la matière organique et la concentration sur la vitesse de chute des particules.....	72
4.4.3. Influence du changement du comportement hydraulique sur la vitesse de chute des particules.....	74
4.4.4. Conclusion sur la distribution de la vitesse de chute des particules.....	77
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>78</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>80</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>86</b>
Annexe A : Échantillons récoltés .....	88
Annexe B : Essais effectués au laboratoire .....	90
Annexe C : Détermination des matières en suspension totales et volatiles (méthode gravimétrique) .....	138

Annexe D : Protocole ViCAs .....	155
Annexe E : Estimation du débit sous-vanne .....	185
Annexe F : Courbes pluie- débit.....	188
Annexe G : Pollutogrammes utilisés pour l'analyse en temps sec .....	193

## Liste des figures

<b>Figure 2.1 :</b> Différence entre le réseau unitaire et le réseau séparatif (tiré et modifiée de <a href="https://mysticriver.org/csos/">https://mysticriver.org/csos/</a> d'après US EPA).....	7
<b>Figure 2.2:</b> Profil journalier de débit domestique (tiré de Butler et al., 1995).....	9
<b>Figure 2.3:</b> Évolution de la concentration en MeS en temps de pluie et en temps sec à l'entrée de la StaRRE de Zele en Belgique (tiré de Petersen et al., 2002) .....	11
<b>Figure 2.4:</b> Évolution du débit et de la matière en suspension durant les jours de la semaine (tiré de Verbanck, 1995).....	12
<b>Figure 2.5:</b> Évolution du débit, de la concentration en MeS et en MVeS à l'entrée de la StaRRE de Norwich en Angleterre (tiré de Lessard, 1989) .....	13
<b>Figure 2.6:</b> les courbes extrêmes de M(V) Pour les MeS dans 6 réseaux séparatifs et 6 réseaux unitaires : (a) : réseaux unitaires, (b) : réseaux séparatifs (tiré de Bertrand-Krajewski et al., 1998).....	14
<b>Figure 2.7:</b> Evolution du débit, de la concentration en MeS et de la masse cumulée en MeS en fonction du volume cumulée durant un événement pluvieux (tiré de Rossi et al., 2005).....	15
<b>Figure 2.8:</b> Evolution de la conductivité et de la concentration en MeS pour une série d'événements pluvieux (tiré de Verbanck, 1995).....	16
<b>Figure 2.9:</b> Transport de particules en réseaux d'assainissement (tiré de Dey, 2014)..	19
<b>Figure 2.10:</b> Différents équipements de détermination de la distribution de la vitesse de chute des particules : a) colonne d'Aston, b) colonne de Brombach, c) colonne de US EPA, d) appareil d'élutriation (tiré de Krishnappan et al., 2012).....	20
<b>Figure 2.11:</b> Colonne de décantation ViCAs; (A) : colonne de décantation, (B) : fond de la colonne où l'eau est versée, (C) : coupelles (tiré de Chebbo & Gromaire, 2009).....	21
<b>Figure 2.12:</b> Distribution de la vitesse de chute des particules en phase de premier flot lorsque la concentration est élevée (a) et en phase de dilution avec des concentrations faibles(b) (tiré de Maruéjols et al., 2013) .....	23
<b>Figure 2.13:</b> Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec (A) et en temps de pluie (B) (tiré de Chebbo & Gromaire, 2009).....	24
<b>Figure 3.1:</b> Bassin versant St-Sacrement et Bassin versant Sacré-Cœur (tiré de Maruéjols, 2012).....	27
<b>Figure 3.2 :</b> Localisation des trois sites étudiés .....	27

<b>Figure 3.3:</b> Chambre de contrôle St-Sacrement : Fonctionnement et système de données .....	29
<b>Figure 3.4 :</b> Chambre de contrôle Sacré-Cœur : Fonctionnement et système de données .....	31
<b>Figure 3.5:</b> Auto-échantillonneur Sigma 900max .....	32
<b>Figure 3.6:</b> Installation de l'auto-échantillonneur dans la chambre de contrôle St-Sacrement .....	33
<b>Figure 3.7:</b> Auto-échantillonneur installé au niveau du réseau sanitaire Duberger .....	34
<b>Figure 3.8:</b> Radar Environnement Canada (Villeroy, 28/06/2018) .....	36
<b>Figure 3.9:</b> Protocole d'échantillonnage en temps de pluie .....	37
<b>Figure 3.10:</b> Localisation des pluviomètres utilisés.....	38
<b>Figure 3.11:</b> Banc de filtration.....	39
<b>Figure 3.12:</b> Composants de la colonne de décantation pour les ViCAs .....	40
<b>Figure 4.1:</b> Débit estimé à l'entrée de la chambre de contrôle St-Sacrement en temps sec .....	46
<b>Figure 4.2:</b> Débit estimé au niveau du collecteur Duberger en temps sec .....	47
<b>Figure 4.3:</b> Débit moyen enregistré à la chambre de contrôle Sacré-Cœur en temps sec .....	49
<b>Figure 4.4:</b> Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle St-Sacrement à la pluie du 11-17-17 .....	50
<b>Figure 4.5:</b> Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle St-Sacrement, le débit sanitaire Duberger et le débit déversé dans le bassin de rétention à la suite de la pluie du 04-10-17 .....	52
<b>Figure 4.6:</b> Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur à la suite de la pluie du 04-10-17.....	53
<b>Figure 4.7:</b> Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle St-Sacrement, le débit sanitaire Duberger et le débit déversé dans le bassin de rétention à la suite de la pluie du 15-10-17 .....	54
<b>Figure 4.8:</b> Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur à la suite de la pluie du 15-10-17.....	55
<b>Figure 4.9:</b> Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle St-Sacrement, le débit sanitaire Duberger et le débit déversé dans le bassin de rétention à la suite de la pluie du 24-10-17 .....	56

<b>Figure 4.10:</b> Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur à la suite de la pluie du 24-10-17 .....	56
<b>Figure 4.11:</b> Concentration en MeS et MVeS dans la chambre St-Sacrement en temps sec .....	58
<b>Figure 4.12:</b> Concentration moyenne et écart-type sur les MeS et MVeS de plusieurs échantillons collectés dans la chambre de contrôle St-Sacrement .....	59
<b>Figure 4.13:</b> Concentration moyenne et écart-type sur les MeS et MVeS de plusieurs échantillons collectés dans la chambre de contrôle Sacré-Coeur .....	59
<b>Figure 4.14:</b> Concentration moyenne et écart-type sur les MeS et MVeS de plusieurs échantillons collectés au niveau du réseau sanitaire Duberger.....	60
<b>Figure 4.15:</b> Concentration en MeS dans le réseau sanitaire Duberger sur différentes journées de temps sec .....	61
<b>Figure 4.16:</b> Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 11-07-17 dans la chambre de contrôle St-Sacrement .....	63
<b>Figure 4.17:</b> Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 04-10-17 dans la chambre de contrôle St-Sacrement .....	64
<b>Figure 4.18:</b> Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 04-10-17 dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur.....	64
<b>Figure 4.19:</b> Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 15-10-17 dans la chambre de contrôle St-Sacrement .....	65
<b>Figure 4.20:</b> Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 15-10-17 dans le réseau sanitaire Duberger. ....	66
<b>Figure 4.21:</b> Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 15-10-17 dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur .....	66
<b>Figure 4.22:</b> Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 24-10-17 dans la chambre de contrôle St-Sacrement .....	68
<b>Figure 4.23:</b> Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 24-10-17 dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur .....	68
<b>Figure 4.24:</b> Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 24-10-17 dans le réseau sanitaire Duberger .....	69
<b>Figure 4.25:</b> Vitesse de chute des particules pour un temps sec avec une faible concentration (09-11-17 05h-09h).....	71
<b>Figure 4.26:</b> Vitesse de chute des particules pour un temps sec avec une faible concentration (24-09-17 11h-14h).....	72

<b>Figure 4.27:</b> Influence de la fraction de la matière organique et la concentration sur la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement.....	73
<b>Figure 4.28:</b> Influence de la fraction de la matière organique et la concentration sur la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur .....	74
<b>Figure 4.29:</b> Distribution de la vitesse de chute des particules en phase de premier flot et en phase de dilution dans la chambre de contrôle St-Sacrement.....	76
<b>Figure 4.30:</b> Distribution de la vitesse de chute des particules en phase de premier flot et en phase de dilution dans la chambre de contrôle St-Sacrement et la chambre Sacré-Cœur (24-10-17).....	77

## Liste des tableaux

<b>Tableau 3. 1:</b> Caractéristiques et occupation du sol du bassin versant Sacré-Cœur (Consultants BPR, 1984).....	25
<b>Tableau 3.2:</b> Caractéristiques et occupation du sol du bassin versant St-Sacrement (Consultants BPR, 1984).....	26
<b>Tableau 4.1 :</b> Caractéristiques des événements pluvieux échantillonnés.....	45

## **Liste des abréviations et symboles**

**DBO** : Demande Biologique en Oxygène

**DCO** : Demande Chimique en Oxygène

**MeS** : Matière en Suspension

**MIeS** : Matière Inorganique en Suspension

**MVeS** : Matière Volatile en Suspension

**StaRRE** : Station de Récupération des Ressources en Eau

**ViCAs** : Vitesse de Chute en Assainissement

## Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent à mes directeur et co-directeur de recherche les Professeurs Peter Vanrolleghem et Paul Lessard, pour m'avoir accordé leur confiance et dirigé mes recherches dans le cadre de ma maîtrise. Leurs orientations et conseils pédagogiques et scientifiques m'ont permis d'atteindre mes objectifs et de développer considérablement mes connaissances et mes compétences autant en recherche scientifique qu'en ingénierie. Je les remercie également pour leur disponibilité et leur écoute.

Un grand merci à la Professeure Geneviève Pelletier pour sa contribution à ce projet, sa disponibilité pour répondre à toutes mes questions, ses conseils et ses orientations avisés.

J'aimerais remercier également la Ville de Québec qui nous a donné accès aux infrastructures et à la base de données. Merci à Monsieur Yves Lanthier de la Ville de Québec pour avoir répondu à toutes mes questions et intervenu à temps à chaque fois que j'avais besoin d'aide durant mon échantillonnage.

Je souhaite également adresser mes remerciements à toute l'équipe modelEAU pour les échanges scientifiques, les discussions intéressantes et le soutien continu.

Finalement, un grand merci à mes parents qui m'ont toujours soutenue et encouragée.

*Asma HAFHOUF*

*Décembre 2018*

# 1. Introduction

## 1.1. Contexte d'étude

En temps sec, les réseaux unitaires et sanitaires acheminent les eaux usées vers la station de récupération des ressources de l'eau (StaRRE) dans le but de les traiter avant leur rejet dans le milieu récepteur.

En temps de pluie, le réseau unitaire reçoit, en plus des eaux sanitaires, les eaux de ruissellement qui présentent des débits supplémentaires pouvant dépasser les capacités du réseau et de la station de traitement. De même les réseaux sanitaires peuvent réagir à la pluie à cause des sources de captage, de l'infiltration et des mauvaises connexions.

Afin de mieux utiliser et gérer les StaRREs et les réseaux d'assainissement, des structures de stockage comme des bassins de rétention sont installées au sein du système de drainage afin de retenir le volume d'eau excessif dans le réseau jusqu'à la baisse du débit dirigé vers la station de traitement. En plus des débits importants observés dans les réseaux en temps de pluie, une importante augmentation survient au niveau des polluants comme les matières en suspension (MeS), la demande chimique et biologique en oxygène (DCO, DBO<sub>5</sub>) et les métaux (Gromaire et al, 2001; McPherson et al., 2002). La concentration de ces polluants dépend principalement de l'intensité de pluie, la surface du bassin et son imperméabilité, l'occupation du sol ainsi que la période sèche antécédente à la pluie. Lors de certains événements pluvieux intenses, les volumes d'eau excèdent même la capacité des bassins de rétention pour déborder directement dans les milieux récepteurs. Dans de telles situations, les matières en suspension sont considérées comme l'indicateur majeur de la pollution en temps de pluie (Rossi et al., 2006) puisqu'elles causent une augmentation de la turbidité qui nuit à la faune et flore du système aquatique. De plus, elles constituent un vecteur de transport pour d'autres polluants comme les métaux lourds et les pathogènes.

Ashley et al. (2004) exposent les problèmes que causent les MeS dans un système d'assainissement. Ces problèmes consistent en l'accumulation des MeS dans les réseaux, ce qui engendre la réduction de la capacité hydraulique des réseaux d'où la possibilité de refoulement et l'augmentation des fréquences des débordements dans le milieu récepteur. D'autre part, à l'entrée de la StaRRE, les grosses particules peuvent bloquer les

dégrilleurs, abraser les pompes ainsi que diminuer les performances des procédés de traitement au sein de la station.

En temps sec, ces matières en suspension proviennent des eaux sanitaires. Dépendamment des conditions hydrauliques, les particules les plus légères se déplacent par suspension alors que les plus lourdes peuvent décanter au fond de la conduite pour être transportées par charriage ou former des dépôts de sédiments. En temps de pluie avec l'augmentation des débits dans les réseaux unitaires, les particules qui ont décanté au fond de la conduite en temps sec peuvent être remises en suspension. Hannouche et al. (2014) montrent que la contribution du dépôt de sédiment à la charge en MeS dans les égouts unitaires en temps de pluie varie entre 20 et 80% dépendamment de l'événement pluvieux. Cependant, le ruissellement de surface reste une source importante des MeS en temps de pluie (Gasperi et al., 2009).

Comme le transport de particules en réseau d'assainissement est décrit par analogie avec les principes de l'hydraulique fluviale, les principaux facteurs agissant sur ce processus sont la vitesse d'écoulement, le cisaillement, la décantation et la resuspension. La vitesse de chute des particules joue un rôle dans ces processus. Bien que cette caractéristique physique reste difficile à observer, plusieurs chercheurs commencent à s'intéresser à cette notion.

Dans ce contexte, plusieurs recherches ont été effectuées pour un bassin de rétention de la Ville de Québec (Rondeau, 2009; Wipliez, 2011; Maruéjols, 2012). Ces recherches se sont déroulées dans le cadre du projet *retEAU I* qui a consisté à étudier le comportement des particules à la sortie du bassin de rétention afin d'établir un modèle de la qualité de l'eau qui se base sur la distribution de la vitesse de chute des particules. Wipliez (2011) montre que les concentrations à l'entrée du bassin de rétention sont très importantes en temps de pluie à la suite du lessivage du bassin versant. À la vidange, 45% de la masse des particules sont pompées dans la première heure (Rondeau, 2009) présentant des fortes concentrations dans les 15 premières minutes pouvant atteindre 1500 mg/l (Wipliez, 2011). Également, Wipliez (2011) conclut que la distribution de la vitesse de chute des particules à la vidange est similaire à celle observée pour l'affluent de la station de traitement en temps sec. À la suite de ces travaux, Maruéjols (2012) a développé un modèle qui décrit la sédimentation, la remise en suspension et l'hydrolyse des particules en se basant sur la vitesse de chute des particules.

Le projet *retEAU* II constitue la suite du projet *retEAU* I et vise à étudier les mêmes processus mais dans le réseau d'égout dans le but d'améliorer la gestion du système de drainage et la prévision de la qualité de l'eau à l'affluent de la station de traitement.

Ce mémoire de maîtrise traitera du comportement des particules dans les réseaux d'assainissement en termes d'évolution de la qualité de l'eau sous différentes conditions hydrauliques ainsi de la décantation des particules à travers la vitesse de chute. L'hydraulique dans les réseaux d'assainissement en temps de pluie et en temps sec est décrite dans la revue de littérature. Cette description permettra de prédire la qualité de l'eau dans les réseaux et discuter certains phénomènes comme le premier flot d'orage. Dans une dernière section de la revue de littérature, la discussion sera menée sur la caractérisation de la sédimentation par la vitesse de chutes de particules. Dans une deuxième partie, la méthodologie suivie et le matériel utilisé pour collecter la base de données nécessaires à la caractérisation sont présentés. Ensuite, les résultats importants obtenus sont présentés et analysés. La conclusion et les recommandations achèvent ce manuscrit. Des annexes complètent le document.

## **1.2. Objectifs**

Ce projet de maîtrise s'inscrit dans le cadre du projet de recherche *retEAU II* qui vise à développer les connaissances sur la qualité de l'eau dans le réseau d'assainissement pour bien comprendre les phénomènes qui l'influencent et avancer la modélisation dans ce domaine afin de mieux gérer le système intégré d'assainissement.

Comme le transport des polluants particulaires est l'un des processus majeurs qui agit sur la qualité de l'eau, ce projet de maîtrise a comme objectif de caractériser ces polluants particulaires et étudier la vitesse de chute des particules qui joue un rôle important dans le processus du transport au sein des réseaux d'assainissement. Trois objectifs secondaires ont été fixés et qui consistent à :

- Caractériser le comportement hydraulique du système étudié;
- Caractériser les particules et leur sédimentation; et
- Comprendre l'interaction entre le débit, la sédimentation et la resuspension en se basant sur la distribution de la vitesse de chute des particules.

## 2. Revue de littérature

### 2.1. Systèmes de drainage urbains

Depuis l'antiquité, le système de drainage a existé en Rome antique sous la forme d'un grand canal à ciel ouvert pour assécher les zones marécageuses dans le but de les rendre constructibles. Quelques siècles après, ce canal a été développé pour être souterrain afin de diminuer les épidémies. Mais généralement, les eaux pluviales étaient évacuées dans des fossés et les eaux sanitaires sur les terrains de maisons (Brière, 2012). Des systèmes d'assainissement modernes sont apparus à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle avec la découverte de l'origine du choléra à Londres. En effet, la contamination des eaux était la cause de cette épidémie. Ainsi, les réseaux d'assainissement ont été développés pour éliminer les risques touchant la santé publique, diminuer les inondations et protéger le milieu naturel.

Il existe trois types de réseaux d'assainissement (Figure 2.1) :

- Le réseau unitaire qui achemine les eaux sanitaires et les eaux pluviales dans la même conduite vers la StaRRE;
- Le réseau séparatif qui évacue les eaux de pluie et les eaux sanitaires dans deux conduites distinctes; et
- Le réseau pseudo-séparatif qui reçoit les eaux sanitaires et certaines eaux de pluie provenant des drains de fondation et de toits dans la conduite sanitaire (Brière, 2012) alors que les autres eaux de pluie sont transportées dans la conduite pluviale.

En temps sec, le réseau unitaire et le réseau sanitaire reçoivent les eaux usées d'origine domestique et industrielle ainsi que les eaux d'infiltration. Ces infiltrations sont dues au vieillissement des conduites (De Bénédictis & Bertrand-Krajewski, 2005) et des joints (Butler & Davies, 2010; Weiß et al., 2002) et elles varient avec l'âge du réseau, le type du sol (Butler & Davies, 2010) et l'évolution du niveau des eaux souterraines (Karpf & Krebs, 2011). En effet, ces infiltrations augmentent en saison de pluie, lorsque les nappes souterraines se rechargent et elles diminuent en période sèche. Dans les pays nordiques, une augmentation de l'infiltration dans les réseaux d'assainissement peut être enregistrée au printemps à la suite du dégel du sol et de la fonte des neiges.

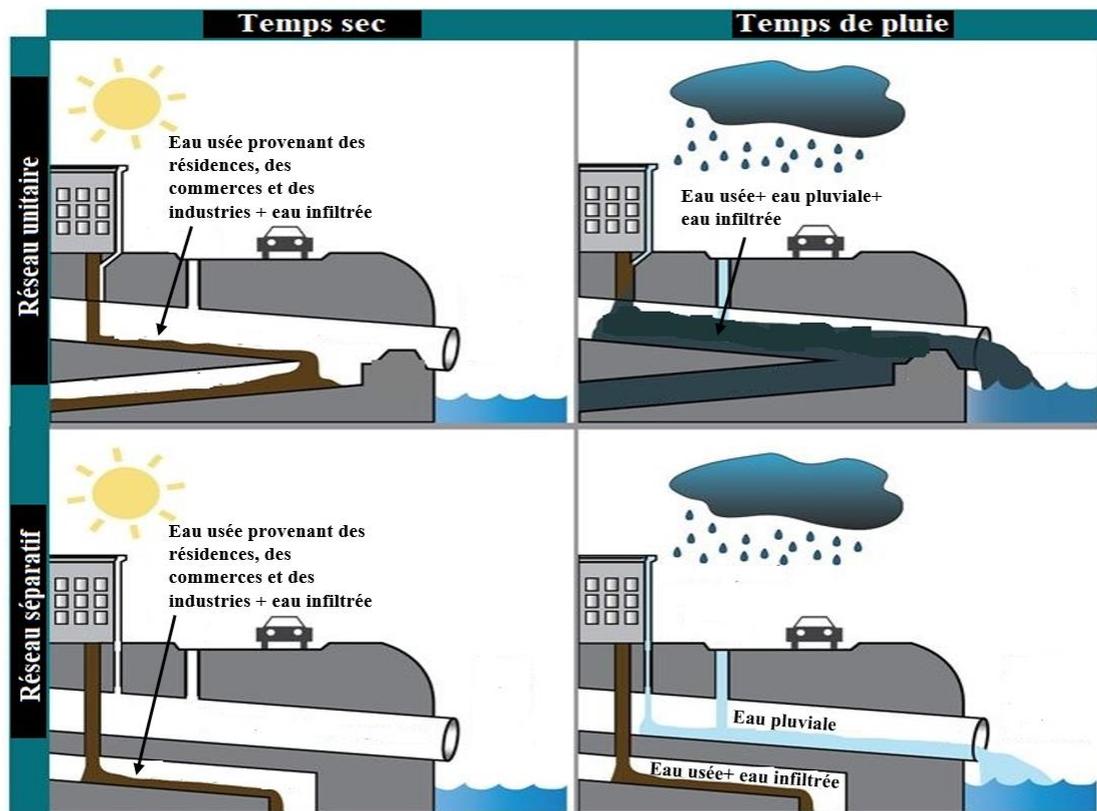
De Bénédictis & Bertrand-Krajewski (2005) ont trouvé, pour une étude effectuée sur deux bassins versants urbains à Lyon en France, que l'infiltration varie dans un large intervalle

autour de 20% du débit en temps sec. Cette valeur peut augmenter pour plusieurs raisons. Des études faites en Allemagne, en Italie et au Canada montrent que l'infiltration varie entre 15% et 50% (Wittenberg & Aksoy, 2010; Prigiobbe & Giulianelli, 2009; Shehab & Moselhi, 2005). Comme mentionné ci-haut l'une des causes de la variation de ces infiltrations est le vieillissement du réseau, Prigiobbe & Giulianelli (2009) démontrent que l'infiltration augmente avec l'âge du réseau et ils l'estiment à  $14 \pm 1.8$  % pour un nouveau réseau (14 ans) et à  $50 \pm 11.9$  % pour un ancien réseau (40 ans). Au Québec, le débit d'infiltration observé dans les réseaux d'égouts devant faire l'objet de réfection varie entre 1500 et 6000 l/(cm.km.j)<sup>1</sup> pour un réseau sanitaire et entre 2000 et 9000 l/(cm.km.j) pour un réseau unitaire (Brière, 2012).

En temps de pluie, le réseau unitaire reçoit, en plus des eaux sanitaires et des eaux d'infiltration, les eaux pluviales. Les volumes d'eau générés dépassent souvent la capacité du réseau engendrant des débordements vers le milieu récepteur. Pour minimiser ces effets, les bassins de rétention sont intégrés au réseau pour stocker ces eaux excédentaires. Mais pour des pluies torrentielles, le débordement dans les milieux naturels devient inévitable. Pour le réseau sanitaire, il est possible qu'il réagisse à la pluie. Des eaux de captage peuvent pénétrer le réseau sanitaire à travers les mauvaises connexions et les raccordements de drains de fondation, de bouches d'égout ou des conduites pluviales (Brière, 2012). Ces eaux de captage ainsi que les eaux d'infiltration engendrent la diminution de la capacité hydraulique des réseaux sanitaires et peuvent ramener à des refoulements et diminuer la performance des procédés de traitement (Machado et al., 2007).

---

<sup>1</sup> Litres par jour par centimètre de diamètre intérieur de conduite et par kilomètre de conduite



*Figure 2.1 : Différence entre le réseau unitaire et le réseau séparatif (tiré et modifié de <https://mysticriver.org/csos/> d'après US EPA)*

Dans le cadre d'une comparaison des deux réseaux, plusieurs études ont montré qu'un réseau séparatif n'est pas toujours la meilleure solution pour la qualité du milieu récepteur (De Toffol et al., 2007; Brombach et al., 2005; Mannina & Viviani, 2009). En effet ce réseau peut engendrer autant de charges polluantes que le réseau unitaire en cas de débordement dans le milieu naturel lorsque des bassins d'orage et de rétention sont implantés dans les deux systèmes (De Toffol et al, 2007; Mannina & Viviani, 2009). En revanche, en absence de bassin d'orage dans le réseau séparatif, les eaux de ruissellement, provenant du réseau pluvial, qui contiennent des MeS et métaux lourds, se déversent directement dans le milieu récepteur et causent une pollution plus importante que celle engendrée par le réseau unitaire avec des bassins de rétention (De Toffol et al, 2007; Mannina & Viviani, 2009). En même temps, De Toffol et al. (2007) montrent que, lorsqu'il s'agit d'une concentration polluante très importante<sup>2</sup> tant en temps sec qu'en temps de pluie, les rejets urbains en temps de pluie à partir du réseau unitaire ont une concentration élevée en ammoniac (18 mg/l pour le réseau unitaire alors que pour un

<sup>2</sup> Plus importante que d'autres concentrations enregistrées pour les deux cas temps sec et temps de pluie.

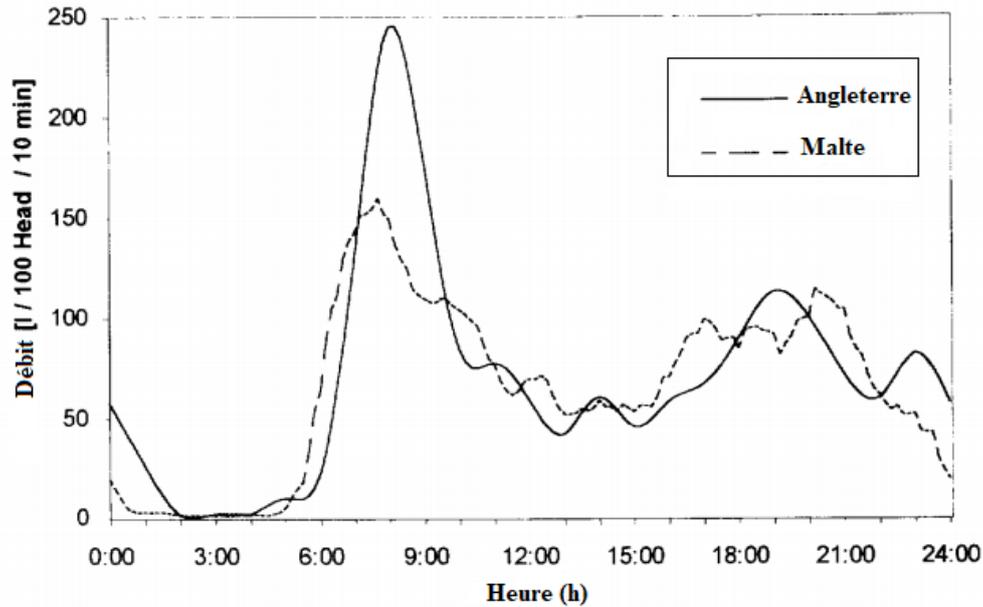
réseau séparatif, la concentration est plus faible à 12 mg/l), ce qui fait augmenter la concentration de l'ammoniac non-ionisé et donc toxique dans les cours d'eau. Dans la même étude, les auteurs confirment que le réseau séparatif engendre une pollution plus importante en termes d'autres polluants comme le cuivre (1.5 t/an pour le réseau unitaire et 4 t/an pour le réseau séparatif) et l'azote (12.5 t/an pour le réseau unitaire et 20 t/an pour le réseau séparatif). D'autre part, Brombach et al. (2005) concluent à partir d'une étude comparative entre les deux types de réseau, que le réseau sanitaire présente moins de charges en DBO et en nutriments alors que le réseau unitaire présente moins de MeS et particulièrement les métaux lourds. Donc aucun réseau ne peut présenter une meilleure alternative pour préserver la qualité du milieu naturel.

## **2.2. Hydraulique dans le réseau d'assainissement**

Les débits des eaux usées varient suivant plusieurs sollicitations. Ils fluctuent dépendamment de plusieurs facteurs comme la surface du bassin versant, la nature de l'occupation du sol et la nature de l'urbanisation. Ces fluctuations sont horaires, hebdomadaires, saisonnières ou annuelles. Les variations les plus importantes sont celles de court-terme et les saisonnières (Tchobanoglous & Schroeder, 1985). Ces fluctuations sont dues à une variation du régime hydraulique en temps sec et temps de pluie (Brière, 2012).

### **2.2.1. Temps sec**

Les eaux sanitaires en temps sec proviennent essentiellement des eaux usées domestiques et industrielles et de l'infiltration. La variation du débit en temps sec diffère en fonction de l'activité de la population sur le bassin versant (Brière, 2012). Généralement dans des bassins pratiquement résidentiels, le débit est très faible durant les premières heures de la journée. Une augmentation est enregistrée avec le réveil de la population. Ensuite le débit diminue au cours de la journée pour augmenter de nouveau le soir lorsque les gens rentrent du travail. Butler et al. (1995) révèlent le même profil de débit décrit auparavant, lors d'une étude qui consiste à évaluer le débit et la qualité de l'eau provenant de résidences en Angleterre et à Malte, voir Figure 2.2.



*Figure 2.2: Profil journalier de débit domestique (tiré de Butler et al, 1995)*

Ce profil de débit change en fonction de l'occupation du territoire. Les industries, les commerces et les institutions peuvent augmenter le débit sur le bassin urbain au milieu de la journée. L'estimation du débit institutionnel et commercial est possible. Par exemple au Québec, la valeur moyenne du débit institutionnel est estimée à  $25 \text{ m}^3/(\text{ha} \cdot \text{j})$  et celle du débit commercial est estimée à  $75 \text{ m}^3/(\text{ha} \cdot \text{j})$  (Brière, 2012). En revanche, le débit industriel est plus difficile à estimer puisqu'il dépend des procédés de production.

### **2.2.2. Temps de pluie**

Le débit dans les réseaux unitaires réagit à la pluie. La variation de ce débit dépend de l'intensité de la pluie, de l'occupation du sol, de la pente et la taille du bassin versant (Brière, 2012). Afin de gérer les volumes d'eau excessifs, des structures de rétention sont souvent intégrées au réseau de drainage. Une fois que le risque de dépasser la capacité du réseau ou la capacité de la StaRRE se présente, les eaux unitaires sont dirigées vers des bassins de rétention. Il se peut que même les volumes d'eau transportés par le réseau dépassent la capacité des bassins de rétention. Dans ce cas, un rejet vers le milieu naturel s'impose.

### **2.3. Qualité de l'eau en termes de polluants particuliers**

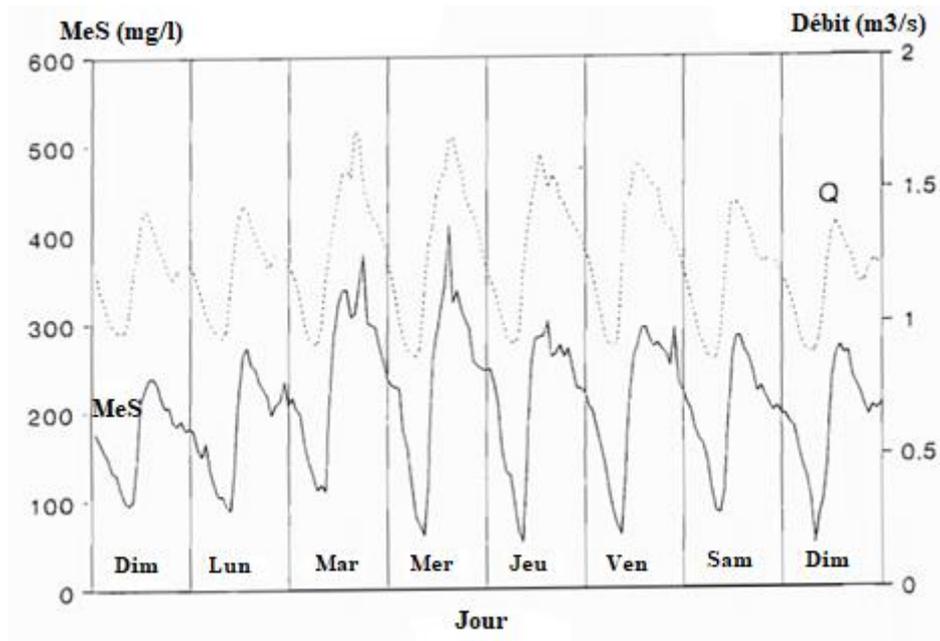
Les MeS constituent un polluant important qui permet d'évaluer la qualité de l'eau. En outre, ce polluant particulière peut causer plusieurs problèmes dans le réseau de drainage ainsi que dans tout le système d'assainissement; par exemple une accumulation de

sédiments dans le réseau qui engendre la diminution de la capacité des conduites, un blocage des dégrilleurs au sein de la StaRRE et une diminution des performances des procédés de traitement (Ashley et al., 2004). D'autre part, les métaux lourds, les bactéries et les PHA sont adsorbés sur les particules en présentant un pourcentage important de la matière organique (sous forme de DCO). En cas de déversement en temps de pluie au milieu naturel, les MeS peuvent provoquer l'augmentation de la turbidité qui cause à son tour des effets nocifs pour les poissons et affecte la flore aquatique par une limitation de la pénétration de la lumière. Un suivi des MeS permet donc de comprendre leur comportement sous différentes conditions afin de pouvoir prévoir la qualité de l'eau.

### **2.3.1. Temps sec**

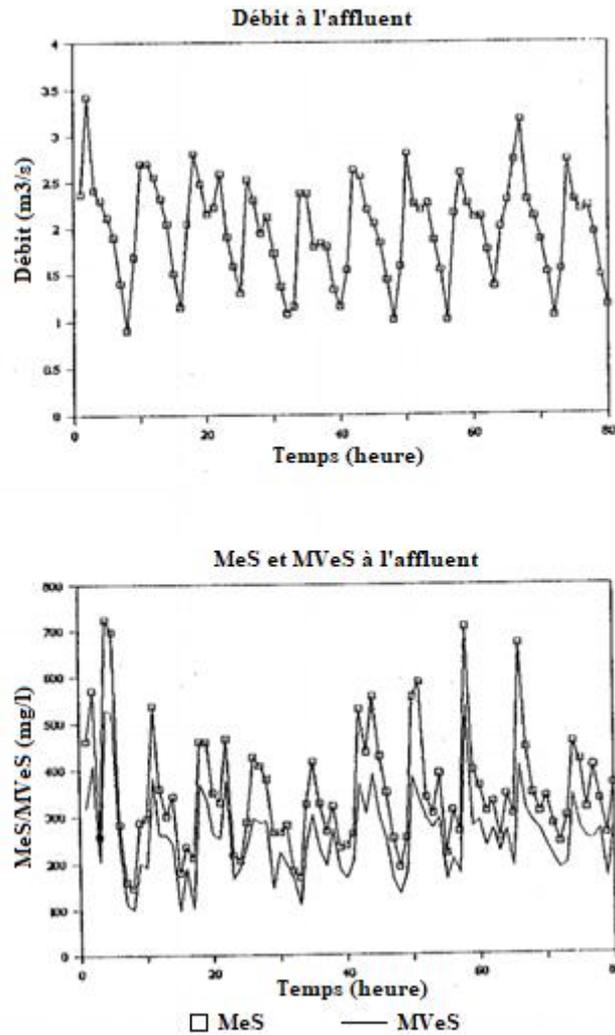
Le temps sec a été toujours traité comme une référence pour voir l'effet de la pluie sur l'évolution de la charge polluante en termes de MeS. La charge en MeS en temps sec présente des quantités faibles par rapport au temps de pluie. Petersen et al. (2002) montrent la différence entre le temps de pluie et le temps sec en termes de concentrations en MeS (Figure 2.3). À partir de mercredi en après-midi, une augmentation des MeS est observée à la suite d'une pluie et qui se prolonge jusqu'à jeudi matin. Ensuite, la concentration en MeS reprend ses valeurs de temps sec qui fluctuent entre 50 mg/l et 200 mg/l. Lessard (1989) a montré également dans son étude sur le contrôle des stations en temps de pluie que la concentration en MeS à l'entrée d'une StaRRE de Norwich en Angleterre en temps sec varie autour d'une moyenne de 210 mg/l qui est considérée comme une concentration moyennement élevée (Metcalf and Eddy, 2003).





**Figure 2.4:** Évolution du débit et de la matière en suspension durant les jours de la semaine (tiré de Verbanck, 1995)

Cette même relation entre le débit et la concentration en MeS a été observée dans l'étude de Lessard (1989) (Figure 2.5). De plus, la concentration en matières volatiles en suspension (MVeS) suit la même allure que la concentration en MeS. En revanche, une différence entre la concentration des deux matières est observée lorsqu'il s'agit de fortes concentrations en MeS. Cette différence peut être due à un temps de pluie où les particules sont plus minérales ou des rejets inhabituels qui font augmenter la concentration en MeS et changer leur composition en matière organique.



*Figure 2. 5: Évolution du débit, de la concentration en MeS et en MVeS à l'entrée de la StaRRE de Norwich en Angleterre (tiré de Lessard, 1989)*

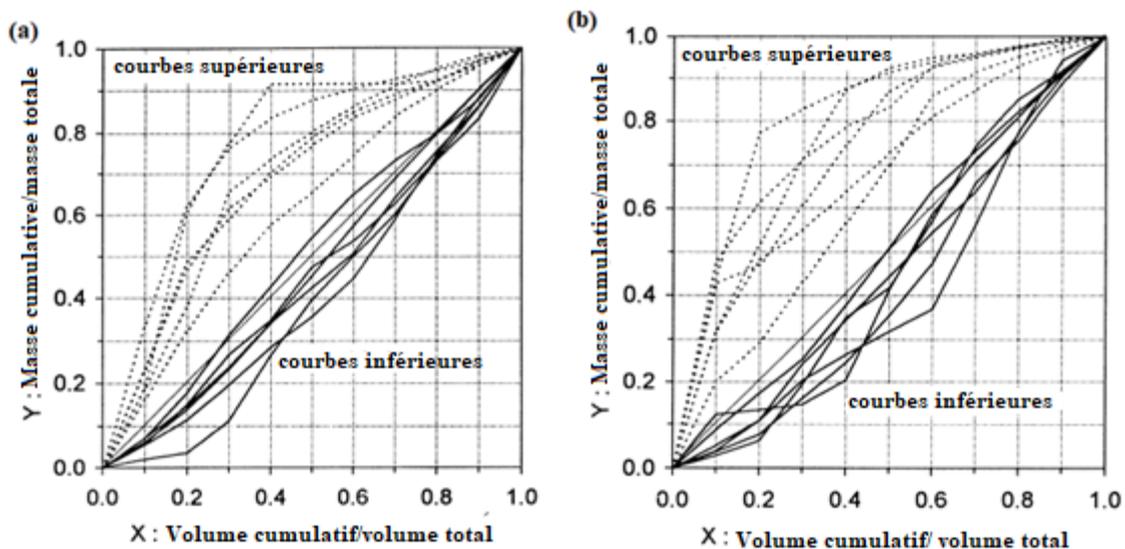
### 2.3.2. Temps de pluie

Les matières en suspension constituent un indicateur de la pollution des eaux sanitaires. En temps de pluie, la concentration en MeS augmente et ce polluant devient un vecteur majeur de la pollution des eaux unitaires (Gupta & Saul, 1996). Ces MeS contiennent entre 83 et 92% de la DCO totale et entre 48 et 82% de l'azote Kjeldahl (Chebbo et al., 1995).

L'augmentation de la concentration en MeS est souvent associée au phénomène du premier flot (first flush). Le premier flot consiste en une augmentation de la concentration en MeS qui est provoquée par les premiers ruissellements et qui est plus importante par rapport à la pollution enregistrée à la fin de la pluie (Barco et al., 2008). En effet, cette augmentation est engendrée en début de pluie par le lessivage des conduites et des surfaces du bassin versant. Bertrand-Krajewski et al. (1998) définissent un premier flot

significatif comme étant le transport de 80% de la masse des polluants par les premiers 30% du volume du ruissellement à la suite d'un événement pluvieux.

Dans une étude menée sur 197 événements pluvieux dans 12 réseaux séparés et unitaires, Bertrand-Krajewski et al. (1998) montrent que la masse cumulée en fonction du volume écoulé varie d'un bassin versant à un autre ou d'un réseau à un autre. Ainsi, cette masse en fonction du volume cumulé varie également dépendamment de l'évènement pluvieux. La Figure 2.6 montre les variations extrêmes de la masse cumulée en MeS en fonction du volume cumulé. Les courbes en pointillés au-dessus de la bissectrice présentent des masses cumulées plus importantes transportées par des volumes moins élevés. Par contre, les courbes au-dessous de la bissectrice présentent des masses moins importantes transportées par des volumes importants, ce qui confirme l'effet des caractéristiques des événements pluvieux sur le transport des polluants par l'eau. Les auteurs de cette étude concluent que dans les réseaux séparatifs, 80% de la masse totale des polluants est transportée dans les premiers 74% du volume total des 50% des événements pluvieux, et dans les réseaux unitaires, 80% de la masse totale des polluants est transportée dans les premiers 79% du volume total des 50% des événements pluvieux.

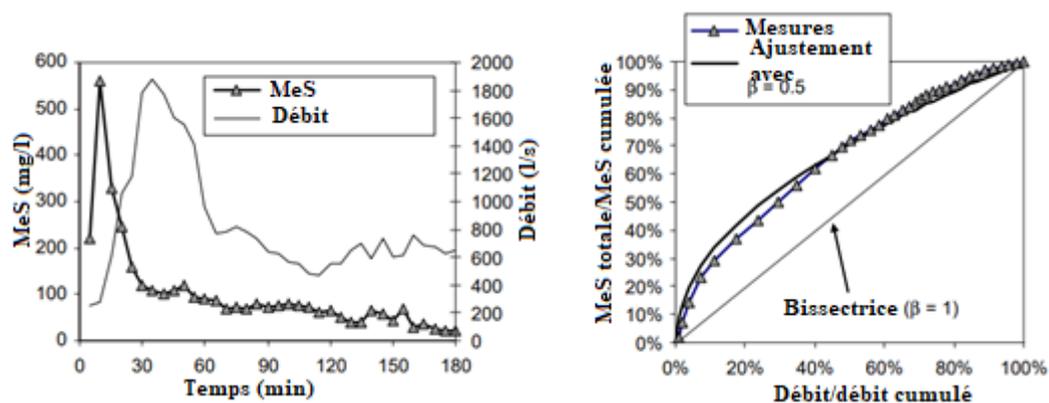


**Figure 2.6:** Courbes extrêmes de la masse cumulée en MeS en fonction du volume cumulé dans 6 réseaux séparatifs et 6 réseaux unitaires : (a) : réseaux unitaires, (b) : réseaux séparatifs (tiré de Bertrand-Krajewski et al., 1998)

Selon le guide de gestion des eaux pluviales du gouvernement de Québec, trois mécanismes peuvent provoquer le premier flot:

- Le lessivage de l'atmosphère peut engendrer une eau plus polluée en début de la pluie. La pollution contenue dans cette eau présente entre 15 et 25% de la pollution dans le réseau;
- Le lessivage des surfaces urbaines où les polluants se sont accumulés en temps sec; et
- La remise en suspension des sédiments dans le réseau qui peut être la cause du pic de la concentration au début de l'événement pluvieux.

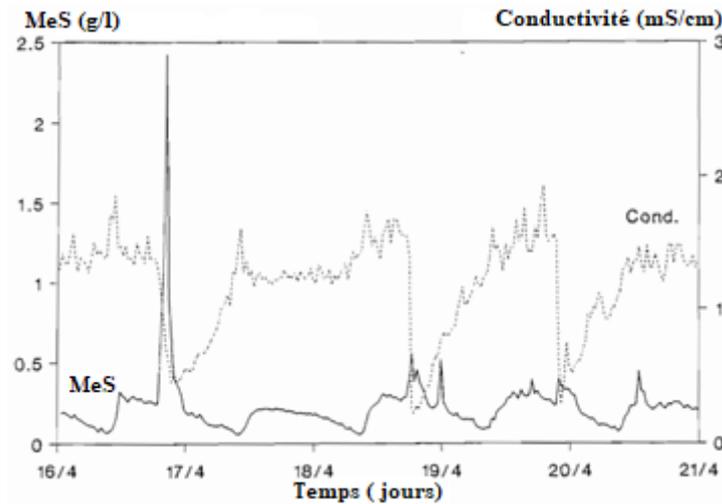
Tous ces mécanismes peuvent engendrer l'augmentation de la concentration en MeS. Avec le début de la pluie, il y a une augmentation du débit à laquelle correspond une augmentation des MeS qui présente la phase du premier flot. Rossi et al. (2005) présentent l'évolution des MeS et du débit durant un événement pluvieux ainsi que l'évolution de la masse cumulée en fonction du volume cumulé (Figure 2.7) : 40% de la masse totale des MeS se trouve dans 20% du volume total. Une augmentation des MeS a été enregistrée avant le pic de débit. Ce pic de débit a entraîné ensuite une diminution de la concentration en MeS, ce qui peut être expliqué par le lessivage de tous les polluants sur la surface du bassin durant les premières minutes de la pluie. Le même résultat a été observé par Maruéjols et al. (2013) à l'entrée d'un bassin de rétention avec une concentration qui atteint 600 mg/l durant les premières minutes de la pluie et qui diminue en phase de dilution pour atteindre des valeurs inférieures à 100 mg/l.



**Figure 2.7:** Évolution du débit, de la concentration en MeS et de la masse cumulée en MeS en fonction du volume cumulé durant un événement pluvieux (tiré de Rossi et al., 2005)

La concentration en MeS est très importante lorsque l'événement pluvieux est précédé par une longue période sèche, où le débit est faible, ce qui favorise le dépôt de sédiments dans le réseau unitaire. D'après l'étude menée à Bruxelles par Verbanck (1995), pendant

trois crues datant des 16, 18 et 19 avril 1988 (Figure 2.8), l'auteur constate que le pic de concentration en MeS (2500 mg/l) enregistré pour la crue du 16, correspond à une diminution de la conductivité. Cette crue est précédée par une période de dix-sept jours de temps sec. La concentration en MeS décroît pour atteindre 550mg/l le 18 avril à la suite de la deuxième crue et elle est de l'ordre de 400 mg/l le 19 avril.



*Figure 2.8: Évolution de la conductivité et de la concentration en MeS pour une série d'événements pluvieux (tiré de Verbanck, 1995)*

## 2.4. Transport des polluants

Les charges polluantes particulières dans les réseaux d'assainissement proviennent des eaux usées et des eaux de ruissellement. Ces charges polluantes sont transportées en suspension et peuvent en partie sédimenter au fond des conduites ou être transportées en suspension ou par charriage. Le transport dans le réseau varie selon l'origine des particules qui définit leur nature et leurs caractéristiques.

### 2.4.1. Origine et nature des particules

Ashley et al. (2004) présentent cinq principales sources de particules présentes dans le réseau d'égouts :

- L'atmosphère qui contient des poussières et des aérosols;
- Les surfaces du bassin versant où les solides s'accumulent en temps sec et s'érodent lors des événements pluvieux pour rejoindre le réseau d'égout;
- Les particules provenant des sites de construction;
- Les processus se déroulant au sein du réseau de drainage : infiltration, dégradation de sédiments, etc.;

- Les eaux usées domestiques qui contiennent plusieurs solides organiques; et
- Les effluents industriels et commerciaux.

La composition des particules varie selon l'origine des eaux. Les particules transportées par les eaux sanitaires contiennent entre 70 et 80% de matière organique. En temps de pluie, ces eaux contiennent plus de matières minérales soit un pourcentage d'environ 60% (Bertrand-Krajewski et al., 1993). Cette valeur peut augmenter avec la durée des précipitations.

Ces particules peuvent être classées selon leur taille qui est influencée également par leur provenance. Bertrand-Krajewski et al. (1993) proposent un classement pour les tailles des particules:

- Particules déposées tout au long des rues et des trottoirs : leur diamètre est entre 200 et 1000  $\mu\text{m}$ , avec un diamètre médian ( $d_{50}$ ) entre 300-400  $\mu\text{m}$ ;
- Particules dans les eaux sanitaires : leur diamètre médian  $d_{50}$  est entre 30-40 $\mu\text{m}$ ;
- Particules transférées dans le réseau par les eaux de pluie; elles sont très fines avec un diamètre moyen entre 30-40  $\mu\text{m}$  et sont transportées généralement en suspension; et
- Particules déposées dans le réseau; elles sont les plus grosses par rapport à celles transportées par suspension; leur  $d_{50}$  est entre 200-1000  $\mu\text{m}$  et elles sont essentiellement transportées par charriage qui consiste au roulement des particules qui restent en contact avec le lit de sédiments ou par saltation où les particules se déplacent par sauts.

Ashley et al. (2004) présentent d'autres données sur les tailles des particules en temps de pluie selon les études de Chebbo (1992), Chebbo and Bachoc (1992) et Chebbo et al. (1995). Les résultats issus de ces études montrent que les particules fines (<100  $\mu\text{m}$ ) sont généralement en suspension. Elles représentent entre 66 et 85% de la masse totale des particules avec un diamètre médian entre 25 et 44  $\mu\text{m}$ . Ces particules ont tendance à s'agglomérer. Des résultats issus de ces études montrent aussi que la taille des particules est la même en réseau séparatif qu'en réseau unitaire.

D'autre part, dans une étude caractéristique de l'affluent d'une usine de traitement, Bel Hadj (2013) souligne l'effet de la concentration en temps sec sur la distribution de la taille des particules. La taille des particules étudiées varie entre 1 à 200 $\mu\text{m}$ . Pour cette gamme

de particules, le nombre de particules pour chaque taille augmente avec l'augmentation de la concentration. Dans un deuxième temps, Bel Hadj (2013) a étudié également l'effet de la pluie sur la taille des particules qui consiste à une augmentation de la taille des particules qui varie entre 20 et 1000 $\mu\text{m}$ .

#### **2.4.2. Transport des particules dans les réseaux d'assainissement**

Le transport des polluants particulaires dans les réseaux d'assainissement est défini en analogie avec les phénomènes de l'hydraulique fluviale (Ashley et al., 2004). Les particules légères sont transportées en suspension alors que les particules lourdes et denses se déplacent par charriage ou par saltation (Figure 2.9).

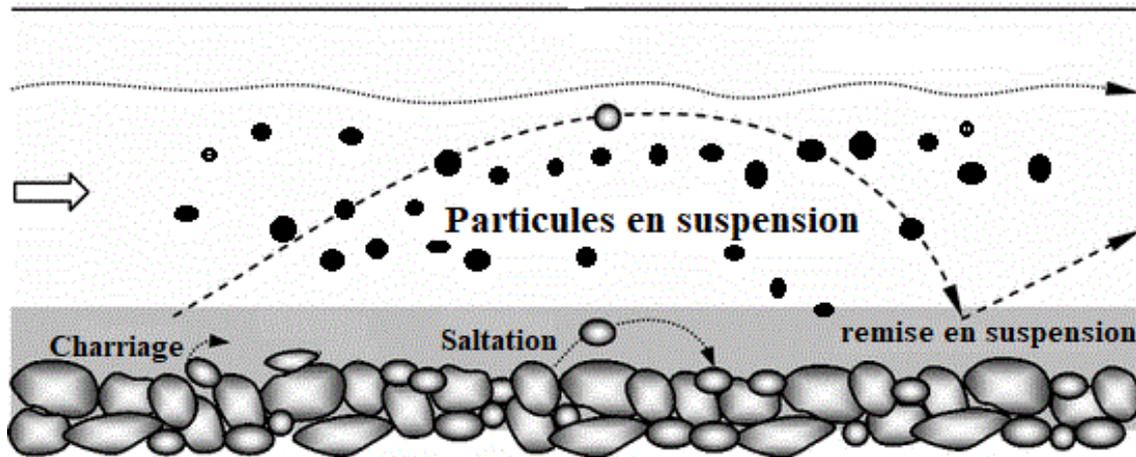
En temps sec, Ashley et Verbanck (1996) rapportent que les particules en suspension sont organiques à 90%. En ce qui concerne les particules qui se déplacent au fond de la conduite, près du lit des sédiments, en charriage ou en saltation, elles représentent 12% de la masse totale des particules (Ashley et al., 1994).

En temps de pluie, avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement et des forces de cisaillement, une partie des particules décantées en temps sec peut être remise en suspension. Alors que d'autres particules plus légères se déplacent par charriage sur le lit de sédiments, il est probable que la couche superficielle dans les sédiments soit la plus susceptible d'être remise en suspension à la suite du changement de conditions hydrauliques puisque les couches les plus profondes sont consolidées (Ashley et al., 1994).

Ashley et al. (1992), dans une étude sur l'érosion des sédiments dans un réseau unitaire, affirment qu'une force de cisaillement entre 20 et 25  $\text{N/m}^2$  peut remettre en suspension les particules décantées en temps sec. Alors que pour le transport par charriage à la surface du lit de sédiments, l'application d'une force de cisaillement de 1,8  $\text{N/m}^2$  est suffisante. L'interaction entre la force de cisaillement et la remise en suspension des sédiments ou le transport par charriage varie avec la résistance du lit de sédiments.

Ahyerre et al. (2000) démontrent que l'érosion des sédiments se fait même avec des contraintes de cisaillement très faibles pouvant aller jusqu'à 0,5  $\text{N/m}^2$ . Ainsi, leur étude a souligné que la fraction organique des sédiments érodés varie entre 54% et 86%. Ces particules sont généralement présentes sur l'interface sédiments-eau, ce qui permet de conclure qu'elles sont les dernières à avoir décantées en temps sec. Par conséquent, la

biodégradation de ces particules n'est pas avancée par rapport à celles qui se trouvent au fond du lit des sédiments, d'où l'importance de la matière organique des particules érodées se trouvant à l'interface eau-sédiments.



*Figure 2.9: Transport de particules en réseaux d'assainissement (tiré de Dey, 2014)*

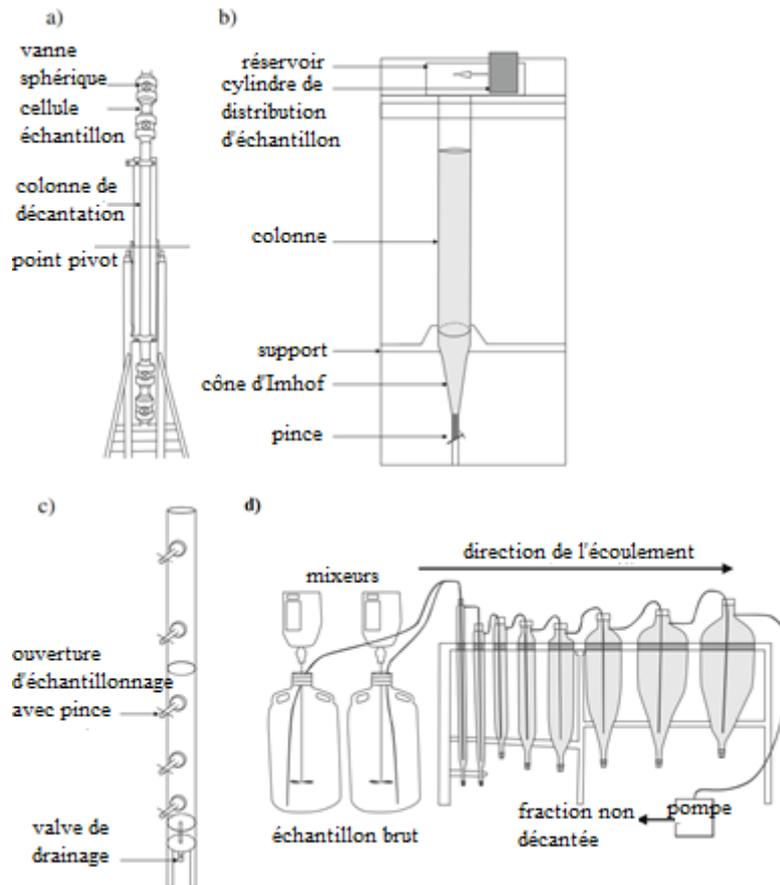
## 2.5. Vitesse de chute des particules

Le transport des particules dans un réseau dépend de plusieurs paramètres comme le régime hydraulique et la vitesse de chute des particules. La vitesse de chute des particules présente le paramètre de base de la sédimentation. Afin de mieux comprendre le phénomène de sédimentation et développer des équipements permettant de déterminer la décantation, il est indispensable d'avoir plus d'informations non seulement sur la vitesse de chute mais aussi sur la distribution de ce paramètre en fonction de la masse des particules décantées (Gasperi et al., 2009).

Plusieurs appareils et protocoles ont été utilisés pour déterminer la distribution de la vitesse de chute des particules. Marsalek et al. (2006) présentent deux catégories d'appareils : des appareils avec une décantation au repos et des appareils avec une décantation dynamique provoquée par un débit et une turbulence réglables. Krishnappan et al. (2012) ont effectué une étude comparative sur la performance de plusieurs appareils permettant la détermination de la distribution de la vitesse de chute des particules des eaux sanitaires et unitaires. Les appareils utilisés dans cette étude sont la colonne d'Aston, la colonne de Brombach et la colonne de l'US EPA<sup>3</sup> qui permettent une décantation au repos et l'appareil d'élutriation qui présente une décantation dynamique (Figure 2.10).

<sup>3</sup> US EPA : US Environmental Protection Agency

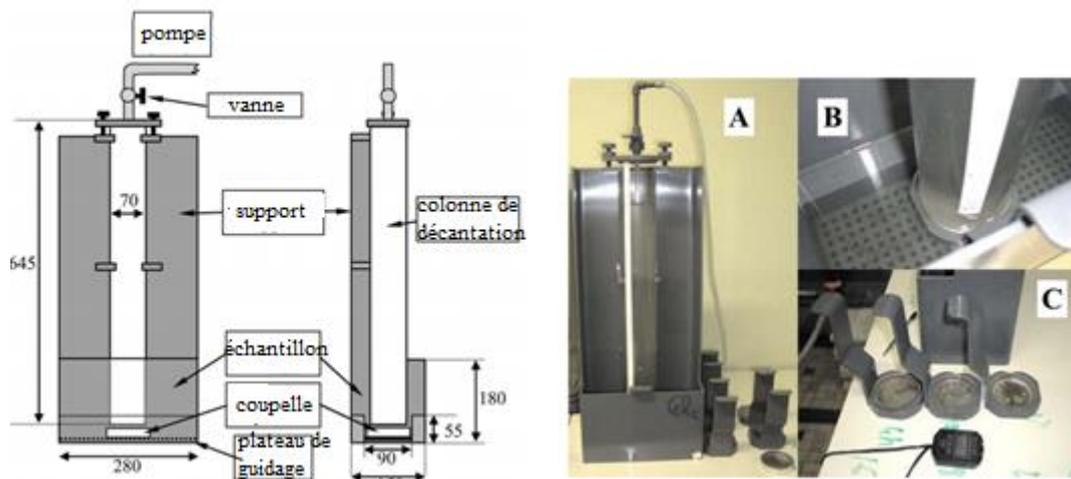
Les résultats obtenus à partir des colonnes de décantation au repos présentent de faibles différences en termes de distribution de vitesse de chute des particules en temps sec et en temps de pluie. Alors que la méthode d'élutriation, qui est une méthode dynamique, révèle des vitesses de chute plus importantes que celles enregistrées pour les colonnes de décantation au repos.



**Figure 2.10:** Différents équipements de détermination de la distribution de la vitesse de chute des particules : a) colonne d'Aston, b) colonne de Brombach, c) colonne de US EPA, d) appareil d'élutriation (tiré de Krishnappan et al., 2012)

Dans ce même cadre, Chebbo et Gromaire (2009) ont développé un protocole de mesure de la distribution de la vitesse de chute des particules (ViCAs). Ce protocole consiste à calculer le pourcentage cumulatif de masse des particules décantant avec une vitesse de chute inférieure à une vitesse donnée  $V_s$ . Une colonne de décantation avec une hauteur de 64,5 cm et un diamètre de 7 cm (Figure 2.11) est utilisée pour l'application de ce protocole qui réside dans la collection des particules décantées au fond de la colonne dans des coupelles à pas de temps choisis. D'autres dimensions de colonnes (colonne de 2 m, colonne de 1,4m) ont été utilisées ultérieurement dépendamment de la provenance des eaux usées (réseau, dessableur, etc.). La spécificité de ce protocole se présente en sa

simplicité et sa reproductibilité. En effet, Chebbo et Gromaire (2009) confirment une bonne reproductibilité pour ce protocole. Ils rapportent que l'incertitude à 95% sur la vitesse de chutes des particules augmente avec la diminution de la vitesse. Pour un échantillon d'eau en temps sec, l'incertitude varie entre  $\pm 2\%$  pour la plus forte vitesse et  $\pm 10,5\%$  pour  $V_s=0,01$  mm/s. Pour le cas des eaux unitaires, elle varie entre  $\pm 1,7\%$  pour  $V_s=10$  mm/s et  $\pm 15\%$  pour  $V_s=0,01$  mm/s. Pour les faibles vitesses de chute  $V_s=0,01$  mm/s, la différence d'incertitude entre le temps sec et le temps de pluie peut être expliquée par la présence des particules plus grossières dans les eaux unitaires, qui décantent plus vite. En effet, ces particules ayant des vitesses de chute importantes peuvent entraîner des particules moins rapides jusqu'au fond de la colonne de décantation d'une façon aléatoire. Cela engendrera une incertitude plus importante observée pour les faibles vitesses.



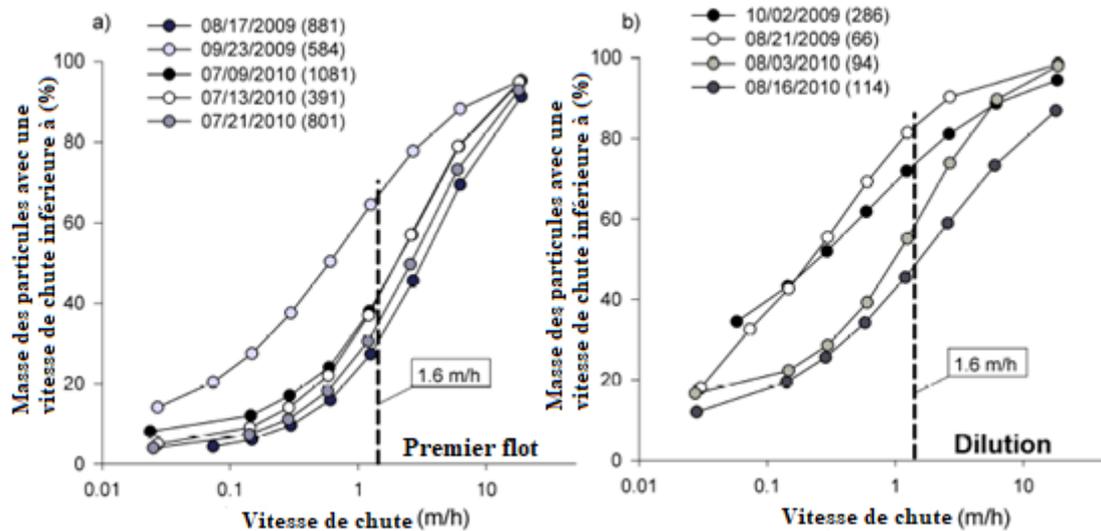
**Figure 2.11:** Colonne de décantation ViCAs : (A) colonne de décantation, (B) fond de la colonne où l'eau est versée, (C) coupelles (tiré de Chebbo & Gromaire, 2009)

Selon Chebbo et al. (1992), la vitesse  $V_{50}$  (50 % des particules décantent avec une vitesse de chute inférieure à  $V_{50}$ ) des particules présentes en eaux pluviales varie entre 7 et 11 m/h, alors que généralement 90% des particules décantent avec des vitesses  $V_{50}$  supérieures à celles enregistrées en réseau unitaire. Gasperi et al. (2009) viennent confirmer ce résultat. Ils ont établi une relation entre la vitesse médiane de chute  $V_{50}$  des particules et la proportion des eaux sanitaires en temps de pluie. Cette relation a montré que, plus la proportion des eaux sanitaires dans le réseau unitaire est élevée, plus la vitesse de chute des particules est faible. La différence entre la vitesse de chute médiane mesurée et la vitesse calculée par la loi de Stokes a été également étudiée (Chebbo & Bachoc,

1992). Les résultats ont montré que pour les particules fines ( $<50 \mu\text{m}$ ), le ratio vitesse mesurée  $V_{50}$ / vitesse calculée peut dépasser 1.

Maruéjols et al. (2013) en étudiant la caractérisation de la qualité de l'eau dans les bassins de rétention montrent que la vitesse médiane de chute ( $V_{50}$ ) à l'entrée du bassin en temps de pluie durant la période de lessivage est de l'ordre de 3 m/h alors qu'elle atteint 0,9 m/h en phase de dilution. Cette vitesse a atteint 7,56 m/h dans une étude effectuée sur un bassin de rétention avec décanteur par Michelbach et Weiß (1996). Cette variation peut être due à plusieurs paramètres.

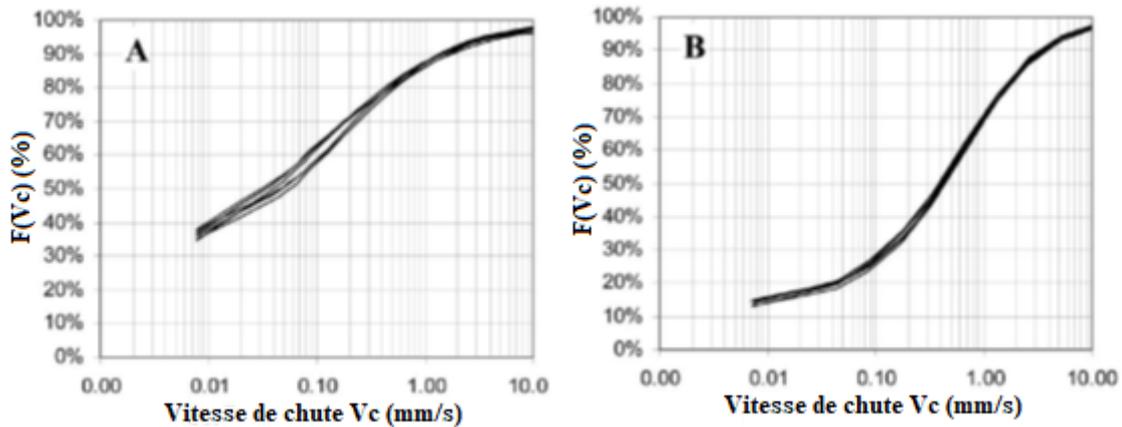
Il existe une corrélation entre la vitesse de chute des particules et la concentration en MeS (Maruéjols et al., 2013). Cette corrélation confirme que pour des concentrations élevées, les vitesses de chute des particules sont plus importantes. Cette corrélation est expliquée comme suit : en temps de pluie, une augmentation du débit (d'où une augmentation de la vitesse d'écoulement) permet de transporter à partir du bassin versant des particules qui sont plus minérales donc plus denses. Ainsi, avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement, des particules légères qui ont décanté dans le réseau en temps sec peuvent être remises en suspension. Ces particules peuvent être plus denses car elles peuvent subir une biodégradation dans les sédiments, ce qui fait qu'elles sont plus inorganiques. Avec toute cette charge, il y a une augmentation de la concentration et une présence des particules plus denses qui décantent plus vite. Ce scénario a été illustré dans l'étude de Maruéjols et al. (2013) en comparant la phase du premier flot et la phase de dilution d'un événement pluvieux à l'entrée d'un bassin de rétention (Figure 2.12).



**Figure 2.12:** Distribution de la vitesse de chute des particules en phase de premier flot lorsque la concentration est élevée (a) et en phase de dilution avec des concentrations faibles (b) (tiré de Maruéjols et al., 2013)

Maruéjols et al. (2013) démontrent que la vitesse de chute des particules est plus importante dans la phase de premier flot qu'en phase de dilution. Ils révèlent qu'au cours de la phase du lessivage, il y a entre 30% et 40% des particules qui décantent avec une vitesse inférieure à 1,6 m/h, alors qu'en phase de dilution, lorsque le débit commence à diminuer et la concentration aussi, il y a entre 40 et 80% des particules qui décantent à une vitesse de 1,6 m/h.

Par ailleurs, afin de montrer la différence entre la décantation en temps de pluie et en temps sec, Chebbo et Gromaire (2009) présentent des résultats typiques en utilisant leur protocole de mesure de la vitesse de chute des particules (Figure 2.13). Les résultats montrent que les particules en temps de pluie décantent plus rapidement que les particules dans les eaux sanitaires. La figure 2.13 montre que 40% des particules en temps sec décantent avec une vitesse inférieure à 0,01 mm/s, alors que juste 15% des particules présentes dans les eaux unitaires décantent avec une vitesse inférieure à 0,01mm/s. Ce résultat confirme l'hypothèse de la remise en suspension des particules par les forts débits en temps de pluie.



*Figure 2.13: Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec (A) et en temps de pluie (B) (tiré de Chebbo & Gromaire, 2009)*

## 2.6. Conclusion

Une bonne connaissance des différents processus se déroulant au sein du réseau d'assainissement permet de bien gérer le système de drainage et développer la modélisation pour la prévision qualitative et quantitative au sein du système.

Les réseaux unitaires et séparatifs présentent deux comportements hydrauliques différents en temps de pluie. En revanche, aucun réseau ne peut être considéré comme la meilleure solution puisque les deux réseaux engendrent parfois les mêmes charges polluantes. De plus, dans certains cas, à cause des sources de captage et de l'infiltration, le réseau sanitaire peut réagir à la pluie.

Avec le changement du comportement hydraulique, il y a un changement du comportement des polluants. Il a été montré qu'il y a une concordance entre l'évolution du débit et de la concentration en MeS en temps sec. En temps de pluie, les précipitations provoquent le lessivage des bassins versants, ainsi que l'augmentation de la vitesse d'écoulement au sein du réseau qui remet en suspension les particules décantées, ce qui permet une augmentation de la concentration reconnue par le phénomène du premier flot.

Ces changements qualitatifs et quantitatifs influencent les caractéristiques des polluants dans le réseau d'assainissement comme la taille et la vitesse de chute des particules. Ces deux caractéristiques sont influencées par la concentration en MeS et le comportement hydraulique (dont la vitesse d'écoulement...).

Dans la section suivante, la méthodologie de l'étude sera présentée.

### 3. Matériel et méthodes

Afin d'atteindre les objectifs du projet de maîtrise, une étude de caractérisation des eaux usées a été réalisée. Cette étude a été effectuée sur une section d'intercepteur de la Ville de Québec. Plusieurs échantillons ont été pris à trois sites dans le but de caractériser l'hydraulique et la qualité de l'eau et de comprendre l'interaction entre le débit, la sédimentation et la resuspension dans un réseau d'assainissement.

Le cas d'étude, le protocole d'échantillonnage ainsi que la méthodologie suivie pour caractériser la qualité de l'eau sont présentés dans le chapitre présent.

