

THESE

Présentée pour l'obtention du titre de DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

Spécialité : Sciences et Techniques de l'Environnement

LOCALISATION, NATURE ET DYNAMIQUE DE L'INTERFACE EAU-SEDIMENT EN RESEAU D'ASSAINISSEMENT UNITAIRE

par

Claire OMS

Thèse soutenue le 6 janvier 2003, devant le jury composé de :

M. Alain HEDUIT	Président
M. Ghassan CHEBBO	Directeur de thèse
Mme Marie-Christine GROMAIRE	Co-directeur de thèse
M. Richard M. ASHLEY	Rapporteur
M. Vladan MILISIC	Rapporteur
M. Jean-Luc BERTRAND-KRAJEWSKI	Examinateur
M. Alain CONSTANT	Membre invité
M. Mathieu AHYERRE	Membre invité



Des lendemains sans nuage Dessin et scénario : B. Gazzotti, R. Meyer, F. Vehlmann Couleurs : B. Devilliers Collection "Signé" Les éditions du LOMBARD. 2001.

Remerciements

Ce travail de recherche a été mené au CEREVE (Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Eau, la Ville et l'Environnement), laboratoire commun à l'ENPC (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées), à l'ENGREF (Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts) et à l'Université Paris XII-Val de Marne. Il a été réalisé dans le cadre de l'Ecole Doctorale Ville et Environnement.

Cette thèse a été effectuée sous la direction de Monsieur Ghassan CHEBBO directeur de recherche à l'ENPC et membre de l'Université du Liban, qui a suivi ce travail et l'a guidé de ses conseils et remarques. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour son soutien. Au CEREVE, Madame Marie-Christine GROMAIRE a encadré quotidiennement ce travail. Sa disponibilité et son investissement permanent m'ont beaucoup aidé et je tiens à lui adresser l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie Monsieur Alain HEDUIT qui m'a fait l'honneur de présider au jury de thèse, ainsi que les professeurs Vladan MILESIC et Richard ASHLEY qui ont accepté le rôle de rapporteurs. Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Mathieu AHYERRE qui m'a mis le pied à l'étrier au cours de mon DEA et qui a toujours su me conseiller judicieusement. Enfin, je remercie Messieurs Jean-Luc BERTRAND-KRAJEWSKI et Alain CONSTANT qui ont accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

Je remercie Messieurs Jean-Marie MOUCHEL, directeur du CEREVE, et Jean-Claude DEUTSCH, directeur de l'Ecole Doctorale Ville et Environnement, qui m'ont permis de travailler dans de très bonnes conditions pendant ces trois années de thèse et qui ont toujours eu une oreille attentive à mes soucis.

Cette recherche a été possible grâce au soutien financier des organismes suivants : l'Agence de l'Eau Seine et Normandie, la Ville de Paris, le Syndicat Intercommunal pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et le Ministère de l'Education et de la Recherche. Les expérimentations réalisées à l'étranger ont bénéficié du soutien financier du programme EGIDE. Le travail expérimental a nécessité la participation de nombreux membres du CEREVE : chercheurs, thésards et stagiaires. Je pense tout particulièrement à Naji BERRY, à Johan GLASSER, à Marie-Perrine MIOSSEC et à Laura DIEUPART-RUEL qui m'ont assisté pour les expériences réalisées sur Le Marais. Enfin, cette recherche n'aurait pas abouti sans la détermination et l'expérience professionnelle de Mohamed SAAD, ingénieur de recherche au CEREVE.

Je tiens à remercier également Mr OBRY, Mr CONSTANT et les personnels du Service d'Assainissement de la ville de Paris pour leur aide technique.

J'adresse mes plus sincères remerciements au professeur Richard ASHLEY qui m'a aidé à organiser et à réaliser les expériences à Dundee, dans le Yorkshire ainsi qu'à Hildesheim. Je remercie également Messieurs Erik RISTENPART, Trevor MCILHATTON, Ruben SAKRABANI et Hazem GOUDA pour leur accueil chaleureux et leur soutien dans les égouts écossais et allemands.

Je remercie aussi Messieurs Dominique LAPLACE et Christian GARRIT, de la Société d'Exploitation du Réseau d'Assainissement de Marseille, pour leur aide durant la réalisation d'expériences dans les égouts de Marseille.

Merci enfin à Jérôme DISPAN, Claire RELIANT, Vincent ROCHER, Catherine GOURLAY, Assem KANSO, Denis QUELO, Sam AZIMI, Thomas BONIERBALE, Nassima MOUHOUS, Jaouad BOUTAHAR, Catherine CHARLEUX ainsi qu'à tous les membres du CEREVE pour l'ambiance chaleureuse et le soutien qu'ils m'ont apportés.

Je n'oublie pas l'ensemble de mes amis qui ont toujours su montrer un grand intérêt pour mes aventures "égoutières".

Et pour finir, je remercie les membres de ma famille et plus particulièrement mon mari Stéphane pour leur patience et toutes ces petites (et grandes !) attentions qui m'ont réchauffé le cœur.

Résumé

La maîtrise de la pollution des rejets urbains par temps de pluie (RUTP) prend une place croissante dans les problèmes d'assainissement. Depuis 1970, un grand nombre d'études consacrées à la pollution des eaux de temps de pluie en milieu urbain ont été réalisées dans différents pays. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'importance de la contribution des dépôts en réseaux d'assainissement unitaires à la pollution des RUTP et le rôle capital des stocks de matière organique situés à l'interface eau/sédiment. Cependant, les données relatives à ces stocks situés à l'interface eau/sédiment sont souvent contradictoires et lacunaires. Le principal objectif de ce travail de thèse est d'apporter de nouvelles connaissances vis-à-vis des stocks organiques à l'interface eau-sédiment. Pour cela de nouvelles méthodes d'observation ont été développées.

• La mise au point et l'utilisation d'un endoscope ont permis d'identifier et de localiser deux types d'interface organique sur différents sites européens :

- une couche immobile dans des creux des dépôts situés à l'amont des collecteurs, dans les zones présentant de très faibles vitesses d'écoulement (v < 0,14m/s) et des pentes de radier très faibles (p < 0,05%) à Paris et à Marseille ;

- des solides en déplacement près du fond (near bed solids) dans des zones de dépôts situés à l'aval des collecteurs et présentant des vitesses d'écoulement faibles (0,2 m/s < v < 0,5 m/s) et des pentes de radier très faibles (p < 0,06%) à Dundee (U.K.) et à Hildesheim (Allemagne).

La mise au point et l'utilisation d'une boite d'observation encastrée dans la paroi d'un collecteur du Marais a permis de montrer que le couche organique immobile située à l'interface eau-sédiment est fortement hétérogène et qu'elle abrite une activité biologique. Cette couche se forme rapidement puis se stabilise à un niveau donné. Cependant elle subit des remaniement locaux en surface liés à des phénomènes aléatoires (par exemple : le passage d'un élément flottant de grosse taille). Enfin, durant des augmentations de débit elles est partiellement érodée et transportée en suspension et en charriage.

Mots Clés

Réseau d'assainissement unitaire ; Rejets urbains de temps de pluie ; Interface eau sédiment ; Couche organique ; Dépôts ; Mécanismes d'érosion ; Mécanismes de formation ; Contrainte de cisaillement.

Abstract

Pollutant release from sewer systems has long been a concern for sewer managers. Since 1970's, several studies undertaken have shown that the erosion of sewer sediments is one of the major sources of pollution for combined sewer overflows (CSO) and that an organic deposit, situated at the water-sediment interface, plays an important role. However, the results of the various studies of this material reveal differences in the nature and the dynamics of the interfacial near bed sediments. New devices have been developed to observe the interface, in order to determine where this stock develops in combined sewers, which is its nature and how it evolves during dry and wet weather :

• a protocol based on an endoscope permits to observe in a non-destructive manner the water-sediment interface and so, to localise the organic stocks in a sewer. This system was applied on "Le Marais" catchment (Paris), and in the main collector of Dundee (UK) and Hildesheim (Germany).

- an immobile layer was observed in Paris and Marseille in sites where mean velocity is very slow(v < 0,14 m/s), bed slope is very low (J < 0,05 %) and bed sediment creates pools, at the upstream part of the collectors ;

- solids moving above to the bed (near bed solids) in the downstream part of collectors where mean velocity is slow (0,2 m/s < v < 0,5 m/s) and bed slope is very low (J < 0,06 %) in Dundee and Hildesheim.

• an off-line photographic system has been placed inside a box, embedded in the sewerwall, to obtain pictures of the interface at regular time steps. The system was installed in a collector of Le Marais. The pictures collected showed that the organic layer is an heterogeneous material with biological activity in it. The layer builds up rapidly to a stable depth during dry weather. However it is disturbed by local changes linked to random disruptive phenomena. During flow increases, the organic layer is partly eroded and it is transported in bed-load and in suspension.

Key Words

Combined sewer, Combined sewer overflows, water-sediment interface, organic layer, sediments, mechanisms of erosion, mechanisms of formation, shear stress.

Publications et Communications

Les principaux résultats de cette thèse ont fait l'objet de publications et de communications.

C. Oms, M.C. Gromaire-Mertz, R. DeSutter, G. Chebbo (2001). "Measurement of local bed shear stress in combined sewers"

"Urban Drainage Modeling" (proceedings of UDM Symposium, part of the World Water and Environmental Resources Congress), Orlando, Florida, May 20-24, 2001, Edited by Robert W. Brashear and Cedo Maksimovic, ASCE, pp.507-517 (ISBN 0-7844-0583-2).

C. Oms, R. Sakrabani, T. McIlhatton, G. Chebbo, R. Ashley (2002). "The nature of near bed solids in combined sewers"

"Global Solutions for Urban Drainage" (proceedings of the 9th International Conf. on Urban Drainage), Portland, Oregon, September 8-13, 2002. Edited by E.W. Strecker and W.C. Huber, ASCE, CD-Rom, 16 p. (ISBN 0-7844-0644-8).

C. Oms, M.C. Gromaire, G. Chebbo (2003). "In situ observation of the water-sediment interface in combined sewers, using endoscopy"

Water Science and Technology (IWA), Vol 47, n°4, pp. 11-18, 2003.

D. Laplace, C. Oms, M. Ahyerre, G. Chebbo, J. Lemasson, L. Felouzis (2003). "Removal of the organic surface layer in combined sewer sediment using a flushing gate" Water Science and Technology (IWA), Vol 47, n°4, pp. 19-26, 2003.

C. Oms, M.C. Gromaire, G. Chebbo (2003). "Localisation et observation de l'interface eausédiment en réseau d'assainissement unitaire"

"Eau dans la ville et développement durable, Actes des 13èmes Journées du DEA Sciences et Techniques de l'Environnement", Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp.15-30 (ISBN 0-7844-0583-2).

Deux publications complémentaires sont également en projet : la première reprendra la partie "Dynamique de l'interface eau-sédiment", la seconde reprendra les résultats de la collaboration européenne menée lors des observations avec l'endoscope.

Sommaire

PARTIE I. INTRODUCTION	.1
1. Contexte	2
2. Cadre de la thèse	3
2.1. Le programme de recherche « génération et transport de la pollution des rejets urbains par temps de pluie en réseau d'assainissement uniteire »	r 2
2.2. Vers un nouveau programme de recherche : « évolution spatiale des caractéristiques et de	s. 5
origines des polluants dans les réseaux d'assainissement unitaires »	4
2.3. Problématique de la thèse	6
3. Objectifs de la thèse	6
3.1. Etude du taux de cisaillement en réseau d'assainissement	6
3.2. Nature et localisation de l'interface eau-sédiment	7
3.3. Dynamique de l'interface eau-sédiment	. 7

CHAPITRE 1. INTRODUCTION	. 10
CHAPITRE 2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	. 11
1. ECOULEMENT EN RÉGIME UNIFORME PERMANENT	. 11
1.1. Equations de Saint-Venant	. 11
1.1.1. Ecoulement permanent	. 12
1.1.2. Ecoulement permanent uniforme	. 12
1.2. Structure verticale de l'écoulement	. 13
1.3. Les courants secondaires	. 14
2. CONTRAINTE DE CISAILLEMENT À LA PAROI	. 15
2.1. Coefficient de frottement	. 15
2.2. Contrainte de cisaillement à la paroi	. 17
2.2.1. Contrainte de cisaillement, loi de Reynolds	. 17
2.2.2. Contrainte de cisaillement, distribution logarithmique des vitesses	. 18
2.2.3. Contrainte de cisaillement, équation de mouvement	. 19
2.3. Evaluation du taux de cisaillement en réseaux d'assainissement	. 20
2.3.1. Loi de Reynolds	. 20
2.3.2. Distribution logarithmique des vitesses	. 20
2.3.3. Equation de mouvement	. 20
2.3.4. Conclusion	. 21
CHAPITRE 3. Expériences réalisées	. 23
1. Sites d'étude	. 23
1.1. Site en laboratoire	. 23
1.2. Sites en réseau d'assainissement	. 24
1.2.1. Sites sans dépôt	. 24
1.2.2. Sites avec dépôt	. 24
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES	. 25
2.1. La distribution des tensions de Reynolds	. 25
2.1.1. Matériel : Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)	. 25
2.1.2. Méthodologie	. 26
2.2. La distribution logarithmique des vitesses	. 27
2.2.1. Matériel : micro-moulinet	. 27
2.2.2. Méthodologie	. 28
2.3. Evaluation à partir de l'équation de mouvement	. 28
2.3.1. A partir de la pente du radier	. 28

2.3.2. A partir de la pente d'énergie	
CHAPITRE 4. RÉSULTATS	
1. Analyse du matériel utilisé	
1.1. Comparaison des résultats obtenus suivant le matériel utilisé	
1.2. Incertitudes associées aux matériels utilisés	
1.2.1. Les incertitudes liées à l'appareil	
1.2.2. Les incertitudes liées au positionnement de l'appareil	
2. ANALYSE DU CALCUL DU CISAILLEMENT SANS DÉPÔTS	
2.1. Analyse des données ADV	
2.2. Analyse des données de vitesse du micro-moulinet	
2.3. Evaluation du taux de cisaillement avec l'équation de mouvement	35
2.3.1. Pente du radier	35
2.3.2. Pente d'énergie	35
2.4. Variabilité spatiale du taux de cisaillement au fond	
2.5. Discussion : quelle méthode choisir ?	
3. ANALYSE DU CISAILLEMENT AVEC DÉPÔTS	39
3.1. Caractéristiques des dépôts	39
3.1.1. Relevé des hauteurs de dépôts sur les sites étudiés	39
3.1.2. Analyse granulométrique du dépôt	40
3.2. Analyse des données de vitesse	
3.2.1. Collecteur Saint-Gilles	
3.2.2. Collecteur Rivoli	
3.3. Analyse des données ADV	
3.4. Discussion	45
CHAPITRE 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	47

PARTIE III. CARACTÉRISATION DE L'INTERFACE EAU-SÉDIMENT 49

•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	.49
CHAPITRE 1. INTRODUCTION	. 50
CHAPITRE 2. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	. 51
1. Typologie des dépôts	. 51
1.1. Les biofilms	. 51
1.2. Les dépôts grossiers	. 52
1.3. L'interface eau-sédiment	. 52
1.3.1. Le dépôt de type C	. 53
1.3.2. Les « Near Bed Solids »	. 53
1.3.3. Le « Fluid Sediment »	. 55
2. L'INTERFACE EAU / SÉDIMENT, SUR LE BASSIN VERSANT DU MARAIS	. 57
2.1. Principaux résultats obtenus par Ahyerre	. 57
2.1.1. Observation de la couche organique	. 57
2.1.2. Prélèvement de la couche organique	. 58
2.1.3. Comportement de la couche organique	. 59
2.1.4. Localisation de la couche organique	. 60
2.2. Origines de la matière organique dans le réseau, par temps sec	. 60
2.2.1. Rejets des particuliers	. 61
2.2.2. Ruissellement sur les chaussées	. 64
2.2.3. Transformation des matières dans le réseau	. 64
3. CONCLUSIONS	. 66
CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION ET LOCALISATION DE L'INTERFACE EAU – SÉDIMENT	. 67
1. Système d'observation avec un endoscope	. 67
2. MÉTHODOLOGIE POUR LE SUIVI DES COLLECTEURS DU MARAIS	. 68
2.1. Le bassin versant du Marais	. 68
2.2. Méthodologie pour la localisation de la couche organique	. 70

2.3. Méthodologie d'échantillonnage et d'analyses	1
2.3.1. La boite à prélèvement	1
2.3.2. Les analyses physico-chimiques	2
3. LE SUIVI DES COLLECTEURS DU MARAIS : RÉSULTATS	2
3.1. Nature de l'interface eau – sédiment	2
3.2. Caractéristiques physico-chimiques de la couche organique	4
3.3. Cartographie de la couche organique	6
3.3.1. Evolution des dépôts grossiers et de la vitesse moyenne	7
3.3.2. Interface eau - sédiment	8
3.3.3. Suivi serré de l'amont du collecteur Saint-Gilles	9
3.3.4. Suivi des collecteurs Vieille du Temple et Saint-Antoine	0
3.4. Discussion des résultats	0
3.4.1. Comparaison avec la cartographie réalisée par Ahyerre (1999)	0
3.4.2. Comparaison avec les stocks érodés par temps de pluie	1
3.4.3. Taux de cisaillement	2
3.5. Conclusions	3
4. RÉALISATION D'OBSERVATIONS EN EUROPE	4
4.1. Choix des sites	4
4.1.1. Sites principaux : Dundee, Hildesheim	4
4.1.2. Sites complémentaires	5
4.2. Méthodologie utilisée	6
4.3. Résultats	7
4.3.1. Dundee	7
4.3.2. Hildesheim	9
4.3.3. Marseille	0
4.3.4. Yorkshire (G-B)	2
4.4. Conclusions	2
CHAPITRE 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	4

CHAPITRE 1. INTRODUCTION	98
CHAPITRE 2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE : LES DÉPÔTS COHÉSIFS	. 100
1. LE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES DÉPÔTS COHÉSIFS	. 100
1.1. Etude des boues dans les estuaires	. 100
1.1.1. Comportement dynamique des boues en estuaires (COSINUS, 2000)	. 100
1.1.2. Modélisation du transport de sédiments cohésifs en estuaire	. 102
1.2. Etudes des dépôts cohésifs en laboratoire	. 103
1.2.1. Tests sur des boues d'estuaires	. 103
1.2.2. Tests sur des mélanges à base de sable et de matières cohésives	. 106
1.2.3. Tests sur des sédiments provenant du réseau d'assainissement	. 109
1.3. Conclusion	. 112
2. LA DYNAMIQUE DE L'INTERFACE EAU-SÉDIMENT EN RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT UNITAIRE	:
ÉTUDES ET MODÉLISATION	. 113
2.1. L'étude de l'interface eau / sédiment	. 113
2.1.1. avec une vanne de chasse	. 113
2.1.2. durant une pluie réelle	. 113
2.1.3. Avec des augmentations artificielles du débit	. 116
2.2. Modélisation de la dynamique de l'interface eau-sédiment	. 118
2.2.1. Modèle pour les « near bed solids » (1996)	. 118
2.2.2. Modèle pour la couche organique	. 120
3. CONCLUSIONS	. 121
CHAPITRE 3. OBSERVATION DE LA DYNAMIQUE DE L'INTERFACE EAU - SÉDIMENT	. 123
1. DISPOSITIF D'OBSERVATION MIS EN PLACE DANS LE MARAIS	. 123

1.1. Le système d'observation « Ahyerre 1999 »	123
1.2. Le nouveau système d'observation	124
1.2.1. Vitrage	124
1.2.2. Prise d'image	125
1.2.3. Eclairage	125
1.2.4. Alimentation électrique du système	125
1.2.5. Mesure du débit	125
1.2.6. Mesure de la pluviométrie	126
1.3. Site de mesure	126
1.3.1. Choix du site	126
1.3.2. Débit de temps sec sur le site d'observation	127
1.3.3. Caractéristiques des pluies affectant le site	128
2. Expériences réalisées	129
2.1. Suivi en continu sur plusieurs journées	129
2.2. Suivi en continu durant des augmentations de débit	129
2.2.1. Méthode d'injection	129
2.2.2. Dispositif de mesures	130
2.2.3. Schémas d'injection réalisés	130
2.2.4. Mesure des paramètres de qualité	132
2.3. Données recueillies	132
3. Résultats	133
3.1. Description de la couche organique	133
3.1.1. Devant la boîte	133
3.1.2. Sur le tronçon	134
3.2. Evolutions de la couche par temps sec	135
3.2.1. Evolutions devant la boîte	135
3.2.2. Evolutions sur le tronçon	137
3.2.3. Conclusion	138
3.3. Evolutions de la couche durant des augmentations de débit	139
3.3.1. Injections d'eau	139
3.3.2. Durant une vraie pluie (dispositif de suivi de temps sec en place)	143
3.3.3. Conclusion	143
4. DISCUSSION : LA MODÉLISATION DE LA COUCHE ORGANIQUE	144
4.1. Caractérisation de la couche organique	144
4.1.1. Composition de la couche organique	144
4.1.2. Variations verticales, dans l'épaisseur de la couche organique	145
4.1.3. Variations longitudinales de l'épaisseur de la couche organique	145
4.2. Dynamique de la couche organique par temps sec	145
4.2.1. L'accumulation est-elle une fonction de la durée de temps sec ?	145
4.2.2. Y a-t-il corrélation entre phénomènes observés et hydraulique de temps sec ?	146
4.3. Dynamique de la couche organique par temps de pluie	147
4.3.1. Y a-t-il corrélation entre phénomènes observés et hydraulique de temps de pluie	?
	147
4.3.2. L'érosion se produit-elle de façon homogène ?	148
5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	148
CHAPITRE 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	150

PARTIE V. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES....... 151

1. PRINCIPAUX RÉSULTATS	
1.1. L'évaluation du taux de cisaillement	
1.2. L'interface eau-sédiment dans la bassin versant du Marais	
1.3. L'interface eau-sédiment dans des bassins versants hors du Marais	
1.4. La dynamique de la couche organique	

2. PERSPECTIVES DE RECHERCHE	154
2.1. Localisation de la couche organique	. 154
2.2. Caractérisation de la couche organique	. 155
2.3. Dynamique de la couche organique	. 155
2.4. Modélisation des stocks de matière organique à l'interface eau-sédiment	156
2.5. Gestion de la couche organique.	. 156
3. PERSPECTIVES MÉTHODOLOGIQUES	. 157

PARTIE VII. ANNEXES	171
1. NOTATIONS	
2. TABLE DES FIGURES	
3. TABLE DES TABLEAUX	
4. LE RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT PARISIEN	
4.1. Les égouts	
4.2. Les collecteurs	
4.3. Les émissaires	
4.4. Fonctionnement du réseau	
4.5. Les problèmes liés aux dépôts dans le réseau d'assainissement	
5. Photos des sites étudiés en Europe	
6. LA VANNE HYDRASS SUR LE COLLECTEUR TOBELEM, À MARSEILLE	
7. LA MISE EN PLACE DE LA BOITE D'OBSERVATION SUR LE COLLECTEUR SAINT-	GILLES, DANS LE
MARAIS	

PARTIE I. Introduction

1. Contexte

Les réseaux d'assainissement ont pour objectif d'évacuer les eaux usées et les eaux de pluie afin de limiter les nuisances et les dégâts dans les centres urbains.

On distingue deux types de réseaux en milieu urbain : les réseaux séparatifs (eaux usées et eaux de pluie circulent dans des canalisations séparées) et les réseaux unitaires (eaux usées et eaux de pluie circulent dans les mêmes canalisations).

- Dans le cas des réseaux unitaires, les volumes d'eau importants transportés par temps de pluie dans le système d'assainissement vers la station d'épuration sont difficilement pris en charge. Une partie des eaux circulant dans le réseau doit donc être rejetée dans l'environnement pour préserver les stations d'épurations qui sont dimensionnées pour traiter un volume d'eau limité, voire pour limiter les débordements sur la chaussée et préserver les infrastructures du réseau.
- Dans le cas des réseaux séparatifs, les volumes d'eaux liés à la pluie ne subissent généralement aucun traitement et sont rejetés directement vers l'environnement.

Ces déversements vers le milieu récepteur (par exemple : un fleuve ou la mer) sont appelés rejets urbains de temps de pluie (RUTP).

Les quantités importantes de matières transportées dans les RUTP ont un impact négatif sur l'environnement : les solides de grande taille créent des pollutions « visuelles » et les solides de petite taille, les particules en suspension, mettent en danger l'équilibre écologique des milieux récepteurs parce qu'elles sont chargées d'éléments comme des matières organiques, des métaux lourds, des hydrocarbures,... La maîtrise de la pollution de ces RUTP tient donc une place importante dans les problèmes d'assainissement. Les investissements prévus à moyen terme, en France, dans ce domaine se chiffrent à plusieurs milliards d'euros. Ils visent la préservation et la reconquête du milieu naturel, mais aussi l'application de la directive européenne du 21 mai 1991 qui impose le traitement des surverses des réseaux unitaires pour les événements non exceptionnels ainsi que la Directive Cadre Européenne sur l'eau du 22 décembre 2000 qui impose d'amener à une bonne qualité les eaux superficielles d'ici à 2015.

Depuis 1970, un grand nombre d'études consacrées à la pollution des eaux de temps de pluie en milieu urbain ont été réalisées dans différents pays. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'importance de la contribution des dépôts en réseaux d'assainissement unitaires à la pollution des RUTP (Krejci et al., 1987 ; Chebbo,1992 ; Bachoc et al., 1993 ; Gromaire, 1998).

Plusieurs études menées en Europe ont montré que cette contribution est liée à l'érosion d'un stock de matière organique situé à l'interface entre les eaux usées et les dépôts du réseau : l'interface eau-sédiment (Crabtree, 1989 ; Ristenpart *et al.*, 1995 ; Verbanck, 1995 ; Arthur, 1996; Ahyerre, 1999). Ce stock se constitue durant les périodes de temps sec. Néanmoins, les résultats obtenus ne permettent pas de conclure sur la nature et le comportement dynamique des stocks de matière organique, notamment parce que les méthodes mises en œuvre pour étudier l'interface eau-sédiment varient selon les sites expérimentaux.

Cependant, l'identification des sources et des mécanismes de formation et d'érosion de la pollution des RUTP en réseau d'assainissement unitaire constituent un enjeu important pour les gestionnaires. Et la construction d'outils de contrôle et d'évaluation des flux, sous forme de modèles, passe par une compréhension des phénomènes liés à l'interface eau-sédiment.

2. Cadre de la thèse

2.1. Le programme de recherche « génération et transport de la pollution des rejets urbains par temps de pluie en réseau d'assainissement unitaire »

En 1994, le CEREVE (Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Eau, laVille et l'Environnement) a équipé un bassin versant dans le quartier du Marais à Paris pour mieux connaître les caractéristiques et les origines de la pollution transportée par temps de pluie dans les réseaux d'assainissement unitaires. Ce bassin versant urbain a une surface de 42 ha, une pente moyenne de 0,84 % et un coefficient de ruissellement d'environ 0,78 %. Il est drainé par un réseau unitaire, entièrement visitable.

Dans un premier temps, des bilans de masse ont été effectués sur le bassin versant entre l'entrée et la sortie du réseau unitaire pour 32 évènements pluvieux. Pour cela, la nature et les flux de particules transportées par les eaux ruisselées en surface du bassin et par les eaux usées ont été évalués (cf. Figure I-1) ainsi que la nature et les flux des particules transitant à l'exutoire du bassin versant par temps de pluie. A l'échelle de l'événement pluvial, la contribution des dépôts constitués par temps sec dans le réseau d'assainissement a été estimée entre 30 % et 80 % de la masse polluante rejetée en matière organique (Gromaire-Mertz *et al.*,2001).

Dans un deuxième temps, les stocks et la nature de la pollution particulaire présente dans les différents dépôts identifiés sur le bassin versant ont été évalués puis comparés aux masses et à la nature des particules rejetées par temps de pluie. Cette analyse a permis de mettre en évidence le rôle de l'interface eau-sédiment. Des observations réalisées dans un tronçon de collecteur ont par ailleurs permis d'identifier les stocks de matière organique situés à l'interface comme une couche immobile, composée de matière organique et de fibres, qui s'accumule par temps sec et qui peut être entraînée par des pluies faibles.

Il apparaît donc que la principale source de matières organiques dans le réseau, par temps de pluie, est constituée d'une couche organique mobilisable et située à l'interface eau/sédiment, à l'amont des collecteurs (Ahyerre,1999). Les résultats exposés dans cette thèse font largement référence aux travaux de Mathieu Ahyerre (1999) qui sont présentés dans les différentes parties bibliographiques.



Figure I-1 – Le bassin versant du Marais – Exemple de dispositifs de suivis mis en place pour l'analyse des eaux ruisselées en surface du bassin

2.2. Vers un nouveau programme de recherche : « évolution spatiale des caractéristiques et des origines des polluants dans les réseaux d'assainissement <u>unitaires »</u>

Le programme de recherche « génération et transport de la pollution des rejets urbains par temps de pluie en réseau d'assainissement unitaire » a permis de quantifier les flux et la nature des particules transitant dans le réseau ainsi que d'identifier la principale source de pollution des eaux de temps pluie, sur un petit bassin versant (Le Marais). Il a ainsi mis en évidence le

rôle du réseau d'assainissement en tant que réacteur « physico-chimique » vis-à-vis de la qualité des eaux transitant dans le réseau, par de temps de pluie.

Vu ces résultats, il semble important d'étudier l'évolution des caractéristiques de la pollution des eaux transitant dans le réseau par temps de pluie entre l'amont et l'aval d'un grand bassin versant urbain, en fonction de l'échelle spatiale et du temps de transfert en réseau. C'est pourquoi un programme de recherche intitulé « évolution spatiale des caractéristiques et des origines des polluants dans les réseaux d'assainissement unitaires », piloté par le CEREVE, a démarré en 2001. Il s'articule autour de plusieurs axes de recherche :

- caractérisation des polluants,
- définition des différentes sources possibles de polluants et de leur mode de transfert,
- évolution des flux de pollution à différentes échelles spatiales.



Figure I-2 – OPUR : les 6 sites de mesures (ronds bleus)

Des campagnes d'échantillonnage et d'observations seront menées à différentes échelles spatiales, par temps sec et par temps de pluie, sur une durée de 3 à 5 ans. Le site expérimental choisi a été appelé OPUR (Observatoire des Polluants Urbains) : il comprend 6 sites de mesures correspondant à l'exutoire de 6 bassins versants de tailles différentes, allant de 42 ha à 2470 ha, et dont le plus petit d'entre eux est le bassin versant du Marais (cf. Figure I-2).

Cette thèse s'inscrit au début de ce programme de recherche et vise à compléter les connaissances acquises sur la couche organique, principale source de polluants située dans le Marais.

2.3. Problématique de la thèse

La problématique de cette thèse se trouve à l'interface entre les deux projets de recherche présentés ci-dessus et découle directement des résultats obtenus par Ahyerre (1999) sur l'interface eau-sédiment. Les questions posées dans le cadre de cette thèse portent sur la nature et le comportement des stocks de matière organique situés à l'interface eau-sédiment.

- Le stock de matière organique situé à l'interface eau-sédiment a été identifié comme étant une couche immobile, sur un tronçon de collecteur dans le Marais. Cette observation estelle valable pour l'ensemble du Marais ? Quelles sont les conditions pour l'existence d'une telle couche ?
- En dehors du Marais, dans les systèmes d'assainissement où des stocks de matière organique ont été identifiés à l'interface eau-sédiment, l'interface se présente-t-elle sous la même forme ? Existe-t-il différents types d'interface organique ?
- Les stocks de matière organique s'accumulent à l'interface eau-sédiment par temps sec et sont érodés par temps de pluie. Dans le cas du Marais, est-il possible de préciser les mécanismes qui entrent en jeu dans les processus de formation et d'érosion de la couche organique ?

3. Objectifs de la thèse

Pour répondre à la problématique de la thèse, nous avons décomposé le travail à réaliser en trois étapes.

3.1. Etude du taux de cisaillement en réseau d'assainissement

Le taux de cisaillement est le critère le plus utilisé pour étudier les processus de déposition et d'érosion des particules. La couche organique se développe à l'interface eau-sédiment c'est-àdire au-dessus des dépôts existants. Durant cette étape, nous comparerons différentes méthodes d'évaluation du taux de cisaillement et le suivi de plusieurs sites avec et sans dépôt. Le résultat attendu est : le choix d'une méthode d'évaluation du taux de cisaillement, en vue de son application à l'étude de l'interface eau-sédiment.

3.2. Nature et localisation de l'interface eau-sédiment

Cette étape comprend la mise au point d'un système portable pour l'observation de l'interface eau-sédiment, le suivi de plusieurs sites dans le Marais et l'échantillonnage de l'interface eau-sédiment sur des sites différents des points étudiés par Ahyerre (1999).

Les résultats attendus sont : une méthode pour la localisation de la couche organique, une caractérisation physico-chimique de la couche organique, et la mise en évidence de critères pour la nature et la présence de la couche organique.

Ce système d'observation sera également appliqué à l'étude de l'interface eau-sédiment sur des sites en Grande-Bretagne (Dundee, Mexborough, Doncaster), en Allemagne (Hildesheim) et en France (Marseille).

Le résultat attendu est : une typologie des stocks de matière organique à l'interface eausédiment existant en réseau d'assainissement.

3.3. Dynamique de l'interface eau-sédiment

Cette étape comprend la mise au point d'un système d'observation automatisé pour assurer le suivi en continu de la couche organique sur un site du Marais.

Le résultat attendu est : la mise en évidence des phénomènes conduisant à la formation et à l'érosion de la couche organique.

PARTIE II. Etude du taux de cisaillement en réseau d'assainissement unitaire

CHAPITRE 1. Introduction

La majeure partie des particules érodées dans le réseau par temps de pluie, dans le Marais, provient d'une couche organique située à l'interface eau-sédiment (Ahyerre, 1999). Le taux de cisaillement est un critère pertinent pour comprendre les phénomènes de sédimentation et d'érosion des dépôts. Dans le cadre de notre étude, l'évaluation du taux de cisaillement en réseau d'assainissement unitaire doit permettre de mieux comprendre, et à long terme de modéliser, le comportement dynamique de la couche organique.

Les méthodes d'évaluation du taux de cisaillement en égout sont généralement basées sur l'hypothèse d'un écoulement permanent uniforme, ce qui permet d'estimer le taux de cisaillement à partir de mesures relativement simples à réaliser. En effet, les conditions de travail en égouts sont particulièrement dures et les méthodes de laboratoire destinées à évaluer le taux de cisaillement sont difficiles à mettre en œuvre dans des écoulements qui transportent des quantités importantes de MES mais également de gros éléments (papiers, sacs plastiques, etc.) qui perturbent les mesures.

Cependant les incertitudes liées à l'application de ces méthodes pour estimer le taux de cisaillement sont importantes car l'écoulement n'est jamais parfaitement permanent à cause de la variabilité des arrivées latérales, même durant les périodes de temps sec, et l'écoulement n'est jamais réellement uniforme à cause des irrégularités géométriques liées notamment à la pente des collecteurs ou à la présence de dépôts.

L'objectif de ce chapitre est de choisir une méthode d'évaluation du taux de cisaillement qui soit précise et simple d'utilisation. Cette méthode sera appliquée pour définir les critères liés au comportement de la couche organique (constitution, érosion) dans la suite de notre étude. Nous avons donc testé différentes méthodes pour évaluer le taux de cisaillement local et moyen dans trois collecteurs situés dans le bassin versant du Marais. Dans un premier temps, des expériences ont eu lieu dans les meilleures conditions possibles (temps sec, absence de dépôt) afin de faciliter la comparaison entre les méthodes. Puis, dans un second temps, nous avons réalisé des expériences dans des collecteurs avec du dépôt pour étudier l'influence des reliefs sur le taux de cisaillement.

CHAPITRE 2. Etude bibliographique

1. Ecoulement en régime uniforme permanent

L'écoulement des eaux usées dans le réseau d'assainissement parisien est un écoulement gravitaire. Durant le temps sec, l'écoulement se fait dans la cunette des collecteurs du réseau d'assainissement (cf. Figure II-1) et on peut alors considérer que les collecteurs se comportent comme des canaux à surface libre.



Figure II-1- Exemples de collecteurs dans le réseau d'assainissement du Marais

Le fluide qui s'écoule (de l'eau usée chargée en MES) est assimilable à un fluide newtonien incompressible. La dynamique de l'écoulement est alors décrite par les équations de Navier-Stockes. Dans le cas des écoulements à surface libre, unidirectionnels et graduellement variés, les équations de Navier-Stockes se simplifient en équations de Saint-Venant.

1.1. Equations de Saint-Venant

Les équations de Saint-Venant pour un écoulement unidirectionnel non-permanent et nonuniforme sur un tronçon à faible pente ($J \ll 1$) sont de la forme :

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0\\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + g.S. \frac{\partial h}{\partial x} = g.S.(J - J_e) \end{cases}$$
Équation II-1

avec J: pente du fond; S: section de l'écoulement; Q: débit; Je: pente énergétique; h: hauteur d'eau.

1.1.1. Ecoulement permanent

Pour le cas du temps sec, Gromaire (1998) a pu observer une variabilité horaire des débits à l'exutoire du bassin versant du Marais. Nous avons cependant considéré l'écoulement comme permanent sur des intervalles de temps courts (de l'ordre de 30 minutes).

Dans cette situation (écoulement permanent non-uniforme) les équations de Saint-Venant précédentes se simplifient ainsi (cf. Equation II-2) :

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0\\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + g.S. \frac{\partial h}{\partial x} = g.S.(J - J_e) \end{cases}$$

Équation II-2

1.1.2. Ecoulement permanent uniforme

Dans les collecteurs des réseaux d'assainissement on peut observer des changements de pente liés à un changement de pente du radier et à la présence de dépôts grossiers (cf. Figure II-2). Nous avons cependant considéré que l'écoulement possède un comportement uniforme par petits tronçons (de l'ordre de 15 mètres).



Figure II-2 - Exemples de profils de collecteurs dans les collecteurs du Marais (Ahyerre,1999)

Dans le cas du régime permanent et uniforme, les équations de Saint-Venant se simplifient encore (cf. Equation II-3).

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ J = J_e \end{cases}$$
 Équation II-3

La pente énergétique J_e peut être déterminée au moyen de formules du type Weisbach-Darcy, Chézy ou encore Manning-Strickler. Ces formules ne sont strictement valables que pour les écoulements permanents uniformes mais il est en général admis qu'elles sont applicables pour des écoulements non permanents ou non uniformes (Graf & Altinakar,1996).

• Formule de Weisbach-Darcy (ou encore, équation de Blasius) :

$$J_e = \lambda \frac{1}{4R_h} \frac{U^2}{2g}$$
 Équation II-4

avec λ : coefficient de frottement ; U : vitesse moyenne de l'écoulement ; R_h : rayon hydraulique

• Formule de Chezy :

$$J_e = \frac{8g}{C^2} \frac{1}{4R_h} \frac{U^2}{2g} = \frac{1}{C^2} \frac{U^2}{R_h}$$
 Équation II-5

avec C : coefficient de Chézy

• Formule de Manning-Strickler :

$$J_e = \frac{1}{{K_s}^2} \frac{U^2}{R_h^{4/3}}$$
 Équation II-6

avec K_s : coefficient de Manning-Strickler

Toutes ces formulations font appel à une représentation de la rugosité du canal grâce au coefficient de frottement λ ou encore au coefficient *C* ou K_s .

1.2. Structure verticale de l'écoulement

Les parois des collecteurs constituent la limite physique des écoulements : l'écoulement se fait avec une certaine vitesse moyenne mais la vitesse d'écoulement est nulle contre les parois (condition d'adhérence). L'interface entre l'écoulement et les parois est appelée couche limite ou sous-couche visqueuse ou encore couche laminaire. On considère que la hauteur de la couche laminaire δ est de l'ordre de $\delta \ge 2 k_s$ (avec k_s : la rugosité de la paroi). Dans cette couche mince (quelques millimètres), on observe une diminution rapide de la vitesse.