#### 3.1. Cas d'étude

##### 3.1.1. Localisation et caractéristiques

Des échantillons d'eaux sanitaires et unitaires provenant respectivement des bassins versants Duberger, St-Sacrement et Sacré-Cœur ont été étudiés. Les deux bassins versants St-Sacrement et Sacré-Cœur présentent une diversité dans leur occupation du sol. Ils sont majoritairement résidentiels. Le secteur commercial occupe une partie importante du territoire dans le bassin Sacré-Cœur alors que pour le bassin St-Sacrement, le secteur institutionnel est important. Des industries sont présentes sur le territoire du bassin Sacré-Cœur, ce qui peut influencer le régime hydraulique et la composition des eaux sur ce dernier. La superficie et la population de chaque bassin sont aussi différentes. La population du bassin versant Sacré-Cœur est presque 4 fois la population du bassin St-Sacrement et sa superficie est le double de la superficie de ce dernier. Les Tableaux 3.1 et 3.2 présentent en détails les caractéristiques et l'occupation du sol de chaque bassin versant. Il manquait de données sur le bassin versant Duberger qui n'est pas présenté.

*Tableau 3. 1: Caractéristiques et occupation du sol du bassin versant Sacré-Cœur (Consultants BPR, 1984)*

Caractéristiques		Occupation du sol	
Surface	3,4 km <sup>2</sup>	Institutionnel	12%
Imperméabilité	65%	Résidentiel	46%
Temps de concentration	25 min	Commercial	22%
Population	23000	Industriel	17%
		Espace vert	17%

**Tableau 3.2:** *Caractéristiques et occupation du sol du bassin versant St-Sacrement (Consultants BPR, 1984)<sup>4</sup>*

Caractéristiques		Occupation du sol	
Surface	1,54 km <sup>2</sup>	Institutionnel	30%
Imperméabilité	51%	Résidentiel	32%
Temps de concentration	26 min	Commercial	22%
Population	5211	Industriel	5%
		Espace vert	11%

Trois sites ont été choisis afin de faire une campagne d'échantillonnage. Le premier site se trouve au niveau de la chambre de contrôle St-Sacrement située à l'exutoire du bassin versant St-Sacrement qui est doté d'un réseau d'assainissement unitaire. À l'aval de cette chambre de contrôle, les eaux sont acheminées vers l'intercepteur. À côté de cette chambre, un deuxième point d'échantillonnage a été choisi. Il est au niveau d'un regard d'égout du réseau sanitaire venant du bassin versant Duberger qui est un bassin muni d'un réseau d'assainissement séparatif. Quelques mètres en aval de ce point, le collecteur venant du bassin Duberger rejoint l'intercepteur. À 1,8 km en aval de cette section d'intercepteur, se situe le troisième point étudié. Ce site est au niveau de la chambre de contrôle Sacré-Cœur qui reçoit les eaux unitaires du bassin Sacré-Cœur, qui est un bassin adjacent au bassin St-Sacrement (Figure 3.1), ainsi que les eaux unitaires de l'intercepteur. La figure 3.2 localise les trois sites étudiés.

<sup>4</sup> Une évolution dans l'occupation du territoire des deux bassins peut être mineure depuis 1984. Cette évolution n'a pas un grand effet sur le débit moyen.

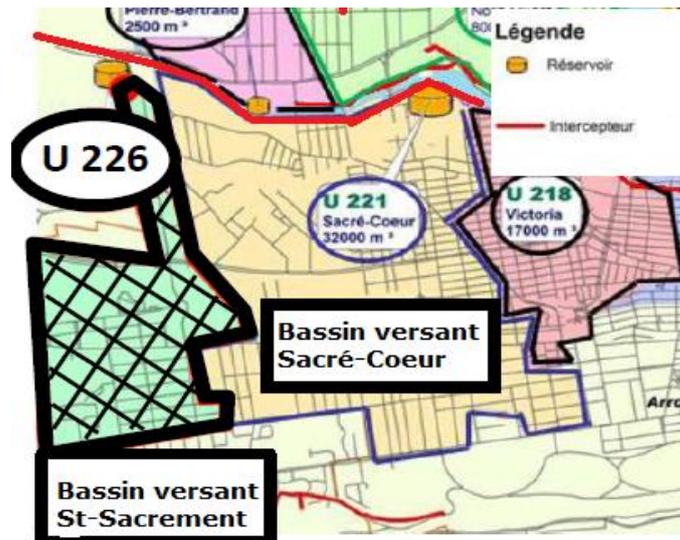


Figure 3.1: Bassins versants St-Sacrement et Sacré-Coeur (Maruéjols, 2012)

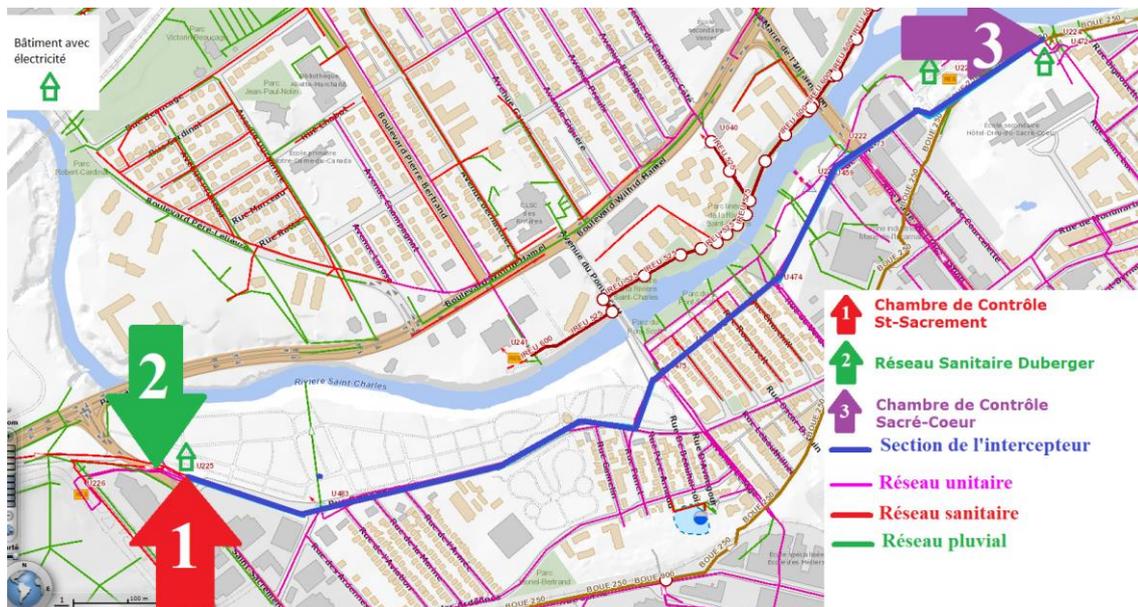


Figure 3.2 : Localisation des trois sites étudiés

### 3.1.2. Fonctionnement des chambres de contrôle

#### 3.1.2.1. Fonctionnement de la chambre de contrôle St-Sacrement

La chambre de contrôle se trouvant à l'exutoire du bassin versant St-Sacrement reçoit toutes les eaux du bassin versant et contrôle leur cheminement vers l'intercepteur, le bassin de rétention ou le milieu récepteur. Les eaux dans la chambre St-Sacrement peuvent suivre plusieurs chemins comme indiqué sur la Figure 3.3 :

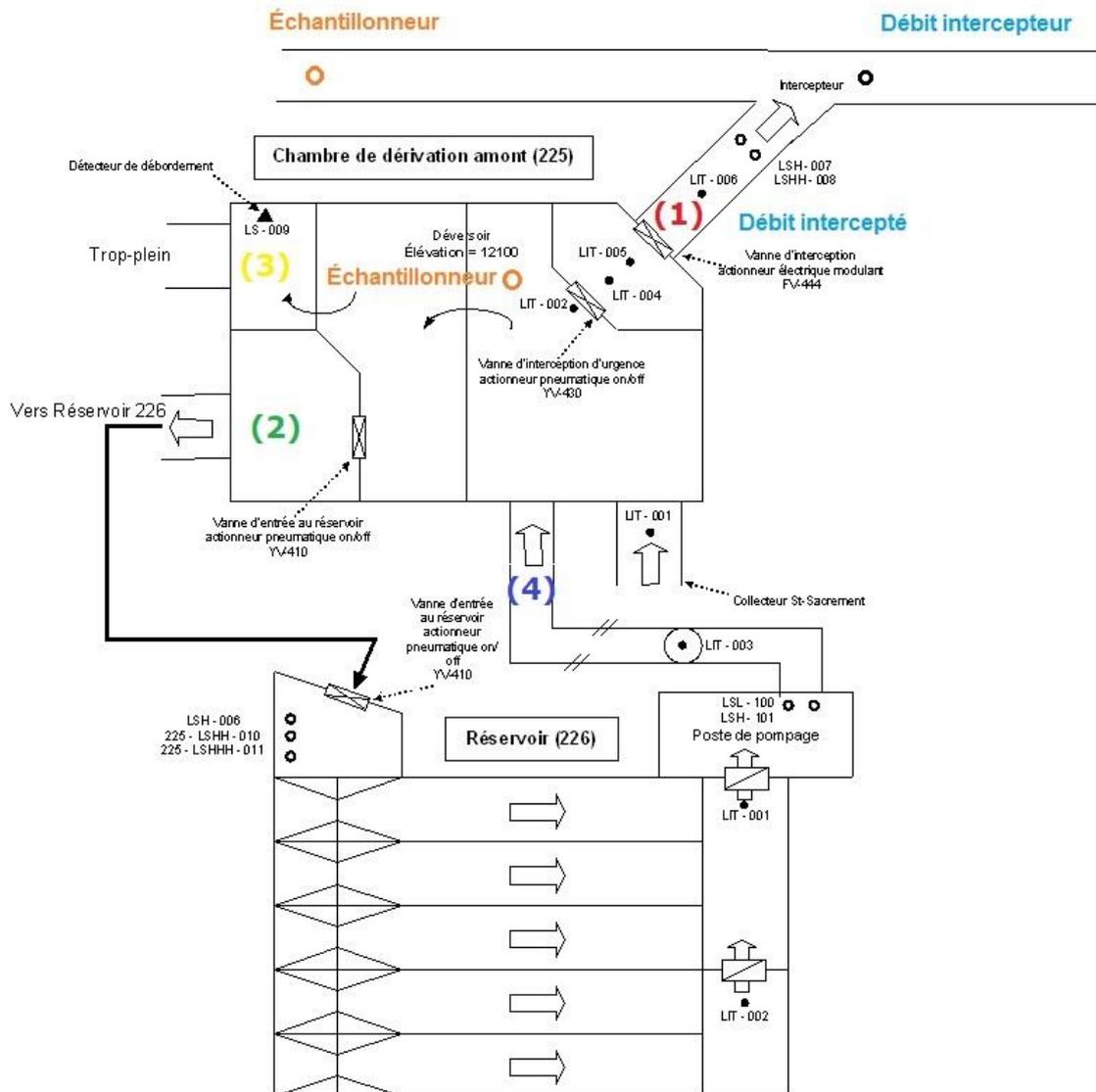
- (1) En temps sec, les eaux sanitaires en provenance du bassin St-Sacrement passent sous la vanne d'interception qui est ouverte pour rejoindre l'intercepteur qui les achemine vers la station de récupération des ressources de l'eau.
- (2) En temps de pluie, la vanne d'interception au niveau de la chambre est dans l'eau ou presque fermée pour empêcher l'écoulement de l'eau vers l'intercepteur puisque les débits en provenance du Duberger sont assez importants. L'eau s'accumule dans la chambre et commence à se déverser vers le bassin de rétention.
- (3) Une fois le bassin de rétention rempli (volume total 7600 m<sup>3</sup>), les eaux provenant de la chambre sont déversées vers le trop-plein pour déborder dans la rivière St-Charles.
- (4) Après la pluie, une fois que la hauteur d'eau dans l'intercepteur tend vers le niveau habituel de temps sec, les eaux accumulées dans le bassin de rétention sont pompées vers la chambre St-Sacrement pour rejoindre l'intercepteur afin d'être traitées à la station de récupération des ressources de l'eau.

Afin de bien contrôler et gérer ce qui se passe au niveau de la chambre St-Sacrement, un système d'acquisition de données est installé. Ce système se compose de limnimètres présents dans différentes parties de la chambre (Figure 3.3).

Le limnimètre Lit-001 mesure la hauteur d'eau dans le collecteur de St-Sacrement juste avant la chambre. Le limnimètre Lit-002 permet de mesurer le niveau d'eau dans la chambre. Les limnimètres Lit-004 et Lit-006 évaluent la hauteur d'eau en amont et en aval de la vanne d'interception. Le limnimètre Lit-005 est utilisé pour des fins de validation.

Au niveau du bassin de rétention, la hauteur d'eau dans les deux compartiments est mesurée avec les limnimètres Lit-001 et Lit-002 (différents des deux limnimètres Lit-001 et Lit-002 installés dans la chambre de contrôle). Alors que le limnimètre Lit-003 permet de connaître le niveau d'eau dans la conduite de vidange du bassin de rétention vers la chambre de contrôle St-Sacrement.

Les niveaux d'eau dans les différentes parties de la chambre permettent de calculer le débit sous vanne, le débit déversé et le débit dans le collecteur St-Sacrement afin d'assurer une bonne gestion. Le débit entrant permet de manipuler la vanne d'interception lorsque les quantités d'eau augmentent dans la chambre afin de maintenir le bon fonctionnement de l'intercepteur.



**Figure 3.3:** Chambre de contrôle St-Sacrement : Fonctionnement et système de données (Voir paragraphe 3.1.2.1)

### 3.1.2.2. Fonctionnement de la chambre de contrôle Sacré-Cœur

Le même principe de fonctionnement est appliqué au niveau de la chambre Sacré-Cœur. En temps sec, les eaux sanitaires viennent à partir de l'intercepteur vers la chambre de

contrôle Sacré-Cœur. Ces eaux contiennent les eaux en provenance du bassin versant Duberger, du bassin St-Sacrement ainsi que du bassin Sacré-Cœur.

Comme indiqué sur la Figure 3.4, les eaux passent par la chambre de contrôle à travers la vanne de contrôle qui est ouverte en temps sec pour rejoindre l'intercepteur (la ligne bleue). En temps de pluie, les eaux s'accumulent dans la chambre, puisque la vanne de contrôle est dans l'eau et empêche d'acheminer de grands débits vers l'intercepteur en aval. Lorsque la hauteur d'eau dans la chambre atteint le seuil du déversoir, l'eau commence à se déverser vers le bassin de rétention. Une fois que le bassin de rétention est plein et qu'une importante charge hydraulique continue à rentrer dans la chambre, le déversement vers la rivière St-Charles est inévitable.

Un système d'acquisition de données est installé dans la chambre Sacré-Cœur permettant de connaître les niveaux d'eau dans les différentes parties de la chambre. Le limnimètre Lit-001 permet de mesurer le niveau d'eau dans la chambre. Le limnimètre Lit-002 fournit de l'information sur la hauteur d'eau en amont de la vanne d'interception. Les hauteurs d'eau évaluées par les limnimètres Lit-004 et Lit-005 permettent de savoir s'il y a un déversement dans le bassin de rétention et un débordement vers la rivière St-Charles respectivement.

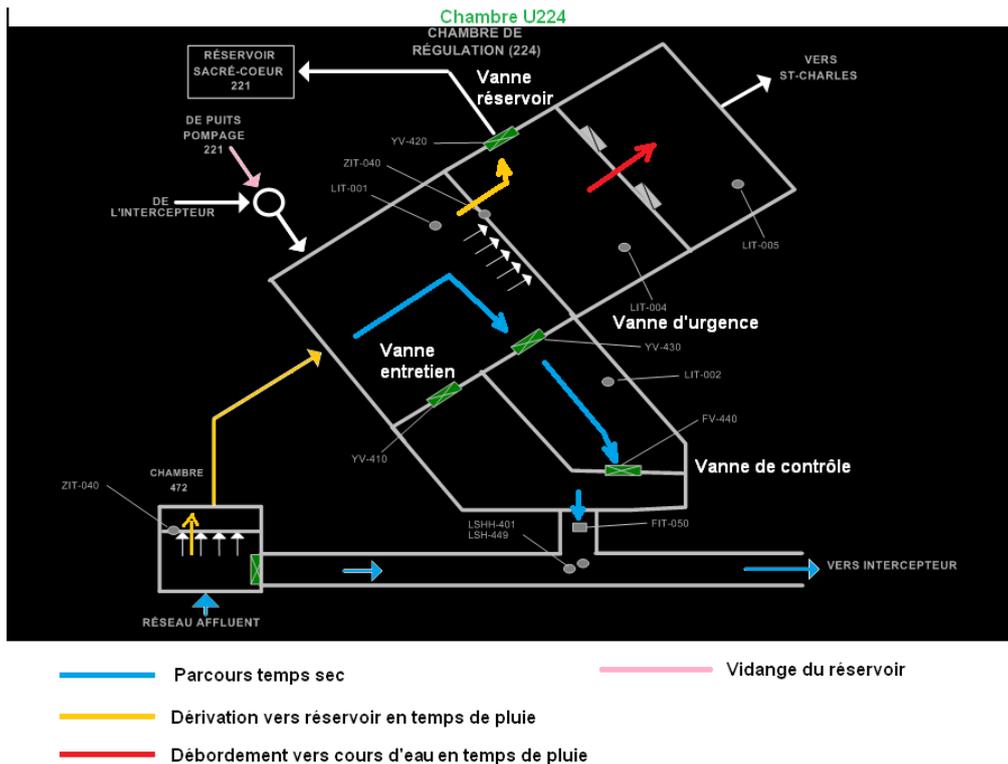


Figure 3.4 : Chambre de contrôle Sacré-Cœur : Fonctionnement et système de données<sup>5</sup>

### 3.2. Protocole d'échantillonnage

L'échantillonnage a été effectué en temps sec et en temps de pluie pour comprendre le comportement des particules dans chaque site d'étude sous différentes conditions hydrauliques. La campagne d'échantillonnage a été réalisée de juin 2017 à la mi-novembre 2017. Elle s'est déroulée au niveau des trois sites d'étude : la chambre de contrôle St-Sacrement, la chambre de contrôle Sacré-Cœur et le réseau sanitaire Duberger. À cause de certains problèmes d'installation, l'échantillonnage dans le réseau sanitaire Duberger et à la chambre Sacré-Cœur a commencé plus tard en septembre. Des échantillons ont été pris à différentes heures de la journée, ce qui a nécessité beaucoup de disponibilité et de personnel, surtout lorsqu'il s'agissait d'un temps de pluie. Des campagnes ont été effectuées même lorsque l'événement pluvieux survenait tard le soir, pendant les premières heures du matin ou bien à la fin de la semaine. Vu le nombre de sites d'études, au moins deux personnes doivent être disponibles et se déplacer pour lancer l'échantillonnage. Une personne doit être présente à St-Sacrement pour manipuler l'auto-échantillonneur dans la chambre de contrôle et celui installé au niveau du réseau

<sup>5</sup> En cas d'augmentation du débit dans l'intercepteur, l'eau provenant de la chambre 472 passe par la chambre Sacré-Cœur pour se déverser vers le bassin de rétention. Après la diminution du débit dans l'intercepteur en temps sec, les eaux du bassin de rétention sont pompées vers ce dernier à travers le puits de pompage

sanitaire Duberger. L'autre personne doit être à la chambre Sacré-Cœur. À cause d'un dysfonctionnement au niveau des auto-échantillonneurs (voir la section suivante), une manipulation manuelle et une présence sur place durant tout l'échantillonnage, ont été requises. En outre, les échantillons récoltés ont été analysés au laboratoire dans les 24 heures qui ont suivi leur collecte.

Tous les échantillons récoltés sont présentés dans l'annexe A.

### 3.2.1. Matériel

Les trois points d'échantillonnage sont équipés d'un auto-échantillonneur réfrigéré de type *Sigma 900max* (Hach, Loveland, Colorado, États-Unis). Chaque échantillonneur contient 24 bouteilles de 1 litre chacune (Figure 3.5). Il est réfrigéré à 4°C, ce qui permet de conserver les bouteilles au frais lors de l'échantillonnage.

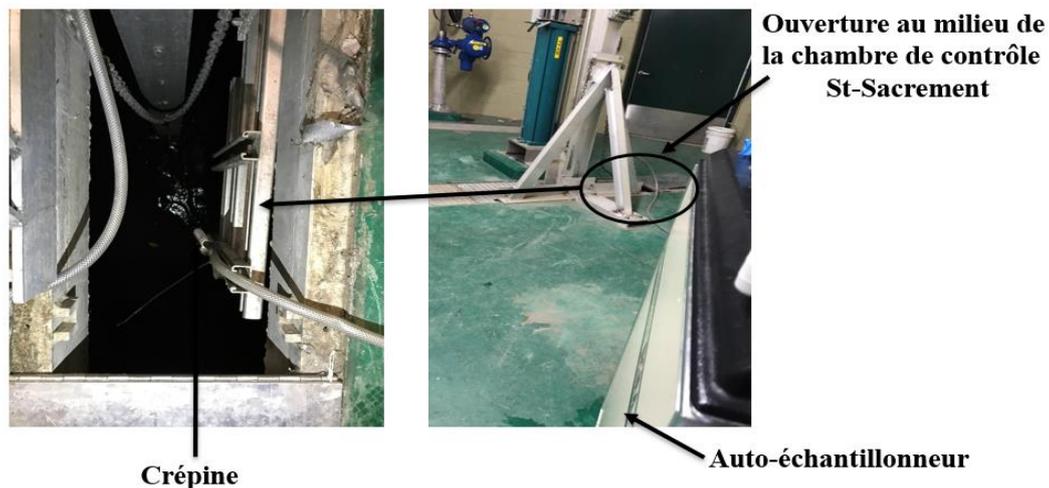


*Figure 3.5: Auto-échantillonneur Sigma 900max*

L'auto-échantillonneur est programmable. Avec un pas de temps fixe, il prend des échantillons à chaque période souhaitée automatiquement. À l'aide d'une pompe, l'échantillonneur permet de collecter un volume précis dans chaque bouteille pour chaque pas de temps ou un volume d'eau à chaque pas de temps dans la même bouteille pour avoir un échantillon composite. Avant chaque échantillon, il y a une purge du tuyau. La

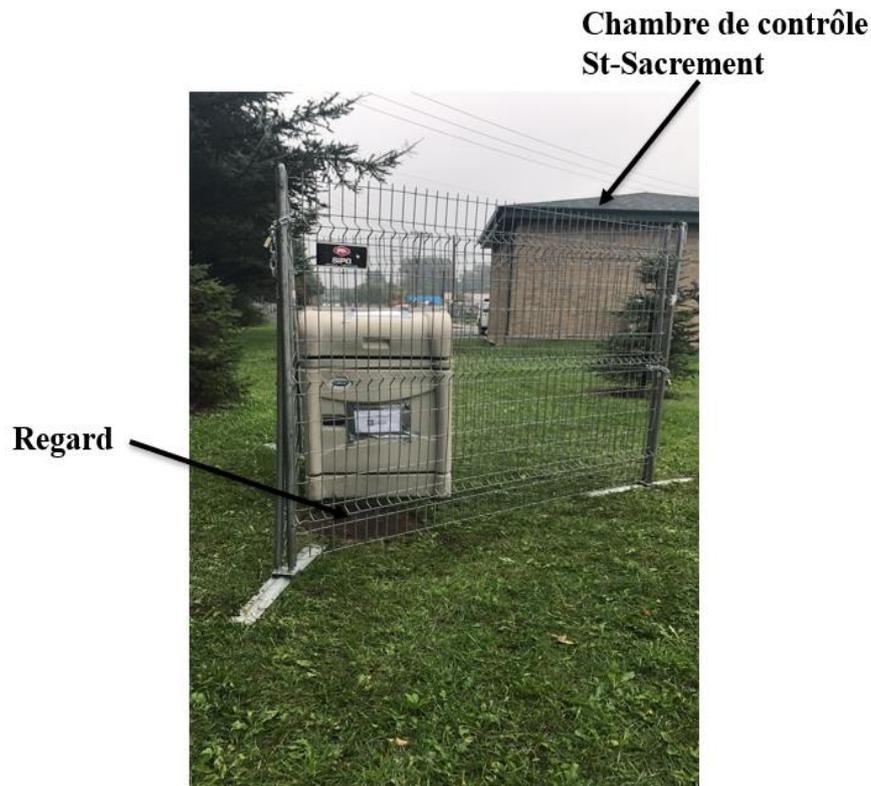
vitesse de la montée d'eau dans le tuyau est estimée approximativement à 30 m/min, ce qui permet de collecter les particules d'intérêt. Lorsqu'il s'agit d'un pas de temps variable ou de volumes d'eau différents, il faut qu'un opérateur soit sur place. C'était le cas en temps de pluie, puisque différents pas de temps ainsi que différents volumes ont été utilisés. Même en temps sec, la présence du personnel sur place a été requise. Cela est dû aux quelques dysfonctionnements comme le blocage du bras de distribution, la distribution aléatoire des échantillons, le colmatage de la crépine et l'arrêt brusque du pompage de l'eau.

Au niveau des chambres de contrôle, les auto-échantillonneurs sont installés à l'intérieur. Des ouvertures au milieu des chambres ont permis l'introduction des crépines dans la conduite d'intérêt (Figure 3.6).



**Figure 3.6:** Installation de l'auto-échantillonneur dans la chambre de contrôle St-Sacrement

Au niveau du réseau sanitaire Duberger, l'auto-échantillonneur a été installé à l'extérieur près du regard où la crépine a été introduite. Il a été protégé par des clôtures métalliques (Figure 3.7) et a été alimenté en électricité à partir de la chambre de contrôle St-Sacrement.



*Figure 3.7: Auto-échantillonneur installé au niveau du réseau sanitaire Duberger*

### 3.2.2. Échantillonnage en temps sec

La campagne d'échantillonnage en temps sec a été effectuée pour différentes plages horaires durant la journée pendant lesquelles une variation importante (maximum et minimum) en termes de charges hydrauliques et charges de polluants particuliers est constatée;

- Le matin, entre 5h et 9h;
- Au milieu de la journée, entre 11h et 14h; et
- Le soir, entre 18h et 22h.

L'échantillonnage pour chaque plage horaire s'est déroulé comme suit :

- Entre 5h et 9h : un échantillon de 900 ml a été pris à chaque 10 minutes;
- Entre 11h et 14h : un échantillon de 900 ml a été pris à chaque 8 minutes; et
- Entre 18h et 22h : un échantillon de 900 ml a été pris à chaque 10 minutes.

Chaque échantillon de 900 ml a été pris par un seul cycle de pompage. Les échantillons pour chaque plage horaire n'ont pas été pris forcément dans la même journée, vu la forte

charge de travail au laboratoire et les nombreuses expérimentations à faire dans ce cas. Mais l'hypothèse que les données sont cohérentes pour différents jours a été retenue puisque les conditions en temps sec sont quand même très similaires.

Les échantillons ont été récoltés dans les chambres de contrôle St-Sacrement et Sacré-Cœur, avant les vannes de contrôle. Au niveau du réseau sanitaire Duberger, l'eau a été prise du regard en amont du raccordement de ce dernier à l'intercepteur. Aucune tige n'a été utilisée pour fixer la crépine dans l'eau. Donc la position exacte de la crépine dans l'eau ne peut pas être connue. Par contre, il était assuré qu'elle soit entièrement immergée dans l'eau.

### **3.2.3. Échantillonnage en temps de pluie**

#### **3.2.3.1. Prévisions des événements pluvieux**

Pour pouvoir réussir un échantillonnage représentatif en temps de pluie, des outils de prévisions météorologiques ont été utilisés. Le site d'Environnement Canada<sup>6</sup> qui fait la prévision météorologique journalière ainsi qu'une mise à jour assez fréquente permet de prévoir la journée où il va pleuvoir. Ensuite le site de Météo Média<sup>7</sup> a été consulté afin de déterminer la quantité de précipitations prévue. Dans des travaux antérieurs (Wipliez, 2011), l'intensité approximative de pluie qui provoque un ruissellement au niveau du bassin versant St-Sacrement avait été évaluée à 4 mm/h.

De plus, pour voir l'évolution de la pluie sur le territoire, le radar d'Environnement Canada<sup>8</sup> a été consulté. La station radar la plus proche est à Villeroy vis à vis de Trois-Rivières sur la rive sud du fleuve St-Laurent (Figure 3.8). Ce radar couvre un territoire d'un rayon de 240 km. Il donne de l'information sur les précipitations selon 14 classes d'intensité variant de 0,1 mm/h jusqu'à une intensité supérieure à 200 mm/h. Également, ce radar permet de visualiser les quantités de pluie durant les trois dernières heures avec un pas de temps de 20 minutes.

Le départ pour l'échantillonnage se faisait toujours à partir de l'université qui est proche des sites d'étude. L'échantillonnage est décidé après la consultation de toutes les références de prévision météorologique et le début de la pluie pour estimer son intensité.

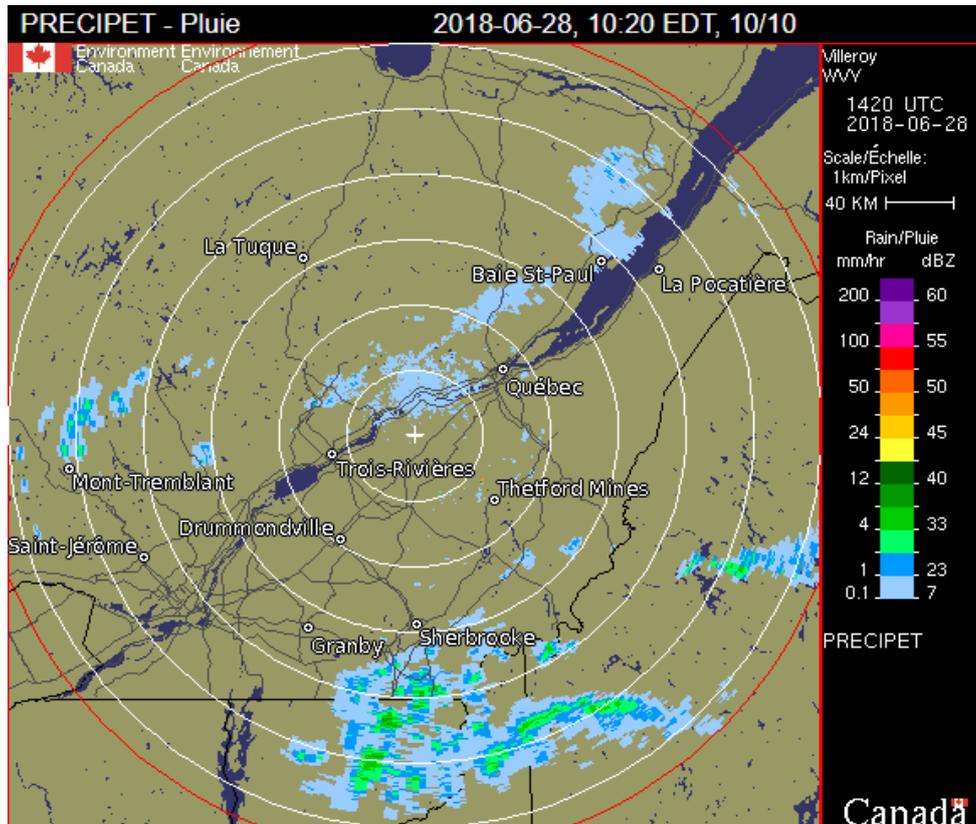
---

<sup>6</sup> <https://meteo.gc.ca>

<sup>7</sup> <https://www.meteo.com/ca>

<sup>8</sup> <https://meteo.gc.ca/radar/>

Avec une forte intensité de pluie, il pouvait être anticipé que la pluie échantillonnée serait représentative sur les trois sites étudiés.



*Figure 3.8: Radar Environnement Canada (Villeroy, 28/06/2018)*

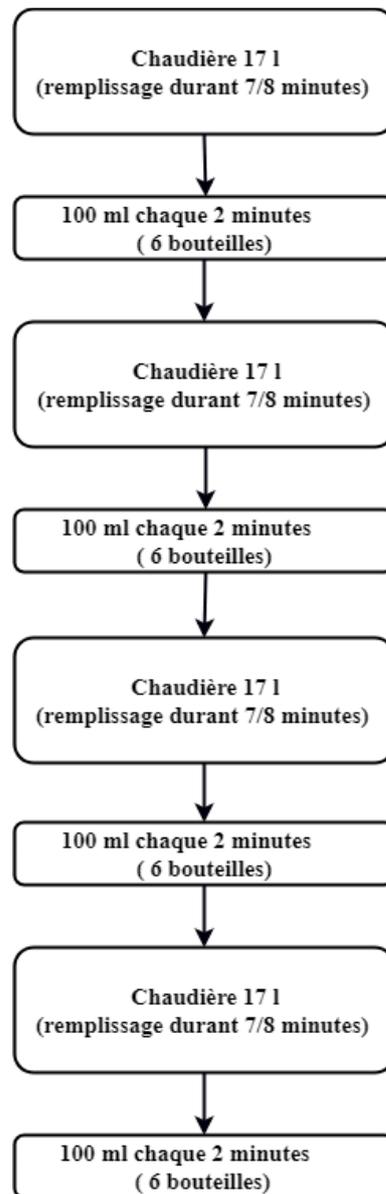
### 3.2.3.2. Déroulement de l'échantillonnage en temps de pluie

Une fois la pluie détectée, l'installation au niveau des trois sites d'étude se faisait. La présence sur les lieux était préférable avant le début de la pluie pour pouvoir détecter le phénomène de premier flot.

La chambre St-Sacrement est considérée comme le point de référence. Une fois que le débit provenant du bassin St-Sacrement commençait à augmenter, l'échantillonnage était lancé. Il s'effectuait simultanément sur les trois points d'échantillonnage : la chambre de contrôle St-Sacrement, le réseau sanitaire Duberger et la chambre de contrôle Sacré-Cœur.

Le remplissage d'une chaudière de 17 l était effectué au début de l'échantillonnage pour effectuer des tests ViCAs. Ensuite, la prise de 6 échantillons de 100 ml chacun a été réalisée à chaque 2 minutes. Cette séquence d'une chaudière et 6 bouteilles était répétée

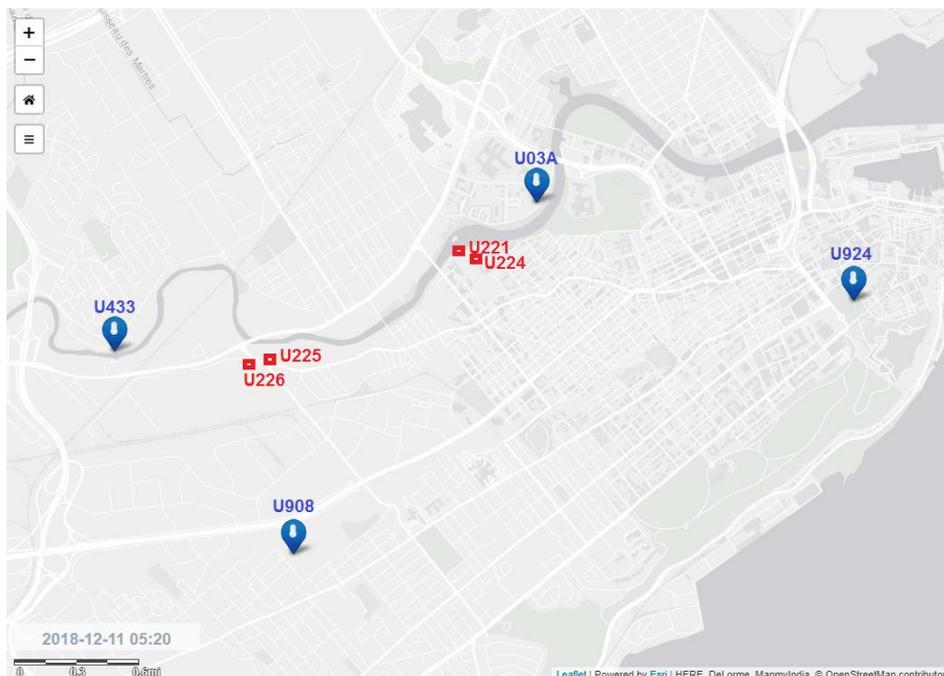
jusqu'au remplissage de 4 chaudières de 17 l chacune et 24 bouteilles. Cette séquence durait approximativement 1h20 (Figure 3.9). Le contenu des chaudières a été utilisé pour déterminer la concentration la plus élevée enregistrée durant l'événement pluvieux. Le contenu des bouteilles a été utilisé pour déterminer les profils des concentrations en matières en suspension.



*Figure 3.9: Protocole d'échantillonnage en temps de pluie*

### 3.2.3.3. Données pluviométriques

Des données de pluie avec un pas de temps de 5 minutes ont été fournies par la Ville de Québec à partir de deux pluviomètres U433 et U03A (Figure 3.10). Ces pluviomètres sont au niveau des chambres de contrôle St-Sacrement (U225) et Sacré-Cœur (U224).



*Figure 3.10:* Localisation des pluviomètres utilisés.

### 3.3. Analyses en laboratoire

Les analyses effectuées en laboratoire déterminent les variables suivantes :

- La concentration des Matières en suspension (MeS);
- La concentration des Matières volatiles en suspension (MVeS); et
- Distribution de la vitesse de chute en assainissement (ViCAs).

Toutes les analyses effectuées pour les échantillons récoltés sont présentes à l'annexe B.

#### 3.3.1. Composition en MeS et MVeS

La concentration en MeS et en MVeS a été déterminée pour les échantillons dans les bouteilles collectées en temps sec et en temps de pluie, ainsi que la masse des particules filtrées lors des essais ViCAs.

En temps sec et en temps de pluie, la concentration des MeS et des MVeS a été déterminée à chaque fois pour le mélange des échantillons de trois bouteilles collectées successivement afin d'optimiser la charge de travail. Cela n'a pas permis d'avoir plus de détails et de données sur les échantillons collectés. Un banc de filtration a été utilisé pour collecter les particules sur des filtres (Figure 3.11).

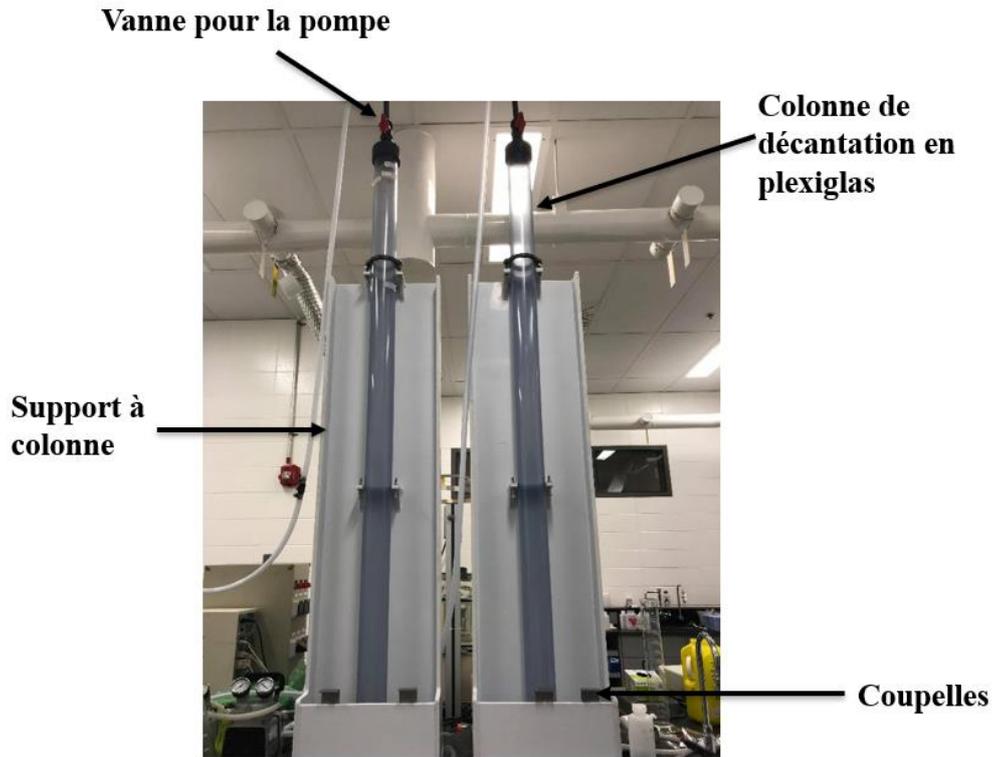


*Figure 3.11: Banc de filtration*

Le protocole complet de détermination des solides en suspension totaux et volatils par la méthode gravimétrique est présenté à l'annexe C.

### **3.3.2. Distribution de la vitesse de chute des particules**

Le protocole ViCAs choisi pour faire les mesures de la vitesse de chute de particules est celui de Chebbo et Gromaire (2009). Ce protocole a été utilisé pour des études antérieures sur l'eau usée effectuées au sein de l'équipe de recherche modelEAU (Tik, et al., 2014). La méthode est bien détaillée et expliquée dans le protocole présenté à l'annexe D. Elle consiste à pomper l'eau usée en quelques secondes dans une colonne de plexiglas de 2 m de hauteur et 7,6 cm de diamètre (Figure 3.12). Cette colonne est fixée sur un support. Les particules qui décantent sont récupérées dans des coupelles mises en dessous de la colonne de décantation. L'expérience se déroule sur deux heures. Les pas de temps choisis sont 1, 3, 5, 10, 20, 35, 60 minutes et 2h. Un chronomètre est utilisé pour marquer ces pas de temps. La masse récoltée est passée premièrement au four à 105°C pour mesurer les MeS. Ensuite, les filtres sont brûlés à 550°C afin de déterminer les MVeS. Les résultats sont ensuite introduits sur une feuille Excel qui permet de faire tous les calculs nécessaires pour déterminer la distribution des vitesses de chute de particules associée à chaque fraction de masse. Un bilan de masse est établi entre la masse décantée dans les coupelles et la masse initiale de particules introduites dans la colonne. Chebbo et Gromaire (2009) précisent dans leur protocole que l'essai ViCAs peut être considéré comme valide et fiable si l'erreur sur le bilan de masse ne dépasse pas  $\pm 15\%$ .



*Figure 3.12: Composants de la colonne de décantation pour les ViCAs*

Les tests ViCAs ont été faits sur des échantillons composites collectés en temps sec mélangeant le même volume pris pour les différents pas de temps. En temps de pluie, les tests ont été effectués avec des prélèvements ponctuels : un pour le premier flot et le deuxième en phase de dilution.

### **3.4. Estimation du débit**

Plusieurs données de hauteur d'eau et de débits ont été récupérées de la Ville de Québec. Ces données proviennent de la chambre de contrôle St-Sacrement, la chambre Sacré-Cœur et l'intercepteur.

Au niveau de la chambre Sacré-Cœur, les données de débit qui sont utilisées pour la description du comportement hydraulique sont fiables et cohérentes en comparaison avec les estimations faites à partir des données de la population et du type d'occupation du territoire sur le bassin versant ainsi qu'en tenant compte du débit en amont provenant de l'intercepteur et passant par la chambre.

Quelques données aberrantes sont enregistrées au niveau de la chambre St-Sacrement, telles que des données de débit négatives observées surtout en temps sec et des hauteurs

d'eau dans le collecteur St-Sacrement très faibles en temps sec. En théorie, cette hauteur d'eau permet d'estimer le débit amont qui rentre dans la chambre St-Sacrement à partir de la formule Manning-Strickler. Le calcul de débit à partir de cette formule donne des valeurs très faibles par rapport aux estimations faites à partir des rejets typiques par personne et selon l'occupation de sol. Également, en temps de pluie, le refoulement de l'eau de la chambre St-Sacrement vers le collecteur rend les données de la hauteur d'eau inutilisables (Rondeau, 2009). La méthodologie suivie pour déterminer le débit en amont de la chambre St-Sacrement consiste à faire un bilan de débit au niveau de la chambre.

En temps sec, le débit entrant (débit du collecteur St-Sacrement) a été calculé par la somme du débit dans la chambre St-Sacrement (à partir de la variation de la hauteur d'eau dans la chambre) et le débit sous vanne (débit vers l'intercepteur). L'estimation du débit sous vanne a été effectuée (lorsque la vanne est en eau en temps sec)<sup>9</sup>, en utilisant les niveaux d'eau Lit-004 et Lit-006 en amont et en aval de la vanne (Figure 3.3). Le bilan de débit est exprimé selon l'équation suivante :

$$Q_{\text{St-Sacrement}} = \frac{dh}{dt} S + Q_{\text{sous vanne}} \quad (\text{Eq 4.1})$$

où

$Q_{\text{St-Sacrement}}$  : Débit du collecteur St-Sacrement (m<sup>3</sup>/s);

$h$  : Hauteur d'eau dans la chambre St-Sacrement (m);

$S$  : Surface de la chambre St-Sacrement (m<sup>2</sup>); et

$Q_{\text{sous vanne}}$  : Débit sous vanne (m<sup>3</sup>/s).

La méthode de calcul du débit sous vanne est présentée à l'annexe E. Afin de valider les ordres de grandeur obtenus, le calcul du débit moyen du bassin St-Sacrement, à partir des données de la population et l'occupation du territoire, s'impose. Les hypothèses prises en compte pour le calcul du débit moyen sur le bassin St-Sacrement sont :

- Débit sanitaire suggéré : 310 l/personne/j (Brière, 2012)

---

<sup>9</sup> La vanne contrôle le flux d'eau dirigé vers l'intercepteur. En conditions d'utilisation normale, la vanne doit être ouverte complètement en **temps sec** puisque le débit n'est pas élevé. En revanche, à cause de certains dysfonctionnements, la vanne peut être dans l'eau.

- Débit industriel suggéré : 25 m<sup>3</sup>/(ha. j) (Brière, 2012)

- Débit d'infiltration suggéré : 2 l/s<sup>10</sup>

Le calcul a donné une valeur de débit moyen journalier de l'ordre de 20 l/s ce qui correspond aussi aux estimations faites par le bilan de débit.

Comme le refoulement dans le collecteur St-Sacrement en temps de pluie inutilisable les données de la hauteur d'eau, un bilan de débit est indispensable. Ce débit est estimé à partir de l'équation Eq 4.2 :

$$Q_{\text{collecteur}} = \frac{dh}{dt} S + Q_{\text{déversé}} + Q_{\text{sous vanne}} \quad (\text{Eq 4.2})$$

Le débit déversé  $Q_{\text{déversé}}$  est calculé à partir de l'équation Eq 4.3:

$$Q = C_d B^3 \sqrt{h_e - h_d} \quad (\text{Eq 4.3})$$

où

Q : Débit calculé (m<sup>3</sup>/s);

C<sub>d</sub> : Coefficient du déversoir (C<sub>d</sub> = 2,385);

B : Largeur du déversoir (B = 7 m);

h<sub>e</sub> : Hauteur d'eau mesurée (m); et

h<sub>d</sub> : Hauteur du seuil (1,2 m).

Selon Maruéjols (2012), cette équation est valide juste pour certaines conditions hydrauliques. En effet, l'équation n'est valide que pour le cas de l'homogénéité du flux sur la hauteur et la largeur et pour un déversement frontal au seuil. Par contre le cas étudié présente un déversoir latéral qui provoque une différence de la hauteur d'eau le long du seuil du déversoir. La comparaison entre les volumes d'eau enregistrés dans le bassin de rétention et les volumes déversés permet de constater une différence. À partir de cette différence, Maruéjols (2012) propose de rectifier le débit déversé pour obtenir un débit corrigé à partir de l'équation Eq 4.4 :

$$Q_{\text{corrigé}} = \alpha Q_{\text{déversé}} \quad (\text{Eq 4.4})$$

où  $\alpha$ : coefficient de correction.

---

<sup>10</sup> Par manque d'informations sur la longueur du réseau, l'infiltration ne peut pas être estimée par (m<sup>3</sup>/(cm.km)/j), alors une valeur approximative est suggérée de l'ordre de 2 l/s.

Ce coefficient varie d'un événement à un autre. Il est déterminé en calculant l'écart entre le volume observé dans le bassin de rétention et le volume déversé.

Au niveau du réseau sanitaire Duberger, le débit ne peut être estimé que lorsque la vanne de contrôle dans la chambre St-Sacrement est en eau. Le débit sanitaire Duberger est déduit à partir de la différence entre le débit de l'intercepteur et le débit sous vanne dans la chambre St-Sacrement.

## **4. Résultats et discussion**

Dans cette section, les résultats obtenus selon la méthodologie suivie seront analysés. Dans une première partie, les événements pluvieux étudiés seront présentés et suivis de l'étude du comportement hydraulique sur les trois sites d'étude. Dans une seconde partie, l'évolution de la qualité de l'eau sera présentée. Avec ces résultats, une étude de la vitesse de chute des particules permettra de tirer des conclusions pour aboutir au troisième objectif de l'étude.

### **4.1. Événements pluvieux étudiés**

Un total de 8 événements a été échantillonné pendant la campagne d'échantillonnage dans la chambre St-Sacrement. À cause de quelques problèmes d'installation, seulement 5 échantillons au niveau du réseau sanitaire Duberger et 6 échantillons au niveau de la chambre de contrôle Sacré-Cœur ont été récoltés en temps de pluie (Annexe A). Le tableau 4.1 présente les caractéristiques des événements pluvieux échantillonnés. Dans ce tableau, la durée de la pluie, la pluie totale et les intensités sont considérées à partir du début de la pluie jusqu'à la fin de l'échantillonnage. Les événements des 02-11-17 et 05-11-17 n'ont pas été échantillonnés selon le protocole d'échantillonnage établi en temps de pluie.

**Tableau 4.1 : Caractéristiques des événements pluvieux échantillonnés**

Date de l'événement	Début de la pluie	Durée de la pluie	Échantillonnage	Pluie totale (mm)	Intensité max sur 5 minutes (mm/h)	Intensité moyenne (mm/h)	Temps sec antécédant (h)
27-06-17	13h20	25 min	14h30-15h30	2	10	5	67
11-07-17*	11h25	10 min	11h40-12h55	5	30	29	42
07-09-17	10h35	2h10	12h38-13h57	4	4	2	5
04-10-17*	16h00	2h05	18h56-20h09	17	41	8	164
15-10-17*	6h20	5h25	09h15-10h23	12	8	3	131
24-10-17*	20h30	2h10	21h30-22h44	24	35	11	214
02-11-17	22h00	12h	10h <sup>11</sup>	18	4	1	43
05-11-17	16h45	1h15	17h55-18h41 <sup>12</sup>	2	2	1	58

\* L'hydraulique et la qualité de l'eau des événements étoilés (Tableau 4.1) seront présentées plus en détails ultérieurement.

Les événements échantillonnés présentent une grande variabilité. La durée de la pluie varie entre 10 minutes et 12h. Les précipitations enregistrées pour chaque événement varient entre 2 mm et 24 mm. La période de temps sec avant l'événement pluvieux n'a pas été considérée comme critère pour décider de réaliser l'échantillonnage, mais cette dernière présente une large diversité aussi. La période sèche la plus courte avant la pluie était de 5h alors que la plus longue était 214h (9 jours). L'intensité maximale sur 5 minutes a varié entre 2 mm/h et 41 mm/h, tandis que l'intensité moyenne varie entre 1 mm/h et 29 mm/h. Les périodes sèches les plus longues sont enregistrées à l'automne (événements des 4, 15 et 24 octobre). Également, les intensités de pluie les plus importantes ont été constatées sur cette même période (événements des 4 et 24 octobre). Les événements survenus en été sont plus courts, avec des intensités maximales sur 5

<sup>11</sup> La pluie a commencé à 22h00 le 01-11-17, l'échantillonnage n'est effectué que le 02-11-17, et consistait en un échantillonnage ponctuel à 10h puisqu'une augmentation de débit n'a pas été remarquée à l'œil nu dans la chambre St-Sacrement. Le personnel était sur les sites d'échantillonnage depuis 8h et la pluie ne s'est arrêtée que le 03-11-17 à 7h30

<sup>12</sup> À ce jour juste 24 bouteilles ont été prises chaque 2 minutes et un test ViCAs a été effectué avec l'échantillon composite.

minutes qui sont considérées non négligeables puisque selon Wipliez (2011), une intensité supérieure à 4 mm/h peut engendrer un ruissellement sur le bassin St-Sacrement.

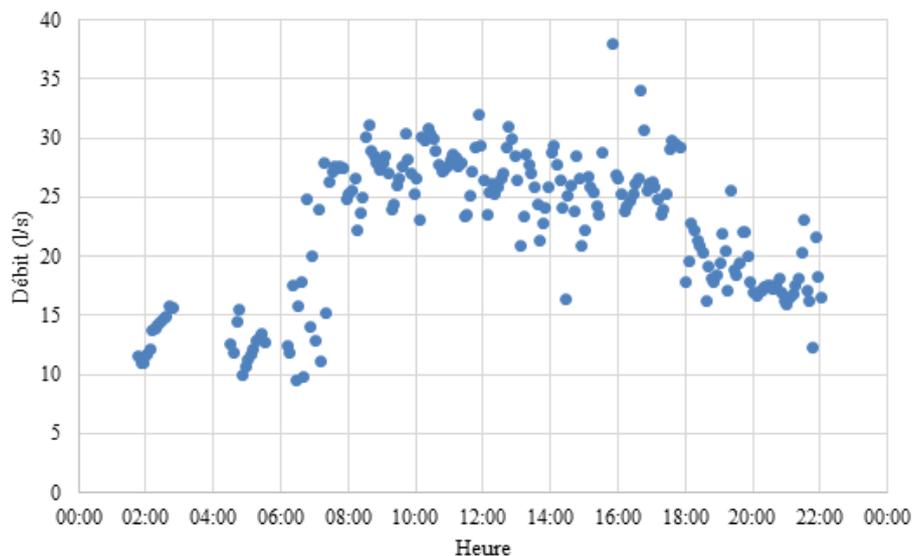
## 4.2. Comportement hydraulique des sites étudiés

Afin de bien comprendre et analyser les résultats de la qualité de l'eau, une étude du comportement hydraulique des sites étudiés sous différentes conditions est nécessaire. Dans cette section, les débits en temps sec et en temps de pluie des trois sites d'échantillonnage sont présentés. En temps sec, des estimations de débit, au niveau de la chambre de contrôle St-Sacrement et du réseau sanitaire Duberger ont été effectuées comme indiqué dans la méthodologie. Le débit au niveau de la chambre Sacré-Cœur a été mesuré par la Ville de Québec. La réaction des trois sites à quelques événements pluvieux est exposée également dans cette section.

### 4.2.1. Hydraulique en temps sec

#### 4.2.1.1. Chambre de contrôle St-Sacrement

La chambre de contrôle reçoit les eaux usées du bassin St-Sacrement. Les mesures de la hauteur d'eau enregistrées au niveau du collecteur St-Sacrement, qui vont déterminer le débit qui entre dans la chambre, sont inutilisables comme indiqué dans la section 3.4. Les quelques fois que la vanne de contrôle au sein de la chambre St-Sacrement était dans l'eau en temps sec ont permis de faire une estimation de l'évolution journalière du débit à partir d'un bilan (section 3.4). Le débit estimé à l'entrée de la chambre de contrôle St-Sacrement est montré à la figure 4.1.

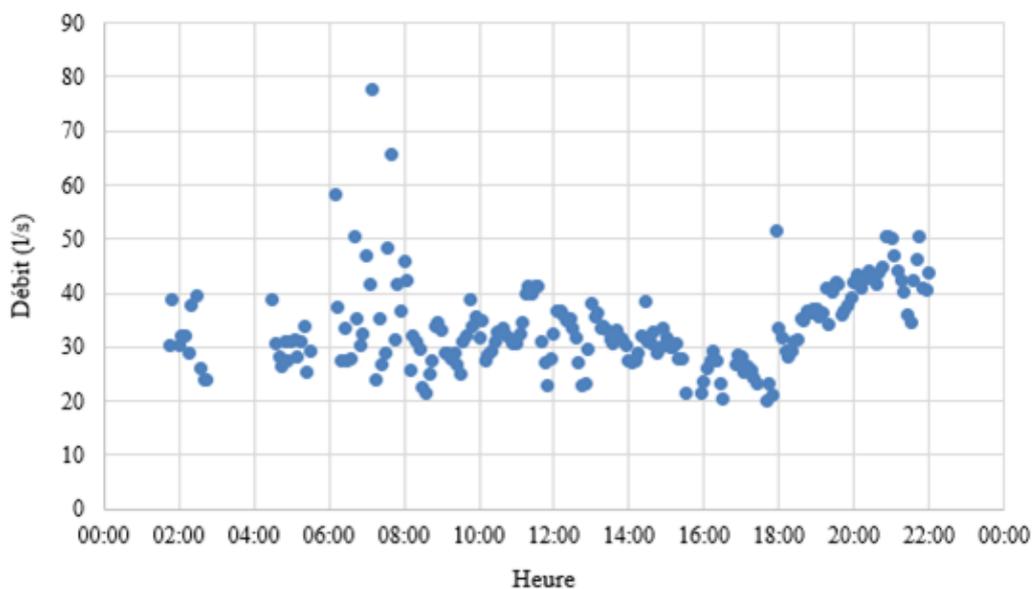


*Figure 4.1: Débit estimé à l'entrée de la chambre de contrôle St-Sacrement en temps sec*

Le débit à l'entrée de la chambre de contrôle St-Sacrement est très faible durant les premières heures de la journée. Il varie entre 10 et 15 l/s jusqu'à 7h du matin. Avec le début de l'activité humaine sur le bassin (par exemple : réveil de la population, commerces, institutions), le débit commence à augmenter à partir de 7h du matin. Il atteint des valeurs maximales enregistrées entre 8h et 18h. Aucun pic n'est enregistré durant la journée, cependant un palier est constaté durant les heures de travail, ce qui est expliqué par l'activité commerciale et institutionnelle ainsi que l'activité des résidents. Le soir, le débit diminue en comparaison au débit enregistré au milieu de la journée. Il fluctue aux alentours de 17 l/s. En revanche, ce débit reste plus élevé par rapport au faible débit des premières heures de la journée.

#### 4.2.1.2. Réseau sanitaire Duberger

À cause du manque de données au niveau de la chambre St-Sacrement, une moyenne sur le débit journalier au niveau du réseau sanitaire Duberger ne peut pas être effectuée puisqu'il n'y a pas de données au niveau de ce dernier. En effet, la seule possibilité de déterminer le débit provenant du Duberger est de soustraire du débit de l'intercepteur le débit provenant du collecteur St-Sacrement. Comme expliqué avant, l'estimation de débit en temps sec au niveau de St-Sacrement ne permet d'avoir qu'une estimation au niveau du collecteur Duberger lorsque la vanne de contrôle est dans l'eau. La figure 4.2 présente le profil de débit obtenu pour le réseau Duberger à la suite de cette estimation.



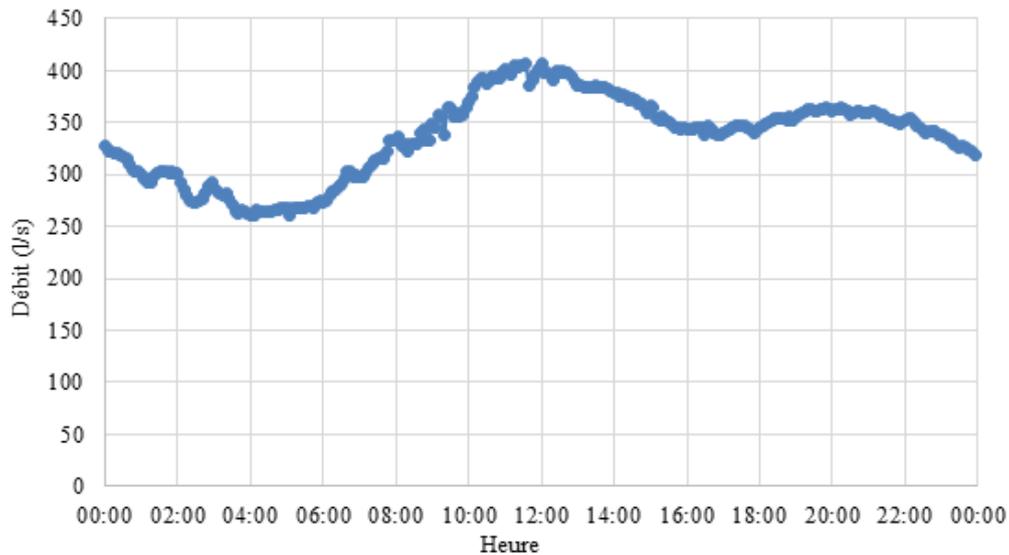
*Figure 4.2: Débit estimé au niveau du collecteur Duberger en temps sec*

L'évolution du débit provenant du bassin Duberger (Figure 4.2) est différente de celle enregistrée pour le bassin St-Sacrement. L'estimation de la moyenne journalière est plus importante. Elle est de l'ordre de 35 l/s. Le débit le moins important et le plus faible est enregistré également dans les premières heures du matin. Un pic à 78 l/s est constaté à 7h du matin à la suite du réveil de la population qui donne un débit supérieur à 40 l/s. À partir de cette heure le débit diminue pour former un palier à 30 l/s jusqu'à 18h. Une augmentation qui dépasse 40 l/s est remarquée plus tard. Cette augmentation peut être expliquée par le retour de la population de leur travail et leurs activités à domicile.

#### **4.2.1.3. Chambre de contrôle Sacré-Cœur**

En utilisant les données de débit fournies par la Ville de Québec au niveau de la chambre de contrôle Sacré-Cœur, la moyenne journalière a été calculée pour voir l'évolution du débit sur ce site (Figure 4.3). Comme relevé pour les autres sites, le débit durant les premières heures de la journée (la nuit) est le plus faible, avec 250 l/s. Un premier pic important à 400 l/s est constaté au milieu de la journée. Le second pic est enregistré le soir, il est de l'ordre de 360 l/s. Dans le même contexte, Butler et al. (1995) rapportent l'évolution du débit dans deux bassins versants résidentiels en Angleterre et à Malte. Ils indiquent que le débit est faible durant les premières heures du matin, ainsi que deux pics sont enregistrés durant la journée; le plus important apparaît le matin avec le réveil de la population et le deuxième est le soir avec le retour du travail. Dans leur étude, une chute dans le débit est enregistrée entre les deux pics, ce qui n'est pas le cas dans la chambre Sacré-Cœur qui reçoit aussi des eaux institutionnelles, commerciales et industrielles au milieu de la journée.

Le débit dans cette chambre est beaucoup plus élevé que celui des deux autres sites, le collecteur sanitaire Duberger et la chambre St-Sacrement, puisqu'il reçoit les eaux de ces deux derniers ainsi que les eaux provenant du bassin Sacré-Cœur.



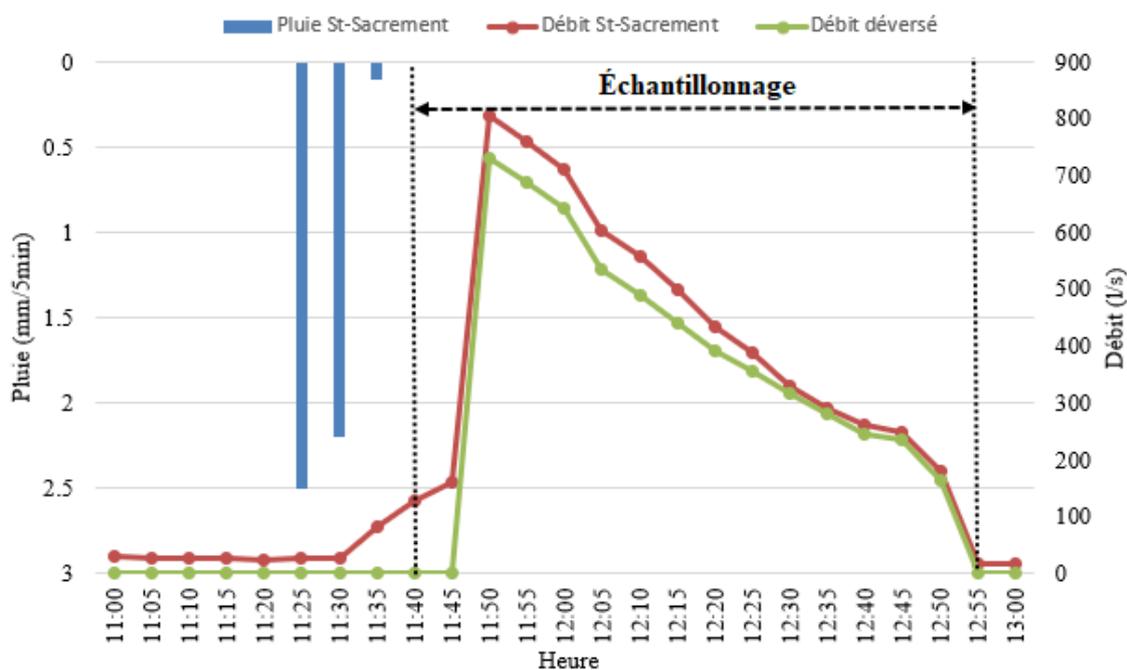
*Figure 4.3: Débit moyen enregistré à la chambre de contrôle Sacré-Cœur en temps sec*

#### **4.2.2. Hydraulique en temps de pluie**

Dans cette section, l'effet de la pluie sur les débits de chaque site étudié sera traité. Quelques évènements pluvieux seront analysés. Le reste des graphiques de débit en temps de pluie sont présentés à l'annexe F.

##### **4.2.2.1. Événement du 11-07-17**

Pour cet événement, l'échantillonnage n'a été effectué que pour la station St-Sacrement vu que l'installation des équipements sur les autres sites n'était pas encore faite à ce moment. Une pluie avec une intensité maximale sur 5 minutes égale à 30 mm/h (Figure 4.4) a permis d'engendrer un fort débit avec un pic à 805 l/s qui a été enregistré 25 minutes après le début de la pluie. Cette forte pluie sur une durée courte de 10 minutes a contribué au déversement vers le bassin de rétention. Le débit a dépassé la capacité de la chambre St-Sacrement après la fermeture de la vanne de contrôle, donc il y a eu un déversement vers le bassin de rétention. Le débit revient à sa valeur normale en temps sec 1h20 après la fin de la pluie. L'effet de cette pluie sur la qualité de l'eau sera traité ultérieurement.



**Figure 4.4:** Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle St-Sacrement lors de la pluie du 11-07-17

#### 4.2.2.2. Événement du 04-10-17

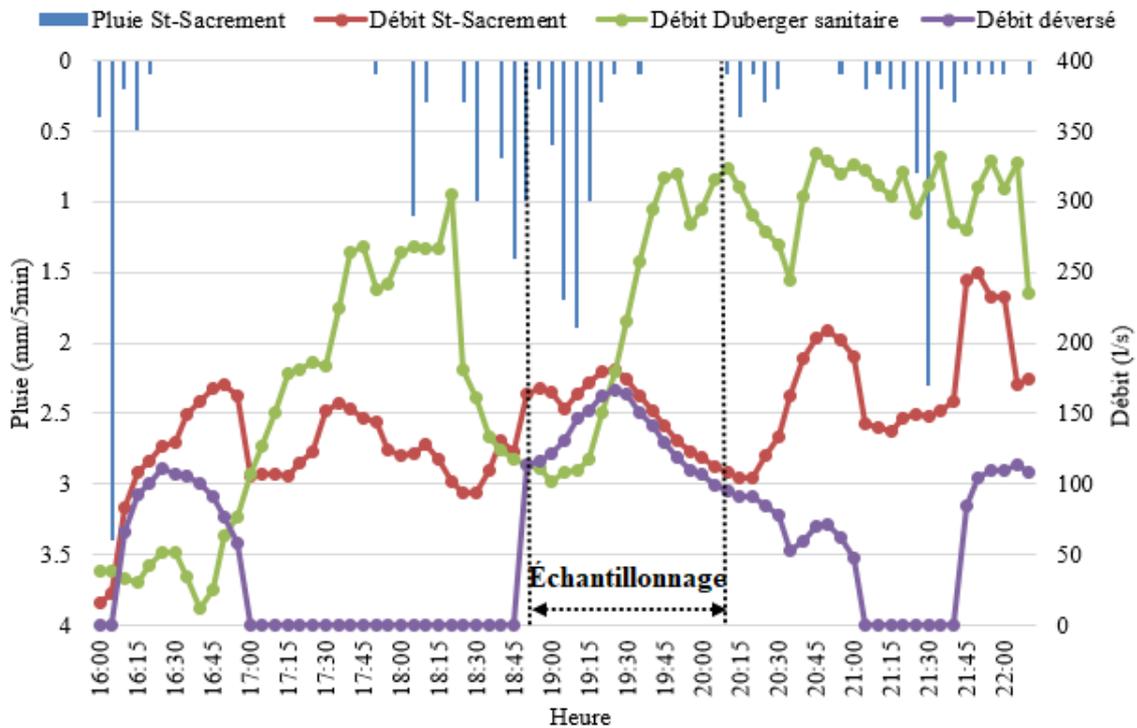
L'événement du 04-10-17 est caractérisé par une pluie de forte intensité. L'intensité maximale sur 5 minutes de 41 mm/h a été enregistrée à 16h05 (Figure 4.5). Après cette première pluie, un deuxième événement a suivi avec des précipitations plus faibles mais sur une durée plus longue. L'échantillonnage a été effectué durant la deuxième pluie à partir de 18h.

Le débit à l'entrée de la chambre St-Sacrement atteint un premier pic à 170 l/s après 40 minutes du début de la pluie. Le débit n'est pas aussi important que celui enregistré durant l'événement du 11-07-17. Plusieurs facteurs comme l'intensité moyenne des précipitations, la durée de la pluie et la saturation des sols influencent la réponse d'un bassin à une pluie. Le débit sanitaire provenant du bassin Duberger réagit fortement à la pluie d'après la Figure 4.5. Cette réaction peut être expliquée principalement par la présence de sources de captage mais aussi par l'infiltration dans le réseau. Plusieurs recherches ont été effectuées sur cette problématique qui peut causer des débordements au sein du réseau sanitaire. Par exemple, Brombach et al. (2005) montrent que dans un réseau sanitaire, 45% du volume total annuel des eaux sont des eaux parasites. Dans cette étude, les auteurs confirment que la principale cause de ce pourcentage correspond aux drains de fondations connectés au réseau sanitaire.

L'augmentation du débit sanitaire Duberger est enregistrée à partir de 16h45, soit la même heure à laquelle le pic de débit a déjà été constaté à l'entrée de la chambre St-Sacrement. Ce décalage entre le temps d'évolution des deux débits peut être expliqué par deux hypothèses. La première hypothèse est que le bassin Duberger n'est pas influencé par la pluie détectée par le pluviomètre installé à St-Sacrement. Une autre distribution de précipitations peut avoir affecté le bassin Duberger d'où la réponse obtenue au niveau du deuxième point d'échantillonnage. La deuxième hypothèse consiste au temps que prennent les eaux de pluie pour s'infiltrer dans le réseau.

La diminution du débit entrant dans la chambre St-Sacrement est constatée une fois que la première phase de la pluie terminée. Le débit n'a pas retrouvé les valeurs de temps sec ( $\sim 20$  l/s) mais des fluctuations autour de 125 l/s sont enregistrées. Une deuxième pluie a recommencé à tomber après 1h20 de temps sec. Cette pluie a engendré la ré-augmentation du débit dans les deux points d'échantillonnage. C'est durant cette deuxième pluie que les échantillons ont été pris. Par conséquent, il est possible que le premier flot n'ait pas été détecté durant cet échantillonnage.