La couche laminaire a une influence sur le frottement de l'écoulement sur la paroi qui est représentée par le coefficient de frottement.

1.3. Les courants secondaires

Dans les écoulements qui ont un rapport largeur sur hauteur faible (rapport inférieur à 5), des phénomènes de re-circulations ont lieu dans la section d'écoulement. On les appelle courants secondaires. Ils influent sur la répartition des vitesses : en présence de courants secondaires, la vitesse maximale ne se manifeste pas à la surface de l'écoulement mais au dessous de la surface libre (à environ 3/4 de la hauteur d'eau).

Ces courants sont générés par la turbulence et le frottement sur les parois. D'après Viollet *et al.* (1996) on distingue deux types de courants secondaires. Le plus facilement observable est causé par le changement de direction de l'écoulement dans les coudes. Le second, d'intensité plus faible, existe en écoulement uniforme et trouve son moteur dans la structure de la turbulence. Il se décompose de manière symétrique dans la section d'écoulement (cf. Figure II-3) et on peut observer, selon McLelland *et al.* (1999), deux cellules de circulation : un grand vortex au niveau de la surface libre et un de taille plus réduite près du fond.



Figure II-3 - Structure des écoulements secondaires (Viollet et al., 1998)

McLelland *et al.* (1999) ont mené des expériences sur un matériau faiblement bi-modal ($d_A = 0,812 \text{ mm}$; $d_B = 1,78 \text{ mm}$), obtenu en mélangeant un sable et un gravier. Un écoulement turbulent a été appliqué au-dessus du matériau, dans un canal circulaire, avec un rapport largeur sur hauteur égal à 3. Les auteurs ont observé que les courants secondaires généraient une perturbation au niveau de la distribution du taux de cisaillement dans la section d'écoulement. En effet, durant ces expériences, une partie des sédiments fins sont transportés latéralement par le courant secondaire, à partir des zones à fort cisaillement, et se déposent dans les zones de faible cisaillement. Ils observent ainsi la formation de sillons alternés contenant plus ou moins de fines. Ces sillons se forment suivant les axes de rotation des vortex et la profondeur des sillons est d'environ 1 mm.

Huygens *et al.* (1997) ont observé les effets des courants secondaires sur des dépôts partiellement cohésifs (mélanges de sable et de kaolinite ou de montmorillonite) en canal circulaire. Le rapport largeur sur hauteur est environ égal à 3,7. Des courants secondaires sont

générés par l'interaction des dépôts et des parois du canal. Ils se traduisent par la formation de dunes et de creux qui augmentent la rugosité du dépôt et entraînent ainsi un cisaillement plus important : à la résistance des particules du dépôt s'ajoute la résistance liée au relief du dépôt. De plus, ces courants donnent naissance à des « erosion spots » sur les parties exposées (dunes, creux) qui se propagent le long du canal.

Nous pouvons donc supposer que les courants secondaires vont avoir une influence sur les caractéristiques hydrauliques (répartition des vitesses, contraintes de cisaillement) dans le cas des petits collecteurs dont l'écoulement présente un faible rapport largeur sur hauteur.

2. Contrainte de cisaillement à la paroi

L'action d'un écoulement sur une paroi est caractérisée par la contrainte de cisaillement à la paroi τ_0 . Elle exprime la force de frottement agissant tangentiellement sur la paroi, par unité de surface.

2.1. Coefficient de frottement

Le coefficient de frottement λ est fonction du nombre de Reynolds, de la hauteur des aspérités k_s (rugosité) et du diamètre hydraulique D_h .

Dans le cas d'une couche laminaire développée, c'est le nombre de Reynolds qui va déterminer le coefficient de frottement (cf. Figure II-4). Dans le cas où la couche laminaire disparaît, c'est la rugosité qui devient le paramètre déterminant pour le frottement.



Figure II-4 - Influence de la rugosité sur la couche laminaire

La formation de la couche laminaire est liée à la rugosité des parois. Dans un écoulement turbulent, une rugosité importante amène à la disparition de la couche laminaire car celle-ci ne peut se développer. On distingue ainsi les écoulements turbulents « lisses » où la couche laminaire peut se former et les écoulements turbulents « rugueux » où la couche laminaire ne peut pas se former. Pour les écoulements permanents uniformes, la distinction lisse / rugueux se fait à partir du nombre de Reynolds « de grain » ou « particulaire » :

$$Re^* = \frac{u^* k_s}{v}$$
 Équation II-7

avec u* : la vitesse de cisaillement ; v : viscosité cinématique.On définit alors les différents régimes d'écoulement :

- lorsque $Re^* < 5$, on est en régime turbulent lisse
- lorsque $Re^* > 70$, on est en régime turbulent rugueux,
- lorsque $5 < Re^* < 70$, on est en régime turbulent de transition.

Dans le cas d'un écoulement turbulent lisse, on utilise les relations de Weisbach-Darcy (Equation II-4) pour déterminer la pente d'énergie J_e . Le coefficient de frottement λ peut alors être déterminé en utilisant la formule de Colebrook (cf. Equation II-8) :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.\log\left(\frac{2.51}{Re.\sqrt{\lambda}} + \frac{k_s/D_h}{3.7}\right) \quad \text{Équation II-8}$$

Dans le cas des écoulements turbulent rugueux on considère les relations de Chézy (Equation II-5) ou de Manning-Strickler (Equation II-6) pour déterminer la pente d'énergie J_e .

Dans le cas de canaux naturels aux parois en granulat non-cohésif, on peut utiliser la relation de Strickler (cf. Equation II-9) basée sur un diamètre représentatif des granulats (*d*₅₀ ou *d*₉₀) pour déterminer le coefficient de Manning-Strickler *K_s*:

$$K_s = \frac{21,1}{d_{50}^{1/6}}$$
 ou $K_s = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}$ Équation II-9

 Si le fond et les parois ne sont pas de même nature, on peut utiliser par exemple l'expression de Meyer-Peter (cf. Equation II-10) pour le calcul du coefficient de Strickler pour la section d'écoulement (Viollet *et al.*,1998) :

$$\frac{\chi}{K_s^2} = \frac{\chi_{paroi}}{K_s^2 paroi} + \frac{\chi_{fond}}{K_s^2 fond}$$
 Équation II-10

avec χ : périmètre mouillé (m)

Des ordres de grandeur de K_s sont donnés par Viollet et al. (1998) :

- $K_s = 70$ à 80 m^{1/3}.s⁻¹pour des fonds revêtus- $K_s = 30$ à 50 m^{1/3}.s⁻¹pour des fonds naturels- $K_s = 10$ à 30 m^{1/3}.s⁻¹pour des fonds encombrés

2.2. Contrainte de cisaillement à la paroi

Trois méthodes ont été identifiées pour évaluer le taux de cisaillement, dans le cas d'un régime permanent uniforme. Deux d'entre elles permettent d'évaluer le taux de cisaillement local à partir de la distribution de Reynolds et de la distribution logarithmique des vitesses. La troisième méthode permet de calculer le cisaillement moyen sur un tronçon de collecteur.

2.2.1. Contrainte de cisaillement, loi de Reynolds

La contrainte de cisaillement se décompose classiquement en taux de cisaillement laminaire τ_{lam} et en taux de cisaillement turbulent τ_{turb} (encore appelé « tension de Reynolds ») suivant l'Equation II-11 (Yalin, 1977) :

$$\tau(z) = \tau_{turb}(z) + \tau_{lam}(z) = -\rho \overline{u'(z)w'(z)} + \mu \cdot \frac{d\overline{u}(z)}{dz} \qquad \text{Équation II-11}$$

avec ρ : la masse volumique du fluide ; μ : la viscosité dunamique.

L'expression $\overline{u'(z)w'(z)}$ représente la covariance des composantes du vecteur vitesse : u(z) (composante tangentielle) et w(z) (composante verticale) (cf. Figure II-5).



Figure II-5 – Composantes de la vitesse dans l'espace

On définit la vitesse de frottement (ou vitesse de cisaillement) u^* suivant l'Equation II-12 :

$$\tau = \rho u^{*2} (1 - \frac{z}{h})$$
 Équation II-12

Et le taux de cisaillement au fond τ_0 est estimé avec l'Equation II-13 :

$$\tau_0 = \rho u^{*2}$$
 Équation II-13

La répartition du taux de cisaillement en régime permanent uniforme turbulent est donnée sur la Figure II-6. Au-dessus de la hauteur de la couche laminaire δ , la contrainte de cisaillement est pratiquement égale à τ_{turb} et au-dessous de δ , la contrainte de cisaillement est presque égale à τ_{lam} .



Figure II-6 - Répartition des contraintes de cisaillement avec la profondeur (Yalin,1977)2.2.2. Contrainte de cisaillement, distribution logarithmique des vitesses

En écoulement permanent uniforme, la répartition des vitesses répond à une relation logarithmique (cf. Equation II-14) :

$$\frac{u(z)}{u^*} = \frac{1}{k} \ln(\frac{z}{k_s}) + Bs$$
 Équation II-14

avec k: la constante de Von Karman (k = 0.41); k_s : la rugosité ; Bs: dépend du régime de l'écoulement défini par le nombre de Reynolds de grain Re^* (cf. Tableau II-1).

- $Re^* < 5$, écoulement turbulent lisse :	$Bs = 2.5 \ln \left(\frac{u * k_s}{v}\right) + 5.5$
- $5 < Re^* < 7.1$, écoulement transition I :	$Bs = 1.52 \ln \left(\frac{u * k_s}{v}\right) + 6.6$
- 7.1 < Re^* < 14.1, écoulement transition II :	<i>Bs</i> =9.6
- 14.1 < <i>Re</i> * < 70, écoulement transition III :	$Bs = 11.5 - 0.70 \ln \left(\frac{u^* k_s}{v} \right)$
- $Re^* > 70$, écoulement turbulent rugueux :	Bs = 8.5

Tableau II-1 – Valeurs de Bs pour les différents types d'écoulement (Yalin, 1977 ; Hollingshead et Rajaratnam, 1980)

Cette loi est valable dans la zone intérieure où : 0,01 < z/h < 0,2. Selon (Graf et Altinakar, 1996), dans un écoulement à deux dimensions, la loi logarithmique peut être étendue à toute la colonne d'eau *h* quand on ne recherche pas une grande précision dans les calculs. Le taux de cisaillement au fond est déduit à partir de la valeur de *u** en utilisant l'Equation II-13.

2.2.3. Contrainte de cisaillement, équation de mouvement



Figure II-7 - Canal prismatique (schéma) et contraintes de surface appliquées sur un élément de fluide (Julien, 1998).

Dans un canal prismatique (cf. Figure II-7), en régime permanent uniforme, les équations de mouvement dans la direction de l'écoulement (axe x) et dans la direction verticale (axe z) peuvent s'écrire sous la forme simplifiée suivante (Julien, 1998):

$$g \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} \right) = g_x + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$$
 Équation II-15.a
$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{U^2}{2} \right) = g_z + u \cdot \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}$$
 Equation II-15.b

Les hypothèses simplificatrices sont les suivantes :

- les composantes du cisaillement selon xx, yx, yz, zz sont négligeables
- les composantes de la vitesse suivant y et z sont négligeables devant la composante selon x (soit v << u et w << u) et donc u est égal à la vitesse totale de l'écoulement

En considérant une répartition hydrostatique des pressions (soit $\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = 0$), l'équation II-15.b peut être intégrée sur la hauteur d'eau h et on obtient :

$$P = \rho g (h - z) \cos \alpha$$
 avec $g_z = -g \cos \alpha$

Le taux de cisaillement est obtenu en intégrant l'équation II-15.a, en considérant la vitesse u et la pression P constantes le long de l'écoulement :

$$\tau_{zx}(z) = \rho g (h-z) \sin \alpha$$

Le taux de cisaillement au fond s'écrit généralement sous la forme :

$\tau_o = \rho g . R_h . J$ Équation II-16

avec R_h le rayon hydraulique et en considérant que la pente du fond J est suffisamment faible ($J \ll 1$) pour écrire : $\sin \alpha = \alpha = J$.

2.3. Evaluation du taux de cisaillement en réseaux d'assainissement

Les trois méthodes identifiées ci-dessus sont utilisées pour évaluer le taux de cisaillement en réseau d'assainissement.

2.3.1. Loi de Reynolds

L'application de la méthode de Reynolds implique une mesure des champs de vitesse très précise, suivant les trois composantes de l'espace (x, y, z).

Ahyerre (1999) a utilisé un Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) pour réaliser ce type de mesures au cours d'expériences d'augmentations de débit en réseau d'assainissement. Cependant cet appareil ne peut pas être utilisé en mesure de routine car il requiert un entretien difficile à mettre en œuvre de manière autonome.

2.3.2. Distribution logarithmique des vitesses

La méthode basée sur la distribution logarithmique des vitesses est fréquemment employée en réseau d'assainissement car les mesures nécessaires peuvent être obtenues avec des appareils simples comme le micro-moulinet ou le vélocimètre. Ashley *et al.*(1994), Ahyerre (1999), Jaumouillie *et al.* (2001) ont utilisé cette méthode pour étudier précisément l'hydraulique de quelques sites.

Elle est également à la base de certains modèles hydrauliques qui évaluent la contrainte de cisaillement au fond, par exemple dans le module Engelund-Hansen de MOUSE-TRAP.

2.3.3. Equation de mouvement

L'équation de mouvement est à la base des méthodes les plus largement utilisées pour estimer le taux de cisaillement en égout dans les modèles hydrauliques du type STSim ou Canoe.

Les mesures nécessaires à l'application de cette méthode (hauteur d'eau, vitesse moyenne) peuvent être obtenues à partir de mesures de routine :

a) mesure de la vitesse moyenne dans la section et de la hauteur d'eau sur un site

Les paramètres sont généralement mesurés simultanément sur un site grâce aux débitmètres que l'on trouve sur le marché et qui fonctionnent, par exemple, avec une sonde à effet Doppler pour la vitesse et un capteur de pression piézométrique pour la hauteur d'eau (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000).

On peut également se contenter d'une mesure de la hauteur d'eau, à condition qu'une loi hauteur-débit ait été déterminée sur le site de mesure. Cette loi permet de retrouver le débit et donc la vitesse d'écoulement à partir de la hauteur d'eau.

Ensuite, le taux de cisaillement au fond est déterminé à partir des relations de Darcy-Weisbach (Equation II-4) ou de Manning-Strickler (Equation II-6) qui sont valables pour les écoulements turbulents rugueux. Cette méthode est la plus fréquemment citée dans la littérature : Ashley *et al.* (1994), Laplace (1991), Hrissanthou et Hartmann (1998), Verbanck (1995), Jaumouillie *et al.* (2001).

b) mesure de la hauteur d'eau en deux points.

Ce système de mesure a été utilisé par Ristenpart et Uhl (1993) et McIlhatton (2001) : la pente de la surface de l'eau est déterminée grâce à deux sonars placés à 80 m l'un de l'autre. Le taux de cisaillement est ensuite déterminé par application directe de l'Equation II-16, en considérant que la pente de la surface de l'eau est égale à la pente d'énergie de l'écoulement.

c) à partir de la pente du radier.

La pente du radier peut être déterminée à partir des plans du réseau d'assainissement. Le taux de cisaillement est ensuite déterminé par application directe de l'Equation II-16, en considérant que la pente du radier ou la pente du (radier + sédiment) est égale à la pente d'énergie de l'écoulement.

2.3.4. Conclusion

On constate que les méthodes mises en œuvre dans les réseaux d'assainissement sont généralement les méthodes basées sur l'application de l'Equation II-16. En effet, cette méthode requiert des données qui peuvent être mesurées de façon routinière et relevées rapidement sur site ou à distance, par liaison modem par exemple.

Il faut préciser ici que les différentes méthodes décrites ci-dessus peuvent être divisées en deux catégories : les mesures destinées à l'étude d'un site particulier et les mesures destinées à alimenter une base de données utilisée dans les modèles hydrauliques. Les modèles hydrauliques destinés à reproduire le fonctionnement d'un réseau d'assainissement utilisent généralement des méthodes simples (généralement basées sur la relation de Manning-Strickler) pour estimer le cisaillement afin d'être efficaces au niveau du temps de calcul.

Cette nuance dans les objectifs de la mesure joue sur les choix méthodologiques mis en œuvre et permet d'expliquer la popularité des méthodes basées sur la pente du radier ou les mesures débitmètriques. Dans notre étude sur l'interface eau-sédiment, nous allons avoir recours au taux de cisaillement qui est un critère permettant de prévoir la formation et l'érosion de dépôts dans le réseau. Nous avons donc décidé de tester les trois méthodes présentées (loi de Reynolds, profil logarithmique des vitesses et équation de mouvement) sur des sites sans dépôt et avec dépôt .

Cette étude comparative nous permettra de choisir une méthode d'évaluation du taux de cisaillement qui soit précise et simple d'utilisation. Cette méthode sera appliquée pour définir les critères liés au comportement de la couche organique (constitution, érosion) dans la suite de notre étude.

CHAPITRE 3. Expériences réalisées

1. Sites d'étude

1.1. Site en laboratoire

Nous avons testé le matériel utilisé au cours des expériences dans un canal mis à disposition par le Laboratoire d'Hydraulique de l'Université de Gent (cf. Figure II-8). Le canal utilisé a une longueur de 11m et une section rectangulaire de 70cm de largeur.



Figure II-8 – Canal hydraulique de Gent

Dans le canal de Gent nous avons validé notre appareillage en effectuant des mesures dans des conditions d'écoulement stables et bien définies. Le Tableau II-2 reprend la vitesse moyenne d'écoulement (U), la largeur du canal (b), la hauteur d'eau (h) et le nombre de Reynolds (Re) pour les expériences réalisées. Les mesures ont été réalisées dans la zone intérieure de l'écoulement, c'est-à-dire au-dessous de 0,2h.

Expérience	Gent - 19/04/00	Gent - 18/04/00
<i>U</i> (m/s)	0.28	0.18
<i>h</i> (m)	0.34	0.34
<i>b</i> (m)	0.7	0.7
Re	48.3 E+3	31 E+3

Tableau II-2 - Caractéristiques des écoulements appliqués dans le canal de Gent
1.2. Sites en réseau d'assainissement

Les expériences menées pour évaluer le taux de cisaillement ont été réalisées dans le réseau d'assainissement du Marais, sur trois sites : le collecteur Vieille du Temple, le collecteur Saint-Gilles et le collecteur Rivoli.

1.2.1. Sites sans dépôt

Les tronçons choisis pour l'étude sans dépôt sont situés à l'aval du collecteur Vieille du Temple (pente 0.03%) et à l'aval du collecteur Rivoli (pente 0.09%). Les caractéristiques des écoulements sont différentes d'un site à l'autre : les hauteurs d'eau varient de 20 cm à 30 cm et la vitesse moyenne varie de 0.26 m/s à 0.89 m/s (cf. Tableau II-3).

De plus, les sites choisis diffèrent par leur section d'écoulement : sur le collecteur Vieille du Temple, la cunette (partie du collecteur où s'écoulent les eaux de temps sec) a une largeur de 60 cm et, sur le collecteur Rivoli, la cunette a une largeur de 120 cm. Ainsi, sur Rivoli l'écoulement peut être est considéré comme étant bi-dimensionnel car le rapport largeur sur hauteur b/h varie entre 4 et 5 tandis que sur Vieille du Temple le rapport b/h vaut 3, ce qui laisse supposer l'existence de courants secondaires.

1.2.2. Sites avec dépôt

Des expériences ont également été menées dans deux tronçons de collecteur avec des sédiments sur le collecteur Saint-Gilles (pente 0.03%) et sur le collecteur Rivoli (pente 0.09%). Comme dans le cas des sites sans dépôt, les caractéristiques des écoulements varient d'un site à l'autre (cf. Tableau II-3) et les deux sites choisis présentent des rapports largeur sur hauteur b/h = 3.

	Sites sans dépôt				Sites avec dépôts		
Expérience	e Rivoli Rivoli Vieille du Temple		Vieille du Temple	Saint-Gilles	Rivoli		
	(03/03/00)	(15/03/00)	(29/03/00)	(22/08/00)	(29/08/00)		
<i>U</i> (m/s)	0.34	0.26	0.89	0.4	0.3		
<i>h</i> (m)	0.30	0.24	0.20	0.29	0.39		
<i>b</i> (m)	1.2	1.2	0.6	0.6	1.2		
Re	68 E+3	44.6 E+3	96 E+3	59 E+3	70.9 E+3		

Tableau II-3 – Caractéristiques des écoulement étudiés sur les sites sans et avec dépôt

2. Matériel et Méthodes

Nous avons décidé de tester sur site les trois méthodes de mesure suivantes :

- évaluation directe du taux de cisaillement local à partir de la loi de Reynolds,
- évaluation du taux de cisaillement local à partir de la distribution logarithmique des vitesses dans la section de l'écoulement (profils de vitesses),
- évaluation du taux de cisaillement moyen à partir de l'équation de mouvement (pente du fond et pente d'énergie).

Les mesures en réseau d'assainissement ont été réalisées l'après-midi afin de bénéficier d'un régime d'écoulement stable.

2.1. La distribution des tensions de Reynolds

L'ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) a été utilisé pour faire des mesures de vitesse ponctuelles afin d'en déduire le taux de cisaillement ponctuel à partir des tensions de Reynolds. A partir de ces données, nous avons pu observer la distribution du taux de cisaillement dans la partie basse des écoulements.

2.1.1. Matériel : Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)

L'ADV est un appareil construit par la société Nortek As. Il est composé d'une sonde munie d'un émetteur acoustique et de trois récepteurs permettant une réception dans les trois directions de l'espace (cf. Figure II-9). Le pilotage de l'ADV est effectué à partir d'un ordinateur.



Figure II-9 – Schéma de l'ADV et ADV en place dans le collecteur Vieille du Temple

L'émetteur produit un signal acoustique court et périodique. Quand l'impulsion acoustique traverse la colonne d'eau, les matières en suspension ou les bulles d'air dispersent une fraction de l'énergie acoustique. Les récepteurs détectent l'écho acoustique provenant du volume de mesure à l'intersection des récepteurs et de l'émetteur. La fréquence de l'écho est

modifiée par effet Doppler, en fonction du déplacement relatif des particules dont on suppose qu'elles se déplacent à la vitesse de l'écoulement. Cette modification de fréquence, captée par les trois récepteurs, permet une détermination du vecteur vitesse : il est déterminé à partir des trois projections de la vitesse mesurées par les récepteurs et d'une matrice de transformation qui prend en compte la position géométrique des récepteurs et de l'émetteur.

Pour la mesure de vitesse en un point, les capteurs et l'émetteur sont complètement immergés. La sonde mesure la vitesse 11 cm sous l'émetteur de façon à ne pas perturber l'écoulement au point d'acquisition. Le volume de mesure est de 3 à 9 mm de long et de 6 mm de diamètre. Nous avons choisi de travailler à une fréquence de 25 Hz afin d'avoir des vecteurs représentatifs des composantes de la vitesse et de leurs variations dans le temps. Enfin, une sonde intégrée au capteur ADV permet de connaître la distance entre le point de mesure et le fond.

L'ADV permet d'obtenir beaucoup d'informations sur les évolutions du vecteur vitesse grâce à la fréquence des mesures réalisées. Cependant ce type de matériel est difficile à mettre en œuvre dans les collecteurs à cause de ses caractéristique techniques (mise en place dans le collecteur, commande à partir d'un PC) et des précautions à prendre : l'ADV demande une surveillance constante lors de son utilisation car les flottants et papiers qui s'accrochent dessus empêchent son bon fonctionnement. Il a donc besoin d'être souvent nettoyé manuellement (toutes les 15 minutes). De plus, il faut le manipuler avec beaucoup de précautions en évitant les chocs car les capteurs sont très sensibles. L'ADV ne peut donc pas être utilisé de manière permanente en égout mais ponctuellement. Nous avons choisi cet instrument comme « méthode de référence » pour nos expériences en réseau dans des tronçons sans dépôt.

2.1.2. Méthodologie

L'ADV permet d'obtenir l'enregistrement des vitesses dans les 3 directions (u, v, w) à une fréquence de 25Hz durant des périodes variant de 3 minutes à 5 minutes. Ces mesures ont été effectuées sur 6 à 20 hauteurs différentes z_i dans l'écoulement.

Pour chaque enregistrement, la partie turbulente du cisaillement a été calculée en utilisant l'Equation II-17 sur des pas de temps de 12 secondes (soit 300 mesures de vitesse):

$$\tau_{turb, j}(z_i) = -\rho \times \operatorname{cov}(u_k(z_i), w_k(z_i))$$

$$\text{équation II-17}$$

$$avec \quad j-150 \le k \le j+150$$

Cet intervalle de temps est un compromis entre la variabilité observée sur le taux de cisaillement et les limites expérimentales (Berry,2000). Il reste proche des données

bibliographiques : Song (1995) a utilisé des pas de temps de 4 secondes avec des mesures réalisées à 60Hz en laboratoire, Ahyerre (1999) a choisi un intervalle de temps de 10 secondes avec des mesures réalisées à 25Hz en égouts et Saadi (2000) a précisé, à partir d'une étude statistique, que les traitements de données ADV devaient être réalisés à partir d'enregistrements sur 4 minutes à 25 Hz pour avoir une bonne précision sur le taux de cisaillement. A partir de ces résultats, la valeur moyenne du cisaillement turbulent sur la période d'enregistrement a été calculée pour chaque point de mesure z_i :

$$\tau_{turb}(\mathbf{z}_{i}) = \frac{\Sigma \tau_{turb,j}}{j}$$

La partie laminaire du taux de cisaillement a été évaluée pour chaque point de mesure z_i à l'aide de la relation suivante (cf. Equation II-11):

$$\tau_{lam}(z_i) = \mu \frac{d\overline{u}(z_i)}{dz}$$

Afin de déterminer le terme dérivé $\frac{d\overline{u}(z_i)}{dz}$, nous avons ajusté une régression linéaire sur les mesures expérimentales $u(z_i)$ en fonction de $ln(z_i)$ avec la méthode des moindres carrés. Finalement, nous avons ajusté la distribution linéaire $\tau(z) = \rho u^{*2}(1-\frac{z}{h})$ à la somme $\tau(z_i) = \tau_{turb}(z_i) + \tau_{lam}(z_i)$ avec la méthode des moindres carrés afin de pouvoir déterminer le taux de cisaillement au fond.

2.2. La distribution logarithmique des vitesses

Nous avons choisi d'utiliser un micro-moulinet pour mesurer la vitesse de l'écoulement à différentes hauteurs dans la section. A partir des profils de vitesse mesurés nous avons effectué un calage de la distribution logarithmique des vitesses théorique pour déterminer le taux de cisaillement au fond.

2.2.1. Matériel : micro-moulinet

La mesure de la vitesse ponctuelle a été effectuée au moyen d'un moulinet OTT C2 prévu pour la mesure de vitesse de l'eau dans de faibles profondeurs. La mesure est intégrée sur un pas de temps de 30 secondes. La vitesse est calculée directement à partir d'une formule résultant d'un étalonnage en canal :

$$\overline{u} = 0,00587 \times n + 0.019$$

avec *n* : nombre de tours par seconde ; \overline{u} : la vitesse en m/s.

L'incertitude sur la mesure ponctuelle donnée par le fabriquant vaut : $\Delta u / u = 1\%$. Enfin, les mesures ne sont possibles qu'à partir de z = 3 cm car l'hélice a un diamètre de 5 cm.

Pour l'étude en réseau avec dépôts, nous avons utilisé un vélocimètre électromagnétique qui remplit les mêmes fonctions que le micro-moulinet et qui permet une lecture directe de la valeur.

2.2.2. Méthodologie

Pour chaque expérience, $u(z_i)$ a été mesurée avec le micro-moulinet sur 6 à 20 points le long de l'axe z. Pour tous les profils de vitesse, la vitesse de cisaillement u^* est déterminée en faisant une régression linéaire à partir des vitesses mesurées et de ln(z).

$$\overline{u}(z) = A \ln(z) + B$$

où : $A = \frac{u^*}{k}$ et $B = u^* \left(B_s - \frac{1}{k} \ln k_s \right)$

On déduit u^* à partir du terme *A*. Le terme *B* donne des informations concernant le régime d'écoulement. Pour chaque régime, *Bs* est remplacé par l'équation correspondante (cf. Tableau II-1) et ainsi k_s peut être estimé. Le calcul de *Re** permet de déterminer le type de régime d'écoulement. Enfin, le taux de cisaillement est déterminé à partie de l' Equation II-13.

2.3. Evaluation à partir de l'équation de mouvement

Nous avons calculé τ_0 à partir de l'Equation II-15 en utilisant tour à tour la pente du fond et la pente d'énergie pour le collecteur Rivoli.

2.3.1. A partir de la pente du radier

Les données issues des relevés topographiques réalisés dans le Marais en 1995 ont servi à évaluer la pente du radier *J* pour déterminer le taux de cisaillement suivant l'Equation II-16.

2.3.2. A partir de la pente d'énergie

La pente d'énergie Je a été estimée à partir de deux méthodes suivantes :

 avec l'équation de Weisbach-Darcy en considérant le coefficient de frottement calculé à partir de la formule de Colebrook simplifiée (Graf et Altinakar,1996) (cf. Equation II-18)

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = 2.03 Log \left(Re.\sqrt{\lambda} \right) + 0.32$$
 Équation II-18

- avec la formule de Manning (Graf et Altinakar,1996) avec un coefficient de Strickler K_s = 80, ce qui correspond à un béton « lisse ».

CHAPITRE 4. Résultats

1. Analyse du matériel utilisé

1.1. Comparaison des résultats obtenus suivant le matériel utilisé

Nous avons tout d'abord comparé les données obtenues en terme de vitesses, à l'aide de la méthode du profil logarithmique des vitesses. Les résultats obtenus dans le canal de Gent (cf. Figure II-10) montrent que l'ADV et le micro-moulinet sont équivalents pour la mesure des vitesses car les données et les profils théoriques ajustés sont très proches. Sur les hauteurs où les profils ajustés se recouvrent (entre z/h = 0,15 et z/h = 0,25) on observe un écart relatif sur les vitesses de 1 % entre les deux appareils. Le taux de cisaillement déduit des profils logarithmiques obtenus avec le micro-moulinet et l'ADV vaut 0,14 N/m².





Nous avons ensuite étudié le taux de cisaillement avec la méthode de Reynolds. L'application de la méthode de Reynolds a permis d'estimer le taux de cisaillement au fond à $0,13 \text{ N/m}^2$. Des fluctuations importantes du cisaillement ont été observées dans la zone z/h < 0,15. Comme l'écoulement dans le canal est un écoulement contrôlé nous pensons que la dispersion des valeurs du cisaillement peut être attribuée à des phénomènes de turbulence près du fond ou à une perturbation du signal par les échos du fond.

Ces expériences nous ont permis de montrer que l'emploi de ces différents matériels de mesure donne des résultats similaires, malgré la dispersion des mesures très près du fond.

Nous avons également réalisé une étude sur la variabilité du taux de cisaillement à la paroi dans le canal : des profils au micro-moulinet ont été mesurés au milieu de la section et au quart de la section, dans trois sections espacées d'environ 2 m. Les résultats sont présentés dans le Tableau II-4. On constate que le taux de cisaillement ponctuel ne varie quasiment pas sur les 6 points étudiés. Les courants secondaires, dans le canal de Gent, ne semblent pas avoir d'influence dans la zone étudiée malgré un rapport b/h inférieur à 3,5 .

Repère	largeur / 2	largeur / 4
9,05m	0,06	0,06
7,5m	0,06	0,07
5,5m	0,06	0,06

Tableau II-4 – Valeurs du taux de cisaillement (en N/m²) en différentes sections (expérience du 18/04/00 à Gent)

Les résultats obtenus dans le canal de Gent vont servir de référence pour les expériences que nous avons réalisées dans le réseau d'assainissement.

1.2. Incertitudes associées aux matériels utilisés

Les incertitudes associées à la mesure sont de plusieurs types : incertitudes liées à l'appareil, incertitudes sur le positionnement de l'appareil, incertitude sur l'uniformité de l'écoulement.

1.2.1. Les incertitudes liées à l'appareil

• Micro-moulinet

Les mesures ont généralement été répétées trois fois pour chaque hauteur. L'erreur relative maximale par rapport à la moyenne de ces mesures est estimée à 4 % dans le canal de Gent. Nous avons également procédé à l'étalonnage du micro-moulinet dans le canal d'étalonnage du laboratoire d'Hydraulique de Gent : l'incertitude calculée sur la mesure ponctuelle vaut $\Delta u/u = 1,5$ %, ce qui est cohérent avec les valeurs constructeur.

• ADV

Les mesures sont réalisées à une fréquence de 25 Hz et nous utilisons des moyennes glissantes sur plusieurs minutes pour évaluer la vitesse moyenne. Nous avons donc considéré comme négligeable l'erreur relative maximale à la vitesse moyenne.

Nous avons également procédé à l'étalonnage de l'ADV dans le canal d'étalonnage du laboratoire d'Hydraulique de Gent : l'incertitude calculée sur la mesure ponctuelle vaut $\Delta u/u=3,5$ % pour des vitesse supérieures à 0,6 m/s, en deçà l'incertitude est négligeable.

1.2.2. Les incertitudes liées au positionnement de l'appareil

Pour le micro-moulinet, nous avons considéré que l'erreur de positionnement de l'hélice sur la tige de mesure pouvait atteindre 0,5 cm. Cette incertitude va avoir une influence sur le profil de vitesses et donc sur la détermination de la vitesse de cisaillement.

Pour l'ADV, l'appareil fait automatiquement la mesure de la distance entre la sonde et le radier. L'incertitude liée à cette mesure est négligeable.

2. Analyse du calcul du cisaillement sans dépôts

Nous avons réalisé une série d'expériences dans des collecteurs du Marais où il n'y avait pas de dépôt. Ces zones sont situées à l'aval des collecteurs Vieille du Temple et Rivoli.

2.1. Analyse des données ADV

Les mesures ADV permettent de faire un calcul direct du cisaillement. Nous avons réalisé des mesures à partir du fond puis nous avons évalué le cisaillement aux différentes hauteurs. Nous avons ensuite déduit le taux de cisaillement à la paroi en faisant la supposition d'une distribution verticale linéaire du cisaillement (méthode de Reynolds, cf. Equation II-11). Les profils mesurés et les profils déterminés à partir de la méthode de Reynolds pour les expériences en réseau sont dans la Figure II-11.

Pour toutes les expériences, la composante visqueuse du cisaillement $\tau_{lam}(z) = \mu \cdot \frac{d\overline{u}(z)}{dz}$ ne

dépasse jamais 2 % de la composante turbulente τ_{turb} , même pour les mesures effectuées près du fond (z/h < 0,1). Ceci confirme que les écoulements étudiés correspondent à des écoulements turbulents développés et que les mesures ont été réalisées en dehors de la couche limite visqueuse. On peut donc négliger la composante visqueuse de $\tau(z_i)$ pour la suite des calculs.Une dispersion importante du taux de cisaillement est observée dans la zone z/h <0,15: les variations du cisaillement d'un point à l'autre peuvent atteindre un facteur 6. Afin de déterminer si les variations pouvaient être expliquées par des évolutions de l'écoulement durant les expériences, des mesures ADV ont été effectuées sur 4 périodes successives de 5 minutes à deux hauteurs différentes z = 2 cm et z = 5 cm. Sur chaque enregistrement, \overline{u} et τ_{turb} ont été calculés. La variation maximale obtenue à ces deux hauteurs atteint 4 % sur $\overline{u}(z)$ et 15 % sur τ_{turb} . Les variations temporelles de la vitesse moyenne ne permettent donc pas d'expliquer la dispersion des données et on vérifie ici que l'écoulement est permanent par périodes.



Figure II-11 - Résultats obtenus avec les données ADV en réseau sans dépôt



Figure II-12 - Résultats obtenus avec les données micro-moulinet en réseau sans dépôt

Il faut rappeler que la variabilité près du fond a également été observée dans le canal de Gent où les conditions hydrauliques sont stables. Les hypothèses les plus vraisemblables concernent les échos du fond (en béton dans les collecteurs) qui peuvent expliquer une part importante de la dispersion observée ainsi que les turbulences près du fond et les petites perturbations du radier qui peuvent générer des phénomènes turbulents.

A cause de cette importante dispersion, nous avons éliminé les points situés dans la zone z/h < 0,1 avant de réaliser le calage de la régression linaire pour déterminer τ_{local} . L'erreur de lecture (± 0,5 cm) et la variabilité sur τ_{turb} (± 15 %) ont été appliqués aux données de cisaillement et l'incertitude estimée sur le taux de cisaillement vaut ± 17 %.

Le taux de cisaillement local évalué pour chaque site vaut (cf. Tableau II-5) :

$$\tau_{local,03/03/00} = 0,27 \text{ N/m}^2, \ \tau_{local,15/03/00} = 0,15 \text{ N/m}^2 \text{ et } \tau_{local,29/03/00} = 0,85 \text{ N/m}^2.$$

Si les points situés sous z/h = 0,1 n'étaient pas enlevés on obtiendrait les valeurs suivantes :

 $\tau_{local,03/03/00} = 0.37 \text{ N/m}^2$, $\tau_{local,15/03/00} = 0.12 \text{ N/m}^2$ et $\tau_{local,29/03/00} = 0.90 \text{ N/m}^2$.

2.2. Analyse des données de vitesse du micro-moulinet

Pour chaque expérience, les données micro-moulinet ainsi que les profils de vitesse déduits avec la distribution logarithmique sont présentés dans la Figure II-12.

Les régressions linéaires présentent de bons coefficients de corrélation, excepté pour l'expérience Rivoli-15/03/00. La variabilité temporelle de l'écoulement peut expliquer cette mauvaise corrélation. En effet, la réalisation de chaque profil nécessite environ 30 minutes. Nous avons fait un suivi de la variabilité temporelle de la vitesse mesurée avec le micro-moulinet dans Rivoli et Vieille du Temple à deux hauteurs différents sur une période de 20 minutes. Sur ces périodes, la variabilité de la vitesse moyenne $\overline{u}(z)$ atteint ± 10 %. Cette incertitude appliquée aux données des expériences induit une incertitude sur u^* de l'ordre de ± 10 % et de ± 20 % sur le cisaillement.

Il faut ajouter aux incertitudes liées à l'écoulement, l'incertitude liée à la lecture des hauteurs pour le micro-moulinet. L'erreur sur la hauteur a été estimé à $\pm 0,5$ cm. L'incertitude maximale induite sur u^* vaut $\pm 2\%$ et $\pm 4\%$ sur le cisaillement. Finalement, l'incertitude totale sur le taux de cisaillement au fond vaut $\pm 24\%$.

La détermination des régimes d'écoulement a fait apparaître que les régimes sont « transitionnels » pour toutes les expériences. Le taux de cisaillement au fond vaut $0,17 \text{ N/m}^2$ et $0,30 \text{ N/m}^2$ sur Rivoli et $1,32 \text{ N/m}^2$ sur Vieille du Temple. (cf. Tableau II-5). Dans le bassin du Marais, les cunettes où circulent les eaux usées sont en béton. Graf (1998) donne différentes valeurs de la rugosité équivalente pour du béton : $0,3 \text{ mm} < k_s < 3 \text{ mm}$. Ces valeurs sont cohérentes avec les valeurs de k_s déterminées à partir des expériences.

Enfin, on observe une bonne concordance pour les taux de cisaillement obtenus à partir des données micro-moulinet et ADV sur le collecteur Rivoli tandis que sur Vieille du Temple on observe un rapport d'environ 1,5 entre les résultats.