Le déversement vers le bassin de rétention s'est déroulé sur deux phases. À la suite de la première pluie, l'augmentation du débit entrant dans la chambre a engendré le premier déversement qui s'est arrêté une fois que le débit du bassin St-Sacrement avait diminué. La deuxième phase aussi s'est déroulée de la même manière quand la pluie a recommencé à tomber.

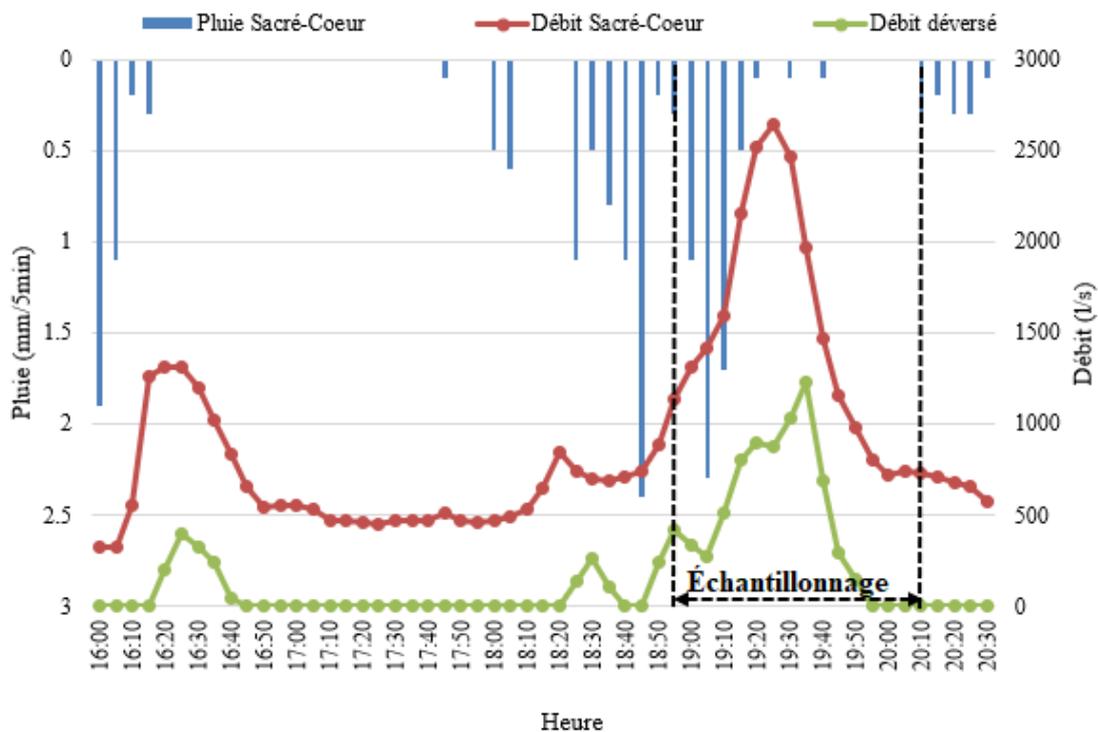


**Figure 4.5:** Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle St-Sacrement, le débit sanitaire Duberger et le débit déversé dans le bassin de rétention à la suite de la pluie du 04-10-17

Une ré-augmentation du débit de la chambre St-Sacrement est constatée à partir de 20h30. Le débit déversé diminue progressivement. Cette diminution est due à l'augmentation de l'ouverture de la vanne de contrôle qui laisse passer beaucoup plus d'eau vers l'intercepteur. Ensuite, le débit St-Sacrement augmente avec la réaugmentation de la pluie pour engendrer l'augmentation du débit déversé de nouveau.

Pour la chambre de contrôle Sacré-Cœur, le débit réagit à la pluie (Figure 4.6). Les deux pluies successives ont engendré deux pics de débit à 1300 l/s et 2600 l/s. Entre ces deux pics, le débit a diminué remarquablement sans toutefois atteindre la valeur enregistrée en temps sec (~350 l/s). Le débit déversé vers le bassin de rétention à Sacré-Cœur évolue de façon similaire à celui de la chambre St-Sacrement. Un déversement s'est fait à chaque pic de débit dans la chambre Sacré-Cœur.

L'échantillonnage a été effectué lorsque le débit a commencé à augmenter après la deuxième pluie pour couvrir un pic et une diminution du débit.



**Figure 4.6:** Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur à la suite de la pluie du 04-10-17

La forte pluie enregistrée au début de l'événement a produit une augmentation simultanée au niveau des deux chambres de contrôle. L'augmentation du débit est survenue après 15 minutes du début de la pluie, ce qui donne une idée du temps de concentration des bassins versant.

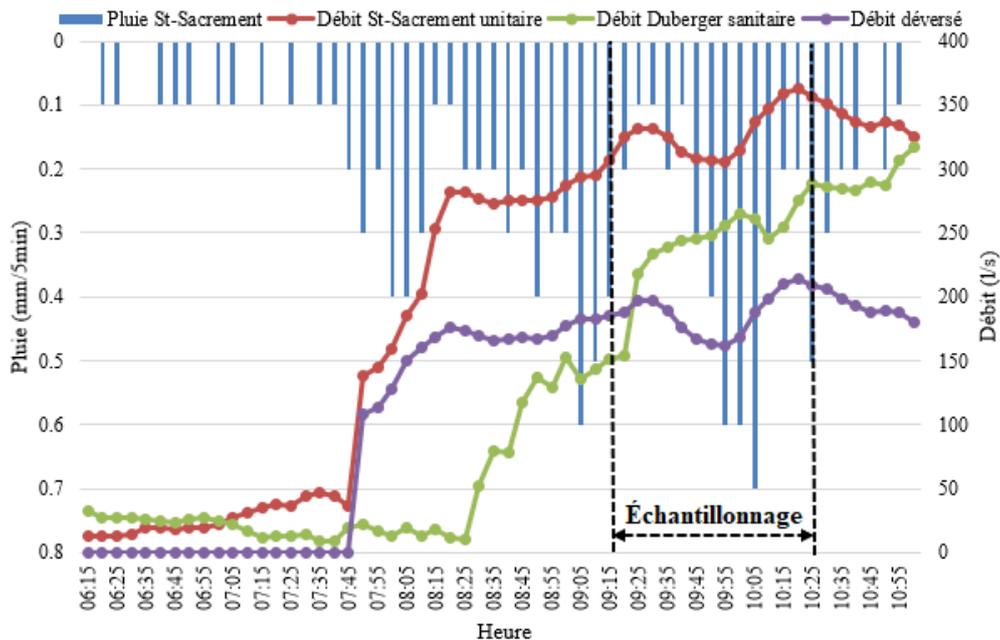
#### 4.2.2.3. Événement du 15-10-17

La pluie du 15-10-17 était de faible intensité; l'intensité maximale sur 5 minutes est égale à 8 mm/h, avec 131 heures de période sèche avant le début de l'événement. Toutes ces caractéristiques ont produit une évolution lente du débit dans les deux chambres de contrôle (il y a aussi la possibilité de la non-saturation du sol qui permettra une plus importante infiltration avant le début du ruissellement) (Figure 4.6 et Figure 4.7). Une augmentation importante et rapide du débit de la chambre St-Sacrement a été constatée à la suite de l'augmentation de la pluie. Durant la période d'échantillonnage, deux pics dans les deux chambres de contrôle ont été constatés, alors que pour le débit sanitaire Duberger, une augmentation continue entre 150 l/s et 290 l/s a été observée. Le débit considérablement faible provenant du bassin Duberger, jusqu'à 9h25, n'a pas contribué à une forte augmentation du débit dans l'intercepteur d'où le faible débit déversé vers le bassin de rétention St-Sacrement. En effet, ce débit déversé est considéré faible par

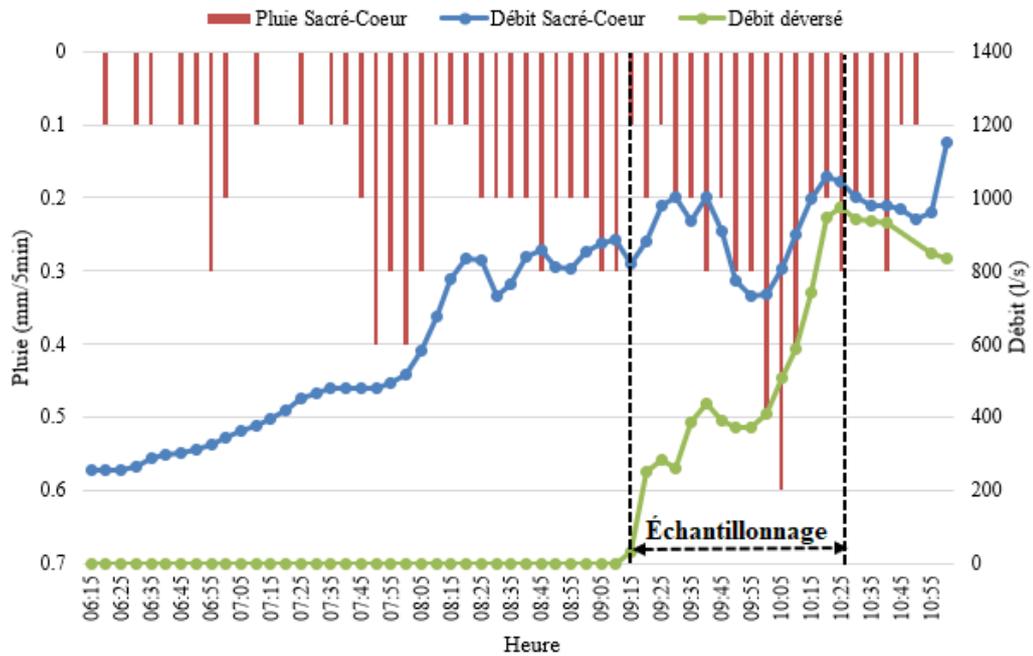
rapport au cas précédent (un débit déversé très élevé presque égal au débit entrant dans la chambre de contrôle St-Sacrement à chaque pic). Cela peut être expliqué par une ouverture de vanne plus importante. L'ouverture de la vanne de contrôle est plus importante quand le débit provenant du Duberger est plus faible. Cela laisse passer plus d'eau vers l'intercepteur d'où la diminution du volume d'eau dans la chambre de contrôle et ainsi du débit déversé.

Dans la chambre Sacré-Cœur, le déversement vers le bassin de rétention, qui a accompagné le début d'échantillonnage, a commencé à 9h15, avec un décalage de 1h30 par rapport au déversement vers le bassin de St-Sacrement. Une augmentation du débit déversé vers le bassin Sacré-Cœur a été constatée avec l'augmentation de la pluie à partir de 9h55, ce qui coïncide également avec l'augmentation du débit dans la chambre.

Au début de l'événement, la pluie était faible, ce qui a encouragé l'équipe de partir pour l'échantillonnage un peu plus tard, vers 8h, pour avoir un ruissellement observable. La détection de l'augmentation du débit au sein de la chambre de contrôle St-Sacrement se fait à l'œil nu et à partir de 9h15, une légère augmentation de débit a été constatée et c'est à cet instant que l'échantillonnage a été lancé.



**Figure 4.7:** Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle St-Sacrement, le débit sanitaire Duberger et le débit déversé dans le bassin de rétention à la suite de la pluie du 15-10-17



**Figure 4.8:** Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur à la suite de la pluie du 15-10-17

#### 4.2.2.4. Événement du 24-10-17

La plus longue période sèche précédant un événement pluvieux a été enregistrée pour la pluie du 24-10-17. Elle correspond à 214 heures, soit 9 jours. Avec une intensité maximale sur 5 minutes égale à 35 mm/h, la réponse des trois sites d'études n'a pas été la même.

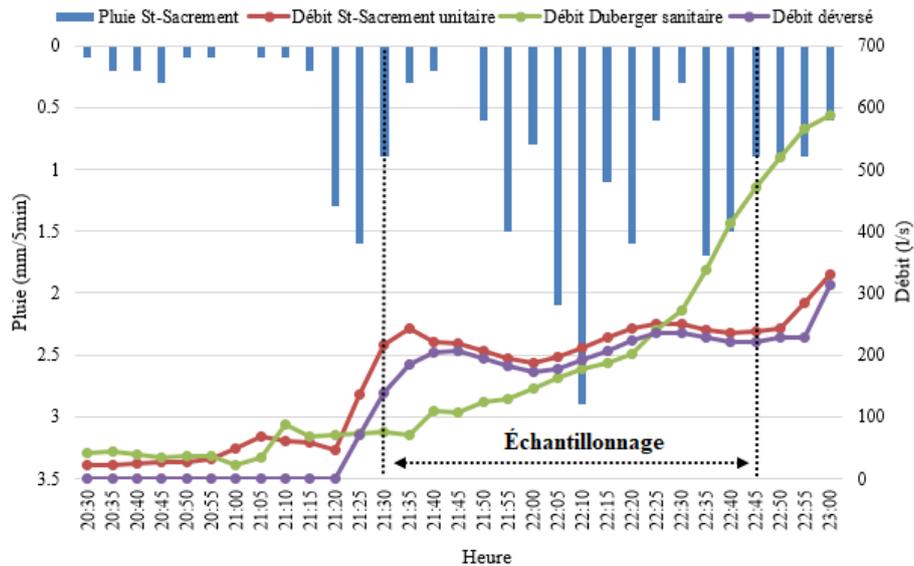
Le pic de débit à l'entrée de la chambre de contrôle Sacré-Cœur est beaucoup plus marqué par rapport à celui observé à St-Sacrement (Figure 4.9 et Figure 4.10). La différence entre l'imperméabilité ainsi que la grandeur des deux bassins versants a probablement influencé la réaction des deux sites d'échantillonnage.

Le débit observé au niveau du réseau sanitaire provenant de Duberger a suivi une augmentation importante tout au long de l'épisode pluvieux pour atteindre une valeur très élevée, soit 600 l/s (Figure 4.9). Le débit déversé vers le bassin de rétention de St-Sacrement atteint presque la valeur du débit entrant dans la chambre St-Sacrement et cela est dû à l'augmentation du débit sanitaire provenant du Duberger qui a entraîné la fermeture de la vanne de contrôle dans la chambre St-Sacrement pour respecter la capacité de l'intercepteur (Figure 4.9).

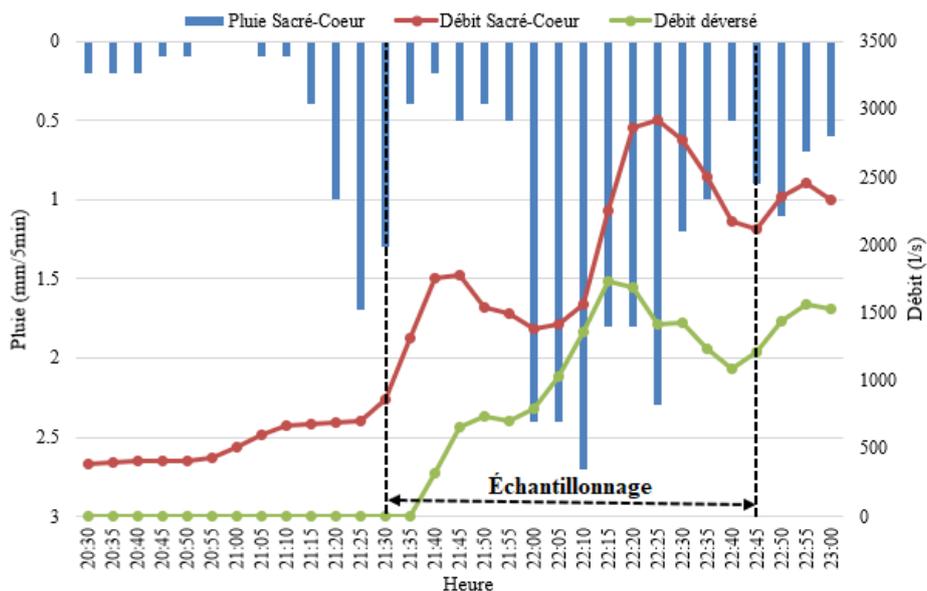
Dans la chambre Sacré-Cœur, une augmentation remarquable du débit a entraîné le début du déversement vers le bassin Sacré-Cœur. Le débit déversé suivait l'évolution du débit

entrant dans la chambre mais il était plus faible que ce dernier. Ceci peut être expliqué par le passage d'un certain débit à travers la vanne de contrôle vers l'intercepteur.

Pour cette pluie, l'équipe était sur place dès le début de la pluie. L'échantillonnage a commencé une fois que l'augmentation du débit a été constatée à la chambre St-Sacrement. En inspectant les courbes de débit, l'échantillonnage pour cet événement a été au bon moment pour les trois sites.



**Figure 4.9:** Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle St-Sacrement, le débit sanitaire Duberger et le débit déversé dans le bassin de rétention à la suite de la pluie du 24-10-17



**Figure 4.10:** Évolution du débit entrant dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur à la suite de la pluie du 24-10-17

### **4.2.3. Conclusion sur le comportement hydraulique**

L'évolution du débit en temps sec correspond aux activités au sein de chaque bassin. Des faibles débits sont enregistrés durant les premières heures de la journée. Une augmentation du débit est observée à partir de 7h du matin et elle est suivie d'une stabilité de ce dernier au milieu de la journée. Le soir, le débit diminue un peu mais reste toujours plus élevé par rapport à celui observé durant les premières heures de la journée. En temps de pluie, la réponse de chaque site varie avec les caractéristiques de chaque événement. Une réaction importante du réseau sanitaire Duberger à la pluie a été observée avec un débit pouvant atteindre 600 l/s (pour une pluie d'intensité maximale sur 5 min égale à 35 mm/h).

## **4.3. Qualité de l'eau dans les sites étudiés**

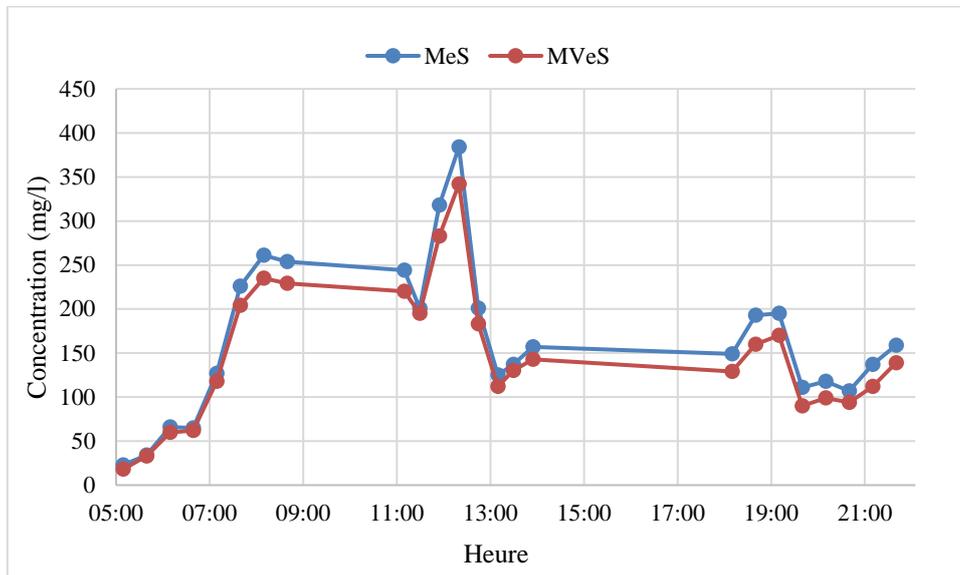
Après l'étude du comportement hydraulique, cette section présentera la qualité de l'eau en temps sec et en temps de pluie en termes de concentration en MeS et MVeS. L'effet du comportement hydraulique sur les concentrations sera évalué particulièrement durant la phase du premier flot et la phase de dilution.

### **4.3.1. Évolution de la concentration en MeS et MVeS**

#### **4.3.1.1. En temps sec**

Plusieurs échantillons ont été récoltés en temps sec sur les trois sites d'étude pour différentes plages horaires. L'échantillonnage sur toute une journée était un peu compliqué à cause de la charge de travail au laboratoire. Ce travail a été effectué juste pour une seule journée sur la chambre de contrôle St-Sacrement. La Figure 4.11 présente les résultats de l'évolution de la concentration en MeS et en MVeS durant les différentes heures de la journée. Les concentrations les plus basses sont observées durant les premières heures du matin, lorsque le débit est très faible (Figure 4.1). Avec l'augmentation du débit à partir de 7h, la concentration en MeS augmente également. Pour cette journée, un pic à 380 mg/l a été enregistré à midi. Malgré la stabilité du débit aux environs de 28 l/s jusqu'à 17h (Figure 4.1) la concentration diminue considérablement après 12h pour atteindre 150 mg/l. Un faible pic est constaté le soir aux alentours de 19h qui accompagne également un pic de débit. Cette journée sèche a permis d'observer un exemple de concentration en MeS dont l'évolution coïncide avec l'évolution de débit. Ce résultat a été également constaté par Verbanck (1995), à l'exutoire d'un collecteur unitaire : l'évolution de la matière en suspension présente une

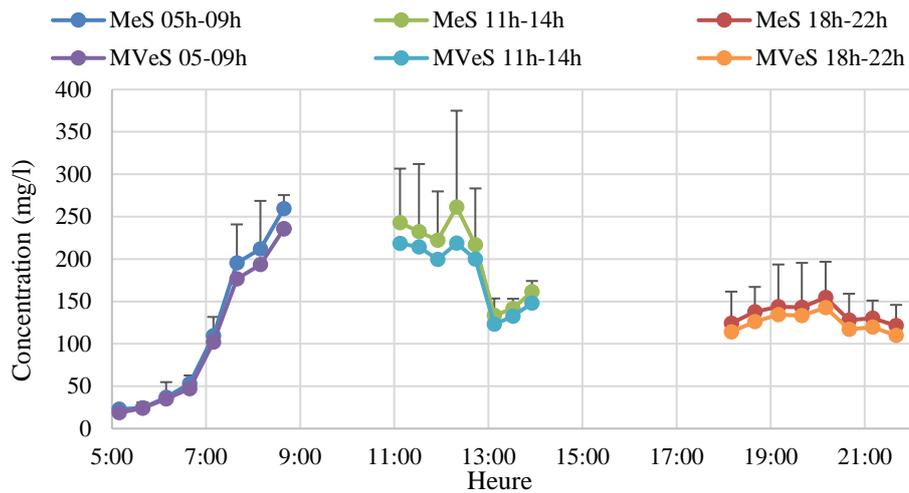
grande similitude avec celle du débit. La concentration en MVeS évolue conformément à la concentration en MeS. La fraction moyenne sur cette journée en MVeS présente 91% de la MeS. Sur toute la journée, cette fraction varie entre 78% et 97%.



**Figure 4.11:** Concentration en MeS et MVeS dans la chambre St-Sacrement en temps sec

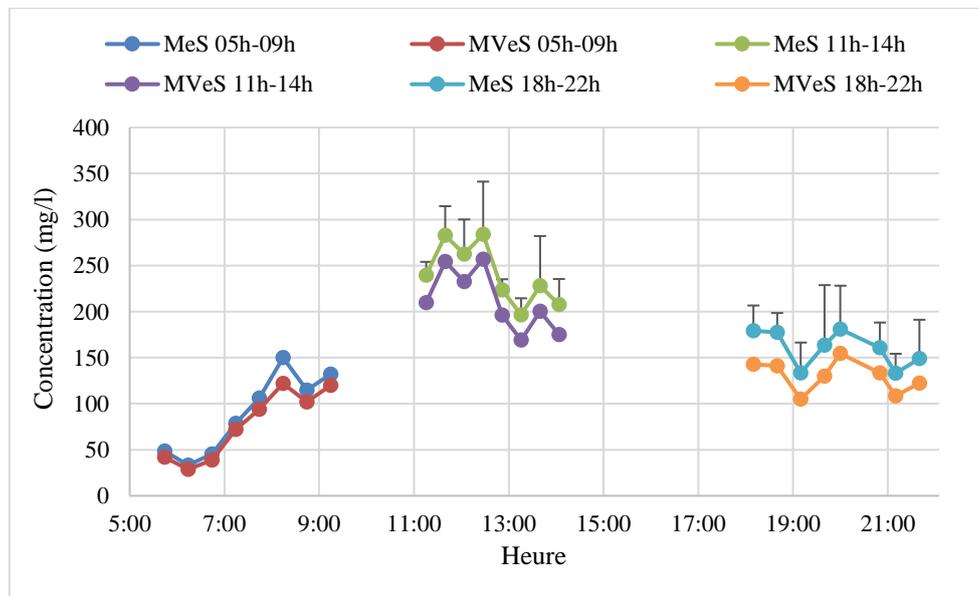
Afin de voir la variation de la concentration sur différentes journées en temps sec, une moyenne de la concentration en MeS et en MVeS a été établie sur plusieurs résultats de concentrations issues de plusieurs échantillons collectés dans la chambre de contrôle St-Sacrement, le réseau sanitaire Duberger et la chambre de contrôle Sacré-Cœur (Figure 4.12 à 4.14). Dans la chambre St-Sacrement, la moyenne a été faite sur 3 courbes de concentrations pour la période matinale et 4 courbes pour les périodes 11h-14h et 18h-22h. Pour le réseau sanitaire Duberger, la moyenne a été faite sur 4 courbes pour les périodes 11h-14h et 18h-22h, un seul échantillon a été présenté pour le matin. Et, finalement, pour la chambre Sacré-Cœur, la moyenne a été faite sur 3 courbes de concentrations pour la période 11h-14h et 4 courbes pour la période 18h-22h et un seul échantillon a été présenté pour le matin.

Les résultats utilisés pour faire la moyenne sur les concentrations sont présentés à l'annexe G.

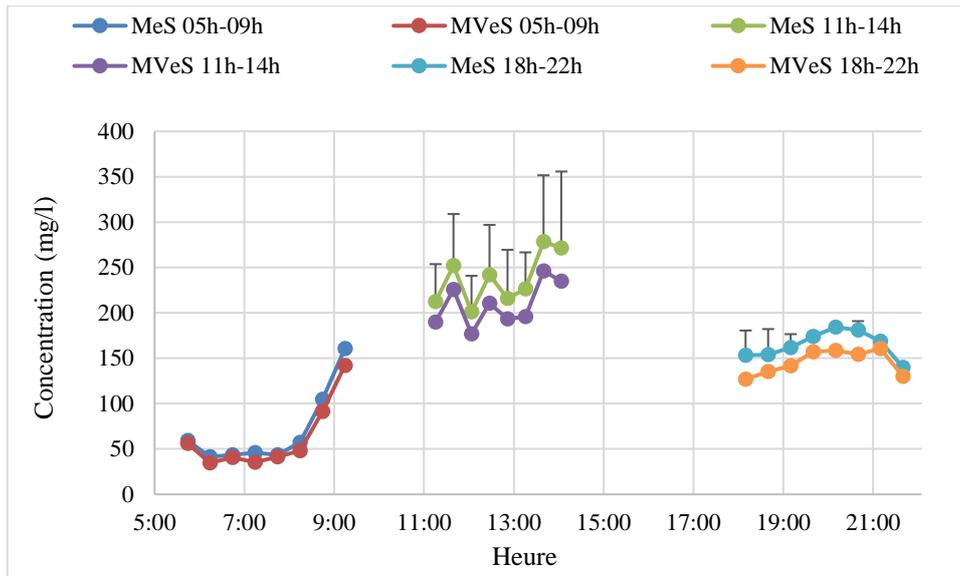


**Figure 4.12:** Concentration moyenne et écart-type sur les MeS et MVeS de plusieurs échantillons collectés dans la chambre de contrôle St-Sacrement. (Afin de faciliter la lecture des graphiques, l'écart type des concentrations a seulement été montré vers le haut)

Pour les trois sites d'étude, la même évolution est observée durant toute la journée. Des concentrations faibles en début de matinée entre 20 mg/l et 50 mg/l, qui commencent à augmenter vers 7h du matin. La concentration moyenne la plus élevée est enregistrée au milieu de la journée. Cette valeur moyenne maximale est similaire pour les trois sites. Elle atteint 260 mg/l à la chambre St-Sacrement (Figure 4.12), 278 mg/l à la chambre Sacré-Cœur (Figure 4.13) et 280 mg/l au réseau sanitaire Duberger (Figure 4.14).



**Figure 4.13:** Concentration moyenne et écart-type sur les MeS et MVeS de plusieurs échantillons collectés dans la chambre de contrôle Sacré-Coeur



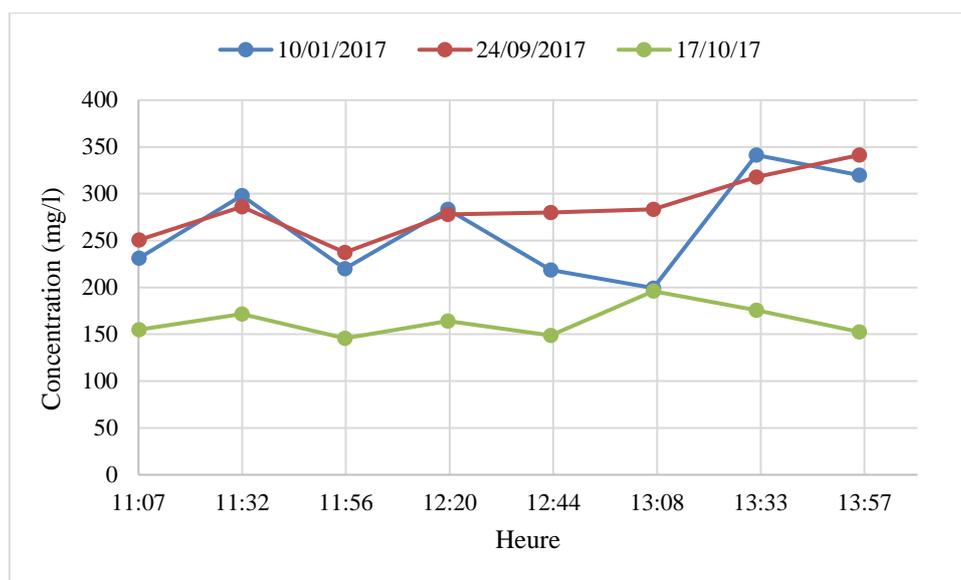
**Figure 4.14:** Concentration moyenne et écart-type sur les MeS et MVeS de plusieurs échantillons collectés au niveau du réseau sanitaire Duberger

Aux Figures 4.13 et 4.14, l'évolution des MVeS qui suit celle des MeS est observée clairement. Comme les eaux collectées dans les trois sites en temps sec sont des eaux sanitaires, elles sont principalement organiques. Ainsi, la majorité des MeS est composée de la matière organique, d'où la concordance dans l'évolution des MVeS avec les MeS. Sur le réseau sanitaire Duberger et dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur, la fraction de la matière organique est légèrement plus faible que celle de la chambre St-Sacrement, particulièrement au milieu de la journée et le soir, mais elle reste toujours importante : 88% de la matière organique par rapport au total de MeS sont enregistrés sur le réseau sanitaire Duberger alors que dans la chambre de contrôle, il y a 85 % de matière organique. Cette variabilité revient à la différence des rejets sur chaque bassin qui contribuent à définir la composition des eaux.

Dans le cas de la chambre Sacré-Cœur, la variation de la concentration en MeS et MVeS pour la plage horaire 05h-09h a été présentée pour un seul jour puisque c'est le seul échantillon obtenu. Pour le cas du réseau sanitaire Duberger, deux échantillons ont été pris durant deux journées différentes pour cette plage horaire mais un seul échantillon a été considéré puisque le deuxième a été considéré comme non fiable (des écart-types importants pour les concentrations en MeS et MVeS par rapport aux autres sites d'études).

Par ailleurs, les écart-types sur les moyennes de concentrations pour les trois sites présentent une large variabilité. Particulièrement pour la chambre St-Sacrement, les écart-

types sont larges pour la période 11h-14h. Également dans les autres sites, lorsque la concentration est élevée, l'écart-type le plus élevé est observé. Cela confirme que la concentration varie d'une journée à une autre. Plusieurs causes peuvent expliquer cette large variation comme la durée de temps sec précédent un échantillonnage ainsi que l'importance de la dernière pluie survenue qui ont une influence sur les sédiments dans le réseau.



**Figure 4.15:** Concentration en MeS dans le réseau sanitaire Duberger sur différentes journées de temps sec

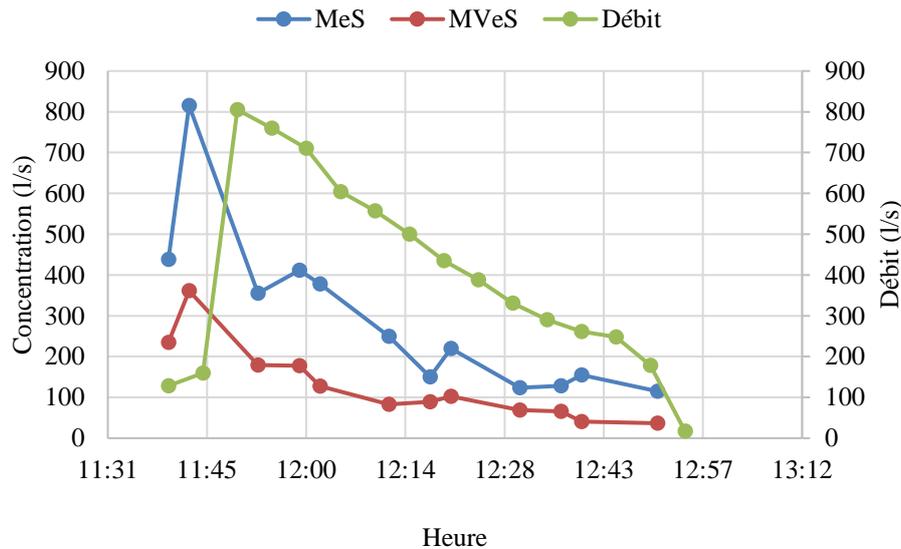
La Figure 4.15 montre que la concentration en MeS du 17-10-17 dans le réseau sanitaire Duberger est faible par rapport aux deux autres jours 01-10-17 et 24-09-17. L'échantillonnage entre 11h et 14h pour le 17-10-17 a été effectué après 37 heures de temps sec. La dernière pluie s'est arrêtée le 15-10-17 à 20h15, tandis que le temps sec antécédant des deux autres échantillonnages du 01-10-17 et 24-09-17 est respectivement 69 heures et 87 heures. Cette pluie du 15-10-17 avait une forte intensité sur 5 minutes égale à 36 mm/h et des précipitations totales de 54 mm. En effet, en plus des MeS transportées dans le réseau provenant des eaux usées rejetées en temps sec, un débit proportionnellement important peut resuspendre les particules les plus légères qui pourront être collectées lors de l'échantillonnage. Du moment que le réseau sanitaire Duberger réagit à la pluie avec une augmentation de débit assez remarquable comme montré dans la partie comportement hydraulique en temps de pluie, la pluie du 15-10-17 vient nettoyer le réseau en remettant en suspension les particules déjà décantées en temps sec et les transporter vers l'aval, ce qui explique les faibles concentrations du 17-10-17.

### **4.3.1.2. En temps de pluie**

#### **4.3.1.2.1. Événement du 11-07-17**

Cet événement représente convenablement ce qui est cité dans la littérature et qui correspond au phénomène du premier flot. Une pluie d'été courte (10 minutes) avec une intensité maximale sur 5 minutes importante (30 mm/h) a provoqué un débit très important. La Figure 4.16 montre l'évolution de la concentration en MeS et MVeS durant cette pluie. Une augmentation du débit a engendré petit à petit l'augmentation de la concentration en MeS par rapport à celle enregistrée en temps sec. Le pic de concentration en MeS à 800 mg/l est atteint à la suite d'une légère augmentation de débit qui a lessivé les chaussées et a resuspendu les particules qui ont décanté en temps sec. Ensuite vient le pic de débit après 5 minutes qui commence à diluer les eaux. Il s'agit juste des eaux de ruissellement qui viennent rejoindre le réseau, d'où la diminution de la concentration après le pic du débit. Cette concentration diminue jusqu'à atteindre à la fin de l'échantillonnage 100 mg/l, ce qui est inférieur à la concentration observée en temps sec.

Toujours, les MVeS suivent le même comportement que les MeS, mais en temps de pluie la fraction de la matière organique diminue considérablement. Sur la figure 4.16, une large différence est constatée en début de la pluie. La matière organique présente seulement 44% sur ce point. Ce pourcentage augmente pour atteindre jusqu'à 55% après la diminution de la concentration en phase de dilution. Mais cette fraction de matière organique reste toujours inférieure à celle enregistrée en temps sec, soit de l'ordre de 90%. En effet, cette diminution du rapport MVeS/MeS est engendrée par le changement de la composition des eaux dans le réseau. À la suite de l'intrusion des eaux de ruissellement dans le réseau, d'autres types de particules comme les particules provenant des chaussées qui sont plus inorganiques rejoignent le réseau. De plus, la dégradation de la matière organique des particules qui décantent dans le réseau jusqu'à ce qu'elles soient remises en suspension avec l'augmentation des vitesses d'écoulement, peut aussi être la cause de cette diminution de la matière organique.

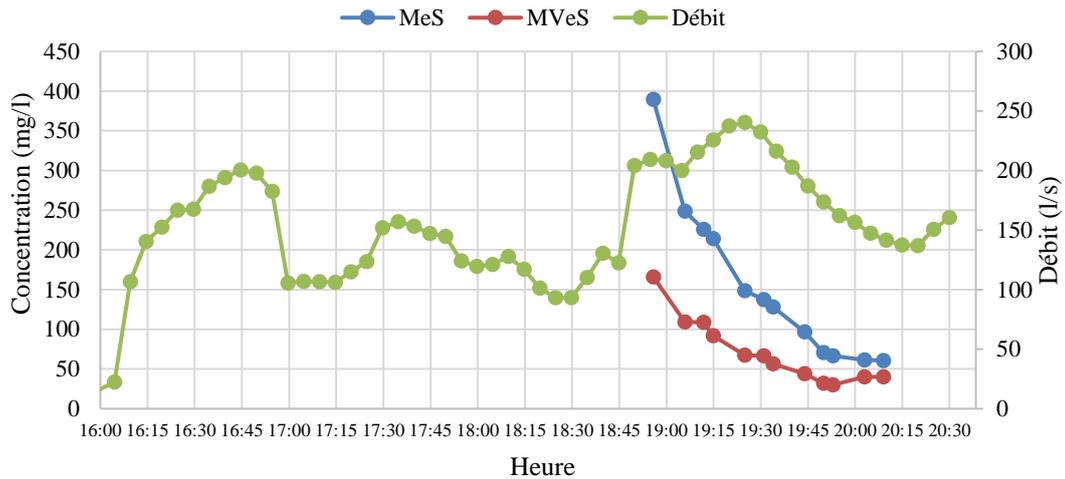


**Figure 4.16:** Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 11-07-17 dans la chambre de contrôle St-Sacrement<sup>13</sup>

#### 4.3.1.2.2. Événement du 04-10-17

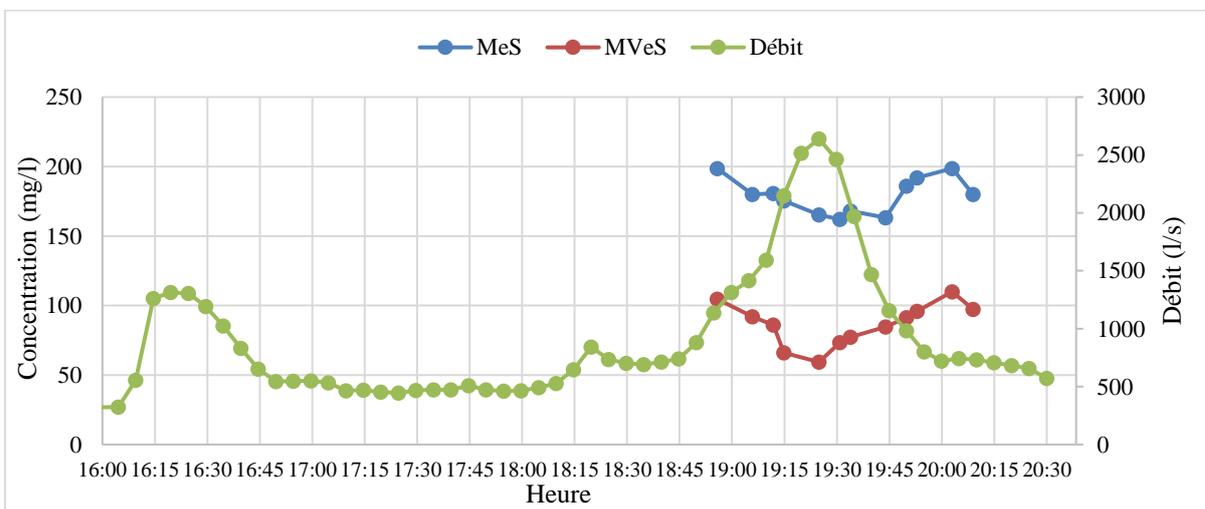
Comme indiqué précédemment, l'événement du 04-10-17 comptait 2 pluies. Aucun échantillonnage n'a été effectué durant la première partie de l'événement du 04-10-17, mais un a été fait durant la deuxième augmentation du débit. La concentration en MeS la plus élevée qui est égale à 400 mg/l dans la chambre de contrôle St-Sacrement est enregistrée en début d'échantillonnage (Figure 4.17). Cette concentration reste plus importante que la concentration moyenne observée en temps sec sur cette plage horaire qui est aux alentours de 135 mg/l, mais il n'est pas sûr qu'elle corresponde au premier flot. En effet, l'intensité de pluie maximale sur 5 minutes est enregistrée à 16h05, ce qui a entraîné également une augmentation du débit. Il est possible que le phénomène du premier flot aurait été enregistré pendant la première phase de pluie (à peu près à 16h15). Conformément à l'événement du 11-07-17, lorsque la concentration est élevée, la fraction en matière organique est faible (42%). L'évolution des MVeS dans ce cas dans la chambre St-Sacrement reste aussi conforme à celle des MeS. Une concentration très faible de 50 mg/l est enregistrée en phase de dilution, ce qui est plus faible que la concentration en temps sec.

<sup>13</sup> Le débit à la fin de l'événement ne s'annule pas mais il atteint les valeurs du temps sec (17 l/s)



**Figure 4.17:** Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 04-10-17 dans la chambre de contrôle St-Sacrement

Dans le cas de la chambre Sacré-Cœur, d'après la figure 4.18, l'augmentation de débit n'avait pas d'effet sur la concentration en MeS qui est quasiment stable. Il semble que lors de l'échantillonnage, l'eau dans cette chambre soit déjà diluée. Le pic de concentration est probablement survenu pendant la première phase de pluie. La fraction organique moyenne lors de cet échantillonnage a été de l'ordre de 48% qui reste toujours plus faible que la moyenne en temps sec, indiquant l'effet de la pluie.

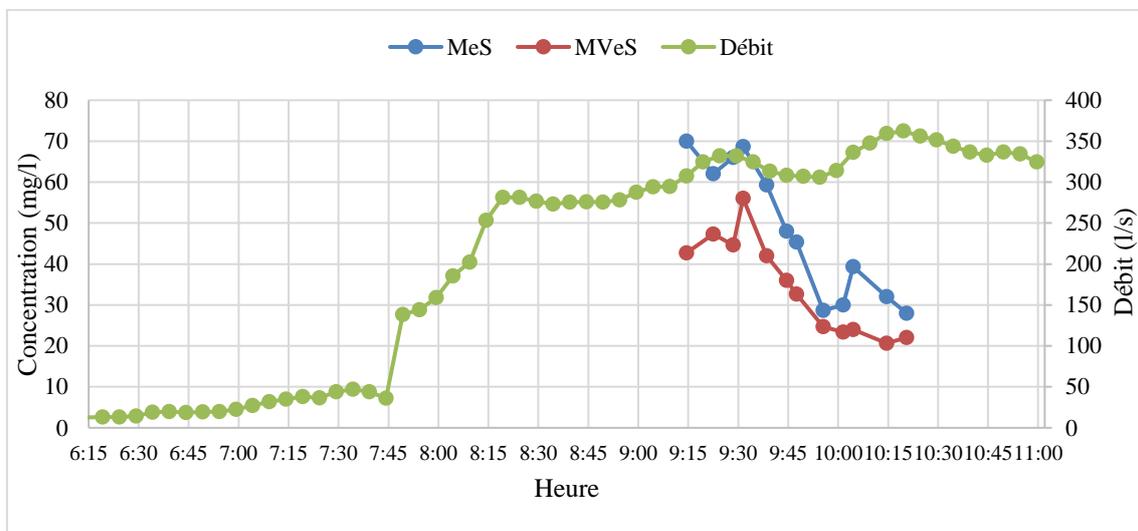


**Figure 4.18:** Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 04-10-17 dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur

#### 4.3.1.2.3. Événement du 15-10-17

La pluie du 15-10-17 avait une faible intensité comparément aux pluies antécédentes (intensité maximale sur 5 minutes 8 mm/h). Cette pluie, qui a commencé à 6h15, n'a engendré une augmentation de débit qu'à partir de 7h45 à la chambre St-Sacrement. Lors

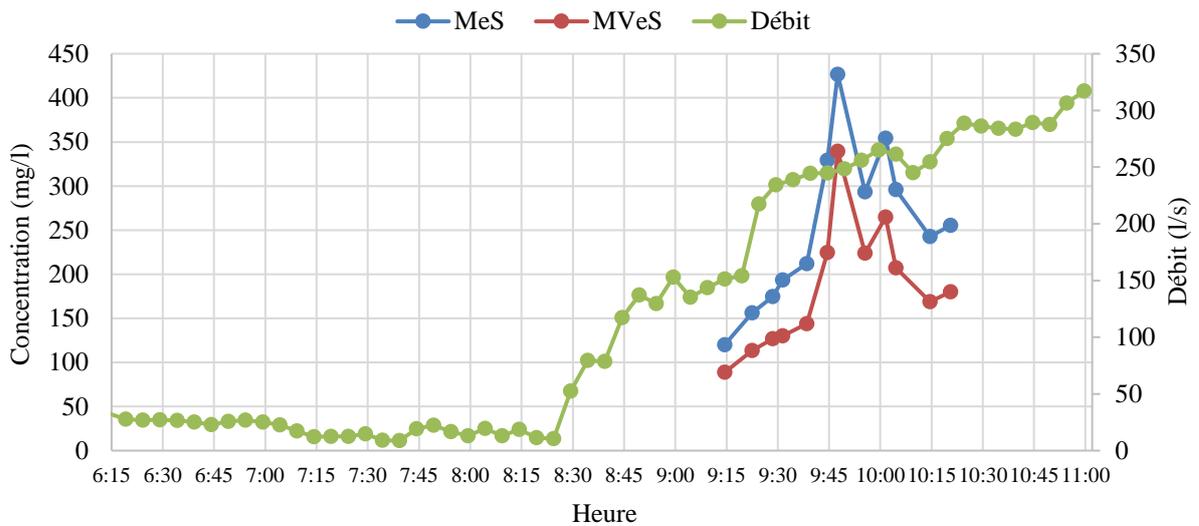
de l'échantillonnage qui a débuté à 9h15, le débit était déjà élevé et fluctuait autour de 325 l/s dans la chambre de contrôle St-Sacrement (Figure 4.19), ce qui a influencé à son tour la concentration qui était diluée avec un maximum observé lors de l'échantillonnage égal à 70 mg/l. La concentration diminuait tout au long de l'échantillonnage pour atteindre 28 mg/l, une concentration très faible par rapport à la concentration constatée à cette heure en temps sec. A 9h15, où la concentration est la plus élevée (70 mg/l), la fraction de matière organique présente 60%, un pourcentage élevé puisqu'il s'agissait bien de la phase de dilution vu le décalage entre l'augmentation du débit et l'échantillonnage.



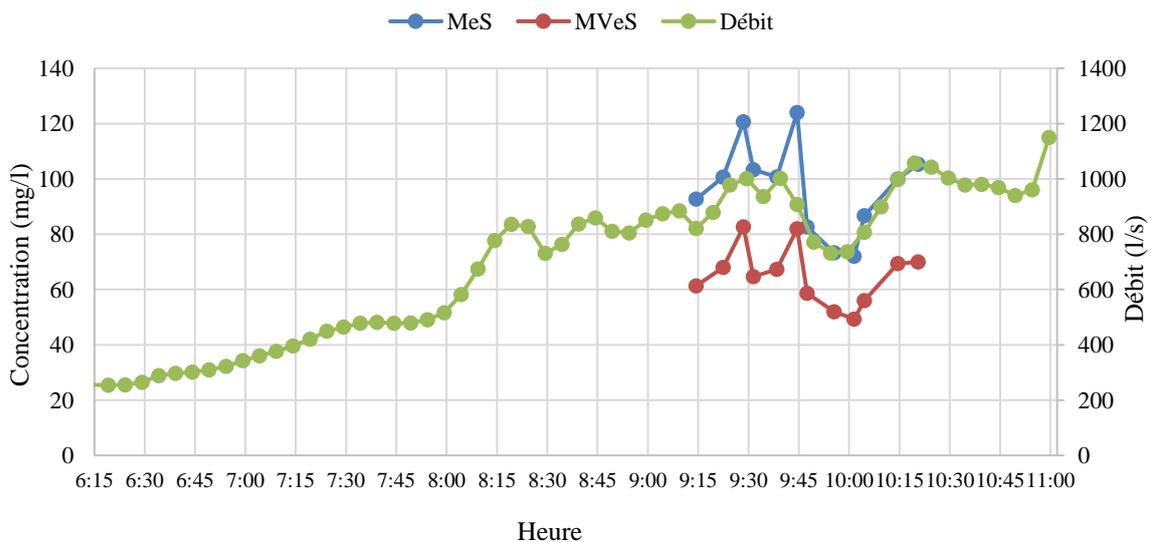
**Figure 4.19:** Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 15-10-17 dans la chambre de contrôle St-Sacrement

Dans le réseau sanitaire Duberger, l'augmentation de la concentration coïncide avec l'augmentation du débit comme montré à la Figure 4.20. Après, le débit a commencé à augmenter lentement alors qu'un pic de concentration a été observé sur le réseau sanitaire. Comme déjà discuté dans la partie comportement hydraulique du système, le réseau sanitaire Duberger réagit à la pluie avec une augmentation de débit généralement lente. Cette augmentation est accompagnée également d'une augmentation de concentration mais moins logique comparée à ce qui se passe dans les deux chambres de contrôle où les eaux sont unitaires. D'après la Figure 4.20, le phénomène de premier flot n'apparaît pas car le pic de concentration est enregistré après à peu près 25 minutes suite à l'augmentation de débit. Donc ce pic ne peut pas être dû aux charges ramenées avec les eaux de pluie. Ce pic est très important à 440 mg/l. Il dépasse les concentrations enregistrées aux autres sites d'études au même moment. La fraction moyenne de matière

organique est égale à 72%. Ce pourcentage semble assez élevé par rapport à ceux observés en temps de pluie pour les autres sites d'étude. Cela peut être expliqué par la resuspension des particules à la suite de la pluie. Ces particules sont principalement organiques puisqu'elles proviennent des eaux sanitaires. D'ailleurs, les deux pics à 440 mg/l et 350 mg/l sont survenus lorsque le débit a atteint une valeur de 250 l/s. Avec cette augmentation de débit, la vitesse d'écoulement a augmenté et a entraîné la resuspension de certaines particules qui ont été échantillonnées.



**Figure 4.20:** Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 15-10-17 dans le réseau sanitaire Duberger.



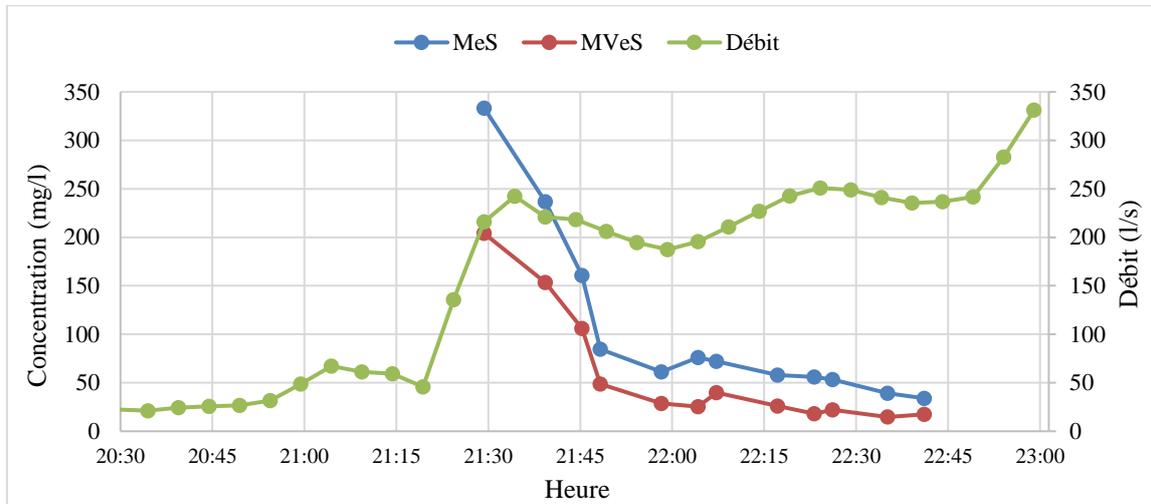
**Figure 4.21:** Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 15-10-17 dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur

La Figure 4.21 montre une évolution des MeS qui suit celle du débit dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur. Comme pour la chambre St-Sacrement, la concentration est très faible avec un maximum de 120 mg/l. Il semble que le phénomène de premier flot ait été raté. Chaque petite augmentation du débit est accompagnée d'un pic de concentration, et il est donc possible de conclure qu'avec chaque augmentation de débit, il y a des particules qui s'introduisent dans la chambre Sacré-Cœur même avec des faibles charges. Comme indiqué également sur les autres sites d'étude, le pourcentage de la matière organique à Sacré-Coeur est assez élevé avec 67 %. L'échantillonnage qui a été effectué en retard par rapport au début de la pluie et l'augmentation du débit, ainsi que les résultats concernant la faible concentration en MeS et la faible fraction de la matière organique permettent de conclure que l'échantillonnage a été fait en phase de dilution.

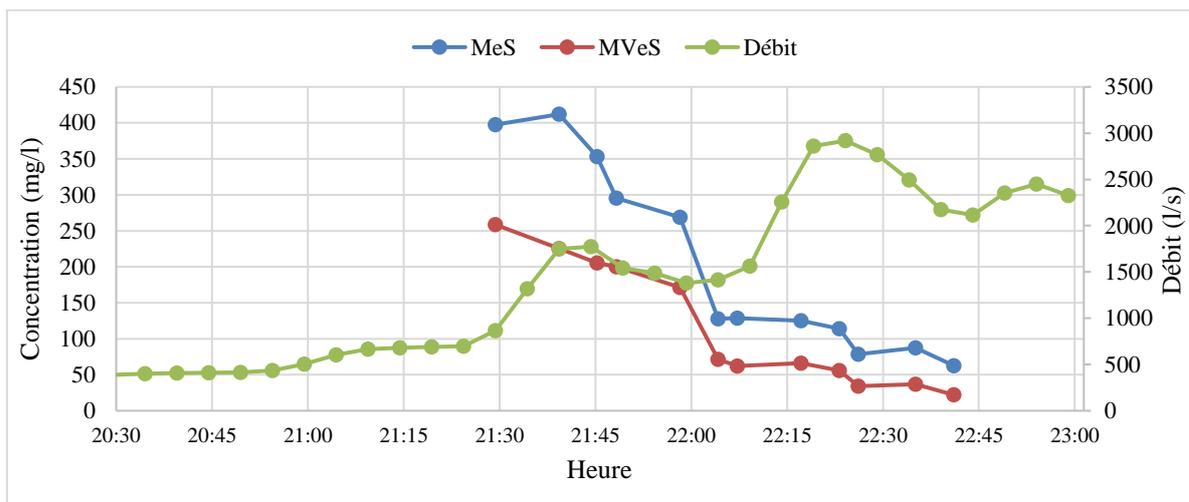
#### **4.3.1.2.4. Événement du 24-10-17**

Cet événement vient confirmer le comportement constaté dans la chambre de contrôle St-Sacrement durant l'événement du 04-10-17. Toujours le soir, une concentration maximale est enregistrée dans la chambre St-Sacrement (Figure 4.22) et Sacré-Cœur (Figure 4.23) dès le début de l'échantillonnage. Elle est égale à 333 mg/l à St-Sacrement et 412 mg/l à Sacré-Cœur. Cela peut présenter typiquement le phénomène du premier flot puisque l'échantillonnage a commencé avec l'augmentation du débit. Une forte concentration comme celle enregistrée durant l'événement du 11-07-17 n'a jamais été enregistrée durant les événements d'automne, bien que 214 heures de temps sec antécédent sont enregistrés pour cet événement, ce qui a permis l'accumulation de particules sur le bassin versant. Tel qu'expliqué avant, cela peut être dû à l'heure de l'échantillonnage. Les concentrations en temps sec le soir sont faibles par rapport à celles enregistrées à midi. Et dans ce cas, la concentration obtenue dans les deux chambres de contrôle est presque le double de celle observée en temps sec. Au moment où la concentration est la plus importante, les MVeS sont à 55% des MeS à St-Sacrement et 60% à Sacré-Cœur. À la fin de l'échantillonnage, en phase de dilution, la concentration en MeS atteint 34 mg/l à St-Sacrement avec 51% de matière organique alors qu'à Sacré-Cœur la concentration est à 64 mg/l avec 34% de matière organique. Ces pourcentages faibles de la matière organique, surtout à Sacré-Cœur, peuvent être dus à la biodégradation avancée de la matière organique (temps antécédent très long de 9 jours) au sein des sédiments qui sont resuspendus avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement. En outre, l'augmentation de

la vitesse d'écoulement peut engendrer l'abrasion des particules d'où la diminution de la fraction de la matière organique sur ces derniers.



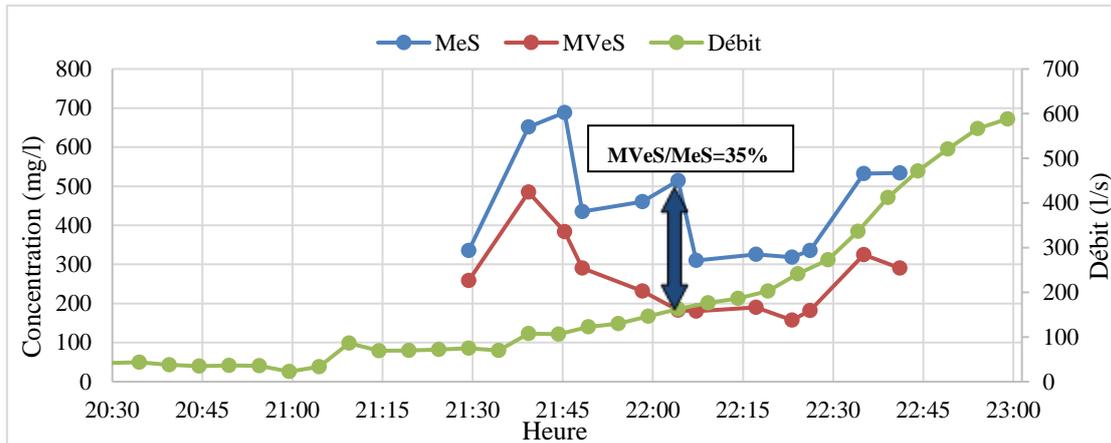
**Figure 4.22:** Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 24-10-17 dans la chambre de contrôle St-Sacrement



**Figure 4.23:** Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 24-10-17 dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur

Une variation aléatoire dans les concentrations en MeS est observée pour cet événement dans le réseau sanitaire Duberger bien que le débit augmente continuellement (Figure 4.24). La concentration moyenne en MeS enregistrée est égale à 450 mg/l avec une concentration maximale de l'ordre de 700 mg/l. Cette concentration est très élevée pour un réseau sanitaire qui est supposé ne pas réagir à la pluie. Mais avec le débit important d'où une vitesse d'écoulement élevée, l'hypothèse de resuspension des sédiments peut être considérée. En effet, les 214 heures (8 jours) de temps sec antécédent, peuvent permettre l'accumulation d'une quantité importante de sédiments au fond de la conduite

resuspendus durant cette pluie. Une fraction moyenne de matière organique de l'ordre de 60% est enregistrée pour cet échantillonnage. Ce pourcentage diminue pour atteindre 35% (Figure 4.24). Cela peut être expliqué par l'existence d'autres types de particules comme les particules qui ont été biodégradées à la suite de leur longue présence dans les dépôts au sein du réseau sanitaire.



**Figure 4.24:** Évolution de la concentration en MeS et MVeS durant l'événement pluvieux du 24-10-17 dans le réseau sanitaire Duberger

#### 4.3.2. Conclusion sur la qualité de l'eau dans les sites étudiés

En temps sec, les résultats présentés montrent que la concentration en MeS et en MVeS augmente avec l'augmentation du débit à partir de 7h du matin. Les concentrations les plus importantes sont enregistrées à midi. Le soir, elles diminuent avec le débit mais restent toujours plus élevées que celles observées durant les premières heures de la journée. La fraction de la matière organique est importante. Elle varie entre 85% et 90%. En temps de pluie, des concentrations plus élevées que celles enregistrées en temps sec sont observées. Elles sont associées dans certains cas au phénomène du premier flot. La fraction de la matière organique diminue considérablement au début de l'événement pluvieux pour augmenter à la phase de dilution sans atteindre les valeurs enregistrées en temps sec. Le réseau sanitaire Duberger réagit également à la pluie et des concentrations élevées en MeS y sont enregistrées.

## **4.4. Distribution de la vitesse de chutes des particules**

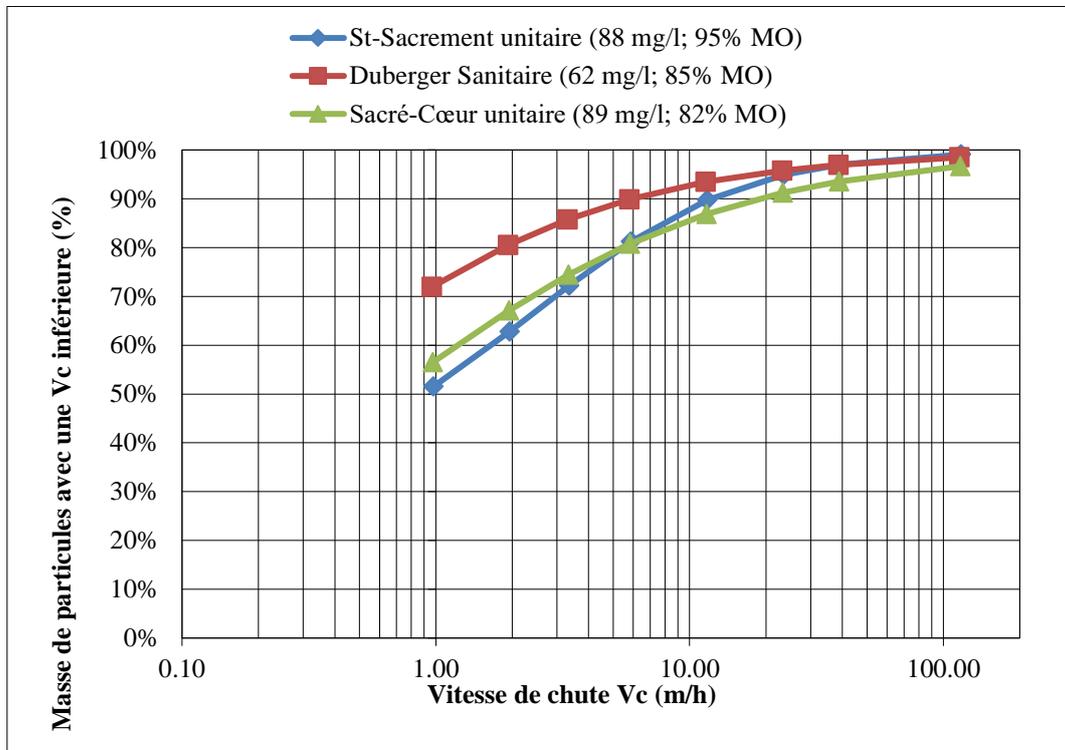
Dans cette section, le troisième objectif du projet sera abordé. Après avoir étudié le comportement hydraulique et déterminé les pollutogrammes sous différentes conditions, l'étude de la décantation des particules sera établie dans cette partie à travers la distribution de la vitesse de chute des particules afin de comprendre l'interaction entre débit/ sédimentation /resuspension. Pour ce faire, la compréhension de l'influence de certains facteurs comme la concentration, la matière organique et le régime hydraulique sur la vitesse de chute des particules est indispensable.

### **4.4.1. Comparaison de la distribution de la vitesse de chute des particules entre les trois sites étudiés en temps sec**

#### **4.4.1.1. Entre 05h-09h (faibles concentrations)**

Les courbes ViCAs ont été effectuées à partir d'un échantillon composite collecté entre 05h et 09h comme expliqué dans la partie méthodologie. Pour cet échantillon avec une concentration relativement faible, les particules ne décantent pas vite sur les trois sites d'étude. D'après la Figure 4.25, plus de 50% des particules sur les trois sites d'étude ont une vitesse de chute inférieure à 1 m/h. Il n'y a pas de grande différence entre la concentration des chambres St-Sacrement et Sacré-Cœur et le réseau sanitaire Duberger pour cet échantillon mais une différence dans la distribution de la vitesse de chute est constatée. Les particules présentes dans l'échantillon du réseau sanitaire Duberger décantent moins vite que celles des chambres de contrôle St-Sacrement et Sacré-Cœur. La courbe du réseau sanitaire Duberger est au-dessus des courbes associées à St-Sacrement et Sacré-Cœur; 88% et 87% des particules décantent avec une vitesse inférieure à 10 m/h respectivement à St-Sacrement et Sacré-Cœur alors que dans le réseau sanitaire Duberger 92% des particules décantent avec une vitesse inférieure à cette dernière. Ces pourcentages sont assez proches mais une différence est constatée pour les faibles vitesses; il y a 50% des particules qui décantent avec une vitesse de chute inférieure à 1 m/h à St-Sacrement alors qu'à Sacré-Cœur et à Duberger ce pourcentage augmente pour atteindre respectivement 57% et 72%. À la suite des conclusions de Maruéjols et al. (2013), la différence de concentration peut expliquer cette différence de distribution de vitesse de chute puisque plus l'eau est chargée plus des grosses particules qui décantent plus vite sont présentes. Également, une différence de proportion de matière organique est observée (85% à Duberger et 95% à St-Sacrement). En effet, la densité de la matière organique qui est plus faible que celle de la matière inorganique peut expliquer

le fait que les particules présentes dans l'eau la plus organique, décantent moins vite. Sans aucune différence de concentration, les particules à la chambre St-Sacrement et Sacré-Cœur décantent de la même manière pour cet échantillon.

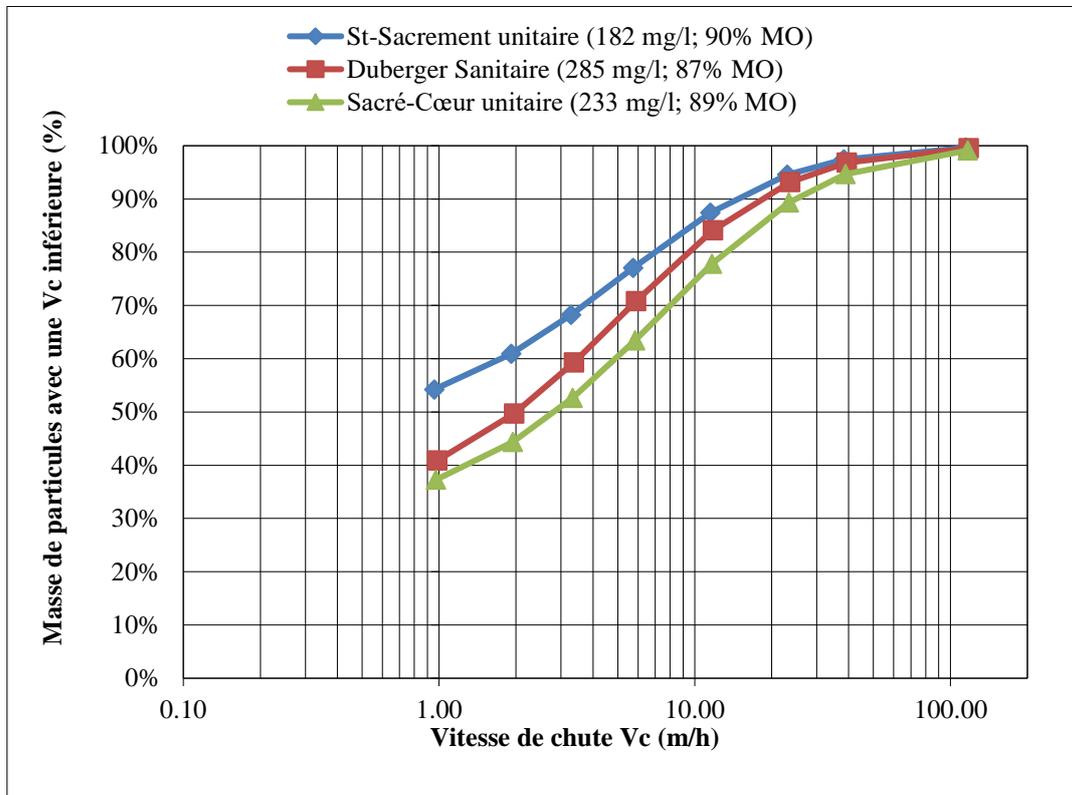


*Figure 4.25: Vitesse de chute des particules pour un temps sec avec une faible concentration (09-11-17 05h-09h)*

#### 4.4.1.2. Entre 11h-14h (concentrations élevées)

La même procédure a été effectuée pour les échantillons pris entre 11h et 14h. Un échantillon composite pour cette plage horaire a été utilisé pour faire les tests ViCAs. La première constatation concerne la diminution du pourcentage de la masse de particules qui décantent avec une vitesse de moins de 1 m/h dans le réseau sanitaire Duberger et la chambre Sacré-Cœur, soit respectivement 41% et 38%, ce qui fait le décalage des courbes pour les deux sites vers la droite, signe d'une décantation plus rapide. Cela peut être expliqué par la présence d'autres types de particules : des particules plus lourdes. À des concentrations proches, les deux courbes ViCAs sont proches. Également, la proportion de matières organiques sur ces sites est presque la même, ce qui peut leur donner une densité (et une vitesse de décantation) similaire. L'augmentation de la vitesse de chute sur ces deux sites peut être due à l'augmentation de la vitesse d'écoulement par rapport au matin (avec une augmentation du débit), ce qui permet de remettre en suspension des particules qui décantent plus rapidement.

En revanche, à la chambre St-Sacrement, la concentration est plus faible avec 90% de matière organique et la décantation se trouve moins rapide : 55% des particules décantent avec une vitesse de chute inférieure à 1 m/h.

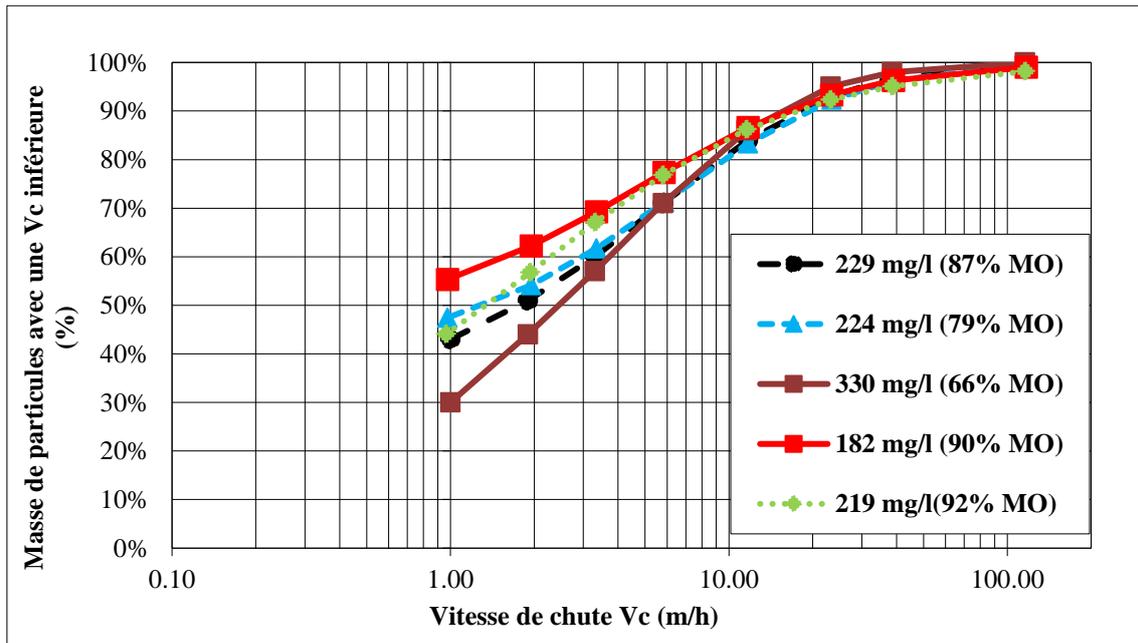


*Figure 4.26: Vitesse de chute des particules pour un temps sec avec une forte concentration (24-09-17 11h-14h)*

#### 4.4.2. Influence de la matière organique et de la concentration sur la vitesse de chute des particules

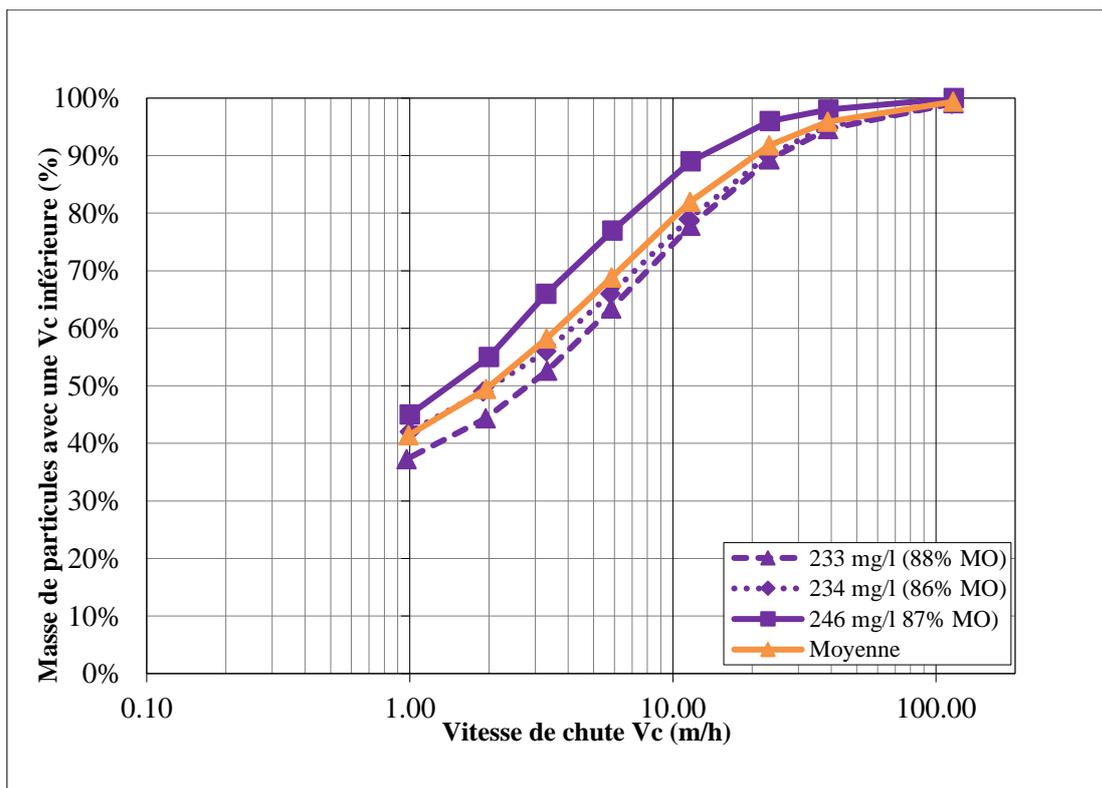
Pour voir clairement l'effet de la concentration et la matière organique sur la vitesse de chute des particules, plusieurs ViCAs d'un seul site pour la même période d'échantillonnage ont été comparés (Figures 4.27 et 4.28). La Figure 4.27 présente des résultats de tests ViCAs pris entre 11h et 14h pour des journées différentes. On y observe une différence entre la courbe dont la concentration est la plus élevée (330 mg/l) et la courbe dont la concentration est la moins élevée (182 mg/l). Avec une concentration à 182 mg/l, 55% des particules décantent avec une vitesse inférieure à 1 m/h alors que pour la même vitesse à une concentration de 330 mg/l, il s'agit de 30% des particules. Cette différence de concentrations a été accompagnée par une différence en fraction organique. En effet, comme interprété dans le paragraphe précédent, le taux de matière organique élevé ramène à une décantation plus lente. La proportion de matière organique la plus

faible est liée à la concentration la plus importante. Comme vu dans la partie sur la qualité de l'eau en temps sec aux Figures 4.12 à 4.14, la proportion de la matière organique diminue avec l'augmentation de la concentration. Cela peut être lié juste à une forte charge qui est plus inorganique comme des rejets industriels en temps sec dans le réseau, comme il peut être dû au changement du comportement hydraulique du système (débits plus élevés) qui influence la resuspension des particules déjà décantées, ce qui va être présenté dans le paragraphe suivant.



**Figure 4.27:** Influence de la fraction de la matière organique et de la concentration sur la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement

Comme comparé antérieurement, la décantation à Sacré-Cœur est plus rapide que celle observée à St-Sacrement. La figure 4.28 montre que pour les 3 résultats de tests ViCAs, une moyenne de 41% de la masse des particules décantent avec une vitesse inférieure à 1 m/h. Le pourcentage de masse des particules qui ont une vitesse de chute inférieure à 1 m/h varie entre 38% et 45%. L'écart-type entre les courbes est très faible. Une valeur maximale de l'écart-type est enregistrée pour la vitesse de 6 m/h. A cette vitesse,  $69 \pm 6\%$  de la masse moyenne des particules décantent avec une vitesse inférieure à 6 m/h.



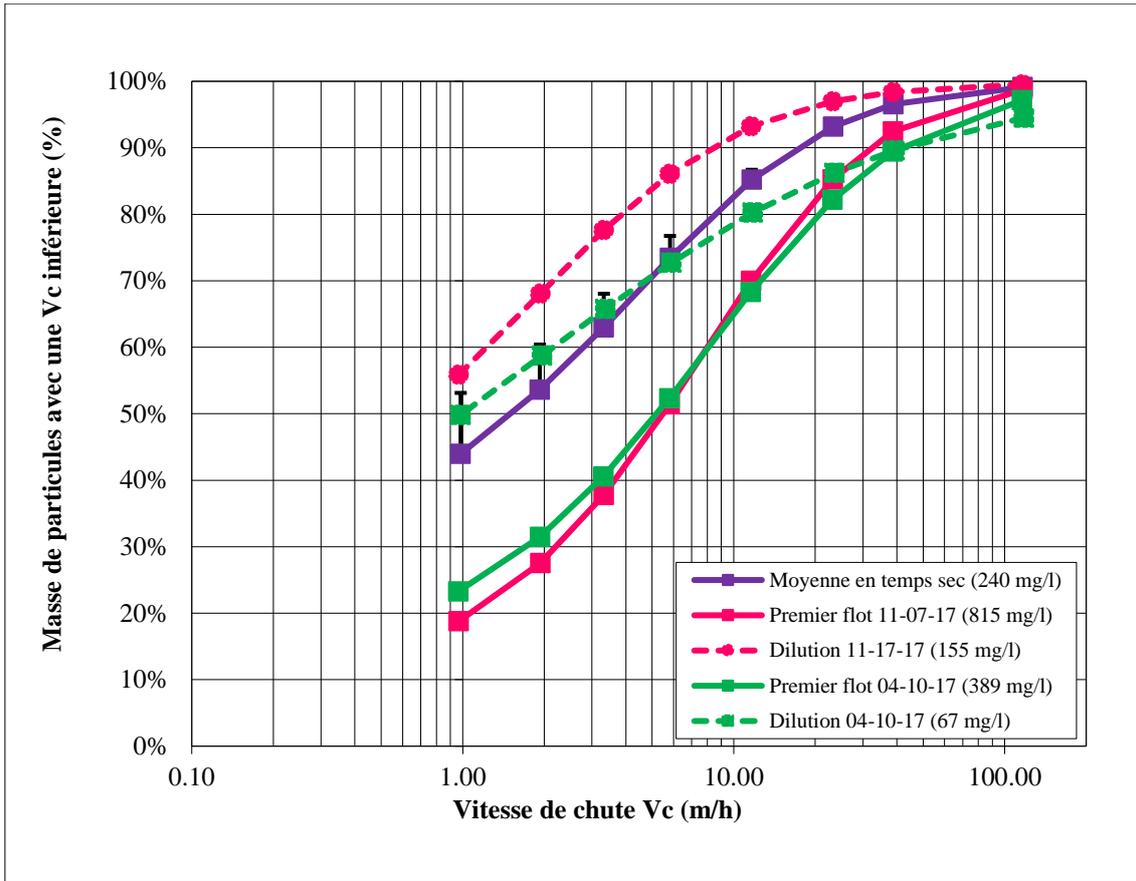
*Figure 4.28: Influence de la fraction de la matière organique et de la concentration sur la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur*

#### 4.4.3. Influence du changement du comportement hydraulique sur la vitesse de chute des particules

En temps de pluie, lorsque le comportement hydraulique dans le système change complètement, un impact sur la vitesse de chute peut être constaté. La Figure 4.29 montre la distribution de la vitesse de chute des particules lors de la phase du premier flot (où la concentration est la plus élevée) et la phase de dilution (où la concentration est la plus faible) des deux événements pluvieux 11-07-17 et 04-10-17. Les résultats présentés correspondent à la chambre St-Sacrement. Il est attendu que les particules en phase de premier flot décantent plus vite que celles collectées en phase de dilution ou même en temps sec. En effet, avec l'augmentation du débit observée à la suite de la pluie et le changement du comportement hydraulique (surtout la vitesse d'écoulement), il y a un apport d'une charge supplémentaire à partir du bassin versant urbain. Cette charge est principalement inorganique, ce qui est déjà montré dans la partie sur la qualité de l'eau concernant la fraction de la matière organique qui est faible en phase de premier flot. Les particules inorganiques sont plus denses donc décantent plus vite. En plus de cette charge, la vitesse d'écoulement dans les conduites augmente avec le débit et permet de

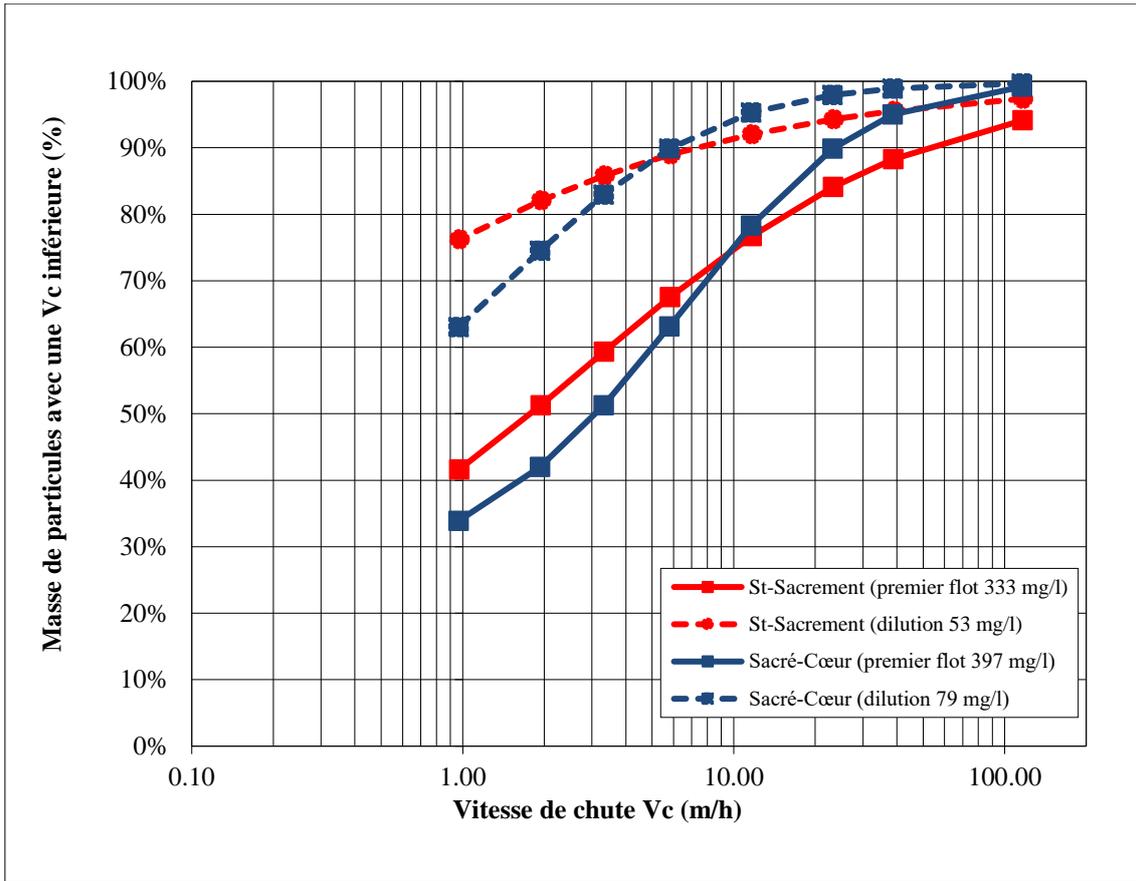
resuspendre les particules qui ont une vitesse de chute plus importante et qui sont restées plus longtemps dans les sédiments dans lesquels la matière organique s'est dégradée. Dans ce cas, l'augmentation de la concentration et la présence de particules qui sont plus denses, sont deux caractéristiques qui vont augmenter la vitesse de chute.

Bien que les deux courbes de la phase de premier flot aient des concentrations différentes, la distribution de la vitesse de chute est presque la même. Cette « quasi » même allure peut être expliquée par la présence d'une fraction importante de particules qui décantent plus vite dans l'échantillon du 04-10-17, malgré que la concentration soit plus faible que celle enregistrée le 11-07-17. La plupart des particules décantent dans la phase du premier flot puisqu'elles ont des vitesses de chutes importantes, d'où en phase de dilution, en plus de la faible concentration qui influence indirectement la décantation, les particules décantent moins vite. Même en phase de dilution, les particules de l'événement du 04-10-17 ont des vitesses de chute supérieures à celles de l'événement du 11-07-17. Il est possible de noter que pour la phase de dilution de l'événement du 04-10-17, seulement 5% des particules décantent avec une vitesse supérieure à 118 m/h. Ce pourcentage de particules a des vitesses très importantes qui leur ont permis de décanter même avant d'installer les coupelles sous la colonne de décantation. Ceci explique le décalage de cette courbe par rapport aux autres courbes (temps sec et dilution du 11-07-17).



*Figure 4.29: Distribution de la vitesse de chute des particules en phase de premier flot et en phase de dilution dans la chambre de contrôle St-Sacrement*

D'un autre côté, la figure 4.30 présente la distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre St-Sacrement et dans la chambre Sacré-Cœur pour le même événement pluvieux 24-10-17. Cet événement a été choisi puisque le phénomène du premier flot a été observé dans les deux chambres. En plus, les concentrations obtenues sont presque les mêmes. Pour cet événement, les particules à Sacré-Cœur ont une vitesse plus élevée par rapport aux particules échantillonnées à St-Sacrement. En premier flot, il y a 35 % des particules qui décantent avec une vitesse inférieure à 1 m/h à Sacré-Cœur alors que à St-Sacrement, il y en a 41%. La même observation a été faite en phase de dilution. Cela peut être dû à la différence de concentration entre les deux chambres comme expliqué pour le temps sec, mais également au comportement hydraulique. En effet, puisque la chambre Sacré-Cœur reçoit une charge hydraulique importante surtout en temps de pluie, avec des vitesses d'écoulement beaucoup plus élevées, celles-ci permettent de resuspendre plus de particules qui ont des vitesses de chute plus importantes.



*Figure 4.30: Distribution de la vitesse de chute des particules en phase de premier flot et en phase de dilution dans la chambre de contrôle St-Sacrement et la chambre Sacré-Cœur (24-10-17)*

#### 4.4.4. Conclusion sur la distribution de la vitesse de chute des particules

La vitesse de chute des particules est influencée par plusieurs paramètres comme le régime hydraulique, la concentration et la fraction de la matière organique. En effet, une augmentation de la vitesse d'écoulement permet de remettre en suspension plus de particules denses ou plus grosses qui décantent plus vite. Cette remise en suspension engendre à son tour une augmentation de la concentration, d'où la corrélation constatée entre l'augmentation de la vitesse de chute des particules et l'augmentation de la concentration. D'autre part, avec l'augmentation de la matière organique, les particules sont moins denses, d'où une vitesse de chute des particules moins importante.

## 5. Conclusion

Ce mémoire a traité du comportement des particules dans les réseaux d'assainissement. Pour atteindre les objectifs fixés dans ce projet de maîtrise, une campagne d'échantillonnage a été menée en été et en automne 2017 sur trois sites d'étude : la chambre de contrôle St-Sacrement, le réseau sanitaire de Duberger et la chambre de contrôle Sacré-Cœur.

L'analyse des résultats a été élaborée pour quatre aspects principaux : l'hydraulique dans les systèmes étudiés en temps sec et en temps de pluie, l'évolution de la qualité de l'eau, la distribution de la vitesse de chute des particules et la compréhension de l'interaction entre le débit, la sédimentation et la remise en suspension.

En temps sec, comme observé ailleurs, les débits varient selon l'activité sur le bassin versant tandis qu'en temps de pluie, la réponse de chaque site en termes de débit dépend des caractéristiques de la pluie. En temps de pluie, une augmentation de débit est enregistrée quelques minutes après le début de l'événement pluvieux. La réponse de chaque site d'étude en termes de débit dépend de chaque bassin versant qui contribue au ruissellement ainsi que de l'intensité de pluie. Un changement du comportement hydraulique a été constaté dans le réseau sanitaire Duberger à la suite de la pluie. En effet, des augmentations importantes y sont observées. Un débit maximum égal à 600 l/s durant les événements présentés dans ce mémoire a été enregistré pour l'événement du 24-10-17. Cette augmentation remarquable et inattendue est liée à l'hypothèse de la présence d'infiltration importante et l'existence de plusieurs sources de captage à l'amont du site d'échantillonnage du réseau sanitaire Duberger.

Ces différents comportements hydrauliques influencent significativement l'évolution de la concentration en MeS et MVeS. En temps de pluie, à la suite de l'augmentation du débit engendré par la pluie, les MeS augmentent. Cette augmentation peut présenter le phénomène du premier flot lorsqu'elle est significative. En effet, le ruissellement à la surface peut être la cause de cette augmentation de la charge en MeS. De plus, avec l'augmentation de la vitesse, les particules décantées en temps sec peuvent être remises en suspension, ce qui est la deuxième cause de l'augmentation des MeS.

Dans des échantillons où un profil de concentrations en MeS et en MVeS a été obtenu avec une concentration initiale importante qui peut correspondre au premier flot, la

fraction de la matière organique correspondante à ces concentrations élevées varie entre 42% et 60%, ce qui représente un pourcentage faible comparativement avec le temps sec, où des valeurs entre 85% et 90% sont enregistrées. Ce faible pourcentage peut être expliqué par l'arrivée des particules inorganiques dans le réseau à la suite du lessivage des chaussées. En outre, la biodégradation des particules décantées dans le réseau en temps sec engendre la diminution de la fraction organique en temps de pluie. En phase de dilution, la concentration en MeS diminue et la fraction en matière organique devient plus importante mais elle n'atteint pas les pourcentages enregistrés en temps sec. Pour le réseau sanitaire Duberger, les mêmes scénarios du changement du comportement hydraulique peuvent être reproduits à cause des sources de captage et de l'infiltration. Avec l'augmentation du débit dans le réseau sanitaire Duberger, des variations aléatoires des MeS y sont observées pour les deux événements traités. Avec un débit très important pour l'événement du 24-10-17, la concentration en MeS, dont une partie a été remise en suspension, atteint 700 mg/l avec une fraction organique de 60% des MeS en moyenne et qui peut diminuer jusqu'à 35%. Ce faible pourcentage de matière organique en réseau sanitaire a été expliqué par la biodégradation des particules dans les sédiments en temps sec.

La vitesse de chute des particules est corrélée avec la concentration des MeS. Elle est influencée par la fraction de la matière organique. Plus le pourcentage de la matière organique est élevé, plus la décantation est lente. Cela revient à la densité de la matière organique qui est plus faible par rapport à la matière minérale (la densité de la matière minérale varie entre 1,1 et 2,65 pour les sables « grit » (WEF, 2017) et elle varie entre 1,83 et 2,5 pour les particules provenant de la chaussée (Ashley et al., 2004). En effet, la faible densité des particules organiques ne permet pas une décantation rapide, d'où l'augmentation de la vitesse de chute lorsque les particules sont plus inorganiques. Tous ces résultats sont liés aux conditions d'écoulement. Cela peut être conclu également en temps de pluie, lorsque le débit est très important par rapport à celui du temps sec. L'augmentation de débit est accompagnée par une augmentation de la vitesse d'écoulement. Cette vitesse d'écoulement crée l'énergie nécessaire pour remettre en suspension des particules plus légères décantées en temps sec. Ces particules sont plutôt inorganiques à la suite de leur biodégradation dans les dépôts de sédiments. Également, l'augmentation de la vitesse sur le bassin a entraîné des particules inorganiques de la surface. Dès que le débit commence à augmenter, les matières en suspension sont alors

principalement inorganiques avec une forte concentration et ces particules décantent avec une vitesse de chute importante. En phase de dilution, les eaux de ruissellement qui rejoignent le réseau ne sont plus concentrées (chaussées lavées durant les premières minutes de la pluie). Aussi les particules avec une vitesse de chute importante ont déjà décanté juste après la phase du premier flot. D'où, à la phase de dilution avec des faibles concentrations, l'eau ne contient que des particules qui décantent moins vite.

## **Recommandations**

Ces travaux de recherche dans le cadre d'un projet de maîtrise ont permis d'avoir une bonne base de données permettant de mieux comprendre la qualité de l'eau dans le réseau. Afin d'améliorer la qualité des résultats et d'avancer davantage les recherches pour le développement ultérieur d'un modèle de réseau assez performant, plusieurs recommandations sont faites :

- L'amélioration de la méthodologie d'échantillonnage en fixant la crépine sur un support et en testant sa position à plusieurs niveaux d'eau pour comparer la différence de concentrations, ce qui donnerait une meilleure idée sur les particules échantillonnées (transportées en suspension ou par charriage).
- Un suivi en temps réel du débit est conseillé afin de pouvoir mieux échantillonner la phase de premier flot.
- La mesure de la hauteur des sédiments en amont et en aval de la section de l'intercepteur permettrait de prévoir une relation entre la vitesse d'écoulement et la vitesse de chute des particules transportées. En effet, cela donnerait une idée sur l'impact du changement de la vitesse d'écoulement sur le type de transport des particules et donnerait plus d'information sur les lieux de sédimentation au sein de la section étudiée de l'intercepteur.
- Un échantillonnage à l'entrée des puisards permettrait de déterminer les caractéristiques des particules provenant du ruissellement et de les comparer à celles trouvées dans le réseau pour déduire les caractéristiques des particules remises en suspension.

# Bibliographie

Ahyerre, M., Chebbo, G. & Saad, M. (2000) Sources and erosion of organic solids in a combined sewer. *Urban water*, 2(4), pp. 305-315.

Ashley, R., Arthur, S., Coghlan, B. & McGregor, I. (1994) Fluid Sediment in combined sewers. *Water Science and Technology*, 29(1-2), pp. 113-123.

Ashley, R., Bertrand-Krajewski, J., Hvitved-Jacobson, T. & Verbank, M. (2004) *Solids in Sewers*, London, UK: IWA Publishing. Scientific and Technical Report.

Ashley, R. & Verbanck, M. (1996) Mechanics of sewer sediment erosion and transport. *Journal of Hydraulic Research*, 34(6), pp. 753-770.

Ashley, R., Wotherspoon, D., Coghla, B. & McGregor, I. (1992) The erosion and movement of sediments and associated pollutants in combined sewer. *Water Science and Technology*, 25(8), pp. 101-114.

Barco, J., Papiri, S. & Stentrom, M. K. (2008) First flush in a combined sewer system. *Chemosphere*, 71, pp. 827-833.

Bel Hadj, I. (2013) *Caractérisation de la taille des particules et de leur vitesse de chute en décantation primaire*, Mémoire de maîtrise. Université Laval. Québec, Qc, Canada.

Bertrand-Krajewski, J.-L., Briat, P. & Scrivener, O. (1993) Sewer sediment production and transport modelling: A literature review. *Journal of Hydraulic Research*, 31(4), pp. 435-460.

Bertrand-Krajewski, J., Chebbo, G. & Saget, A. (1998) Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water Research*, 32(8), pp. 2341-2356.

Brière, F. G. (2012) *Distribution et collecte des eaux*. Presses internationales polytechnique. Montréal, Qc, Canada.

- Brombach, H., Weiss, G. & Fuchs, S. (2005) A new database on urban runoff pollution : comparaison of separate and combined sewer systems. *Water Sciences and Technology*, 51(2), pp. 119-128.
- Butler, D. & Davies, J. (2010) *Urban drainage*. 3 éd. Oxford: Taylor & Francis e-Library,.
- Butler, D., Friedler, E. & Gatt, K. (1995) Characterising the quantity and quality of domestic wastewater inflows. *Water Science and Technology*, 31(7), pp. 13-24.
- Chebbo, G. (1992) *Solides des rejets urbains par temps de pluie: Caractérisation et traitabilité*. Thèse de Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Paris, France.
- Chebbo, G. & Bachoc, A. (1992) Characterization of suspended solids in urban wet weather discharges. *Water Science and Technology*, 28(8), p. 171–179.
- Chebbo, G., Bachoc, A., Laplace, D. & Le Guennec, B. (1995) The transfer of solids in combined sewer networks. *Water Science and Technology*, 37(1), pp. 95-105.
- Chebbo, G. & Gromaire, M. (2009) VICAs an operating protocol to measure the distributions of suspended solid settling velocities within urban drainage samples. *Journal of Environmental Engineering*, 135(9), pp. 768-775.
- Consultants BPR (1984) *Étude du contrôle des déversements d'égouts combinés dans la rivière Saint-Charles*. Rapport technique pour la Ville de Québec. Qc, Canada
- De Bénédictis, J. & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2005) Infiltration in sewer systems: comparison of measurements methods. *Water Science and Technology*, 52(3), pp. 219-227.
- De Toffol, S., Engelhard, C. & Rauch, W. (2007) Combined sewer system versus separate system-a comparison of ecological and economical performance indicators. *Water Science and Technology*, 55(4), pp. 255-264.
- Deletic, A. & Maksumovic, C. (1998) Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas. *Journal of Environmental Engineering*, 124, p. 869–879.

Dey, S. (2014) *Fluvial hydrodynamics: Hydrodynamic and sediment transport phenomena*. Springer, Berlin, Germany.

Gasperi, J; Lorgeoux, C; Moilleron, R; Gromaire, M.C; Chebbo, G. (2009) Settling velocity grading of particle bound PAHs: case of wet weather flows within combined sewer systems. *Journal of Environmental Engineering*, 135(11), pp. 1155-1162.

Gromaire, M., Garnaud, S., Saad, M. & Chebbo, G. (2001) Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. *Water Research*, 35(2), pp. 521-533.

Gupta, K. & Saul, A. (1996) Specific relationship for the first flush load in combined sewer flows. *Water Research*, 30(5), pp. 1244-1252.

Hannouche, A., Chebbo, C. & Joannis, C. (2014) Assessment of the contribution of sewer deposits to suspended solids loads in combined sewer systems during rain events. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, pp. 5311-5317.

Karpf, C. & Krebs, P. (2011) Quantification of groundwater infiltration and surface water inflows in urban sewer networks based on a multiple model approach. *Water Research*, 45, pp. 3129-3136.

Krishnappan, B.G.; Exall, K.; Marsalek, J.; Rochfort, Q.; Kydd, S.; Baker, M.; Stephens, R.P. (2012) Variability of Settling Characteristics of Solids in Dry and Wet Weather Flows in Combined Sewers: Implications for CSO Treatment. *Water, Air and Soil Pollut*, 223, p. 3021–3032. Lessard, P. (1989) *Operational river quality management: Control of storm water discharges*. Ph.D., Imperial College of Science, Technology and Medicine, Londres, UK.

Machado, B; Carvalho, T; Almeida, M; Cupido, C; Cardoso, M.A. (2007) Minimization of inflow and infiltration in separate sanitary sewer systems. Lyon, France, Proceedings Novatech.

Mannina, G. & Viviani, G. (2009) Separate and combined sewer systems: a long-term modelling approach. *Water Science and Technology*, 60(3), pp. 555-565.

Marsalek, J.; Krishnappan, B.G.; Exall, K.; Rochfort, Q.; Stephens, R.P. (2006) An elutriation apparatus for assessing settleability of combined sewer overflows (CSOs). *Water Science & Technology*, 54(6-7), p. 223–23.

Maruéjols, T. (2012) *Gestion intégrée des eaux usées urbaines; Caractérisation et modélisation du comportement des polluants dans un bassin de rétention en réseau unitaire*. Thèse présentée à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval, Québec, Qc, Canada

Maruéjols, T; Lessard, P; Wipliez, B; Pelletier, G; Vanrolleghem, P.A. (2011) Characterization of the potential impact of retention tank emptying on wastewater primary treatment: a new element for CSO management. *Water Science and Technology*, 64(9), pp. 1898-1905.

Maruéjols, T., Vanrolleghem, P. A., Pelletier, G. & et Lessard, P. (2012) A phenomenological retention tank model using settling velocity distributions. *Water Research*, 46, pp. 6857-6867.

Maruéjols, T., Vanrolleghem, P., 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(4), pp. 321-332.

McPherson, T.N; Burian, S.J; Turin, H.J; Stenstrom, M.K; Suffet, I.H. (2002) Comparison of pollutant loads in dry and wet weather runoff in a southern California urban watershed. *Water Science and Technology*, 45(9), pp. 255-261.

Metcalf and Eddy (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. Fourth edition. McGraw Hill, N.Y., U.S.A.

Michelbach, S. & Weiß, G. J. (1996) Settleable sewer solids at stormwater tanks with clarifier for combined sewage. *Water Science and Technology*, 33(9), pp. 261-267.

Paré-Bourque, M. (2007) *Création et analyse de séries temporelles de débit en cinq endroits sur le bassin versant Saint-Charles*, Rapport de sujet Spécial. Université Laval. Québec, Qc, Canada.

- Petersen, B., Gernaey, K., Henze, M. & Vanrolleghem, P.A. (2002) Evaluation of an ASM1 model calibration procedure on a municipal wastewater treatment plant. *Journal of Hydroinformatics*, 4(1), pp.15-38
- Prigobbe, V. &Giulianelli, M. (2009) Quantification of sewer system infiltration using delta (18)O hydrograph separation. *Water Science and Technology*, 60(3), pp. 727-735.
- Rondeau, F. (2009) *Gestion des eaux usées urbaines en temps de pluie: comportement d'un réservoir de rétention*, Mémoire de maîtrise. Université Laval. Québec, Qc, Canada.
- Rossi, L., Fankhauser, R. & Chèvre, N. (2006) Water quality criteria for total suspended solids (TSS) in urban wet weather discharges. *Water Science and Technology*, 54(6-7), pp. 355-362.
- Rossi, L; Krejci, V; Rauch, W; Kreikenbaum, S; Frankhauser, R; Gujer, W. (2005) Stochastic modeling of total suspended solids (TSS) in urban areas during rain events. *Water Research*, 39(17), pp. 4188-4196.
- Shehab, T. & Moselhi, O. (2005) Automated detection and classification of infiltration in sewer pipes. *Journal of infrastructure systems*, 11(3), pp. 165-171.
- Tchobanoglous, G. & Schroeder, E. (1985) *Water Quality, Characteristics, Modeling, Modification*. Michigan, MA, USA: Addison-Wesley.
- Tik, S; Maruéjols, T; Bachis, G; Vallet, B; Lessard, P; Varnrolleghem, P.A. (2014) Using particle settling velocity distributions to better model the fate of stormwater TSS throughout the integrated urban wastewater system. *Influents* (Winter 2014), pp. 48-52.
- Verbanck, M. (1995) Variabilité des charges solides en suspension à l'exutoire des réseaux de collecte. *Fonctionnement du traitement des eaux usées en cas de fortes variations de débits*, Journée d'étude CB-IAWQ, Liège, Belgique.
- Water Environment Federation (2017) *Guidelines for Grit Sampling and Characterization*. WEF Special Publication. Alexandria, VA, USA.
- Weiß, G., Brombach, H. & Haller, B. (2002) Infiltration and inflow in combined sewer systems: long-term analysis. *Water Science and Technology*, 45(7), pp. 11-19.

Wipliez, B. (2011) *Caractérisation et gestion de la vidange de réservoir de rétention des eaux unitaires*, Mémoire de maîtrise. Université Laval. Québec, Qc, Canada.

Wittenberg, H. & Aksoy, H. (2010) Groundwater intrusion into leaky sewer systems. *Water Science and Technology*, 62(1),pp. 92-98.

# Annexes

## **Annexe A**

### **Échantillons récoltés**

**Tableau A.1 : Récapitulatifs des échantillons récoltés en temps sec et en temps de pluie**

			<b>St-Sacrement unitaire</b>	<b>Duberge sanitaire</b>	<b>Sacré-Cœur unitaire</b>
<b>Temps sec</b>	08-06-17	12h-14h			
	09-06-17	05h-07h30			
	14-06-17	11h-13h			
		18h-21h			
	05-07-17	11h-14h			
		18h-22h			
	07-07-17	11h-14h			
	11-07-17	05h-09h			
	20-07-17	05h-09h			
		11h-14h			
		18h-22h			
	25-07-17	18h-22h			
	27-07-17	12h-14			
	06-09-17	18h-22h			
	24-09-17	11h-14h			
		18h-22h			
	01-10-17	11h-14h			
	12-10-17	05h-09h			
	17-10-17	11h-14h			
		18h-22h			
09-11-17	05h30-09h30				
15-11-17	18h-22h				
<b>Temps de pluie</b>	27-06-17	14h30-15h30			
	11-07-17	11h40-12h55			
	07-09-17	12h38-13h57			
	04-10-17	18h56-20h09			
	15-10-17	9h15-10h23			
	24-10-17	21h30-22h44			
	02-11-17	10h			
	05-11-17	17h55-18h41			

## **Annexe B**

### **Essais effectués au laboratoire**

Le tableau B.1 représente toutes les analyses effectuées pour les échantillons. Seuls les résultats fiables sont présentés dans les graphes sous formes de profil en MeS et MVeS et distribution de la vitesse de chute des particules.

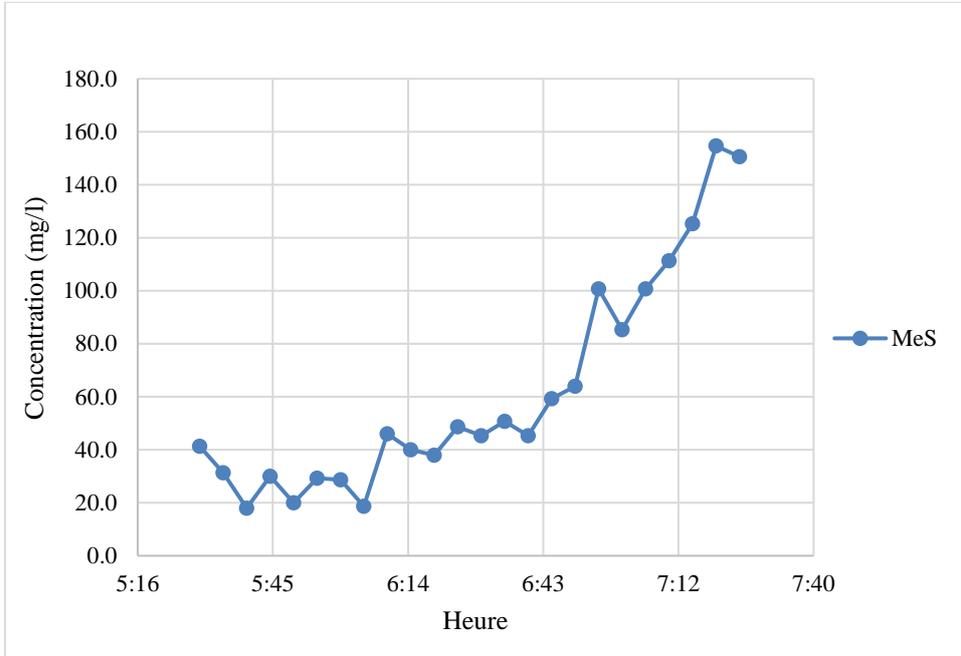
**Tableau B.1: Récapitulatif des essais effectués au laboratoire**

			St-Sacrement unitaire			Duberger sanitaire			Sacré-Cœur unitaire		
			MeS	MVeS	ViCAs	MeS	MVeS	ViCAs	MeS	MVeS	ViCAs
<b>Temps sec</b>	08-06-17	12h-14h									
	09-06-17	05h-07h30									
	14-06-17	11h-13h									
		18h-21h									
	05-07-17	11h-14h									
		18h-22h									
	07-07-17	11h-14h									
	11-07-17	05h-09h									
	20-07-17	05h-09h									
		11h-14h									
		18h-22h									
	25-07-17	18h-22h									
	27-07-17	11h-14h									
	06-09-17	18h-22h									
	24-09-17	11h-14h									
		18h-22h									
	01-10-17	11h-14h									
	12-10-17	05h-09h									
	17-10-17	11h-14h									
		18h-22h									
09-11-17	05h30-09h30										
15-11-17	18h-22h										
<b>Temps de pluie</b>	27-06-17	14h30-15h30									
	11-07-17	11h40-12h55									
	07-09-17	12h38-13h57									
	04-10-17	18h56-20h09									
	15-10-17	9h15-10h23									
	24-10-17	21h30-22h44									
	02-11-17	10h									
	05-11-17	17h55-18h41									

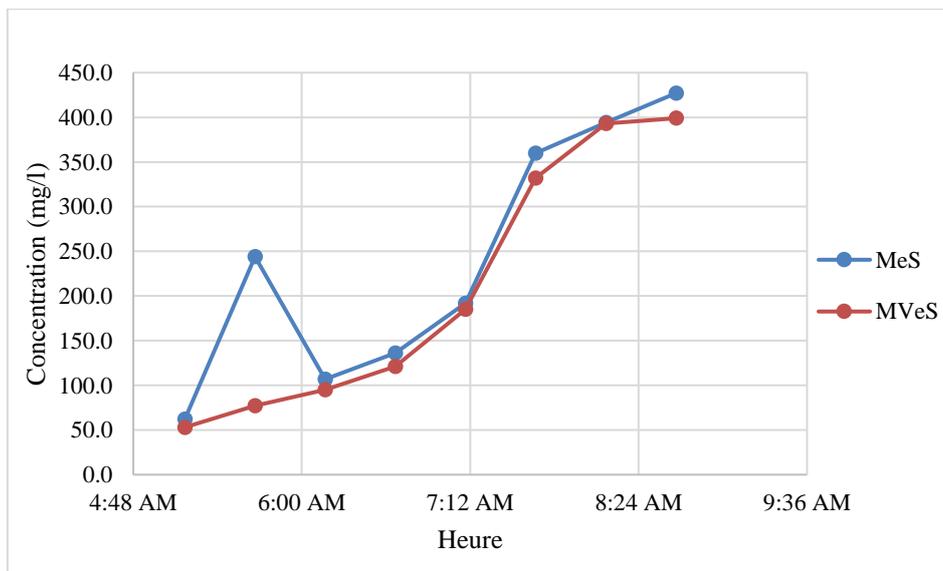
## B.1. Chambre de contrôle St-Sacrement

### B.1.1. MeS-MVeS

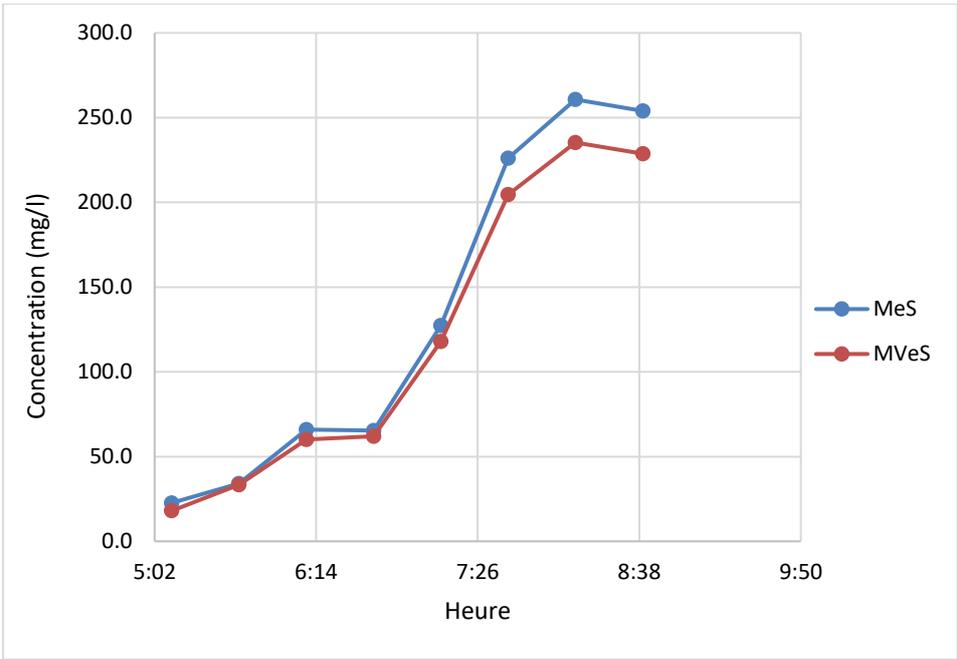
#### B.1.1.1. Temps sec (05h-09h)



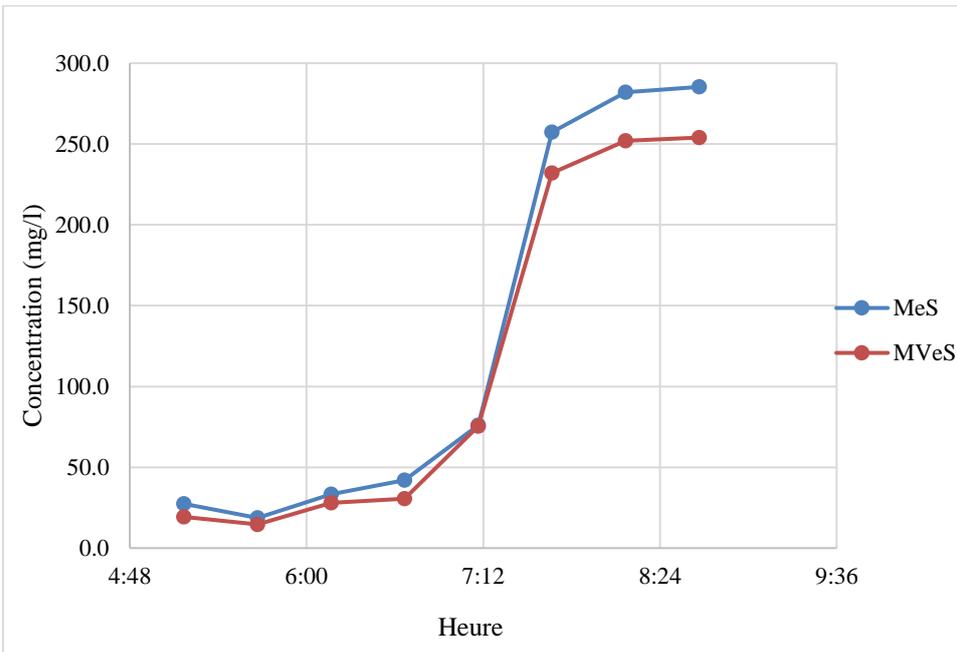
*Figure B.1 : Évolution de la concentration en MeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (09-06-17 05h30-07h30)*



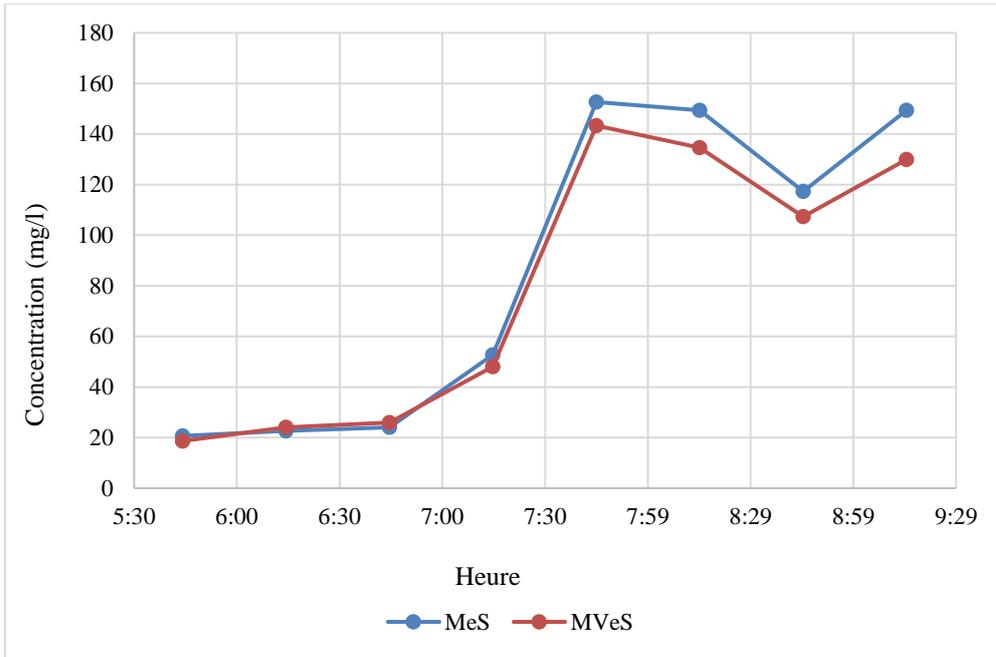
*Figure B.2 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (11-07-17 05h-09h)*



**Figure B.3 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (20-07-17 05h-09h)

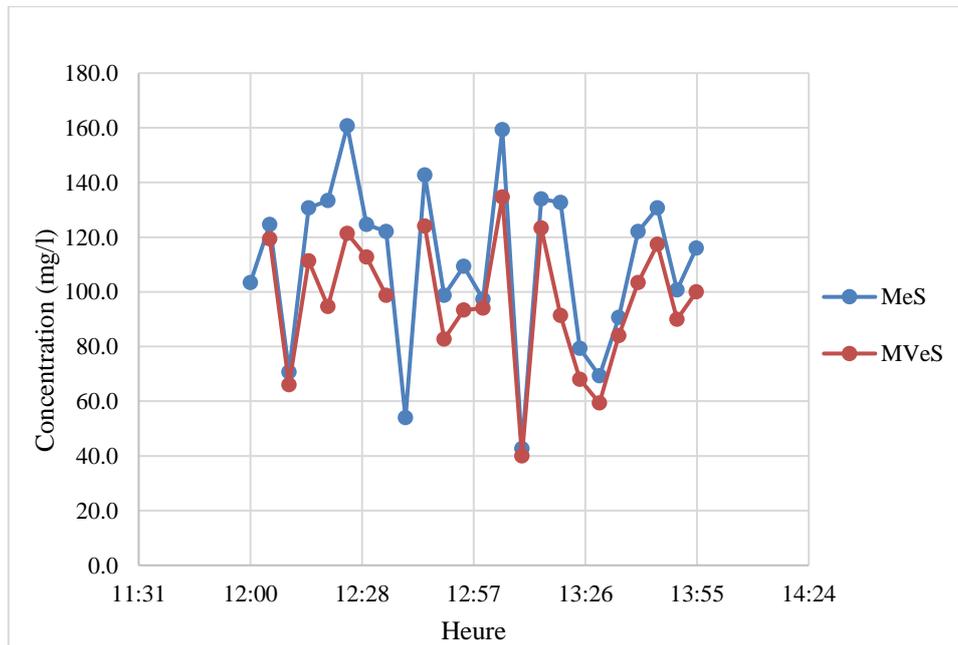


**Figure B.4 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (12-10-17 05h-09h)

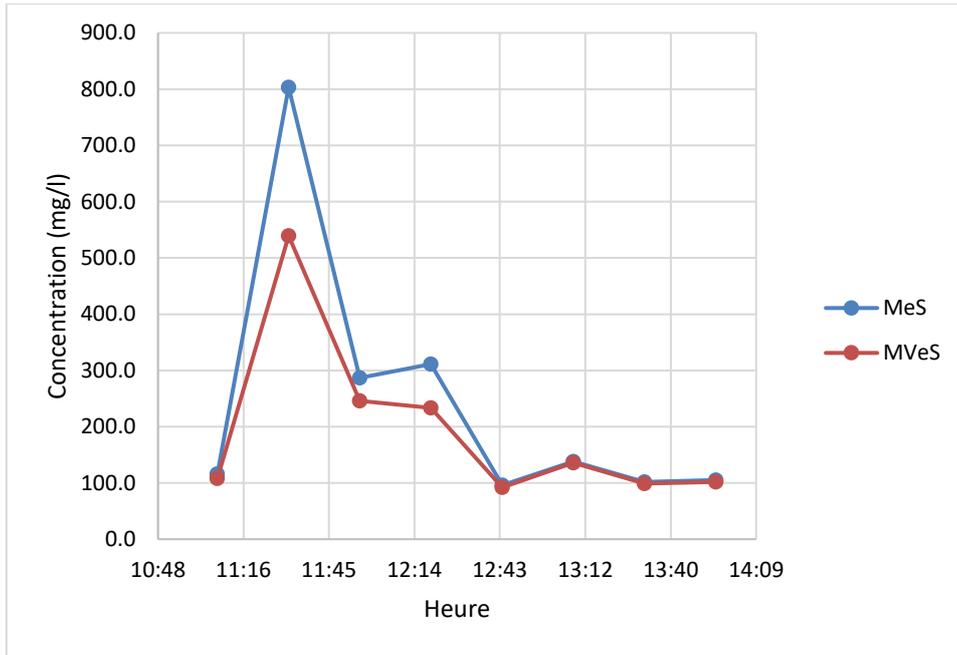


**Figure B.5 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (09-11-17 05h-09h)

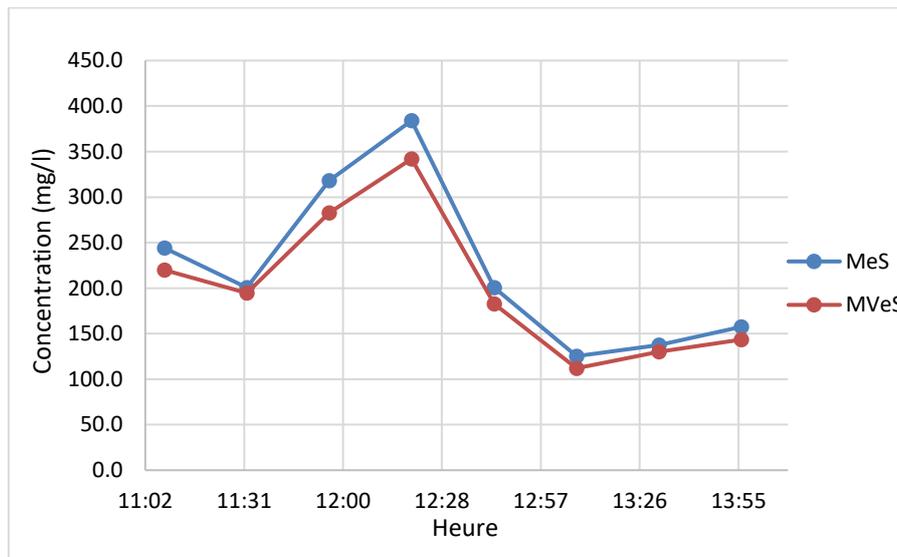
**B.1.1.2. Temps sec (11h-14h)**



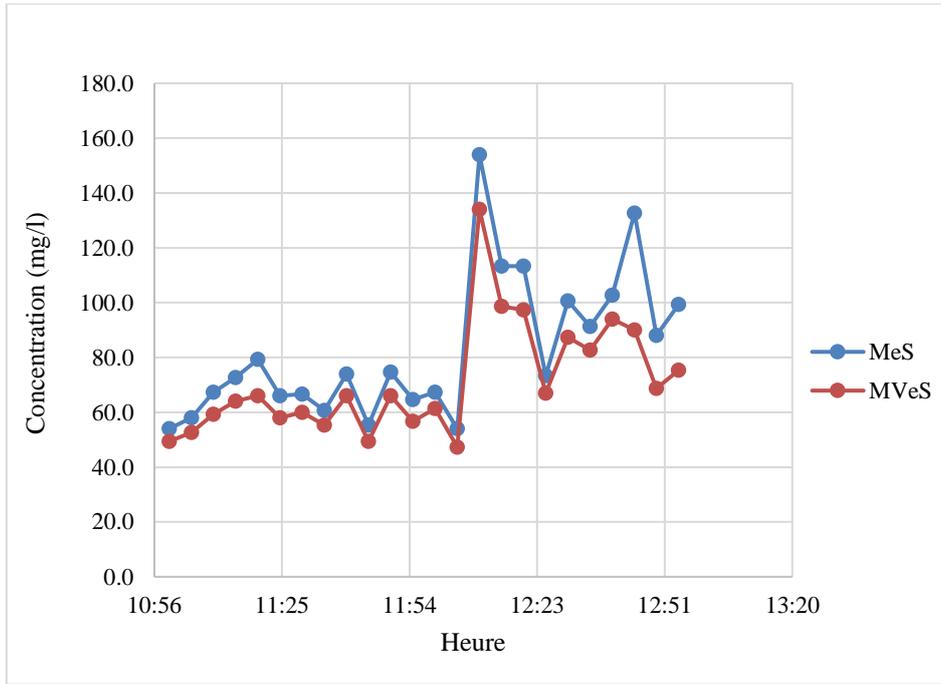
**Figure B.6 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (08-06-17 12h-14h)



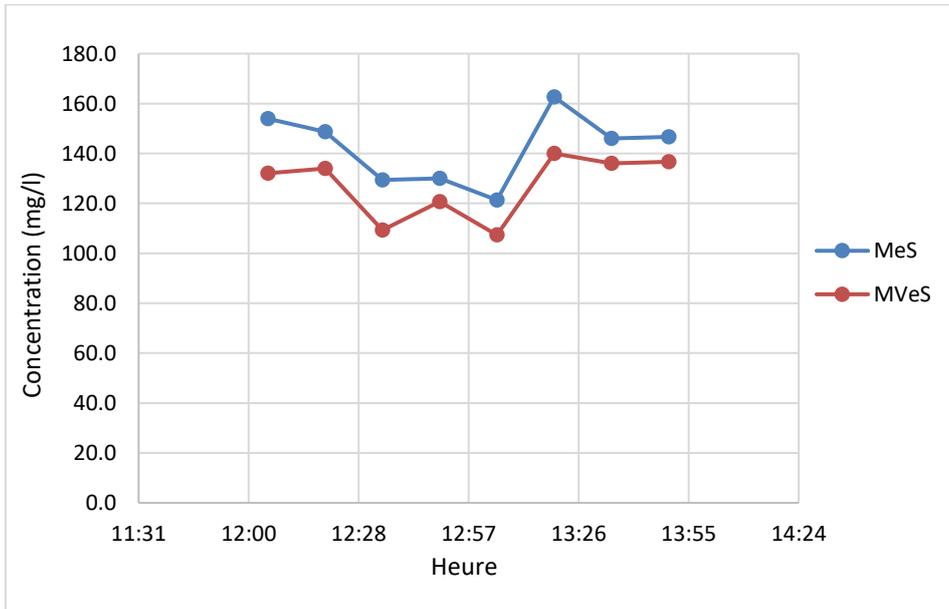
**Figure B.7 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (07-07-17 11h-14h)



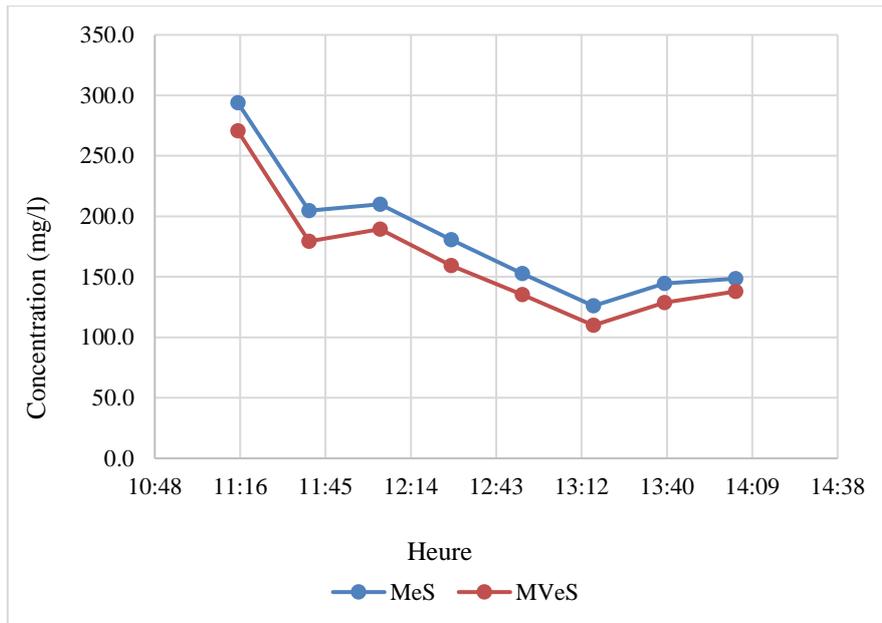
**Figure B.8 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (20-07-17 11h-14h)



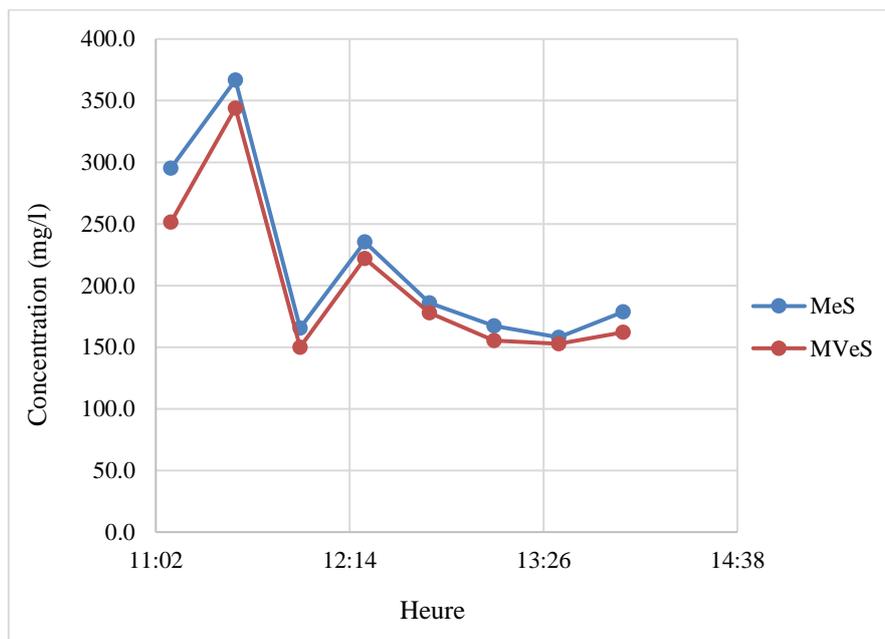
**Figure B.9 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (14-06-17 11h-13h)



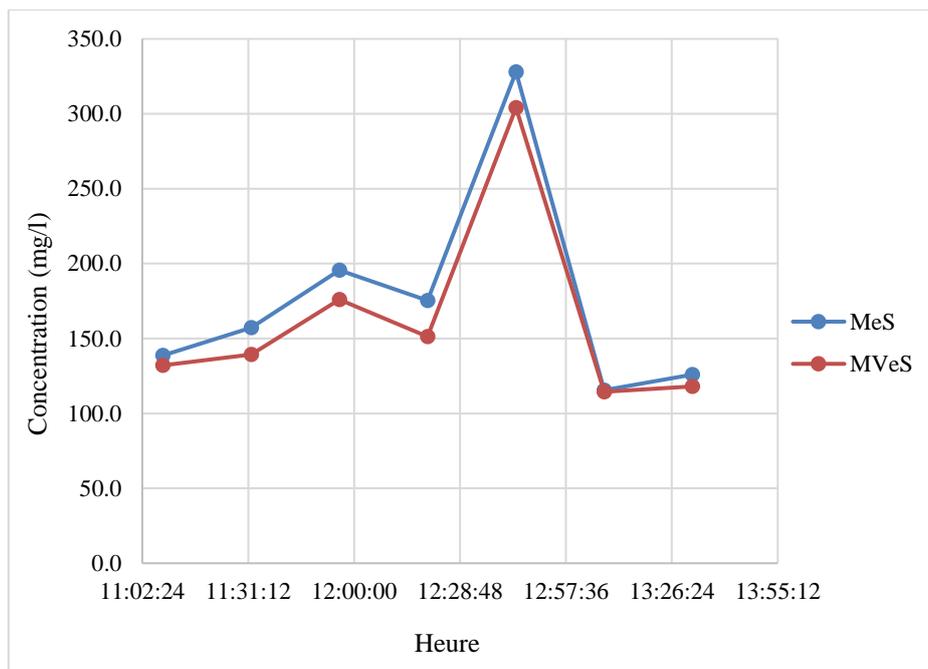
**Figure B.10 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (27-07-17 12h-14h)



**Figure B.11** : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (24-09-17 11h-14h)

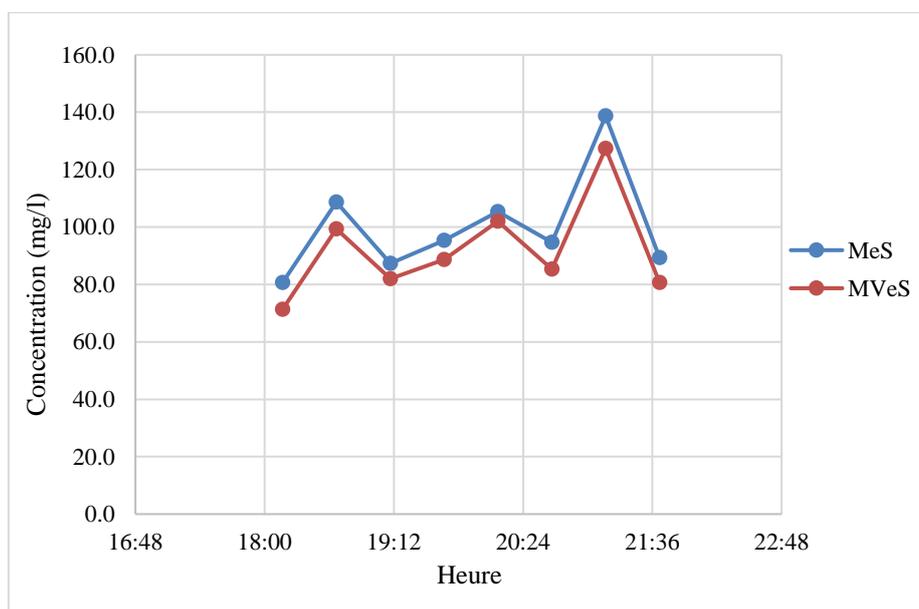


**Figure B.12** : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (01-10-17 11h-14h)

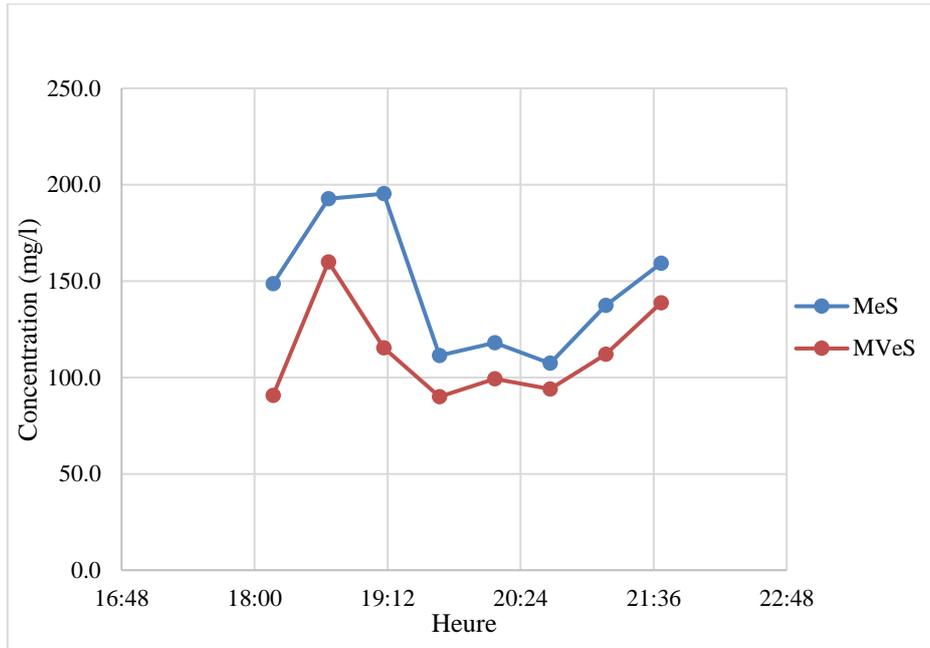


**Figure B.13 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (17-10-17 11h-14h)

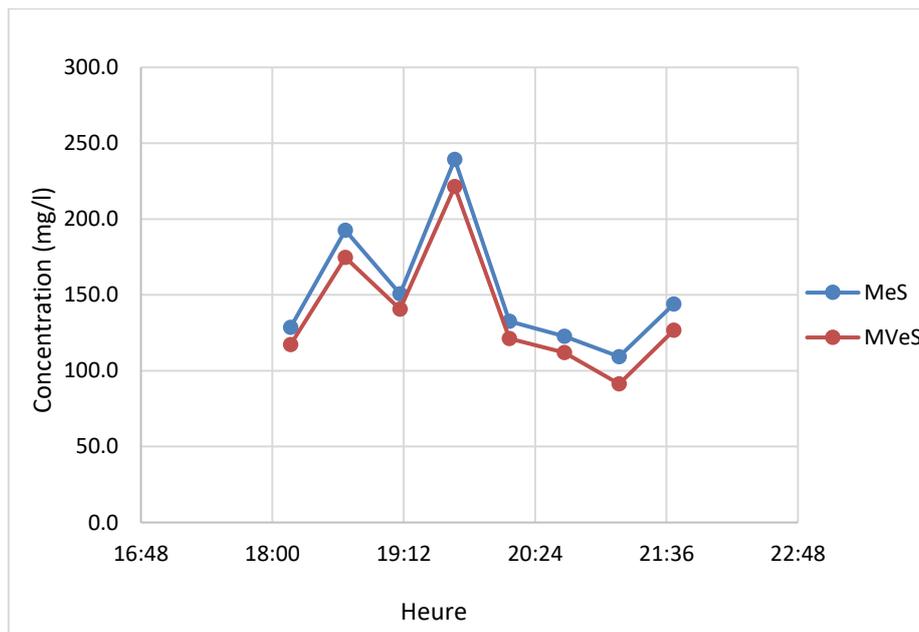
### B.1.1.3. Temps sec (18h-22h)



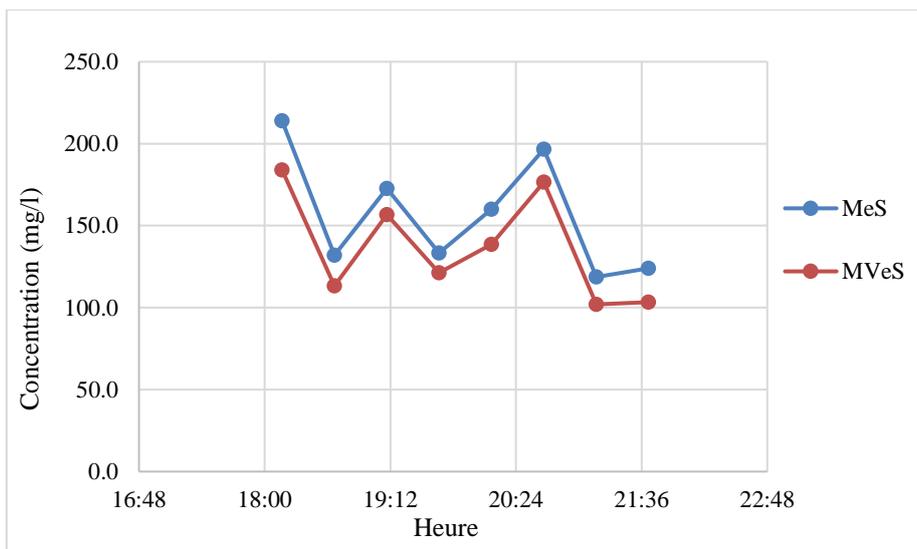
**Figure B.14 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (05-07-17 18h-22h)