	Expérience	Rivoli	Rivoli	Vieille du Temple
		(03/03/00)	(15/03/00)	(29/03/00)
Résultats micro-	Régime	Transitionnel	Transitionnel	Transitionnel
moulinet (profil	<i>u</i> * (m/s)	0,017	0,013	0,036
de vitesses)	k_s	1,2 mm	0,9 mm	0,2 mm
	τ (N/m ²)	$0,\!30 \pm 0,\!05$	$0,17 \pm 0,03$	$1,32 \pm 0,32$
Résultats ADV	τ (N/m ²)	$0,\!27 \pm 0,\!05$	$0,15 \pm 0,03$	$0,85 \pm 0,15$
(loi de Reynolds)				

Tableau II-5 – Résultats du calage des profils théoriques de vitesse aux profils mesurés avec le micro-moulinet et taux de cisaillement τ (N/m²).

2.3. Evaluation du taux de cisaillement avec l'équation de mouvement

2.3.1. Pente du radier

Le taux de cisaillement a été calculé sur Rivoli avec la pente du fond lue dans les relevés topographiques établis en 1995 et relatifs au réseau d'assainissement du Marais. Pour Rivoli, on a obtenu : J = 0.09 % et τ_m calculé est 8 à 11 fois supérieur aux taux de cisaillement calculés à partir de la méthode basée sur le profil logarithmique (cf. Tableau II-6).

2.3.2. Pente d'énergie

La pente d'énergie a été déterminée, à partir de la relation de Darcy-Weisbach et de la formule de Manning-Strickler. Les résultats obtenus avec la pente d'énergie montrent un écart important entre J et Je et les résultats obtenus à partir de Je sont proches des valeurs obtenues avec la méthode basée sur les profils de vitesses. Les différences observées entre la pente du fond et la pente d'énergie peuvent s'expliquer par la non-uniformité de l'écoulement et les imprécisions sur la mesure de la pente. En effet, les relevés topographiques ont été effectués tous les 25 m à 50 m et cette distance ne permet pas de prendre en compte certaines déflections au niveau du radier. De plus, la présence de sédiments peut perturber la mesure topographique dans les égouts : les mesures topographiques sont faites en enfonçant une pige

	Expérience	Rivoli (03/03/00)	Rivoli (15/03/00)
Distribution log. des vitesses	$\tau_m (\mathrm{N/m^2})$	0,30	0,17
Distribution de Reynolds	$\tau_m (\mathrm{N/m^2})$	0,27	0,15
Pente du fond	J (%)	0,09	0,09
	$\tau_m (\mathrm{N/m^2})$	1,77	1,51
Darcy-Weisbach	Je (%)	0,011	0,008
	$\tau_m (\mathrm{N/m}^2)$	0,21	0,13
Manning-Strickler	Je (%)	0,017	0,012
	$\tau_m (\mathrm{N/m}^2)$	0,33	0,20

dans l'écoulement jusqu'à atteindre le radier, si la pige n'est pas bien enfoncée il est possible que les relevés prennent en compte une épaisseur de dépôts.

Tableau II-6 – Taux de cisaillement Erreur! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme. sur Rivoli (J: pente du fond, Je: pente d'énergie)

Les résultats obtenus à partir de la distribution logarithmique des vitesses ou de la loi de Reynolds peuvent être utilisés pour caler les paramètres de rugosité utilisés dans les relations de Manning-Strickler ou de Darcy-Weisbach. Par exemple, en calant le coefficient de Strickler K_s avec les résultats obtenus avec la distribution de Reynolds sur le site de Rivoli, on obtient une valeur moyenne K_s = 87. Cette valeur est proche de la valeur initiale choisie pour du béton lisse (K_s = 80).

A partir de ce type de calage, on peut éventuellement se contenter de faire des mesures de vitesse moyenne et de hauteur d'eau pour estimer le cisaillement dans un tronçon dont le radier est composé d'un matériau uniforme, c'est-à-dire dans un tronçon sans dépôt.

2.4. Variabilité spatiale du taux de cisaillement au fond

Nous avons étudié la variabilité du taux de cisaillement dans la longueur et la largeur de l'écoulement pour un collecteur du type Saint-Gilles et Vieille du Temple où le rapport b/h laisse supposer un effet des courants secondaires sur les caractéristiques de l'écoulement.

Pour cela, nous avons effectué des mesures en différents points du collecteur Vieille du Temple sur 8m de long, le 09/08/01 (vitesse d'écoulement : 0,45 m/s ; hauteur d'eau : 0,38 m) ainsi que des mesures dans une section transversale, le 29/03/01. Les points de mesure sont présentés schématiquement dans la Figure II-13 : trois profils de vitesse ont été effectués dans une section pour étudier les variations transversales du cisaillement et un profil de vitesse a

été effectué au milieu de la section en cinq points du collecteur situés à 2 m de distance les uns des autres pour étudier les variations longitudinales du cisaillement.

En chaque point nous avons fait un profil de vitesses avec le micro-moulinet et nous avons évalué le taux de cisaillement au fond avec la méthode de la distribution logarithmique des vitesses . Les résultats sont regroupés dans le Tableau II-7 et on constate que :

- les variations longitudinales du taux de cisaillement au fond sont peu importantes (entre 0,21 N/m² et 0,25 N/m²) ce qui permet de conclure que les conditions hydrauliques sont stables sur le tronçon de collecteur étudié.
- dans la section de l'écoulement, les valeurs du cisaillement varient jusqu'à 32 % : ces variations peuvent être liées à la forme « arrondie » du collecteur à la base des parois verticales ainsi qu'aux courants secondaires dans le plan perpendiculaire à l'écoulement.

Une étude plus approfondie permettrait sans doute de mettre en évidence les courants secondaires, mais pour cela il faudrait employer l'ADV car le micro-moulinet ne permet pas de prendre en compte la composante de la vitesse suivant l'axe perpendiculaire à l'écoulement.



Variation dans une section (29/03/01)		Variation long	gitudinale (09/08/01)
Position	τ au fond (N/m ²)	Distance	τ au fond (N/m ²)
		0m	0,23
b / 2	1,23	2m	0,21
b / 4	0,95	4m	0,21
b / 8	0,83	6m	0,23
		8m	0,25

Tableau II-7 – Variabilité spatiale du taux de cisaillement sur Vieille du Temple

2.5. Discussion : quelle méthode choisir ?

Nous avons constaté que τ_0 estimé à partir de la distribution logarithmique des vitesses est très proche de τ_0 estimé à partir de la méthode de Reynolds quand les points situés dans la zone z/h < 0,1 sont éliminés. Le micro-moulinet est d'un emploi plus simple que l'ADV en égout, c'est pourquoi nous utiliserons cette méthode pour des expériences ultérieures en réseau, durant des périodes de temps sec.

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour déterminer quel nombre de mesures était nécessaire à une bonne estimation du cisaillement. Quatre mesures à différentes hauteurs sont nécessaires pour obtenir un profil de vitesse similaire au profil complet et donc pour déduire une valeur correcte du cisaillement. La comparaison entre les résultats à partir du profil mesuré et du profil avec 4 points est présenté dans le Tableau II-8. Les hauteurs choisies pour effectuer les mesures coïncident avec la « méthode des 3 points » qui est décrite par Julien (1998) pour déterminer la vitesse moyenne d'un écoulement à z = 0.2h, 0.4h et 0.8h, auxquels on ajoute un point proche du fond à z = 0.15h afin de caler plus précisément le profil de vitesse.

Méthode	Rivoli Rivoli		Vieille du Temple	
	(03/03/00)	(15/03/00)	(29/03/00)	
Profil log. des vitesses « complet »	0,30	0,17	1,32	
Profil log. des vitesses à « 4 points »	0,29	0,17	1,28	

 Tableau II-8 – Comparaison du taux de cisaillement déterminé à partir d'un profil
 logarithmique complet ou avec 4 points de mesures

Toutefois, la méthode au micro-moulinet ne peut pas être utilisée dans des conditions de régime non permanent. Dans ce cas, la mesure en continu avec l'ADV à une hauteur est une bonne méthode pour estimer l'impact des variations de l'écoulement sur les variations du cisaillement, par exemple dans les expériences d'augmentations artificielles du débit menées par Ahyerre (1999). Au vu de la grande dispersion observée près du fond, il est préférable de choisir le point de suivi hors de la zone z/h < 0,1.

Enfin nous avons vu que la méthode classique basée sur la pente du fond peut amener à des erreurs importantes sur le taux de cisaillement calculé. L'utilisation de la pente d'énergie calculée à partir des relations de Darcy-Weisbach ou de Manning-Strickler donne des résultats comparables aux deux autres méthodes. Nous pensons qu'il peut être judicieux d'utiliser les résultats issus des méthodes du type distribution logarithmique des vitesses ou distribution de Reynolds pour valider les termes de rugosité utilisés pour décrire les tronçons de collecteur.

3. Analyse du cisaillement avec dépôts

La présence de dépôt a des répercussions sur l'uniformité de l'écoulement et donc sur l'évaluation du taux de cisaillement. Perrusquia *et al.* (1995) ont noté que la rugosité du fond peut être doublée lorsqu'on passe d'un dépôt plat à un dépôt légèrement perturbé. Nelson *et al.* (1995) ont également constaté que les turbulences au dessus des sédiments ont une influence forte sur les vitesses et que les estimations du taux de cisaillement basées sur l'hypothèse d'un régime permanent uniforme peuvent se montrer insuffisantes pour expliquer l'érosion à l'aval des dépôts, dans les cas où la topographie ou la rugosité ne sont pas uniformes.

Dans notre cas, le stock de matière organique que nous voulons étudier se trouve à l'interface eau-sédiment, c'est-à-dire dans des zones où l'on trouve des dépôts. Nous avons donc procédé à des expériences dans les collecteurs Saint-Gilles et Rivoli, en présence de sédiments, afin d'observer l'impact du dépôt sur le cisaillement et l'application des méthodes d'estimation du taux de cisaillement.

3.1. Caractéristiques des dépôts



3.1.1. Relevé des hauteurs de dépôts sur les sites étudiés



Un relevé des hauteurs de dépôts a été effectué sur une dizaine de mètres, toujours au milieu de l'écoulement (cf. Figure II-14), afin de choisir les points de mesure qui permettront d'observer l'impact d'une dune sur le taux de cisaillement au fond du collecteur. Les deux sites choisis présentent un relief d'environ 10 cm de haut (ce qui correspond à près 20 % de la hauteur de l'écoulement sur Rivoli et 30 % sur Saint-Gilles) qui s'étale sur 5 à 6 m de long.

Nous avons réalisé des profils de vitesse avec un vélocimètre électromagnétique en trois points sur chaque site : sur Saint-Gilles à 10 m, à 11,5 m et à 12,5 m du tampon et sur Rivoli

à 1 m, à 3,5 m et à 5 m du tampon. Nous avons également fait une étude avec l'ADV dans la zone intérieure de l'écoulement (z/h < 0,2) en trois points sur chaque site : sur Saint-Gilles à 11 m, à 12,5 m et à 13,5 m du tampon et sur Rivoli à 2 m, à 3,5 m et à 5 m du tampon. Ces points ont été choisis pour permettre d'observer le taux de cisaillement autour de la dune

et pour permettre de réaliser les deux types de mesures sur chaque site en une demi-journée.

3.1.2. Analyse granulométrique du dépôt

Une analyse granulométrique sur les dépôts situés dans les tronçons de collecteurs étudiés a été conduite en Août 2000 (cf. Figure II-15). Cette granulométrie permettra de confronter les coefficients de rugosité estimés aux diamètres caractéristiques des dépôts présents sur les sites (cf. Tableau II-9).



Figure II-15 - Granulométrie du dépôt grossier, dans les deux tronçons étudiés

	$d_{20}(mm)$	d ₅₀ (mm)	d ₉₀ (mm)
Rivoli	0,2	0,5	
Saint-Gilles	0,5	2,2	9

Tableau II-9 – Diamètres caractéristiques du dépôt dans les deux tronçons étudiés

3.2. Analyse des données de vitesse

3.2.1. Collecteur Saint-Gilles

Les profils de vitesse mesurés et les profils logarithmiques calés sont présentés dans la Figure II-16. Les résultats issus du calage des profils sont présentés dans le Tableau II-10. Sur le collecteur Saint-Gilles, on constate que l'écoulement est en régime turbulent rugueux.

Pour les points 11,5 m et 12,5 m, la rugosité estimée est de l'ordre de la d_{90} , ce qui assure d'une certaine cohérence entre la méthode employée et les critères physiques. Cette conclusion ne s'applique pas au point 10 m : la rugosité obtenue par calage en ce point ne correspond pas à la rugosité des grains qui est du même ordre de grandeur que la d_{90} des

dépôts grossiers, et elle ne correspond pas à la rugosité des « dunes » qui vaut 4,3 cm selon la définition de Van Rijn (cf. Equation II-19, citée par Viollet *et al.*,1998) :

$$k_s = 1.1 H_{dune} \times \left(1 - \exp\left(-25 \times \frac{H_{dune}}{L_{dune}}\right) \right)$$
 Équation II-19

en considérant que $H_{dune} = H_{depot} = 10$ cm et que $L_{dune} = L_{depot} = 5$ m.

Il est probable qu'une des hypothèses liées à l'application du profil logarithmique de vitesses ne soit plus vérifiée en ce point à cause de la variation rapide de pente (hypothèse : écoulement uniforme) ou à cause de courants secondaires liés à la géométrie des dépôts (hypothèse : écoulement unidirectionnel).

Enfin, on constate que la valeur du taux de cisaillement aux points 11,5 m et 12,5 m varie du simple au double, ce qui met en évidence la variabilité du cisaillement au-dessus du dépôt.

	Saint-Gilles (22/08/00)			Rivoli (29/08/00)		
	10 m	11,5 m	12,5 m	1 m	3,5 m	5 m
Régime turbulent	rugueux	rugueux	rugueux	transition.		transition.
k _s (mm)	98	9	14	140		148
u* (m/s)	0,043	0,046	0,031	0,056		0,061
$\tau (N/m^2)$	1,2	2,0	0,9	1,6		2,2

Tableau II-10 – Résultats de la méthode des profils logarithmiques de vitesses

3.2.2. Collecteur Rivoli

Les profils de vitesse mesurés et les profils logarithmiques calés sont présentés dans la Figure II-16. Les valeurs obtenues grâce au calage des profils sont présentés dans le Tableau II-10.

On constate que le point 3,5 m (en haut de la dune) correspond à un point particulier de l'écoulement avec des vitesses nulles sur quelques centimètres de hauteur : l'application de la méthode des profils logarithmiques ne peut pas être réalisée dans un telle configuration. Ce « comportement » de l'écoulement a été observé sur plusieurs minutes et nous n'avons pas trouvé d'explication à ce phénomène.

Sur les deux autres points autour de la dune, on constate que l'écoulement est en régime turbulent de transition mais les valeurs de rugosité obtenues suite au calage des profils de vitesse sont de l'ordre de 15 cm à 35 cm ce qui ne correspond ni à la taille des grains du dépôt, ni à la rugosité équivalente de la dune (cf. paragraphe ci-dessus). Il est probable que l'hypothèse de régime uniforme ne soit pas vérifiée en ces points.



Figure II-16 - Données de vitesse sur Rivoli (29/08/00) et sur Saint-Gilles (22/08/00)



Figure II-17 - Mesures ADV et taux de cisaillement sur Saint-Gilles et sur Rivoli

3.3. Analyse des données ADV

Les observations réalisées avec l'ADV sont présentées dans la Figure II-17 : elles concernent la partie basse de l'écoulement. En effet la tête de l'ADV doit être immergée pour fonctionner et les mesures sont effectuées à 11 cm au-dessous de la tête. Au vu des hauteurs d'eau sur les sites étudiés, les mesures ne peuvent donc pas s'étendre à toute la colonne d'eau.

Les profils de vitesse relevés avec l'ADV mettent en évidence des perturbations des vitesses dans les mêmes zones que le vélocimètre. Les vitesses mesurées sur Saint-Gilles montrent qu'au point 13,5 m il y a une zone morte dans l'écoulement avec un vitesse quasiment nulle (z/h < 0,07). Cette observation vient compléter les résultats obtenus avec le vélocimètre et montre qu'après le dépôt on trouve une zone où les vitesses ne se répartissent pas selon un profil logarithmique sur toute la hauteur d'eau. Les vitesses mesurées sur Rivoli font apparaître au point 3,5 m des vitesses très variables dans la zone étudiée.

Les observations que nous avons réalisées avec l'ADV sur Saint-Gilles se rapprochent des résultats présentés par Julien (1998). La Figure II-18 reprend les distributions de vitesse et de contrainte de cisaillement autour d'un obstacle de hauteur Δz dans le cas d'un écoulement fluvial permanent non-uniforme : on peut assimiler le profil de vitesse de la section B au point 13,5 m du collecteur Saint-Gilles.



Figure II-18 – Exemples de distribution des vitesses et des contraintes de cisaillement autour d'un obstacle (Julien,1998)

L'obstacle crée une perturbation locale non-uniforme de l'écoulement et la perturbation Δz agit sur le terme d'énergie spécifique, qui est négligé en écoulement uniforme. On constate alors que les profils de vitesse se détachent du profil logarithmique dans les zones proches du fond de l'écoulement et que les valeurs de cisaillement oscillent autour d'une valeur τ_0 qui correspond à la valeur en écoulement uniforme permanent. Dans ce cadre, le taux de cisaillement est plus important sur la face amont de la forme et il est plus faible sur la face aval de la forme. Ce mécanisme engendre une amplification de la perturbation de départ jusqu'au développement d'une dune qui grandit vers l'aval de l'écoulement.

L'analyse des taux de cisaillement calculés avec la loi de Reynolds montre une grande variabilité du cisaillement sur les points hauts du dépôt. L'étude des données ADV montre que, autour du dépôt, les valeurs de la vitesse transversale moyenne Vy sont du même ordre voire supérieures à la vitesse longitudinale moyenne Vx pour les points « sensibles » (le point 13,5 m sur Saint-Gilles et le point 3,5 m sur Rivoli) mais également pour les points situés très près du fond et dont la vitesse longitudinale est très faible (cf. Figure II-19). Ces phénomènes sont probablement liés aux turbulences engendrées par le dépôt. Une analyse approfondie des théories de la turbulence et des écoulements en 3D permettraient sans doute d'expliquer les résultats obtenus. Nous pouvons cependant noter que, autour du dépôt, les courants transversaux sont susceptibles d'avoir autant d'importance que le courant principal. Dans ce cas, l'écoulement ne peut pas être considéré comme étant unidirectionnel.

Les valeurs du cisaillement obtenues à partir des données ADV sont donc probablement sousestimées car nous avons effectué le calcul pour le taux de cisaillement appliqué dans le sens de l'écoulement et il faudrait prendre en compte les composantes transversales.



Figure II-19 - Vitesse moyenne longitudinale Vx et transversale Vy mesurées à l'ADV

3.4. Discussion

Les régimes d'écoulement déterminés autour des dunes de dépôt, à partir de la méthode des profils de vitesse, sont des régimes de transition ou rugueux. Perrusquia (1991) a également observé ce type de résultats avec des sédiments dans un canal : il a identifié un régime

turbulent rugueux au-dessus de « dunes » de dépôt et un régime turbulent de transition audessus de « rides » de dépôt (les rides sont des éléments de relief plus petites que les dunes).

De plus, les mesures effectuées avec l'ADV ont permis de montrer que l'écoulement autour des reliefs de dépôt n'est pas unidirectionnel et que, dans certaines zones, la répartition des vitesses ne suivait pas un profil logarithmique sur toute la hauteur d'eau.

Ces observations montrent que les hypothèses simplificatrices utilisées pour les méthodes de calcul du taux de cisaillement ne sont pas valides dans certaines zones du dépôt. Par exemple, la méthode de Manning-Strickler n'est valable que dans un écoulement turbulent rugueux.

Enfin, la détermination du taux de cisaillement ponctuel avec l'ADV, dans une zone de relief, semble également être problématique en canal. Saadi (2000) a procédé à différents essais en canal, avec un ADV à 1 cm au-dessus d'une lit de graviers dont le diamètre caractéristique d_{50} = 5 mm. Il a ainsi « quadrillé » une surface et a calculé le cisaillement en appliquant la distribution de Reynolds. Il a observé des variations du cisaillement, allant du simple au double, d'un point à l'autre, alors que les conditions hydrauliques sont stables. Ces variations semblent dues aux phénomènes de turbulence dans la zone proche du fond, et il faudrait considérer l'ensemble des mesures sur une zone pour avoir une estimation correcte du cisaillement moyen. On ne peut donc pas envisager d'utiliser l'ADV de façon ponctuelle pour obtenir une mesure du taux de cisaillement applicable sur un tronçon de collecteur.

On constate donc que toutes les méthodes pour l'estimation du taux de cisaillement ont un champ d'action limitée quand il s'agit de les appliquer à des zones avec du dépôt.

CHAPITRE 5. Conclusions et perspectives

Les expériences que nous avons menées dans les tronçons de collecteurs sans dépôt nous ont permis de définir une méthode pour évaluer le taux de cisaillement en réseau d'assainissement. Cette méthode se base sur l'établissement d'un profil de vitesse avec 4 points de mesures. Elle a été choisie parce qu'elle est simple à mettre en œuvre et qu'elle permet d'obtenir un résultat précis.

Cette méthode peut, par ailleurs, être utilisée pour déterminer ou pour valider les termes de rugosité utilisés pour décrire les tronçons de collecteur dans les modèles hydrauliques classiques (par exemple : coefficient de Strickler).

Les expériences menées en présence de dépôts dans les collecteurs du réseau d'assainissement du Marais ont montré que les dépôt affectent la distribution des vitesses dans l'écoulement. Les profils de vitesse ne suivent pas forcément une distribution logarithmique, illustrant ainsi que les hypothèses simplificatrices telles que « l'écoulement est uniforme » ne sont pas justifiées lorsque des mesures sont réalisées sur du dépôt. De plus les mesures de vitesses avec l'ADV montrent l'importance des courants transversaux dans la zone proche du fond.

De ce fait, l'évaluation du taux de cisaillement au fond, en présence de dépôts, se révèle complexe. Nous pensons qu'il faudrait faire un relevé tri-dimensionnel des reliefs du dépôt sur le tronçon à étudier, avec un petit pas d'espace, avant d'appliquer un modèle hydraulique capable de prendre en compte les phénomènes de re-circulations et de courants secondaires. Si le choix d'un tel modèle peut se justifier à petite échelle (tronçon de collecteur) pour comprendre les phénomènes mis en jeu, il est difficile à gérer à grande échelle (réseau) car c'est une approche gourmande en temps et en calculs.

Pour réaliser la suite de ce travail, nous avons finalement opté pour la technique basée sur le profil de vitesse afin d'étudier l'évolution du cisaillement le long des collecteurs du Marais, tout en sachant que cette méthode est limitée lorsqu'elle est utilisée dans des zones avec du dépôt, parce que c'est une méthode relativement simple à mettre en œuvre qui permet d'obtenir plus de renseignement sur l'écoulement qu'une simple mesure de vitesse moyenne.

PARTIE III. Caractérisation de l'interface eau-sédiment

CHAPITRE 1. Introduction

Les rejets urbains de temps de pluie sont chargés d'éléments en suspension qui ont un impact négatif sur l'environnement. Une partie importante de ces éléments polluants provient des dépôts constitués dans le réseau d'assainissement. Gromaire(1998) a estimé qu'entre 40 % et 70 % des MES, MVS, DCO et DBO₅ proviennent des dépôts, dans le cas du Marais.

On observe différents types de dépôts dans les réseaux d'assainissement unitaires : des dépôts grossiers minéraux qui se déposent au fond des collecteurs, des biofilms qui se développent dans la zone de battement des eaux usées et une interface organique qui se forme entre les dépôts grossiers et l'eau usée. Cette interface a été identifiée sous différentes formes : une couche organique à Paris(Ahyerre,1999), des « Near Bed Solids » à Dundee (Arthur,1996), un « Fluid Sediment » à Bruxelles (Verbanck, 1994).

Dans le Marais, la couche organique mise en évidence à l'interface eau - sédiment par Ahyerre (1999) est la principale source de pollution des eaux transportées par temps de pluie à l'exutoire du bassin versant. L'étude menée sur le Marais a permis de définir les zones d'existence de la couche organique, à partir de mesures indirectes, de caractériser les charges polluantes contenues dans la couche organique sur le collecteur Vieille du Temple dans le Marais et de fournir des éléments sur son comportement par temps sec (croissance) et durant des augmentations de débit (érosion).

Cette partie de notre étude vise à répondre à certains points restés en suspens tels que :

- valider les zones d'existence de la couche organique avec une méthode d'observation directe;
- préciser la nature de la couche organique sur tout le réseau du Marais ;
- étudier l'interface eau-sédiment dans des collecteurs différents du Marais afin d'observer s'il existe plusieurs types d'interfaces.

Pour cela nous avons développé une méthode d'observation basée sur un endoscope et nous l'avons appliquée dans les principaux collecteurs du Marais ainsi que dans des collecteurs de Dundee (G-B), de Hildesheim (Allemagne) et de Marseille. Ceci nous a permis de localiser et d'identifier différentes formes de l'interface eau-sédiment en réseau unitaire.

CHAPITRE 2. Synthèse bibliographique

1. Typologie des dépôts

Depuis (Crabtree, 1989), on définit 3 types de dépôts dans le réseau d'assainissement grâce à la typologie suivante (cf. Figure III-1) :

- les biofilms, qui se forment sur les parois des cunettes et de préférence dans la zone de battement des eaux de temps sec ;
- le dépôt grossier, plus ou moins consolidé et situé au fond de la canalisation ;
- l'interface eau/sédiment.

L'interface eau-sédiment n'est pas définie de manière uniforme et semble se présenter sous différents aspects. Nous ferons un état des connaissances dans la partie 1.3.



Figure III-1 – Typologie des dépôts en réseau d'assainissement

1.1. Les biofilms

Les biofilms sont composés de micro-organismes, de polymères extracellulaires et de substances organiques et inorganiques adsorbées. La surface des biofilms est rugueuse et filamenteuse, ce qui est dû à la présence de microorganismes formant des colonies, de type *Zooglea*, et à la présence de micro-organismes filamenteux (*Sphaerotilus*).

Les biofilms se forment par intermittence le long des parois du réseau, au niveau de la zone de battement des eaux et ont une épaisseur de quelques millimètres (Flemming, 1995). Ils présentent des teneurs élevées en matière organique : entre 30 % et 60 %, selon Gutekunst (1988) cité par Ahyerre (1999), et la teneur en DCO est de l'ordre de 0,8 g/g selon Krejci *et al.* (1987).

Dans le Marais, les analyses effectuées par Ahyerre (1999) montrent que, dans les biofilms, le taux de matières volatiles varie entre 39 % et 81 % et la teneur moyenne en DCO varie entre 1,1 g/g et 1,7 g/g.

1.2. Les dépôts grossiers

Les dépôts grossiers se déposent sur le fond des collecteurs, dans les endroits où les écoulements sont relativement lents, on les trouve donc souvent en tête de réseau.

Les principales caractéristiques du dépôt grossier sont présentées dans le Tableau III-1. La masse volumique des dépôts grossiers varie selon les systèmes d'assainissement. D'une manière générale, on constate que les dépôts grossiers sont minéraux.

	MV	DCO	DBO ₅	Masse	Teneur en eau
	%	gO ₂ /g	gO ₂ /g	Volumique	M _{eau} /
				(kg/m^3)	/M _{sèche}
Le Marais	3-13	0,06-0,22	0,01-0,06	2600	41 %-65 %
(Ahyerre, 1999)					
Hildesheim	9	0,01-0,27	0,01-0,09	1495	
(Ristenpart et al.,1995)					
Marseille	2			2680	15 %
(Laplace, 1991)					
Bruxelles	2-6			1510	21 %
(Verbanck, 1992)					
Dundee	3-15	0,02	0,01	1720	27 %
(Crabtree, 1989)					

Tableau III-1 - Caractéristiques du dépôt grossier

1.3. L'interface eau-sédiment

Les stocks de matière organique situés à l'interface eau-sédiment ont été identifiés par plusieurs auteurs, sous différentes appellations :

- « dépôt de type C » (Crabtree, 1989),
- « near bed solids » (Ashley et al., 1992) (Arthur, 1996),
- « dense undercurrent » (Verbanck, 1995) ou « fluid sediment » (Ristenpart et al., 1995),
- « couche organique » (Ahyerre,1999).

Ces différentes dénominations correspondent à des conceptions différentes de l'interface eausédiment. Ces conceptions ont par ailleurs orienté les méthodes de prélèvements mises en œuvre afin de réaliser l'analyse physico-chimique de l'interface (cf. Tableau III-2).

Il semble donc que les chercheurs aient observé des propriétés particulières à l'interface, suivant la méthode adoptée pour les prélèvements et les analyses :

- pour (Crabtree,1989) il s'agit de dépôts présents dans des zones où l'écoulement est stagnant,
- pour (Ashley et al., 1992) il s'agit d'un ensemble de solides transportés près du fond,
- pour (Brombach,1981), (Verbanck,1995), (Ristenpart *et al.*,1995) il s'agit d'un gradient de concentration au fond : le « fluid sediment » est prélevé par aspiration à la limite haute des dépôts consolidés. Les teneurs en MES mesurées peuvent atteindre jusqu'à 5 g/l,
- pour (Ahyerre, 1999) l'interface est une couche sédimentée et immobile par temps sec.

	Dénomination	« Concept »	Méthode
Crabtree	Dépôt, type C	Couche « mobile »	Pelle
Arthur, Ashley	Near bed solids	Solides mobiles	« Bed traps »
Verbanck	Fluid sediment	Saut de concentration	Pompes
Ristenpart	Fluid sediment	Saut de concentration	Pompes
Ahyerre	Couche organique	Couche immobile	Boite d'observation
			+ Boite de prélèvement

Tableau III-2 – L'interface eau/sédiment à travers l'Europe

1.3.1. Le dépôt de type C

Le dépôt de type C défini par Crabtree (1989) est un dépôt, composé de particules fines, qui se forme dans des zones d'« eaux mortes », seul ou au-dessus des dépôts grossiers situés au fond de l'égout (dépôts de type A). Il se présente comme un dépôt vaseux ou argileux, proche du sable fin et il est susceptible d'être mis en déplacement par l'écoulement même avec des valeurs très faibles du taux de cisaillement.

1.3.2. Les « Near Bed Solids »

Les « Near Bed Solids » sont des solides transportés près du fond de l'écoulement, en surface des dépôts grossiers. Afin de piéger ces solides des systèmes de « piège à charriage » ou « bed traps » ont été mis au point et utilisés à Marseille par Lin (1993) et à Dundee par Arthur (1996). A Marseille, les boites de prélèvement sont enfouies à l'intérieur du dépôt grossier et sont munies d'une fente sur la partie supérieure qui affleure à la surface du dépôt. A Dundee les boites de prélèvement sont placées dans une chambre de dessablement. Cette chambre a été préalablement isolée avec une couverture qui s'adapte à la forme du collecteur étudié. La partie supérieure des boites affleure ainsi au niveau du nouveau radier constitué (cf. Figure III-2).



Figure III-2 – Schéma des pièges à charriage et des « bed traps »

Les solides piégés par Lin (1993) ont des caractéristiques physiques proches des dépôts grossiers prélevés à Marseille ($d_{50} = 630 \,\mu m$, masse volumique > 2000 kg/m³). Les solides piégés à Dundee sont de nature variable selon les collecteurs étudiés (cf. Tableau III-3), mais il semble que sur Samuels Street et Constable Street on se trouve en présence de particules largement organiques. (Arthur, 1996) a noté la présence de grosses particules provenant visiblement des différents usages domestiques de l'eau potable comme des selles, des résidus de nourriture, des papiers, etc. dans les « bed traps ». Il faut noter qu'il y a des branchements particuliers dans tous les collecteurs étudiés.

Lieu	Population drainée	$ ho_{ ext{humide}}$	$ ho_{ m sèche}$	MV/MS	DCO/DBO ₅
d'échantillonnage	(habitants)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(%)	
1. Dens Brae Street	9500	1518	1020	10.8	3
2. Samuels street	13000	1096	207	54.3	2,5
3. Constable street	18000	~1000	81	77.2	1,3

Tableau III-3 – Données recueillies sur trois collecteurs de Dundee (Arthur,1996)La conception des « bed-traps » ainsi que les caractéristiques des sites étudiés peuventapporter des explications aux différences observées sur les solides prélevés :

- Lin (1993) a construit des « bed traps » avec une fente de $L_{bt} = 10$ cm de large, en se basant sur la longueur de saut moyenne (L_s) définie par VanRijn (1984) pour des particules sableuses de diamètre 2 mm (avec $L_{bt} > 0.5L_s$) tandis que Arthur (1996) a prévu une ouverture de 60 cm à 70 cm de large, suivant les sites étudiés, divisée en 6 cellules côte à côte.
- à Marseille, Lin (1993) a récolté des particules fines et « légères » proches de ce qui est observable en suspension sur un seul site, placé sous l'influence aval d'une jonction : à ce

point, les écoulements sont plus « tranquilles » que sur les autres sites étudiés. Il faut noter que les vitesses régnant dans le collecteur étudié par Lin (1993) varient entre 0,4 m/s et 0,7 m/s : ces valeurs sont proches des vitesses relevées sur Dens Brae Street (pour une journée de temps sec, la vitesse varie entre 0,38 m/s et 0,75 m/s) tandis que sur Samuels Street et Constable Street les vitesses varient entre 0,05 m/s et 0,38 m/s. De plus, la pente du collecteur vaut 4,6 % sur Dens Brae Street et 0,6 % sur Constable Street et Samuels Street.

Ces observations renforcent l'hypothèse selon laquelle les « NBS » organiques apparaissent dans des zones de faible vitesse et de faible pente.

1.3.3. Le « Fluid Sediment »

L'interface eau-sédiment est aussi considérée comme un « fluid sediment », caractérisé par un saut de concentration en MES près du fond. Cette notion a été largement développée par Verbanck (1993 ; 1995). Le graphique suivant (cf. Figure III-3) présente des exemples de profils de concentration relevés par Ristenpart *et al.* (1995) sur un site à Hildesheim, et relevés par Ahyerre (1999) en trois sites sur le collecteur Vieille du Temple (dans le Marais).



Figure III-3- Exemple de profil de concentration relevés en réseau d'assainissement unitaire

Les méthodes de prélèvement utilisées par différents auteurs (Brombach, 1981 ; Verbanck, 1993 ; Ashley,1994 ; Ristenpart *et al.*,1995 ; Ahyerre,1999) sont basées sur un même principe : prélever des échantillons à plusieurs hauteurs. Le graphique suivant (cf. Figure III-4) présente quelques schémas des appareil utilisés. On remarque que le système mis au point par Verbanck (1993) ne permet pas de prélever simultanément à plusieurs profondeurs.



Figure III-4 - Méthodes de prélèvement du « fluid sediment » par différents auteurs

Les caractéristiques du « fluid sediment » prélevé sur différents sites sont présentées dans le Tableau III-4. Tous les auteurs ont relevé une importante concentration en MES près du fond mais les concentrations maximales en MES sont variables d'un site à l'autre.

	MES (mg/l)	MVS/MES	DCO (mg/l)
Brombach (1981)	400-1250	43.8-70.3	568-2520
Verbanck (1993)	<5000	65-90	-
Ristenpart et al. (1995)	<3600	-	2520
Ashley & Verbanck (1996)	500-3500	32-68	-
Ahyerre (1996)	500-2000	40-75	500-5000

Tableau III-4 - Caractéristiques du « fluid sediment » étudié par différents auteurs





De plus, les profils de concentration près du fond varient en fonction de l'heure des prélèvements. Une analyse des résultats obtenus par Arthur (1996) permet d'observer que les profils sont liés aux évolutions du débit journalier (cf. Figure III-5).

Enfin, le « fluid sediment » n'est pas présent dans tous les collecteurs, et il n'est pas facile de prédire les lieux où on le trouve, saufs dans des situations particulières comme les zones de fort ralentissement (par exemple à l'amont des zones de confluence de deux collecteurs) selon Ristenpart *et al.* (1995).

2. L'interface eau / sédiment, sur le bassin versant du Marais

Sur le bassin versant du Marais, l'interface eau / sédiment a été identifiée par Ahyerre(1999) comme une couche de matière organique et de papiers, située en surface des dépôts grossiers minéraux (cf. Figure III-6).



Figure III-6 - Vue en coupe de l'interface eau-sédiment

2.1. Principaux résultats obtenus par Ahyerre

2.1.1. Observation de la couche organique

La méthode d'observation utilisée par Ahyerre(1999) dans Le Marais est schématiquement présentée dans la Figure III-7. C'est une boite d'observation en PVC (longueur : 1.5 m, hauteur : 55 cm, largeur : 11 cm) qui est fixée à la paroi de la cunette et pénètre dans le dépôt grossier. La face avant de la boite est vitrée et un miroir incliné à 45°, à l'intérieur de la boite, permet d'observer l'interface eau/sédiment. La hauteur du miroir dans la boite est ajustable grâce à des cales. Un couvercle étanche permet de laisser la boite dans l'égout durant de longues périodes.





La boite d'observation doit être mise en place une semaine avant les expériences car son installation perturbe les dépôts. Ahyerre (1999) a placé la boite en un point du collecteur Vieille du Temple, dans le Marais. Les observations qu'il a réalisé ont montré que :

- la couche organique est immobile durant le temps sec ;
- l'épaisseur de la couche organique est variable (de 1,5 cm à 7 cm selon les périodes d'observation).

2.1.2. Prélèvement de la couche organique

Des prélèvements ont été réalisés sur le bassin versant du Marais afin d'analyser la couche organique. Le système de prélèvement utilisé par Ahyerre (1999) est présenté sur la Figure III-8 : c'est un parallélépipède en PVC (longueur : 150 cm, largeur : 40 cm, hauteur : 50 cm) ouvert aux deux extrémités.



Figure III-8 - Schéma de la boite de prélèvement

Le système est placé dans la cunette et enfoncé dans le dépôt grossier suivant la direction de l'écoulement. La boite est laissée en place durant plusieurs jours avant de réaliser les prélèvements. Pour prélever la couche, deux guillotines en PVC sont glissées à l'extrémité de

la boite afin d'isoler l'échantillon. L'eau usée piégée dans la boite est ensuite pompée jusqu'à ce que l'interface organique soit atteinte, enfin la couche organique est raclée avec une petite pelle pour collecter les échantillons. Les échantillons sont ainsi prélevés après différentes périodes de temps sec.

Les caractéristiques de la couche organique prélevée par Ahyerre (1999) sont les suivantes :

- MVS / MES = 60 % à 75 % (médiane = 69 %)
- DCO / MES = 0.90 g/g à 1.43 g/g (médiane = 1.19 g/g)
- DBO₅ / MES = 0,19 g/g à 0,36 g/g (médiane = 0,3 g/g)
- DCO / DBO₅ = 3,9 a 4,9

Ces résultats ont été comparés avec les données obtenues par bilan de masses par Gromaire (1998) sur la masse et la nature des particules transitant entre l'amont et l'exutoire du Marais par temps de pluie. Cette analyse a permis de montrer que les caractéristiques des particules de la couche organique sont comparables à celles des particules érodées par temps de pluie (Ahyerre *et al.*, 2001a).

2.1.3. Comportement de la couche organique

Ahyerre (1999) a également précisé le mode d'accumulation de la couche organique sur le Marais grâce une série de prélèvements effectués à différents pas de temps (de 2 jours à 6 jours) sur un même site, durant des périodes de temps sec. Sur une période de 6 jours de temps sec, la couche s'accumule de façon à peu près linéaire dans le réseau d'assainissement, avec un taux de croissance égal à 215 g/m²/j (cf. Figure III-9).



Figure III-9 -Accumulation de couche organique par temps sec (Ahyerre,1999)

Des expériences d'érosion menées sur un tronçon de 150 m, dans le collecteur Vieille du Temple, par Ahyerre (1999) ont permis de montrer que la couche organique est érodée
progressivement lors des augmentations de débit, c'est-à-dire lorsque le taux de cisaillement augmente. L'érosion de la couche organique débute aux alentours de 0,4 N/m².

De plus il a observé que, lors des expériences d'érosion, les particules érodées sont de plus en plus minérales et que leur charge particulaire en métaux augmente. Il a également noté que les flux érodés augmentent brutalement à chaque augmentation de débit puis redescendent et se stabilisent. La masse de couche organique érodable par un cisaillement donné est donc limitée. La couche organique semble donc se comporter comme une matériau stratifié dont les caractéristiques physico-chimiques varient suivant la profondeur.

2.1.4. Localisation de la couche organique

Afin de localiser les zones où se développe la couche organique, Ahyerre (1999) a utilisé les résultats obtenus avec un appareil de prélèvement multi-profondeur (appareil utilisé pour l'étude du « Fluid Sediment »). Cet appareil permet de distinguer les zones où un gradient de concentration apparaît près du fond : les zones à fort gradient de concentration sont considérées comme caractéristiques de présence de couche organique à l'interface eau-sédiment, la couche étant partiellement aspirée lors des prélèvements.

Grâce à la cartographie établie à partir des profils de concentration, Ahyerre (1999) a déterminé que la couche organique s'accumule à l'amont des collecteurs, dans des zones où le taux de cisaillement, déterminé à partir de profils de vitesse mesurés en 3 points, est faible (inférieur à $0,1 \text{ N/m}^2$).

2.2. Origines de la matière organique dans le réseau, par temps sec

L'interface eau-sédiment est de nature très organique, quel que soit le système de prélèvement utilisé, et elle se constitue par temps sec. Il semble donc justifié de rechercher les origines possibles pour les matières organiques.

On peut distinguer trois types d'entrées dans le réseau par temps sec : les rejets des particuliers, les eaux de ruissellement (balayage des rues) et les rejets des industriels. Chaque type d'entrée est susceptible d'apporter des matières organiques.

Les activités de restauration sont très présentes sur le Marais, ainsi que la petite industrie (artisanat). Ces activités sont consommatrices d'eau et sont susceptibles de produire des matières organiques. Cependant nous ne disposons pas de données sur ces types de rejets. Nous avons donc mené cette étude sur les apports de matières liés aux rejets des particuliers et au balayage des rues.

2.2.1. Rejets des particuliers

2.2.1.1. Apports physiologiques

Des données de physiologie humaine ont été obtenues dans l'Encyclopaedia Britannica. Un être humain adulte produit entre 100 g et 180 g de matières fécales par jour (en moyenne, 150g/jour). La composition des selles est donnée dans le Tableau III-5. Globalement, les selles sont constituées à 75 % d'eau et la quantité de matière sèche produite par un individu est donc de l'ordre de **40g/jour**.

Les caractéristiques de la défécation d'une personne sont en rapport avec son âge, son état général, son régime alimentaire, etc. d'après Monestier (1997). On distingue, par la forme et la consistance de la matière fécale, trois types principaux : premièrement, « l'étron formé » qui provient généralement de nourriture riche en fibres, et qui est de forme cylindrique. Il mesure environ 2,5 à 4,5 centimètres de diamètre et 12 à 27 centimètres de longueur. Il se coupe parfois lors de l'évacuation. Deuxièmement, « la matière liée » qui ressemble à une bouillie épaisse et ne contient pas de grumeaux. Enfin, « la matière liquide », ou diarrhée, est l'évacuation répétée de liquides ou semi-liquides.

Cette description montre que les matières fécales peuvent être rejetées sous des formes différentes (solides, grosses particules, particules en suspension).

Eau	Eau	75 %
	Bactéries, cellules intestinales mortes	7,5 %
	Résidus non-digérés (protéines, cellulose)	7,5 %
Matières solides	Substances inorganiques (calcium, phosphate,)	2,5 à 5 %
	Cholestérol, graisses	2,5 à 5 %
	Pigments biliaires, ions,	1 %

Tableau III-5 - Données physiologiques

2.2.1.2. Apports divers

On retrouve dans les eaux-vannes (eaux issues des WC) d'autres composantes que les selles dont les volumes sont difficiles à évaluer. Nous les avons classé en deux catégories : les déchets solides (du type tampons hygiéniques, bâtonnets cure-oreilles,...) et les déchets dégradables (du type papier toilette).

• Déchets solides :

en Grande-Bretagne d'après Ashley (1999), chaque année, 56.000 tonnes de matières plastiques et d'objets à usage sanitaire sont jetés dans les toilettes. Chaque jour, 2.500.000 tampons et 1.400.000 serviettes hygiéniques transitent dans les égouts. Au niveau des STEP,

en Angleterre et en Ecosse, on relève environ **1 g/hab/jour** de déchets solides autres que des matières fécales (Friedler *et al.*,1996).

• Déchets dégradables :

selon des fabricants consultés par Friedler *et al.* (1996), un britannique consomme 19,4 g de papier toilette quotidiennement. Cependant les résultats d'une enquête menée par Friedler auprès de 250 personnes ont montré que la consommation de papier toilette dans les WC variait entre **6,4 et 7,8 g/hab/jour**. C'est ce dernier chiffre qui sera retenu, en supposant que la masse de papier toilette restant (entre 11,6 et 13,0 g/hab/jour) est utilisée par les consommateurs hors des toilettes. Par ailleurs, les résultats de l'enquête vis-à-vis de l'utilisation de WC sont cohérents avec les valeurs rencontrées dans la littérature : les gens vont à la selle 1 fois par jour.

Enfin, cette enquête permet de mettre en évidence le cycle journalier de la production de la matière organique. Le taux d'utilisation des WC pour aller « à la selle » connaît un pic le matin des jours de semaine à 3,5 chasses/100 hab/ 10 minutes entre 6h00 et 9h00, il est relativement stable le reste de la journée à 0,5 chasses/100 hab/10 min et il est nul entre 0h30 et 5h30.

2.2.1.3. Apports totaux

Afin de définir quel poste contribue aux apports de matières dans le réseau, Butler *et al.* (1995) ont réalisé une étude bibliographique sur les caractéristiques des eaux usées selon leur provenance : il apparaît que les résultats les plus complets ont été obtenus par Siegrist *et al.* (1976), sur une commune rurale des USA.

Ces résultats montrent que la majorité des matières sèches sont issues des WC et des machines à laver (77 % des matières totales), cf. Tableau III-6. Le total des Matières Sèches (MS) produites par ces 4 postes est d'environ **95 g/hab/jour**. On notera l'écart important entre les matières sèches et les matières en suspension (MES). Cette différence trouve sans doute son explication dans le fait que les matières produites ne sont pas toujours rapidement désagrégées en particules transportables en suspension.

	WC	Cuisine	Salle de bain	Machine à laver
MS (g/hab/jour)	28,5	13,8	4,6	48,4
MES (g/hab/jour)	12,5	4,4	2,3	10,9
DBO5 (g/hab/jour)	10,7	8,3	3,1	14,8

Tableau III-6 -	Composition	des eaux	usées	(Siegrist <i>et</i>	al., 19	976)
-----------------	-------------	----------	-------	---------------------	---------	------

2.2.1.4. Notion d'Equivalent Habitant

Les rejets des particuliers sont un mélange d'eaux domestiques (vaisselle, lessive) et d'eauxvannes (toilettes, WC). L'Equivalent Habitant (E.H.) exprime la charge polluante moyenne engendrée par un habitant et par jour (soit la charge polluante contenue dans 150 litres d'eaux usées). L'E.H. permet de dimensionner les stations d'épuration en fonction de la charge polluante, il a été déterminé à partir de mesures en réseau aux exutoires de différents bassins versants. Les valeurs données dans le Tableau III-7 correspondent à l'arrêté du 06/11/96. On peut constater une bonne relation entre les matières sèches mesurées par Siegrist et al. (1976) et les MES estimées selon l'Equivalent-Habitant.

Charge polluante	MES	Matière oxydable	Azote	Phosphore
1 E.H.	90 g	57 g	15 g	4 g

Tableau III-7 – Equivalent Habitant

On trouve aussi, d'après (Masson,1997) dans les eaux usées domestiques : de l'ammoniaque (3 à 7 g/hab), des graisses (5 à 15 g/hab) et des charges bactériologiques (3 à 5g/hab).

Satin et Selmi (1999) remarquent également qu'il existe des différences suivant les sites de mesures : les MES mesurées en réseau séparatif varient entre 60 et 80 g/hab/jour, les MES mesurées en réseau unitaire varient entre 70 et 80 g/hab/jour. Ils attribuent ces variations aux caractéristiques des réseaux étudiés (par exemple : la pente).

2.2.1.5. Bilan des apports des particuliers, au niveau du Marais

En considérant les données INSEE de 1994, la population sur le Marais peut être estimée à 12372 habitants. Nous avons appliqué cette donnée à différentes valeurs obtenues ci-dessus pour établir un « bilan » des apports des particuliers en matières sèches au réseau du Marais (cf. Tableau III-8). La couche organique décrite par Ahyerre (1999) est composée de papiers et de « matières organiques ». Le taux de croissance de la couche organique évaluée sur l'ensemble du Marais par Ahyerre (1999) est de 116 kg/jour. Cette masse représente environ 15 % de la production liée au poste WC et cuisine, les postes qui sont susceptibles d'apporter des papiers et des particules organiques « identifiables » visuellement.

	MS (kg/jour)
Données physiologiques, d'après l'Encyclopédia Britannica	495
Papier toilette, d'après (Friedler et al., 1996)	110
Poste cuisine, d'après Siegrist et al. (1976)	170

Tableau III-8 – Matières Sèches apportées au réseau du Marais, par les rejets des particuliers

2.2.2. Ruissellement sur les chaussées

A Paris, le balayage est effectué avec un apport d'eau non potable à partir de bornes placées tous les 50 m le long des chaussées. Le balayage entraîne dans le réseau des matières d'origines diverses : des papiers (journaux,...), des emballages, des feuilles mortes, des crottes de chien, ...

(Gromaire,1998) a effectué des expériences sur le réseau d'assainissement du Marais afin de déterminer, à l'aide de bilans de masse, les caractéristiques des particules apportées au réseau d'assainissement par le ruissellement. Les caractéristiques des particules entraînées par le lavage des rues sont présentées dans le Tableau III-9.

	MVS/MES	DCO _{part} /MES	DBO _{5,part} /MES	Vitesse de chute
Caractéristiques	54 %	0,83 gO ₂ /g	0,47 gO ₂ /g	$V_{80} = 0,37 \text{ cm/s}$
des particules				$V_{50} = 0,02 \text{ cm/s}$

Tableau III-9 -Comparaison des particules entraînées par le lavage des rues

Un bilan des masses entrant dans le réseau est présenté dans le Tableau III-10. Ces valeurs ont été obtenues à partir de données quantifiées au niveau de 3 chaussées puis extrapolées à l'ensemble des 21 km de caniveaux du Marais. Les solides grossiers qui ne sont pas transportés en suspension (ex : graviers, canettes, déchets divers) n'ont pas été pris en compte dans ce bilan. On constate que les apports au réseau en MES par ruissellement sont minoritaires par rapport aux apports des particuliers.

	MES	MVS	DBO ₅	DCO
Masse (kg/jour)	35	19	14	53

Tableau III-10 - Masses apportées au réseau du Marais, par le lavage des rues

2.2.3. Transformation des matières dans le réseau

2.2.3.1. Variations de diamètre

Nous ne savons pas comment les matières solides produites au niveau des particuliers sont désagrégées au cours de leur passage dans le siphon et dans le raccordement jusqu'à l'égout. Nous ne connaissons donc pas la taille moyenne des matières issues des rejets des particuliers qui entrent dans le réseau d'assainissement.

Arthur (1996) a observé à Dundee, au point de mesure aval du bassin versant de 340 ha qu'il a étudié, que les papiers transitant dans le réseau avaient été déchiquetés et présentaient des diamètres inférieurs à **20 mm**.

Davies *et al.* (1997) ont effectué des expériences en canal sur les solides que l'on retrouve en égout. Les premiers résultats obtenus montrent que les matières fécales et le papier toilette sont rapidement détériorés tandis que les autres solides (serviettes et tampons hygiéniques, bâtonnets cure-oreille, couches,...) sont peu abîmés. Les particules et les solides entrant dans le réseau sont donc susceptibles de subir des dégradations physiques liées aux conditions de transport : certains éléments peuvent se désagréger en particules plus petites tout au long du parcours. Nous pouvons alors supposer que le trajet dans le réseau va avoir une influence sur les caractéristiques des matières transportées. Cet élément peut être pris en compte en utilisant une classification des collecteurs suivant leur rang depuis les collecteurs à l'amont jusqu'aux collecteurs à l'aval.

Enfin, durant nos observations sur le Marais, nous avons pu constater que des papiers de grande taille (plusieurs centimètres de longueur) circulaient dans les collecteurs. Ils proviennent probablement des entrées les plus proches, notamment des avaloirs, et ils n'ont donc pas eu le temps de se détériorer suffisamment. Les rejets des particuliers ont sans doute des temps de parcours plus long et plus « tortueux » que les éléments provenant du balayage des rues.

Comme exemple de rejet de particulier nous pouvons citer le cas d'un sani-broyeur SFA. D'après le fabricant, un sani-broyeur broie et évacue les eaux usées et les eaux vannes jusqu'à une distance de 50 m ou une hauteur de 4 m. Les matières évacuées par ces appareils ne dépassent pas **10 mm**, et sont mélangées à une quantité d'eau allant de 4 à 10 litres selon la chasse d'eau.

2.2.3.2. Variations de composition

Le séjour de matières organiques (matières fécales, matières d'origine "alimentaire",...) en réseau d'assainissement dure de quelques heures à plusieurs jours, si on considère qu'elles transitent en suspension ou qu'elles se déposent dans le fond des collecteurs. Ce temps de séjour doit avoir des conséquences sur la composition physico-chimique des matières : il doit y avoir une part de dégradation bactérienne, par exemple. Les résultats du programme de recherche « évolution spatiale des carcatéristiques et des origines des polluants dans les réseaux d'assainissement unitaire », mené sur le site OPUR, devraient apporter des renseignements dans ce domaine.

3. Conclusions

Les stocks de pollution représentés par les dépôts grossiers et les biofilms en réseau unitaire sont relativement bien connus. En revanche, les données sur les stocks de matière organique constitués à l'interface eau-sédiment font apparaître des divergences : les stocks semblent exister sous des formes différentes (« fluid sediment », « NBS », couche organique). Nous avons pu constater que les méthodes utilisées pour identifier ce stock varient suivant les sites étudiés.

Ahyerre (1999) a mis en évidence certaines caractéristiques de l'interface eau-sédiment, dans le réseau du Marais :

- les stocks de matière organique se présentent sous la forme d'une couche organique, probablement stratifiée ;
- la couche organique croit avec un taux d'accumulation de 116 kg/jour et son seuil d'érosion est de l'ordre de 0,4 N/m²;
- la couche organique est présente dans les zones où le taux de cisaillement est inférieur à 0,1 N/m².

La localisation à l'échelle du bassin versant de la couche organique réalisée par Ahyerre (1999) est basée sur des prélèvements multi-profondeurs. Ce type de méthode a conduit Verbanck (1993) et Ristenpart *et al.* (1995) à identifier les stocks de matières organiques comme un « fluid sediment ». Il parait donc judicieux de développer une méthode permettant de visualiser l'interface eau-sédiment in situ afin de localiser et d'identifier précisément les stocks de matières organiques.

Cette méthode sera validée sur le Marais et sera ensuite appliquée aux collecteurs où des stocks de matières organiques à l'interface eau-sédiment ont déjà été identifiés, en Europe. Ceci permettra d'observer l'interface eau-sédiment avec une seule méthode pour pouvoir établir des comparaisons entre les différents sites et permettre de définir des critères pour l'existence des stocks de matières organiques à l'interface eau-sédiment.

Par ailleurs, les échantillons de couche organique ont été prélevés par Ahyerre (1999) sur un collecteur dans le Marais. Une nouvelle série de prélèvements en d'autres points permettra de valider les caractéristiques physico-chimiques de la couche organique.

<u>CHAPITRE 3. Caractérisation et localisation de l'interface</u> <u>eau – sédiment</u>

1. Système d'observation avec un endoscope

Le système d'observation portatif a été conçu pour respecter deux critères : il doit être facilement transportable dans les égouts afin d'étudier des portions de collecteur importantes et il doit permettre une vue en coupe des sédiments sans les détruire. Ce point est le plus contraignant car Ahyerre (1999) a décrit la couche organique comme une couche très peu résistante et facilement érodable. Le système choisi donc d'avoir une surface d'approche aussi petite que possible afin de ne pas perturber la couche organique.



Figure III-10 - Système d'observation

Nous avons fixé notre choix sur l'utilisation d'un endoscope (Olympus R080-104-090-50) (cf. Figure III-10). L'endoscope a une longueur de 104 cm avec un diamètre de 8 mm et un axe d'observation latéral à 90°. Il est associé à une source lumineuse, de type lampe halogène au tungstène (150 W). La lumière est concentrée dans un guide de lumière pour éclairer la zone d'observation. L'endoscope est alimenté par une batterie 12 V et un appareil photo numérique peut être adapté à l'oculaire de l'endoscope et des photo des sédiments peuvent donc être prises sur le site : la zone observée a un diamètre de 4 mm.

Une gaine en Plexiglas protège l'endoscope : elle a une longueur de 100 cm et a une section carré de 2 cm x 2 cm. Quatre languettes flexibles permettent de maintenir l'endoscope en position à l'intérieur de la gaine pendant les expériences. La gaine est profilée afin de pénétrer facilement dans le dépôt grossier. Des graduations ont été réalisées tous les 5 mm sur une face de la gaine avec des notes de référence tous les 5 cm.

2. Méthodologie pour le suivi des collecteurs du Marais

2.1. Le bassin versant du Marais



Figure III-11 - Bassin versant du Marais (contours en pointillé)

Notre étude a été essentiellement réalisée sur le bassin versant urbain du Marais (cf. Figure III-11). Ce bassin versant a été choisi parce qu'il a déjà fait l'objet d'études sur le même thème durant le programme expérimental « Génération et Transport de la pollution des RUTP en réseau d'assainissement unitaire ». De plus, la Ville de Paris nous facilite l'accès à cette zone du réseau d'assainissement ce qui nous permet des descentes fréquentes.

Ce bassin versant est situé au centre de Paris, sur une partie des 3^{ième} et 4^{ième} arrondissements, dans le quartier du Marais. L'occupation du sol est représentative d'un centre ville ancien : il s'agit d'un quartier résidentiel. L'habitat est dense avec 295 habitants par hectare, soit une population totale de 12 372 habitants (INSEE, 1990). Cette population est répartie uniformément sur l'ensemble du bassin. L'activité principale est le petit commerce ainsi que la restauration et les diverses activités du secteur tertiaire. Ces activités sont réparties de façon

relativement uniforme sur l'ensemble du bassin versant, avec cependant une plus forte concentration le long des principaux axes de circulation : rue de Rivoli, rue St Antoine, rue des Francs Bourgeois, rue Vieille du Temple, rue de Turenne. Enfin, un nettoyage régulier est pratiqué sur l'ensemble de la voirie du bassin versant.



Figure III-12 - Vue en coupe de différents collecteurs du Marais

Le bassin versant du Marais est drainé par un réseau unitaire, entièrement visitable, ses caractéristiques sont connues, et la présence de dépôts de tous types en quantité importante a été observée durant tout le programme de recherche. Sa surface est de 42 hectares. Le coefficient de ruissellement est d'environ 0,78 et la pente moyenne du bassin est de 0,84 %. Les trois principaux collecteurs (cf. Figure III-12) du bassin versant du Marais sont les suivantes :

• <u>Collecteur Vieille du temple</u> longueur totale: 596 m pente équivalente: 0,06 % Le collecteur présente une pente nettement plus forte (0,7 %) sur ses 80 premiers mètres amonts. Après un important élargissement de la section à 525 m du point aval, cette pente prend une valeur de l'ordre de 0,02 % à 0,2 % (moyenne 0,05 %) sur tout le reste du parcours.

• <u>Collecteur St Gilles</u> longueur totale: 798 m pente équivalente: 0,04 % Ce collecteur présente une pente très faible, de 0,02 à 0,03 % dans les 250 m amont jusqu'à une zone très perturbée avec des contre-pentes sur 150 m (on notera la présence d'un coude situé à 400 m de l'amont). Sur les 400 m à l'aval, la pente est relativement constante et de l'ordre de 0,05%.

• <u>Collecteur Saint-Antoine/Rivoli</u> longueur totale: 430 m pente équivalente: 0,09 % Le collecteur Rivoli présente une pente relativement constante sur tout son parcours jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Nous avons limité notre étude aux 200 m amont de Rivoli (cette partie du collecteur s'appelle « collecteur Saint-Antoine ») car des travaux d'entretien et de curage étaient prévus sur la partie aval qui ont donné lieu à un écoulement rapide peu favorable à la formation de couche organique. Avec le changement de nom intervient un changement de section du collecteur qui passe d'une largeur de 60 cm à 1,2 m.

2.2. Méthodologie pour la localisation de la couche organique

Afin de comparer les observations à l'endoscope sur le Marais avec les résultats obtenus par Ahyerre (1999) à l'aide des profils de concentration en MES, il a été décidé de travailler sur les même collecteurs et avec les mêmes pas d'espace que Ahyerre (1999). Les profils de MES avaient été réalisés tous les 50m sur Saint-Gilles, Vieille du Temple et Rivoli (soit environ 30 points). Nos observations ont été réalisées comme suit :

- tous les 25 m sur Saint-Gilles en Décembre 2000. La partie amont du collecteur a été étudiée une seconde fois en Février 2001, tous les 10 m à 15 m afin d'affiner les données sur la présence de la couche organique.
- tous les 50 m sur Vieille du Temple, en Janvier 2001.
- sur quelques points dans la partie amont de Rivoli (coll. Saint-Antoine), en Janvier 2001.
 Le nombre d'observations a du être limité à cause de difficultés d'accès dans cette zone ainsi qu'à des travaux de réhabilitation.

Les trois collecteurs que nous avons étudiés (Saint-Gilles, Vieille du Temple, Saint-Antoine) présentent des similitudes géométriques au niveau de la cunette où s'écoulent les eaux de temps sec avec une largeur de 60 cm à et une profondeur variant de 40 cm à 60 cm. On peut dresser sommairement une hiérarchie de collecteurs :

- branchement particulier..... niveau 1
- égout élémentaire qui rassemble des branchements particuliers...... niveau 2
- collecteur primaire qui rassemble des collecteurs élémentaires niveau 3
- collecteur secondaire qui rassemble des collecteurs primaires niveau 4
- émissaire qui rassemble des collecteurs secondaires niveau 5

Les collecteurs que nous avons étudiés peuvent être classés au niveau 3. Ces collecteurs reçoivent des eaux en provenance directe de branchements particuliers, d'égouts individuels (niveau 1) et d'égouts élémentaires (niveau 2). Les collecteurs de niveau 2 et les égouts individuels (niveau1) n'ont pas été étudiés car les cunettes se réduisent à des caniveaux dans lesquels on ne trouve pas de dépôts grossiers continus, comme sur les plus gros collecteurs. Systématiquement, cinq observations ont été réalisées pour chaque site : 3 observations ont été réalisées dans la section étudiée et 2 observations supplémentaires ont été effectuées au milieu de l'écoulement 1 m à l'amont et 1 m à l'aval de la section étudiée. Ces observations ont pour objectif de s'assurer que les relevés sont bien caractéristiques du site.

Pour faire une observation, la gaine en Plexiglas est enfoncée rapidement et en un seul mouvement dans l'eau et les sédiments. L'endoscope peut ensuite glisser à l'intérieur de la gaine qui reste fixe. Après la mise au point, les observations et des photos peuvent être réalisées. Le niveau de chaque interface est lu grâce aux graduations. Comme la gaine n'atteint pas toujours le radier, à cause de la forte résistance des dépôts grossiers, des mesures de hauteur de dépôt grossier et de hauteur d'eau ont été faites à la pige en chaque point, après l'observation à l'endoscope.

Enfin, en chaque point, des profils de vitesses avec 4 ou 5 mesures à différentes hauteurs ont été réalisés avec le micro-moulinet OTT-C2. La plus grande partie des expériences se sont déroulées durant l'après-midi afin d'avoir un écoulement relativement stable.

2.3. Méthodologie d'échantillonnage et d'analyses

A partir de la cartographie de la couche organique, deux sites séparés par 50 m sur le collecteur Saint-Gilles (pk650 et pk600) ont été choisis afin de réaliser des prélèvements. Ils correspondent à des zones où des stocks importants de matière organique ont été observés et sont situés sur un collecteur différent de celui étudié par Ahyerre (1999). Trois échantillons ont été prélevés au point PK600 en Février 2001 et trois autres au point PK650 en Mars et Avril 2001.



Figure III-13 -Sites de prélèvement sur le collecteur Saint-Gilles

2.3.1. La boite à prélèvement

Pour échantillonner la couche organique, le système de prélèvement utilisé par Ahyerre (2001) (cf. Figure III-8) a été réduit en taille afin d'être plus facilement transportable. Les nouvelles dimensions de la boite de prélèvement sont les suivantes : longueur : 85 cm, largeur : 30 cm, hauteur : 50 cm.

2.3.2. Les analyses physico-chimiques

Les échantillons de couche organique ont été dilués 30 à 50 fois avant analyse pour ramener les concentrations en matières sèches (MS) à une valeur maximale de 1 g/l afin de rester dans les gammes de mesure pour la Demande Biologique en Oxygène (DBO₅) et la Demande Chimique en Oxygène (DCO). Les protocoles d'analyse pour les MS, les Matières Volatiles (MV) et la DBO₅ sont basés sur la norme AFNOR NF T 90-105, NF T 90-209 et NF T 90-103. La DCO est déterminée suivant la micro-méthode Hach, validée par Saad *et al.* (1996). Pour la DCO et la DBO₅ les échantillons ont été broyés et homogénéisés avant analyse. Nous avons également effectué des mesures physiques sur les échantillons bruts :

- détermination de la masse volumique humide ρ_{humide} par pesée d'un volume déterminé d'échantillon de couche organique prélevée (entre 100 ml et 250 ml);
- détermination de la masse volumique sèche apparente ρ_{sèche _apparente} par pesée d'un échantillon de couche séché à l'étuve (105°C) durant 2 heures, en considérant le volume d'échantillon initial ;
- détermination de la teneur en eau en calculant le rapport des masses de l'échantillon de couche organique avant et après séchage à l'étuve ;
- détermination de la masse volumique des particules ρ_{particulaire} avec un pycnomètre à hélium sur un échantillon de couche organique séché à l'étuve (105°C) durant 2 heures.

Le mode de prélèvement utilisé déstructure fortement la couche, les mesures physiques effectuées doivent donc être considérées comme des approximations.

3. Le suivi des collecteurs du Marais : résultats

3.1. Nature de l'interface eau – sédiment

Différents éléments ont pu être visualisés grâce à l'endoscope :

- le dépôt grossier (type A suivant la classification de Crabtree) se présente comme un dépôt très sombre (noir et gris) composé de particules bien distinctes de diamètre millimétrique.
- l'eau usée apparaît en gris clair avec des très fines particules brillantes.
- à l'interface entre l'eau et le dépôt grossier on observe dans certaines zones une couche immobile composée de particules plus grosses que dans le dépôt grossier mais avec des contours mal définis. Les particules ont des couleurs brunes et orangées. La hauteur de cette couche varie entre 2 cm et 15 cm et elle ressemble à la couche organique observée sur Vieille du Temple par Ahyerre (1999) au moyen d'une boite d'observation.

• une deuxième couche située au-dessus de la couche organique a également été observée.

Cette couche à une texture « crémeuse » et nous l'avons observée au-dessus des dépôts grossiers et de la couche organique. Elle n'offre aucune résistance, tout comme la couche organique, à l'enfoncement de la pige ou d'un moulinet , ce qui explique qu'elle n'ait pas été détectée auparavant. A l'intérieur de cette « crème », le moulinet relève des vitesses nulles ou légèrement négatives, ce qui laisse supposer que cette phase de l'écoulement est stagnante. On observe une couleur claire sur les images : cette couleur est probablement due à la réflexion de la lumière produite par l'endoscope. Ceci nous permet de supposer que la « crème » est constituée de très fines particules qui forment un écran réfléchissant à la lumière. Les bulles de gaz observées peuvent signifier qu'une forte activité bactérienne se développe à l'intérieur ou au-dessous de la « crème ».

Cette « crème » a été observée dans des zones de forte décélération, à l'amont d'amas de flottants ou de grosses arrivées latérales, dans les collecteurs Saint-Gilles et Vieille du Temple. Elle atteignait une hauteur de 15 cm dans la partie amont de Saint-Gilles en Décembre 2000, et elle avait quasiment disparu lors du suivi réalisé en Février 2001. Cette observation montre que la « crème » n'est pas présente en permanence dans les collecteurs.



Figure III-14 - Images obtenues avec le système endoscope

Nous n'avons pas réussi à prélever et à analyser la « crème » avec la boite de prélèvement utilisée pour la couche organique. En effet, son caractère liquide et sa présence dans des endroits proches de problèmes hydrauliques ne permettent pas l'utilisation d'un tel système.

3.2. Caractéristiques physico-chimiques de la couche organique

Nous avons effectué trois prélèvements sur chaque site à des dates différentes. Les résultats des différents prélèvements sont rassemblés dans le Tableau III-11.

		PK 650			PK 600			
		07/03/01	22/03/01	03/04/01	06/02/01	22/02/01	28/02/01	
MV	g/g	82	49	73	78,4	76,5	75,5	
DBO ₅	gO ₂ /gMS	0,6	0,2	0,5		0,3	0,4	
DCO	gO ₂ /gMS	1,6	0,9	1,7	1,9	0,6	1,5	
DCO/DBO ₅	gO ₂ /gMS	2,7	4,1	3,4		1,6	3,9	
$oldsymbol{ ho}_{humide}$	kg/m ³	1046	1249	1026	1116	1135	1315	
$ ho_{{\scriptstyle s}{\scriptstyle e}{\scriptstyle che}_{\scriptstyle apparente}}$	kg/m ³	137	226	167	118	165	285	
<i>ρ</i> particulaire	kg/m ³	1441	2224	1330	1841	1525	1522	
Teneur en eau	%	87	82	84	90	85	78	
Temps sec précédent	jour	0,6	0,5	5	1	9	6	

Tableau III-11- Caractéristiques physico-chimiques de la couche organique, site de prélèvement PK650 et PK600

On constate que la variabilité des mesures est importante d'un échantillon à l'autre et qu'il n'y a pas de relation entre la durée de temps sec et la nature des particules.

L'échantillon du 22/03/01 semble voir été contaminé par du dépôt grossier (faible teneur en MV et masse volumique particulaire élevée). De plus, on note la présence de couche organique dès le lendemain d'une pluie, ce qui laisse supposer que la couche se reconstitue rapidement.

Les masses volumiques sèches et humides sont en accord avec les valeurs citées par Crabtree (1989) (masse volumique humide moyenne Dépôt C: 1170 kg/m³) et Arthur (1996) (masse volumique humide des NBS : de 1000 kg/m³ à 1518 kg/m³). Ces masses volumiques sont très

proches de la masse volumique de l'eau, ce qui est logique lorsqu'on remarque que les teneurs en eau de ces matériaux sont très élevées (78 % à 91 %).





La Figure III-15 permet de comparer les caractéristiques moyennes de la couche organique entre différents sites : il n'y a pas d'évolution significative des teneurs en polluants entre les deux sites du collecteur Saint-Gilles.

On note une ressemblance importante entre la couche organique prélevée sur Saint-Gilles et la couche organique prélevée par Ahyerre (1999) sur le collecteur Vieille du Temple : les teneurs en matière volatile et en DBO₅ sont du même ordre. On constate cependant que, sur Saint-Gilles, les teneurs particulaires en MV et en DCO sont plus élevées et que le rapport DCO/DBO₅ est plus faible : il semble donc que la couche prélevée sur Saint-Gilles soit plus organique que la couche prélevée sur Vieille du Temple. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cet écart : une origine différente des particules (occupation du sol) ou un prélèvement « partiel » de la couche organique. En effet, les prélèvements sont effectués en fonction de la couleur du sédiment ; si la couche est stratifiée, il est possible que des particules récentes se trouvent en surface et que des particules plus anciennes se trouvent vers la base de la couche. Nous avons peut-être échantillonné uniquement la partie superficielle de la couche organique.

3.3. Cartographie de la couche organique

Les graphiques sur les pages suivantes (Figure III-16, Figure III-17) regroupent les observations réalisées sur le collecteur Saint-Gilles et le collecteur Vieille du Temple. Le nombre d'observations réalisées sur Saint-Antoine est trop faible pour être représenté ici.



Figure III-16 - Dépôts grossiers et hauteur d'eau relevés sur Saint-Gilles



Figure III-17 – Dépôts grossiers et hauteur d'eau sur Vieille du Temple

3.3.1. Evolution des dépôts grossiers et de la vitesse moyenne

On relève les effets du curage qui a eu lieu en 2000 sur le collecteur Saint-Gilles (cf. Figure III-16) : les hauteurs de dépôts grossiers sont plus faibles que les hauteurs relevées par Ahyerre (1999), en 1997. On note l'absence de dépôts grossiers sur les 150 mètres situés à l'aval du collecteur.

Sur le collecteur Vieille du Temple (cf. Figure III-17), les hauteurs des dépôts grossiers ont peu évolué depuis les relevés effectués en 1997 par Ahyerre (1999). Il n'y a pas de dépôts sur les 80 mètres à l'aval puis on observe une augmentation régulière de la hauteur des dépôts, de l'aval vers l'amont. Le collecteur a donc atteint une « limite » d'encrassement : Ahyerre (1999) avait déjà constaté que les hauteurs de dépôt avaient peu évolué depuis les relevés effectués en 1995.





On peut également noter l'évolution de la vitesse moyenne de l'écoulement de l'amont vers l'aval du collecteur Saint-Gilles (cf. Figure III-18) : la vitesse moyenne augmente régulièrement avec la distance à l'amont. Cette évolution correspond à une augmentation de la pente du collecteur ainsi qu'à une augmentation du débit liée aux apports tout le long du collecteur. La présence de flottants dans la zone amont du collecteur perturbe la mesure de hauteur d'eau, dans la zone aval (entre les points PK0 et PK500) le profil de hauteur d'eau suit les évolutions du fond.

Il faut préciser que la détermination de la vitesse moyenne de l'écoulement n'est pas aisée dans la zone amont (entre PK600 et PK800) car le moulinet s'enfonce sans rencontrer de résistance dans la couche organique et la « crème ». Il relève alors des valeurs nulles ou légèrement négatives. La zone d'écoulement réelle est très réduite (elle est inférieure à 8 cm) et ne permet pas d'établir des profils de vitesse. Les valeurs présentées ont été évaluées en considérant les mesures de vitesse effectuées hors de la couche organique et de la crème.

Les faibles hauteurs d'eau à l'amont du collecteur Vieille du Temple ne nous ont pas permis de faire des relevés de vitesse moyenne de manière systématique, nous avons donc simplement positionné les valeurs relevées en trois sites sur la Figure III-17 : on observe cependant une diminution de la vitesse vers l'amont du collecteur.

3.3.2. Interface eau - sédiment

Des observations de l'interface eau-sédiment avec l'endoscope ont été effectuées simultanément aux relevés de hauteur de dépôt et de vitesse. Ces observations ont permis de déterminer l'absence ou la présence de couche organique en surface des dépôts grossiers ainsi que la hauteur de couche.





Les résultats de ces observations sont présentés sous forme de cartographie (cf. Figure III-19). La couche organique est présente dans la zone amont des trois collecteurs étudiés. L'épaisseur de la couche varie entre 2 cm et 15 cm sur Saint-Gilles, elle atteint 10 cm sur Vieille du Temple et seulement 5 cm à l'amont de Rivoli.

On observe que les zones de formation de couche organique à l'interface eau – sédiment correspondent à des zones de très faible vitesse (vitesse moyenne < 0,10 m/s), de faible pente du radier (pente radier < 0,05 %) et de « creux » dans les dépôts grossiers.

3.3.3. Suivi serré de l'amont du collecteur Saint-Gilles

Une seconde campagne d'étude sur le collecteur Saint-Gilles a été réalisée en Février 2001. Les observations ont été effectuées tous les 10 m à 15 m, afin d'avoir un rendu plus précis de la zone amont du collecteur.

Les bouchons flottants sur cette zone ont disparu entre Décembre 2000 et Février 2001. Ils ont probablement été entraînés par les orages du 05/01/01 (Imax = 90 mm/h, Imoyen = 5,7 mm/h, durée = 34 min.) et du 24/01/01 (Imax = 40 mm/h, Imoyen = 4,5 mm/h, durée = 1h43). Ces données ont été relevées par un pluviomètre installé Rue du Foin, à 150 m du collecteur. Il faut aussi noter que le mois de Janvier a été très pluvieux : la pluviométrie moyenne pour le mois de Janvier, à Paris, est d'environ 55 mm (données climatologiques Météo-France) alors que les données relevées sur le Marais donnent une pluviométrie de 87 mm en Janvier.





On observe sur le relevé (cf. Figure III-20) que la couche organique est essentiellement présente à l'amont du point PK600, dans une cuvette formée par les dépôts grossiers. On retrouve également de la couche aux points PK575 et PK510, dans des creux de dépôt.

La présence de couche organique à l'interface eau-sédiment semble donc favorisée par la morphologie des dépôts grossiers et semble par ailleurs liée à une faible pente de radier (la pente à l'amont du PK400 est inférieure à 0,03 %) ainsi qu'à des vitesses d'écoulement très faibles (la vitesse à l'amont du PK450 est inférieure à 0,05 m/s).

Par ailleurs, entre Décembre 2000 et Février 2001, l'épaisseur de la couche organique n'a pas sensiblement évolué mais la «crème » n'a été observée en Février 2001 que sur une vingtaine de mètres, à l'amont d'une importante arrivée latérale située au PK700 (rue du Béarn), alors

qu'en Décembre 2000, elle était présente sur toute la zone à l'amont du point PK600. Cette remarque semble confirmer que la présence de la « crème » et des flottants est liée à des conditions hydrauliques particulières.

3.3.4. Suivi des collecteurs Vieille du Temple et Saint-Antoine

3.3.4.1. Relevés sur Vieille du Temple

Sur le collecteur Vieille du Temple, on observe les mêmes tendances que sur Saint-Gilles : la présence de couche organique est liée à des zones de cuvette dans le dépôt grossier. Les observations sont reportées sur la Figure III-17 et sur la Figure III-19. On observe la présence de la couche organique dans des zones où il y a des « creux » dans le dépôt grossier, où la pente du radier est faible (0,05 %)et où la vitesse d'écoulement est faible (la vitesse à l'amont du PK275 est inférieure à 0,14 m/s).

Le suivi est assez lâche (tous les 50 m) et un suivi de la zone amont tous les 10 m à 15 m permettrait sans doute de compléter de manière efficace le manque de données. Nous n'avons pas pu réaliser ce suivi car lors d'une nouvelle descente dans le collecteur Vieille du Temple en Octobre 2001, nous avons constaté que l'écoulement était recouvert sur plusieurs dizaines de mètres par une masse flottante graisseuse, épaisse d'une dizaine de centimètres.

3.3.4.2. Relevés sur Saint-Antoine

Les relevés sont pratiquement inexploitables car ce collecteur est très difficile d'accès : deux grosses canalisations occupent une grande partie de la zone visitable du collecteur, et il faut souvent marcher au milieu de la cunette pour pouvoir progresser. De plus, la visite programmée avec les égoutiers a eu lieu la semaine suivant un gros orage (le 05/01/01) et la durée de temps sec précédent la visite n'a pas excédé 2 jours, ce qui laisse supposer que le collecteur a pu être « nettoyé » par les pluies. Nous avons seulement pu faire quelques observations à l'endoscope qui sont reportées sur la Figure III-19.