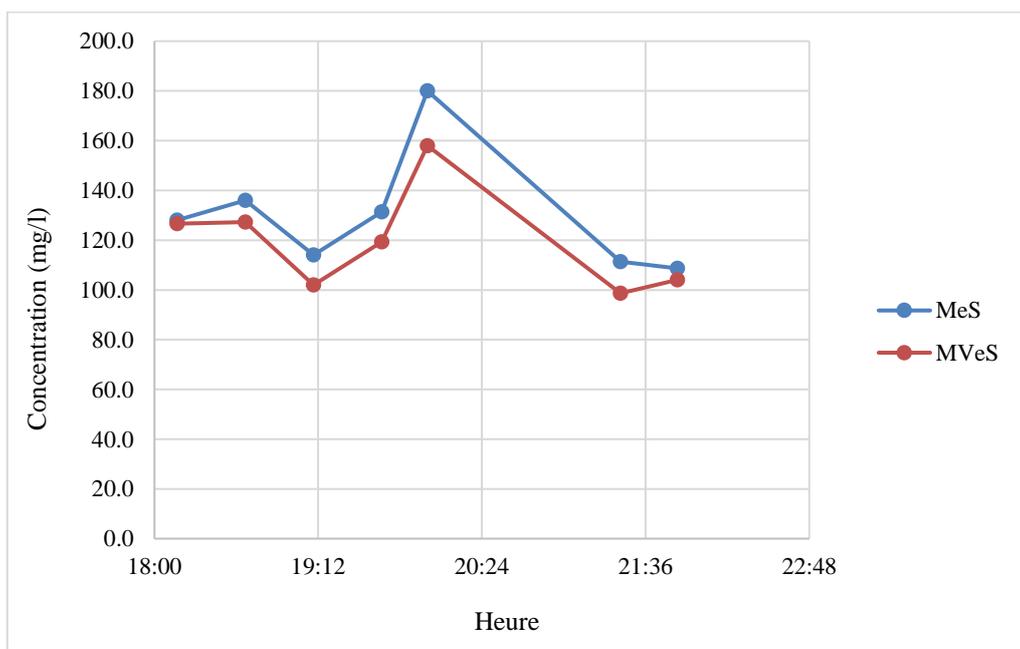
**Figure B.15 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (20-07-17 18h-22h)



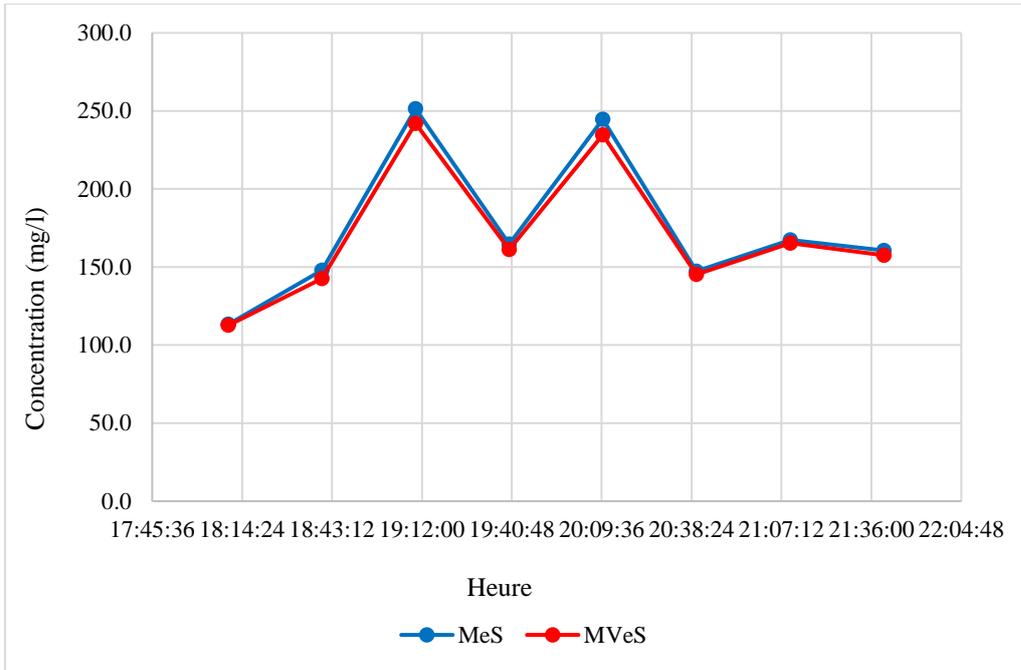
**Figure B.16 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (25-07-17 18h-22h)



**Figure B.17 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (06-09-17 18h-22h)

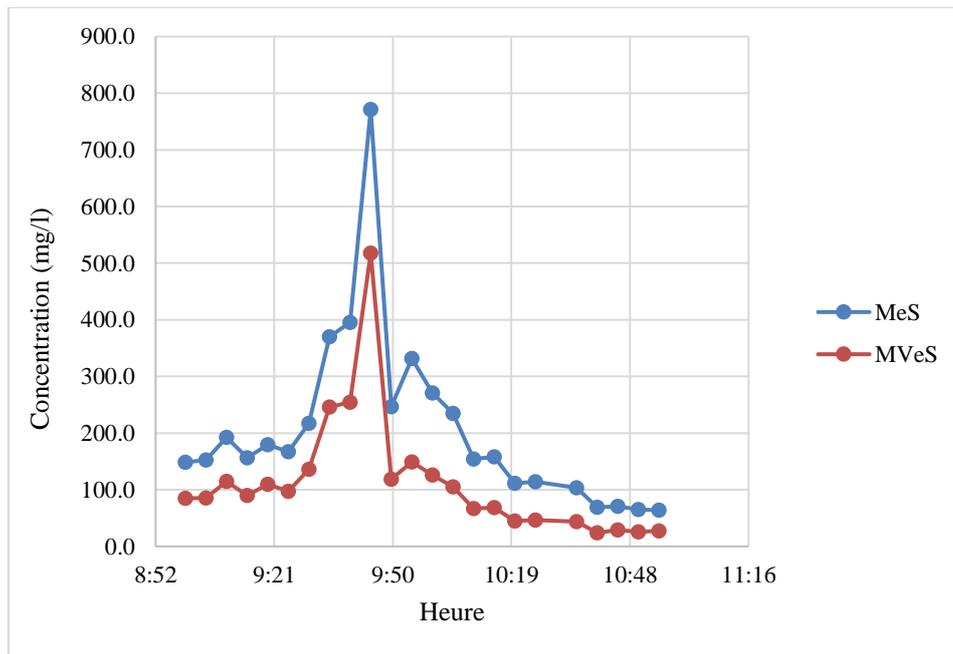


**Figure B.18 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (24-09-17 18h-22h)

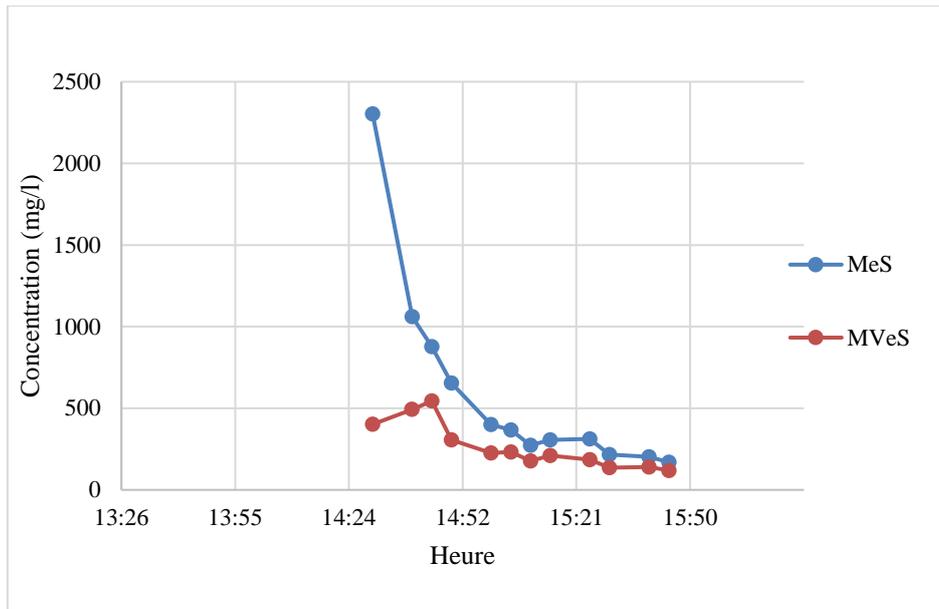


**Figure B.19 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec dans la chambre de contrôle St-Sacrement (15-11-17 18h-22h)

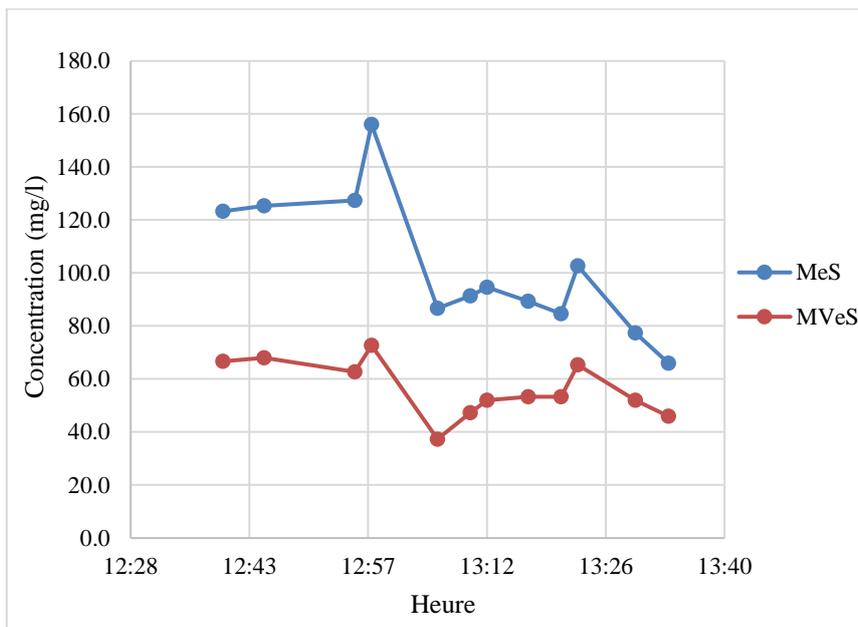
#### B.1.1.4. Temps de pluie



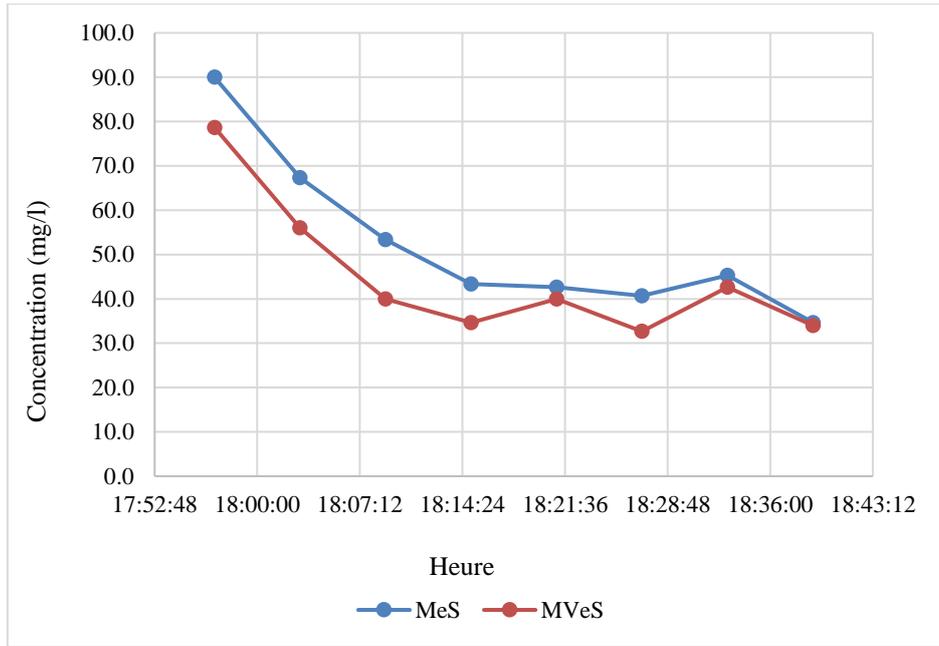
**Figure B.20 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps de pluie dans la chambre de contrôle St-Sacrement (16-06-17 09h-11h)



**Figure B.21 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps de pluie dans la chambre de contrôle St-Sacrement (27-06-17 14h30-15h45)



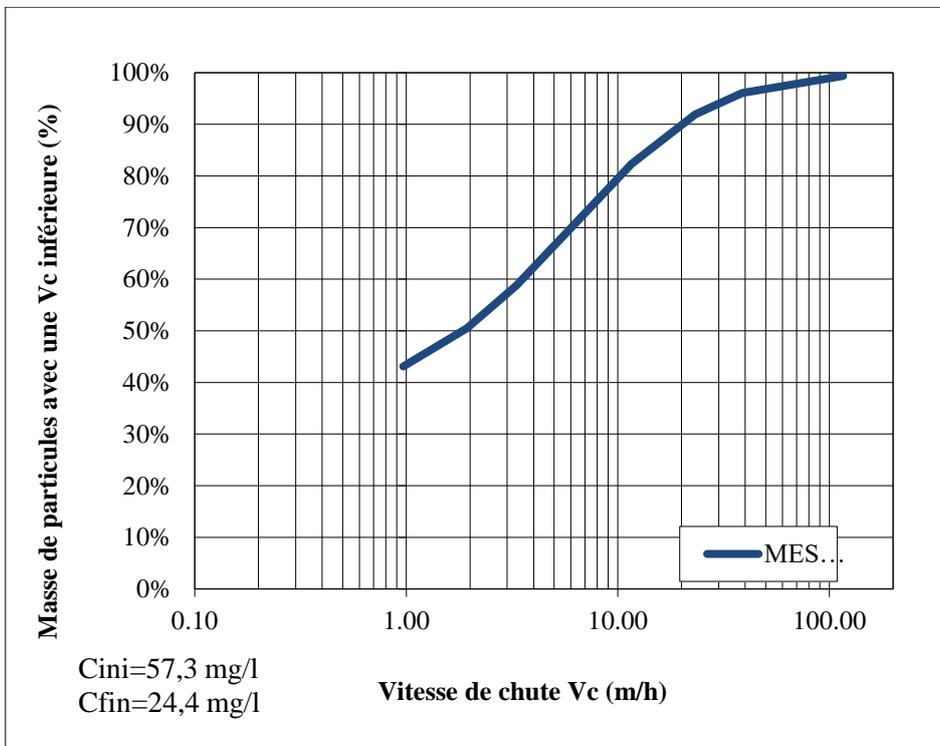
**Figure B.22 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps de pluie dans la chambre de contrôle St-Sacrement (07-09-17 12h40-13h34)



**Figure B.23 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps de pluie dans la chambre de contrôle St-Sacrement (05-11-17 17h55-18h41)

## B.2.1. ViCAs

### B.2.1.1. Temps sec (05h-09h)



**Figure B.24 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (09-06-17 05h30-07h30)

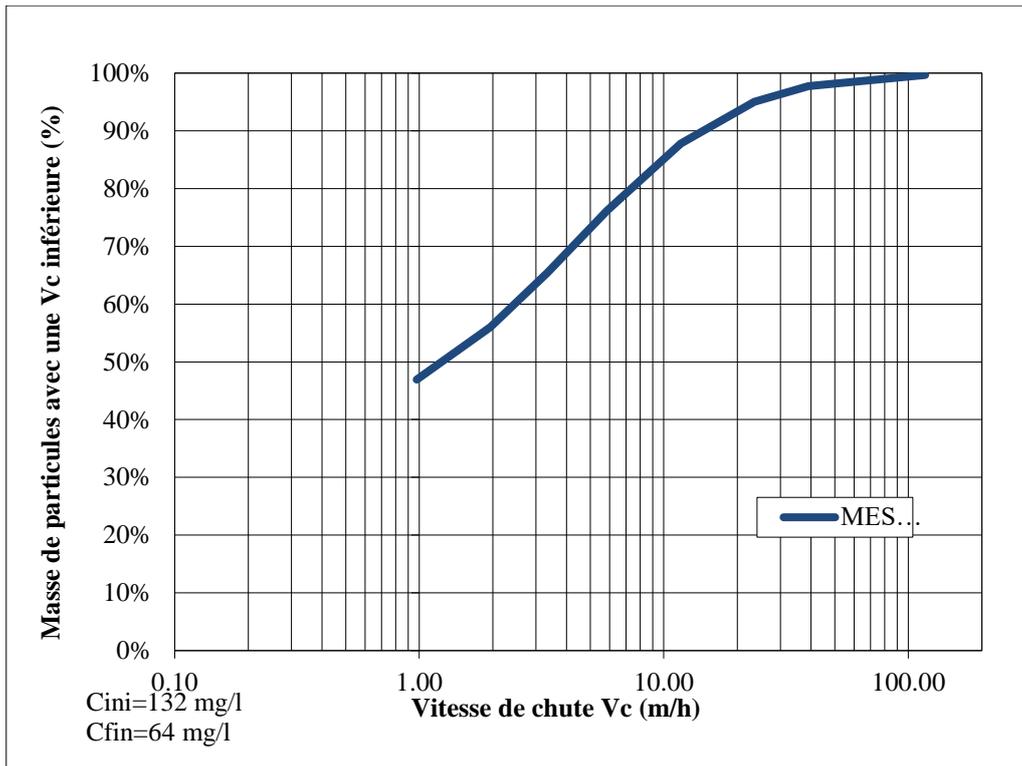


Figure B.25 : Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle  
St-Sacrement (20-07-17 05h-09h)

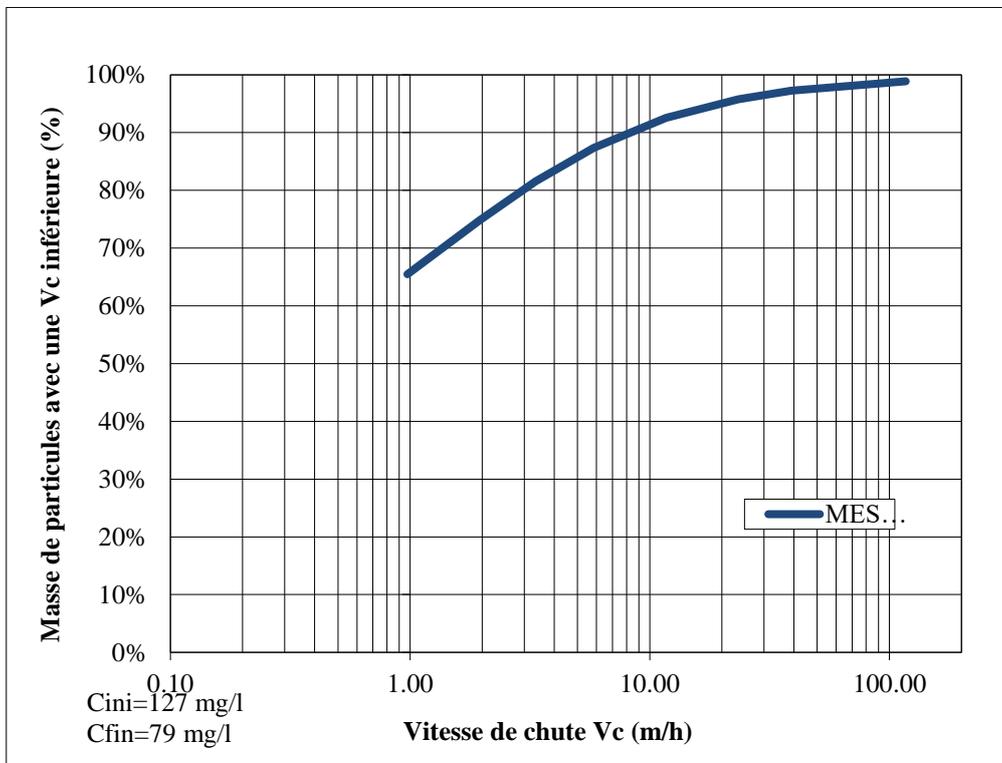


Figure B.26 : Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle  
St-Sacrement (12-10-17 05h-09h)

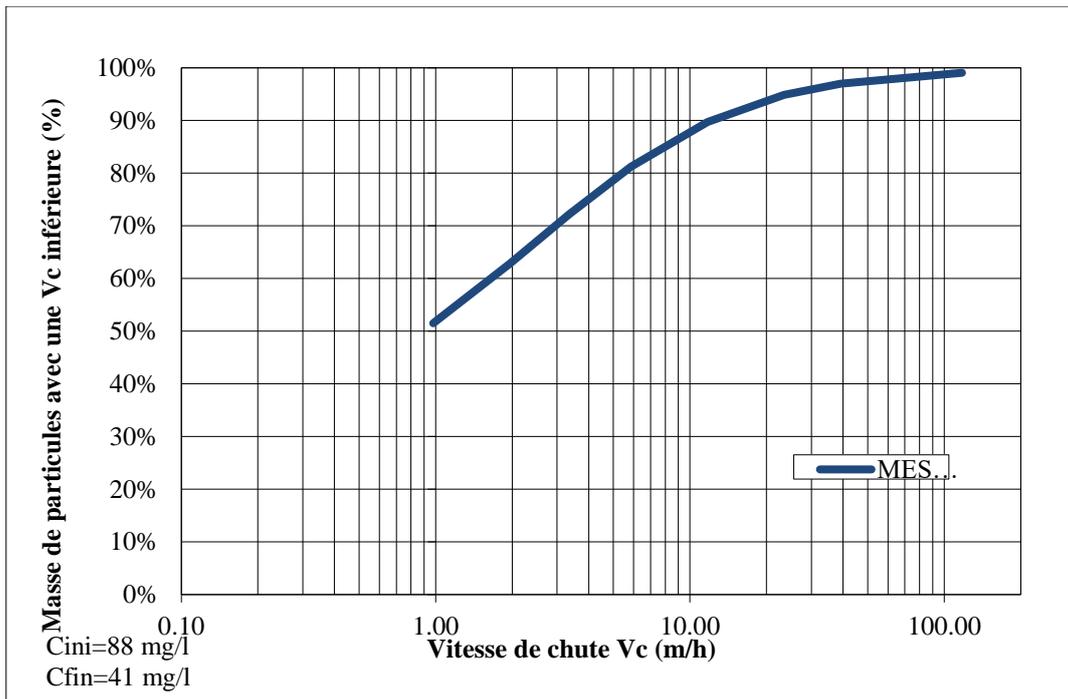


Figure B.27 : Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (09-11-17 05h-09h)

#### B.1.2.2. Temps sec (11h-14h)

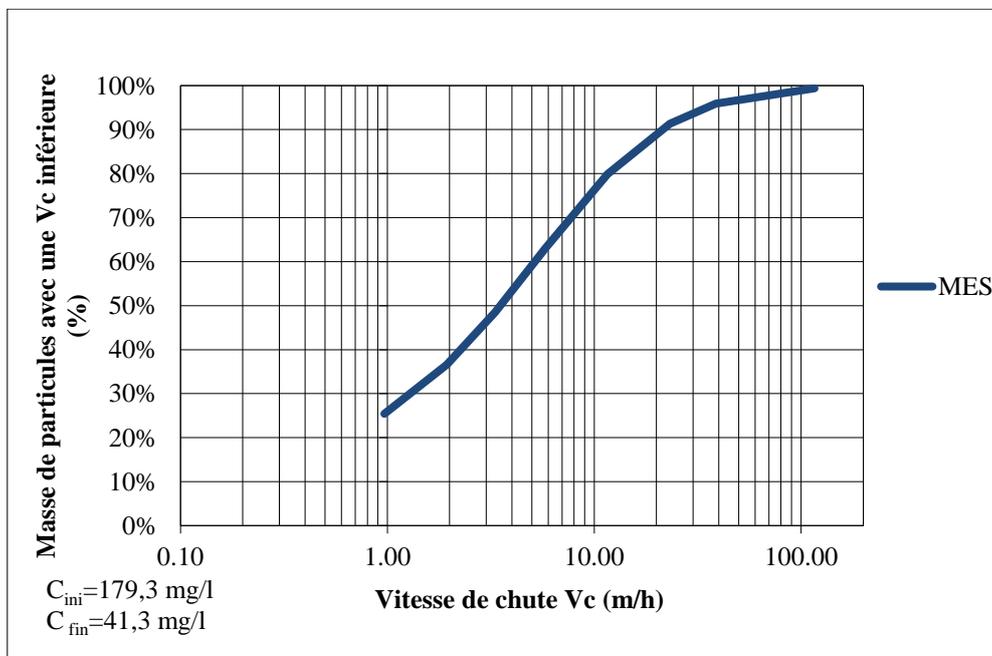
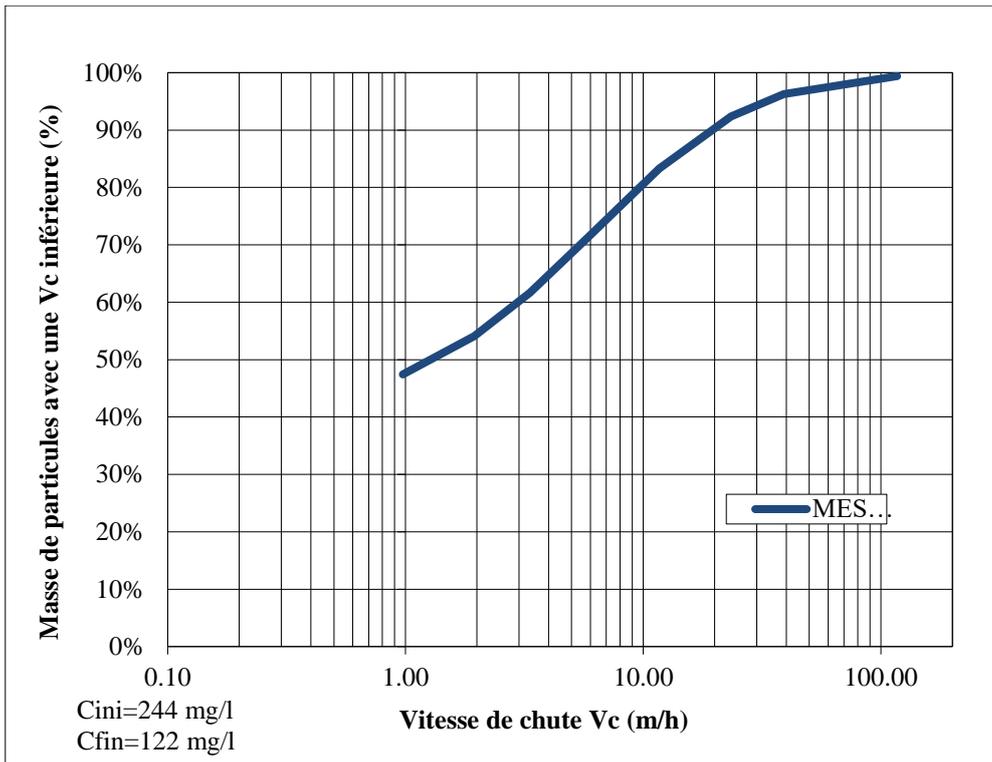
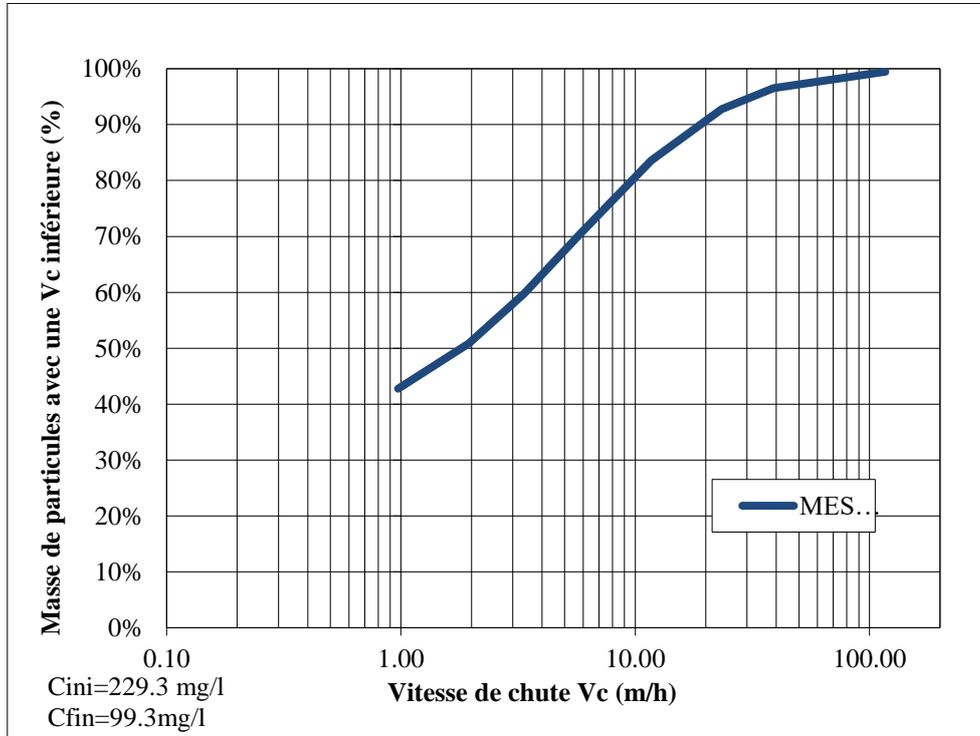


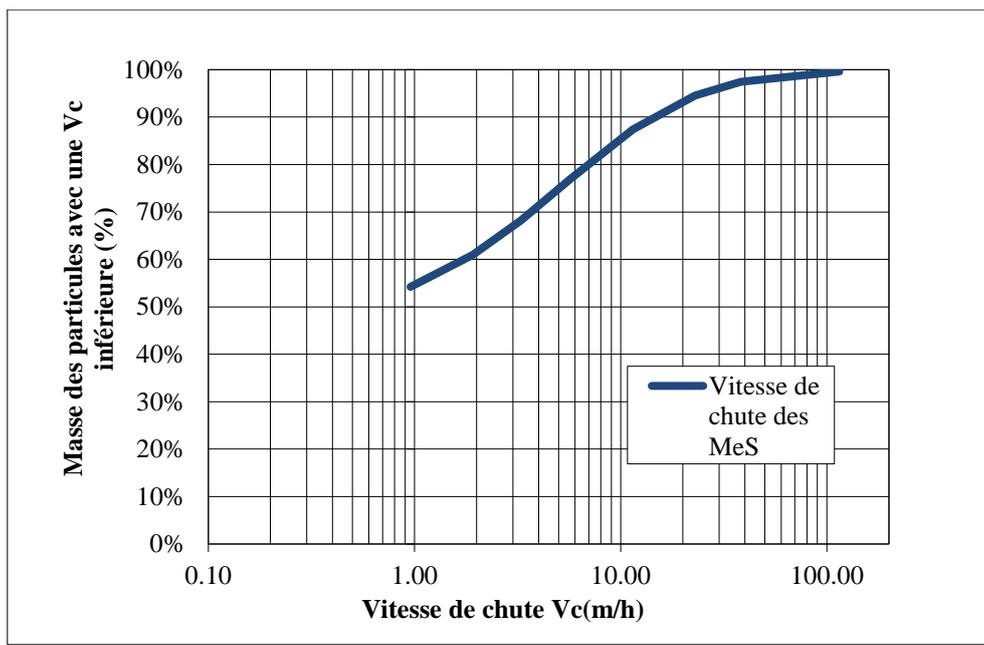
Figure B.28 : Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (08-06-17 12h-14h)



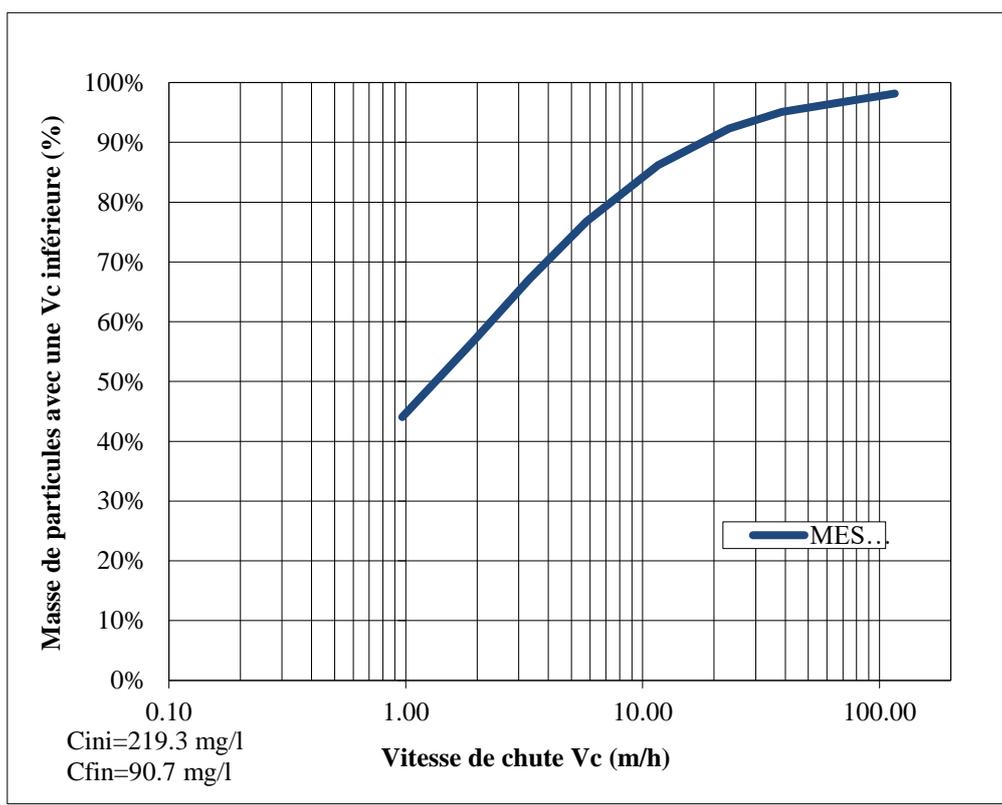
**Figure B.29 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (07-07-17 11h-14h)



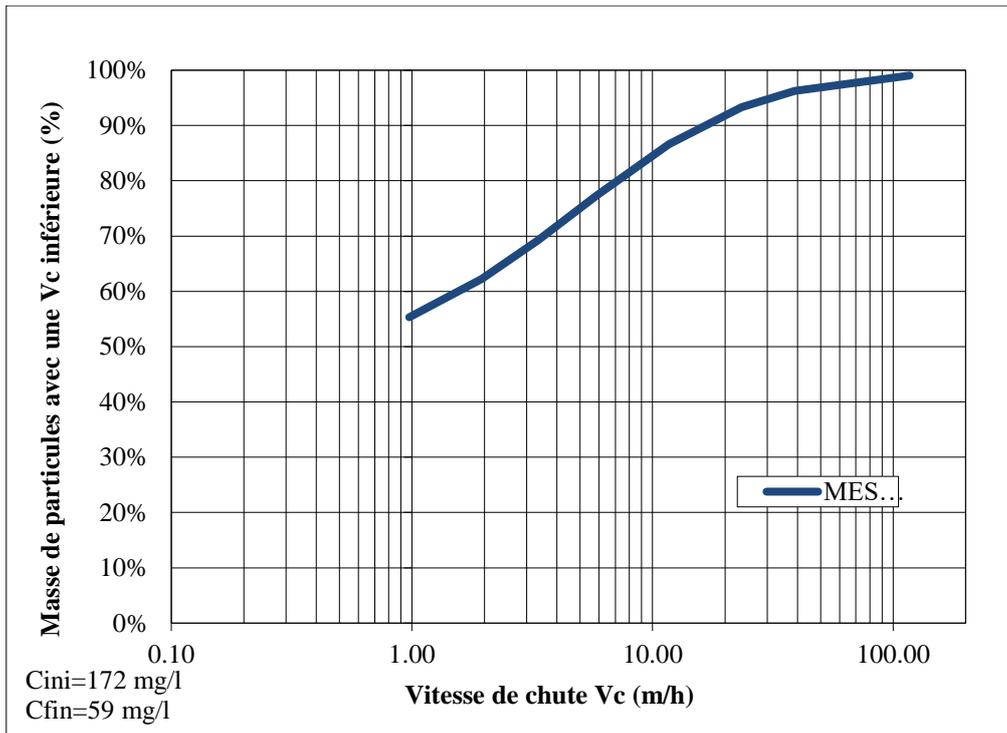
**Figure B.30 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (20-07-17 11h-14h)



**Figure B.31 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (24-09-17 11h-14h)

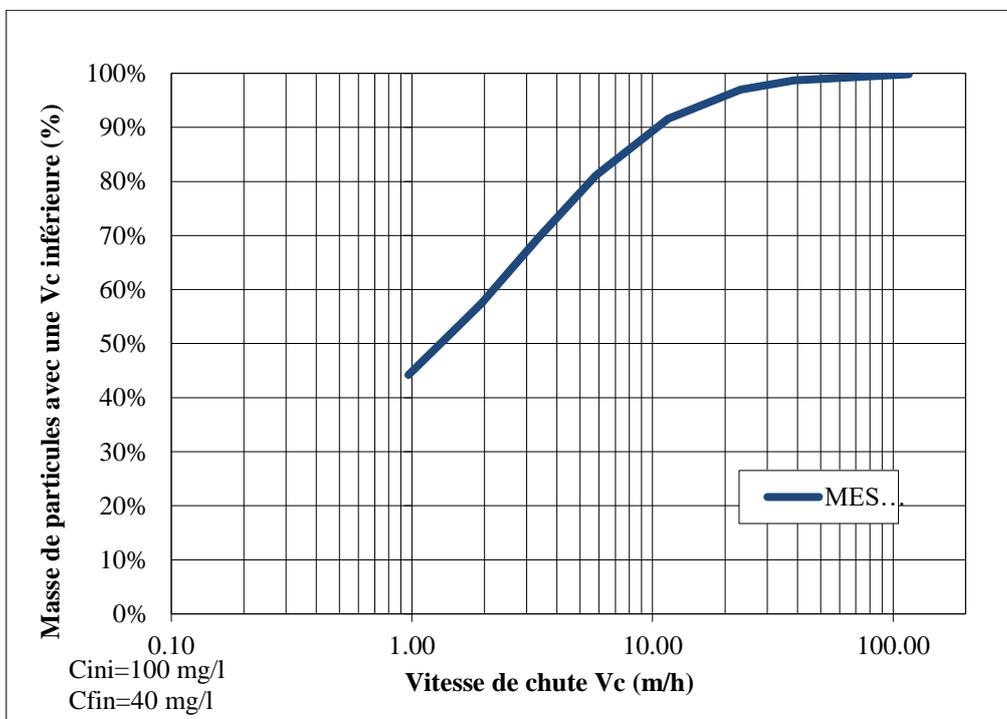


**Figure B.32 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (01-10-17 11h-14h)

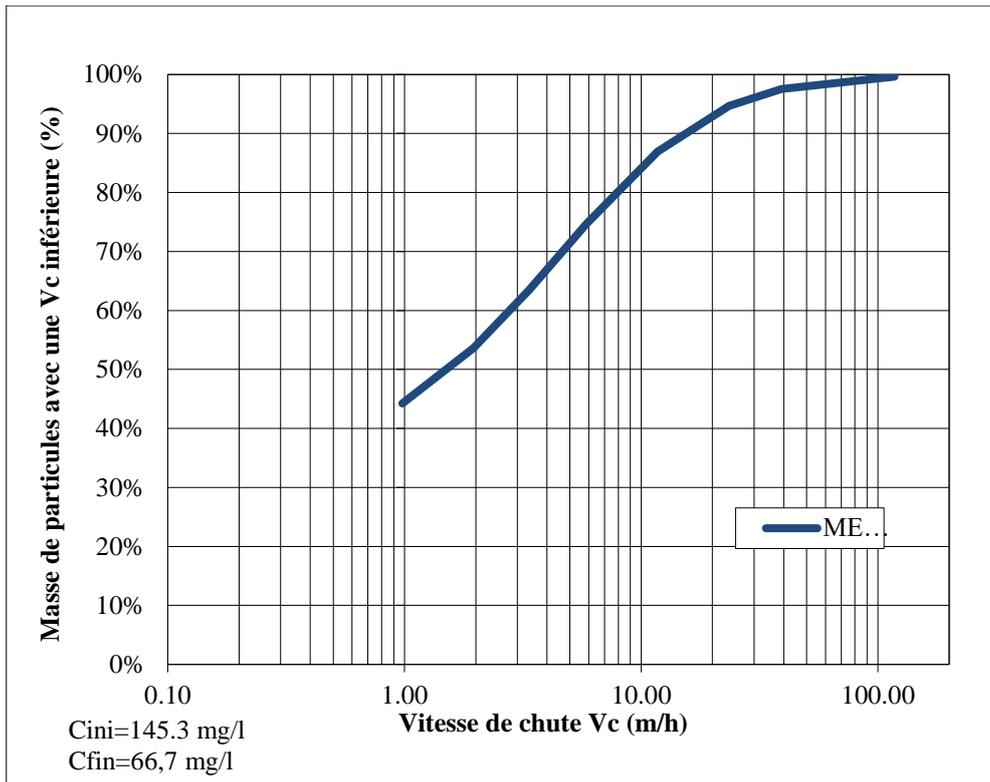


*Figure B.33 : Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (17-10-17 11h-14h)*

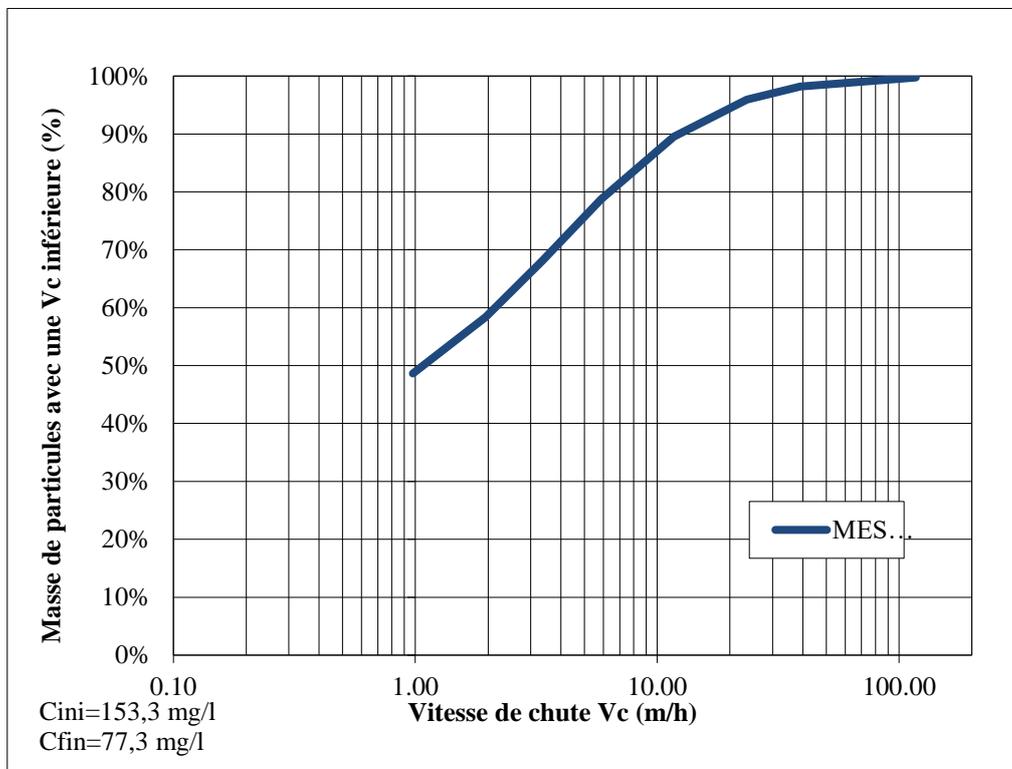
### B.1.2.3. Temps sec (18h-22h)



*Figure B.34 : Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (05-07-17 18h-22h)*



*Figure B.35 : Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (20-07-17 18h-22h)*



*Figure B.36 : Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (25-07-17 18h-2h)*

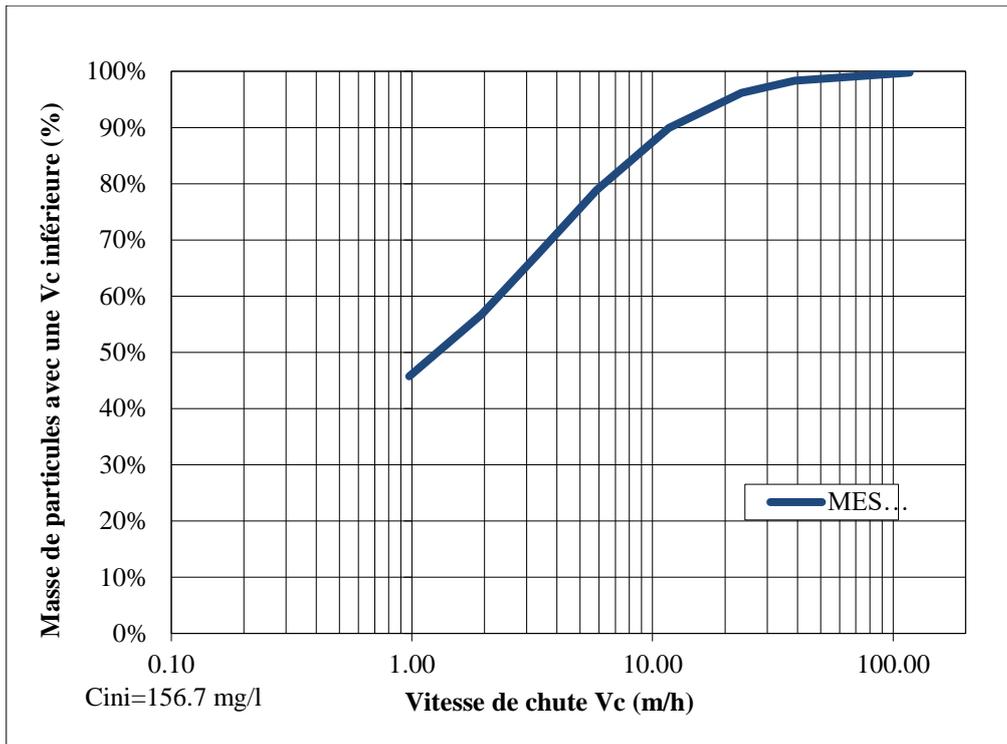


Figure B.37 : Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle  
St-Sacrement (06-09-17 18h-22h)

#### B.1.2.4. Temps de pluie

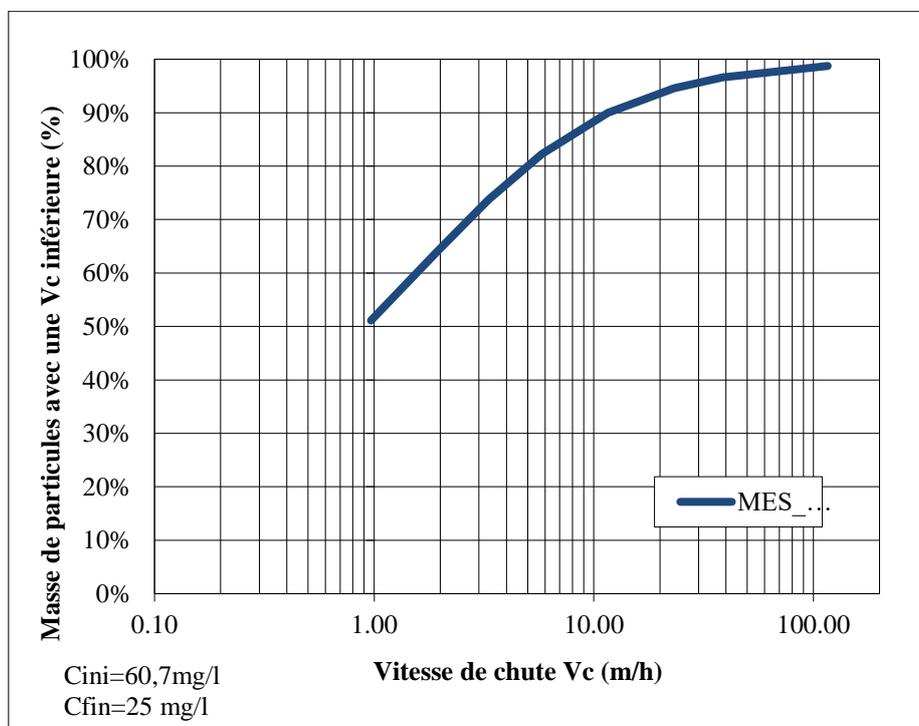
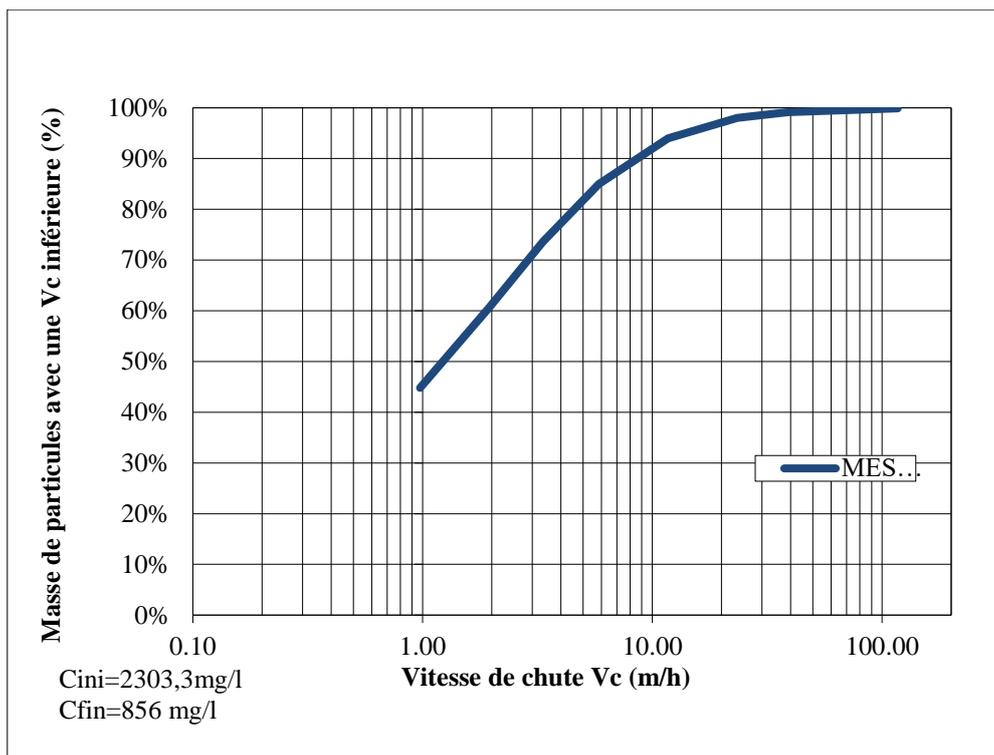
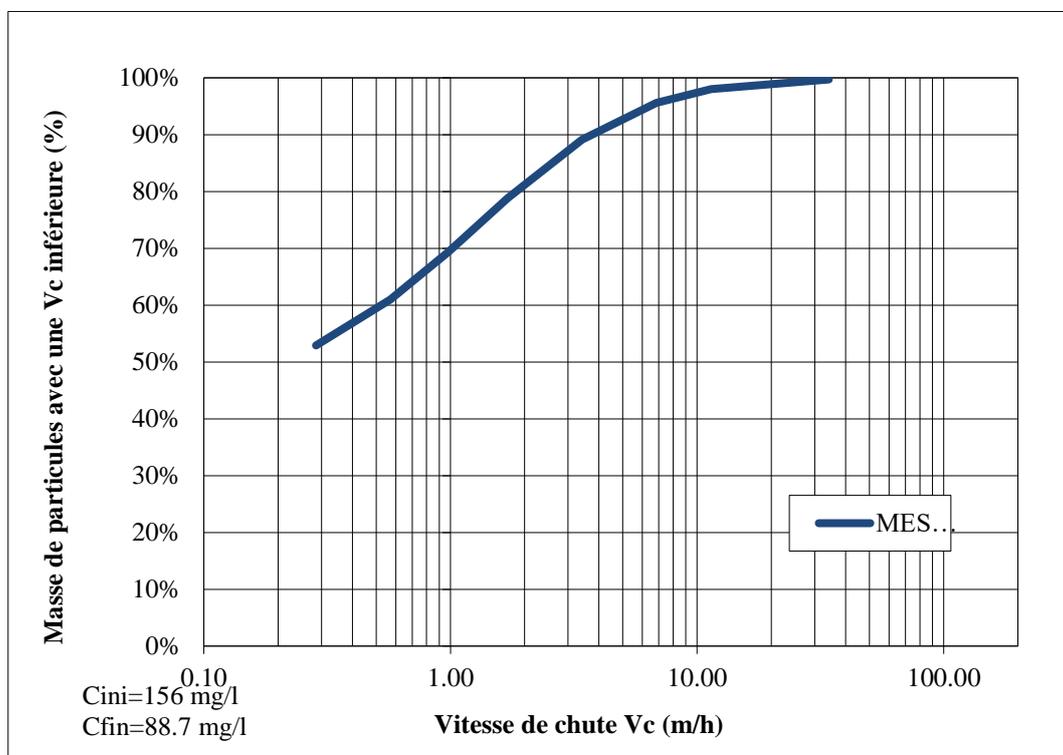


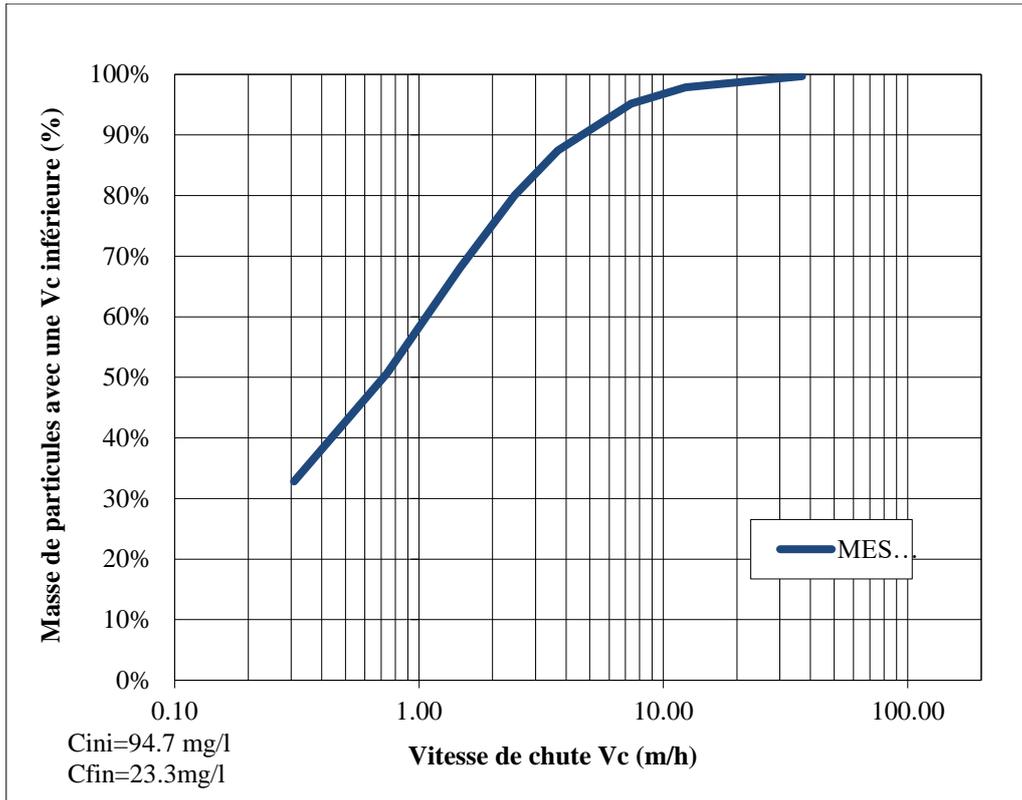
Figure B.38 : Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle  
St-Sacrement (16-06-17 11h (« Dilution »))



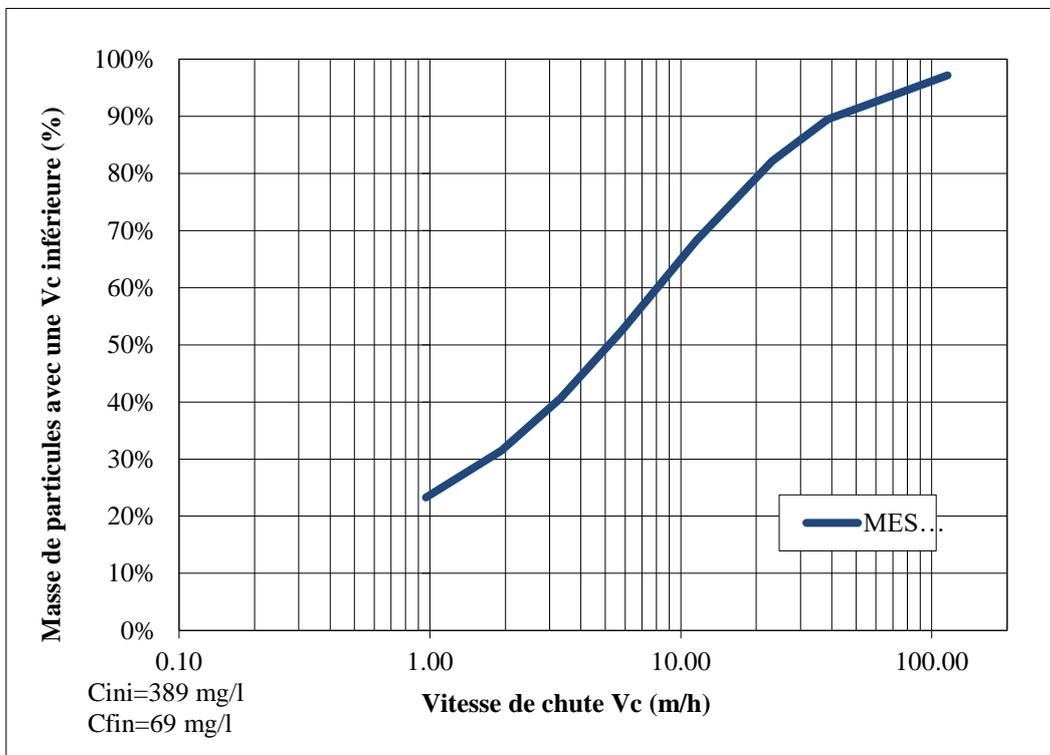
**Figure B.39 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (27-06-17 14h30 (« premier flot »))



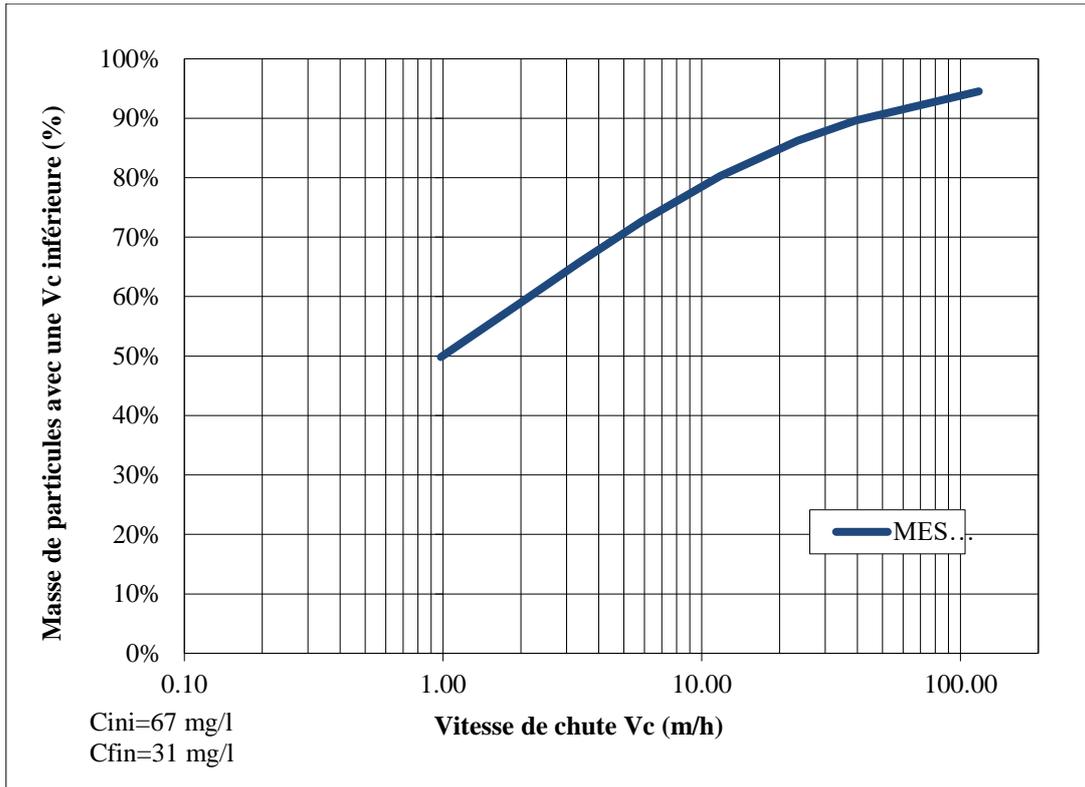
**Figure B.40 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (07-09-17 12h38 (« concentration la plus élevée de l'échantillon »))



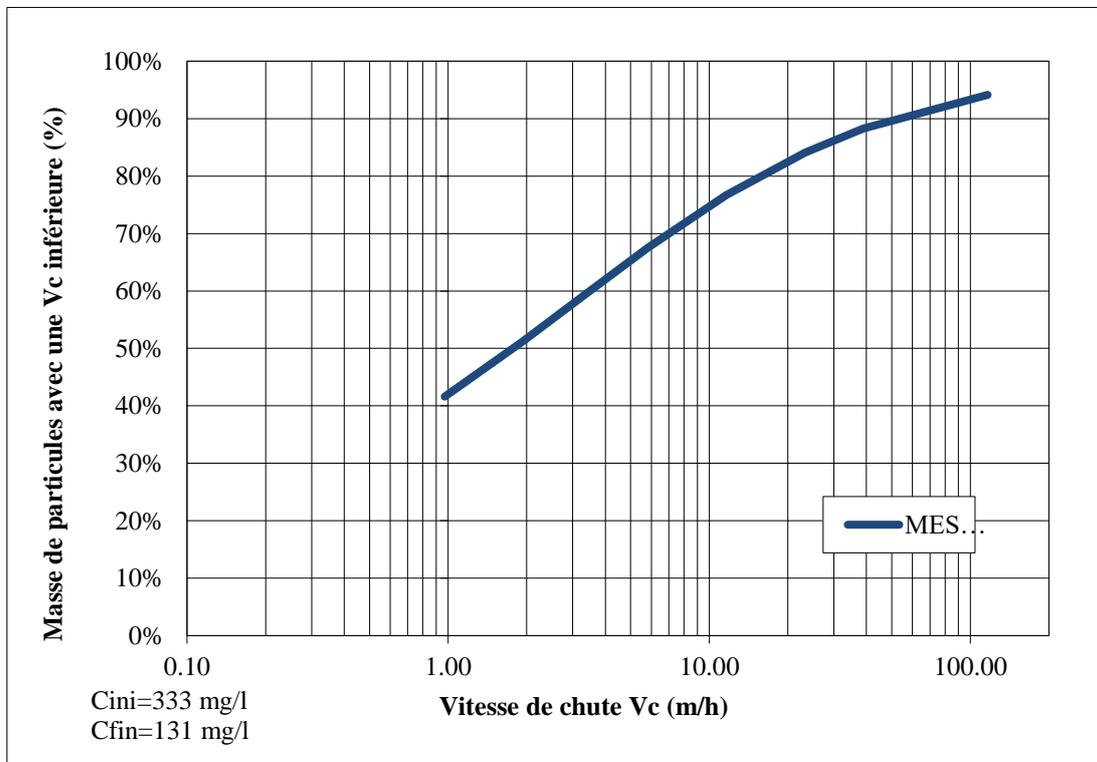
**Figure B.41 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (07-09-17 13h37 (« concentration la plus faible de l'échantillon »))



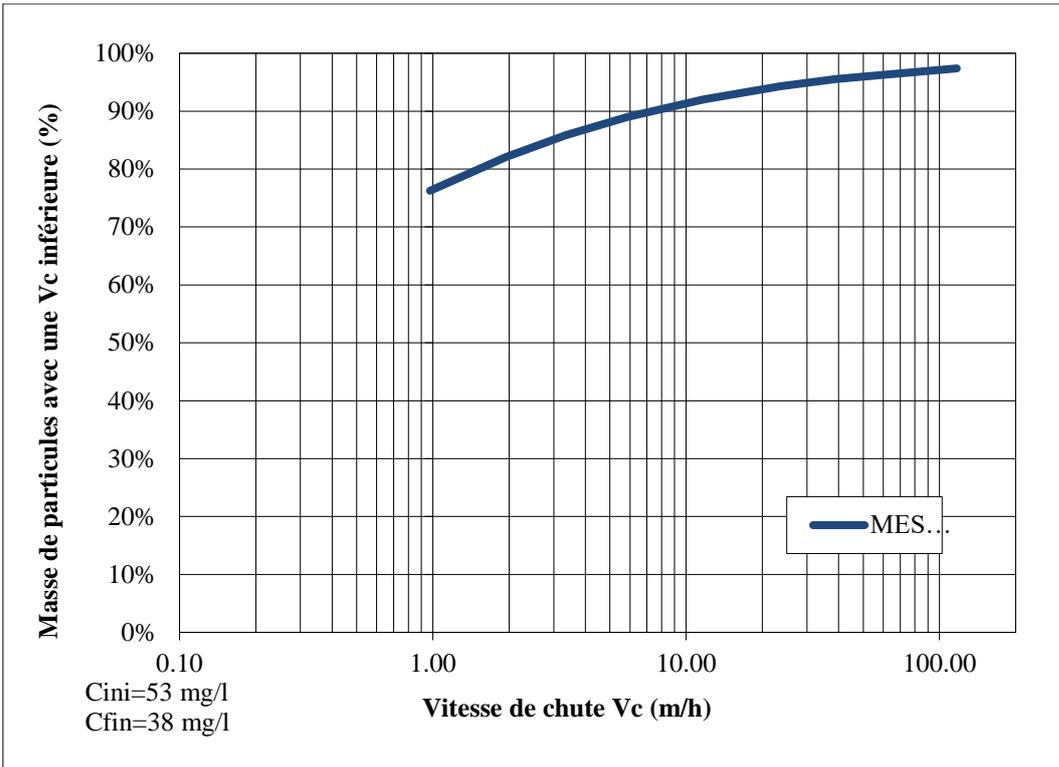
**Figure B.42 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (04-10-17 18h56 (« concentration la plus élevée de l'échantillon »))



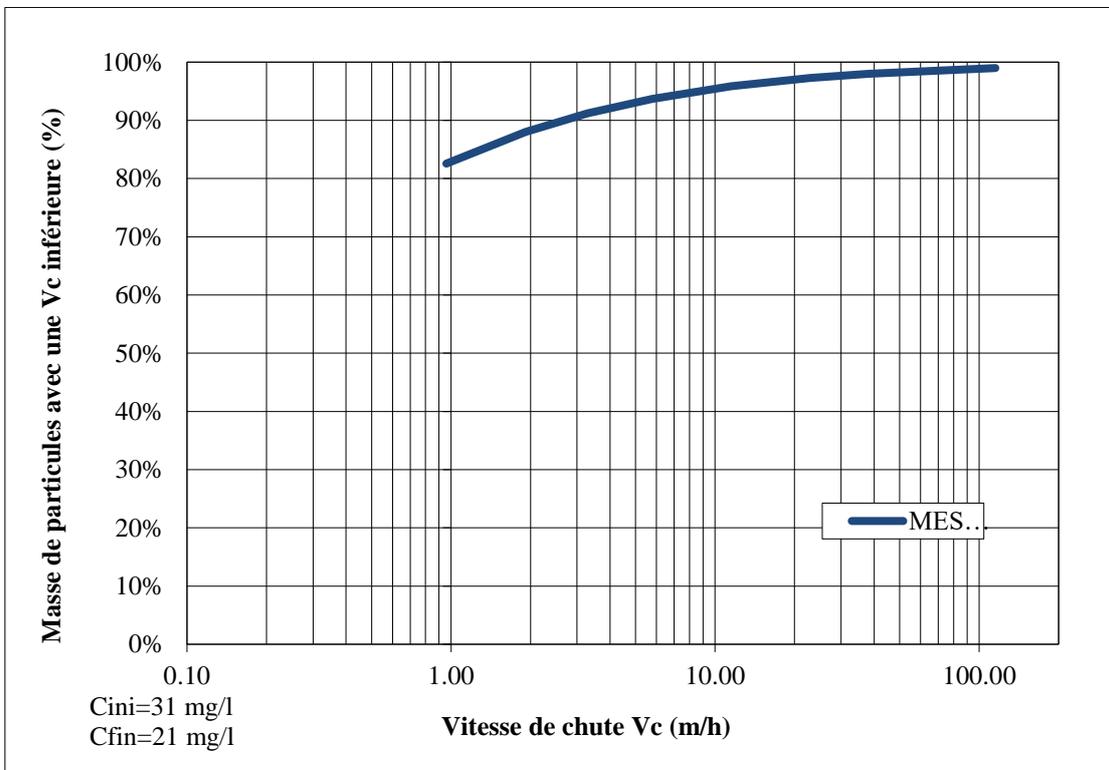
**Figure B.43 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (04-10-17 19h53 (« concentration la plus faible de l'échantillon »))



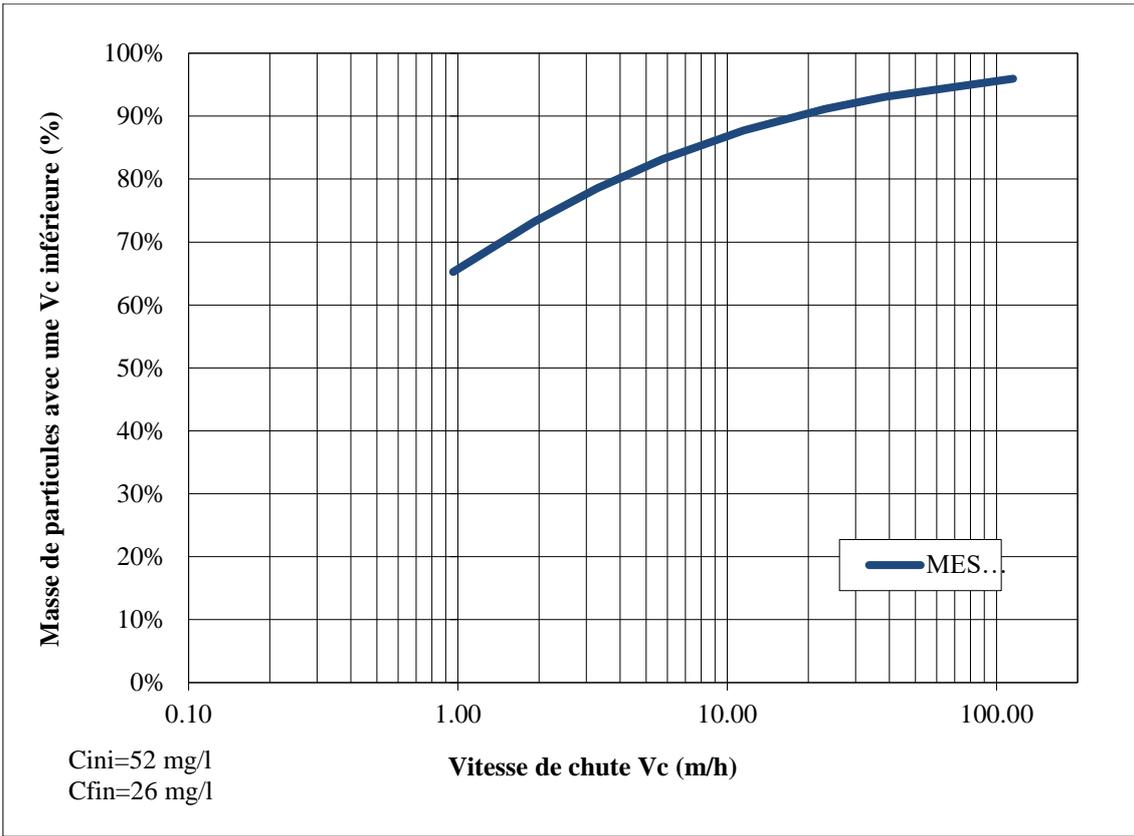
**Figure B.44 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (24-10-17 21h30 (« concentration la plus élevée de l'échantillon »))