3.4. Discussion des résultats

3.4.1. Comparaison avec la cartographie réalisée par Ahyerre (1999)

La cartographie réalisée à l'endoscope a été mise en parallèle avec les résultats obtenus par Ahyerre (1999) à partir des profils de concentration mesurés sur Le Marais (cf. Figure III-21). Les zones où la couche organique a été observée correspondent aux zones où Ahyerre (1999) a observé des concentrations en MES supérieures à 700 mg/l, à 1 cm du fond (radier ou dépôt grossier). Cette analyse montre que, dans Le Marais, les sauts de concentration près du fond ne sont pas liés au passage de particules en mouvement près du fond mais à la présence de la couche organique immobile en surface des dépôts grossiers et à son aspiration par le dispositif de prélèvement utilisé.



Figure III-21 - Cartographie de l'interface eau – sédiment

3.4.2. Comparaison avec les stocks érodés par temps de pluie

Le volume de couche organique sur Saint-Gilles a été estimé à 7,5 m^3 à partir des données mesurées en Février 2001.

A partir de caractéristiques moyennes de la couche organique déterminées lors des deux séries de prélèvements, la quantité de matière disponible dans le collecteur Saint-Gilles a été estimée à 1200 kg pour les matières sèches et à 530 kg pour la DBO₅ (ces résultats doivent être considérés avec beaucoup de précautions car le mode de prélèvement utilisé déstructure fortement la couche organique et peut donc avoir des répercussions entre les volumes observés et les masses effectivement présentes sur le tronçon).

Gromaire (1998) a estimé que la masse de particules érodées dans le réseau du Marais, sur 30 pluies, représentait entre 120 kg et 700 kg de matière sèche par pluie et entre 60 kg et 400 kg de DBO₅ par pluie. Le stock de matières sèches évalué sur Saint-Gilles est largement suffisant pour expliquer la contribution de l'ensemble du réseau. Par conséquent, il apparaît que la couche organique n'est pas entièrement mobilisée au cours de chaque évènement pluvieux.

3.4.3. Taux de cisaillement

Le taux de cisaillement est le critère le plus couramment utilisé pour décrire les phénomènes de déposition et d'érosion des particules. Le taux de cisaillement a donc été calculé le long du collecteur Saint-Gilles avec la méthode présentée dans la Partie 1 appliquée aux profils de vitesses mesurés sur chaque site. Nous avons cependant rencontré des difficultés pour appliquer la méthode de calcul dans les zones très à l'amont du collecteur Saint-Gilles où les faibles hauteurs d'eau (inférieures à 8 cm) ne permettent pas la mesure d'un profil de vitesses avec 4 points répartis. Aussi, afin de donner une estimation des taux de cisaillement sur l'ensemble du collecteur Saint-Gilles, avons nous décidé de présenter les résultats issus des deux méthodes de calcul (cf. Figure III-22) :

- à partir de la méthode basée sur les profils de vitesse, proposée dans la Partie 1 ;
 - à partir de la relation de Manning-Strickler en considérant un coefficient $K_s = 87$ dans les zones sans dépôt (cf. Partie 1, Chapitre 4) et un coefficient K_s ' dans les zones avec dépôts.

Le coefficient K_s ' a été déterminé en considérant que le fond et les parois de l'écoulement sont de natures différentes dans la zone avec dépôt. Pour calculer le coefficient de Strickler pour chaque section, nous avons appliqué l'Equation II-10 avec $K_{s,paroi} = 87$, pour les parois verticales constituées en béton, et avec $K_{s,fond} = 58,5$. Cette valeur de $K_{s,fond}$ a été déterminée en appliquant l'Equation II-9, avec le diamètre des granulats du dépôt grossier pour Saint-Gilles ($d_{50} = 2.2$ mm, cf. Partie 1, Chapitre 4).





On constate des variations importantes entre le taux de cisaillement estimé à partir des profils de vitesse et à partir de la relation de Manning-Strickler. Ces différences sont liées à la

présence de dépôts grossiers dans le collecteur qui modifient les propriétés de l'écoulement ainsi qu'à des variations possibles dans la granulométrie du dépôt grossier.

D'une manière générale, le taux de cisaillement diminue de l'aval vers l'amont et la couche organique se trouve dans des zones où le cisaillement calculé avec Manning-Strickler ne dépasse pas $0,03 \text{ N/m}^2$, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par Ahyerre (1999).

3.5. Conclusions

Cette partie de l'étude a permis de valider l'efficacité du système d'observation avec l'endoscope : il a permis de réaliser une cartographie de la couche organique sur Le Marais et de mettre en évidence l'existence d'une « crème » à l'interface eau-sédiment dans des zones de fort ralentissement de l'écoulement.

Les caractéristiques de la couche organique prélevée sur Saint-Gilles sont les suivantes :

- MVS / MES = 63 % à 80 % (médiane = 76 %)
- DCO / MES = $0.8 \text{ g/g} \ge 1.8 \text{ g/g}$ (médiane = 1.5 g/g)
- DBO₅ / MES = $0.25 \text{ g/g} \ge 0.55 \text{ g/g}$ (médiane = 0.4 g/g)
- Teneur en eau = 80 % à 89 % (médiane = 84 %)
- $\rho_{seche apparente} = 129 \text{ kg/m}^3 \text{ à } 256 \text{ kg/m}^3 \text{ (médiane} = 166 \text{ kg/m}^3)$
- $\rho_{humide} = 1038 \text{ kg/m}^3 \text{ à } 1282 \text{ kg/m}^3 \text{ (médiane} = 1125 \text{ kg/m}^3)$

Les charges particulaires en polluants sont proches des caractéristiques relevées par Ahyerre (1999) sur le collecteur Vieille du Temple. La couche prélevée sur Saint-Gilles semble cependant plus « organique » que sur Vieille du Temple.

De grandes tendances se dégagent des observations réalisées : la couche est présente dans des zones de « cuvettes » et de préférence sur des sites où l'écoulement a de faibles vitesses (v < 0,14 m/s) et où la pente du radier est très faible (pente < 0,05 %). Les premiers relevés montrent que la grande « cuvette » à l'amont du collecteur Saint-Gilles est entièrement remplie par de la couche organique. Les deux cuvettes à l'aval présentent de la couche organique sur une toute petite zone, située elle-même dans la partie amont de ces cuvettes.

Cette observation peut être significative du mode de développement de la couche organique : la couche remplit les cuvettes de l'amont vers l'aval, les unes après les autres. Une étude approfondie du mode de formation de la couche organique permettrait sans doute d'apporter un nouvel éclairage sur cette hypothèse.

Enfin, les sauts de concentration en MES près du fond relevés par Ahyerre (1999) dans le Marais peuvent être attribués à l'aspiration d'une partie de la couche organique située à la surface des dépôts grossiers. Cette conclusion remet en question les hypothèses de stocks de particules constitués par un sédiment fluidisé ou des particules en mouvement près du fond. Des expériences ont donc été menées dans d'autres réseaux d'assainissement en Europe afin d'observer l'interface eau/sédiment avec l'endoscope.

4. Réalisation d'observations en Europe

4.1. Choix des sites

4.1.1. Sites principaux : Dundee, Hildesheim

Le système d'observation basé sur l'endoscope a été également utilisé en dehors du bassin versant du Marais. L'application du même dispositif d'observation sur plusieurs sites nous permettra d'étudier s'il existe différents types de stocks organiques à l'interface eau-sédiment. Nous avons décidé d'utiliser cette approche dans des collecteurs en réseau d'assainissement unitaire où la présence d'un stock de particules organiques à l'interface eau-sédiment a été avérée. Les trois principaux sites concernés, en dehors du Marais à Paris, sont situés :

- à Bruxelles en Belgique (Verbanck, 1992);
- à Dundee en Ecosse (Crabtre, 1989; Ashley et al., 1992; Arthur, 1996);
- à Hildesheim en Allemagne (Ristenpart, 1995).

Le site de Bruxelles a du être écarté car il présente des caractéristiques qui ne sont pas compatibles avec l'utilisation de l'endoscope. En effet, le collecteur étudié par Verbanck (1992) présente un cunette de 2 m de profondeur et de 2,20 m de largeur, et la hauteur d'eau moyenne est d'environ 1 m. L'utilisation de l'endoscope tel qu'il existe n'est pas possible sur ce site. Nos expériences ont donc été menées dans le collecteur principal de Dundee (G-B) et de Hildesheim (Allemagne). Des photos des sites sont présentées en Annexes.

Nous avons établi une comparaison entre les deux sites sélectionnés et le Marais (cf. Tableau III-12). Ces trois sites présentent des points communs (pente de radier très faible, présence de dépôts grossiers, branchements particuliers dans le collecteur), mais également des différences au niveau :

- de la densité de population (Dundee : 55 hab/ha ; Hildesheim : 135 hab/ha ; Le Marais : 297 hab/ha) ;
- des types de collecteurs (ovoïde, circulaire, à cunette) construits en brique ou en béton ;
- du positionnement dans le réseau. Les collecteurs de Dundee et Hildesheim sont situés dans la partie aval du réseau d'assainissement alors que Le Marais est situé à l'amont.

Sites	Dundee	Dundee Hildesheim	
Surface du	245 ha	739 ha	42 ha
Bassin			
Population	13,300	100,000	12,372
Type d'égouts	Section ovoïde,	Section circulaire,	Cunette,
(sur la zone étudiée)	en brique	en béton	en béton
Hauteur du	90 cm	85 cm	2 m
collecteur			
Pente	0,06 %		0,03 % à 0,09 %
Vitesse	0,45 m/s	0,25 m/s	0,05 à 0,4 m/s
Hauteur d'eau	0,3 m	0,3 m	0,08 à 0,25 m
Dépôt grossier	oui	oui	oui

Tableau III-12 – Caractéristiques des sites étudiés, en Europe

4.1.2. Sites complémentaires

Des expériences complémentaires ont été menées sur des collecteurs secondaires à Dundee et dans deux autres réseaux d'assainissement unitaires, à Marseille et dans le Yorkshire (G-B) :

- à Dundee, nous avons réalisé des observations sur Perth Road et Union Street. Le collecteur est circulaire sur Perth Road et il est ovoïde sur Union Street. Ces deux collecteurs sont de petite taille ;
- à Marseille, nous avons travaillé sur un tronçon du collecteur Tobelem dans lequel se trouve du dépôt grossier. C'est un collecteur ovoïde et le tronçon présente une pente moyenne de 0,25 %. Ce collecteur est situé à l'aval d'une vanne Hydrass mise hors service durant quelques mois. Nous avons également circulé dans une zone du Collecteur 13, située à l'aval d'une vanne Hydrass en fonctionnement ;
- dans le Yorkshire, nous avons travaillé sur deux tronçons de collecteurs situés à l'aval du système d'assainissement de Doncaster (51500 habitants) et de Mexborough (25700 habitants). Le collecteur étudié est circulaire avec un contre-pente de -0,06 % à Doncaster et il est ovoïde avec un contre-pente -0,34 % à Mexborough. On trouve des dépôts grossiers dans ces deux collecteurs et les vitesses maximales au pic journalier de débit atteignent 0,05 m/s sur le site de Doncaster et 0,25 m/s sur le site de Mexborough d'après le modèle hydraulique (Hydroworks) utilisé par les services de l'assainissement du Yorkshire.



Figure III-23 – Localisation des sites étudiés

4.2. Méthodologie utilisée

En parallèle avec les observations avec l'endoscope, nous avons utilisé les méthodes mises au point et employées sur chaque site pour étudier l'interface eau-sédiment :

- à Dundee, nous avons utilisé les « bed traps » mis au point par Arthur (1996) pour visualiser les « NBS ». Ces éléments ont été mis à notre disposition par l'équipe du professeur Richard Ashley, composée de Trevor McIlhatton et de Ruben Sakrabani.
- à Hildesheim, nous avons réalisé des prélèvements d'effluent à 3 cm et à 15 cm au-dessus du dépôt grossier au moyen d'un dispositif de prélèvement multi-profondeur comparable à celui utilisé par Ahyerre (1999), afin d'observer un saut de concentration en MES près du fond.

- enfin, à Marseille et dans le Yorkshire, nous avons utilisé uniquement l'endoscope. Il faut préciser que, excepté sur un site à Marseille, les collecteurs étudiés ne disposent pas de cunette. Nous avons donc procédé aux observations avec l'endoscope en progressant de l'aval vers l'amont afin de limiter l'impact lié à notre progression dans les collecteurs.

Enfin, nous avons effectué des mesures de vitesse moyenne avec un micro-moulinet OTT-C2 sur la plupart des sites.

4.3. Résultats

4.3.1. Dundee





Figure III-24 – Suivi du tronçon de Samuels Street à Dundee (réalisé par A. Fraser) Nous avons utilisé l'endoscope sur une distance de 70 m (entre le point 70 m et 0 m) dans le collecteur principal de Dundee sur le site de Samuels Street (cf. Figure III-24). Les expériences ont été réalisées le 01/05/01 entre 12:00 et 14:00 et le 03/05/01 entre 10:00 et 12:00.

Dans le collecteur principal de Dundee, le dépôt grossier se présente comme un dépôt sableux, très sombre, excepté quelques grosses particules brunes incluses dans le corps du dépôt (cf. Figure III-25). La vitesse moyenne est de l'ordre de 0,45 m/s et nous n'avons pas observé de couche organique immobile à l'interface eau-sédiment.



Figure III-25 – Photo du dépôt grossier à Dundee

En revanche, nous avons pu observer des particules qui se déplacent en charriage le long du collecteur, juste au-dessus du dépôt grossier. Nous n'avons pas obtenu de photo de ces particules parce qu'elles se déplacent trop rapidement pour obtenir une image nette. Ces particules sont en partie piégées dans les « bed traps » mis en place sur le site (cf. Figure III-26). On remarque la présence d'une quantité importante de matières blanches fibreuses, de type papier, ainsi que des matières fécales et des détritus de nourriture (maïs,..).



Figure III-26 – « NBS » piégés par les « bed-traps » (site de Samuels Street, Mai 2001)

D'après les analyses réalisées par Trevor McIlhatton et Ruben Sakrabani sur des échantillons récupérés le 13/06/00 et le 16/06/00, les particules sont organiques et présentent un rapport MV/MS = 90 % et DCO/MS = 2,2 g/g. Ces caractéristiques sont proches des caractéristiques des particules en suspension dans l'eau usée ce qui peut être expliqué par le fait que les « NBS » piégés durant les observations (quelques heures) sont rapidement analysés : les processus de « vieillissement » n'ont pas le temps de se développer à l'intérieur des « bed traps ».

4.3.1.2. Autres sites

Des observations complémentaires ont été réalisées sur deux autres sites (Perth Road, le 01/05/01 et Union Street, le 02/05/01). Durant nos observations, la vitesse moyenne d'écoulement sur Perth Road était de 0,15 m/s et la hauteur d'eau était d'environ 8 cm (ces données hydrauliques ont été mesurées avec un débitmètre placé sur le site). Le site dans Union Street se trouve à l'amont d'une confluence et il présente une vitesse apparente nulle et une hauteur d'eau de 5 cm. Les hauteurs de dépôt sont très faibles dans ces collecteurs (quelques centimètres).

Sur ces deux sites, nous n'avons pas observé de couche organique à l'interface eau-sédiment mais des matières éparses d'origine organique (matières fécales, papiers, fibres végétales). Il faut noter que les diamètres des collecteurs ne permettent pas de se déplacer avec l'endoscope et que nous avons du limiter notre zone d'observation à 50 cm vers l'amont et 50 cm vers l'aval du tampon d'accès.

4.3.2. Hildesheim

Dans le collecteur d'Hildesheim, les observations à l'endoscope ont été réalisées tous les 5m sur un tronçon de 90 m de long. Le suivi a été réalisé le 28/08/02 entre 14:00 et 16:00. Les hauteurs de dépôt grossier et le niveau d'eau ont été mesurés (cf. Figure III-27). Le tronçon est en contre-pente et le dépôt grossier est réparti sur toute la partie étudiée.



Figure III-27 – Suivi du collecteur d'Hildesheim (28/08/02)

Sur le tronçon étudié, le dépôt grossier se présente sous la forme d'un matériau granulaire, sombre. La surface du dépôt grossier ne présente pas de zones avec des reliefs contrastés. Nous avons observé des grosses particules en mouvement sur une épaisseur de 3 cm audessus du dépôt grossier. Enfin, des matières organiques dispersées ont été observées en un point, au niveau d'une arrivée latérale.

	Hauteur	Hauteur de	Vitesse	MES	MVS/MES	DCO
	d'eau	prélèvement	(m/s)	(mg/l)	(%)	(mg/l)
28/08/02	30 cm	3 cm	0,08	2615	60	4582
12:00		15 cm	0,24	1073	69	2339
29/08/02	25 cm	3 cm	0,15	742	79	852
08:30		15 cm	0,20	545	80	610

Tableau III-13 – Echantillons prélevés à Hildesheim

Nous avons également analysé les échantillons prélevés à deux hauteurs dans la section de l'écoulement (à 3 cm et à 15 cm au-dessus du dépôt grossier). Les prélèvements ont été effectués à deux moments différents de la journée : durant le pic de débit journalier, à 12:00, le 28/08/02 et avant l'augmentation de débit matinale, à 08:30, le 29/08/02. Les résultats sont présentés dans le Tableau III-13.

D'une manière générale, les particules prélevées sont organiques (MVS/MES > 60 %) et on observe une augmentation de la concentration en MES avec la profondeur. Ce profil de MES, interprété initialement comme étant un « fluid sediment » peut être imputé aux particules en mouvement près du fond. Par ailleurs, le profil des concentrations semble lié aux conditions hydrauliques régnant dans l'égout : le profil est d'autant plus marqué que le débit circulant dans le tronçon est important.



Figure III-28 – Dépôt grossier et interface eau-dépôt grossier, à Hildesheim (08:30, le 29/08/02)

La Figure III-28 regroupe deux photos qui ont été prises le 29/08/02 au matin, alors que les profils de concentration sont très faibles. On peut observer le dépôt grossier et son interface avec l'eau. On note qu'au moment de la prise de vue, il n'y a pas de matière organique à l'interface eau-sédiment.

4.3.3. Marseille

A Marseille, durant le mois de Septembre 2001, nous avons réalisé un suivi du collecteur Tobelem avant et après la remise en service d'une vanne Hydrass, au cours d'une expérience dirigée par Dominique Laplace (Société d'Exploitation du Réseau d'Assainissement de Marseille) et destinée à tester l'efficacité de la vanne pour éroder les sédiments (Laplace *et al.*, 2002).



Figure III-29 – Suivi du collecteur Tobelem à Marseille avant la mise en route de la vanne Hydrass (située au point 0).



Figure III-30 – Photos des dépôts dans le collecteur Tobelem, avant la mise en route de la vanne (06/09/01)

Les observations à l'endoscope ont été effectuées tous les 5 m sur un tronçon de 110 m de long avant la mise en service de la vanne. Les résultats sont présentés dans la Figure III-29 et la Figure III-30.

Le dépôt grossier présent à l'aval du tronçon est composé de matières granulaires bien identifiables. Avant la mise en service de la vanne, nous avons observé la présence de couche organique à l'amont du tronçon, dans un creux du dépôt. Les particules qui la composent sont plus petites que les particules du dépôt grossier, et elles sont jointes par une matière dont la couleur varie entre le blanc et le brun. Cette zone (entre 0m et 30m) présentait une vitesse moyenne d'écoulement de l'ordre de 0,15 m/s.

Dans le collecteur 13, la vanne Hydrass était en fonctionnement depuis plusieurs mois. Nous avons noté l'absence de dépôt grossier et de couche organique sur un tronçon situé à 200 m à l'aval de la vanne.

4.3.4. Yorkshire (G-B)

A Doncaster nous avons réalisé un suivi du collecteur sur une dizaine de mètres, autour de trois tampons espacés d'environ 50 m. La vitesse moyenne variait d'un point à l'autre entre 0,3 m/s et 0,6 m/s, et la hauteur d'eau variait entre 12 cm et 15 cm. A Mexborough nous avons fait des observations au droit de deux tampons.

A Doncaster, nous avons relevé la présence de particules en déplacement au-dessus des dépôts grossiers et à Mexborough, nous avons constaté la présence de matières organiques éparses au-dessus du dépôt grossier, au niveau d'arrivées latérales où les vitesses étaient très faibles, mais les particules en déplacement au-dessus du dépôt grossier étaient rares.



Figure III-31 – A gauche, dépôt sédimenté à Mexborough ; à droite, dépôt grossier sédimenté dans le Marais.

Enfin, nous avons noté que le sédiment présent au fond du collecteur de Mexborough présente des particules de diamètre inférieur, de type sableux, à ce qui a pu être observé sur d'autres sites comme le Marais (cf. Figure III-31). Ce type d'observation a déjà été rapporté dans la littérature : les différences sont dues aux types d'avaloirs mis en place sur les chaussées (dans le Marais, on ne trouve pas d'avaloir sélectif) ou encore à un effet de tri granulométrique lié au positionnement du site de Mexborough à l'aval du réseau d'assainissement.

4.4. Conclusions

Des observations ont été réalisées sur des sites hors du Marais malgré l'absence des « cunettes » parisiennes qui permettent de progresser dans le réseau sans perturber l'écoulement. Les expériences réalisées à Dundee et à Hildesheim ont permis d'observer un flot de particules qui se déplacent au-dessus des dépôts grossiers. Ces particules sont de nature organique et correspondent à la définition des « NBS ». Il semble donc que la similarité des conditions hydrauliques régnant dans les différents sites que nous avons étudié (pente faible, vitesse faible, présence de dépôts grossiers) ne soit pas un critère suffisant pour expliquer la présence de couche organique à la surface des dépôts grossiers.

Les sites où la couche organique a été observée correspondent à des zones urbaines à forte densité et ils sont situés à l'amont du réseau d'assainissement, contrairement aux autres sites étudiés : en effet, l'équivalent des collecteurs du Marais et du collecteur Tobelem, à Marseille, correspondent à des égouts non visitables dans les systèmes d'assainissement de Dundee et Hildesheim. Deux critères sont donc à prendre en considération :

- la densité de population, qui influence la production de matières organiques entrant dans le système ;
- le positionnement dans le réseau d'assainissement qui joue sur des phénomènes tels que la désagrégation des particules en circulation (Davies *et al.*,1997).

De plus, au cours de la cartographie réalisée sur le Marais, nous n'avons pas observé de flots continus de particules au-dessus des dépôts grossiers. Or, nos expériences ont été menées majoritairement durant l'après-midi, une période de faible production. Ce type de configuration n'est pas favorable à la présence de profils de MES très marqués à Hildesheim ainsi qu'à Dundee (Arthur,1996), ce qui semble indiquer que les « NBS » sont liés aux débits et donc à la production journalière (variations horaires).

Enfin, les observations et les photographies à partir de l'endoscope permettent d'apprécier les possibilités techniques liées à l'utilisation de ce type d'appareil : quelques améliorations permettraient sans doute de faire, par exemple, une étude granulométrique des dépôts sans avoir à prélever des échantillons.

CHAPITRE 4. Conclusions et perspectives

Cette partie de l'étude a permis de mettre au point et de valider l'utilisation d'un système d'observation basé sur un endoscope pour localiser la couche organique à l'interface eau-sédiment. Cette méthode présente plusieurs avantages :

- elle est simple d'utilisation,
- elle permet d'étudier de grandes longueurs de collecteur,
- elle permet d'obtenir rapidement des indications sur la nature et l'épaisseur des dépôts présents sur les tronçons étudiés.

Sur le Marais, l'endoscope a permis de repérer la couche organique immobile à l'amont des collecteurs. Les critères pour l'existence de cette couche sont les suivants : faible vitesse d'écoulement, faible pente de radier, présence de « cuvettes » formées par les dépôts grossiers. Les zones où la couche organique se développe correspondent à des zones où le taux de cisaillement est très faible (inférieur à $0,03 \text{ N/m}^2$).

Des prélèvements ont été effectués dans un collecteur différent du collecteur étudié par Ahyerre (1999). La comparaison des résultats des analyses réalisées sur ces échantillons (MV/MS : 76 % ; DCO/MS : 1,5 gO₂/g ; DBO₅/MS : 0,4 gO₂/g) montrent que la couche organique est de nature relativement homogène dans le bassin versant du Marais.

De plus, la présence d'une couche « crémeuse » a été mise en évidence dans les zones de fort ralentissement de l'écoulement. Cette crème se forme au-dessus des dépôts existants à l'amont des collecteurs (dépôts grossiers, couche organique) et à l'amont de forts ralentissements de l'écoulement (bouchons de flottants, entrée latérale importante). Elle semble être constituée de fines particules en suspension dans de l'eau stagnante et peut contenir des bulles de gaz. Des expériences supplémentaires devront être menées pour identifier la nature de cette couche car aucun prélèvement n'a pu être réalisé. On peut imaginer une méthode de prélèvement basée sur un système de pompage avec un contrôle visuel grâce à l'endoscope.

Des expériences ont également été menées dans plusieurs réseaux d'assainissement en Europe afin d'étudier l'interface eau/sédiment avec l'endoscope. L'endoscope a permis d'observer :

- des particules se déplaçant dans une zone de quelques centimètres d'épaisseur au-dessus du dépôt grossier, dans les collecteurs de Dundee, de Hildesheim et de Doncaster;
- des matières organiques éparses, notamment au droit d'arrivées latérales, dans certains collecteurs;
- un stock de couche organique dans le collecteur Tobelem, à Marseille.

Finalement, nous avons observé deux types différents d'interface eau-sédiment dans des réseaux d'assainissement unitaires en appliquant la même méthode d'un site à l'autre :

- des « NBS » qui se déplacent le long des collecteurs,
- de la couche organique immobile.

Ces deux types d'interface se développent dans des zones avec de faibles vitesses d'écoulement et de faibles pentes de radier. Cependant la couche organique a été observée dans des « cuvettes » formées par les dépôts grossiers, à l'amont des réseaux d'assainissement, dans des zones où les vitesses moyennes sont de l'ordre de 0,05 m/s à 0,15 m/s, tandis que les « NBS » ont été observés au-dessus des dépôts grossiers, à l'aval des réseaux d'assainissement, dans des zones où les vitesses moyennes sont de l'ordre de 0,2 m/s à 0,4 m/s.

Sur le site de Hildesheim, nous avons observé une augmentation de la concentration en MES près du fond. D'après les observations menées à l'endoscope, le saut de concentration est lié à l'aspiration de particules se déplaçant en charriage dans une zone d'environ 3 cm au-dessus des dépôts grossiers. A Hildesheim, nous n'avons donc pas observé de « fluid sediment » à proprement parler, mais bien des « NBS ».

Une étude pourrait être menée dans l'émissaire de Bruxelles afin de déterminer si les prélèvements réalisés par Verbanck (1994) concernent réellement un type d'interface distinct ou bien s'ils concernent également des « NBS » : les deux hypothèses restent valables car le site étudié à Bruxelles possède des caractéristiques hydrauliques particulières (hauteur d'eau d'environ 1 m, vitesse moyenne d'écoulement de l'ordre de 0,5 m/s) qui confèrent peut-être à l'interface eau-sédiment des propriétés singulières.

Enfin, la couche organique prélevée sur Le Marais a des caractéristiques proches des « NBS » prélevés par Arthur (1996) et « visuellement » on constate des similitudes entre ces deux types d'interface : présence de matières fécales, de papiers,... Ces deux types d'interfaces ont donc probablement la même origine.
On peut alors imaginer que la couche organique se constitue à partir de matériaux charriés près du fond (du type « NBS ») et qui sont piégés dans les creux des dépôts, à l'amont des réseaux d'assainissement unitaires (cf. Figure III-32), ou encore que les « NBS » sont le résultat de la remise en suspension d'une partie de la couche organique.



Figure III-32 -Proposition de développement de la couche organique dans une « cuvette » du dépôt grossier

PARTIE IV. Dynamique de l'interface eau-sédiment

CHAPITRE 1. Introduction

Le comportement général de l'interface eau-sédiment a été mis en évidence à partir d'analyses menées sur la qualité des eaux transportées dans le réseau par temps de pluie : un stock de matières organiques se constitue par temps sec à l'interface eau-sédiment et ce stock est érodé par les augmentations de débit, à partir d'un seuil de cisaillement.

Dans le réseau du Marais, l'interface eau-sédiment se présente sous la forme d'une couche organique immobile. Ahyerre (1999) a montré que la couche organique est érodée par des taux de cisaillement très faibles et qu'elle est probablement stratifiée. Ces résultats ont été obtenus à partir des masses et de la nature des particules érodées durant des expériences d'injection d'eau potable sur un tronçon du réseau du Marais.

Une seule expérience a été réalisée pour observer les évolutions de la couche organique, en un point du réseau, avec une boite d'observation. Elle a montré que la couche organique s'érodait progressivement durant un palier de débit.

Ahyerre (1999) a également évalué le taux d'accumulation de la couche organique, par temps sec, à 215 $g/m^2/j$.

Pour envisager la modélisation du stockage par temps sec et de l'érosion par temps de pluie des particules polluées, à l'interface eau-sédiment, une meilleure connaissance du comportement de la couche organique est nécessaire. Pour cela, il faut répondre aux questions suivantes :

- la couche organique se comporte-t-elle comme un matériau homogène ?
- à petite échelle, les phénomènes d'accumulation et d'érosion de la couche organique se font-ils de manière progressive ?
- à la surface d'un tronçon, les phénomènes d'accumulation et d'érosion de la couche organique sont-ils homogènes?

Des observations de la couche organique en continu sur un site et des observations sur un tronçon de collecteur, menées par temps sec et durant des expériences d'érosion ou des pluies, permettront d'apporter des éléments de réponse à ces questions.

La présence d'éléments organiques confère des caractéristiques de cohésion à la couche organique qui influencent son comportement lorsqu'elle est soumise à des contraintes (par exemple, lors d'une augmentation de débit). Nous avons donc mené une étude bibliographique portant sur les dépôts cohésifs pour déterminer les paramètres influant sur la cohésion de la couche organique, puis sur l'interface eau-sédiment dans les réseaux d'assainissement afin de préciser le champ de nos recherches.

Ensuite, des expériences d'observation ont été menées par temps sec et durant des expériences d'injections d'eau potable. Pour cela, nous avons développé une méthode d'observation en continu de l'interface eau-sédiment que nous avons placée dans un collecteur du bassin versant du Marais. Pour réaliser les observations à l'échelle d'un tronçon de collecteur, nous avons utilisé le système d'endoscope que nous avons mis au point pour localiser et identifier les stocks de matière organique à l'interface eau-sédiment.

Les observations réalisées durant ces expériences ont permis de mettre en évidence la complexité de la structure de la couche organique mais également des phénomènes liés à sa déposition et à son érosion, enrichissant ainsi la base de données sur l'interface eau-sédiment.

CHAPITRE 2. Etude bibliographique : les dépôts cohésifs

Nous avons mené une étude bibliographique sur différents types de dépôts cohésifs (boues d'estuaires, dépôts cohésifs « synthétiques » et sédiments du réseau d'assainissement) pour faire un état des connaissances sur les paramètres qui influent sur la cohésion des sédiments et sur le comportement, et la modélisation du comportement, de ce type de dépôts.

1. Le comportement dynamique des dépôts cohésifs

1.1. Etude des boues dans les estuaires

Les recherches menées dans les estuaires ont montré la présence de boues sur le fond des estuaires et des zones côtières. Ces boues sont constituées de sédiments cohésifs et sont remises en suspension lors des crues ou sous l'effet des marées et des vagues. Elles entrent dans les mécanismes majeurs du transport des sédiments dans les zones côtières et les estuaires. Ces boues sont constituées en grande partie par des particules fines mobiles.

1.1.1. Comportement dynamique des boues en estuaires (COSINUS, 2000)

1.1.1.1. Formation des boues

La capacité de transport des sédiments est limitée par la quantité d'énergie de l'écoulement. Ainsi, une stratification des matières en suspension peut avoir lieu dans la colonne d'eau lorsque l'énergie liée à la turbulence diminue, donnant lieu à une couche concentrée près du fond. Cette couche concentrée peut avoir des concentrations en MES atteignant 5 à 10 g/l.

1.1.1.2. Consolidation des boues

La présence de particules en suspension modifie les caractéristiques turbulentes des écoulements : la viscosité du mélange eau-particules augmente avec la concentration, ce qui augmente le terme de dissipation d'énergie cinétique. A fortes concentrations, la turbulence peut être dissipée par l'interaction entre les particules. Quand le gradient de densité est très important, la turbulence ne peut pas se maintenir et l'écoulement se « laminarise » sous forme de « boue fluide ».

Le terme de « boue fluide » est également utilisé à propos des strates de particules lorsqu'elles commencent à se consolider. Au-delà d'une concentration de 10 g/l, les collisions interparticulaires donnent lieu à la formation de flocs modifiant les propriétés de la zone de forte concentration qui se comporte alors comme un fluide non-Newtonien. Ce type de fluide a besoin de beaucoup d'énergie pour être maintenu en mouvement. Si les conditions hydrauliques varient peu, la zone de fluide à forte concentration peut se déposer et former une couche de boue fluide plus dense.

Lorsque les concentrations atteignent un second seuil critique, le « point de gel », les flocs sont très proches les uns des autres et forment une structure continue poreuse que l'on peut comparer à un sol meuble, saturé en eau. La structure ainsi constituée se comprime sous l'effet du poids propre, ce qui augmente sa résistance.

1.1.1.3. Erosion des boues

Sous l'effet de forces externes la structure poreuse consolidée formée à partir de flocs peut se briser et éventuellement se décomposer en agrégats mobiles pour retrouver une forme de couche concentrée. On dit qu'elle s'est « liquéfiée » sous les contraintes appliquées ou qu'elle s'est « fluidisée » sous l'effet de la pression exercée dans ses pores : une analyse théorique menée par De Wit et Kranenburg (1997) montre que, dans des conditions normales, la contrainte exercée par la pression - causée par une oscillation de l'écoulement (la marée, les vagues) - dans les pores d'une boue consolidée, et modélisée comme un matériau poreux élastique, est beaucoup plus forte que la contrainte de cisaillement en surface causée par cette même oscillation de l'écoulement. Si cette contrainte « de pression » dans les pores dépasse la résistance de la boue consolidée, celle-ci se désagrège et se liquéfie.

Les couches concentrées résultantes peuvent alors être facilement transportées par les écoulements. Ce mode d'entraînement est différent de l'érosion des dépôts par arrachement des particules.

1.1.1.4. Le rôle des flocs

La structure des flocs de sédiments cohésifs est complexe et variable (Kranenburg,1994). La structure des agrégats influence les caractéristiques mécaniques et rhéologiques des flocs et, donc, des boues constituées à partir de ces flocs. A l'heure actuelle, les caractéristiques des flocs (dimension / densité / vitesse de chute) sont mal modélisées et il faut passer par des mesures in situ pour les évaluer.

Dans les canaux à surface libre, Parthenaides (1993) a noté que les cisaillements importants près du fond déterminent la taille et la résistance des flocs qui se déposent au fond du canal. Ainsi, le phénomène de déposition est lié au cisaillement appliqué au fond de l'écoulement et à la taille des particules.

D'après Lick et Huang (1993) la vitesse de chute des flocs est fonction des conditions qui ont conduit à leur formation. Ainsi, dans un écoulement donné, un floc peut avoir une vitesse de chute plus faible que le même floc constitué dans un écoulement avec un cisaillement au fond plus fort ou une concentration plus forte. Ils notent que la formation des flocs est d'autant plus rapide, et le diamètre d_{50} d'autant plus petit, que le cisaillement au fond ou la concentration en MES sont importants.

Enfin, Kranenburg (1999) a montré que les gros flocs ont des densités plus faibles que les petits flocs mais qu'ils ont une vitesse de chute plus grande et qu'ils transportent plus de matière, en masse. Son interprétation du phénomène de déposition l'amène à penser que les gros flocs se brisent lorsqu'ils entrent en contact avec un sédiment rigide et se décomposent en flocs plus petits et plus denses.

Les forces de cohésion inter-particulaires sont complexes : elles sont d'ordre physicochimiques (ex : forces de Van der Waals) mais également biologiques. Ten Brinke (1996) note que certains polymères organiques « collants », produits par des bactéries en situation de stress ou durant la lyse de cellules bactériennes, stimulent l'agrégation des particules.

1.1.2. Modélisation du transport de sédiments cohésifs en estuaire

1.1.2.1. Description générale des modèles utilisés

Les modèles de simulation du transport des sédiments cohésifs en estuaire utilisent une approche à trois couches : le dépôt consolidé, la colonne d'eau et la couche concentrée située entre les deux. Généralement, les interactions entre la couche concentrée et la colonne d'eau sont négligées et les propriétés des particules en suspension et dans la couche concentrée sont décrites par des relations empiriques.

Une modélisation des phénomènes d'érosion et de déposition des sédiments en estuaire a été réalisée au cours du programme COSINUS. Elle se base sur des équations classiques pour évaluer le taux d'érosion (cf. Equation 4-1) :

$$E = E_{O} \cdot \left(\left(\tau_{O} / \tau_{CF} \right)^{n} - 1 \right)^{m}$$
 Équation IV-1

avec E: flux d'érosion surfacique, E_0 : paramètre d'érosion, τ_o , τ_{cr} : contrainte de cisaillement à la paroi et contrainte de cisaillement critique. La contrainte de cisaillement critique correspond à la valeur seuil de mise en mouvement des particules.

Une formulation a été proposée pour déterminer τ_{cr} des boues fluides (cf. Equation 4-2) :

$$\tau_{Cr} = a \left(e^{C_{MES} / C_{gel} - 1} - 1 \right)$$
Équation IV-2

avec C_{MES} : concentration en MES, C_{gel} : concentration critique en MES de la suspension (« point de gel »).

Il reste cependant beaucoup d'incertitudes sur la modélisation de la turbulence en présence de sédiments en suspension et le manque de données sur le transport des sédiments cohésifs est handicapant pour la validation des formulations.

1.1.2.2. Mesure de la résistance des boues d'estuaire

Des expérimentations ont été menées in situ pour évaluer différents paramètres utiles à la modélisation de la dynamique des sédiments cohésifs. Les sédiments étudiés ont une teneur en MV qui varie entre 8 % et 15 %, et leur masse volumique vaut environ 1230 kg/m³. Les taux de cisaillement critique mesurés varient entre 0,1 N.m⁻² et 0,21 N.m⁻².

Des tests en laboratoire ont également été réalisés pour identifier les processus de consolidation. Ils ont permis de montrer que les équations qui relient la résistance au cisaillement à la densité du sédiment étaient liées à l'historique des contraintes subies par les sédiments. Ces contraintes sont notamment liées aux cycles des marées.

Enfin, des expériences visant à reproduire des boues d'estuaire à l'état naturel ont également été menées. Une zone de 4 mm à 15 mm d'épaisseur, au niveau de la surface, semble être une zone de forte activité biologique. Des développements d'algues et de biofilms ont été observés et des sillages de vers sont devenus apparents. Les observations ont montré que ces « tunnels » accélèrent la consolidation du sédiment en favorisant l'évacuation de l'eau interstitielle.

1.2. Etudes des dépôts cohésifs en laboratoire

1.2.1. Tests sur des boues d'estuaires

Des essais en laboratoire sur les sédiments cohésifs, et plus particulièrement les boues d'estuaires, sont menés depuis de nombreuses années. Nous présentons ici quelques résultats obtenus dans ce domaine.