**Figure B.45 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (24-10-17 22h27 (« concentration la plus faible de l'échantillon »))



**Figure B.46 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (02-11-17 10h)

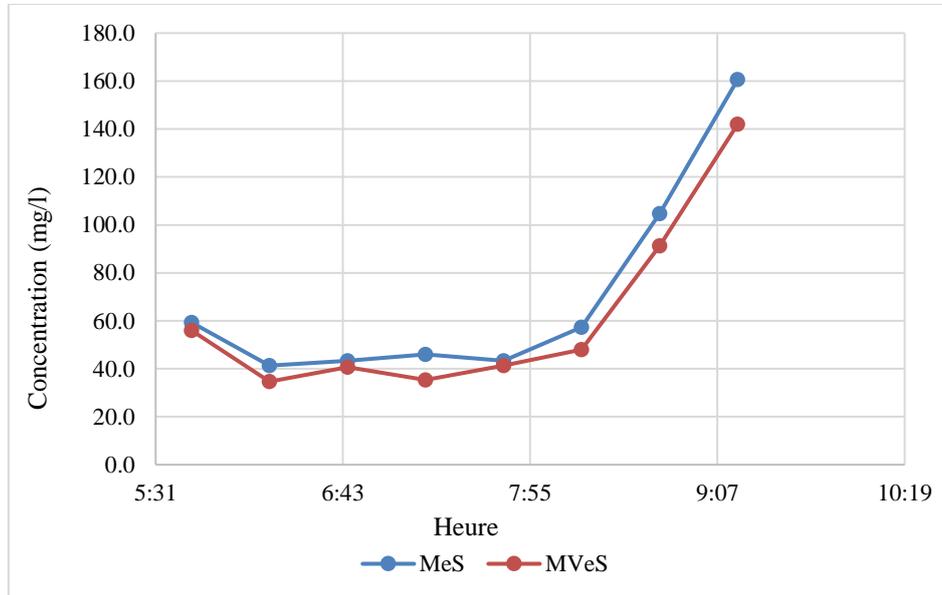


**Figure B.47 :** Distribution de la vitesse de chute des particules dans la chambre de contrôle St-Sacrement (05-11-17 17h55-18h55)

## B.2. Réseau sanitaire Duberger

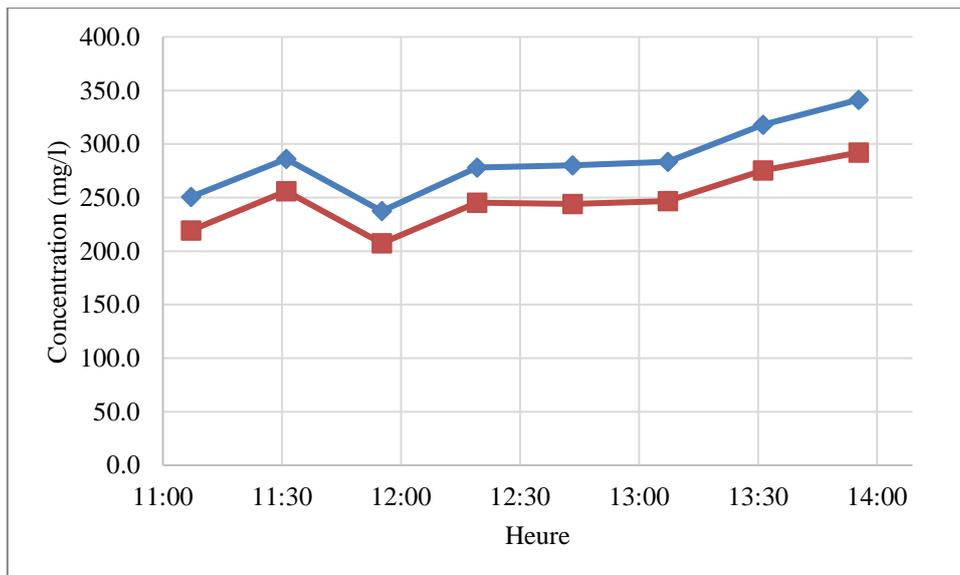
### B.2.1. MeS-MVeS

#### B.2.1.1. Temps sec (05h-09h)

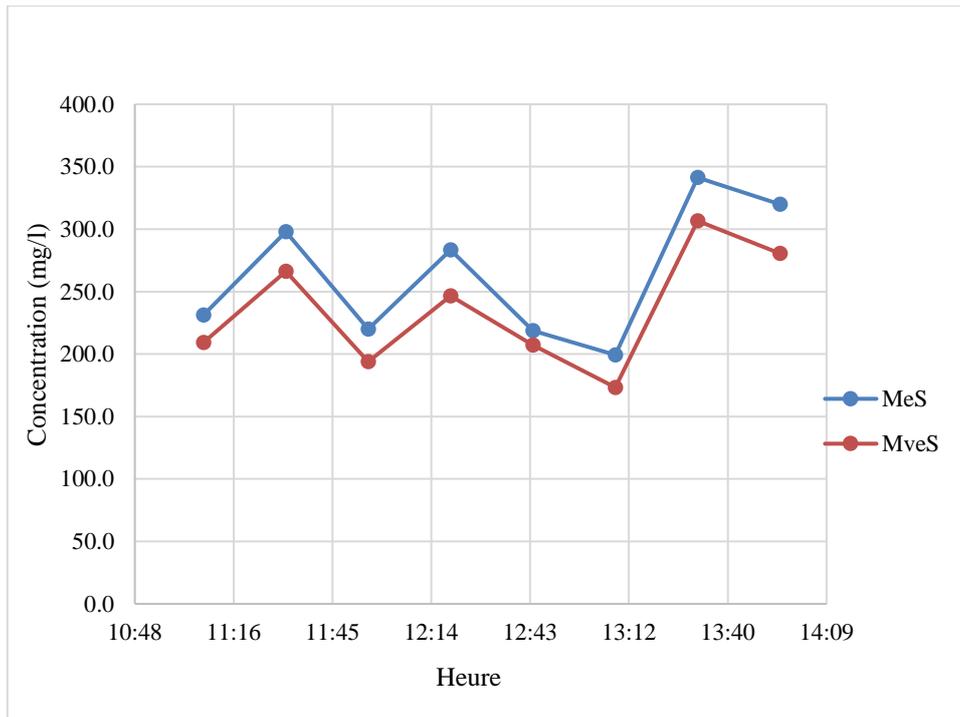


*Figure B.47 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (09-11-17 05h30-09h30)*

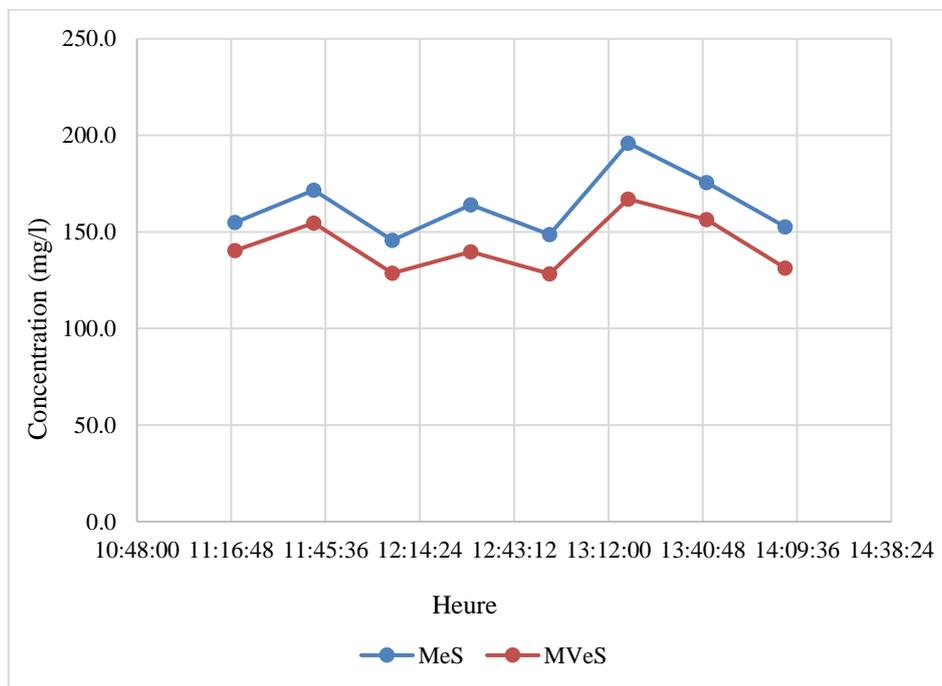
#### B.2.1.2. Temps sec (11h-14h)



*Figure B.48 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (24/09/17 11h-14h)*

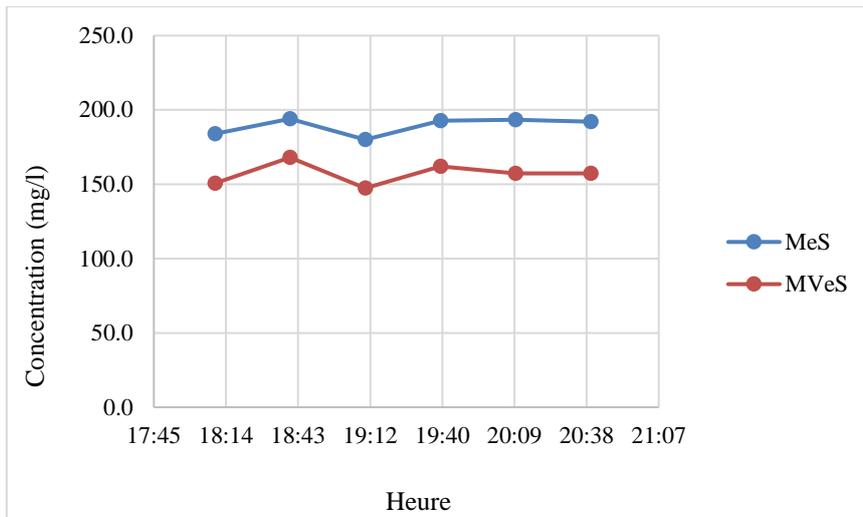


**Figure B.49 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (01/10/17 11h-14h)

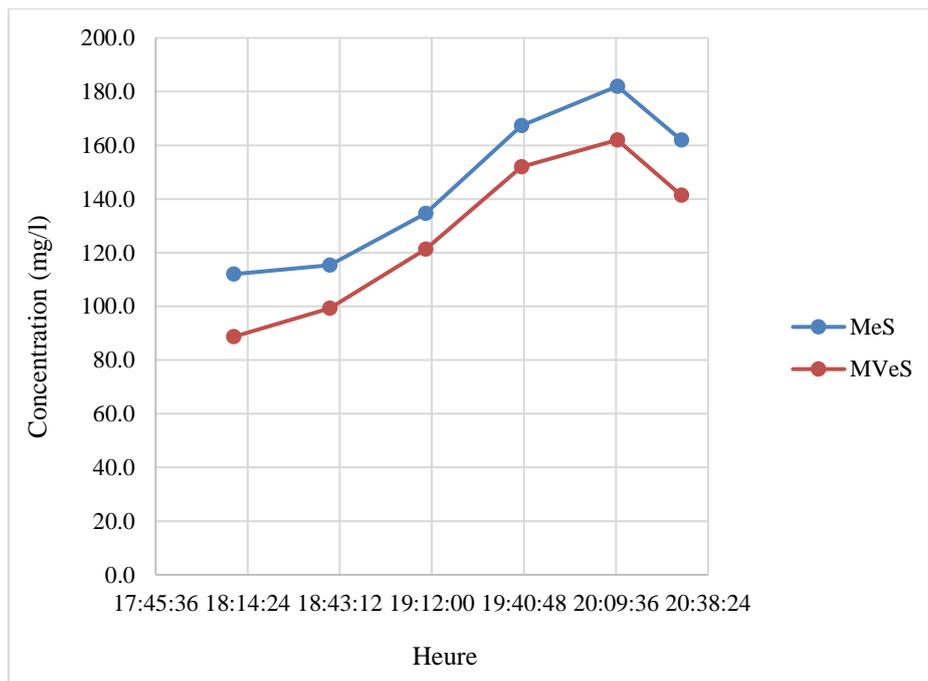


**Figure B.50 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (17/10/17 11h-14h)

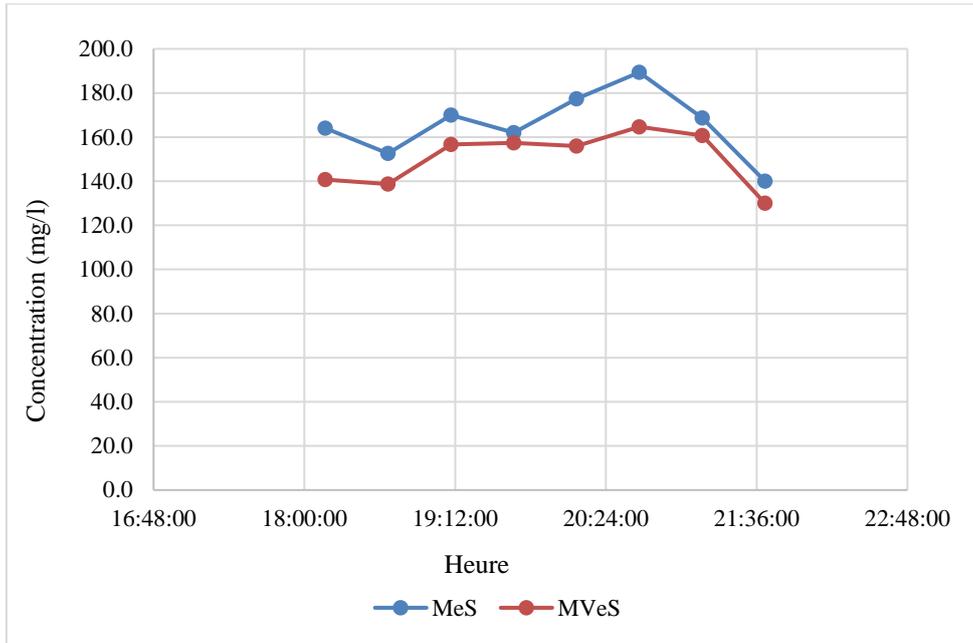
### B.2.1.3. Temps sec (18h-22h)



**Figure B.51** : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (24/09/17 18h-22h)

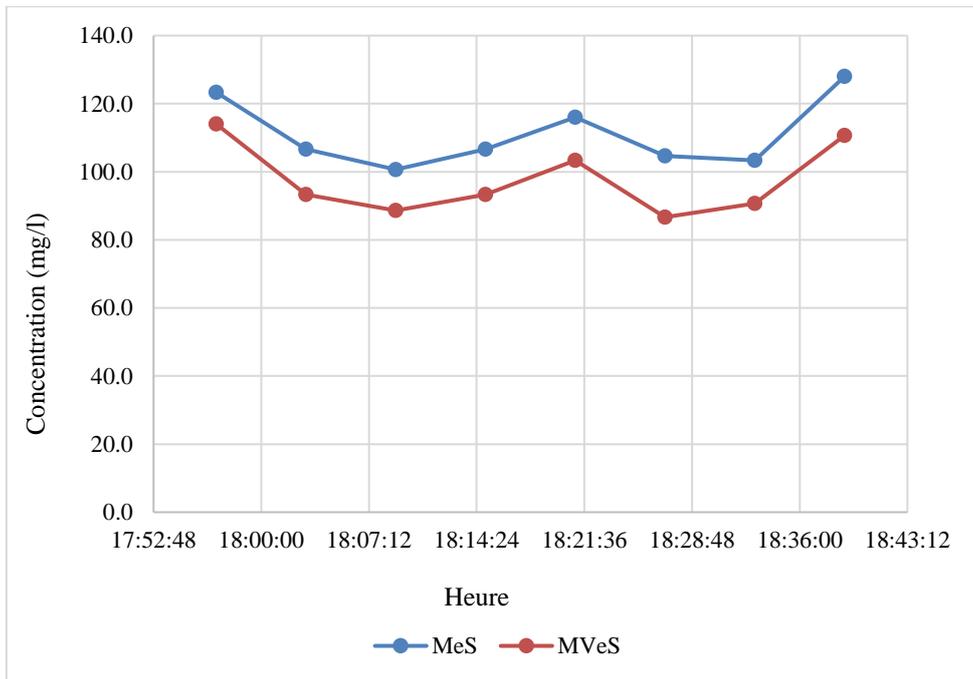


**Figure B.52** : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (17/10/17 18h-22h)



*Figure B.53 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (15/11/17 18h-22h)*

**B.2.1.4. Temps de pluie**



*Figure B.54 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps de pluie au niveau du réseau sanitaire Duberger (05/11/17 17h55-18h41)*

## B.2.2. ViCAs

### B.2.2.1. Temps sec (05h-09h)

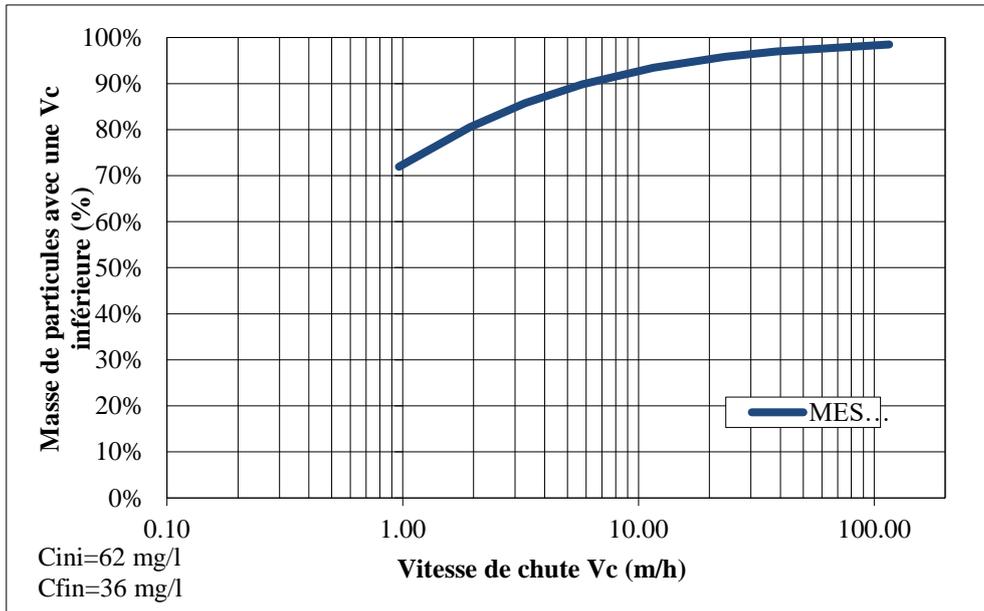


Figure B.55 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (09-11-17 05h30-09h30)

### B.2.2.2. Temps sec (11h-14h)

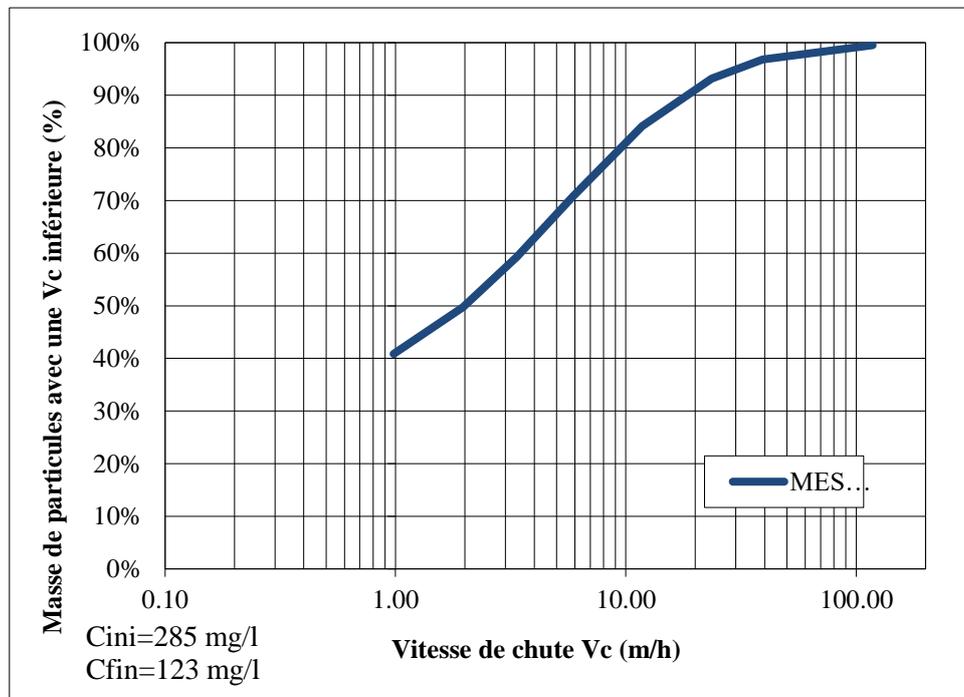
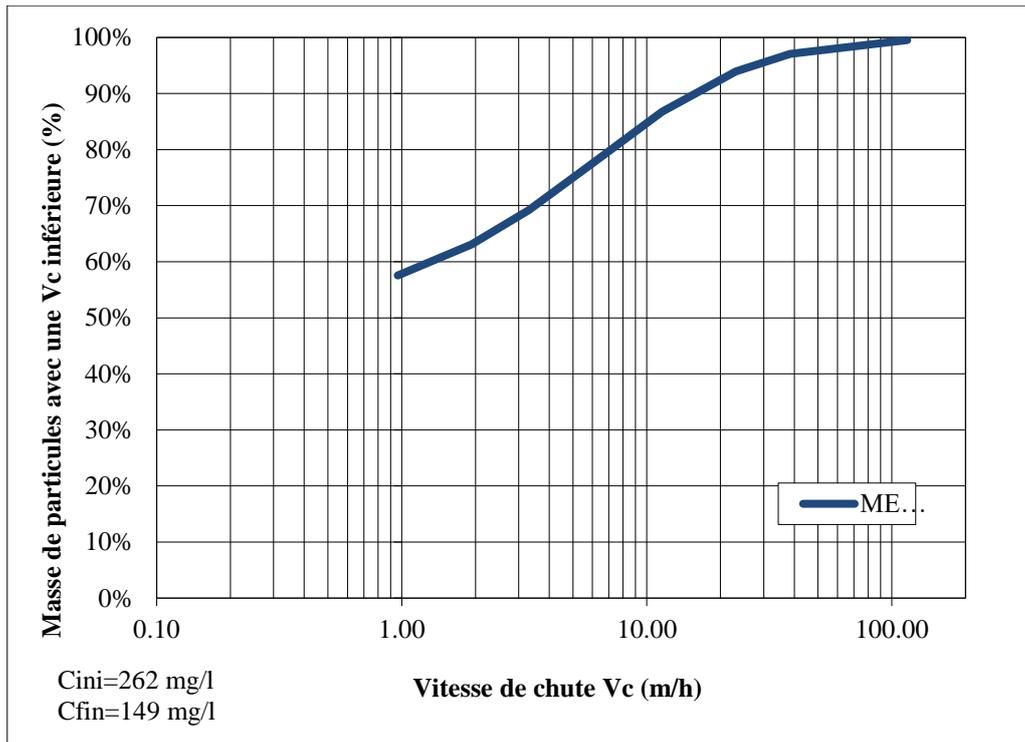
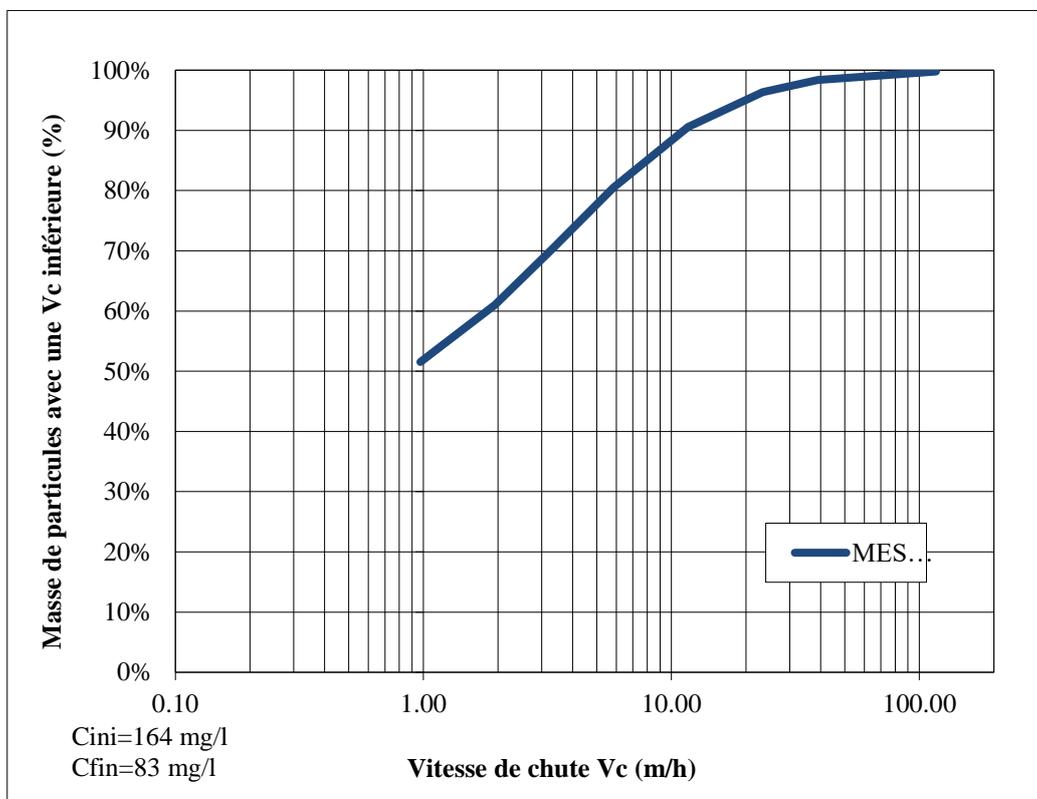


Figure B.56 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (24-09-17 11h-14h)



**Figure B.57 :** Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (01-10-17 11h-14h)



**Figure B.58 :** Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (17-10-17 11h-14h)

### B.2.2.3. Temps sec (18h-22h)

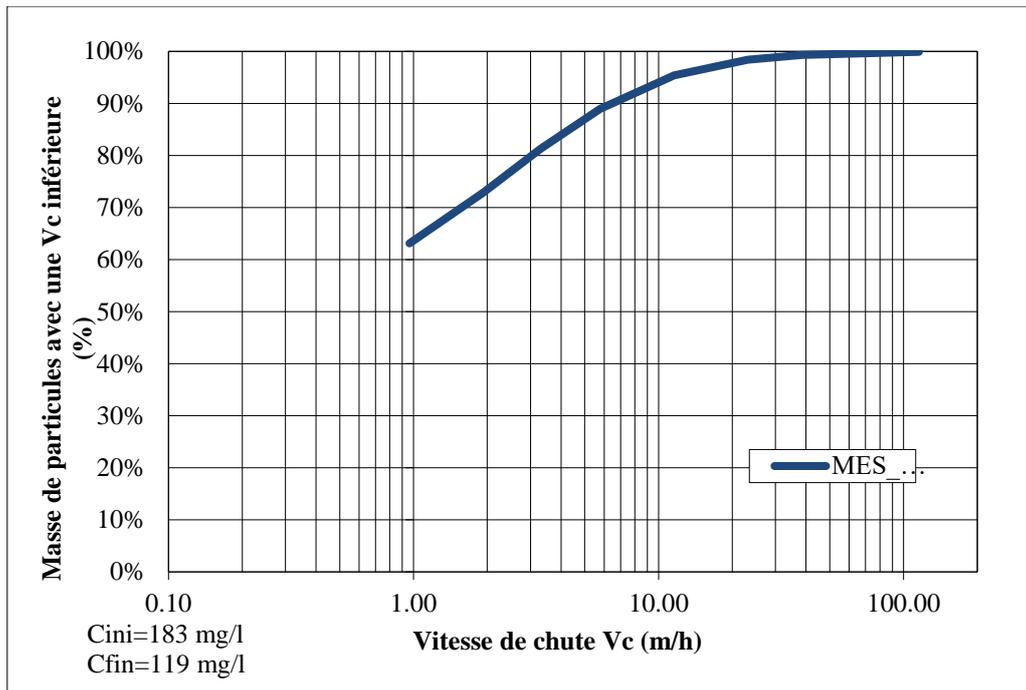


Figure B.59 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (24-09-17 18h-22h)

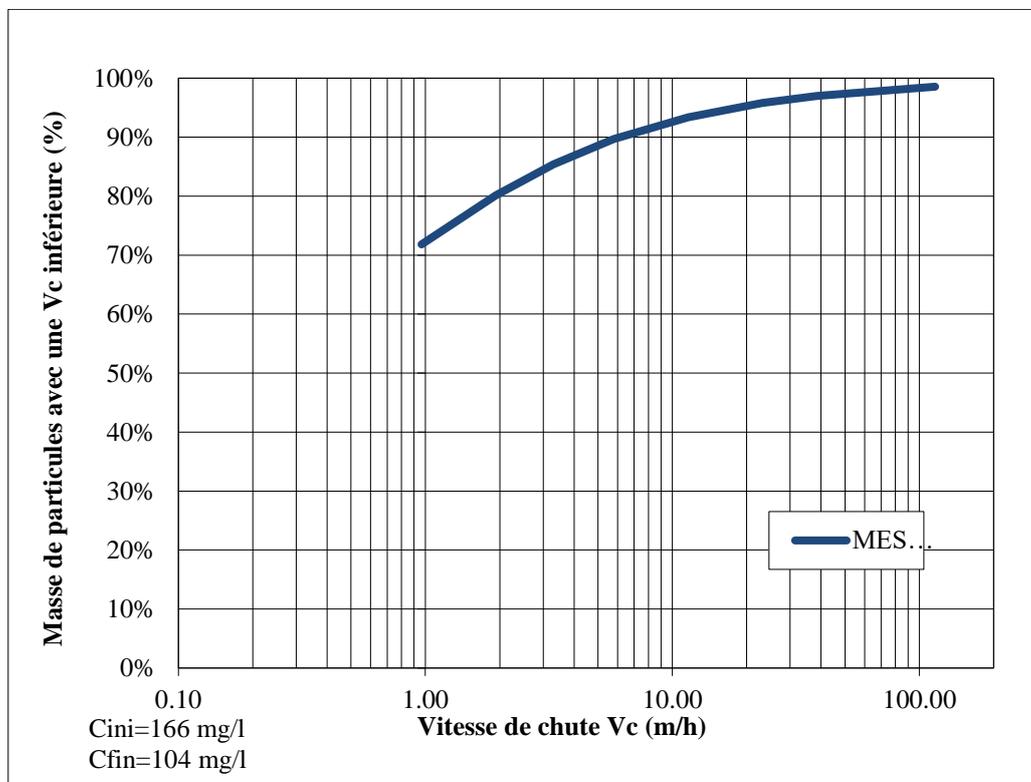


Figure B.60 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (15-11-17 18h-22h)

#### B.2.2.4. Temps de pluie

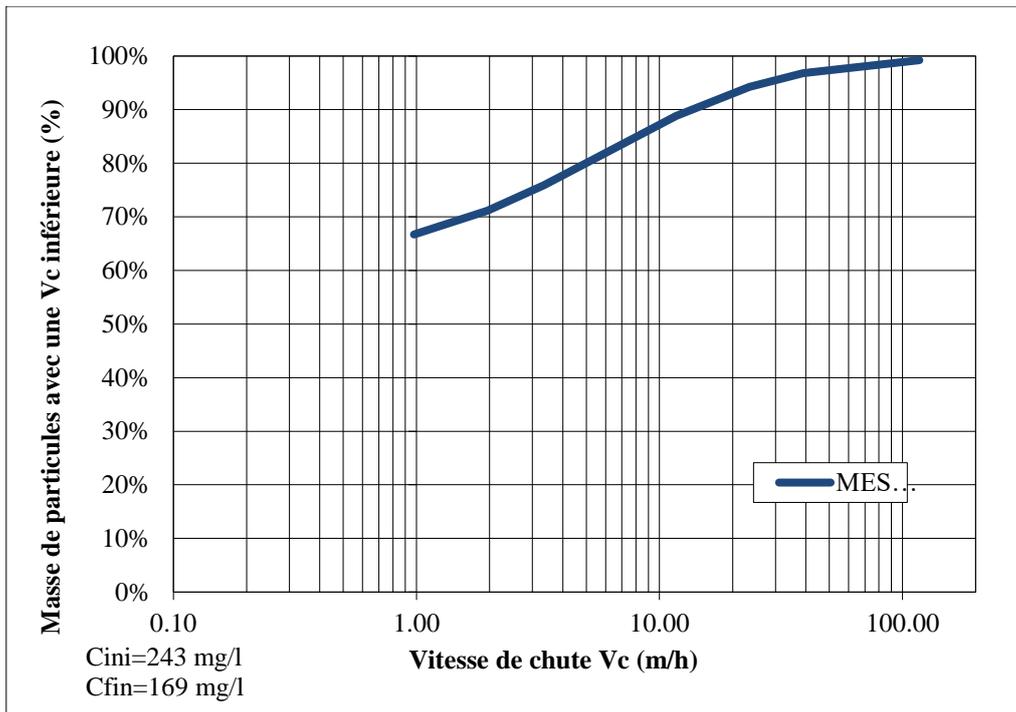


Figure B.61 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps de pluie au niveau du réseau sanitaire Duberger (04-10-17 18h56-18h25)

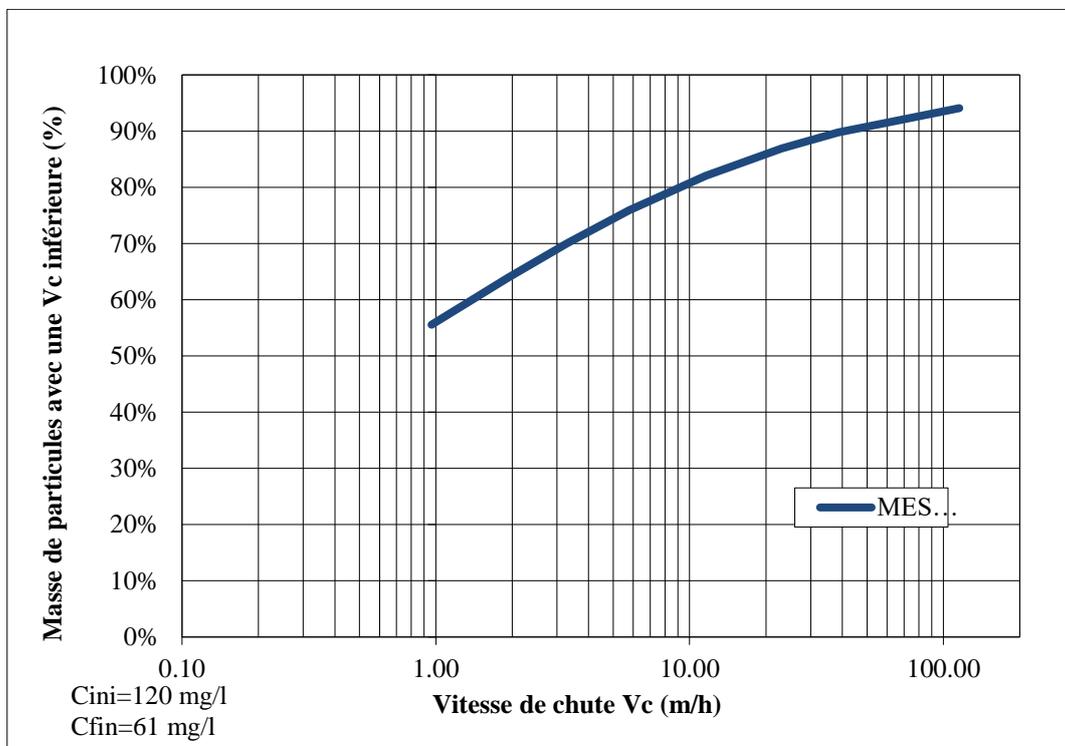
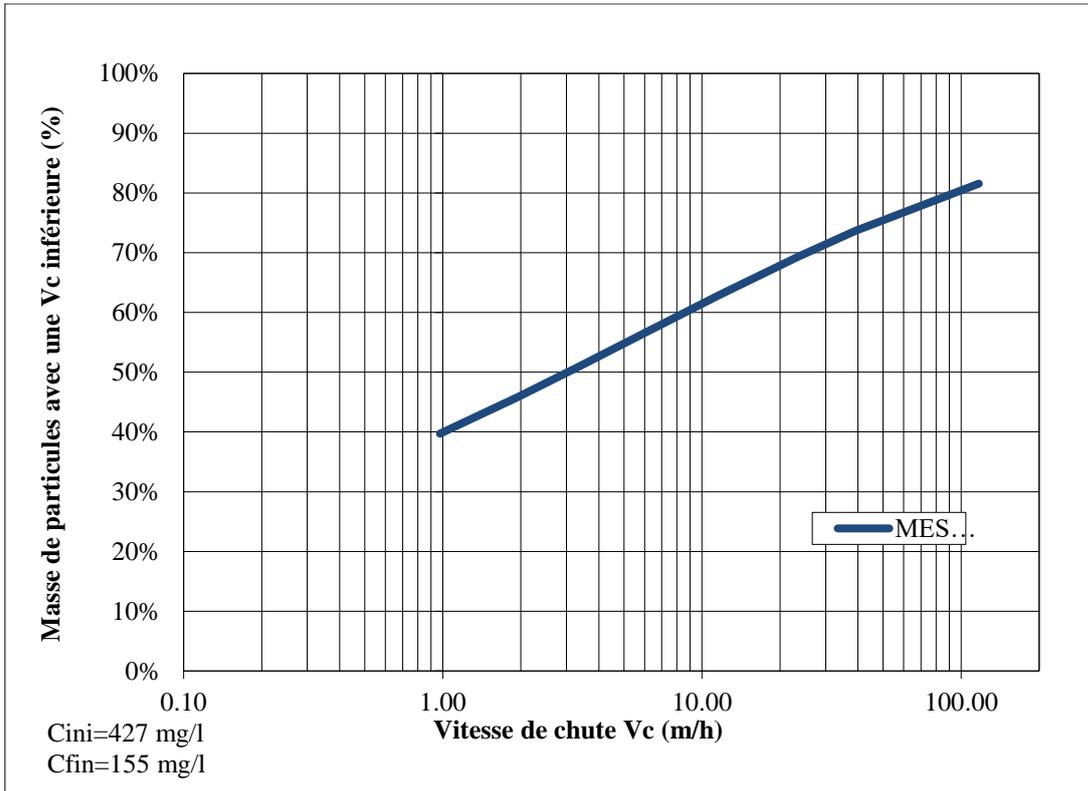
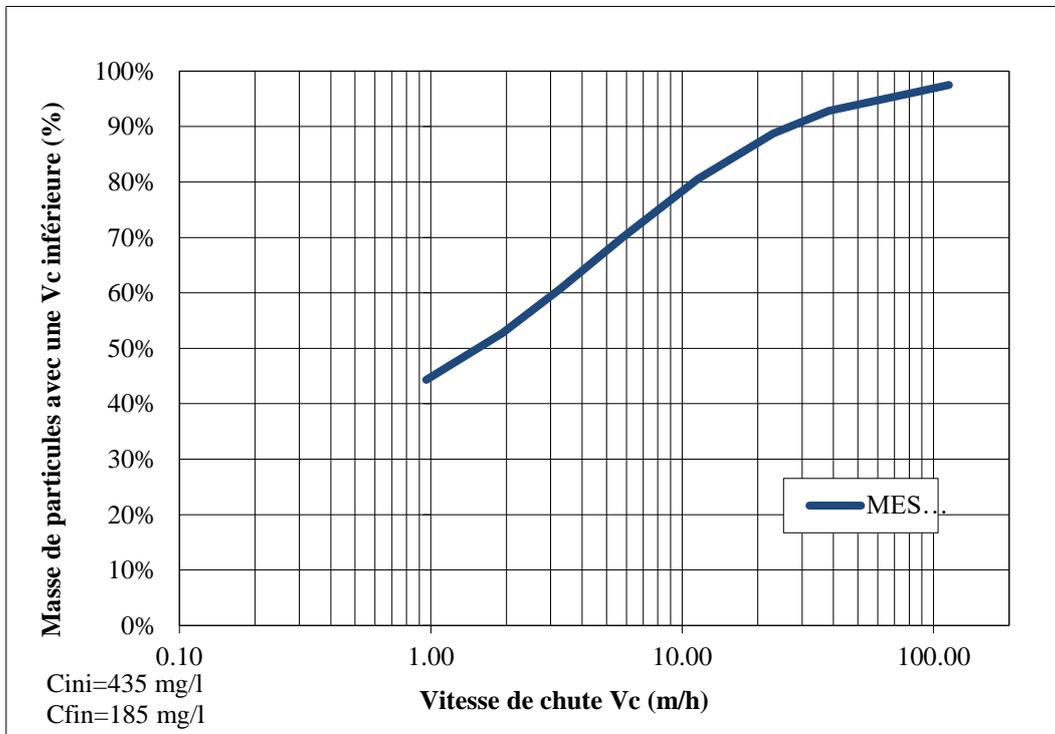


Figure B.62 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps de pluie au niveau du réseau sanitaire Duberger (15-10-17 09h15 (« Concentration la plus élevée de l'échantillon »))



**Figure B.63 :** Distribution de la vitesse de chute des particules en temps de pluie au niveau du réseau sanitaire Duberger (15-10-17 09h48 (« Concentration la plus faible de l'échantillon »))



**Figure B.64 :** Distribution de la vitesse de chute des particules en temps de pluie au niveau du réseau sanitaire Duberger (24-09-17 21h30 (« Concentration la plus élevée de l'échantillon »))

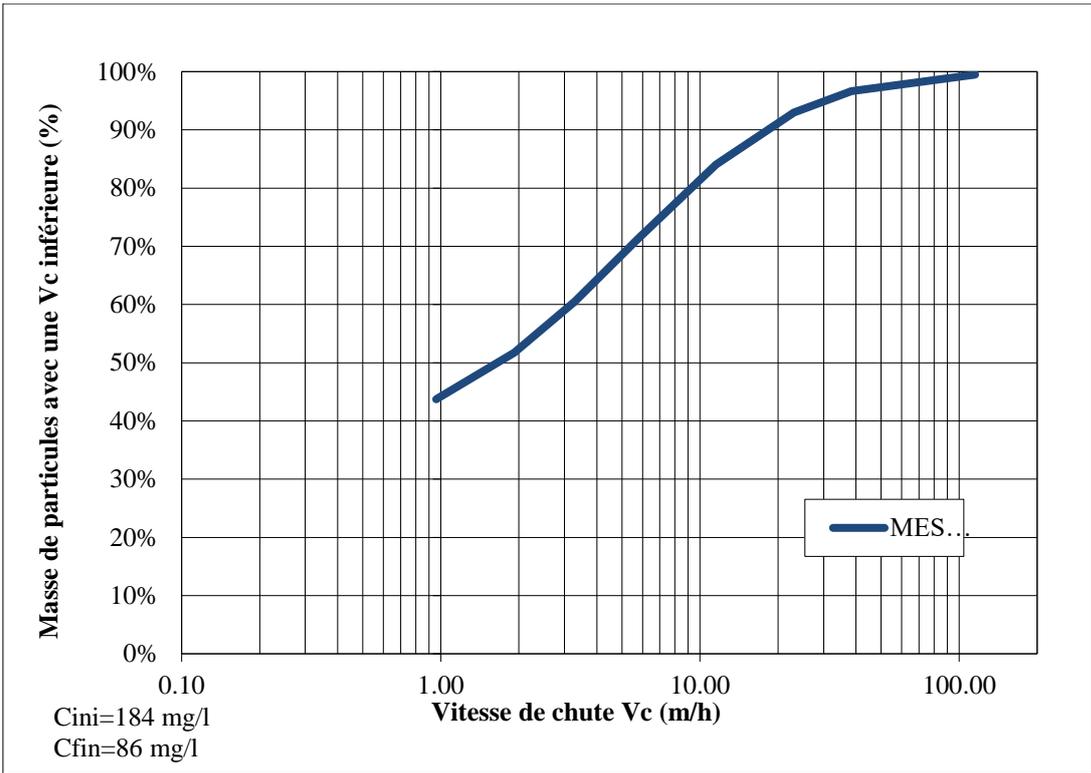


Figure B.65 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps de pluie au niveau du réseau sanitaire Duberger (02-11-17 10h)

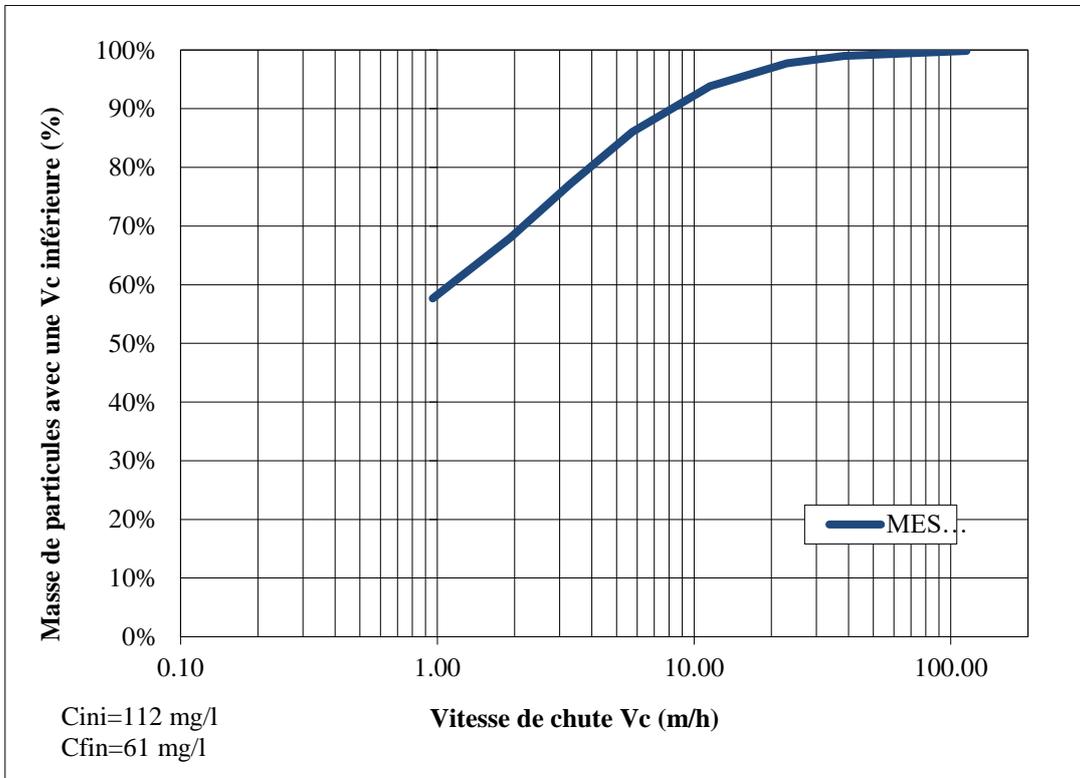
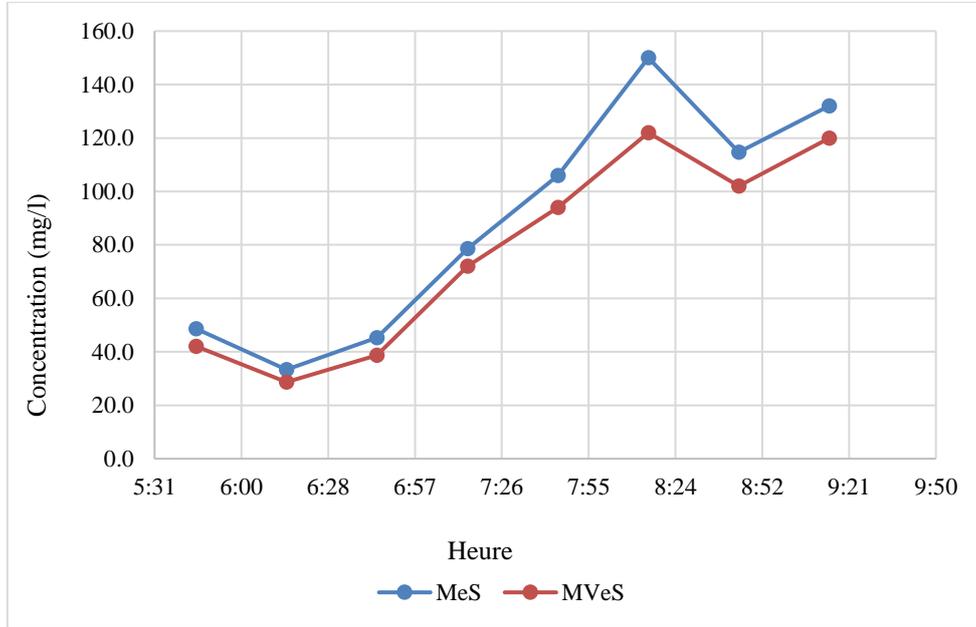


Figure B.66 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps de pluie au niveau du réseau sanitaire Duberger (05-11-17 17h55-18h25)

### B.3. Chambre de contrôle Sacré-Cœur

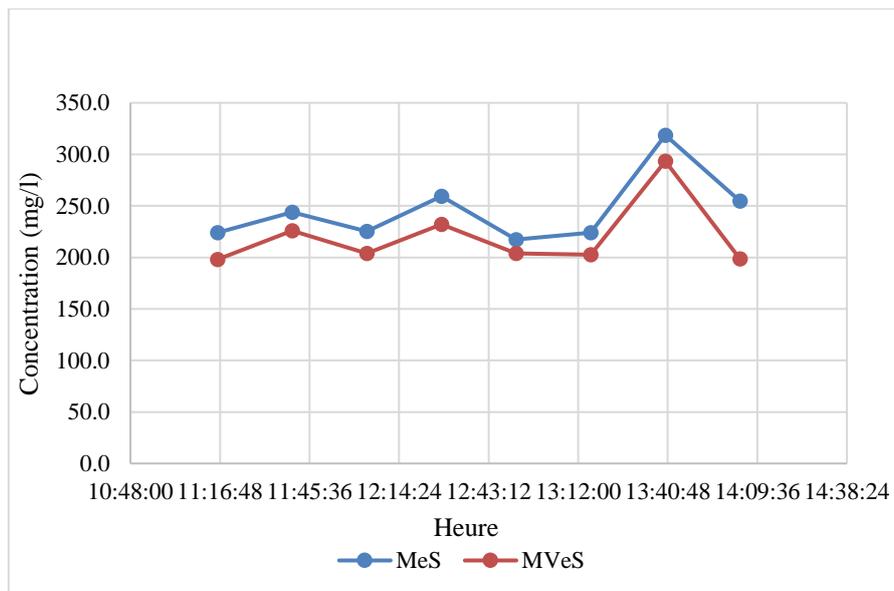
#### B.3.1. MeS-MVeS

##### B.3.1.1. Temps sec (05h-09h)

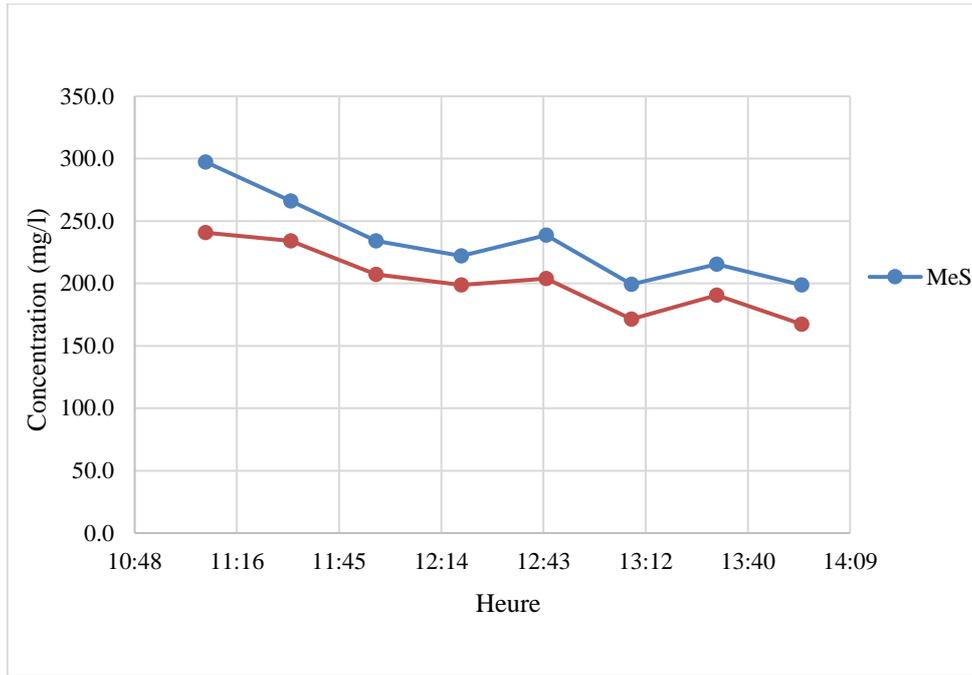


*Figure B.67 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (05/11/17 05h-09h)*

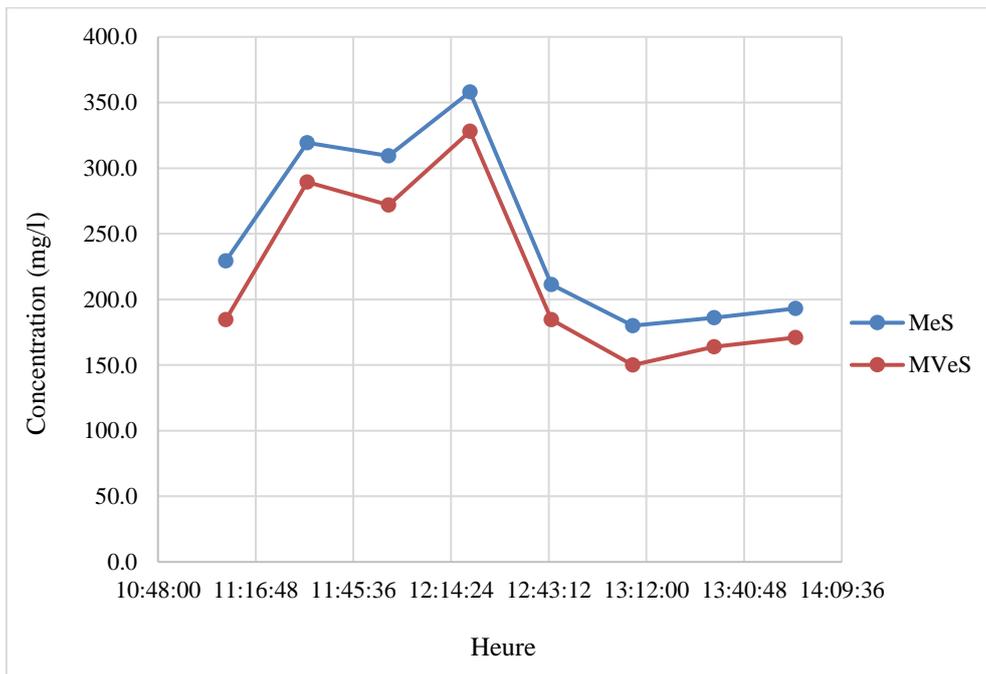
##### B.3.1.2. Temps sec (11h-14h)



*Figure B.68 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (24/10/17 11h-14h)*



**Figure B.69** : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (01/10/17 11h-14h)



**Figure B.70** : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (17/10/17 11h-14h)

### B.3.1.3. Temps sec (18h-22h)

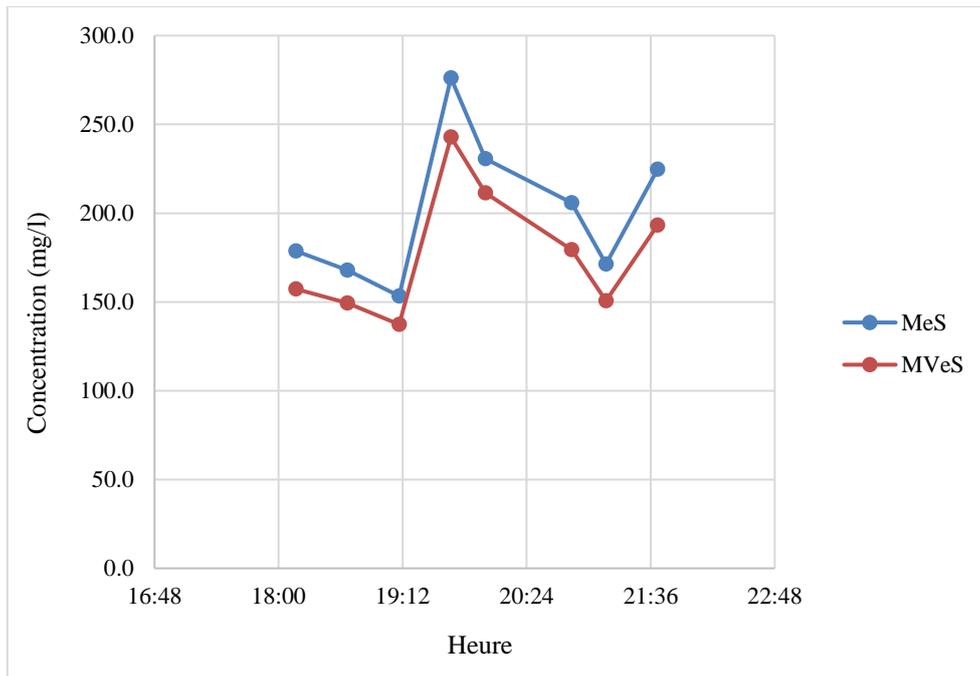


Figure B.71 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (24/09/17 18h-22h)

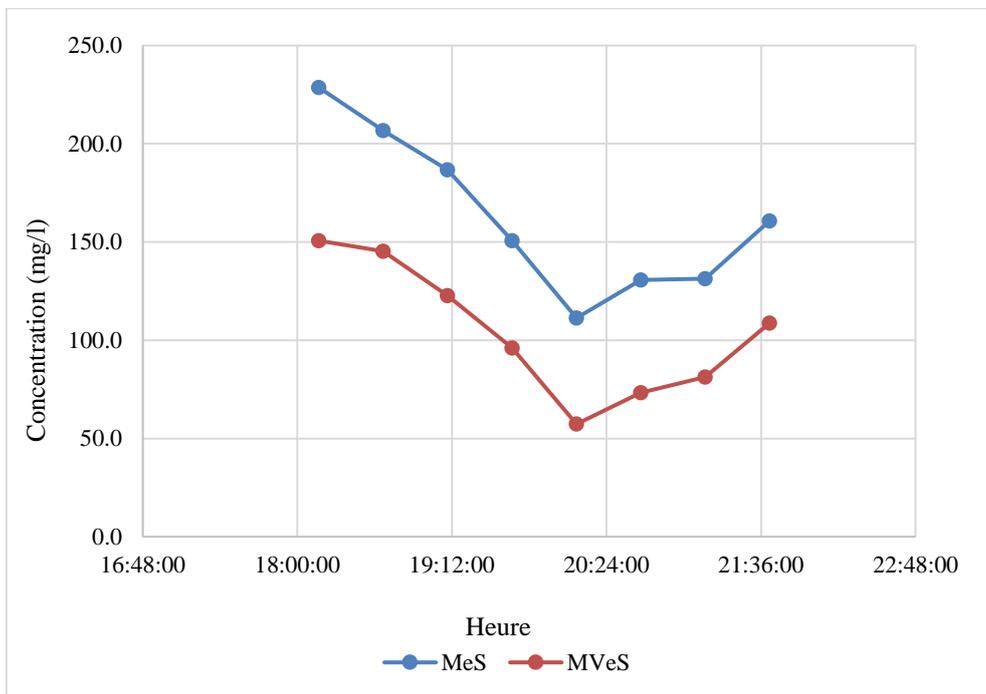
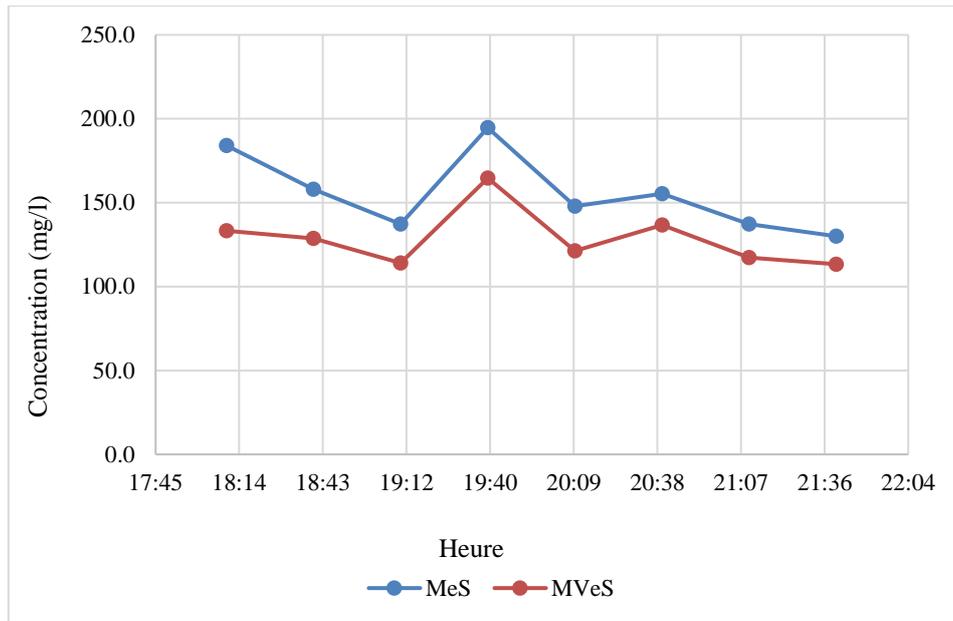
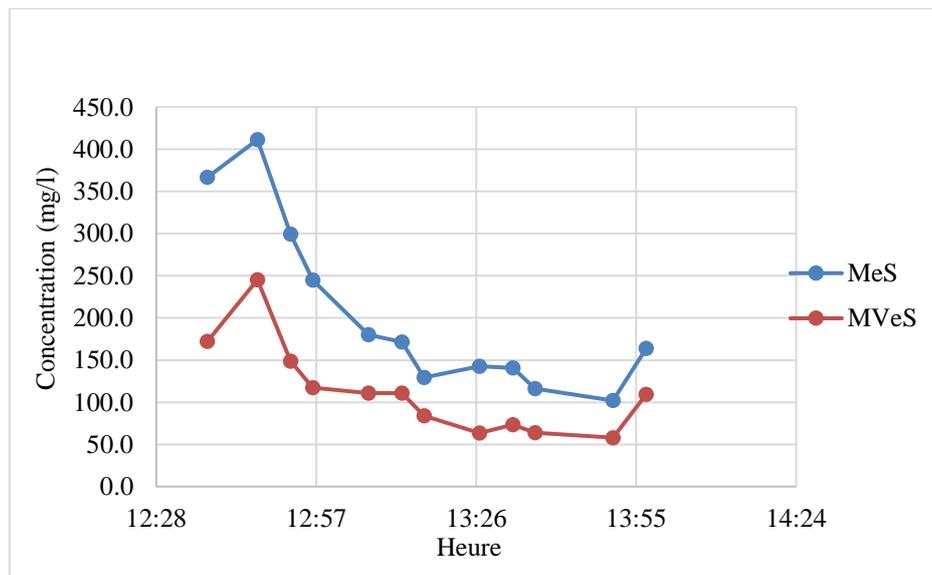


Figure B.72 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (17/10/17 18h-22h)

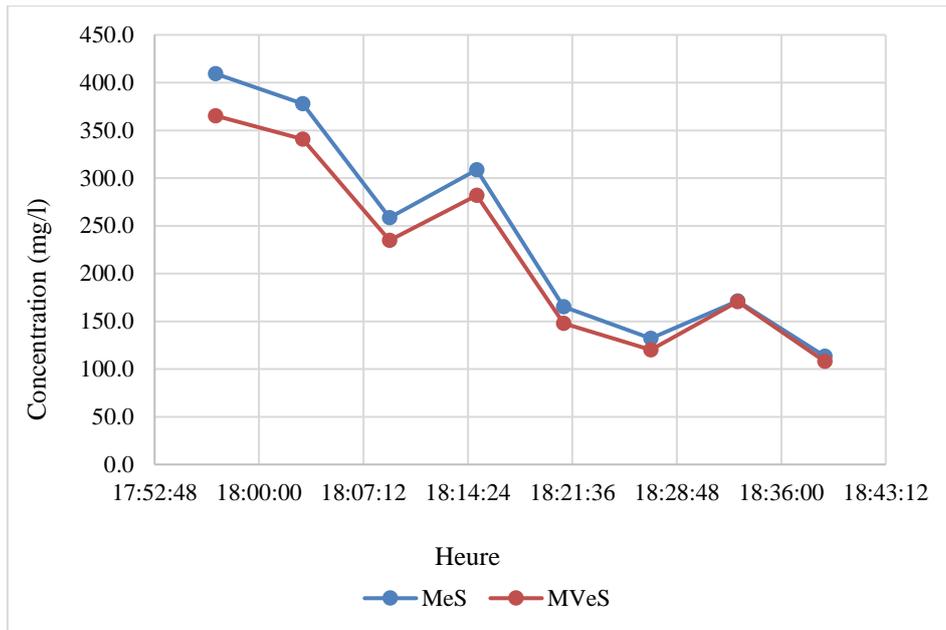


**Figure B.73 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (15/11/17 18h-22h)

#### B.3.1.4. Temps de pluie



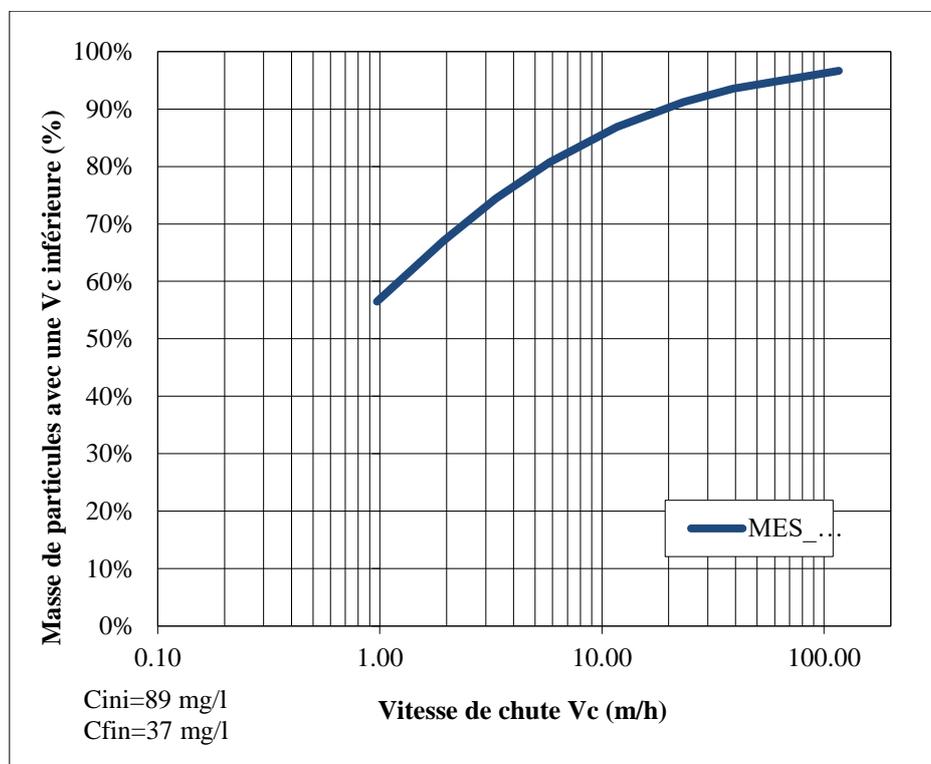
**Figure B.74 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps de pluie à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (07/09/17 12h38-13h57)



**Figure B.75 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps de pluie à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (05/11/17 17h55-18h41)

### B.3.2. ViCAs

#### B.3.2.1. Temps sec (05h-09h)



**Figure B.76 :** Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (09/11/17 05h-09h)

### B.3.2.2. Temps sec (11h-14h)

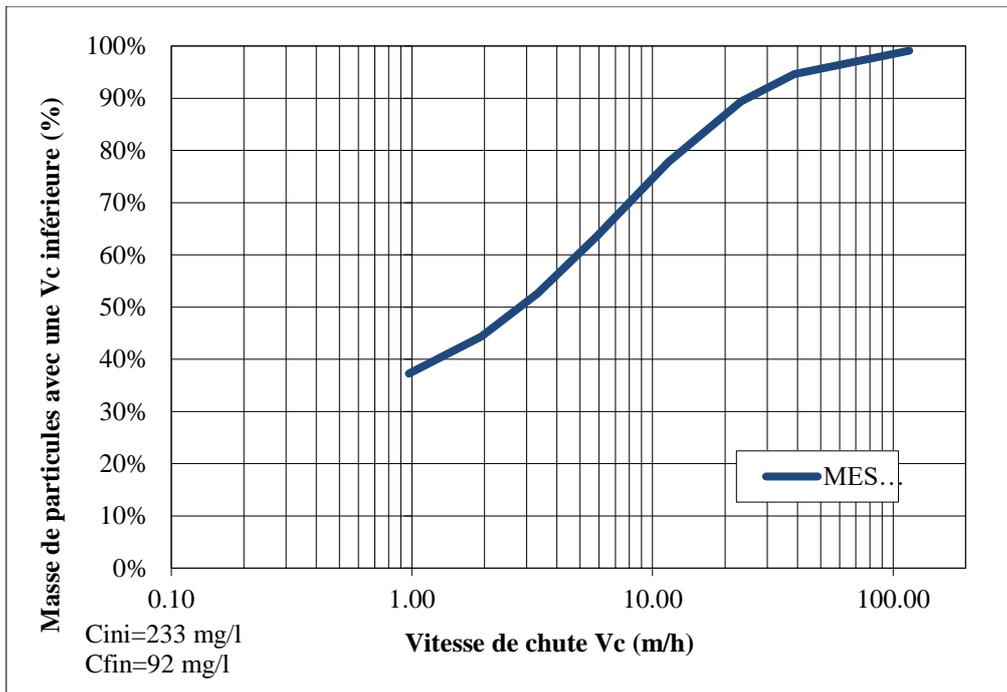


Figure B.77 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (24/09/17 11h-14h)