1.2.1.1. Expression du taux d'érosion

Piedra-Cueva et Mory (1995) ont mené une étude sur l'érosion des sédiments cohésifs, issus de La Gironde, afin de retrouver la formulation générale du taux d'érosion pour une couche dense uniforme donnée par Parthéniades en 1965 :

$$E=M.(\frac{\tau o - \tau cr}{\tau cr})$$
Équation IV-3
avec E : flux d'érosion surfacique (kg.m⁻².s⁻¹)
M : coefficient d'érodabilité (kg.m⁻².s⁻¹)
 τ_0 , τ_{cr} : contrainte de cisaillement à la paroi et critique (N.m⁻²)

Cette formulation a été trouvée lors d'expériences sur des sédiments cohésifs disposés dans un canal circulaire (cf. Figure IV-1), la vitesse de l'eau était contrôlée par une pompe à disque afin de créer des paliers de vitesse et donc de cisaillement.



Figure IV-1 - Expérience d'érosion (Piedra-Cueva & Mory, 1995)

Il existe d'autres formulations du taux d'érosion qui font également référence aux notions de taux de cisaillement critique et de taux de cisaillement à la paroi. Nous pouvons citer deux exemples : la relation décrite dans le programme COSINUS (cf. Equation 4-2) et l'expression du taux d'érosion donnée par Parchure et Mehta (1985) dans le cas de dépôts partiellement consolidés :

$$E = E_o \exp\left(\alpha (\tau_o - \tau_{cr})^{1/2}\right)$$

Équation IV-4

avec τ_0 : contrainte appliquée à la paroi (N.m⁻²)

 τ_{cr} : résistance au cisaillement du dépôt (N.m⁻²)

 α : facteur de proportionnalité, fonction de la température

1.2.1.2. Phénomène de déposition

Au cours d'expériences dans un canal avec re-circulation, Droppo *et al.* (2001) ont observé que selon les conditions hydrauliques, les dépôts formés sont plus ou moins résistants : un dépôt constitué par des sédiments du port d'Hamilton (Ontario) a été érodé partiellement par un écoulement qui exerçait un cisaillement de 0,054 N.m⁻². En quelques heures, le dépôt s'est reconstitué alors que l'écoulement exerçait toujours le même taux de cisaillement sur le fond. Ce "nouveau" dépôt a été érodé entièrement lorsque l'écoulement a exercé un taux de cisaillement égal à 0,135 N.m⁻² (cf. Figure IV-2).

Les auteurs expliquent cette observation par un phénomène d'agrégation des particules : il considère que les seules particules, issues du dépôt initial, pouvant sédimenter malgré un certain taux de cisaillement sont nécessairement des particules qui se sont agrégées et qui ont acquis une résistance suffisante pour ne pas être brisées par l'écoulement. Ces agrégats, en

sédimentant, vont former une couche protectrice sur le dépôt, réalisant ainsi une sorte de "pavement" du dépôt qui expliquerait son augmentation de résistance à l'érosion.



Figure IV-2 - Evolution des concentrations en MES en fonction du temps, rôle de la déposition (Droppo *et al.*, 2001)

L'intérêt supplémentaire des expériences menées par Droppo *et al.* (2001) réside dans la critique des modes opératoires habituels d'analyse de la résistance des dépôts de matériaux en canal. En effet, on mesure généralement le taux de cisaillement critique sur des dépôts qui ont sédimenté dans le canal dans des conditions "calmes" (pas d'écoulement). Les résultats de Droppo *et al.* (2001) montrent qu'en suivant un tel protocole, on risque de sous-estimer le taux de cisaillement critique des dépôts formés in situ.

1.2.1.3. Consolidation biologique

Le système « EROMES » a été développé pour faire des tests d'érosion sur des boues d'estuaire (Witte et Khul,1996). Cet appareil permet d'étudier le taux d'érosion en fonction du taux de cisaillement appliqué. Le rôle de la consolidation biologique (liée à des diatomées) a été mis en évidence au cours d'expériences réalisées sur des échantillons de sédiments prélevés en mer.

Enfin, Droppo *et al.* (2001) au cours des expériences en canal circulaire sur des sédiments issus du port d'Hamilton, Ontario, ($d < 63 \mu m$) ont également observé l'impact de la « bio-stabilisation » réalisée par la colonisation de la surface des dépôts par des micro-organismes. Ces micro-organismes lient les particules du dépôt entre elles, à la manière d'un biofilm et plus la bio-stabilisation est longue (durée de colonisation), plus le dépôt est résistant.

1.2.1.4. Expériences d'érosion

Un instrument de mesure appelé « In Situ Erosion Flume » a été développé par Houwing et van Rijn (1998) (cf. Figure IV-3). Ce système n'a été testé pour le moment que sur de la

kaolinite, mais il est destiné à réaliser des expériences en estuaire. Dans ce système, le taux de cisaillement est déterminé à partir du profil de vitesse mesuré, en considérant une distribution logarithmique dans la section. Cet appareil permet la mesure du taux de cisaillement minimum à exercer sur un dépôt pour initier son érosion (taux de cisaillement critique). Les expériences menées sur de la kaolinite ont montré que, après 6 jours de consolidation, la densité du dépôt ainsi que sa résistance au cisaillement augmente avec la profondeur.



Figure IV-3 – Schéma de principe du ISEF (Houwing & van Rijn, 1998)

1.2.2. Tests sur des mélanges à base de sable et de matières cohésives

Des expériences menées par Huygens *et al.* (1997) ont montré que la présence d'argiles cohésives (de type kaolinite et montmorillonite) dans des dépôts sableux augmente la résistance à l'érosion de celui-ci : sans argile cohésive la contrainte de cisaillement critique du dépôt sableux vaut environ $\tau_{cr} = 0,2 \text{ N.m}^{-2}$, avec 30 % d'argile dans le dépôt la contrainte de cisaillement critique τ_{cr} atteint des valeurs de l'ordre de 1,1 à 1,5 N.m⁻² suivant la nature de l'argile utilisée. Il conclut de ses expériences que les paramètres influant sur τ_{cr} sont la nature et le pourcentage de fines dans le dépôt.

Afin d'établir l'influence de la matière organique sur le phénomène de consolidation des sédiments, Tait *et al.* (1998) ont mené une étude en canal, sans re-circulation d'eau. Ils ont étudié des mélanges composés, entre autres, de 90 % de noyaux d'olives broyés et 10 % de sables. Les mélanges sont saturés en eau, ils sont ensuite placés dans un canal et soumis à différents paliers de débits. Des pièges à sédiment sont placés à l'aval de l'écoulement. Les résultats obtenus montrent que, à chaque début d'expérience, un pic de flux de MES apparaît. Le flux de MES se réduit ensuite assez rapidement pour atteindre un seuil stable. Les

mélanges de noyaux d'olives et de sable donnent lieu à des flux de MES plus importants au niveau des pics et du seuil de stabilisation que les sédiments composés uniquement de noyaux d'olives broyés. Les auteurs remarquent que les matériaux retenus dans les pièges à sédiments contiennent essentiellement du sable (noyaux d'olives < 3%).

Il apparaît donc que le degré de mobilité des matériaux susceptibles d'être mis en suspension est plus important lorsqu'un matériau granulaire mobile (ici, le sable) est présent. Aux forts débits, les auteurs observent une ségrégation entre les noyaux d'olives et le sable et, à la fin des expériences, des petites dunes de sables sont visibles au fond du canal. Les sédiments contenant du matériau cohésif et du matériau granulaire (sable) ont un comportement différent des sédiments contenant uniquement du matériau cohésif. Une faible quantité de matériau granulaire suffit à augmenter le transport en suspension du sédiment organique.

Skipworth *et al.* (1999) ont également étudié en canal des dépôts cohésifs réalisés avec des noyaux d'olives broyés. Ce dépôt a été laissé au repos durant 4 heures puis il a été soumis à différents paliers de vitesse. Cette expérience a mis en évidence l'existence d'une couche faiblement résistante située dans la partie supérieure du dépôt et dans laquelle la résistance augmente avec la profondeur : cette couche s'érode à partir d'un taux de cisaillement critique $\tau_{cr,s}$ inférieur au taux de cisaillement critique $\tau_{cr,u}$ nécessaire pour éroder le cœur du dépôt (cf. Figure IV-4). Durant les expériences, il a également été observé que les paramètres d', $\tau_{cr,s}$ et $\tau_{cr,u}$ sont dépendants de la pente du canal.



Figure IV-4 - Résistance à l'érosion en fonction de la profondeur dans le dépôt (Skipworth *et al*, 1999)

La résistance à l'érosion du dépôt dans la couche supérieure a été modélisée par la relation suivante :

$$\tau_{cr} = \frac{p^{1/q} (\tau_{cr,u} - \tau_{cr,s})}{\frac{1}{p'} q} + \tau_{cr,s}$$

Équation IV-5

avec τ_{cr} : contrainte de cisaillement critique

 $\tau_{cr,u}\,$: contrainte de cisaillement critique au cœur du dépôt

 $\tau_{cr,s}\,$: contrainte de cisaillement critique en surface du dépôt

p : hauteur d'érosion du dépôt

p' : hauteur de la couche superficielle du dépôt

q : coefficient empirique, spécifique du matériau étudié (dans ce cas : b = 0,45)

Enfin, Camuffo *et al.* (2002) ont réalisé des tests sur des sédiments à base de noyaux d'olives broyés afin d'étudier l'impact des conditions hydrauliques sur la formation et la résistance à l'érosion des sédiments cohésifs. Ils ont placé les échantillons dans la partie basse d'un érosimètre (cf. Figure IV-6) et les ont soumis à plusieurs phases d'augmentations progressives de débit (le cisaillement appliqué atteint des valeurs allant de 0.5 à 1.2 N/m²), entrecoupées de phases à faible débit (le cisaillement appliqué est de l'ordre de 0.16 N/m²). Ils observent ainsi des phases d'érosion et de déposition des sédiments cohésifs : la résistance à l'érosion des dépôts augmente durant les phases à faible débit, sous l'effet de la consolidation. Les auteurs soulignent l'apparition d'une couche mince résistante en surface du sédiment et ils supposent que lorsque cette couche « protectrice » est brisée (par exemple, lors d'une augmentation très forte de débit), elle permet l'affleurement du sédiment moins résistant.

Ces expériences ont montré que la couche superficielle des dépôts avait un comportement différent du corps des dépôts. Cependant, certains résultats laissent apparaître des ambiguïtés quant au comportement de cette couche. A partir de ces résultats, nous pouvons avancer l'hypothèse suivante : il existe deux phénomènes de consolidation simultanés. Le premier a lieu en surface et il est lié à des processus biologiques, le second a lieu dans la masse du dépôt et il est lié à des phénomènes de réarrangement granulaire, de tassement, etc.

Il faudrait vraisemblablement étudier plus précisément la zone superficielle en considérant les conditions hydrauliques et la durée du mode de constitution des dépôts pour tenir compte de ces deux types de consolidation.

1.2.3. Tests sur des sédiments provenant du réseau d'assainissement

Nous présentons ici les principaux résultats et les méthodes employées pour déterminer les caractéristiques « mécaniques » des dépôts cohésifs issus du réseau d'assainissement. Ces expériences sont souvent liées à un site expérimental particulier, car les équipes de recherche dans ce domaine sont peu nombreuses.

1.2.3.1. Sédiments provenant de Strasbourg et de Enthzeim (Alsace)

Beyer (1989) a étudié des sédiments du réseau d'assainissement, en laboratoire. Il a fait des analyses à l'aide d'un viscosimètre de Couette (viscosimètre à cylindres coaxiaux, l'un est fixe, l'autre peut être mis en rotation – cf. Figure IV-5) sur des boues composées de particules fines de dépôt (<80µm) et d'eau. Le viscosimètre permet d'évaluer la rigidité initiale τ_y d'un fluide que l'on peut lier à la contrainte de cisaillement à l'aide d'une relation du type Migniot (1968), citée par (Beyer, (1989) :

 $\tau_{cr} = K.\tau_y^a$ Équation IV-6

avec : si $\tau_v \le 3$ Pa alors K = 0.169 et a = 0.5 ; si $\tau_v > 3$ Pa alors K = 0.081 et a = 1



Figure IV-5 - Vue en coupe d'un viscosimètre de Couette

Les expériences réalisées sur les vases du réseau d'assainissement d'Entzheim avec le viscosimètre sont présentées dans le Tableau IV-1. Pour préparer les échantillons de vase, Beyer (1989) a fait un tamisage sous eau (tamis $80 \,\mu m$) des sédiments prélevés en réseau. Il a ensuite procédé à un ajout d'eau pour obtenir plusieurs concentrations. On observe un effet prédominant de la matière organique sur la rigidité initiale des dépôts : lorsque le pourcentage de matière organique passe de 15 % à 30 % dans le dépôt, la contrainte de cisaillement critique est multipliée par 3,5. Cependant, cette méthode s'est révélée difficile à mettre en

œuvre : les mélanges à faible concentration sédimentent rapidement et les mélanges à forte concentration se mettent difficilement en place dans l'appareil.

Beyer (1989) a également réalisé une étude en canal durant laquelle le dépôt est soumis à différents paliers de vitesse. Il observe que la rigidité augmente avec la hauteur du dépôt et il attribue cela à un effet de tassement. Il aboutit à la conclusion que les vases issues du réseau d'assainissement ont un caractère cohésif apparent et que l'érosion affecte une couche déterminée du sédiment, modifiant ainsi l'interface eau-sédiment.

Enfin, il a constaté que les micro-organismes avaient un impact sur la consolidation des vases en augmentant la contrainte critique d'érosion et que les sédiments présentent un comportement thixotropique : la résistance au cisaillement diminue lorsqu'une sollicitation d'intensité constante est appliquée de manière prolongée.

_			Rigidité initiale (N.m ⁻²)				<i>Cisaillement critique (</i> N.m ⁻²)					
% mat.	%	d ₅₀	200	300	400	500	600	200	300	400	500	600
organique	argile	μm	(g/l)	(g/l)	(g/l)	(g/l)	(g/l)	(g/l)	(g/l)	(g/l)	(g/l)	(g/l)
8	23	8.4	0	0	0.6	1.4	2.5	0	0	0.13	0.20	0.27
11	30	7.0			5.7					0.46		
15	42	2.6	0.7	2.4	5.6	15.0	47.2	0.14	0.26	0.45	1.22	3.82
20	36	3.3	1.4	8.7				0.20	0.71			
25	43	2.5	5.8					0.47				
30	39	2.6	8.8					0.71				

Tableau IV-1 - Rigidité initiale de la vase d'Entzheim et contrainte de cisaillement critique, en fonction des concentrations testées, à partir des données de (Beyer,1989)

1.2.3.2. Sédiments provenant de Dundee (Ecosse)

Wotherspoon et Ashley (1992) ont étudié 61 échantillons de dépôts. Pour cela, ils ont utilisé un scissomètre basé sur une hélice cruciforme (10 mm diamètre, 20 mm hauteur) dont la vitesse de rotation augmente progressivement (cf. Figure IV-6) permettant d'étudier la réponse des matériaux soumis à une contrainte de plus en plus importante. La résistance du dépôt varie de 10 N.m⁻² à 2650 N.m⁻² sur les 61 échantillons testés.

Ces valeurs correspondent à la rigidité initiale du dépôt. Si on ramène la résistance du dépôt à une contrainte de cisaillement critique (avec la relation de Migniot, cf. Equation 6) on obtient une gamme de variation allant de 0.8 N.m⁻² à 214 N.m⁻². Ces expériences ont également

permis de mettre en évidence une loi exponentielle reliant la résistance du dépôt à la teneur en eau des échantillons : plus la teneur en eau augmente et plus la résistance est faible.



Figure IV-6 - Principe d'un scissomètre avec hélice cruciforme et de l'érosimètre McGregor *et al.* (1993) ont utilisé un érosimètre sur des sédiments de type A ($d_{50} = 0.25$ mm à 0.60 mm) provenant du réseau de Dundee pour étudier le relargage des polluants durant l'érosion des dépôts de type A. L'échantillon de dépôt est placé au repos dans un cylindre (cf. Figure IV-6) avec de l'eau. Une pale rotative (52 mm x 11 mm) à vitesse contrôlée permet de soumettre le dépôt à différents taux de cisaillement. Les matières remises en suspension sont prélevées dans la colonne d'eau pour analyse. Trois taux de cisaillement ont été testés correspondant à un régime turbulent lisse (0.56 N.m⁻²; 0.17 N.m⁻²) et à un régime laminaire (0.06 N.m⁻²) : plus le cisaillement est important et plus les concentrations en DBO₅, DCO et MVS augmentent dans la colonne d'eau. Ces expériences permettent de mettre en évidence une érosion partielle des dépôts de type A à partir de faibles taux de cisaillement.

1.2.3.3. Sédiments provenant de Dundee (Ecosse) et Loenen (Pays-Bas)

Tait *et al.* (2002) ont réalisé des expériences en canal sur des sédiments provenant de Dundee et de Loenen visant à étudier l'impact des conditions de formation sur la résistance à l'érosion des dépôts. Pour cela, ils ont placé les dépôts dans un canal circulaire avec un écoulement faible et ils ont fait varier les conditions de température (4°C et 14°C) et d'oxygène dissous. Les résultats des expériences à 14°C ont mis en évidence l'existence d'une couche superficielle mince très organique et très active biologiquement (une sorte de biofilm) qui possède une couleur plus claire que le reste du sédiment et un aspect « cotonneux ». Une expansion locale de cette couche a été observée durant l'augmentation du taux de cisaillement appliqué, jusqu'au moment de son érosion.

Ces expériences ont également montré un impact des processus biochimiques sur la résistance des dépôts : les dépôts maintenus à 14°C sont sensiblement moins résistants à l'érosion que les dépôts maintenus à 4°C dans lesquels ne subsiste qu'une très faible activité biologique.

1.2.3.4. Sédiments provenant de Gent (Belgique) et de Paris

DeSutter (2000) a réalisé des expériences d'érosion en canal, avec des sédiments issus du réseau d'assainissement du Marais (Paris) et du réseau d'assainissement de Gent (Belgique). Les observations réalisées (cf. Tableau IV-2) montrent que le pourcentage de fines joue un rôle déterminant sur la résistance du dépôt. Il faut noter que les sédiments analysés ont de faibles teneurs en matière organique et donc une faible cohésion interne, ce sont donc des dépôts de type A qui ont été analysés.

	Le Marais	Gent
Teneur en eau (%)	40 à 45	50 à 75
Teneur en matière organique (%)	2 à 6	4 à 9
d ₅₀ (μm)	400 à 500	15 à 50
Taux de cisaillement critique (N.m ⁻²)	0,4 à 0,7	1,4 à 2,6

Tableau IV-2 – Expériences réalisées par DeSutter (2000)

1.3. Conclusion

L'étude des dépôts cohésifs issus des estuaires, des réseaux d'assainissement ou artificiels ont permis de mettre en avant plusieurs caractéristiques :

- la plupart des études se réfèrent à la notion de taux de cisaillement pour expliquer les phénomènes de déposition et d'érosion mais nous avons noté qu'il existe une autre approche basée sur les effets de pression exercée en surface des sédiments cohésifs qui a été relativement peu exploitée ;
- les caractéristiques hydrauliques influent sur les dépôts formés : résistance du dépôt ou nature même du dépôt ;

Les expériences en laboratoire ont par ailleurs permis de déterminer les paramètres agissant sur la résistance des dépôts au cisaillement :

- la teneur en matière organique. Plus il y a de matière organique (qui est par nature « cohésive ») dans un dépôt, plus le dépôt est résistant à l'érosion ;
- la teneur en fines particules. Plus il y a de fines particules, plus la résistance de dépôt est grande (ce phénomène s'explique par la notion d'arrangement granulaire : les petites particules viennent se placer dans les vides des grosses particules donnant un matériau plus compact);
- la teneur en eau. Plus la teneur en eau est importante, moins le dépôt est résistant ;
- les micro-organismes. Ils sont liés à la matière organique et ils renforcent l'effet de cohésion interne des particules.

Enfin, dans le cas de dépôts fortement organiques, il semble que la couche superficielle du dépôt ait un comportement différent du corps du dépôt. Cette analyse a été mise en évidence pour les boues d'estuaires, pour les dépôts à base de noyaux d'olive broyés et pour les dépôts issus du réseau d'assainissement.

De plus, la résistance des dépôts semble liée à l'historique des contraintes subies par les boues d'estuaires ou par les dépôts. En réseau d'assainissement, les dépôts subissent des cycles de contraintes liés au cycle journalier des débits. Cet axe d'étude ne semble pas encore avoir été pleinement développé dans les expériences en laboratoire, aussi nous paraît-il important de le signaler. Il faut noter cependant que quelques études récentes en laboratoire ont pris en compte les aspects liés au prélèvement, au transport et à la mise en place des sédiments. Ce type de considération paraît important dans le cas de l'interface eau-sédiment car elle est sensible au cisaillement et a une structure très variable. Ceci nous conduit à diriger l'étude bibliographique vers les études in-situ.

2. La dynamique de l'interface eau-sédiment en réseau d'assainissement unitaire : études et modélisation

2.1. L'étude de l'interface eau / sédiment

2.1.1. avec une vanne de chasse

Verbanck (1995) a procédé à la rétention puis au lâcher d'eaux usées (grâce à une vanne) dans un tronçon du réseau d'assainissement de Bruxelles. Il observe la remise en suspension du « dense under-current » pour un cisaillement $\tau = 1,1$ à 1,2 N.m⁻².

Ristenpart (1997) a placé une vanne dans le réseau d'assainissement de Hildesheim pour intercepter les eaux usées de temps sec. Il fait ses observations à l'ouverture de la vanne. Le taux de cisaillement imposé vaut $\tau = 1,4$ à 1,8 N.m⁻². Il mesure la hauteur de sédiments et divers paramètres hydrauliques ainsi que la concentration en MES et la qualité des eaux usées sur un volume de contrôle. Au pic de débit correspond le pic de concentration en MES : le processus d'érosion du dépôt provoque le pic de concentration.

2.1.2. durant une pluie réelle

Verbanck (1995) a observé une pluie réelle sur un tronçon de collecteur à Bruxelles. L'augmentation de la concentration en MES est simultanée à l'augmentation de débit dans le tronçon (cf. Figure IV-7). Cependant le pic de MES dure moins longtemps que le pic de débit. L'analyse des MES circulant durant le pic de débit montre que les particules sont de *nature* *très organique* (taux de MVS : 80 % à 90 %), notamment pour les classes granulaires allant de 0.5 mm à 2 mm, ce qui ne correspond pas aux particules des dépôts grossiers. L'origine de ces particules est le « dense undercurrent ».





sec : il a noté le gradient de concentration en MES, près du dépôt, et il a remarqué un déplacement de « gross solids » sur le fond et ponctuellement dans la section. Ces « gross solids » sont constitués de matières fécales, ils se désintègrent et sédimentent avec les autres particules. Du fait de leur caractère très organique ils augmentent la résistance à l'érosion du dépôt. La biodégradation qu'ils génèrent serait à l'origine de la forte teneur en DBO du liquide interstitiel du dépôt. Par temps de pluie, à Hildesheim, durant l'augmentation de débit, Ristenpart (1997) a observé que la concentration en « near bed fluid » diminuait tandis que, simultanément, la concentration en MES augmentait. Le dépôt grossier était lui aussi érodé durant l'augmentation de débit (cf. Figure IV-8).

Ainsi, les grosses particules sont charriées au fond du collecteur tandis que le « fluid sediment » est remis en suspension : finalement les concentrations en MES dans la section sont homogènes. Le lessivage de fines particules inorganiques du dépôt entraîne une réduction des taux de MVS par rapport au temps sec. Les paramètres tels que DCO et DBO₅ varient de la même manière que les MES. On note enfin que le diamètres moyen des MES vaut $d_{50} = 50$ μm durant la pluie, tandis que durant le temps sec on relève des diamètres moyens $d_{50} = 62$ μm . Le dépôt a quant à lui un $d_{50} = 420 \ \mu m$. D'une manière générale, les particules en suspension sont plus fines que les particules du « near bed fluid » ($d_{50} = 70 \ \mu m$), qui sont plus fines que les particules du dépôt grossier.



Figure IV-8 - Evolution des MES et du « fluid sediment », de la hauteur d'eau, de la vitesse et de la hauteur du dépôt durant une pluie (Ristenpart, 1997)

Ashley *et al.* (1992) ont observé à Dundee que, durant une pluie, le gradient de concentrations en MES près du fond diminue, voire disparaît : la concentration en MES est alors fonction du débit. Il suggère que les « near bed solids », situés en surface du dépôt, sont rapidement entraînés par la pluie car ils opposent une faible résistance à l'érosion (ils sont érodés avec un taux de cisaillement $\tau = 1.8 \text{ N.m}^{-2}$). Le dépôt grossier est ensuite exposé au phénomène d'érosion mais n'est que faiblement mis à contribution parce qu'il est consolidé (cf. Figure IV-9).



Figure IV-9 - Mécanismes de remise en suspension des dépôts (Ashley et al.,1992)

2.1.3. Avec des augmentations artificielles du débit

Hrissanthou et Hartmann (1998) ont utilisé un système construit par l'« Institute of Hydrosciences » (Munich) dans une chambre de dessablement et dans un collecteur de Braunschweig. Le système est basé sur un système proche de l'ISEF (cf. Figure IV-3) avec un « canal » en PVC, à section rectangulaire, de 77 cm de long et 10,4 cm de large.

Ce dispositif est posé en surface des dépôts. Sa face supérieure est en plexiglas et sa face inférieure est en métal, avec une ouverture de 26,3 cm sur 8 cm pour faire affleurer le dépôt. Le débit dans le canal est contrôlé par une vanne d'alimentation. Des échantillons de dépôt ont été prélevés pour faire des analyses du type granulométrie, teneur en eau et teneur en matière organique (cf. Tableau IV-3). On constate que les dépôts étudiés présentent des teneurs en matières organiques et des masses volumiques proches des dépôts grossiers de type A.

Site	d ₅₀	ρ	Teneur en matière	Teneur en eau
	(µm)	(kg/m^3)	organique (%)	(%)
Chambre de dessablement	150	2440	15,4	278
Egout	640	2600	5,7	41

Tableau IV-3– Analyses des dépôts étudiés (Hrissanthou et Hartmann, 1998)

Les étapes critiques pour le transport solide (érosion de surface ; érosion de masse) ont été définies via une caméra vidéo sous-marine, maintenue contre la face en Plexiglas et reliée à un système d'acquisition informatique. Un procédé d'analyse d'images permet d'évaluer la vitesse des particules dans le canal. Le taux de cisaillement a été évalué à partir de la vitesse moyenne de l'écoulement (déduite de la mesure du débit), en considérant les relations de Darcy-Weisbach, de Manning-Strickler et également en appliquant un profil logarithmique des vitesses dans la section (ce profil est calé à partir de la vitesse moyenne).

Ces expériences ont permis aux auteurs d'apporter des corrections à l'abaque de Shields qui permet habituellement de déterminer le seuil de mouvement de particules non cohésives, en fonction du nombre de grain de Reynolds (Re^*) et de la contrainte de cisaillement adimensionnelle τ^* .

(Ahyerre,1999) a mené des expériences in situ afin de déterminer les apports dus à la couche organique par temps de pluie. Plusieurs expériences ont été menées durant lesquelles une mesure des composantes (u, v, w) de la vitesse près du fond a été réalisée avec un Acoustic Doppler Velocimeter. Le taux de cisaillement ponctuel a été calculé à partir de ces mesures.

Deux types d'expériences ont été réalisées : l'une en appliquant des paliers de débit d'intensité croissante et l'autre en appliquant trois paliers successifs de débit identique (cf. Expériences A et B, Figure IV-10).

Sur le collecteur étudié, l'érosion de la couche organique débute avec un taux de cisaillement ponctuel très faible ($\tau = 0.05 \text{ N.m}^{-2}$), ce qui montre que la couche organique a une très faible résistance à l'érosion. De plus, l'expérience (A) montre que la couche organique est fortement érodée lors des augmentations de débit et que, plus le cisaillement est important, plus la quantité de matière érodée est importante : ces observations indiquent que l'érosion est liée au taux de cisaillement appliqué en surface de la couche organique. L'analyse des particules érodées durant cette expérience révèle que les particules érodées évoluent au cours de l'expérience : plus le cisaillement est important, plus la teneur en matière volatile diminue.

L'expérience (B) montre que la quantité de matière érodable à un seuil de cisaillement donné est limitée : un même taux de cisaillement appliqué deux fois de suite n'entraîne que très peu d'érosion à la seconde application.

Ces observations indiquent que la couche organique est formée d'une ou plusieurs couches dont la résistance augmente avec la profondeur et dont la teneur en matières volatiles diminue avec la profondeur.

Des photos et un film ont également été réalisés durant une augmentation de débit dans le collecteur Vieille du Temple : ils ont permis de mettre en évidence la couche organique et de montrer que l'entraînement de la couche organique durant un palier de débit se fait de manière progressive.



Figure IV-10– Expériences d'érosion menées par (Ahyerre, 1999)

2.2. Modélisation de la dynamique de l'interface eau-sédiment

Il existe différents modèles décrivant le comportement dynamique de l'interface eau-sédiment en réseau d'assainissement. Les différences entre les modèles sont essentiellement basées sur le concept d'interface eau-sédiment utilisé (cf. Partie 2). On notera par exemple :

- un modèle pour estimer l'érosion et la déposition des sédiments cohésifs (Wotherspoon, 1994),
- une loi décrivant le transport des matières en suspension et des « near bed solids » (Verbanck, 1995 & 2000),
- une relation pour estimer le transport des « near bed solids » (Arthur, 1996),
- une approche par bilan de masse pour la couche organique (Ahyerre et al., 2001a).

Tous ces modèles ont besoin d'être calés sur leur site d'application, mis à part celui développé par Verbanck (2000). Nous allons présenter ici deux approches et les résultats de leur application sur site.

2.2.1. Modèle pour les « near bed solids » (1996)

La masse de particules transitant en suspension durant une augmentation de débit artificielle sur un tronçon de collecteur peut être attribuée aux particules amenées par le flux de temps sec, aux particules dues à l'érosion des « near bed solids » ainsi qu'aux particules provenant de l'érosion du dépôt grossier, de type A (cf. Equation 4-7). Ashley et McIlhatton (1998) ont montré que cette relation simple pouvait être utilisée pour estimer la contribution massique des « near bed solids » à la masse totale transitée durant une augmentation de débit artificielle menée à Dundee (Ecosse).

$$MES_{flush} = MES_{TS} + MES_{NBS} + MES_{TypeA}$$
 Equation IV-7

,

2.2.1.1. Contribution des MES de temps sec

La contribution massique due au flux de temps sec est estimée à partir de pollutogrammes déterminés grâce à des prélèvement d'échantillons au cours des journées de temps sec.

2.2.1.2. Contribution des NBS

Arthur (1996) a défini une relation empirique pour décrire le flux des « near bed solids » par temps sec (cf. Equation 4-8). Cette relation peut être utilisée pour décrire la contribution massique des « NBS » à la masse totale transportée durant une augmentation de débit.

$$C_{v} = -105.73 + 2.55 \times 10^{-3} \left(\frac{I_{r}.TSSS}{D_{r}} \right) + 0.2023 \left(\frac{y_{o}}{y_{\text{max}}} \right) + 47.808 \left(\frac{\tau_{o}}{\tau_{b}} \right) + 120.45 \left(\frac{\rho_{d}}{\rho_{w}} \right) \text{Équation IV-8}$$

avec :

Cv ... Concentration volumique en particules (ppm)

$\left(\underline{I_r.TSSS}\right)$	•••	Ir : intensité maximale de la pluie (mm/h) ; Dr : hauteur totale précipitée					
$\left(D_r \right)$		(mm); TSSS: durée de temps sec précédente (h);					
$\begin{pmatrix} y_o \end{pmatrix}$		Ratio de la hauteur moyenne de l'écoulement sur la hauteur maximale de					
$\left(y_{\max} \right)$		l'écoulement					
$\left(\underline{\tau_{o}}\right)$		Ratio du taux de cisaillement moyen (calculé à partir de la vitesse					
$\left(\tau_{b} \right)$		moyenne de l'écoulement) sur le taux de cisaillement au fond (calculé à					
		partir de la vitesse d'écoulement à 50mm au-dessus du fond)					
$\left(\underline{\rho_d}\right)$		Ratio de la masse volumique sèche des « near bed solids » sur la masse					
$\left(\rho_{W} \right)$		volumique de l'eau (~1000 kg/m ³)					

Une seconde approche a également été proposée pour prédire le flux de « near bed solids ». Elle se base sur les travaux de Verbanck (1995 & 2000) : il s'agit d'un modèle bi-couche qui suppose que les « near bed solids » se déplacent en suspension dans la partie basse de l'écoulement. Les flux de particules sont estimés à partir des profils de concentration en MES mesurés dans la section d'écoulement.

Les solides se déplaçant dans la région supérieure de l'écoulement sont estimés à partir de la forme exponentielle de la relation de Rouse. Les « NBS » sont estimés à partir du profil de concentration en MES. Le profil de MES est évalué avec la relation de Coleman :

$$\frac{C_y}{C_a*} = \left(\frac{y}{a*}\right)^{-\eta}$$
 Équation IV-9

La valeur de référence a* a été déterminée à partir des profils de concentration mesurés sur le site étudié durant le temps sec (a* = 300mm dans une hauteur d'eau de 450mm). Cette valeur est beaucoup plus importante que ce qui avait été suggéré par Coleman.

Cependant, l'estimation des MES près du fond est systématiquement sous-évaluée à cause des méthodes de prélèvement employées (diamètre du tube de prélèvement). Aussi, les quantités de « near bed solids » collectées dans les bed-traps ont-elles servi à caler les profils de concentration.

Ce type de modèle permet de déterminer la masse totale de solides transportés en suspension et sous la forme de « near bed solids » durant le temps sec.

2.2.1.3. Contribution du dépôt grossier

Le modèle d'érosion du dépôt grossier choisi a été développé et testé à partir d'expériences menées à Dundee et à Hildesheim. L'application de ce modèle sur un tronçon de 82 m a montré une bonne correspondance entre les estimations de masses érodées durant un orage à partir de bilan massique entrée / sortie du tronçon (les échantillonnages ont été effectués à l'amont et à l'aval du tronçon, permettant de négliger les apports par ruissellement).

2.2.1.4. Application à une expérience d'augmentation de débit

Durant l'expérience, la masse totale transitée a été estimée à 332 kg. La contribution des MES de temps sec est de 29 kg. L'application de la relation d'Arthur pour estimer la contribution des « near bed solids » a donné une valeur égale à 14 kg. La masse de particules provenant du dépôt grossier est de 289 kg.

Dans cette application, il a été considéré que la concentration en « near bed solids » durant l'augmentation de débit était identique à la concentration déterminée durant le temps sec parce qu'ils sont en déplacement constant sur le fond du collecteur.

Ces résultats montrent que la contribution des « near bed solids » est marginale en terme de masse des particules alors qu'il a été mis en évidence que l'interface eau-sédiment contribue de façon importante en termes de pollution aux rejets urbains de temps de pluie (Ashley et Verbanck, 1996).

2.2.2. Modèle pour la couche organique

Ahyerre (1999) a fait un calcul des masses de particules érodées et accumulées durant une durée de 3 ¹/₂ années à partir d'un schéma conceptuel (cf. Figure IV-11). L'objectif de cette modélisation était de tester la validité du taux d'accumulation déterminé expérimentalement sur le Marais par Ahyerre (1999). Pour cela :

- les masses de couche organique accumulées sur les 3 ¹/₂ années ont été estimées à partir du taux d'accumulation linéaire expérimental déterminé par (Ahyerre,1999) pour le bassin versant du Marais (cf. Partie 2. Chapitre 2.1.2.). Les durées de temps sec ont été déterminées à partir des séries pluviométriques mesurées durant cette période.
- les masses érodées pour chaque événement pluvieux ont été estimées à partir de l'Equation 4-10 :

MES = 482,07. Q_{max} + 29,65.TS + 2,09. I_{max} - 11,10. I_{moy} + 29,88 Équation IV-10 avec Q: débit à l'exutoire (m³/s); I_{max} : intensité maximale de la pluie (mm/h); I_{moy} : intensité moyenne de la pluie (mm/h); TS: la durée de temps sec (jours). Cette relation a été calée sur une série de 30 évènements pluvieux, grâce aux données recueillies par Gromaire (1998) sur le Marais.

La comparaison de ces deux calculs a montré que les masses accumulées et les masses érodées sont du même ordre de grandeur. Ceci a permis à Ahyerre (1999) de conclure que le taux d'accumulation expérimental déterminé était réaliste.

Enfin, ce type de modélisation a été appliqué pour les termes de MVS, DCO et DBO₅. Les résultats obtenus ont permis de valider l'importance de la couche organique en tant que source de particules polluées par temps de pluie, sur le bassin versant du Marais.



Figure IV-11 – Schéma conceptuel de l'érosion de la couche organique (Ahyerre, 1999)

3. Conclusions

Les sédiments cohésifs ont fait l'objet de nombreuses études, notamment en laboratoire. Plusieurs paramètres jouant sur la cohésion et donc la résistance de ce type de sédiments ont été identifiés. On relèvera notamment le rôle de la teneur en eau, de la teneur en matières organiques et des micro-organismes.

Nous avons constaté que le comportement dynamique des sédiments organiques est mal connu, complexe et difficile à interpréter en terme de modélisation. De plus, les études en laboratoire sur du sédiment réel prennent rarement en compte les problèmes liés au prélèvement des sédiments et à la modification éventuelle de leurs caractéristiques ainsi qu'à l'impact des cycles de contraintes subies par les sédiments en réseau d'assainissement.

Dans le cas des recherches menées sur les matières organiques en réseau d'assainissement, les études ont été axées sur la recherche de la source de pollution des RUTP. Elles s'intéressaient donc aux critères déterminant la formation ou l'érosion des stocks de matières organiques. Les auteurs s'accordent à dire que les stocks de matières organiques :

- s'accumulent durant le temps sec à l'interface eau-sédiment dans des zones où le taux de cisaillement par temps sec est faible ;
- sont partiellement érodés par temps de pluie, à partir de valeurs du taux de cisaillement relativement faibles.

Sur le Marais, Ahyerre (1999) a montré que l'érosion de la couche organique débute avec des cisaillements très faibles et que la couche organique est probablement formée de plusieurs strates dont la résistance et la composition physico-chimique varient avec la profondeur. Ces résultats ne sont pas repris dans les deux modèles « conceptuels » que nous avons présentés pour décrire le comportement de l'interface eau-sédiment. Ils sont basés sur des idées différentes de l'interface organique : l'un concerne les « near bed solids », le second concerne la couche organique. Les résultats obtenus avec le modèle pour les « NBS » font apparaître un clivage entre la contribution massique des « NBS » aux RUTP et leur rôle en terme de pollution des RUTP, contrairement au modèle appliqué pour la couche organique.

Pour une meilleure compréhension des phénomènes et des mécanismes de formation et d'érosion des matières organiques stockées à l'interface eau-sédiment, il serait utile de préciser :

- de quelle façon se produisent les phénomènes d'érosion et de déposition ;
- quels sont les paramètres qui gèrent ces mécanismes ;
- s'il est possible de mettre en équation les phénomènes observés.

Pour cela, des expériences d'observation de l'interface eau-sédiment ont été réalisées dans différentes conditions (temps sec, temps de pluie, injection d'eau potable) et in-situ, afin d'être assurés que les observations réalisées portent sur les caractéristiques réelles de l'interface.

<u>CHAPITRE 3. Observation de la dynamique de l'interface</u> eau - sédiment

Le comportement dynamique de la couche organique a été étudié à deux échelles spatiales afin de déterminer si les phénomènes observés sont homogènes. Deux systèmes d'observation ont été mis en œuvre dans le réseau d'assainissement du Marais :

- l'endoscope qui permet de faire des relevés ponctuels des hauteurs de couche organique sur une cinquantaine de mètres ;
- une boîte d'observation qui permet de suivre les évolutions de la couche organique à partir de photos, en un point sur quelques dizaines de centimètres.

Les évolutions de la couche organique ont été considérées à deux échelles de temps suivant le pas de temps choisi pour les prises de photos : des observations ont été réalisées toutes les 15 minutes, sur plusieurs jours, pour faire un suivi de temps sec mais également toutes les minutes, durant quelques heures, pour étudier précisément les évolutions de la couche organique lors d'augmentations artificielles du débit dans le collecteur.

<u>1. Dispositif d'observation mis en place dans le Marais</u>

(Ahyerre,1999) a observé l'érosion de l'interface eau - sédiment grâce à un dispositif placé sur le côté de la cunette dans le collecteur Vieille du Temple. Nous avons décidé d'améliorer ce dispositif afin d'étudier l'évolution de la couche organique dans des conditions hydrodynamiques variées.

1.1. Le système d'observation « Ahyerre 1999 »

Le système d'observation utilisé par Ahyerre (1999) sur le collecteur Vieille du Temple est décrit dans la Partie 1. Chapitre 2.2.1. Grâce à ce système, Ahyerre (1999) a pu observer l'interface eau-sédiment par temps sec et durant une augmentation de débit contrôlée.

Le système d'observation présente cependant plusieurs inconvénients :

a) la vitre s'encrasse rapidement et doit donc être nettoyée régulièrement, ce qui peut perturber l'interface eau-sédiment ;

 b) la boîte ne dispose d'aucun système de prises de vue intégré, les observations nécessitent donc la présence de personnel sur le site ;

c) la largeur de la boîte crée une accélération de l'écoulement face à la zone d'observation.

Ce système d'observation a été placé dans le collecteur Saint-Gilles afin d'évaluer son impact hydraulique. Des mesures de profils de vitesse ont été effectués devant la boîte et à 3 mètres à l'amont de la boîte. La hauteur d'eau mesurée à la pige était de 25 cm. Les résultats sont présentés sur la Figure IV-12. La présence de couche organique correspond à la zone morte au fond du collecteur (zone où z/h < 0,35). Enfin, on constate que la boîte d'observation crée une accélération de la vitesse face à la boîte.



Figure IV-12 – Profils de vitesse réalisés sur le site d'observation

1.2. Le nouveau système d'observation

Il a donc été décidé d'encastrer la boîte d'observation dans la banquette afin de limiter son impact hydraulique (cf. Figure IV-13). La Figure IV-14 donne une vue des différents éléments placés dans le collecteur pour réaliser des photos des évolutions de l'interface eau-sédiment.





Une vitre spéciale a été installée comme face avant de la boîte afin de limiter les opérations de nettoyage. Cette vitre a été fournie par Saint-Gobain Glass : elle est recouverte d'un film photocatalytique « auto-nettoyant » qui réagit aux UV.

1.2.2. Prise d'image

Nous avons utilisé le même principe que dans la boîte d'observation développée par Ahyerre (1999) : un miroir est posé au fond de la boîte, à 45° par rapport à l'horizontale, permettant d'observer l'interface eau-sédiment depuis le haut de la boîte. La hauteur du miroir est réglable avec des cales.

Des clichés de l'interface eau - sédiment sont pris avec un appareil numérique placé dans le panier amovible, dans l'axe du miroir ; la capacité de stockage de l'appareil varie entre 200 et 400 photos. Le déclenchement se fait automatiquement après réglage sur l'appareil de l'intervalle de la série.

Les photographies obtenues couvrent une surface d'environ 30 cm de haut sur 40 cm de large. Sur les images, l'eau usée s'écoule toujours de la gauche vers la droite. Une réglette a également été placée à l'intérieur de la boîte, contre la face vitrée, pour servir de repère et permettre de quantifier les évolutions de l'interface.

1.2.3. Eclairage

Afin d'éclairer la scène et pour éviter les reflets du flash de l'appareil photo sur le miroir et la vitre, nous avons choisi un éclairage faible indépendant constitué de 4 tubes fluorescents 8 Watts. Ces lampes sont placées à l'intérieur de la boîte, sur les côtés.

L'allumage des lampes est commandé par un programmateur qui synchronise l'éclairage avec la prise de photos. Les néons s'allument pendant 70 secondes et la photo est prise 60 secondes après l'allumage. Ceci permet d'économiser l'énergie d'alimentation du système et de limiter le développement de micro-organismes sur la vitre.

1.2.4. Alimentation électrique du système

Le système (programmateur, lampes) est alimenté par deux batteries 12V, de capacité 18Ah, et qui sont placées à l'intérieur de la boîte. La programmation du système permet une autonomie de 72 heures.

1.2.5. Mesure du débit

Afin de suivre simultanément les variations hydrauliques dans le collecteur, un débitmètre NIVUS a été installé à 1 m à l'aval de la boîte d'observation (cf. Figure IV-14). Il a été disposé sur la paroi latérale de la cunette, au-dessus du niveau de la couche organique (à 15 cm du fond). Il mesure la vitesse de l'écoulement par effet Doppler et la hauteur d'eau avec un capteur de pression, durant 20 secondes, toutes les 3 minutes.

1.2.6. Mesure de la pluviométrie

Un pluviomètre a été placé à 150 m du site d'observation sur le toit de l'école Sainte-Geneviève (rue du Foin). Il permet de définir les périodes de temps sec et de temps de pluie qui affectent le collecteur étudié.



Figure IV-14 – Site expérimental du collecteur Saint-Gilles

1.3. Site de mesure

1.3.1. Choix du site

Nous avons utilisé la cartographie des dépôts qui a été effectuée dans les trois principaux collecteurs du bassin versant entre décembre 2000 et février 2001 avec l'endoscope pour déterminer les zones de formation de la couche organique à l'interface eau-sédiment.

A partir de ces données, il a été décidé d'installer la boîte d'observation à l'amont du collecteur Saint-Gilles (entre les points pk550 et pk775) sur un site où la couche organique est présente en quantité importante. Les deux autres collecteurs ont été écartés car ils ne permettaient pas de travailler dans de bonnes conditions sur le site (présence de flottants, accès difficile).

Une visite du tronçon a été réalisée en décembre 2001 (cf. Figure IV-15) afin de vérifier l'état du collecteur Saint-Gilles. La boîte d'observation a été mise en place au point pk652 en février 2002. Le point pk652 est situé dans une zone où la couche organique a une hauteur moyenne de 15 cm. La section d'écoulement mesure 60 cm de profondeur et 60 cm de largeur et il n'y a pas d'arrivée latérale sur les 10 m à l'amont du point pk652. Par temps sec, la vitesse d'écoulement moyenne vaut 0,1 m/s et la hauteur d'eau moyenne vaut 19 cm.

Globalement, l'épaisseur de couche organique à l'amont du collecteur varie entre 5cm et 12,5cm et l'épaisseur sur le site varie entre 9cm et 12,5cm. Nous avons donc choisi un site particulièrement chargé en couche organique.



Figure IV-15 – Etat du collecteur étudié en décembre 2001

1.3.2. Débit de temps sec sur le site d'observation

A partir des données recueillies sur 10 journées de temps sec (du 03/03/02 au 12/03/02), nous avons tracé l'évolution des débits pour une journée moyenne de temps sec au point PK651 du collecteur Saint-Gilles (cf. Figure IV-16).



Figure IV-16 – Evolution des débits pour une journée moyenne de temps sec

Sur le tronçon étudié on observe des variations de débit classiques avec :

• un pic matinal qui atteint un maximum entre 9h00 et $12h00 a 50m^3/h$;

• un creux nocturne qui atteint son minimum entre 3h00 et 6h00 du matin à $22 \text{ m}^3/\text{h}$.

Le débit moyen sur la journée vaut $Q_{moyen} = 35 \text{ m}^3/\text{h}$, et le débit est doublé entre le creux nocturne et le pic matinal.

1.3.3. Caractéristiques des pluies affectant le site

Le Tableau IV-4 présente les données relatives aux pluies qui ont affecté le bassin versant du Marais durant la période où les expériences ont été menées (H_{total} : hauteur totale précipitée, I_{max} , I_{moyen} : intensité maximale et moyenne de la pluie. Elles sont mises en parallèle avec les débits maximum relevés sur Saint-Gilles au point pk651.

Début	Durée	H _{total}	I _{max}	I _{moyen}	Débit maximum relevé
de la pluie	(hh :mm)	(mm)	(mm/h)	(mm/h)	dans St-Gilles (m ³ /h)
02/03/02 04 :57	02 :58	2.8	2.2	0.9	96
02/03/02 09 :47	01 :38	1.2	1.0	0.7	93
14/03/02 21:54	01 :18	6.2	31.3	4.7	146
15/03/02 13:54	00 :13	2.0	40.0	9.0	129
18/03/02 03 :32	01 :47	1.2	0.8	0.7	44
18/03/02 11:44	08 :32	14.8	14.7	1.7	150
18/03/02 23:51	13 :04	19.2	18.5	1.5	151
21/03/02 14:36	03 :42	4.8	13.3	1.3	100
18/04/02 19:19	00:32	1	2.1	1.9	52
18/04/02 21:37	00 :17	1	7.5	3.5	72
26/04/02 13:33	01 :50	2.4	4.1	1.3	88
26/04/02 20:03	00:32	1	8.0	1.9	56
30/04/02 23:19	00 :40	1	3.8	1.5	52
02/05/02 07:03	01:05	1.8	18.9	1.6	126
11/05/02 20:28	00:28	1.0	2.7	2.1	80
13/05/02 20:53	00:20	3	55.4	9.1	120
14/05/02 12:10	02:12	6.6	32.7	3.0	135
17/05/02 22:04	03:11	4.8	4.2	1.5	119
21/05/02 03:43	01:10	1.6	34.3	1.4	71
22/05/02 01:59	05:06	13	24.0	2.6	157

Tableau IV-4 – Caractéristiques des pluies entre le 1^{er} mars 2002 et le 24 mai 2002 On constate une absence de pluie durant plusieurs semaines entre le 21/03/02 et le 18/04/02. Les intensités maximales des pluies s'étalent sur une large gamme (de 0.8 mm/h à 55.4 mm/h) et le débit maximum observé dans le collecteur Saint-Gilles est de 157 m³/h.

2. Expériences réalisées

Deux types d'expériences ont été menés afin d'étudier les évolutions de la couche organique durant des périodes de temps sec, sur plusieurs journées, et durant des augmentations artificielles du débit. Les observations sur plusieurs journées ont par ailleurs permis d'observer les évolutions de la couche organique durant une pluie, le 14/05/02.

2.1. Suivi en continu sur plusieurs journées

Pour étudier l'impact du cycle journalier de débit sur la couche organique, des observations ont été réalisées sur plusieurs jours avec le dispositif d'observation fixe tel qu'il est décrit cidessus. Le système de prises de vues a été programmé pour prendre des clichés toutes les 15 minutes, assurant ainsi une autonomie du système de 3 jours. Les expériences ont été réalisées entre mars 2002 et mai 2002.

De plus, un tronçon d'environ une cinquantaine de mètres (pk640 à pk690) a été suivi quatre fois (26/03/02, 03/04/02, 10/04/02, 24/05/02), tous les 5 mètres, avec l'endoscope afin d'observer l'évolution des hauteurs de couche organique sur le tronçon.

2.2. Suivi en continu durant des augmentations de débit

Pour étudier les phénomènes d'érosion de la couche organique, des augmentations de débit ont été créées, grâce à l'injection d'eau potable dans le collecteur Saint-Gilles.

La méthode de l'injection a été choisie car elle permet de s'affranchir des conditions météorologiques : la date des expériences peut donc être choisie à l'avance. Cette méthode offre également la possibilité de réaliser des schémas d'injection « simples » qui facilitent l'interprétation des résultats et permettent de répondre à des questions précises telles que : existe-t-il un seuil d'érosion pour la couche organique ? la nature des particules érodées évolue-t-elle avec le débit ?

Enfin, ce type d'expériences assure la sécurité des personnes devant intervenir dans le collecteur.

2.2.1. Méthode d'injection

Pour créer une augmentation de débit dans le collecteur, de l'eau potable a été injectée à partir d'un tampon d'accès. Le système d'injection utilisé a été développé par Ahyerre *et al.* (2001b) : l'injection d'eau potable se fait grâce à un coude en PVC, branché sur une bouche incendie, et dont le flot est dirigé contre les parois du tampon d'accès au collecteur pour dissiper l'énergie du front d'eau. On limite ainsi l'érosion locale due à l'impact de l'eau injectée.

2.2.2. Dispositif de mesures

Le dispositif de mesure présenté sur la Figure IV-17 permet de faire le suivi photographique des évolutions de la couche organique devant la boîte d'observation en simultané avec le suivi des paramètres hydrauliques et des paramètres de qualité de l'eau :

- les photos sont prises avec un pas de temps court (1 minute) durant quelques heures ;
- le débitmètre permet de suivre les variations de la hauteur d'eau, de la vitesse et du débit durant toute la durée de l'expérience, avec un pas de temps de 3 minutes ;
- des prélèvements d'eau usée sont effectués à 3m à l'aval de la boîte d'observation pour suivre l'évolution des MES. Les prélèvements « encadrent » les augmentations de débit : ils commencent un quart d'heure avant l'ouverture de la vanne d'injection et se terminent entre 30 minutes et une heure après la fermeture de la vanne.

Les prélèvements d'eau ont été effectués avec un préleveur automatique programmable Buhler PBMOS. Il a été programmé de façon à prélever un échantillon de 100 ml toutes les 2 minutes et à regrouper les échantillons trois par trois dans des flacons en PVC si bien que les échantillons dont nous disposons sont des échantillons moyens sur 6 minutes.

Enfin, un suivi des hauteurs de couche organique a été réalisé avec l'endoscope, tous les 5 m, avant et après les expériences, sur le tronçon affecté par l'augmentation de débit. Ce suivi permet d'étudier si l'érosion de la couche organique se fait de manière uniforme le long du tronçon.





2.2.3. Schémas d'injection réalisés

Une expérience test pour l'injection a été réalisée sur le tronçon le 26/03/02. Le débit maximal atteint est de $123 \text{ m}^3/\text{h}$. Ce test n'a donné lieu à aucune mesure.

La Figure IV-18 permet de visualiser les schémas d'injection réalisés. La première expérience a eu lieu le 03/04/02, sans injection d'eau. Elle sert de référence pour tous les paramètres mesurés durant les deux expériences avec injection d'eau :

- le 10/04/02, augmentation progressive du débit durant 1h30 (de 44 m³/h à 127 m³/h), entre 11h15 et 12h40. Cette expérience doit permettre d'étudier le comportement de la couche organique face à une sollicitation progressive.
- le 24/05/02, augmentation brusque du débit (de 38 m³/h à 103 m³/h) suivie d'un palier à 103 m³/h durant 40 minutes, entre 11h35 et 12h15. Cette expérience doit permettre d'étudier le comportement de la couche organique face à une sollicitation prolongée.

03/04/02	10/04/02	24/05/02
	_/ L	

Figure IV-18 – Schéma des expériences réalisées

Les débits atteints dans le collecteur Saint-Gilles durant les injections ont été comparés aux débits mesurés durant des pluies réelles (cf. Tableau IV-4) afin d'étudier la représentativité des débits injectés. On constate que les débits atteints durant les injections sont du même ordre de grandeur que les débits mesurés durant les pluies du printemps 2002, et qu'ils correspondent à des pluies d'intensité maximale $I_{max} = 14$ mm/h pour le 10/04/02 et $I_{max} = 11$ mm/h pour le 24/05/02. Pour cela nous avons considéré que le débit maximal du à la pluie (c'est à dire, le débit maximal mesuré auquel nous avons retranché le débit de temps sec) est lié à l'intensité maximale par une relation linéaire (cf. Figure IV-19). Nous nous sommes basés sur les 15 pluies dont l'intensité maximale était inférieure à 30 mm/h.



Figure IV-19 – Relation liant le débit maximal du à la pluie (Qmax) à l'intensité maximale de la pluie (Imax)
2.2.4. Mesure des paramètres de qualité

A partir des échantillons prélevés, nous avons évalué les flux de MES érodées au cours des expériences ainsi que les teneurs en MV et en DCO des particules érodées :

- les concentrations en MES et en MVS ont été mesurées sur tous les échantillons moyens.
- à partir des données de débit et des concentrations en MES, les flux de matières érodées et transportées en suspension ont été déterminés à l'aide des relations suivantes :

 $\phi_{\acute{e}rod\acute{e}}(t) = \phi_{transit}(t) - \phi_0 \qquad \phi_{transit}(t) = C(t).Q(t) \qquad \phi_0(t) = C_0(t).Q_0(t)$ avec :

 $\phi_{\acute{e}rod\acute{e}}(t)$: flux de particules érodées (g/s)

 $\phi_{transit}(t)$: flux de particules transitant à l'aval du tronçon pendant l'expérience (g/s)

 $\phi_0(t)$: flux de particules des eaux de temps sec du 03/04/02 (g/s)

- C(t): concentration en polluants pendant l'expérience (g/m³)
- $C_0(t)$: concentration en polluants des eaux de temps sec du 03/04/02 (g/m³)

Q(t): débit pendant l'expérience (m³/s)

 $Q_0(t)$: débit de temps sec du 03/04/02 (m³/s)

Les flux de MES sont calculés sur des intervalles de temps de 6 minutes. On peut ainsi déduire les masses de couche organique qui ont été érodées durant les expériences d'injection. Il faut noter que les expériences ont été menées en dehors des périodes de lavage des rues pour éviter que des particules érodées à la surface des rues ne pénètrent dans le réseau et faussent l'estimation de la masse de couche organique érodée durant les augmentations de débit.

les charges particulaires en DCO permettent de comparer la nature des particules érodées durant les expériences d'injection aux particules de la couche organique. Les mesures de DCO ont été réalisées sur des échantillons moyens constitués à partir des échantillons sur 6 minutes (de 2 à 5 échantillons), regroupés suivant la couleur des échantillons (au moment de l'érosion, les échantillons sont très sombres) et l'heure de prélèvement.

2.3. Données recueillies

Un chronogramme (cf. Figure IV-20) présente les différentes expériences réalisées entre mars 2002 et mai 2002. Nous avons réalisé:

 6 séquences de photographies, à pas de temps 15 minutes, couvrant des périodes de 2 à 3 jours (ces séquences concernent essentiellement des périodes de temps sec et une pluie);

- 1 séquence de photographie, à pas de temps 1 minute, de 09h31 à 13h13, durant l'augmentation de débit du 10/04/02;
- 1 séquence de photographie, à pas de temps 1 minute, de 10h13 à 11h50 et de 13h22 à 13h30 soit avant, durant le début et après l'augmentation de débit du 24/05/02 ;
- 7 relevés de hauteurs de dépôts et de couche organique sur le tronçon amont du collecteur avec l'endoscope (1 relevé les 26/06/02 et 03/04/02, 2 relevés le 10/04/02 et 3 relevés le 24/05/02).



Figure IV-20 – Chronologie des différentes expériences réalisées

3. Résultats

3.1. Description de la couche organique

3.1.1. Devant la boîte

On trouve dans la couche organique de grosses particules (de 5 mm à 20 mm) telles que des matières fécales (en brun-orangé, avec un aspect spongieux) et des papiers (en gris, avec un aspect fibreux). Ces grosses particules sont noyées dans une matrice composée de particules plus fines (de taille inférieure à 2mm) et sombres.

On observe également la présence de « poches » remplies d'eau. Les parois de ces cavités sont formées grâce à des amas de matières fibreuses qui donnent de la cohésion à la couche organique. Les parois présentent parfois des fissurations.



Figure IV-21 – Détails de la couche organique

Les photographies ont mis en évidence la présence de vers (d'une longueur comprise entre 2 cm et 5 cm, avec un diamètre d'environ 1 mm) qui se déplacent à l'intérieur de la couche organique.

Ces organismes sont le signe d'une activité biologique à l'intérieur de la couche organique. Cette activité a sans doute un impact sur l'évolution des paramètres physico-chimiques de la matière organique contenue dans la couche. Enfin, si on se réfère aux observations réalisées sur des boues d'estuaires durant le programme COSINUS (cf. Chapitre 2.1.1.), on peut supposer que les vers ont un rôle à jouer dans les processus de consolidation de la couche organique.

3.1.2. Sur le tronçon

Sur le tronçon étudié, à l'amont de Saint-Gilles, la couche organique comble les dépressions du dépôt grossier (cf. Figure IV-22). Les hauteurs de couche organique diminuent vers l'aval. Les « trous » visibles dans la couche sont dus à des entrées latérales d'égouts élémentaires. La Figure IV-22 permet de visualiser l'évolution des dépôts entre le 07/12/01 et le 26/03/02 : on constate que le dépôt grossier et la couche organique se sont décalés de 5m vers l'aval. La présence de flottants le 26/03/02 entre les points pk680 et pk720 perturbe la mesure des hauteurs de couche organique juste à l'amont des flottants. En effet, on relève une hauteur de couche relativement faible ce qui est probablement lié au passage de l'écoulement sous les flottants.



Figure IV-22 – Evolution des dépôts et de la couche organique entre le 07/12/01 et le 26/03/02.

3.2. Evolutions de la couche par temps sec

3.2.1. Evolutions devant la boîte

Les six séries de photos prises sur plusieurs journées ont été analysées. Sur quelques journées, on constate que la couche tend vers une hauteur stable.

Deux cas de figure sont apparus suivant les conditions initiales devant la boîte :

- Condition 1 : hauteur de couche régulière devant la boîte

Pas de variations notables dans la journée. Un état d'équilibre est atteint.

- Condition 2 : creux devant la boîte

Remplissage du creux par couches successives en quelques heures (cf. Figure IV-23). Une fois le creux rempli, la couche s'accumule par couche successives jusqu'à une hauteur d'équilibre. Les couches récentes sont claires, puis elles foncent jusqu'à avoir la même teinte que le reste du stock.

Cependant des phénomènes avec une courte durée de vie apparaissent dans la couche organique. Nous avons relevé trois cas significatifs :

- Cas 1 : perturbation liée au passage d'un gros élément

On observe le passage de gros éléments à l'interface eau-sédiment. Ces éléments (papiers journaux, sacs plastiques,...) sont transportés à la surface de la couche organique et

déstructurent la couche sur une épaisseur variant de 0,5 cm à 4 cm lors de leur passage, créant des creux qui sont rapidement comblés (quelques heures).

- Cas 2 : expansion et tassements

Durant la journée, on observe des variations dans les hauteurs de couche (des phénomènes d'expansion et de tassement) qui ne sont pas liées à l'apport ou à l'érosion de matière. Ces variations n'ont pas pu être reliées aux paramètres hydrauliques mesurés.

- Cas 3 : arrachement

La Figure IV-23 présente une séquence de photos représentant un phénomène observé durant une période de temps sec (dans la nuit du 2 au 3 Mars 2002) : on observe un phénomène d'expansion de la couche durant 1 heure (entre 01h15 et 02h15), suivi de l'arrachement en 30 minutes d'un bloc de couche d'environ 10 cm de long (entre 02h15 et 02h45). Enfin, le « creux » laissé par le bloc arraché est rapidement comblé (environ 2 heures) par un nouvel apport de matières (entre 03h00 et 04h15). Aucune variation notable de débit n'a été relevée durant cet épisode. Ce phénomène a été observé sur deux autres séries de photos avec moins d'amplitude (les creux mesuraient seulement 2 à 3 cm de profondeur) et toujours sans modification apparente des paramètres hydrauliques. Il semble donc que ce soit un phénomène aléatoire ou lié à une évolution biologique.



Figure IV-23 – Evolution par temps sec : remplissage d'un « trou »



Figure IV-24 – Evolution de la couche organique par temps sec : arrachement d'un « bloc » de couche organique

3.2.2. Evolutions sur le tronçon

Trois suivis à l'endoscope ont été réalisés les 27/03/02, 03/04/02 et 10/04/02 sur un tronçon de 40m. Le premier suivi a été réalisé une heure après l'expérience « test » d'injection et la période étudiée n'a pas comporté d'épisode pluvieux. On observe qu'il n'y a pas eu d'évolution notable des hauteurs de couche entre les trois dates.

Un suivi a également été réalisé avant l'expérience d'injection du 24/05/02. Malgré les pluies relevées au mois de mai 2002 (cf. Tableau IV-4), les hauteurs de couche organique sont sensiblement les mêmes qu'en avril 2002, excepté un « trou » de 6 cm au point pk670. Il semble donc que, sur le tronçon de collecteur étudié, la couche organique ait atteint une hauteur d'équilibre stable dans le temps et que ce niveau se maintienne malgré les épisodes pluvieux.



Figure IV-25 – Evolution de la couche organique sur 15 jours de temps sec

3.2.3. Conclusion

La couche organique observée possède un état d'équilibre qui se caractérise par une hauteur de couche stable. Localement, elle subit des perturbations liées à des événements aléatoires, comme le transport de gros éléments dans le collecteur, qui sont suivis par une « accumulation » : les trous formés dans la couche organique par l'expérimentateur ou par le passage de gros éléments près du fond (de 5 cm à 10 cm d'épaisseur) sont comblés rapidement, en quelques heures. En dehors de ces phénomènes locaux, aucun phénomène d'accumulation notable n'a été observé, durant les périodes de temps sec, sur le tronçon étudié.

3.3. Evolutions de la couche durant des augmentations de débit

3.3.1. Injections d'eau

3.3.1.1. Estimation des débits, des flux de particules et des teneurs particulaires

La Figure IV-26 présente l'évolution des débits et des flux de MES transitées au cours des deux expériences d'injections.



Figure IV-26 – Expériences d'injection du 10/04/02 et du 24/05/02

Durant l'injection du 10/04/02, on constate une augmentation du flux de MES (de 4 g/s à 8 g/s) au début de l'injection, à 11h20. Malgré une augmentation régulière du débit de 50 m3/h à 80 m³/h, le flux reste stable. L'augmentation suivante (de 8 g/s à 15 g/s) se produit à 12h15 lorsque le débit dépasse 85 m³/h. Enfin, une troisième augmentation (de 15 g/s à 24 g/s) à lieu à 12h25, lorsque le débit dépasse 110 m³/h. La masse de particules érodées entre 11h20 et 12h15 est équivalente à la masse érodée entre 12h15 et 12h45. Cette expérience met en évidence la présence de plusieurs seuils d'érosion pour la couche organique (trois seuils ont été observés).

Durant l'expérience du 24/05/02 on constate que le flux de MES connaît son maximum (90 g/s) au début du palier de débit puis il diminue. Le flux de MES durant cette expérience atteint des valeurs maximales très supérieures au flux de MES relevé durant l'expérience du 10/04/02 : les particules sont érodées en quantité plus importante, très rapidement. On peut avancer deux hypothèses pour expliquer cette différence :

- le 10/04/02, la couche organique a été érodée progressivement et les quantités disponibles en fin d'expérience (12h25) sont réduites alors que le stock disponible était « intact » au début de l'expérience du 24/05/02 (11h40);
- la couche organique érodée le 24/05/02 est récente (pluie précédente : 22/05/02), elle n'a pas eu le temps de se consolider et elle est donc remise en suspension plus facilement que la couche organique du 10/04/02 qui s'est construite durant 10 journées de temps sec.

	MVS/MES (%)	DCO/MES (g/g)
Expérience du 26/11/98 et 02/01/98	70 à 75	1.2 à 1.3
Ahyerre <i>et al.</i> (2001)		
Couche organique Vieille du Temple	69	1.2
Ahyerre <i>et al.</i> (2001)		
Expérience du 10/04/02 et 24/05/02	75 à 78	1.6 à 1.8
Couche organique Saint-Gilles	77	1.5

Tableau IV-5 – Nature des particules érodées et des particules de la couche organique Les teneurs particulaires en MVS et DCO sont présentées dans le Tableau IV-5. On constate que les particules érodées au cours des augmentations de débit ont des teneurs en MVS et en DCO qui correspondent aux teneurs trouvées dans la couche organique prélevée sur Saint-Gilles. Ces résultats sont cohérents avec ce qui avait été observé par Ahyerre *et al.* (2001b) sur le collecteur Vieille du Temple. On peut en déduire que les particules érodées sont issues de la couche organique présente sur le tronçon.

La masse totale de particules érodées, et transitant en suspension, est de 30 kg durant l'expérience du 10/04/02 et elle est de 45 kg pour l'expérience du 24/05/02. Pour l'expérience du 10/04/02, la durée de temps sec ayant précédé l'expérience est de 10 jours et pour l'expérience du 24/05/02, elle est de 2 jours. La durée de temps sec ne semble pas avoir donné lieu à une augmentation de la masse de couche organique disponible puisqu'on trouve moins de particules érodées durant l'expérience où la durée de temps sec est la plus importante. Cependant, les schémas d'injection sont distincts : le 10/04/02, le débit maximal atteint (127 m3/h) est maintenu durant 10 minutes alors que, le 24/05/02, il est maintenu durant 40 minutes à 103 m3/h. Il n'est donc pas possible de conclure à partir d'une comparaison directe.

3.3.1.2. Evolutions devant la boîte

Durant l'expérience du 10/04/02, devant la boîte, on observe le passage de nombreuses matières en charriage. Ce phénomène débute 5 minutes après l'augmentation de débit. La couche organique n'évolue pas devant la boîte durant l'injection. Après l'arrêt de l'injection, le débit décroît rapidement, et on observe une accumulation rapide de matières au-dessus de la couche organique (gain de 3 cm d'épaisseur en 7 minutes), devant la boîte.

Pour l'expérience du 24/05/02 (cf. Figure IV-27), un creux d'environ 5 cm de profondeur et 10 cm de largeur a été fait devant la boîte d'observation avant le début de l'injection à 10h15. On constate que le « trou » est comblé en quelques minutes (entre 11h39 et 11h42), au moment du pic de MES, par des particules qui se déplacent près du fond. L'analyse des

photos montre également une égalisation de l'épaisseur de couche organique entre 11h50 et 13h22.

Ces expériences montrent que des particules sont mises en charriage par les augmentations de débit, qu'elles migrent le long du collecteur et qu'elles s'arrêtent dans des zones favorables comme des « trous » présents dans la couche organique.



Figure IV-27 - Expérience d'injection du 24/05/02 (trait plein : interface eau usée – couche organique; trait pointillé : interface de l'image précédente)

3.3.1.3. Evolutions sur le tronçon

La masse volumique de la couche organique a été déterminée grâce à plusieurs prélèvements réalisés sur le collecteur Saint-Gilles (cf. Partie 2.Chapitre 3.). A partir de ces données, nous avons évalué le volume de couche organique érodé durant les expériences du 10/04/02 et du 24/05/02 ainsi que l'épaisseur de couche organique érodée, en considérant une érosion uniforme sur le tronçon (cf. Tableau IV-6).

On constate qu'avec une érosion « répartie », l'épaisseur de couche érodée est de l'ordre de 5 mm. Ces variations d'épaisseur ne sont pas discernables avec un suivi à l'endoscope.

	10/04/02	24/05/02
Masse de particules érodées, transitant en suspension	30 kg	45 kg
Volume « érodé » de couche organique sur le tronçon	200 dm3	300 dm3
Epaisseur « érodée »de couche organique sur le tronçon	3 mm	5 mm

Tableau IV-6 – Estimations des masses et volumes érodés sur le tronçon complet (100m) Lors de l'expérience du 10/04/02 (cf. Figure IV-28) nous avons réalisé un profil endoscope sur les 50 m à l'amont de la boîte avant et après l'expérience d'injection. On observe peu de différences entre les deux suivis : il semble qu'il y ait eu déplacement d'une partie de la couche organique vers l'aval. Le bilan sur les variations des hauteurs de couche, sur le tronçon, est globalement nul : on peut estimer que les volumes de couche organique n'ont pas évolué mais ont été « redistribués » sur les 50 m suivis.

Pour l'expérience du 24/05/02 (cf. Figure IV-28), nous avons réalisé un profil endoscope sur le tronçon à l'amont de la boîte avant, après (entre 12h15 et 12h30) et 1 heure après l'injection (entre 13h10 et 13h25). Immédiatement après l'injection, on observe que certaines zones se sont déplacées ou « étalées » vers l'aval du tronçon et que le « trou » présent dans la couche organique avant l'expérience (pk670) a été en partie comblé durant l'expérience. Le second relevé après l'expérience révèle que la couche a encore subi des variations, mais à une échelle moindre montrant qu'il subsiste du charriage après l'arrêt de l'injection.



Figure IV-28 – Evolution des hauteurs de couche organique, durant les expériences d'injection du 10/04/02 et du 25/04/02

On constate que l'érosion de la couche organique ne se produit pas de manière uniforme à la surface du tronçon concerné par l'augmentation de débit. A partir de ces relevés, on estime que 420 dm3 de couche organique ont disparu sur les 50 mètres étudiés, le 24/05/02. Il semble qu'on ait érodé autant de couche organique sur 50 mètres que sur la longueur totale du

tronçon. Cet écart avec les valeurs estimées à partir des flux de MES sur 100 mètres met en évidence le rôle du charriage au cours des augmentations de débit : en effet, les particules charriées ne sont pas prises en compte par le système de prélèvement mis en place dans les expériences.

3.3.2. Durant une vraie pluie (dispositif de suivi de temps sec en place)

Le dispositif d'observation sur plusieurs journées a permis de suivre les évolutions de la couche organique durant une vraie pluie le 14/05/02 avec des clichés toutes les 15 minutes. Le débit atteint une valeur maximale de 135 m³/h à 13h15 et à 14h15 dans le collecteur.





Durant la phase d'augmentation du débit (12h00 à 14h00), la couche organique devant la boîte est légèrement déplacée vers l'aval et des fissures apparaissent dans la couche organique. Entre 14h15 et 14h30, on observe l'arrachement d'un morceau de couche de 1,5 cm de haut sur 10 cm de long dans la partie amont de la zone photographiée et la déposition d'une épaisseur de couche de 1 cm de haut sur 8 cm de long dans la partie aval de la zone photographiée. On peut supposer qu'il s'agit du même « morceau » de couche qui a été déplacé par l'écoulement.

Durant les heures qui suivent (entre 14h30 et 21h00), la couche reste stable et on n'observe pas de phénomène d'accumulation devant la boîte.

3.3.3. Conclusion

Les augmentations de débit sur le tronçon étudié provoquent une augmentation des particules en suspension : il y a donc érosion sur le tronçon étudié. L'étude des caractéristiques des particules en suspension montre que les particules érodées sont issues de la couche organique. Les observations réalisées révèlent que l'érosion de la couche organique n'est pas uniformément répartie le long du tronçon : il peut y avoir érosion en un point et accumulation en un autre point. On assiste donc à des phénomènes locaux, probablement liés à des singularités hydrauliques ou à des particularités physiques locales de la couche organique (ex : présence de poche,...). De plus, on constate un déplacement vers l'aval de la couche organique durant les augmentations de débit montrant que le transport par charriage joue un rôle important dans le processus d'érosion de la couche organique.

4. Discussion : la modélisation de la couche organique

Les observations réalisées permettent de tirer un certain nombre de conclusions et de remarques sur la couche organique et son comportement par temps sec et durant des augmentations de débit.

4.1. Caractérisation de la couche organique

Les modèles considèrent généralement les sédiments comme étant composé de matériaux avec une composition homogène et une épaisseur constante. Les observations que nous avons réalisées montrent que ces hypothèses doivent être utilisées avec précautions.

4.1.1. Composition de la couche organique

Les observations et les prélèvements ont montré que la couche organique est un ensemble de plusieurs éléments (matières organiques, matières minérales, papiers,...). Cette nature composite a sans doute une influence sur le comportement de la couche car elle présente des éléments qui ont des caractéristiques physiques différentes d'un point à un autre. Les observations à l'endoscope n'ont pas permis de distinguer une évolution dans la nature de la couche organique le long des tronçons étudiés.

De plus, des épisodes de renouvellement de la couche organique ont été observés : des déstructurations de la couche (arrachements de blocs de couche, passage de gros éléments près du fond...) conduisant à la formation de « trous » dans la couche sont suivis d'un remplissage rapide par de la matière nouvelle assurant ainsi un renouvellement partiel de la couche organique. Ces phénomènes n'ont pas pu être reliés à des paramètres hydrauliques, ils sont susceptibles d'être de nature aléatoire.

Enfin, la présence d'une activité biologique (vers) au sein de la couche organique a été relevée. Ils tiennent probablement un rôle dans les phénomènes de consolidation de la couche organique à cause des « tunnels » qu'ils creusent à l'intérieur de celle-ci. Le brunissement de la couche organique observé au cours des expériences peut être imputé en partie à des phénomènes de dégradations biologiques.

4.1.2. Variations verticales, dans l'épaisseur de la couche organique

Plusieurs auteurs ont développé des hypothèses sur une structure stratifiée de la couche organique :

- Ahyerre (1999) a constaté que la teneur en MVS des particules érodées diminuait au cours du temps durant les expériences d'érosion. Il en a déduit que la couche organique était constituée de plusieurs couches de plus en plus minérales avec la profondeur.
- Skipworth *et al.* (1999) ont mis en évidence l'existence d'une couche faiblement résistante située dans la partie supérieure du dépôt et une augmentation de la résistance avec la profondeur du dépôt : la couche superficielle s'érode à partir d'un taux de cisaillement inférieur au taux de cisaillement critique nécessaire pour éroder le cœur du dépôt (cf. Equation 4-4).

Les observations faites durant les expériences montrent que les épisodes de remplissage de trous s'effectuent souvent par couches successives. De plus, nous avons observé plusieurs seuils d'érosion pour la couche organique durant les expériences d'injection d'eau.

Ces observations permettent d'accréditer la théorie développée par Ahyerre (1999) et Skipworth *et al.* (1999). Enfin, les phénomènes aléatoires qui assurent une régénération partielle des matières constituant la couche organique permettent d'appuyer l'hypothèse d'une strate superficielle ayant un comportement différent du corps de la couche organique.

4.1.3. Variations longitudinales de l'épaisseur de la couche organique

Les suivis à l'endoscope du tronçon de collecteur ont montré que l'épaisseur de la couche organique varie d'un point à un autre. La boîte d'observation a permis de mettre en évidence les épisodes de remplissage de « trous ». Les différentes épaisseurs de couche observées correspondent à des formes dans le dépôt grossier : les grandes épaisseurs de couche (15 cm à 18 cm) correspondent à des « creux » et les zones avec de faibles épaisseurs de couche (2 cm à 5 cm) correspondent à des « dunes ».

De plus, nous avons constaté que les arrivées latérales sur le collecteur Saint-Gilles coïncidaient avec de faibles épaisseurs de couche organique ce qui peut être imputé aux perturbations hydrauliques liées au débit incident.

4.2. Dynamique de la couche organique par temps sec

4.2.1. L'accumulation est-elle une fonction de la durée de temps sec ?

Les bilans effectués à l'échelle d'un bassin versant à Paris par Ahyerre (1999) ainsi qu'à Dundee par Arthur (1996) ont montré que la quantité de MES érodées par temps de pluie est une fonction de la durée de temps sec précédente. De plus, Ahyerre (1999) a mis en évidence l'accumulation linéaire de la couche organique avec un taux de croissance de 215 g/m²/j.

Les expériences menées sur le collecteur Saint-Gilles ont été réalisées avec une couche constituée dès le début des observations. Par temps sec, des phénomènes rapides d'accumulation ont été observés jusqu'à un état d'équilibre de la hauteur de couche organique : ces épisodes concernent des « trous » dans la couche organique.

On note que la croissance de la couche paraît plus rapide avec les observations à l'endoscope (expérience du 24/05/02) ou avec la boîte d'observation que le taux de croissance évalué par Ahyerre (1999). Cet écart peut s'expliquer par les conditions initiales des observations réalisées : sur Vieille du Temple les expériences visaient à étudier la constitution de la couche organique tandis que sur Saint-Gilles les expériences ont permis d'étudier le comportement d'une couche déjà constituée. Ces deux cas concernent donc des échelles de temps et d'espace différents : ce sont donc deux études complémentaires qui ont été menées sur le bassin du Marais.