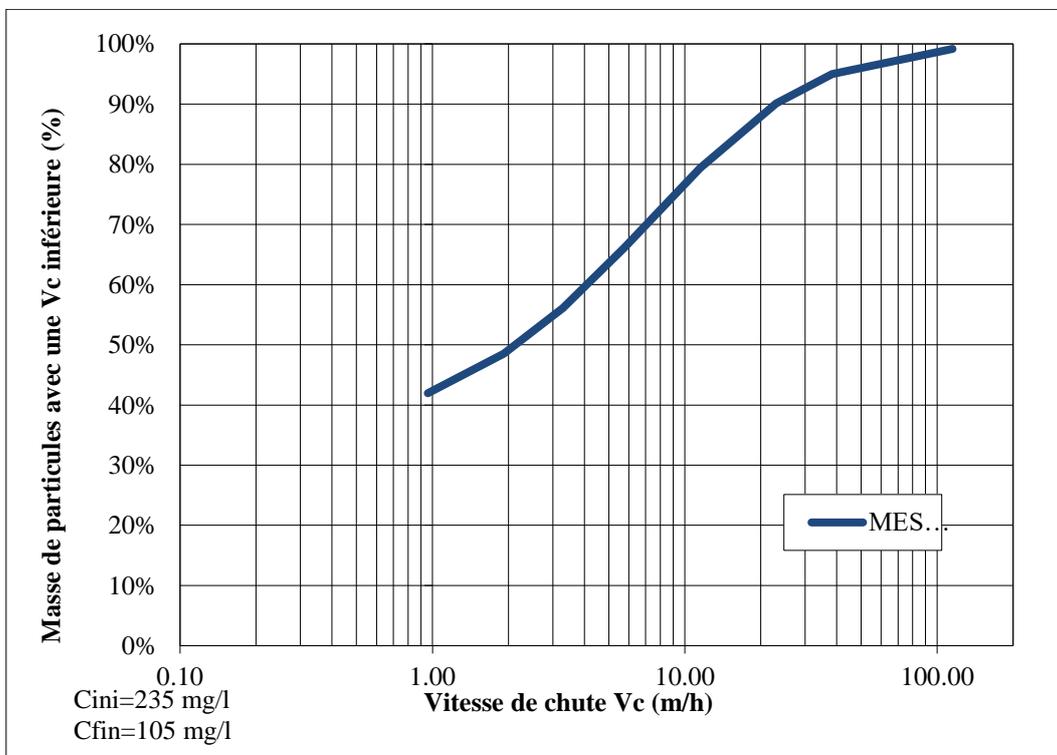
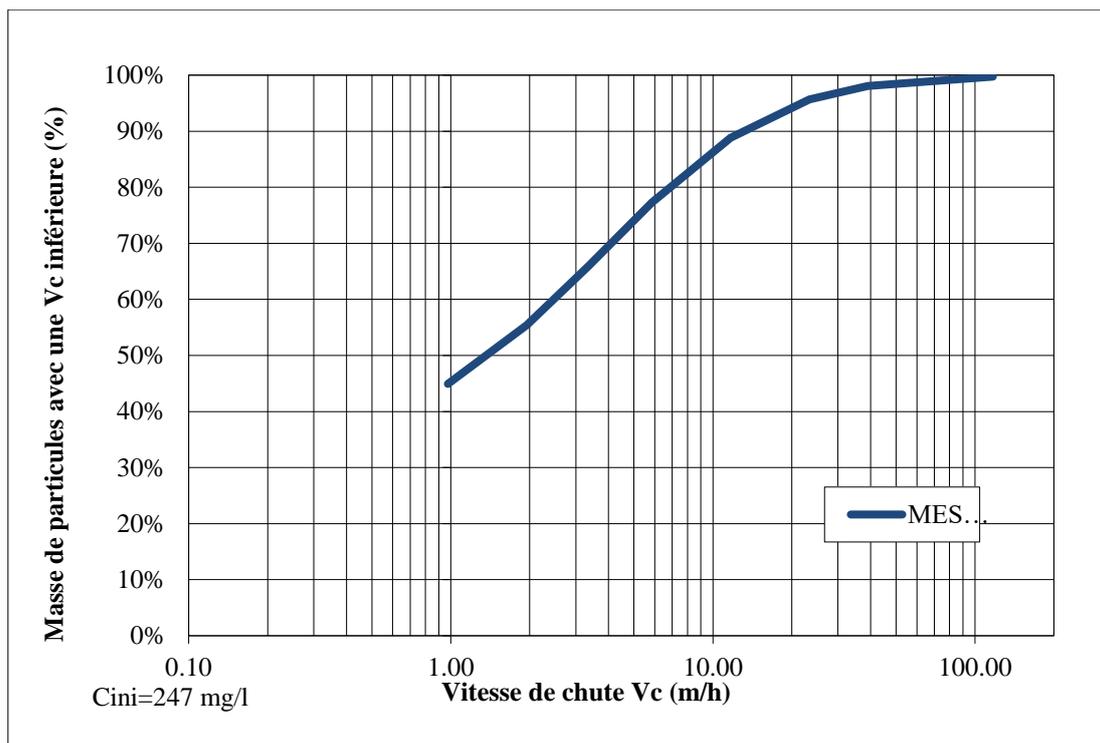
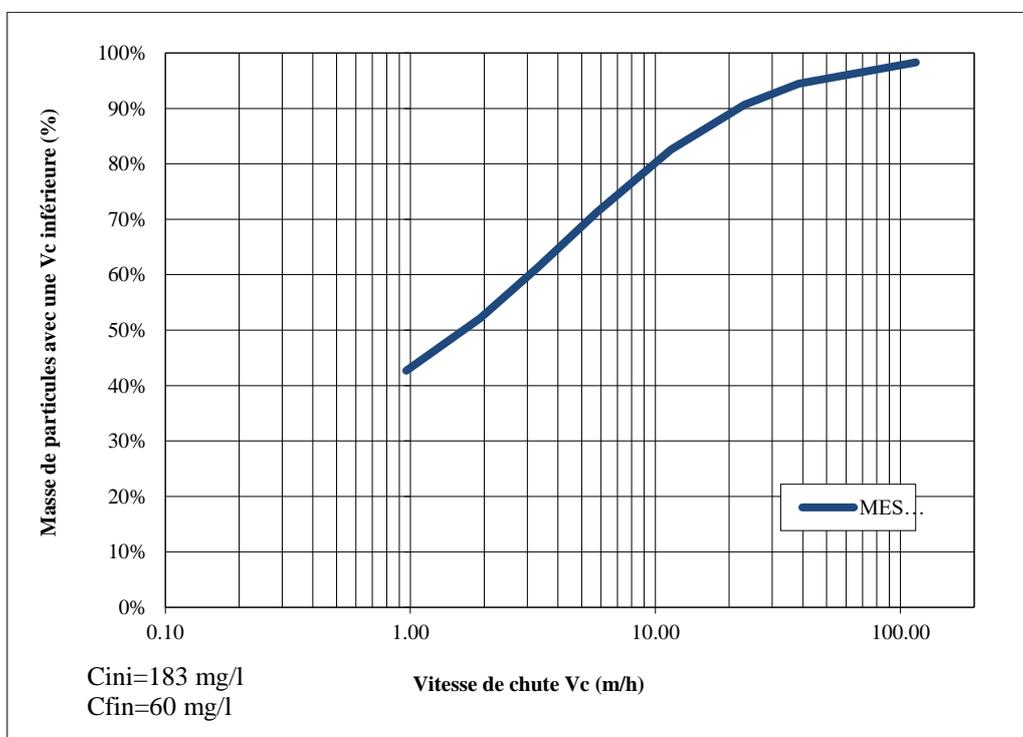


Figure B.78 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (01/10/17 11h-14h)

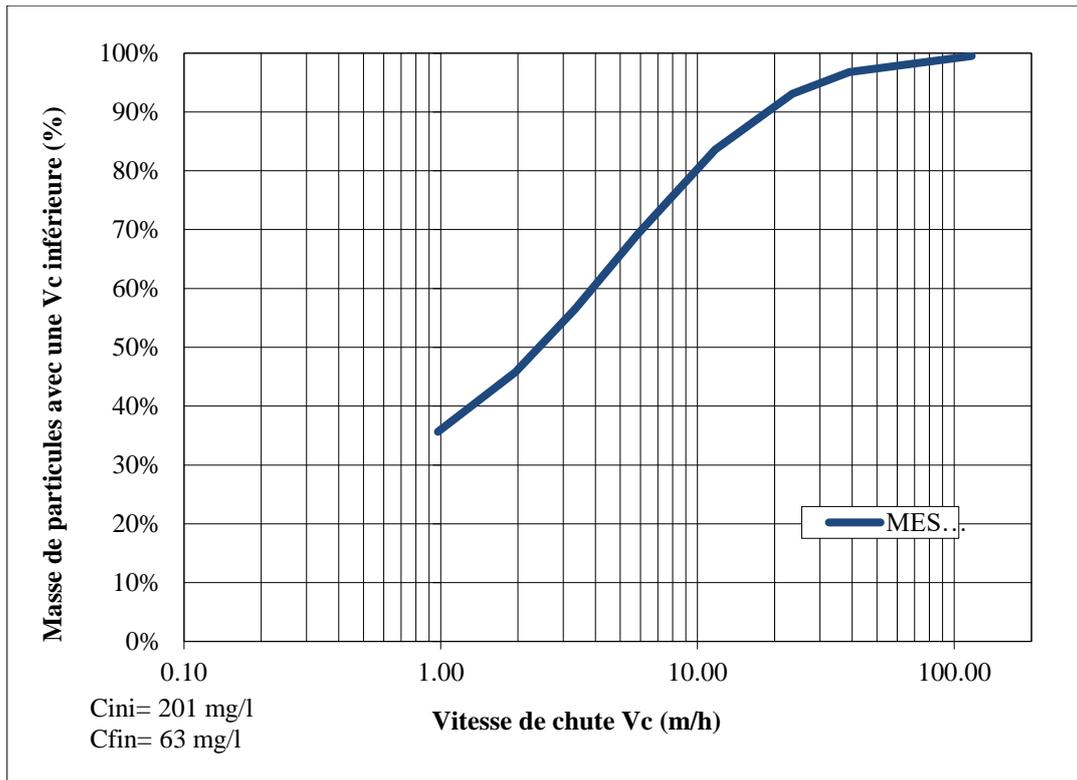


**Figure B.79 :** Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (17/10/17 11h-14h)

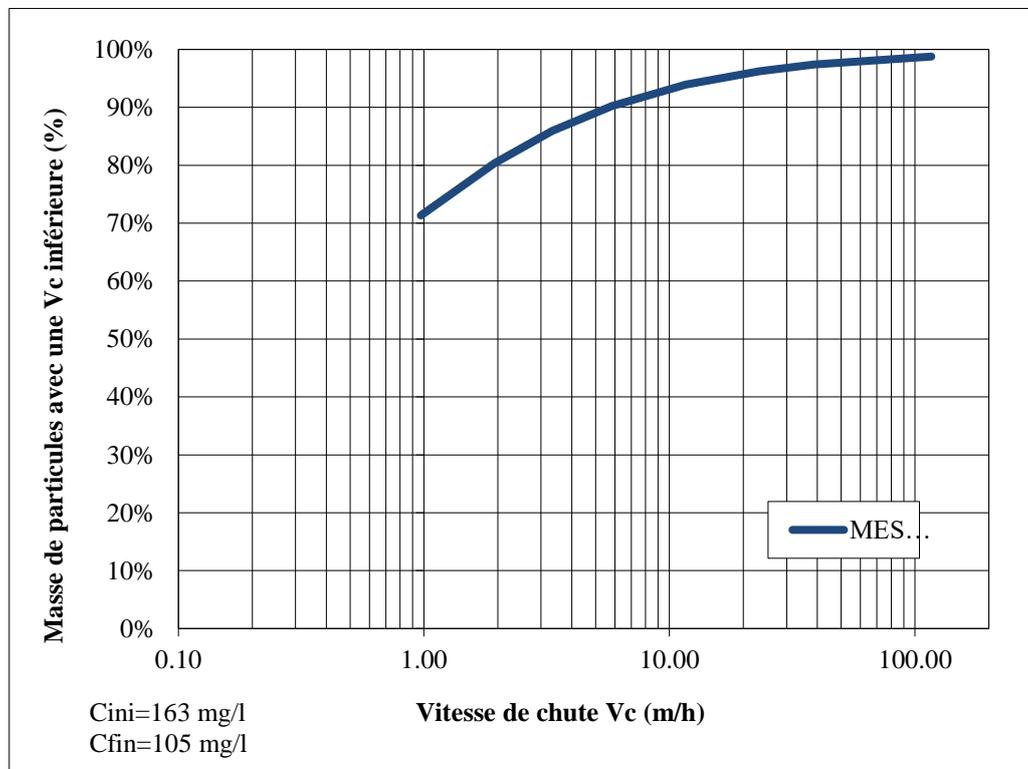
### B.3.2.3. Temps sec (18h-22h)



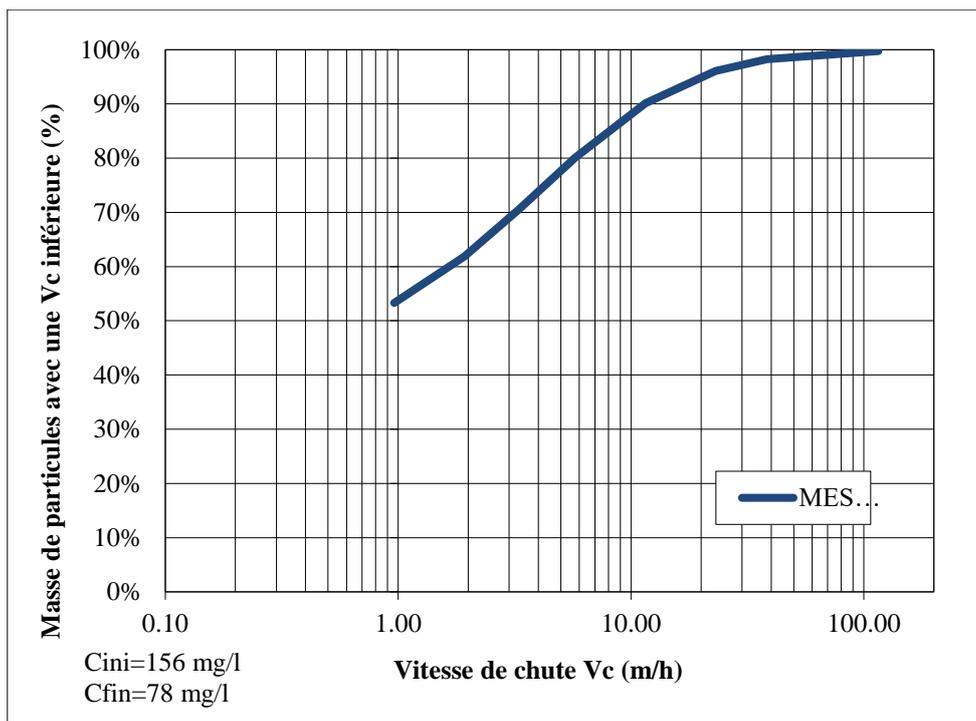
**Figure B.80 :** Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (06/09/17 18h-22h)



*Figure B.81 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (24/09/17 18h-22h)*

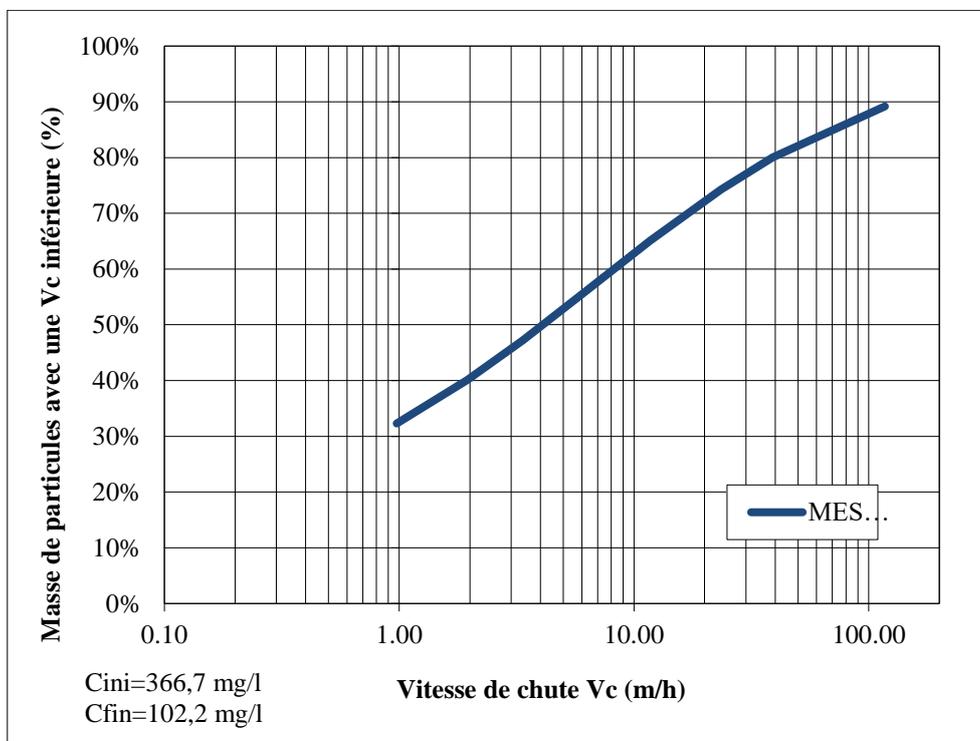


*Figure B.82 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (17/10/17 18h-22h)*

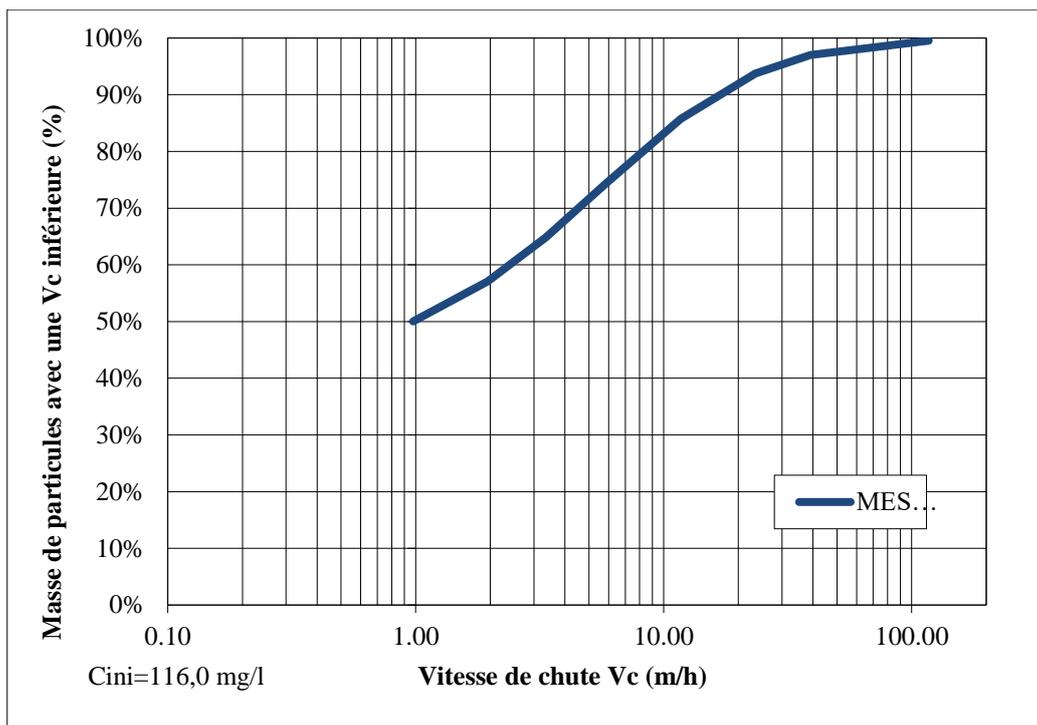


*Figure B.82 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (15/11/17 18h-22h)*

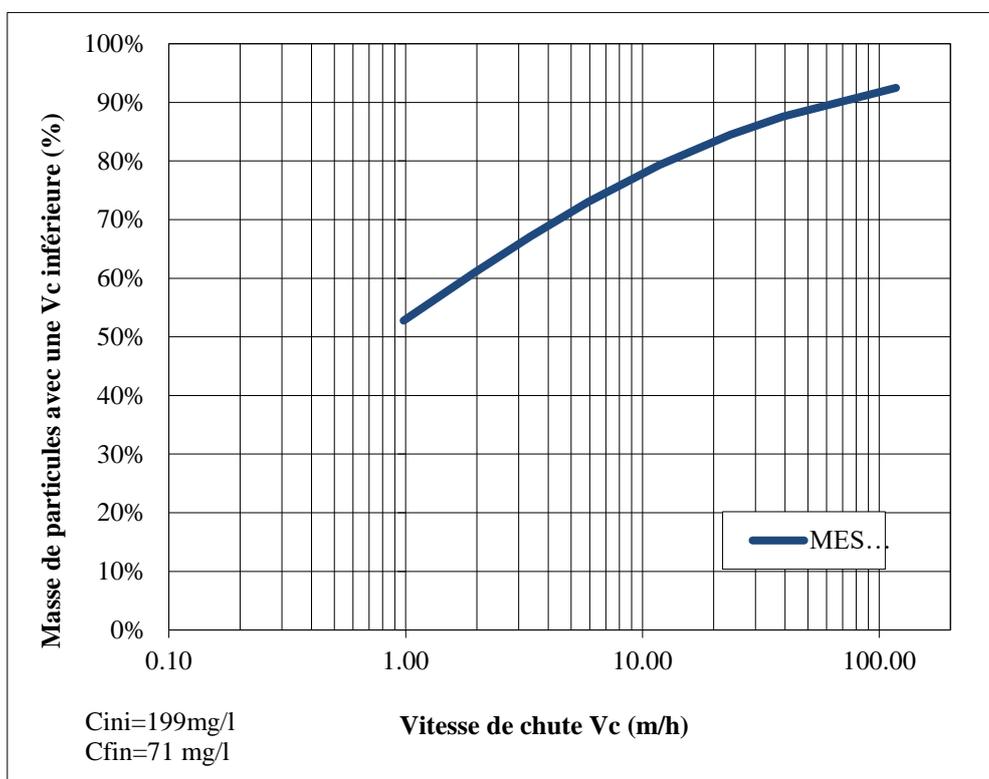
#### B.3.2.4. Temps de pluie



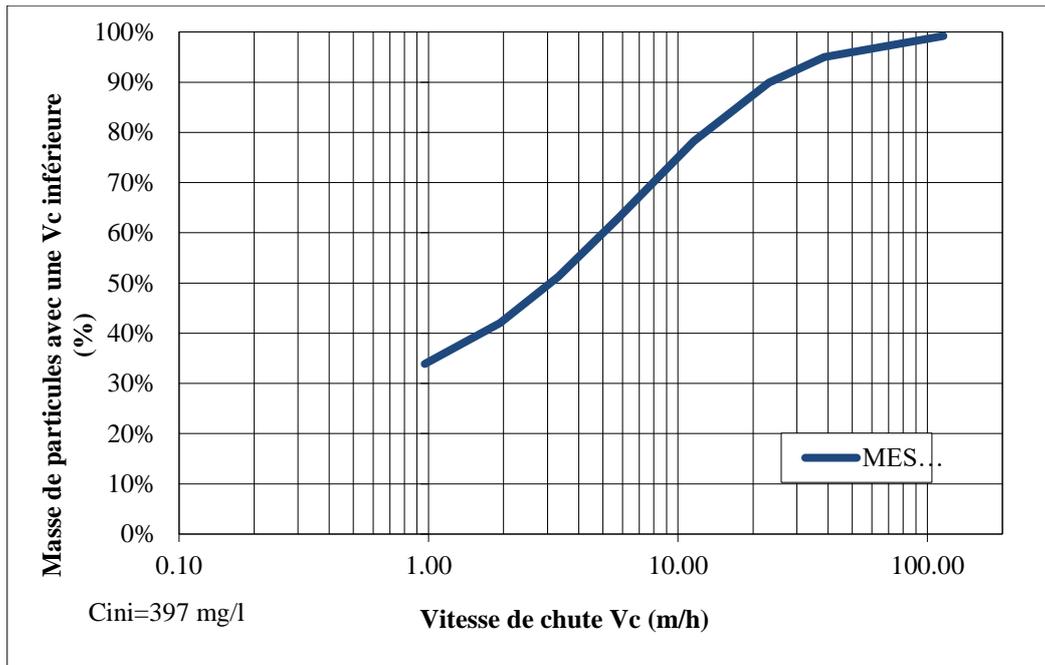
*Figure B.83 : Distribution de la vitesse de chute des particules en temps de pluie à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (07/09/17 12h38 (« concentration la plus élevée de l'échantillon »))*



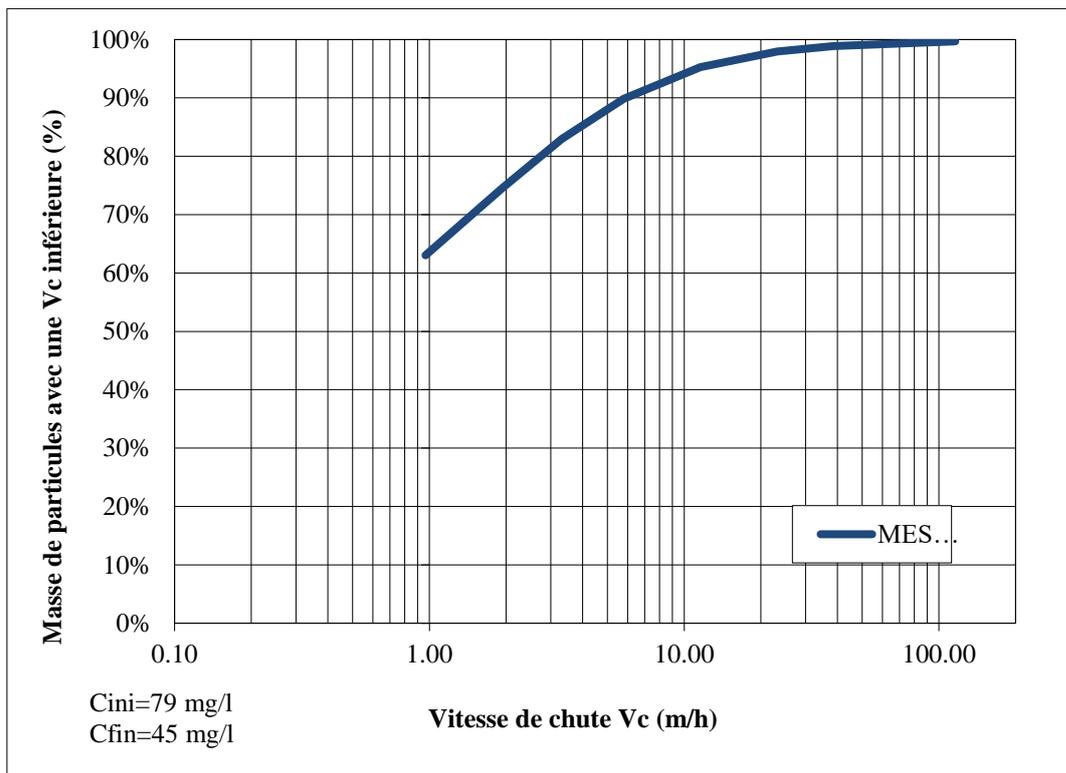
**Figure B.84 :** Distribution de la vitesse de chute des particules en temps de pluie à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (07/09/17 13h37 (« concentration la plus faible de l'échantillon »))



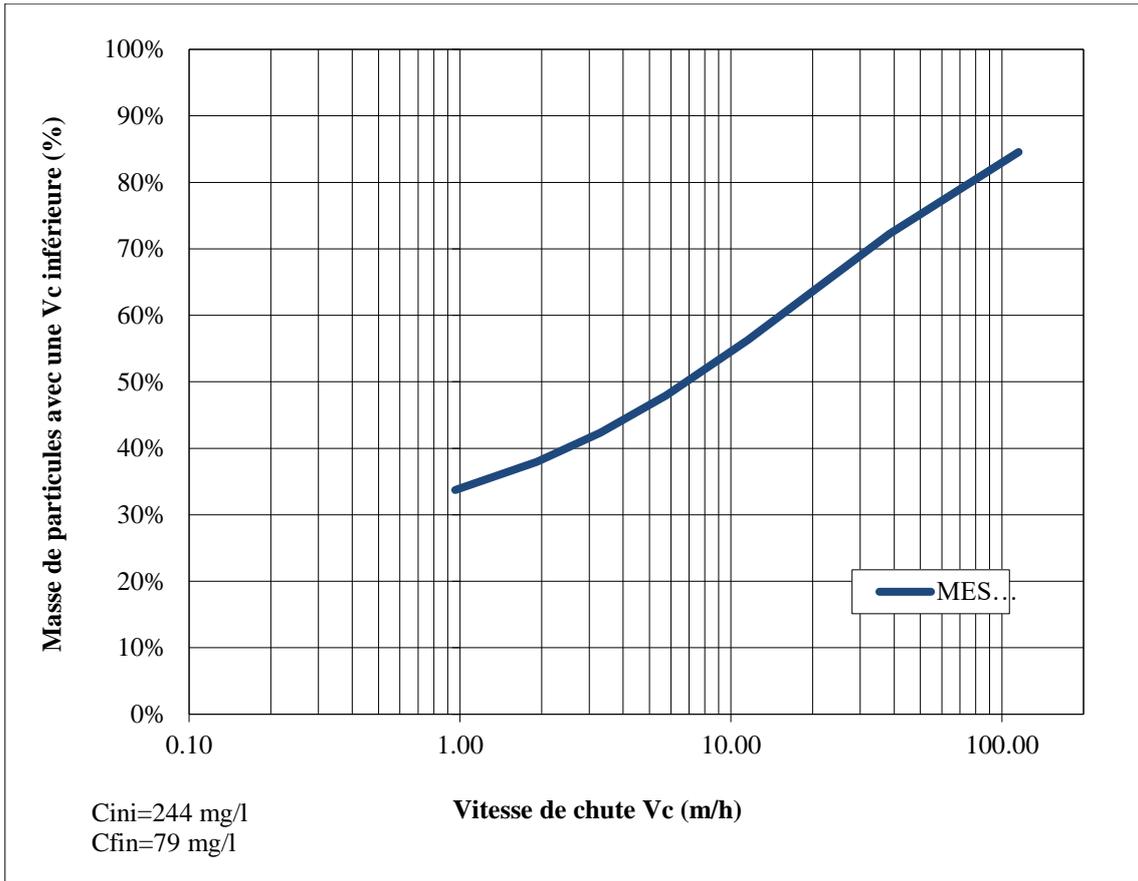
**Figure B.85 :** Distribution de la vitesse de chute des particules en temps de pluie à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (04/10/17 18h56)



**Figure B.86 :** Distribution de la vitesse de chute des particules en temps de pluie à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (24/10/17 21h30 (« concentration la plus élevée dans l'échantillon »))



**Figure B.87 :** Distribution de la vitesse de chute des particules en temps de pluie à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (24/10/17 22h27 (« concentration la plus faible dans l'échantillon »))



**Figure B.89 :** Distribution de la vitesse de chute des particules en temps de pluie à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (05/11/17 17h55-18h55)

## **Annexe C**

### **Détermination des matières en suspension totales et volatiles (méthode gravimétrique)**



UNIVERSITÉ  
LAVAL

**Méthodes analytiques  
SOP-005\_TSS**

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Date: 02-03-2010

Révision: 02

Page 1 de 14

## Détermination des solides en suspension totaux et volatils (méthode gravimétrique)

	RÉALISATION	RÉVISION	APPROBATION
NOM	Maria Pujadas	Bastien Wipliez	
FONCTION	Responsable du laboratoire partie modelEAU	Étudiant à la maîtrise en Génie Civil	
DATE	02-03-2010	01-09-2010	
SIGNATURE			
GESTION DES MODIFICATIONS			
RÉVISION	DATE	DESCRIPTION DE LA MODIFICATION	
01	02-03-2010	Édition du SOP	
02	01-09-2010	Révision et ajouts	
03	13-07-2015	Révision et ajouts (Coralie Chabbas)	
04	11-08-2016	Révision et ajouts (Romain Philippe)	

# Table des matières

1.	Introduction.....	1
2.	Domaine d'application.....	1
3.	Principe et théorie .....	1
4.	Fiabilité .....	2
5.	Prélèvement et conservation .....	4
6.	Appareillage.....	5
7.	Protocole d'analyse.....	6
8.	Calcul et expression des résultats .....	11
9.	Critères d'acceptabilité.....	11
10.	Références.....	12
11.	Annexes .....	13

## 1. Introduction

Les solides en suspension dans l'eau, plus communément appelés MES (matières en suspension), sont constitués par de la matière organique et de la matière minérale. Ils proviennent de sources naturelles, d'effluents municipaux et industriels, du ruissellement des terres agricoles et des retombées de particules atmosphériques.

Les solides en suspension volatils, plus communément appelés MVS (matières volatils en suspension), sont ceux qui sont volatilisés durant la calcination. Ils sont majoritairement composés de matière organique, mais peuvent comprendre certains sels minéraux.

Les eaux avec des niveaux élevés de solides en suspension sont turbides et inesthétiques. La concentration des solides en suspension et des solides en suspension volatils est mesurée pour différentes activités et applications réglementaires.

## 2. Domaine d'application

Cette méthode s'applique à la détermination des solides en suspension totaux dans les eaux potables, les eaux de surface, les eaux souterraines et les eaux usées

Deux types de filtres de différentes porosités sont utilisés selon les besoins : 1,2  $\mu\text{m}$  ou 0,45  $\mu\text{m}$ . Les solides en suspension volatils sont mesurés uniquement pour les eaux usées et avec des filtres de 1,2  $\mu\text{m}$ .

Le domaine d'application pour la mesure des solides en suspension se situe entre 1 et 20000 mg/l lorsqu'un volume d'eau est filtré avec un filtre de 1,2  $\mu\text{m}$ , entre 5 et 20000 mg/l avec un filtre de 0,45  $\mu\text{m}$ .

## 3. Principe et théorie

Les solides en suspension totaux sont obtenus en faisant passer une portion d'un échantillon d'eau à travers un filtre préalablement traité et pesé (**M0**, en mg). Les solides retenus sur le filtre sont séchés à 105°C, puis pesés (**M1**, en mg).

Le poids des solides en suspension est obtenu en faisant la différence entre le poids des solides séchés et le poids initial du filtre, tout en tenant compte du volume filtré (**V**, en ml). Cette opération permet d'obtenir la concentration souhaitée.

D'où :

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 1 de 14</b>

$$MES (mg/l) = \frac{(M1 - M0 - t) * 1000}{V} \quad (\text{eq. 1})$$

La quantité de solides en suspension volatils est obtenue par la différence entre le poids du résidu calciné à 550°C (**M2**) et celui du résidu séché à 105°C (**M1**), t étant la différence de masse du filtre témoin entre le conditionnement et la filtration.

D'où :

$$MVS (mg/l) = \frac{(M1 - M2 - t) * 1000}{V} \quad (\text{eq. 2})$$

## 4. Fiabilité

### 4.1 Interférence

La mesure des MES d'une eau fortement minéralisée peut nécessiter un temps de séchage prolongé à 105°C, car son contenu a une tendance hygroscopique.

La mesure des MVS présente des variations causées par la matière inorganique qui est instable à 550°C. Ainsi, certaines matières solides très volatiles peuvent être perdues pendant le séchage.

### 4.2 Limite de détection

La limite de détection des MES (obtenue par calcul) est de 2,98 mg/l avec des filtres de 1,2 µm et de 4,1 mg/l avec des filtres de 0,45 µm. Pour les applications courantes, cette valeur a été augmentée à 3 mg/l pour les filtrations avec filtres de 1,2 µm et à 5 mg/l pour les filtrations avec filtres de 0,45 µm.

La limite de détection des MVS obtenue par calcul est de 0,61mg/l. Pour les applications courantes, cette valeur a été augmentée à 5 mg/l.

Les données précédentes sont applicables lorsque le volume filtré est de 500 ml. Lorsque le volume est de 1 litre, la limite de détection est de 1,0 mg/l avec un filtre de 1,2 µm.

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 2 de 14</b>

*Note : La méthode qui permet d'établir la limite de détection requiert l'utilisation d'échantillons dont les caractéristiques diffèrent de l'eau usée. Pour cette raison, la limite de détection appliquée pour des échantillons d'eau usée est significativement plus grande que celle calculée.*

### 4.3 Limite de quantification

La limite de quantification des MES obtenue par calcul est de 9,94 mg/l pour les filtres de 1,2 µm et de 13,7 mg/l pour des filtres de 0,45 µm.

La limite de quantification des MVS obtenue par calcul est de 2,1mg/l. Pour les applications courantes, cette valeur a été augmentée à 15 mg/l.

Les données précédentes sont applicables lorsque le volume filtré est de 500 ml. Lorsque le volume est de 1 litre, la limite de quantification est de 3,5 mg/l avec un filtre de 1,2 µm.

*Note : La méthode qui permet d'établir la limite de quantification requiert l'utilisation d'échantillon dont les caractéristiques diffèrent de l'eau usée. Pour cette raison, la limite de quantification appliquée pour des échantillons d'eau usée est significativement plus grande que celle calculée.*

### 4.4 Fidélité

#### 4.4.1 Réplicabilité

La réplicabilité d'une série de mesures MES (n=10) a été de  $\pm 0,73$  mg/l à une concentration moyenne de 29,9 mg/l avec des filtres de 1,2 µm et de  $\pm 1,0$  mg/l à une concentration moyenne de 24,1 mg/l avec des filtres de 0,45 µm.

La réplicabilité d'une série de mesures MVS (n=10) a été de  $\pm 0,53$  mg/l à une concentration moyenne de 101 mg/l.

#### 4.4.2 Répétabilité

La répétabilité d'une série de mesures de MES (n=10) a été de  $\pm 1,5$  mg/l à une concentration moyenne de 48,6 mg/l avec des filtres de 1,2 µm et de  $\pm 1,4$  mg/l à une concentration moyenne de 19,5 mg/l avec des filtres de 0,45 µm.

La répétabilité d'une série de mesures de MVS (n=3) a été de  $\pm 6,6$  mg/l à une concentration moyenne de 41,5 mg/l.

### 4.5 Justesse

Lors d'essais (n=10), la justesse moyenne obtenue pour les MES a été de 93% pour une concentration attendue de 32,9 mg/l avec des filtres de 1,2 µm et de 92% pour une concentration attendue de 26,1 mg/l avec des filtres de 0,45 µm.

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 3 de 14</b>

Lors d'essais (n=3), la justesse moyenne obtenue pour les MVS a été 92 % pour une concentration attendue de 38,8 mg/l.

#### **4.6 Pourcentage de récupération**

Lors d'essai (n=5), le pourcentage de récupération moyen obtenu pour les MES a été de 99% avec des filtres de 1,2 µm.

### **5. Prélèvement et conservation**

Prélever un échantillon représentatif de 500 à 1000 ml (selon la concentration attendue), dans un contenant de plastique ou de verre et le conserver à 4°C.

Le délai préférentiel de conservation entre le prélèvement et l'analyse ne doit pas excéder 24h. Le délai maximum de conservation est de 7 jours, en prenant soin de ramener l'échantillon à température ambiante avant essai.

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 4 de 14</b>

## 6. Appareillage

### 6.1 Appareillage de filtration



Figure 1 : Appareillage de filtration "gros filtres" (Ø125mm)

- Erlenmeyer à vide
- Entonnoir à filtration en porcelaine Ø125mm
- Pompe à vide Gast



Figure 2 : Appareillage de filtration "petits filtres" (Ø47mm)

- Erlenmeyer à vide
- Banc de filtration pour Ø47mm
- Supports de filtration de type Büchner
- Pompe à vide Gast

### 6.2 Appareillage de séchage



Figure 3 : Étuve à 105 ±5°C  
(mesure de MES)



Figure 4 : Four à 550 (mesure de  
MVS)



Figure 5 : Dessiccateur en verre  
(refroidissement)

Date d'émission :  
01-09-2010

Codification :  
SOP-005\_TSS

Détermination des  
solides en suspension  
totaux et volatils dans  
l'eau : méthode  
gravimétrique

Émis par :  
Maria Pujadas

### 6.3 Appareillage de mesure



Figure 6 : Balance analytique

- Balance analytique, précision 0,01 mg

## 7. Protocole d'analyse

### 7.1 Préparation préalable des filtres (MES)

Cette préparation est nécessaire pour des filtres qui n'ont pas subi de prétraitement. Elle permet de « nettoyer » les pores des filtres pour assurer des meilleurs résultats de filtration lors de la réalisation de l'essai par la suite. Elle est à réaliser pour toutes tailles de filtres.

Ainsi :

- Filtrer 3 fois le filtre avec environ 20 ml d'eau distillée
- Déposer le filtre dans une coupelle en aluminium préalablement identifiée.
- Conditionner le filtre en le plaçant à l'étuve à 105°C pendant au moins 2 heures.
- Laisser refroidir le filtre dans un dessiccateur pendant au moins 30 minutes.
- Peser le filtre à l'aide de la balance (0,01 mg), noter la masse **M0** obtenue et le numéro d'identification.

### 7.2 Préparation préalable des filtres (MVS)

Cette préparation remplace celle de la préparation des MES dans le cas où l'on souhaite déterminer les MES et les MVS, pour en supprimer les éventuelles traces de particules organiques qui auraient pu être présentes dans l'eau utilisée.

Ainsi :

- Filtrer 3 fois environ 20 ml d'eau distillée

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 6 de 14</b>

- Déposer le filtre dans une coupelle en aluminium préalablement identifiée.
- Conditionner le filtre en le plaçant au four à 550°C pendant 30 minutes.
- Laisser refroidir le filtre dans un dessiccateur pendant au moins 30 minutes.
- Peser le filtre à l'aide de la balance (0,01 mg), noter la masse **M0** obtenue et le numéro d'identification.

### 7.3 Choix préalables

L'essai de mesure de MES nécessite beaucoup de manipulations qui peuvent générer des erreurs à chaque étape. L'accent est mis sur 2 choix préliminaires importants : **choix du diamètre du filtre** (Ø47 ou Ø 125mm) et **choix du volume à filtrer**. Ces choix sont réalisés selon l'observation de la turbidité de l'échantillon.

La norme 2540D précise que le volume pour la mesure de MES doit générer une masse retenue de 2.5 à 200 mg pour les filtres de Ø47 mm et de 18 à 1415 mg pour les filtres de Ø125 mm. Il faut donc filtrer un petit volume pour des eaux très turbides et à contrario filtrer un plus gros volume pour des eaux peu turbides.

Ainsi :

- Pour la filtration avec des gros filtres (Ø 125 mm), il est conseillé d'utiliser un volume d'échantillon de 130 à 150 ml avant d'observer des variations ou des phénomènes de bouchage du filtre.
- Pour la filtration avec des petits filtres (Ø 47 mm), la surface de filtration diminue et génère donc plus de phénomènes de bouchage du filtre pour des concentrations élevées. Il est conseillé de respecter la règle suivante :

Valeur attendue	1000 mg/l et plus	500 mg/l à 1000 mg/l	300 mg/l à 500 mg/l	150 mg/l à 300 mg/l	0 mg/l à 150 mg/l
Volume conseillé	15 à 30 ml	30 à 50 ml	50 à 70 ml	70 à 130 ml	130 à 1000 ml

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 7 de 14</b>

## 7.4 Réalisation de l'essai (MES)

Un filtre témoin (blanc) doit suivre les mêmes étapes que les filtres utilisés pour les échantillons. Utiliser de l'eau déminéralisée pour la filtration.

Pour toutes les filtrations, l'échantillon est homogénéisé par mélange préalablement, avant d'en mesurer un volume précis approprié dans un cylindre gradué.

Dépendamment du nombre d'échantillon à analyser, des triplicatas peuvent être réalisés.

### 7.4.1 Filtration avec des filtres $\varnothing$ 47 mm

Les étapes suivantes sont établies :



- Placer le filtre sur le support de filtration et bloquer le contenant avec la pince pour réaliser l'étanchéité.

Figure 7 : Mise en place du filtre  $\varnothing$  47 mm

- Déverser et filtrer le volume d'échantillon approprié.

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 8 de 14</b>



**Figure 8 : Filtration d'un échantillon**

- Laver le cylindre gradué avec de l'eau déminéralisée.
- Laver le contenant avec de l'eau déminéralisée, déversée sur les bords.
- Maintenir l'aspiration jusqu'à ce que la filtration soit complétée.
- Eteindre la pompe, démonter le matériel et récupérer le filtre à l'aide d'une pince à épiler.
- Sécher le filtre **2h** à l'étuve
- Refroidir **30 minutes** au dessiccateur
- Peser le filtre sec et noter la masse **M1**.

#### 7.4.2 Filtration avec les filtres Ø 125 mm

Les étapes suivantes sont établies :



**Figure 9 : Mise en place du filtre Ø 125 mm**

- Placer le filtre sur le support de filtration
- Déverser 1 fois 30 ml d'eau pour « assoir » le filtre avec le démarrage de la pompe.

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 9 de 14</b>



Figure 10 : Filtration d'un échantillon

- Déverser et filtrer le volume d'échantillon approprié.
- Laver le cylindre gradué avec **1 fois 20 ml** d'eau.
- Maintenir l'aspiration jusqu'à ce que la filtration soit complétée.
- Eteindre la pompe et récupérer le filtre à l'aide d'une pince à épiler.



Figure 11 : Pliage du filtre Ø 125 mm

Remarque :

- Pour récupérer le filtre, il faut le « plier » en 4 comme indiqué ci-contre.
- Une fois plié en 4, essuyer les « traces » laissées sur le support de filtration en porcelaine.

Finalement :

- Sécher le filtre **2h** à l'étuve
- Refroidir **30 minutes** au dessiccateur
- Peser le filtre sec et noter la masse **M1**.

## 7.5 Réalisation de l'essai (MVS)

Pour la détermination des solides en suspension volatils, placer le filtre de masse **M1** dans le four à 550°C pendant **30 minutes**. Ensuite, laisser refroidir **30 minutes** au dessiccateur et peser la masse **M2**.

Remarque :

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 10 de 14</b>

- L'essai des MVS est réalisé sur des filtres **uniquement** pré-traités pour la mesure de MVS.
- Le four présent au laboratoire met 30 minutes à atteindre la température souhaitée. Il est indispensable de le pré-chauffer.

## 7.6 Réalisation du test massique (MeS)

Dans certains cas, lorsque l'échantillon est trop visqueux pour être filtré, il est préférable de substituer la filtration par un test massique.

- Peser la masse d'une nacelle en aluminium vide et noter le résultat
- Mettre environ 4 à 5 mL d'échantillon dans la nacelle d'aluminium et bien l'étaler
- Peser la masse de la nacelle avec l'échantillon et noter le résultat
- Mettre le tout à l'étuve à 105°C pendant environ 2h en n'oubliant de recouvrir les nacelles avec du papier d'aluminium
- Au bout de 2h, peser la nacelle d'aluminium et noter les résultats.

## 8. Calcul et expression des résultats

Les résultats sont exprimés en mg/l selon les calculs des équations 1 et 2 présentées ci-avant.

## 9. Critères d'acceptabilité

Les critères d'acceptabilité sont appliqués comme suit :

Élément de contrôle	Critère d'acceptabilité
Matériaux de référence	La valeur obtenue doit être à l'intérieur de la moyenne $\pm 2$ écarts types. Une vérification du processus est amorcée lorsque le résultat est compris entre $\pm 1$ et $\pm 3$ écarts types.
Duplicata et réplika	Les valeurs obtenues ne doivent pas différer de plus de 10 % de la valeur moyenne de la concentration analysée.

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 11 de 14</b>

## 10. Références

Ce document a été réalisé avec la documentation suivante :

**American public health association**, American water works association and water pollution control federation, “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*”, protocol 2540D-E, 21<sup>st</sup> Edition, 2005.

**Centre d’expertise en analyse environnementale du Québec**, « *Lignes directrices concernant l’application des contrôles de la qualité en chimie* », DR-12-SCA-01, Ministère de l’Environnement du Québec, Édition courante.

**Centre d’expertise en analyse environnementale du Québec**, « *Protocole pour la validation d’une méthode d’analyse en chimie* », DR-12-VMC, Ministère de l’Environnement du Québec, Édition courante.

**McNeely, R.N., V.P. Neimanis et L. Dwyer**, « *Références sur la qualité des eaux. Guide des paramètres de la qualité des eaux* », Québec, Direction générale des eaux intérieures, Direction de la qualité des eaux, Environnement Canada, Ottawa, 100 p., 1980.

<b>Date d’émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l’eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 12 de 14</b>

## 11. Annexes

### Annexe n°1 : Problèmes rencontrés

L'analyse des MES ou des MVS comporte différentes étapes qui nécessitent une attention particulière de l'utilisateur. Aussi, cette section fait l'état de différents problèmes rencontrés.

#### - Traces sur le contenant (filtration Ø 47 mm)



Figure 1 : Traces laissées sur le support des filtres  
Ø47 mm

Analyse : Les traces sont dues au fait que lors de la filtration, une partie du filtre est en contact avec la membrane d'étanchéité du contenant et donc des fibres de verres y sont « accrochées ».

- Essai : Une étude menée sur différents cycle de préparation de filtres révèle que la masse de ces traces est négligeable dans le test de mesure des MES.

- Conclusion : Les traces laissées par les petits filtres sur la membrane de filtration du contenant sont négligeables.

#### - Traces sur le contenant (filtration Ø 125 mm)

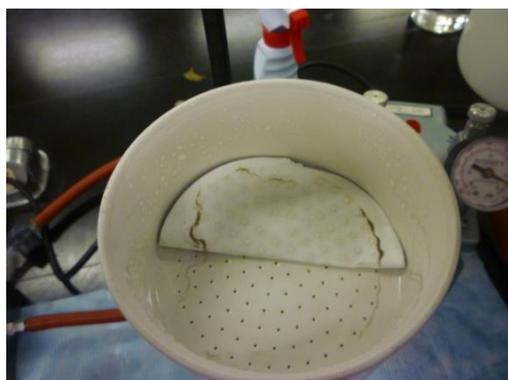


Figure 2 : Traces laissées sur le support des  
filtres Ø125 mm

- Analyse : Les traces sont dues au fait que le filtre est seulement « assis » dans le support de filtration et laisse donc passer une partie des MES.

- Essai : Une étude menée sur les filtrats de plusieurs filtrations de différentes concentrations révèle que ces traces ont bien été retenues par les portes.

- Conclusion : Il faut « essayer » ces traces à l'aide du filtre pour récupérer les matières perdues.

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 13 de 14</b>

### - Bouchage des petits filtres (filtration Ø 47 mm)



Figure 3 : Bouchage lors d'une filtration avec des filtres Ø47 mm

Analyse : Lors de l'essai de mesure de MES, l'échantillon révèle une turbidité importante, donc une concentration importante, et le choix du filtre et/ou du volume a mal été réalisé.

- Essai : Pour ne pas perdre l'échantillon à l'essai, il est possible de réaliser une seconde filtration dans un autre filtre. Il faut alors fermer la vanne de succion, sortir le support du banc de filtration et déverser le contenu « bloqué » dans le nouveau filtre. Il faut ensuite laver tous les bords des contenants et rouvrir la vanne du 1<sup>er</sup> filtre pour filtrer l'eau restante accumulée.



Figure 4 : Méthode pour la solution du bouchage avec des filtres Ø47 mm

### - Bouchage des gros filtres (filtration Ø 125 mm)

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 14 de 14</b>



**Figure 5 : Bouchage lors d'une filtration avec des filtres Ø125 mm**

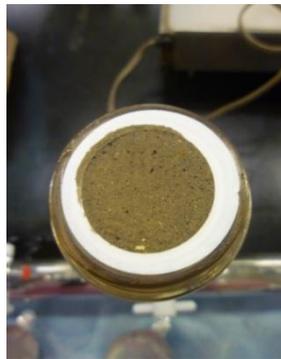
Analyse : Lors de l'essai de mesure de MES, l'échantillon révèle une turbidité importante, donc une concentration importante, et le choix du volume a mal été réalisé. D'une manière générale, il n'est pas vraiment possible de « boucher » les gros filtres. Cependant, la figure ci-contre permet d'observer que les matières retenues sur le dessus du « tas » ne peuvent plus être filtrées.

- Conclusion : Il ne faut pas prendre un trop gros volume pour des boues, du lisier ou des échantillons très chargés et envisager une dilution.

- Résumé des problèmes rencontrés avec les petits filtres (filtration Ø 47 mm)



**Figure 6 : Filtre percé**



**Figure 7 : Filtre mal positionné**



**Figure 8 : Problèmes globaux (percé, mal positionné et bouché)**

<b>Date d'émission :</b> 01-09-2010	<b>Détermination des solides en suspension totaux et volatils dans l'eau : méthode gravimétrique</b>	<b>Émis par :</b> Maria Pujadas
<b>Codification :</b> SOP-005_TSS		<b>Page 15 de 14</b>

## **Annexe D**

### **Protocole ViCAs**

 <b>UNIVERSITÉ LAVAL</b>	<b>Méthodes analytiques SOP-018-ViCAs</b>	
	DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL	
Date: 01-09-2010	Révision: 01	Page 1 de 26

## 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	PL

<b>Date d'émission :</b> 1 <sup>er</sup> sept 2010	<b>Protocole d'utilisation de la colonne ViCAs</b>	<b>Émis par :</b> Bastien Wipliez
<b>Codification :</b> SOP-011-ViCAs		<b>Page 1 de 26</b>

.....

	RÉALISATION	RÉVISION	APPROBATION
<b>NOM</b>	Bastien Wipliez		
<b>FONCTION</b>	Étudiant en génie civil		
<b>DATE</b>	01-09-10		
<b>SIGNATURE</b>			
<b>GESTION DES MODIFICATIONS</b>			
<b>RÉVISION</b>	<b>DATE</b>	<b>DESCRIPTION DE LA MODIFICATION</b>	
01	01-09-10	Émission du SOP	

<b>Date d'émission :</b> 1 <sup>er</sup> sept 2010	<b>Protocole d'utilisation de la colonne ViCAs</b>	<b>Émis par :</b> Bastien Wipliez
<b>Codification :</b> SOP-011-ViCAs		<b>Page 2 de 25</b>

# Table des matières

1.	Introduction.....	4
2.	Domaine d'application.....	4
3.	Principe et théorie .....	5
4.	Spécifications.....	9
5.	Prélèvement et conservation .....	9
6.	Appareillage.....	10
7.	Protocole analytique .....	11
8.	Calculs et expression des résultats.....	16
9.	Fiabilité .....	20
10.	Références.....	21
11.	Annexes .....	22

**Date d'émission :**

1<sup>er</sup> sept 2010

**Codification :**

SOP-011-ViCAs

**Protocole d'utilisation  
de la colonne ViCAs**

**Émis par :**

Bastien Wipliez

**Page 3 de 25**

# 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 µm). 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 chutes 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.

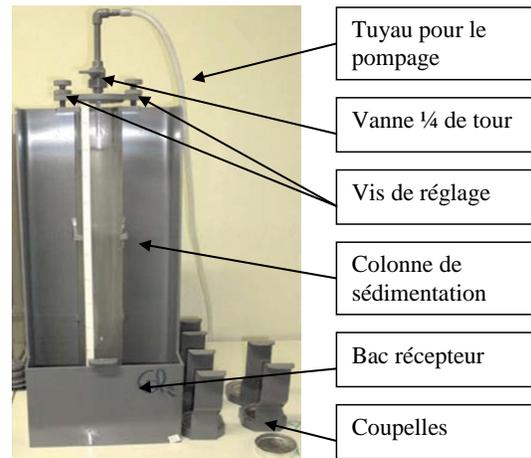


Figure 1 : Matériel pour l'essai

# 2. Domaine d'application

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

<b>Date d'émission :</b> 1 <sup>er</sup> sept 2010	<b>Protocole d'utilisation de la colonne ViCAs</b>	<b>Émis par :</b> Bastien Wipliez
<b>Codification :</b> SOP-011-ViCAs		<b>Page 4 de 26</b>

### 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.

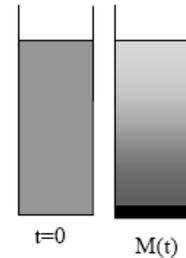


Figure 2 : Principe de la suspension homogène

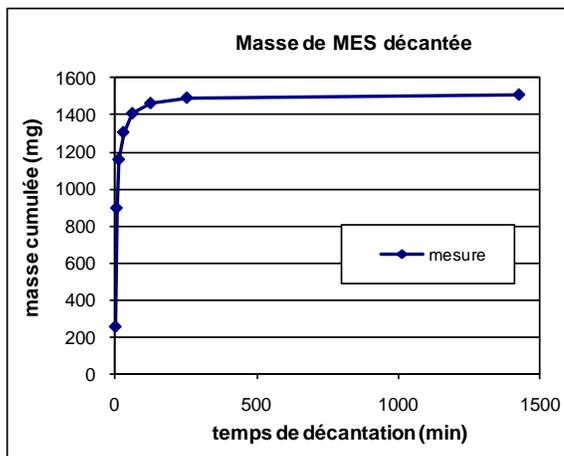


Figure 3 : Courbe de la masse cumulée des solides ayant décantés en fonction du temps

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.

Date d'émission :

1<sup>er</sup> sept 2010

Codification :

SOP-011-ViCAs

Protocole d'utilisation  
de la colonne ViCAs

Émis par :

Bastien Wipliez

Page 5 de 25

## 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  $M(t_i)$ .

<b>Date d'émission :</b> 1 <sup>er</sup> sept 2010	<b>Protocole d'utilisation de la colonne ViCAs</b>	<b>Émis par :</b> Bastien Wipliez
<b>Codification :</b> SOP-011-ViCAs		<b>Page 6 de 25</b>

### 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  $d \in ]0,1[$ .

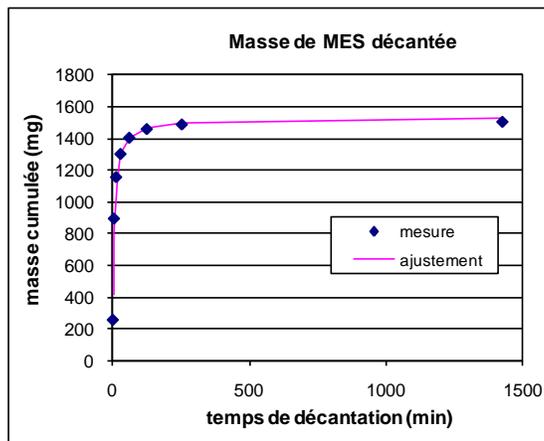


Figure 4 : Exemple d'ajustement de  $M(t)$

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 :

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

<b>Date d'émission :</b> 1 <sup>er</sup> sept 2010	<b>Protocole d'utilisation de la colonne ViCAs</b>	<b>Émis par :</b> Bastien Wipliez
<b>Codification :</b> SOP-011-ViCAs		<b>Page 7 de 25</b>

### 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.

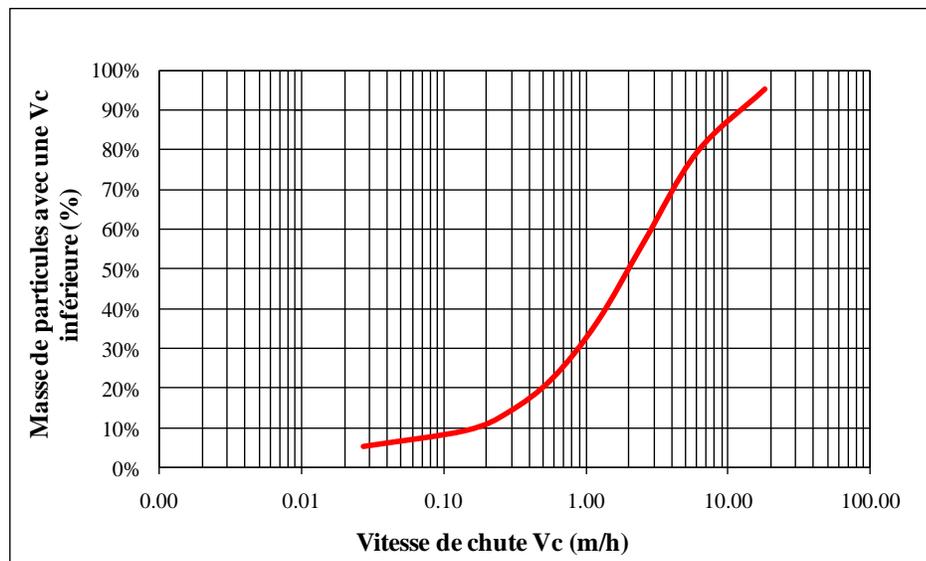


Figure 5 : Exemple de courbe de distribution des vitesses de chute  $F(V_s)$

**Date d'émission :**

1<sup>er</sup> sept 2010

**Codification :**

SOP-011-ViCAs

**Protocole d'utilisation  
de la colonne ViCAs**

**Émis par :**

Bastien Wipliez

Page 8 de 25

## 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.

<b>Date d'émission :</b> 1 <sup>er</sup> sept 2010	<b>Protocole d'utilisation de la colonne ViCAs</b>	<b>Émis par :</b> Bastien Wipliez
<b>Codification :</b> SOP-011-ViCAs		<b>Page 9 de 25</b>

## 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 6 : Matériel d'essai ViCAs

### 6.2 Matériel pour le remplissage de la colonne

- 1 béccher 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),

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

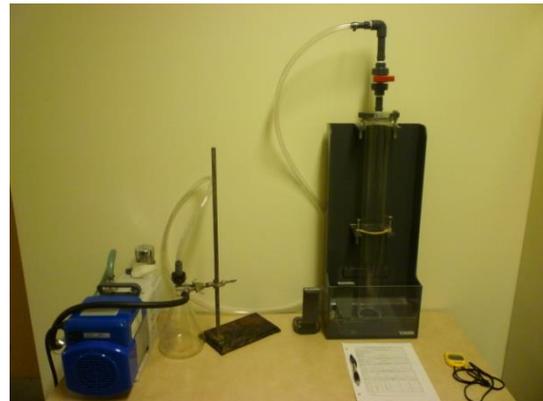


Figure 7 : Matériel ViCAs avec système de remplissage

### 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.

**Date d'émission :**

1<sup>er</sup> sept 2010

**Codification :**

SOP-011-ViCAs

**Protocole d'utilisation  
de la colonne ViCAs**

**Émis par :**

Bastien Wipliez

**Page 10 de 25**

## 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  $\square t$  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.

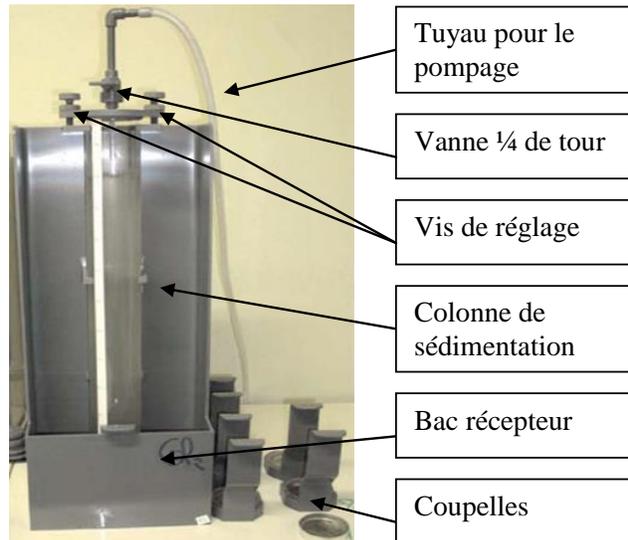


Figure 8 : Présentation du matériel ViCAs

- 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.

**Date d'émission :**

1<sup>er</sup> sept 2010

**Codification :**

SOP-011-ViCAs

**Protocole d'utilisation  
de la colonne ViCAs**

**Émis par :**

Bastien Wipliez

**Page 11 de 25**

- Préparation de l'échantillon

- Homogénéiser l'échantillon à l'aide de la spatule et récolter 5 litres dans le bécher 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 nécessaires 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 ¼ 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.

<b>Date d'émission :</b> 1 <sup>er</sup> sept 2010	<b>Protocole d'utilisation de la colonne ViCAs</b>	<b>Émis par :</b> Bastien Wipliez
<b>Codification :</b> SOP-011-ViCAs		<b>Page 12 de 25</b>



**Figure 9 : Versement de l'échantillon**



**Figure 10 : Fermeture de la vanne 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 ¼ de tour.
- Arrêter la pompe

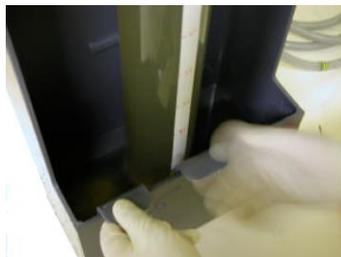
## 7.4 Démarrage de la décantation

- Mettre en place immédiatement après fermeture de la vanne ¼ de tour la première coupelle : placer doucement la coupelle dans le bac récepteur, puis la faire glisser jusque 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 11 : Mise en place de la nouvelle coupelle**



**Figure 12 : 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 béccher de 1000 ml comme récipient de sécurité pour réaliser le déplacement de l'échantillon récolté dans la coupelle jusqu'au banc de filtration.

**Date d'émission :**

1<sup>er</sup> sept 2010

**Codification :**

SOP-011-ViCAs

**Protocole d'utilisation de la colonne ViCAs**

**Émis par :**

Bastien Wipliez

**Page 13 de 25**

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.

<b>Date d'émission :</b> 1 <sup>er</sup> sept 2010	<b>Protocole d'utilisation de la colonne ViCAs</b>	<b>Émis par :</b> Bastien Wipliez
<b>Codification :</b> SOP-011-ViCAs		<b>Page 14 de 25</b>



**Figure 13 : Bouchage de la colonne**

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



**Figure 14 : Prélèvement de la colonne**



**Figure 15 : 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.

**Date d'émission :**

1<sup>er</sup> sept 2010

**Codification :**

SOP-011-ViCAs

**Protocole d'utilisation  
de la colonne ViCAs**

**Émis par :**

Bastien Wipliez

**Page 15 de 25**

## 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 :

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

**Date d'émission :**

1<sup>er</sup> sept 2010

**Codification :**

SOP-011-ViCAs

**Protocole d'utilisation  
de la colonne ViCAs**

**Émis par :**

Bastien Wipliez

**Page 16 de 25**



## 8.2.2 Calcul de la distribution des vitesses de chute

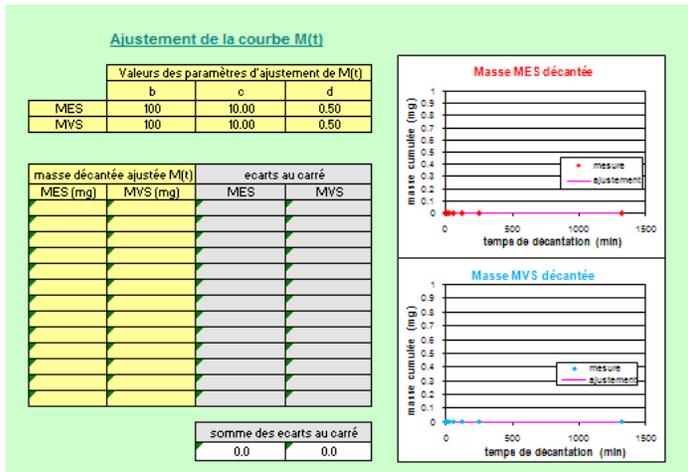


Figure 17 : Ajustement de la courbe M(t)

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)

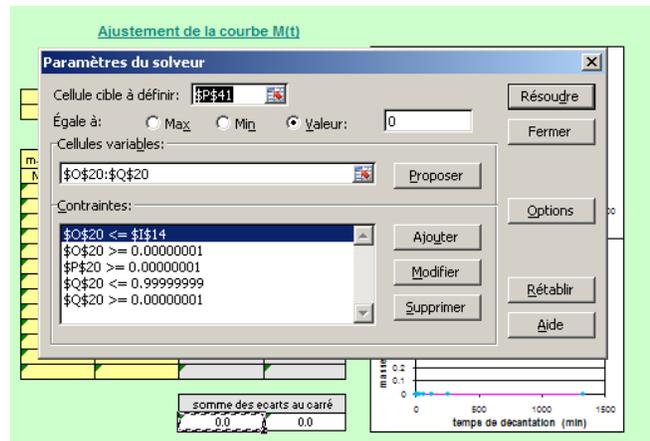


Figure 18 : Résolution avec le solveur Excel

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.

**Date d'émission :**

1<sup>er</sup> sept 2010

**Codification :**

SOP-011-ViCAs

**Protocole d'utilisation  
de la colonne ViCAs**

**Émis par :**

Bastien Wipliez

Page 18 de 25



## 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.

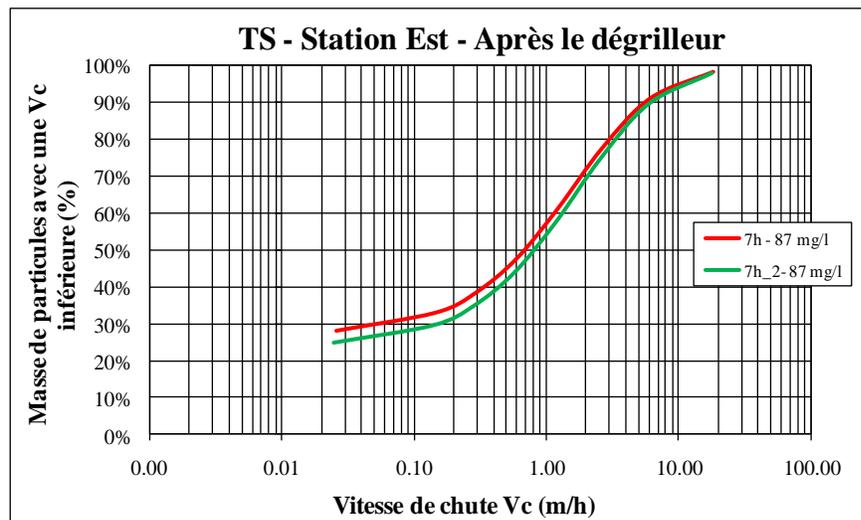


Figure 20 : Test de reproductibilité ViCAs

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.

Date d'émission :

1<sup>er</sup> sept 2010

Codification :

SOP-011-ViCAs

Protocole d'utilisation  
de la colonne ViCAs

Émis par :

Bastien Wipliez

Page 20 de 25

## 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 chutes - Protocole VICAS*.

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

<b>Date d'émission :</b> 1 <sup>er</sup> sept 2010	<b>Protocole d'utilisation de la colonne ViCAs</b>	<b>Émis par :</b> Bastien Wipliez
<b>Codification :</b> SOP-011-ViCAs		<b>Page 21 de 25</b>

## 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

**Date d'émission :**

1<sup>er</sup> sept 2010

**Codification :**

SOP-011-ViCAs

**Protocole d'utilisation  
de la colonne ViCAs**

**Émis par :**

Bastien Wipliez

**Page 22 de 25**



## 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.

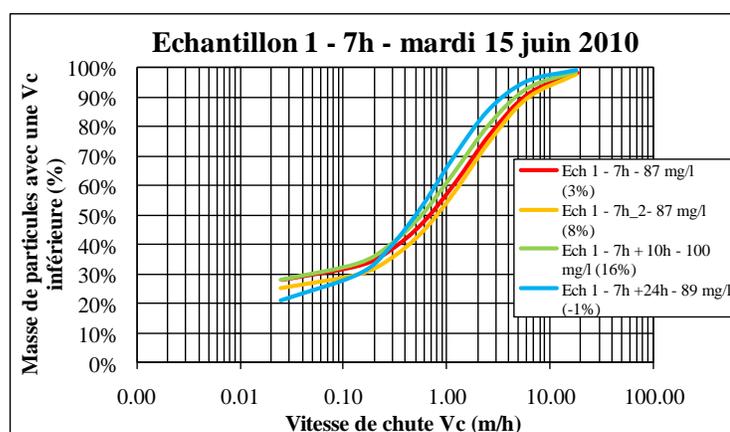


Figure 21 : Essai de conservation ViCAs – Échantillon 1

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.

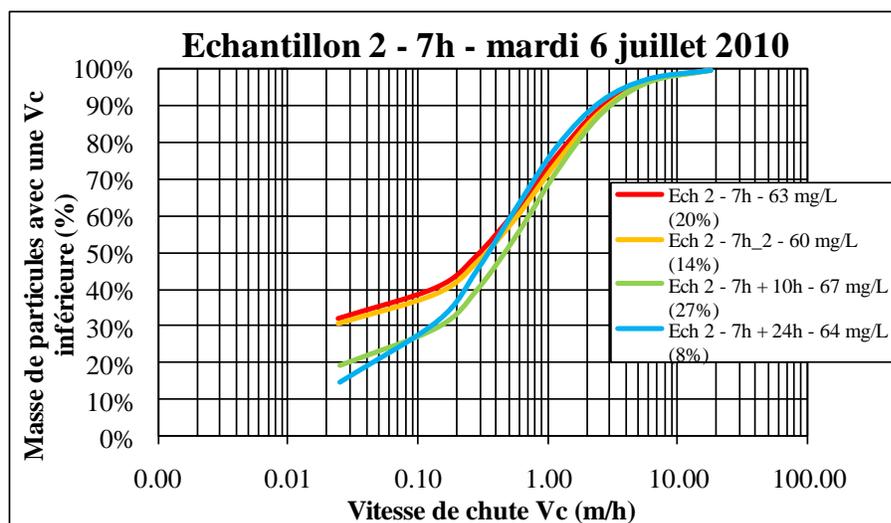


Figure 22 : Essai de conservation ViCAs – Échantillon 2

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.

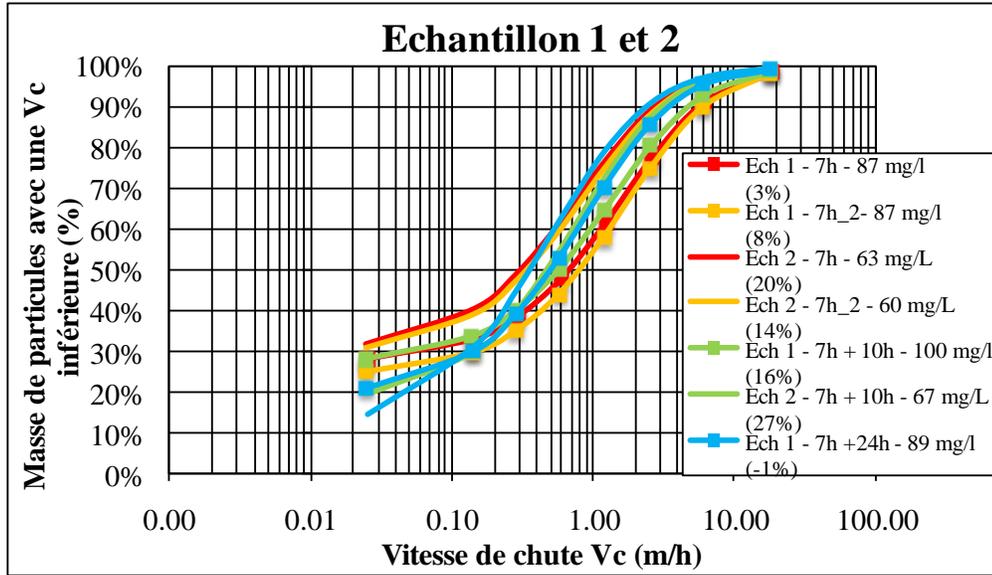


Figure 23 : Essai de conservation ViCAs – Échantillon 1 et 2

#### 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.

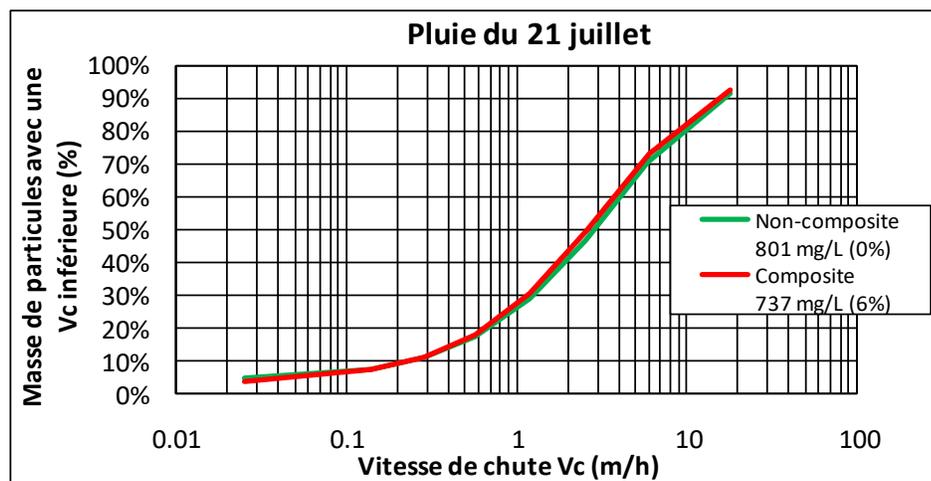


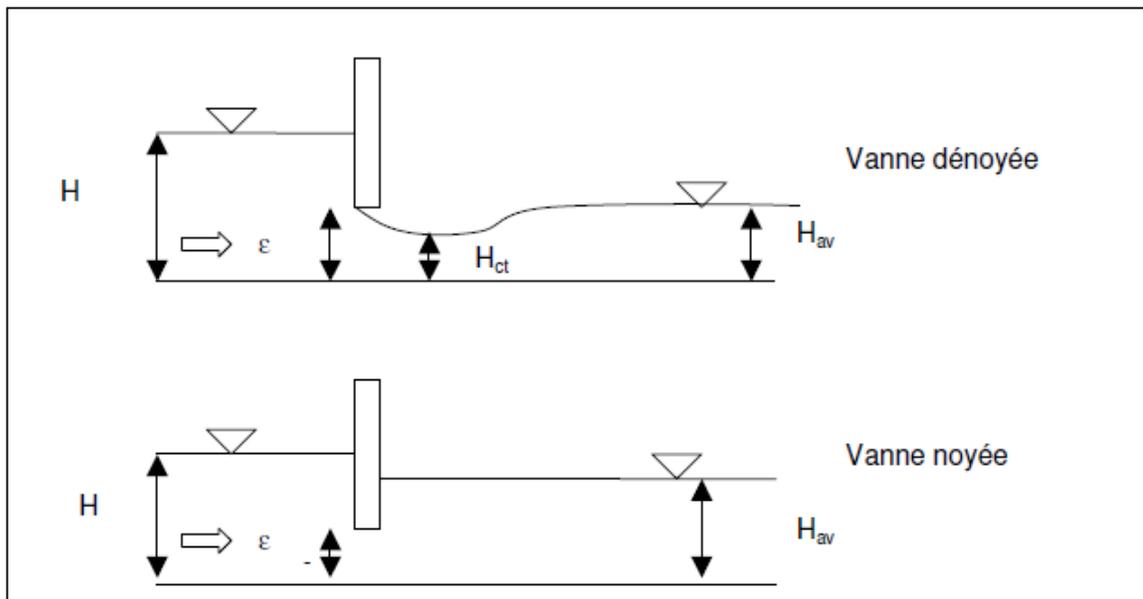
Figure 24 : Comparaison d'un échantillon composite et non-composite

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

## **Annexe E**

### **Estimation du débit sous-vanne**

Dans cette annexe est présentée la méthode d'estimation de débit sous-vanne utilisée déjà pour le calcul de débit sous-vanne pour le barrage Cyrille-Delage (Paré-Bourque, 2007). Cette méthode consiste d'utiliser la théorie de Kréménetski. Ce modèle consiste à établir une relation qui permet de déterminer l'écoulement à travers une vanne rectangulaire dans un canal horizontal. Deux cas peuvent se présenter : vanne dénoyée et vanne noyée (Figure E.1). Pour identifier ces deux cas il faut déterminer la hauteur de l'eau en amont de la vanne  $h_{amont}$ , la hauteur d'eau en aval de la vanne  $h_{aval}$  et la position de la vanne  $a$ .



**Figure E.1 :** Vanne noyée et dénoyée (Paré-Bourque, 2007)

Lorsque la vanne est dénoyée, l'eau peut subir une contraction et une nouvelle hauteur d'eau est définie  $h_{ct}$ . La vanne est noyée lorsque cette condition est respectée :

$$\frac{h_{aval}}{h_{ct}} \left( \frac{h_{aval}}{h_{ct}} + 1 \right) > 4V^2 \left( \frac{h_{amont}}{h_{ct}} - 1 \right)$$

$V$  est le coefficient de vitesse qui est égal à 0.96 pour une vanne installée sur un fond horizontal dans un canal sans chute.

La hauteur contractée est en fonction de l'ouverture de la vanne et un coefficient de contraction  $\epsilon'$  qui lui-même dépend de l'ouverture de vanne et la hauteur d'eau en amont.

$$h_{ct} = \epsilon'a$$

$\epsilon'$  peut être déterminé par deux équations. La limite pour chacune est la fraction  $a/h_{amont}$ .

La figure E.2 permet de déterminer les deux équations.

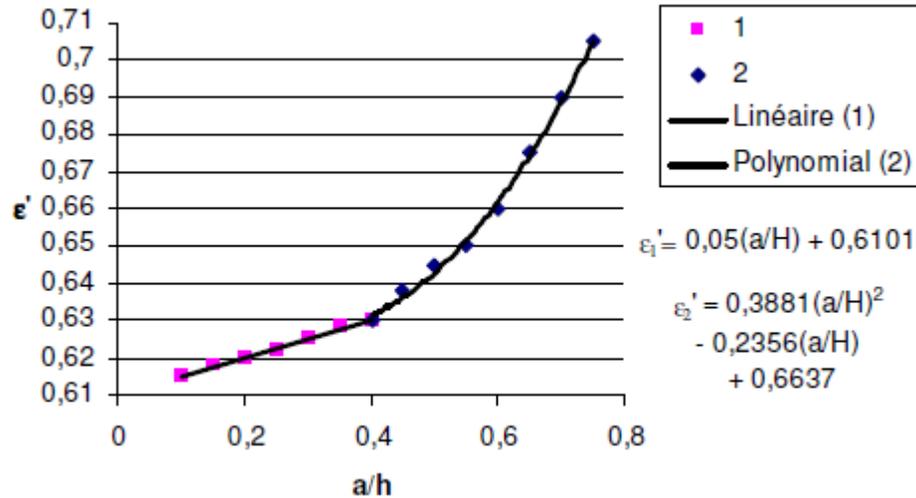


Figure E.2: Détermination du paramètre  $\epsilon'$  (Paré-Bourque, 2007)

Pour le calcul du débit dans le cas de la vanne noyée, il faut déterminer la vitesse de la partie décontractée,  $v_{ct} = V\sqrt{2g(h_{amont} - h_{ct})}$

Le débit dénoyé est déterminé comme suit :

$$m = 4(V\epsilon')^2 a^2 \frac{h_{aval} - h_{ct}}{h_{aval} h_{ct}}$$

$$h_z = \sqrt{h_{aval}^2 - m \left( h_{amont} - \frac{m}{4} \right) + \frac{m}{2}}$$

$$Q_n = V h_{ct} b \sqrt{2g(h_{amont} - h_z)}$$

Avec  $b$  la largeur de la vanne.

Dans le cas d'une vanne dénoyée, le débit sera égal à

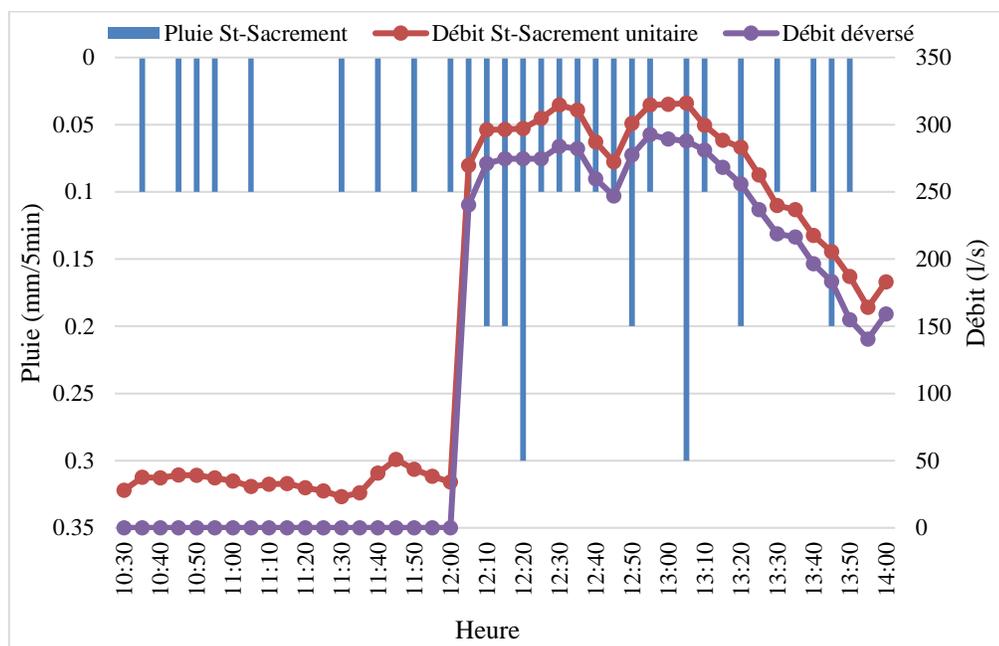
$$Q_d = h_{ct} b v_{ct}$$

## **Annexe F**

### **Courbes pluie- débit**

Pour l'événement du 27-06-17, la vanne n'était pas dans l'eau et il n'y avait pas de déversement vers le bassin de rétention, il était impossible de faire un bilan de débit pour cet événement. Les données de débit à l'intercepteur n'étaient disponibles qu'à partir du 15-09-17.

### F.1. Événement du 07-09-17



*Figure F.1 : Évolution des débits dans la chambre de contrôle St-Sacrement pour l'événement du 07-09-17*

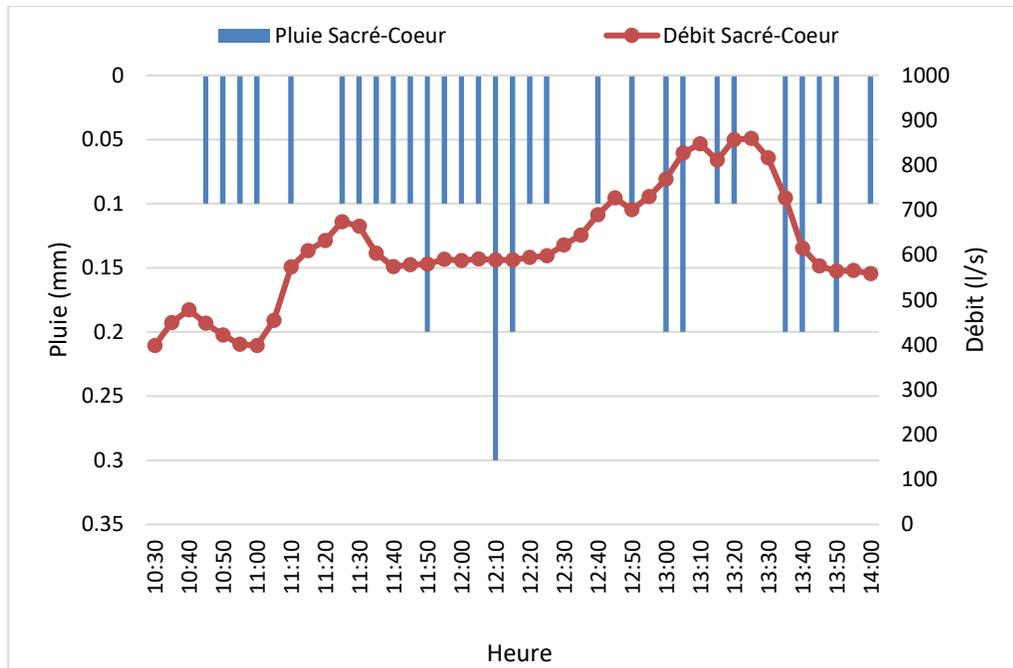


Figure F.2 : Évolution des débits dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur pour l'événement du 07-09-17

## F.2. Événement du 02-11-17

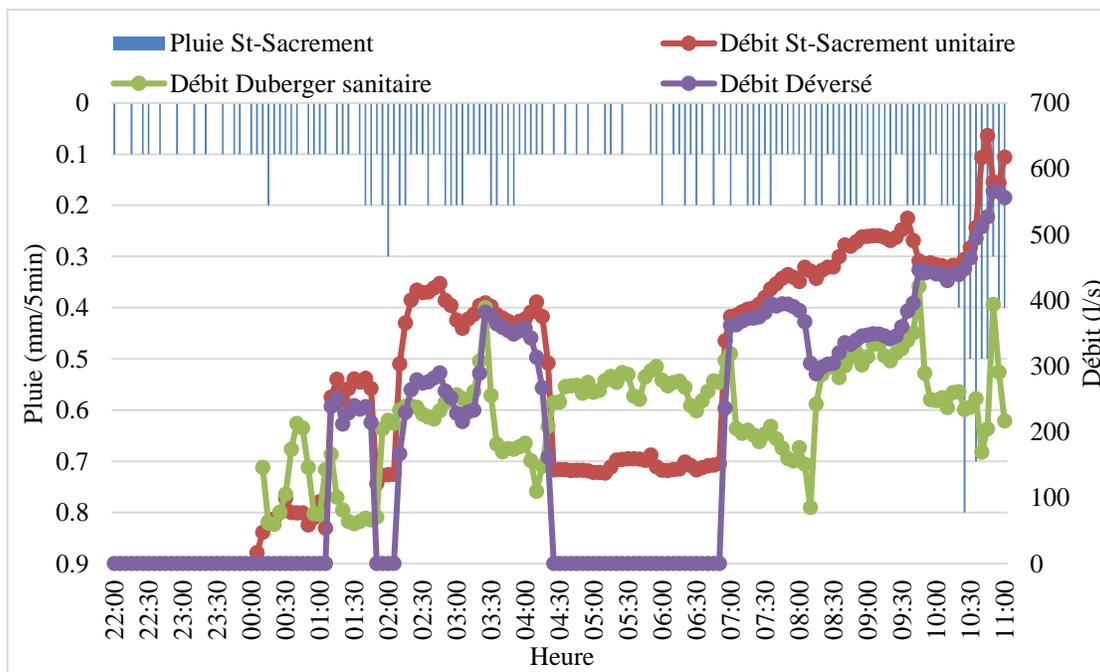


Figure F.3 : Évolution des débits dans la chambre de contrôle St-Sacrement pour l'événement du 02-11-17

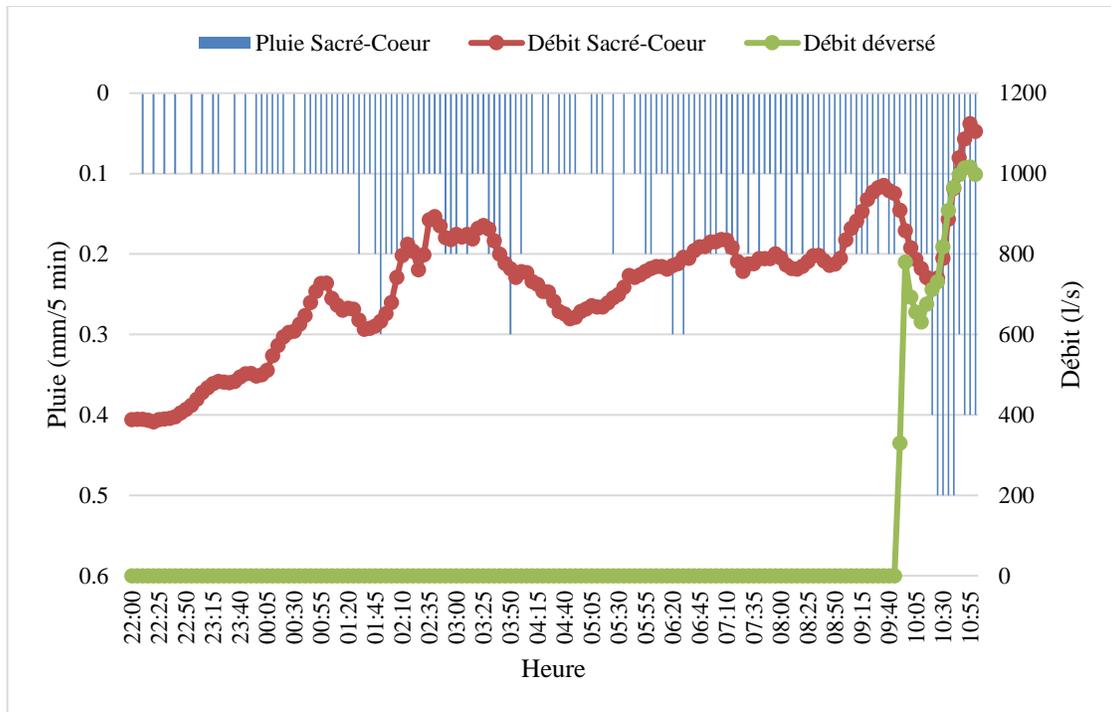


Figure F.4 : Évolution des débits dans la chambre de contrôle Sacré-Coeur pour l'événement du 02-11-17

### F.3. Événement du 05-11-17

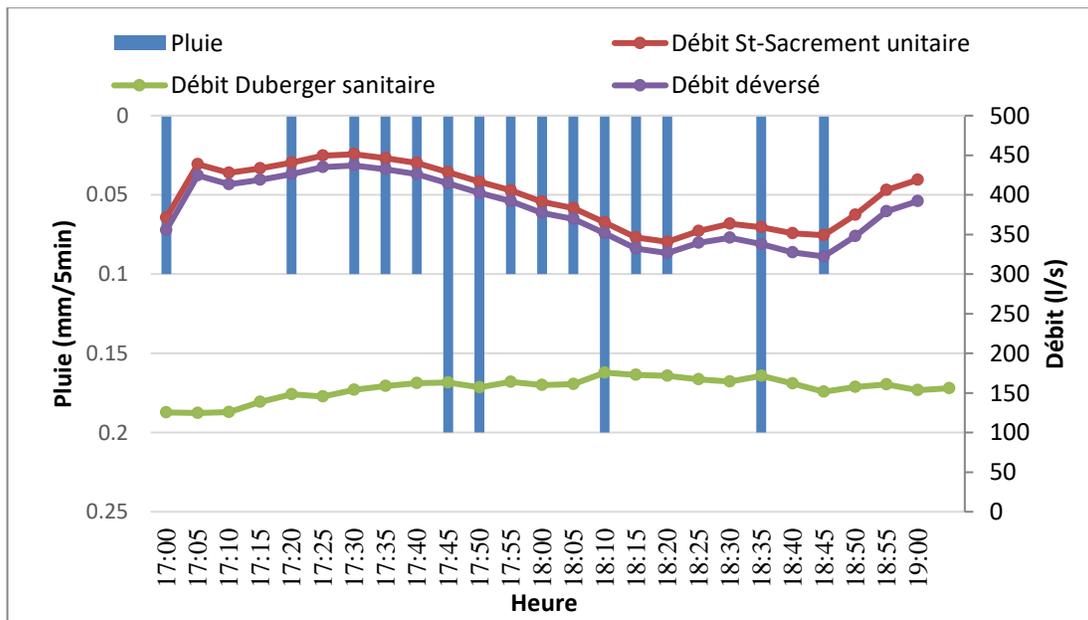
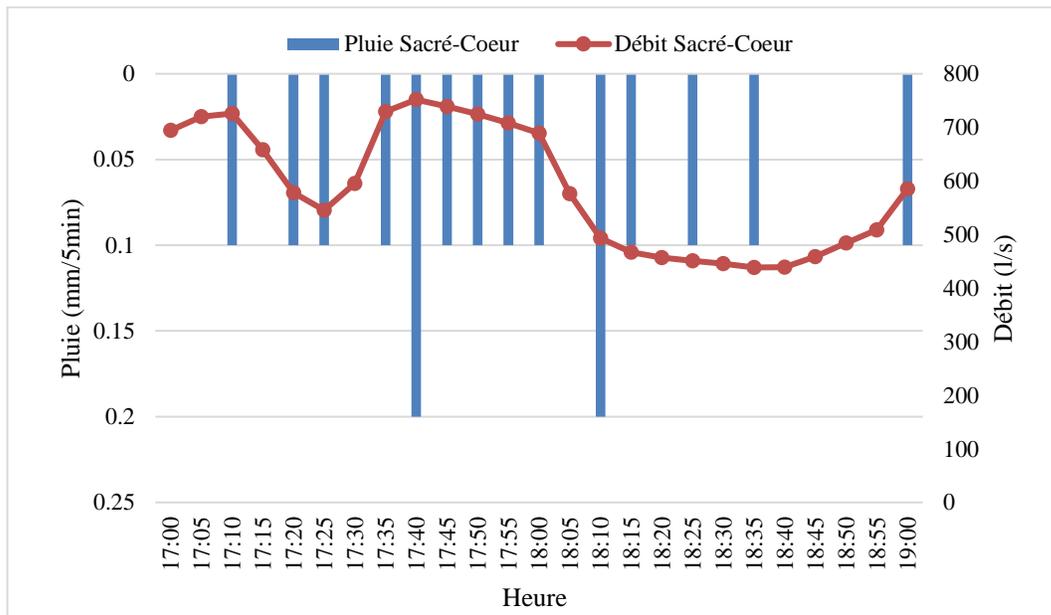


Figure F.5 : Évolution des débits dans la chambre de contrôle St-Sacrement pour l'événement du 05-11-17



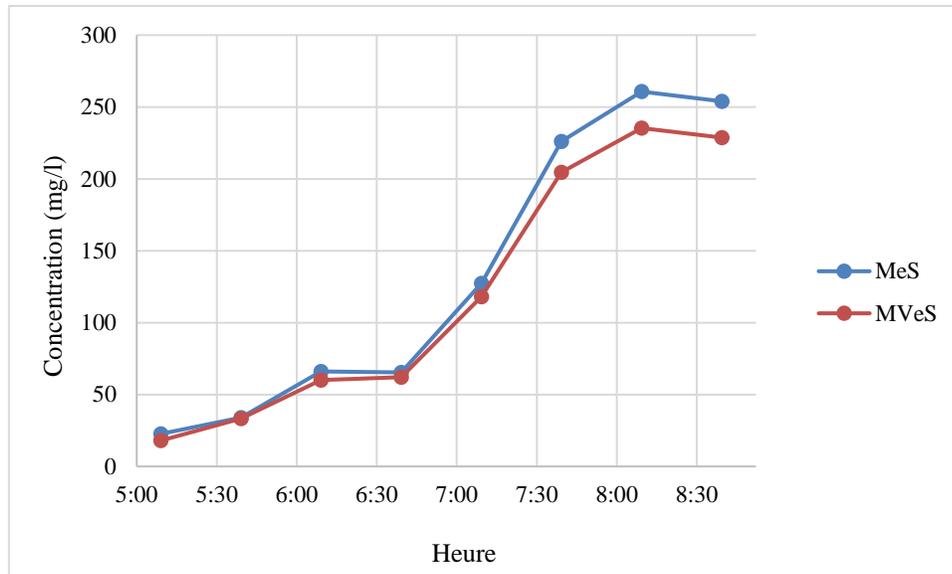
*Figure F.6 : Évolution des débits dans la chambre de contrôle Sacré-Cœur pour l'évènement du 05-11-17*

## **Annexe G**

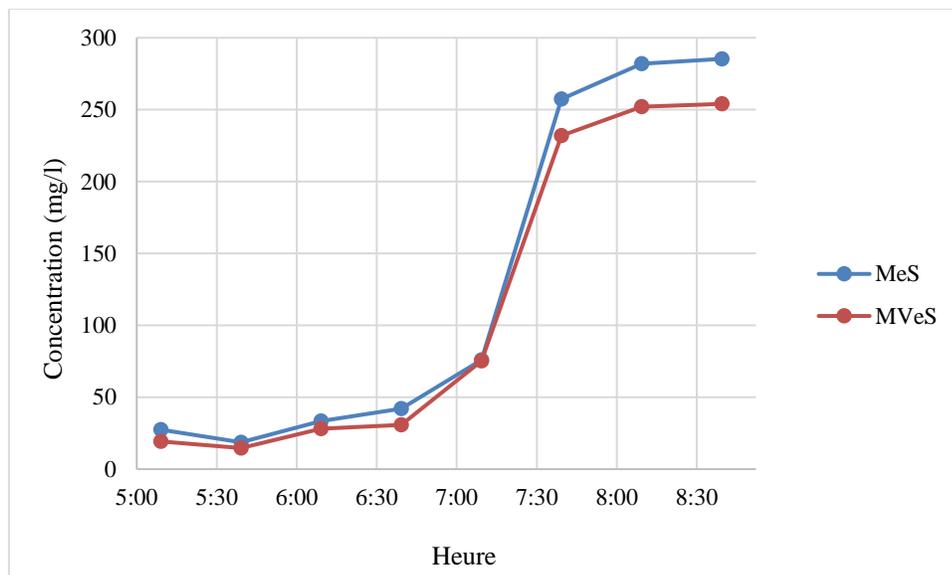
### **Pollutogrammes utilisés pour l'analyse en temps sec**

## G.1. Chambre de contrôle St-Sacrement

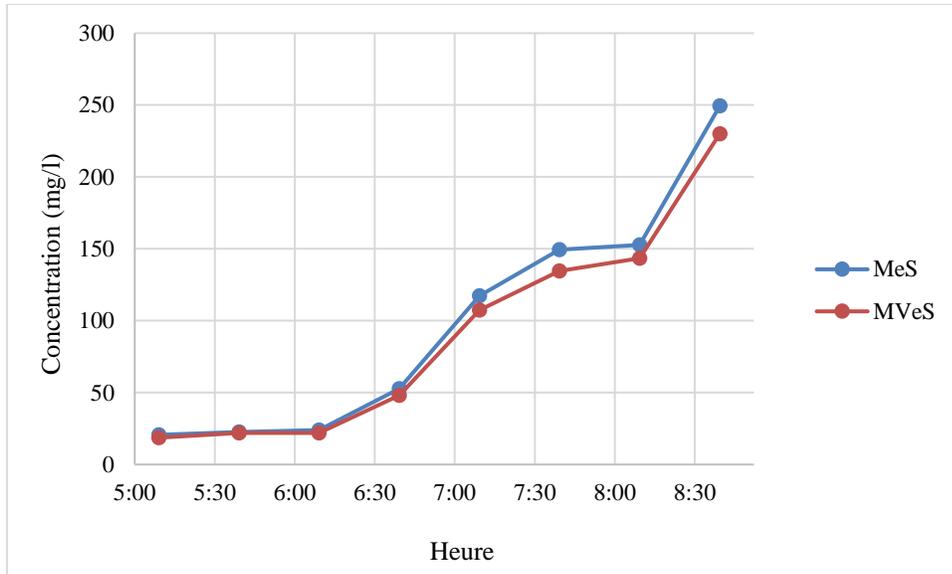
### G.1.1. Période entre 05h-09h



*Figure G.1 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle St-Sacrement (20/07/17 05h-09h)*

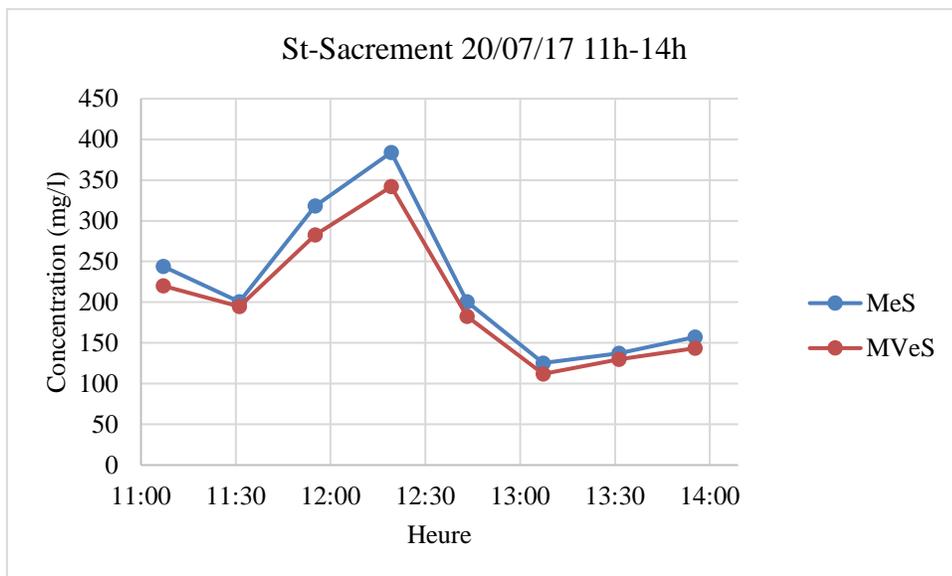


*Figure G.2 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle St-Sacrement (12/10/17 05h-09h)*

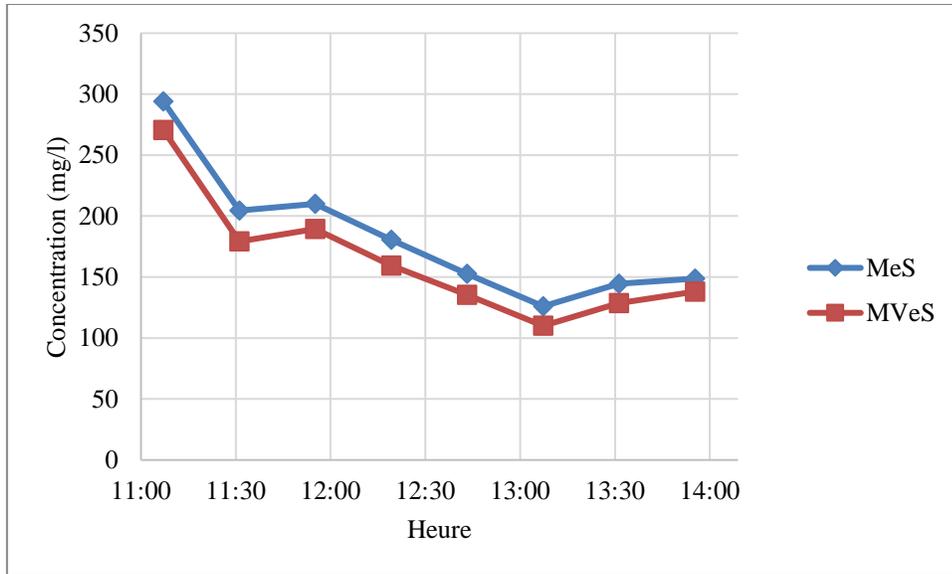


*Figure G.3 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle St-Sacrement (09/11/17 05h-09h)*

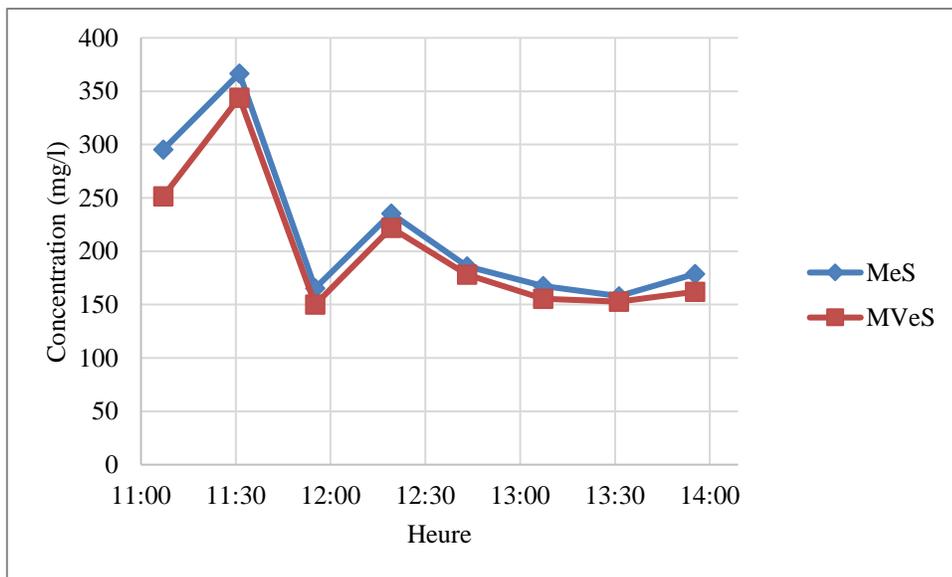
**G.1.2. Période entre 11h-14h**



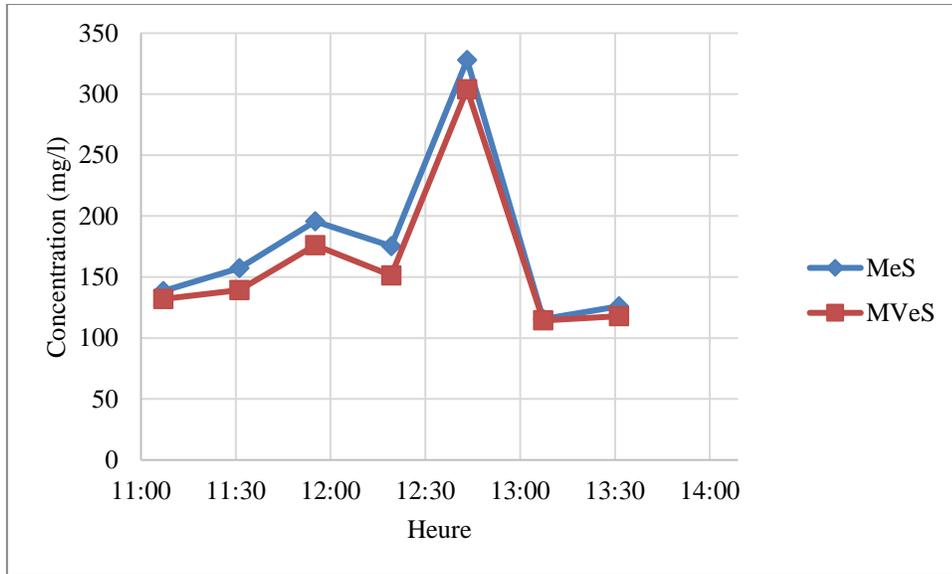
*Figure G.4 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle St-Sacrement (20/07/17 11h-14h)*



*Figure G.5 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle St-Sacrement (24/09/17 11h-14h)*

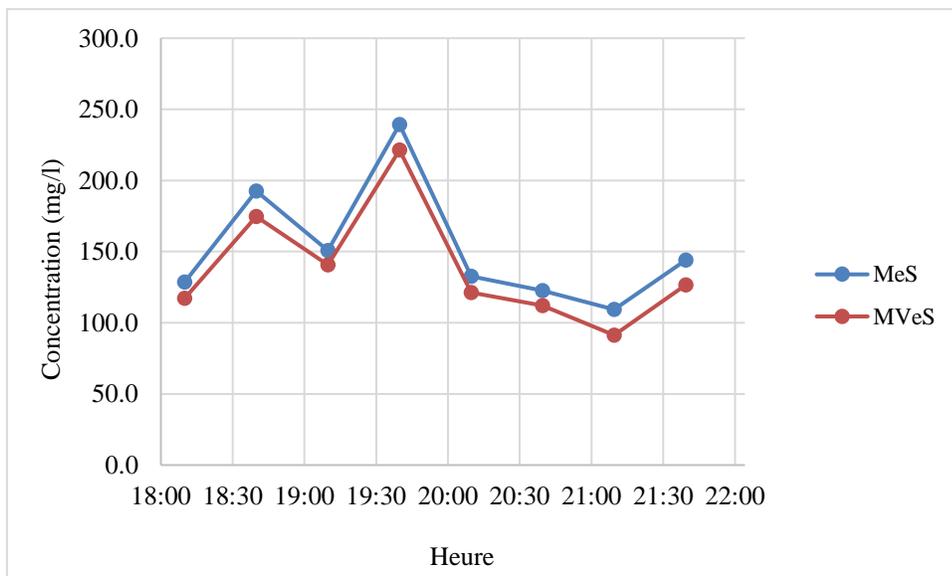


*Figure G.6 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle St-Sacrement (01/10/17 11h-14h)*

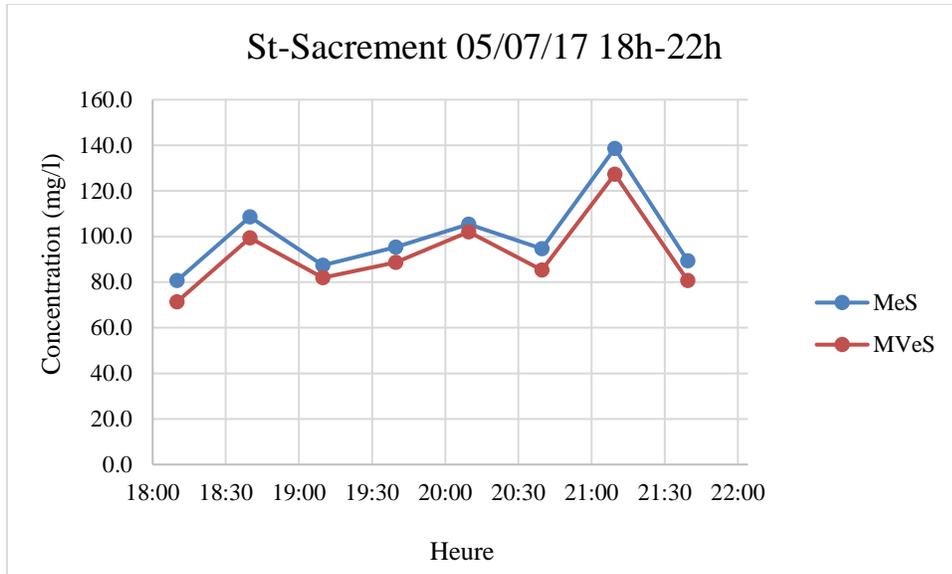


*Figure G.7 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle St-Sacrement (17/10/17 11h-14h)*

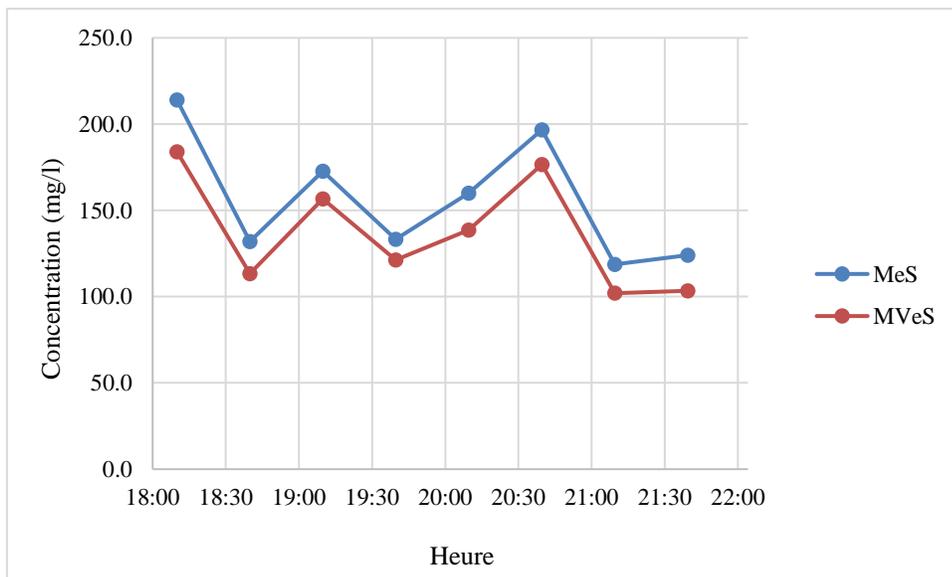
**G.1.3. Période entre 18h-22h**



*Figure G.8 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle St-Sacrement (20/07/17 18h-22h)*



**Figure G.9 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle St-Sacrement (05/07/17 18h-22h)



**Figure G.10 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle St-Sacrement (06/09/17 18h-22h)

## G.2. Réseau sanitaire Duberger

### G.2.1. Période entre 05h-09h

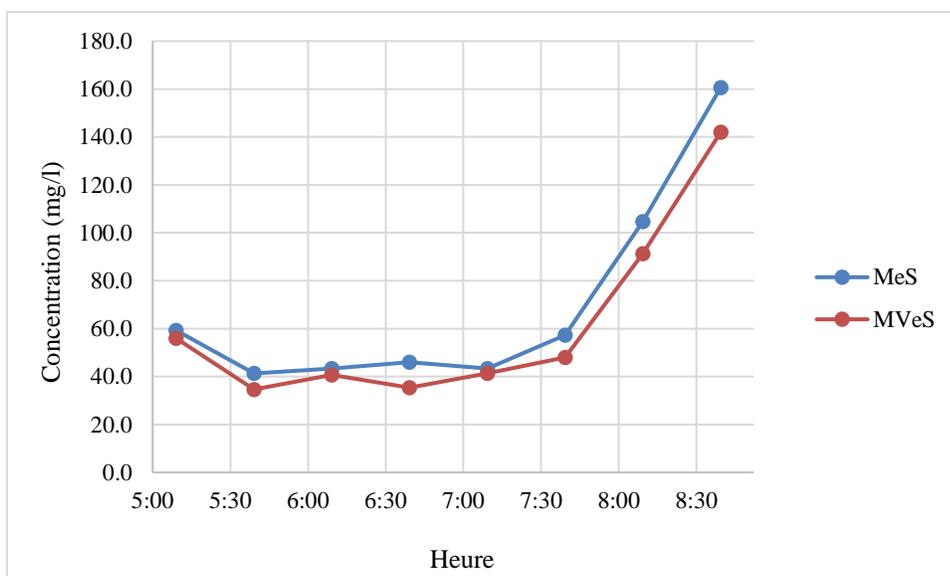


Figure G.11 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (09/11/17 05h-09h)

### G.2.2. Période entre 11h-14h

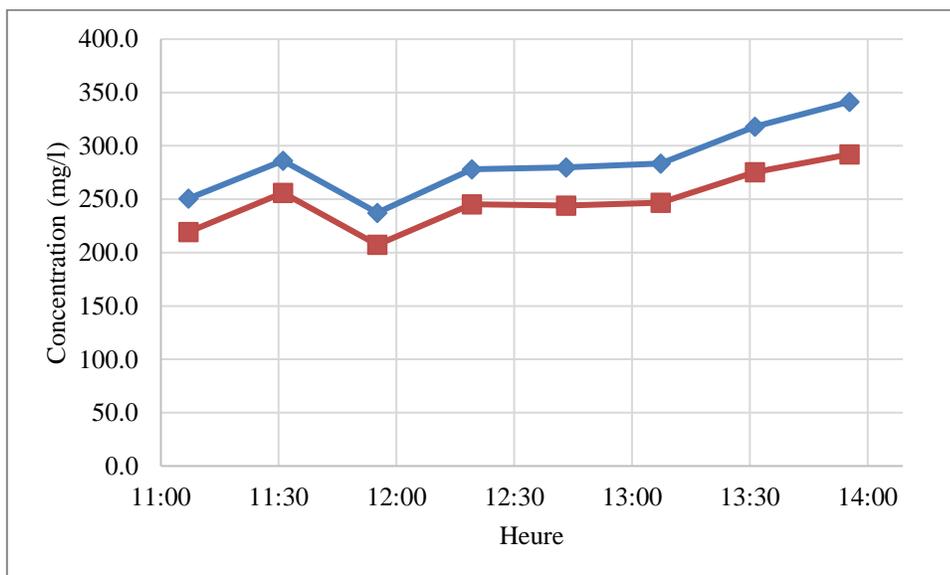
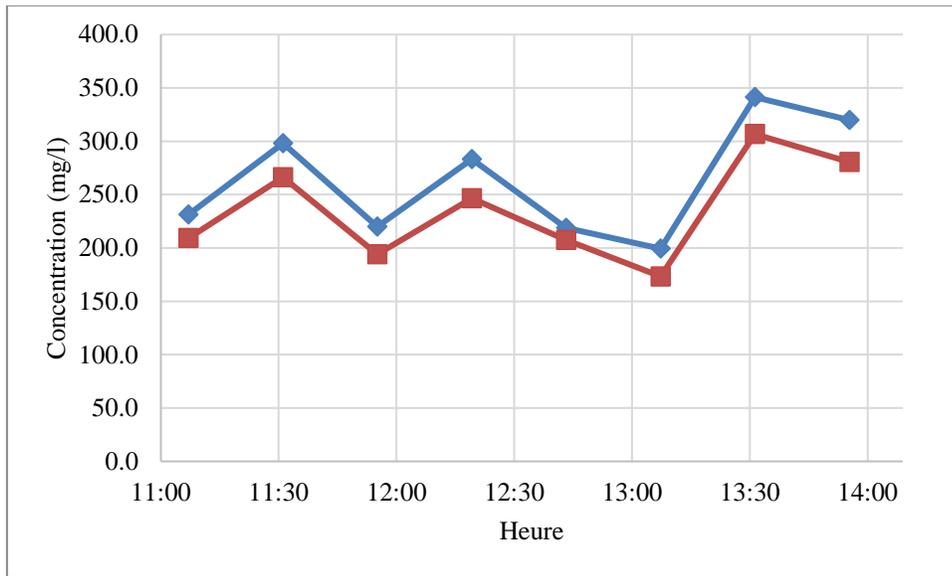
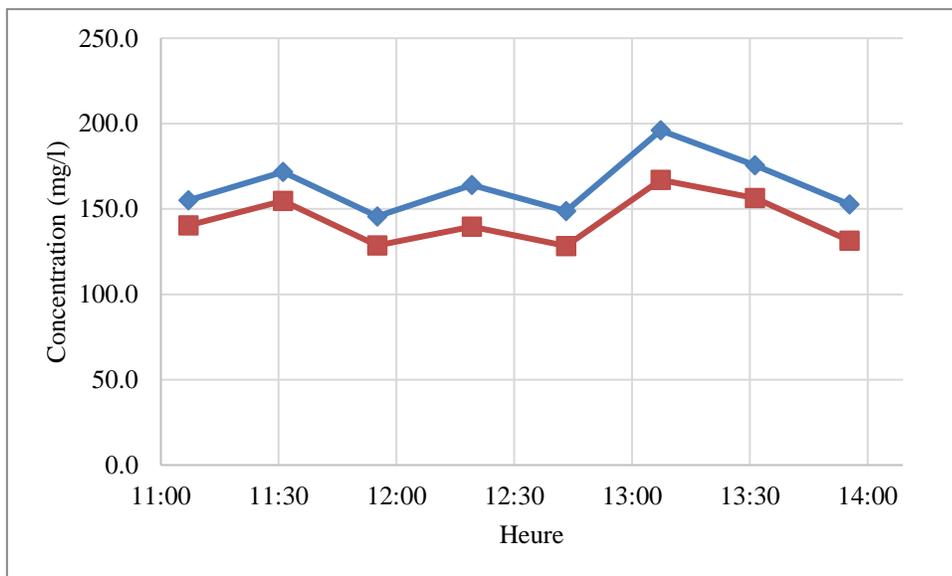


Figure G.12 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (24/09/17 11h-14h)

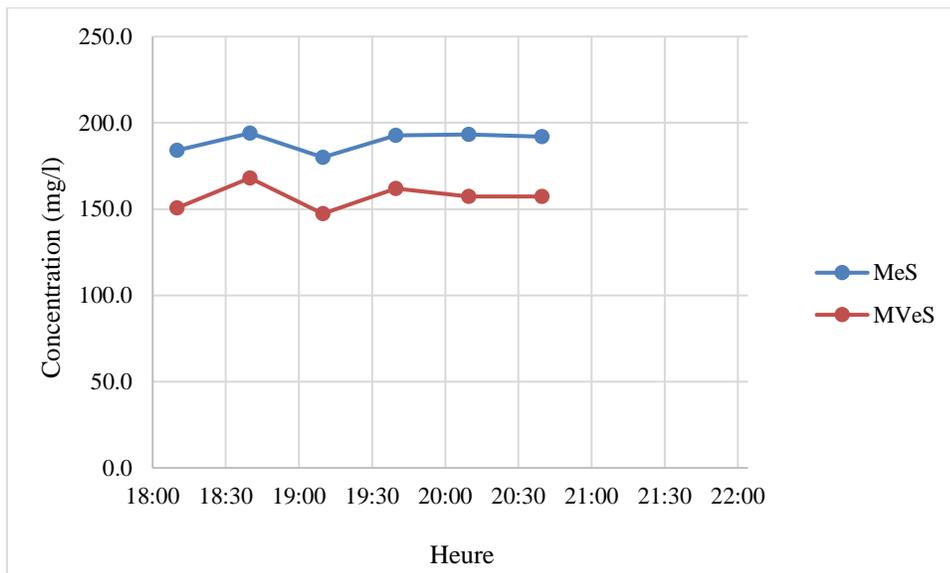


**Figure G.13 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (01/10/17 11h-14h)

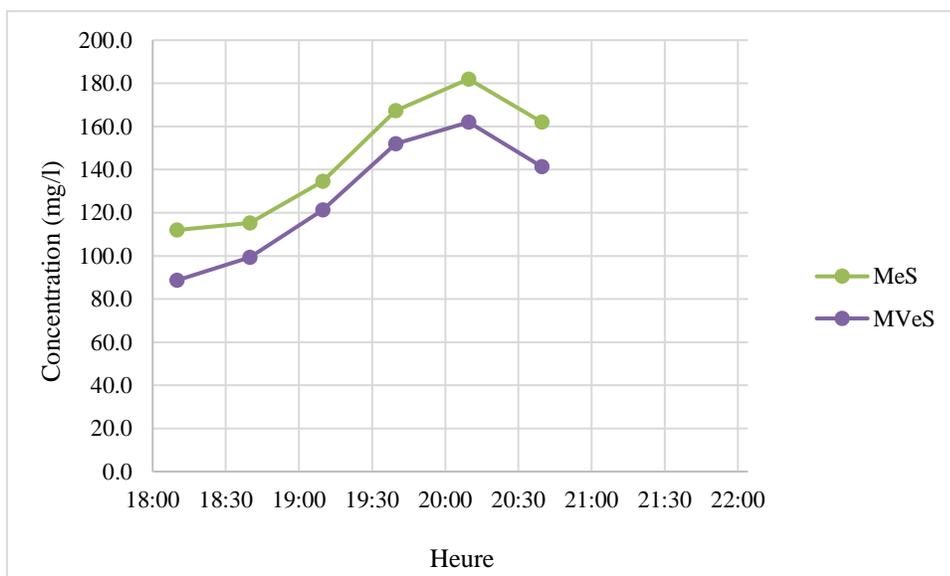


**Figure G.14 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (17/10/17 11h-14h)

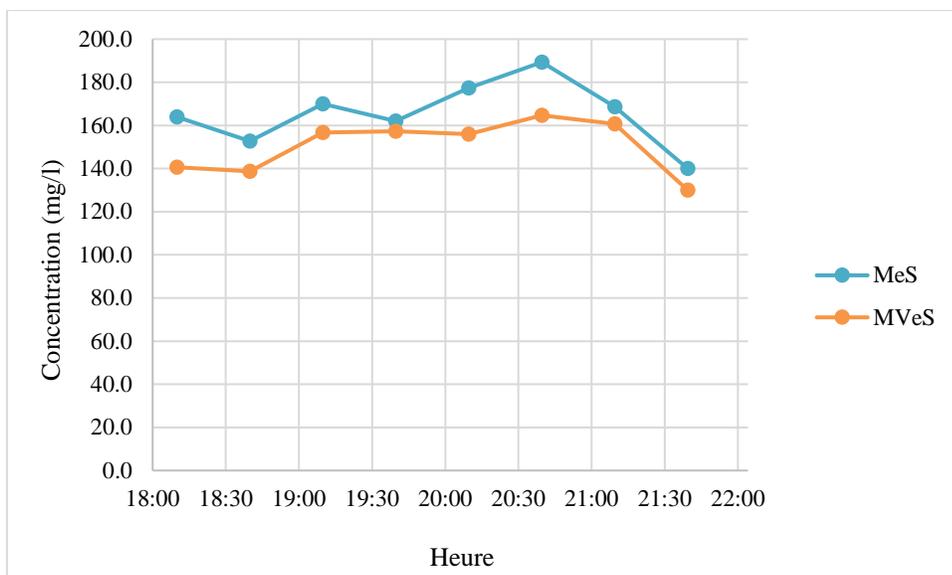
### G.2.3. Période entre 18h-22h



*Figure G.15 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (24/09/17 18h-22h)*



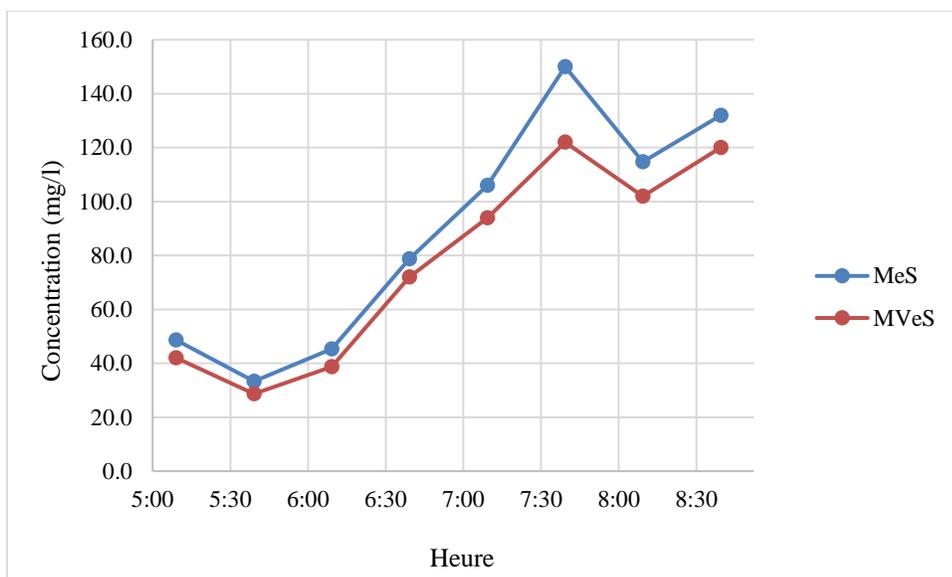
*Figure G.16 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (17/10/17 18h-22h)*



*Figure G.17 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec au niveau du réseau sanitaire Duberger (15/11/17 18h-22h)*

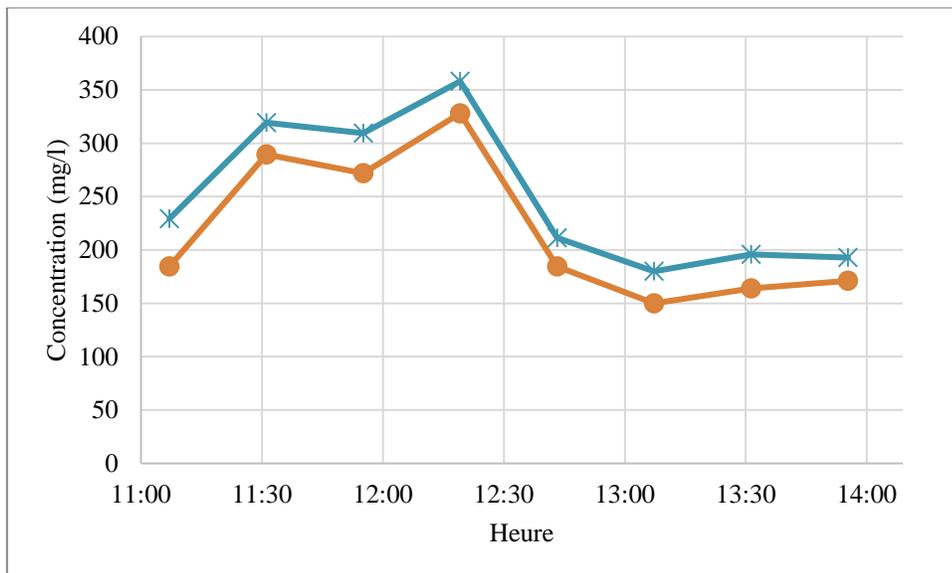
### G.3. Chambre de contrôle Sacré-Coeur

#### G.3.1. Période entre 05h-09h

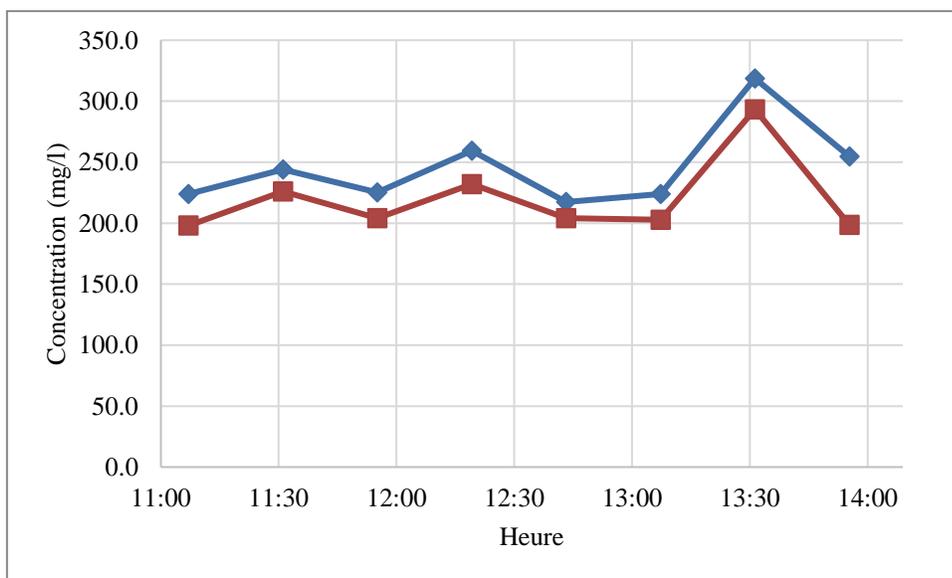


*Figure G.18 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (09/11/17 05h-09h)*

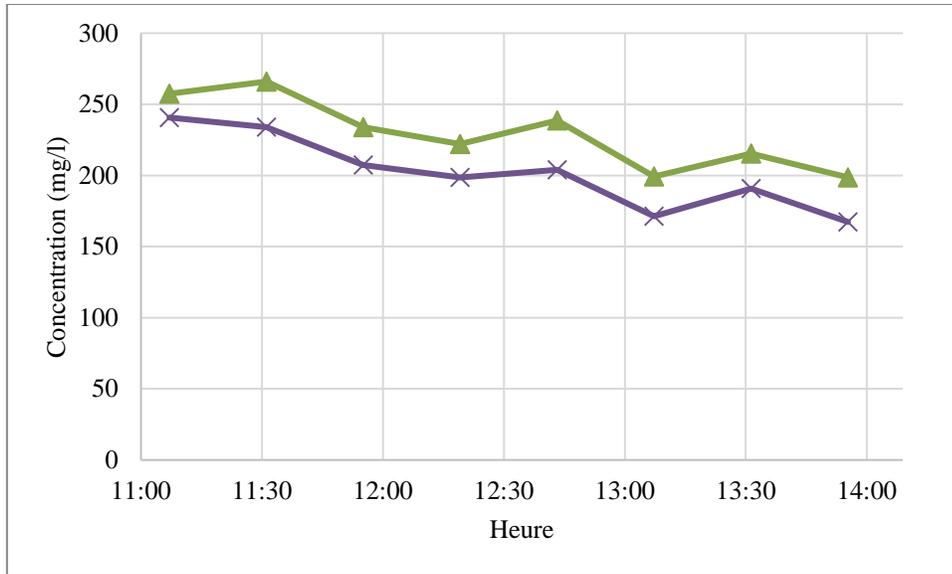
### G.3.2. Période entre 11h-14h



*Figure G.19 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (17/10/17 11h-14h)*

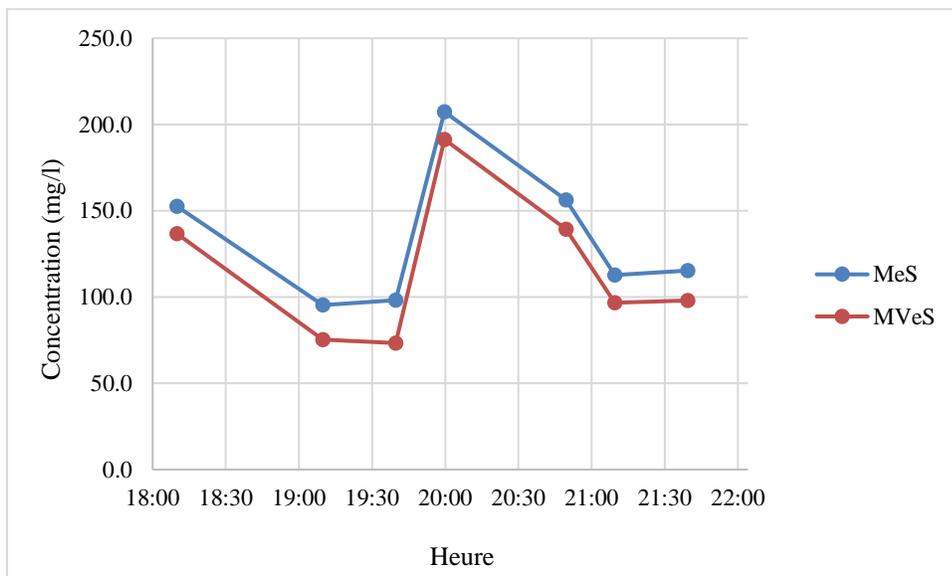


*Figure G.20 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (24/09/17 11h-14h)*

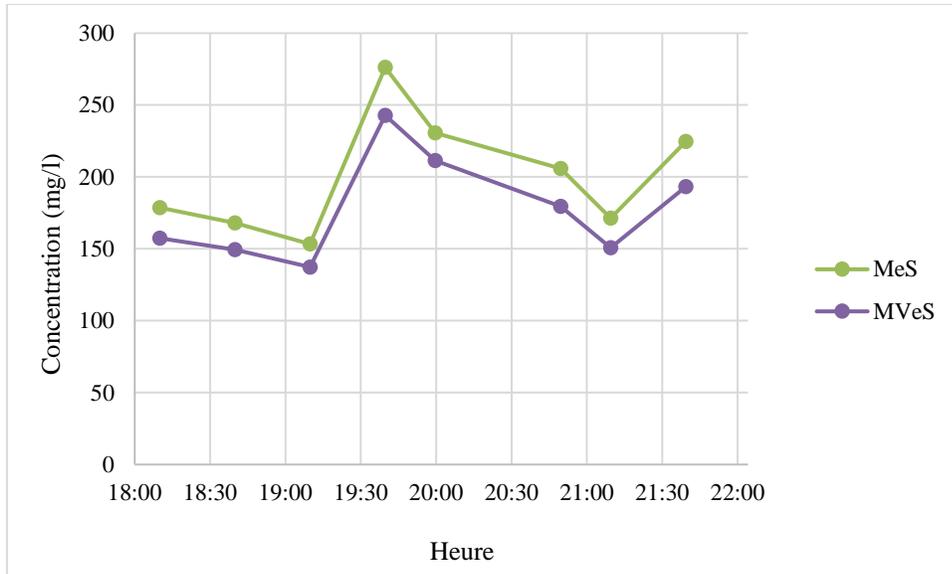


*Figure G.21 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (01/10/17 11h-14h)*

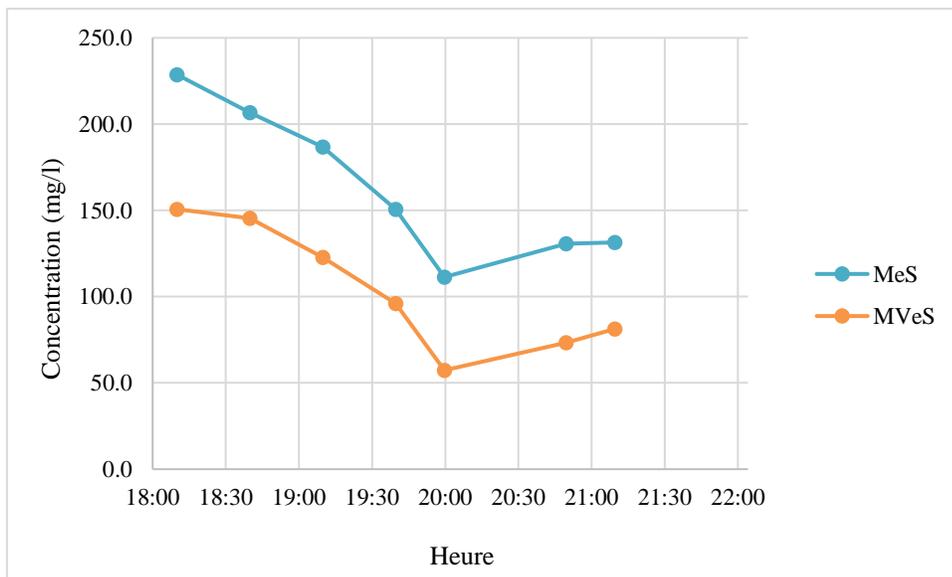
### G.3.3. Période entre 18h-22h



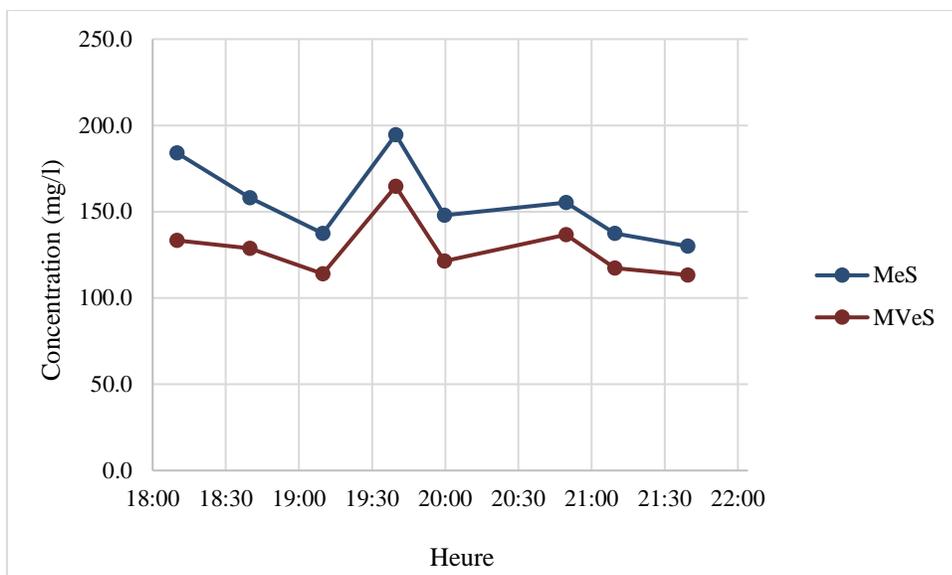
*Figure G.22 : Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (06/09/17 18h-22h)*



**Figure G.23 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (24/09/17 18h-22h)



**Figure G.24 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (17/10/17 18h-22h)



**Figure G.25 :** Évolution de la concentration en MeS et MVeS en temps sec à la chambre de contrôle Sacré-Cœur (15/11/17 18h-22h)