Néanmoins, on doit s'interroger sur la densité de la couche organique : nos observations se rapportent à des volumes de couche organique alors que les expériences de Ahyerre (1999) se rapportent à des masses de couche organique. Il est probable que la couche organique subisse des variations de densité en son sein et qu'à un même volume on puisse associer deux masses différentes. Les observations réalisées ne permettent donc pas de conclure définitivement sur le taux d'accumulation de la couche organique.

4.2.2. Y a-t-il corrélation entre phénomènes observés et hydraulique de temps sec ?

Les observations ont mis en évidence des phénomènes tels que l'arrachement de morceaux de couche suivis de remplissage rapide des trous formés. Ces phénomènes n'étaient pas corrélés avec les paramètres hydrauliques mesurés (vitesse, hauteur d'eau), il faut donc pencher pour un phénomène de type aléatoire lié aux inhomogénéités de la couche organique ou à des circonstances extérieures (passage de gros éléments sur le fond, présence de flottants,...). Le facteur déclenchant n'a pas pu être mis en évidence avec nos expériences.

Une hypothèse sur la structure de la couche organique, basée sur les observations de Tait *et al.* (2002) sur des sédiments issus de réseau d'assainissement ainsi que sur les observations de De Wit et Kanenbourg (1997) sur des sédiments d'estuaires, peut être émise pour expliquer ce type de phénomènes : si on suppose l'existence d'une strate « résistance et imperméable » en surface de la couche organique et structurée grâce à des biofilms ou à des fibres telles que les papiers, alors cette couche peut amener à des conditions de pressions différentes entre le cœur

de la couche et les eaux usées. Les différences de pression pourraient ainsi expliquer le développement de « poches » à l'intérieur de la couche et les fissurations qui conduisent à l'arrachement de morceaux de couche organique. Dans cette hypothèse, les sillages des vers peuvent créer des zones de faiblesse structurelle favorable à la fissuration.

Enfin, il n'a pas été observé de variation de hauteur de la couche organique durant le pic de débit de temps sec, devant la boîte. Différentes hypothèses peuvent être proposées pour expliquer l'augmentation de MES relevée par Gromaire (1998) à l'exutoire du bassin versant du Marais :

- le pic de débit correspond également au pic de production ainsi qu'à la période de lavage des rues ce qui conduit à une augmentation des MES. Cette hypothèse peut être réfutée au vue des résultats obtenus par Gromaire *et al.* (2000) ;
- le pic de débit donne lieu à une érosion de la couche organique mais de façon localisée ;
- des matières sont transportées en charriage et ne sont donc pas prises en compte par les bilans de masse qui sont effectués sur le transport en suspension. Durant le pic de débit, les matières transportées près du fond sont désagrégées et remises en suspension. Elles sont alors prises en compte au niveau des préleveurs.

4.3. Dynamique de la couche organique par temps de pluie

4.3.1. Y a-t-il corrélation entre phénomènes observés et hydraulique de temps de pluie ?

Les résultats des expériences d'injection de débit s'accordent avec les expériences réalisées par Ahyerre *et al.* (2001,b). On observe que le flux de MES est directement lié aux conditions hydrauliques régnant dans le collecteur : il y a un pic de MES au moment où il y a un pic de débit dans le tronçon étudié ou au moment de l'augmentation brusque du débit. Ces variations correspondent à des variations du taux de cisaillement dans le collecteur.

Ce type d'observation est cohérent avec la relation de Partheniades (cf. Equation 4-3), qui est généralement utilisée pour décrire les phénomènes d'érosion de sédiments cohésifs.

Cette relation suppose l'existence d'un seuil de cisaillement critique à partir duquel la couche organique s'érode. Nous avons pu vérifier au cours des expériences d'injection d'eau qu'il existait plusieurs seuils d'érosion pour la couche organique : ces différents seuils correspondent sans doute à différentes zones dans le tronçon de collecteur, zones qui correspondent elles-mêmes à des qualités différentes de couche organique (âge, composition, volume disponible,...) car nous avons pu constater que l'hypothèse d'une couche homogène et répartie uniformément sur un tronçon de collecteur n'était pas valide.

4.3.2. L'érosion se produit-elle de façon homogène ?

Les relevés à l'endoscope avant et après les expériences d'injection ont montré que l'érosion ne se produit pas de manière homogène sur toute la surface du dépôt mais de façon discontinue. Certaines zones semblent plus sensibles que d'autres à l'érosion. Elles correspondent sans doute à des zones de plus faible résistance au cisaillement. Plusieurs causes peuvent être avancées pour expliquer la présence de plusieurs zones : variations dans la composition de la couche, présence d'éléments faiblement résistants en surface de la couche (par exemple, des matières fécales) ou, encore, zones de forte turbulence hydraulique.

5. Conclusions et perspectives

Grâce à l'utilisation de la boîte d'observation et de l'endoscope durant des périodes de temps sec et durant des augmentations de débit (injections d'eau, pluie), dans le collecteur Saint-Gilles, il est apparu que :

- la couche organique est un matériau composé de particules de natures très différentes (eau, papiers, matières fécales, matériaux granulaires, ...) qui abrite une activité biologique (présence de vers)
- par temps sec, la couche organique tend vers une hauteur d'équilibre stable et elle remplit les creux du dépôt grossier. Elle subit des remaniements locaux, liés à des perturbations aléatoires, internes ou externes à la couche organique (passage de gros éléments près du fond,...).
- durant les augmentations de débit, la couche organique est en partie érodée et transportée en suspension mais elle est également transportée par charriage (cf. Figure IV-30).
- le pic de débit correspond aux pics d'érosion de la couche organique et les flux de MES révèlent la présence de plusieurs seuils d'érosion.



Figure IV-30 – Mode d'érosion combiné « charriage et remise en suspension » de la couche organique sur Saint-Gilles

L'étude menée soulève de nouvelles questions sur la nature et le comportement de la couche organique. Différentes expériences pourraient être réalisées pour y répondre :

- étudier le « vieillissement » de la couche organique en fonction du temps grâce à des prélèvements à différents âges ou à des carottages cryogéniques, ce qui permettrait une analyse des variations de la composition, de la densité et de la teneur en eau ;
- étudier les variations de qualité en fonction de la hauteur de couche afin de déterminer s'il existe une réelle stratification à l'intérieur de la couche organique ;
- étudier la reconstitution de la couche organique dans un collecteur après le curage d'un tronçon entier afin de mener une étude sur le taux d'accumulation de la couche organique à grande échelle ;
- des capteurs de pression sur le fond du collecteur ou contre une paroi latérale afin d'étudier des phénomènes de variations de pression internes à la couche.

CHAPITRE 4. Conclusions et perspectives

L'étude bibliographique menée dans cette partie a montré que, malgré l'identification des paramètres influant sur les termes de cohésion et donc de résistance des dépôts organiques, le comportement des sédiments cohésifs est complexe et encore mal connu.

L'étude expérimentale que nous avons menée sur le Marais a permis d'apporter un éclairage nouveau sur les mécanismes qui conduisent à la constitution et à l'érosion des stocks de matières organiques à l'interface eau-sédiment.

Nous avons pu constater que la couche organique n'est pas un élément homogène. Elle est composée de plusieurs matériaux et, vraisemblablement, elle est stratifiée. Nos observations se sont limitées à une petite portion de collecteur, mais il apparaît que des facteurs, autres que le taux de cisaillement, entrent en jeu dans le comportement de l'interface étudiée. Ainsi, dans les processus qui conduisent à l'érosion de la couche organique, il faut probablement considérer les jeux de pression internes et externes à la couche organique mais il faut également tenir compte du facteur « aléa » qui modifie les qualités de la couche organique localement.

En conclusion, il apparaît que l'interface eau-sédiment est un élément complexe à modéliser sous forme de modèles déterministes car pour rendre compte de la complexité des phénomènes, il faudrait une quantité très importante de données. Or il est difficile de recueillir beaucoup de données de bonne qualité en réseau d'assainissement.

Dans ce cadre, les résultats obtenus par Ahyerre (1999) à partir d'un schéma conceptuel semblent prometteurs et les connaissances nouvelles sur la couche organique amenées par des expérimentations sur le terrain permettront vraisemblablement d'affiner les concepts, les hypothèses et les paramètres des relations utilisées dans ce type de modèles.

Remerciements

Nous tenons à remercier très vivement Johan Glasser et Laura Dieupart-Ruel, étudiants du DEA « Sciences et Techniques de l'Environnement », qui ont participé activement à cette partie du projet de recherche.

PARTIE V. Conclusions générales et perspectives

Les rejets urbains de temps de pluie sont chargés de particules ayant un impact négatif sur l'environnement. La contribution des dépôts situés dans le réseau d'assainissement à cette pollution est importante. Dans les réseaux unitaires, les stocks de matière organique situés à l'interface eau-sédiment ont été identifiés comme une source majeure de pollution pour les RUTP. Ces stocks se constituent par temps sec et sont érodés par temps de pluie.

Cette recherche vise à définir les critères pour l'existence de stocks de matière organique à l'interface eau-sédiment ainsi qu'à déterminer s'il existe différentes formes de stocks. Elle vise également à préciser les connaissances sur le comportement d'un type d'interface (la couche organique) par temps sec et par temps de pluie.

Pour cela deux dispositifs d'observation ont été mis au point : l'un deux est « portable » et permet de localiser et d'identifier l'interface eau-sédiment le long des collecteurs, du réseau d'assainissement, le second est « fixe » et permet de suivre en continu, sur un site, les évolutions de la couche organique.

<u>1. Principaux résultats</u>

1.1. L'évaluation du taux de cisaillement

Des expérimentations ont été réalisées afin de comparer différentes méthodes pour estimer le taux de cisaillement dans le but de sélectionner une méthode pratique pour l'estimation du taux de cisaillement en égout.

Dans le cas des tronçons de collecteurs sans dépôt, l'établissement d'un profil de vitesse avec 4 points de mesures (dont un près du fond) suffit à obtenir un résultat relativement précis.

L'étude menée dans les tronçons de collecteurs avec dépôt a mis en évidence les problèmes hydrauliques liés à la présence des sédiments. Les formes des dépôts créent des perturbations locales importantes de l'écoulement et les relations utilisées classiquement pour déterminer le taux de cisaillement pour un tronçon de collecteur se révèlent imprécises.

Dans le cadre de notre étude, une estimation précise du cisaillement aurait sans doute permis d'éclairer les phénomènes se produisant à l'interface eau-sédiment. L'évaluation du taux de cisaillement dans ce type de conditions passe probablement par une modélisation hydraulique tri-dimensionnelle de l'écoulement. Cependant, ce type d'analyse demande beaucoup de ressources en temps et en calculs. Nous avons donc opté pour une estimation du cisaillement basée sur la méthode des profils de vitesse pour préciser les caractéristiques de l'écoulement dans les zones étudiées bien que les taux de cisaillement ainsi déterminés ne soient pas vraiment représentatifs des phénomènes locaux que nous cherchons à étudier.

1.2. L'interface eau-sédiment dans la bassin versant du Marais

Un nouveau système d'observation a été développé : il est basé sur un endoscope et il permet de visualiser l'interface eau-sédiment de manière ponctuelle et non-destructive.

L'utilisation de ce système permet de vérifier la présence et d'estimer le volume des stocks de matière organique à la surface des dépôts grossiers. Son encombrement limité permet de l'utiliser pour étudier rapidement des longueurs importantes de collecteurs.

Sur le bassin versant du Marais, l'interface eau-sédiment a été identifiée comme une couche organique immobile. Les critères pour l'existence de la couche organique sont les suivants : faible vitesse d'écoulement (U < 0,15 m/s), faible pente de radier (j < 0,05 %), présence de dépôts grossiers avec des « creux ». La couche organique se développe dans des zones où le taux de cisaillement est très faible (inférieur à 0,03 N/m²).

Enfin, il semble que la couche organique ait une composition relativement homogène sur tout le bassin versant du Marais (MV/MS : 76 % ; DCO/MS : 1,5 gO_2/g ; DBO₅/MS : 0,4 gO_2/g).

La présence d'une couche « crémeuse » a également été mise en évidence au-dessus des dépôts existants à l'amont des collecteurs, dans les zones de fort ralentissement de l'écoulement. Elle semble être constituée de fines particules en suspension dans de l'eau stagnante et peut contenir des bulles de gaz.

1.3. L'interface eau-sédiment dans des bassins versants hors du Marais

Le système d'observation basé sur l'endoscope a été testé avec succès dans les collecteurs du Marais à Paris ainsi qu'à Marseille, à Dundee (G-B), à Hildesheim (Allemagne) et dans deux villes du Yorkshire (G-B). Ce travail en collaboration avec plusieurs équipes a permis d'observer deux types d'interface :

- des solides se déplaçant près du fond le long des collecteurs, des « NBS » (Hildesheim, Dundee)
- de la couche organique immobile (Paris, Marseille).

La couche organique a été observée dans les creux des dépôts grossiers, à l'amont des réseaux d'assainissement, dans des zones où la vitesse d'écoulement est inférieure à 0,15 m/s tandis que les « NBS » ont été observés au-dessus des dépôts grossiers, à l'aval des réseaux d'assainissement, dans des zones où la vitesse d'écoulement oscillait entre 0,2 et 0,4 m/s. Ces

différences de conditions hydrauliques suffisent sans doute à expliquer le caractère mobile/immobile des interfaces observées.

1.4. La dynamique de la couche organique

Un second système d'observation a été mis au point, il est basé sur une boite vitrée, encastrée dans une paroi de l'égout, à l'intérieur de laquelle un système de prise de vue automatisé a été installé. Les expériences réalisées avec la boite d'observation en continu sur le Marais ont permis de mettre en évidence la complexité de la structure et du comportement de la couche organique.

La couche organique n'est pas un élément homogène : elle est composée de plusieurs matériaux et elle est vraisemblablement stratifiée.

Par temps sec, des phénomènes d'expansion et de tassement ont pu être observés, ainsi que des processus d'érosion par « morceaux » suivis du remplissage rapide des « trous » ainsi réalisés : la surface de la couche organique est donc remaniée fréquemment. Enfin, la couche organique semble atteindre rapidement un palier, un état stable en volume sur le tronçon de collecteur étudié.

Durant les augmentations de débit, nous avons pu constater que les phénomènes d'érosion ne se produisaient pas de manière homogène à la surface du sédiment et que le charriage faisait partie des processus importants pour l'érosion de la couche organique. Il semble donc que des notions telles que le « hasard » ou les phénomènes de pression internes à la structure de la couche doivent être pris en compte pour caractériser le comportement de la couche organique.

2. Perspectives de recherche

2.1. Localisation de la couche organique

La couche organique est la principale source de pollution des eaux transitant dans le réseau du Marais par temps de pluie. Les observations menées sur le bassin versant du Marais ont montré que l'existence de la couche organique est liée à des conditions hydrauliques particulières. On peut se demander si elle est toujours la principale source de pollution à l'échelle d'un grand basin versant.

Dans le cadre du programme de recherche « évolution spatiale des caractéristiques et des origines des polluants dans les réseaux d'assainissement unitaires » sur le site de l'OPUR, il

serait intéressant d'évaluer le linéaire de réseau dans lequel les conditions d'écoulement sont favorables à la formation de la couche organique afin d'estimer les masses de particules disponibles. Une campagne d'observations avec l'endoscope sur certains des sites ainsi identifiés hors du Marais permettrait par ailleurs de vérifier si les critères d'existence déterminés ici sont suffisants.

2.2. Caractérisation de la couche organique

Les observations réalisées avec la boite fixe ont montré que la couche organique est un matériau complexe. Plusieurs questions restent en suspens et pourraient trouver une réponse dans une nouvelle série d'expérimentations.

- Y a-t-il une évolution physico-chimique et biologique de la couche organique avec le temps ?

pour étudier le « vieillissement » de la couche organique, on peut imaginer de curer entièrement un tronçon de collecteur afin d'obtenir une couche organique « fraiche », puis d'effectuer des prélèvements à différents âges ;

- Existe-t-il une stratification de la couche organique ?

pour réaliser une étude de la couche suivant son épaisseur, on peut proposer de réaliser des carottages cryogéniques qui permettraient une analyse des variations de la composition, de la densité et de la teneur en eau de la couche organique ainsi que de paramètres biologiques.

2.3. Dynamique de la couche organique

Le suivi que nous avons réalisé sur le collecteur Saint-Gilles durant deux années a montré que la couche organique avait atteint une hauteur « d'équilibre ». Le suivi d'un tronçon de collecteur à partir de sa date de curage permettrait d'étudier la cinétique de formation de la couche organique à partir d'un état « 0 ».

Nous avons également pu observer des phénomènes internes à la couche organique, du type expansion/tassement et des phénomènes d'érosion par « morceaux ». Un suivi de la pression interstitielle de la couche organique, au moyen de capteurs de pression placés sur le fond du collecteur ou contre une paroi latérale, permettrait d'apporter des éléments de compréhension de ces phénomènes.

Enfin, le charriage semble tenir une part importante dans les processus d'érosion durant les augmentations de débit. La disposition de pièges à charriage à l'aval des zones où se

développe la couche organique permettrait sans doute de savoir si ces particules charriées sont désagrégées et remises en suspension ou bien si elles continuent à se déplacer près du fond, comme des « NBS ».

2.4. Modélisation des stocks de matière organique à l'interface eau-sédiment

Les modèles de qualité proposés actuellement sur le marché utilisent des modules de transport de sédiment basés sur l'érosion de dépôts constitués par un matériau granulaire homogène (Tait *et al.*, 2002). De plus, ils sont très sensibles au terme de « stock initial » des sédiments (Kanso, 2001). Il n'existe pas de modèle d'ensablement qui donne entière satisfaction : les modèles déterministes sont insuffisants et les modèles conceptuels n'ont pas encore fait leur preuve dans le cas d'applications systématiques (Gérard,1999).

Dans ce cadre, l'interface eau-sédiment qui est un élément cohésif et hétérogène n'est pas simple à mettre en équations. Il a également été mis en avant qu'un facteur important pour décrire la couche organique pourrait bien être l'« aléa », ce qui amène à des modélisations de type stochastique.

Les pistes les plus plausibles à l'heure actuelle concernent l'établissement de modèles de localisation de la couche organique, basés sur les critères déterminés durant ce travail, qui permettraient de déterminer les zones à risque dans le réseau.

2.5. Gestion de la couche organique

L'expérience à laquelle nous avons participé dans le collecteur Tobelem de Marseille a montré que l'utilisation de vannes Hydrass permet d'éroder les stocks de couche organique (Laplace *et al.*, 2002 – cf. Annexes). En effet, les chasses d'eau induites par ce type de vanne provoquent une augmentation du cisaillement au fond à laquelle l'interface eau-sédiment ne résiste pas. Cependant, la zone d'action de la vanne Hydrass n'est pas vraiment définie : l'utilisation du système d'observation avec l'endoscope permettrait d'étudier l'impact de la vanne Hydrass sur des longueurs importantes de collecteur.

Les observations que nous avons menées sur Le Marais ont montré que les zones touchées par le développement de la couche organique sont relativement limitées. L'implantation de vannes Hydrass dans ce type de réseau ne paraît pas judicieuse : les pentes de radier sont peu favorables à l'installation d'une vanne, les débits sont faibles, etc. On peut alors proposer des aménagements dans les zones sensibles du type rectification de la pente du radier, couverture avec des revêtements glissants ou modification des sections d'écoulement.

3. Perspectives méthodologiques

Durant cette thèse, deux systèmes d'observation de l'interface eau-sédiment ont été mis au point et testés sur site.

Le premier système basé sur un endoscope permet de visualiser l'interface eau-sédiment de manière ponctuelle. Des améliorations pourraient être apportées à ce système afin d'en faciliter l'usage dans les collecteurs circulaires de diamètre réduit. On peut suggérer, par exemple, l'utilisation d'un endoscope de taille plus réduite (il existe des endoscopes à partir de 40 cm de long). L'utilisation d'un endoscope ne semble cependant pas indiquée dans le cas des collecteurs de grande taille. En effet la puissance et la largeur des écoulements dans les grands collecteurs ne permettent pas de procéder suivant la méthodologie qui a été utilisée sur les petits collecteurs.

Enfin l'utilisation de l'endoscope ouvre des perspectives au niveau de l'analyse de l'interface eau-sédiment. En effet, un système de reconnaissance et de traitement de l'image pourrait être adapté pour faire une analyse granulométrique des dépôts à partir des clichés obtenus avec l'endoscope. Ce type de caractérisation a été réalisé avec succès par Breuil (1999) avec un fibroscope pour effectuer une reconnaissance des milieux granulaires dans des sols et de la neige.

Le second système est basé sur l'encastrement d'une boite d'observation dans une paroi de l'égout à l'intérieur de laquelle on installe un système de prise de vue automatisé. Les résultats obtenus sur Le Marais sont très encourageants. Des améliorations pourraient être apportées à ce système afin de limiter les reflets (sur le système ou par traitement numérique des images) et d'asservir le système de prise d'images à un débitmètre, afin de déclencher automatiquement la prise d'image durant des pluies.

PARTIE VI. Bibliographie

ABDERRAHIM D., ZECH Y. (1997) : "Bedload transport approaches for non-uniform sediments in rivers"

9th Int. Conf. on « Transport and sedimentation of solid particles », 2-5 Sept. 1997, Cracow, Poland ; pp 509-520.

AHYERRE M. (1999) : "Bilans et mécanismes de migration de la pollution organique en réseau d'assainissement unitaire"

Thèse de doctorat, Spécialité : hydrologie, hydrogéologie, géostatistique et géochimie, Université Paris VI, France. 250p.

AHYERRE M., CHEBBO G., SAAD M. (2001,a) : "Nature and dynamics of the watersediment interface in combined sewer trunks".

ASCE, J. of Environmental Engineering, Vol 127, n°3, 2001.

AHYERRE M., OMS C., CHEBBO G. (2001,b) : "The erosion of organic solids in combined sewers".

Water Science and Technology, Vol 43, n°5, 2001 ; pp.95-102.

ARTHUR (1996) : "*Near bed solids transport in combined sewers*" Ph-D, University of Abertay Dundee, Grande-Bretagne. 204p.

ASHLEY R.M., WOTHERSPOON D.J.J., GOGHLEN B.P., MCGREGOR J. (1992) : "*The erosion and movement of sediments and associated pollutants in combined sewers*". Water Science and Technology, Vol 25, n°8, 1992 ; pp101-114.

ASHLEY R.M., ARTHUR S., COGHLAN B.P., McGREGOR I. (1994): "Fluid sediment in combined sewers".

Water Science and Technology, Vol 29 (1/2), 1994 ; pp113-123.

ASHLEY R.M., VERBANCK M.A. (1996): "Mechanics of sewer sediment erosion and transport".

J. of Hydraulic Research, Vol 34 (6), 1996; pp.753-769.

ASHLEY R.M, McILHATTON T.D. (1998) : "*The importance of near bed solids*". Conf. on « Alleviating Stormwater and CSO Problems ». Bristol, UK, Décembre 1998.

ASHLEY A. (1999) : " *Domestic Sanitary Waste disposal via WC*" Conference presentation.

BACHOC A. (1992) : "*Le transfert des solides dans les réseaux d'assainissement unitaire*" Thèse de doctorat, I.N.P. de Toulouse, France. 281p. + annexes.

BACHOC A., LAPLACE D., DARTUS D. (1993) : "Build-up and erosion of sediment deposits in combined sewer network"
6th Int. Conf. on « Urban storm drainage », 12-17 Sept 1993, Niagara Falls.

BALAYN P. (1996) : "Modélisation du transfert de sédiments lors d'un lâcher d'eau en réseau d'assainissement – approche numérique"
Mémoire de DEA "Mécanique et Ingénierie" et de fin d'études de l'ENGEES, 70p.

BERRY N. (2000) : "*Evaluation du taux de cisaillement dans les réseaux d'assainissement*" Mémoire de DEA "Sciences et Techniques de l'Environnement", CEREVE, France.

BERTRAND-KRAJEWSKI J-L., LAPLACE D., JOANNIS C., CHEBBO C. : "*Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*" Edition Technique et Documentation. 2000. 794p.

BEYER G. (1989) : "Contribution à l'étude de l'érosion des dépôts en réseau d'assainissement unitaire"

Thèse de doctorat Sciences et Techniques de l'Eau, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France. 157p.

BREUIL P. (1998) : "Caractérisation endoscopique des milieux granulaires couplée à l'essai de pénétration"

Thèse de doctorat, spécialité Génie Civil, Université Blaise Pascal – Clermont II, France. 272p.

BROMBACH H. (1981) : "*Probenhame in Abwasserkanal*" Rapport technique UFT.

BUTLER D., FRIEDLER E., GATT K. (1995) : "Characterising the quantity and quality of domestic wastewater inflows" Water Science and Technology, vol 31, n°7, 1995 ; pp.13-24.

CAMPISANO A., MODICA C. (2002) : "Flow velocities and shear stresses during flushing operations in sewer collectors" 3^{dr} Int. Conf. on « Sewer Processes and Networks », Paris, France, 15-17 Avril 2002.

CAMUFFO. G, TAIT S.J., MARION A. (2002) : "*The erosion of organic sediment deposits formed under different envionmental conditions*" 3^{dr} Int. Conf. on « Sewer Processes and Networks », Paris, France, 15-17 Avril 2002.

CARLIER M. (1972) : "*Hydraulique générale et appliquée*" Editions Eyrolles. 582p.

CELLINO M., GRAF W.H. (1999) : "Sediment-laden flow in open-channels under noncapacity and capacity conditions" Journal of Hydraulic Engineering, vol 125, n°5, 1999 ; pp. 455-462.

CHEBBO G. (1992) : "Solides des rejets pluviaux urbains. Caractérisation et traitabilité" Thèse de doctorat Sciences et Techniques de l'Environnement, ENPC, France. 413p. + annexes.

COSINUS (2000). "Prediction of cohesive sediment transport and bed dynamics in estuaries and coastal zones with integrated numerical simulation models" Projet Européen (Contrat n°: MAS3 CT97-0082). Coordinateur : J.E. Berlamont, E. Toorman. Rapport final.

CRABTREE R.W. (1989) : "Sediments in sewers" Journal of Inst. Water Env. Management, n°3, 1989 ; pp.569-578. DAVIES J.W., BUTLER D., SMALL J.L., SEKULOSKI V., JEFFERIES C. (1997) : "Gross solids transport and degradation"

2nd Int. Conf. on « Sewer as a physical, chemical and biological reactor », 25-28 Mai 1997, Aalborg, Danemark.

DeSUTTER R. (2000) : "Erosion and transport of cohesive sediment mixtures in unsteady flow"

PhD thesis, Gent Universiteit, Belgique, 2000. 283p.

De WIT P.J., KRANENBOURG C. (1997) : "The wave-induced liquefaction of cohesive sediment beds"

Estuarine, Coastal and Shelf Estuarine, vol 45, n°2, 1997 ; pp.261-271.

DROPPO I.G., LAU Y.L., MITCHELL C. (2001) : "*The effect of Depositional History on Contamined Bed Sediment Stability*" Science of the Total Environment, Vol 266, n°1-3, pp.7-13.

FLEMMING H.C. (1995) : "Sorption sites in biofilms" Water Science and Technology, vol 32, n°8, 1995 ; pp.27-33.

FRIEDLER E., BROWN D.M., BUTLER D. (1996) : "A study of WC derived sewer solids" Water Science and Technology, vol 33, n°9, 1996 ; pp.17-24.

GERARD C. (1999) : "Aide au diagnostic des réseaux d'assainissement : analyse et modélisation des relations entre la structure du réseau et les risques d'envasement" Thèse de doctorat, formation doctorale : conception en bâtiment et techniques urbaines, INSA de Lyon, France. 379p.

GRAF W. H., ALTINAKAR M.S. (1996) : "Hydraulique fluviale - Tome 2 - Ecoulement non permanent et phénomènes de transport"

Traité de Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Vol. 16, 1996, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. GROMAIRE-MERTZ M.C. (1998) : "La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire. Caractéristiques et origines"

Thèse de doctorat Sciences et Techniques de l'Environnement, ENPC, France. 507p. +annexes.

GROMAIRE M-C., GARNAUD S., AHYERRE M., CHEBBO G. (2000) : "Quality of street cleaning waters : comparison with dry and wet weather flow in Paris." Urban Water, Vol 2, 2000 ; pp. 39-46.

GROMAIRE M-C., GARNAUD S., SAAD M., CHEBBO G. (2001): "Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers." Water Research, Vol 35, n°2, 2001; pp. 521-533.

GUTEKUNST B. (1988) : "Sielhautuntersuchungen zur Einkreisungen schwermetallhaltiger Einleitungen "

Presses de l'Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Université de Karlsruhe, Vol 49, ISSN 0722-7698, 141p.

HOLLINGSHEAD AB, RAJARATNAM N. (1980) : "A calibration chart for Preston tube." Journal of Hydraulic Research, 1980, vol 18, n° 4 ; pp.313-326.

HOUWING E.J, van RIJN L.C. (1998): "In Situ Erosion Flume (ISEF): determination of bed-shear stress and erosion of a kaolinite bed." Journal of Sea Research, 1998, vol 39; pp.243-253.

HRISSANTHOU V., HARTMANN S. (1998): "Measurements of critical shear stress in sewers"

Water Research, Vol 32, n°7, 1998 ; pp.2035-2040.

HUYGENS M., TITO L., VERHOEVEN R. (1997) : "Erosional behaviour of non-cohesive and partly cohesive sediments in a cylindrical flume" Journal of Hydrology and Hydromechanics, vol 45, 1997, 1-2 ; pp. 55-68.

KANSO A. (2001). "Bilan des connaissances sur les mécanismes de génération et sur les modèles de calcul des flux polluants des RUTP"
Rapport d'avancement de la 1^{ère} année de thèse. CEREVE-ENPC.

KRANENBURG C. (1994) : "*The fractal structure of cohesive sediment aggregates*" Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol 39, n°5, 1994 ; pp. 451-460.

KRANENBURG C. (1999): "Effect of flow strength on viscosity and deposition of cohesive sediment suspensions".

Continental Shelf Research, vol 19, 1999 ; pp. 1665-1680.

KREJCI V., DAUBER L., NOVAK B., GUJER W. (1987): "Contribution of different sources to pollutant loads in combined sewers".

4th Int. Conf. on « Urban Storm Drainage ». Lausanne, Suisse, 31 Aout- 4 Sept. 1987.

JAUMOUILLIE P., LARRARTE F., MILISIC V. (2001) : "Etude numérique et expérimentale des flux de polluants en collecteur d'assainissement"
4^{ème} Conf. Int. sur « Nouvelles Technologies en assainissement pluvial », NOVATECH, Lyon, 25-27 Juin 2001.

JULIEN P.Y. (1998) : "Erosion and Sedimentation" Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998 ; 280 pages.

LAPLACE D. (1991) : "*Dynamique du dépôt en collecteur d'assainissement*". Thèse de Doctorat, I.N.P. de Toulouse, spécialité : mécanique. 201p.

LAPLACE D., OMS C., AHYERRE M., CHEBBO G., LEMASSON J., FELOUZIS L. (2002) : "Removal of the organic surface layer in combined sewer sediment using a flushing gate"

Water Science and Technology (IWA), Vol 47, n°4, pp. 19-26, 2003.

LAU Y.L., KRISHNAPPAN B.G. (1992) : "Size distribution and settling velocity of cohesive sediment during settling"

Journal of Hydraulic Research, vol 30, n°5, 1992 ; pp. 673-684.

LICK W., HUANG H. (1993) : "*Flocculation and the physical properties of flocs*" Lecture Notes on Coastal and Estuaries Studies, vol 42, Ashish J. Mehta (Ed.), American Geophysical Union, 1993 ; pp. 21-39.

LIN H. (1993) : "Le transport solide en collecteur unitaire d'assainissement et sa modélisation" Thèse de doctorat Sciences et Techniques de l'environnement, ENPC, France. 225p.

MASSON A. (1997) : "Assainissement autonome " Catalogue CATED, France, février 1997.

McGREGOR I., ASHLEY R., ODUYEMI K. (1993) : "Pollutant release from sediments in sewer systems and thier potential release into receiving waters" Water Science and Technology, vol 28, n°8-9, 1993 ; pp.161-169.

McLELLAND S.J., ASHWORTH P.J., BEST J.L., LIVESEY J.R. (1999) : "*Turbulence and secondary flow over sediment stripes in weakly bimodial bed material*" Journal of Hydraulic Engineering, vol 125, n°5, 1999 ; pp. 463-473.

MONESTIER M : "*Histoires et bizarreries des excréments, des origines à nos jours*" (Documentaire) Édition Le Cherche-Midi, France, avril 1997 ; 287 pages.

NELSON J.M., SHREVE R.L., McLEAN S.R., DRAKE T.G. (1995) : "Role of near-ced turbulence structure in bed load transport and bed forms mechanics" Water resources research, vol 31, n°8, 1995 ; pp. 2071-2086.

PARCHURE T.M., MEHTA A.J. (1985) : "*Erosion of soft cohesive sediment deposits*". Journal of Hydraulic engineering, vol 111, n°10, 1985 ; p1308-1325.

PARTHENAIDES E. (1993) : "*Turbulence, flocculation and cohesive sediment dynamics*" Lecture Notes on Coastal and Estuaries Studies, vol 42, Ashish J. Mehta (Ed.), American Geophysical Union, 1993 ; pp. 40-57. PERRUSQUIA G. (1991): "Bed load transport in storm sewers. Stream traction in pipe channels".

PhD thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Suède. 72p + annexes.

PERRUSQUIA G. (1993) : " Sediment transport in storm sewers with a permanent deposit". 6th Int. Conf. on « Urban Storm Drainage ». Niagara Falls, Canada, 1993.

PERRUSQUIA G., PETERSEN O., LARSEN T. (1995) : "Influence of sewer sediments on flow friction and shear stress distribution". Water Science and Technology, vol 31, n°7, 1995 ; pp.117-126.

PIEDRA-CUEVA I., MORY M. (1995) : "Erosion of a deposited soft cohesive sediment bed".Rapport. Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels, Institut de Mécanique de Grenoble. 1995. 52p + annexes.

RISTENPART E., UHL M. (1993) : "*Dynamic behaviour of sewer sediments*". 6th Int. Conf. on « Urban Storm Drainage ». Niagara Falls, Canada, 1993.

RISTENPART E., ASHLEY R.M., UHL M. (1995) : "Organic near bed fluid and particulate transport in combined sewers". Water Science and Technology, vol 314, n°7, 1995 ; p61-68.

RISTENPART E. (1997) : "Solid transport by flushing of combined sewers". 2nd Int Conf. Sur « Sewer as a physical, chemical and biological reactor », 25-28 Mai 1997, Aalborg, Danemark.

SAAD M., MERTZ M-C., CHEBBO G. (1996): "Protocoles de mesure e la demande chimique en oxygène. Bassin versant du Marais".

Rapport d'avancement. CERGRENE-LABAM, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 9p.

SAADI Y. (2000): "The impact of unsteady flows on the erosion and movement of miwed grain size sediment".

Transfert report to Simon TAIT. Department of Civil and Strucutural Engineering. Water engineering research group. University of Sheffield. February 2000.

SATIN M., SELMI B. (1999) : "*Guide technique de l'Assainissement*" 2nd édition, Ed. Le Moniteur, 1999.

SIEGRIST R., WITT M., BOYLE W.C. (1976): : "Characteristics of rural household wastewater"

ASCE J. of Environmental Engineering, Vol 102, n°3, pp.533-548.

SKIPWORTH P., TAIT S., SAUL P. (1999) : : "Erosion of sediment beds in sewers :model development"ASCE J. of Hydraulic Division, Vol 25, n°6, pp.566-573.

SONG T, GRAF W.H. (1994) : "*Non-uniform Open-channel Flow over a Rough Bed*" Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, vol 12, n°1, 1994 ; pp.1-25.

SONG T. (1995) : "Velocity and turbulence distribution in non-uniform and unsteady openchannel flow"

Thèse de doctorat Sciences Techniques, E.P.F. de Lausanne, Suisse. 270p.

TAIT S.J., RUSHFORTH P.J., SAUL A.J. (1998) : "A laboratory study of the erosion and transport of cohesive-like sediment mixtures in sewers"
Water Science and Technology, vol 37, n°1, 1998 ; pp.163-170.

TAIT S.J., ASHLEY R.M., VERHOEVEN R., CLEMENS F., AANEN L. (2002) : "Sewer sediment transport studies using an environmentally controlled annular flume 3rd Int. Conf. on « Sewer Processes and Networks », Paris, France, 15-17 Avril 2002.

TEN BRINKE W.B.M. (1996) : "The impact of primarily produced organic matter on the aggregation of suspended sediment" Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol, vol 47, 1996; pp.77-91.

van LEUSSEN W. (1999) : "The variability of settling velocities of suspended fine-grained sediment in the Ems estuary"

Journal of Sea Research, vol 41, n°1-2, 1999 ; pp.109-118.
van RIJN H.C. (1984) : "Sediment transport - part III - Bed forms and alluvial roughess" Journal of Hydraulics Engineering, vol 110, n°12, 1984 ; pp.1733-1754.

VERBANCK M.A. (1992) : "Field investigations on sediment occurrence and behaviour in Brussels combined sewers".

Water Science and Technology, vol 25, n°8, 1992 ; pp.71-82.

VERBANCK M.A. (1993) : "Identification of the depth-dependent transportation of particulate solids in dry-weather sewage flows".
6th Int. Conf. on « Urban Storm Drainage », Niagara Falls, Canada, 1993.

VERBANCK M.A. (1994) : "Transfert de la charge particulaire des l'égout principal de la ville de Bruxelles".Thèse de Doctorat en Sciences agronomiques, Université Libre de Bruxelles, 1994. 193p.

VERBANCK M.A. (1995) : "Capturing and releasing settleables solids, the significance of dense undercurrents in combined sewer flows". Water Science and Technology, vol 31, n°7, 1995 ; p85-93.

VERBANCK M.A. (2000) : "computing near-bed solids transport in sewers and similar sediment-carrying open-channel flows". Urban Water, vol 2, 2000 ; pp.277-284.

VIOLLET P-L., CHABARD J-P., ESPOSITO P., LAURENCE D. (1998) : "Mécanique des fluides appliquée - Ecoulements incompressibles dans les circuits, canaux et rivières, autour de structures et dans l'environnement" Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

WITTE G., KHUL H. (1996) : "Facilities for sedimentation and erosion measurements" Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol., vol 47, 1996, pp.121-125.

WOHRLE C., BROMBACH H. (1991) : "Sampling in sewers" Wasserwirtschaft.

WOTHERSPOON D., ASHLEY R. (1992) : "Rheological measurement of the yield strength of combined sewer sediment deposits" Water Science and Technology, vol 28, n°8, 1992 ; pp.165-169.

WOTHERSPOON D.J.J. (1994) : " The movement of cohesive sediment in a large combined sewer".

PhD thesis, University of Abertay Dundee, UK.

YALIN M.S. (1977) : "*Mechanics of sediment transport*" Pergamon Press, Queens University. 298p.

PARTIE VII. Annexes

1. Notations utiles

b	largeur de l'écoulement, du canal
Bs	terme pour l'équation de la distribution logarithmique des vitesses (cf. Tableau II-1)
С	coefficient de Chézy
C _{gel}	concentration de gel (= concentration en MES « critique »)
C _{MES}	concentration en MES
C _v	concentration volumique
d	diamètre des particules
d_{50}, d_{90}	diamètre représentatif des particules (d_{90} : 90% des particules ont un diamètre d < d_{90})
$\mathbf{D}_{\mathbf{h}}$	diamètre hydraulique
E	flux d'érosion surfacique
Eo	paramètre d'érosion
Fr	nombre de Froude
g	accélération de la pesanteur
h	hauteur d'eau
J	pente du fond
Je	pente énergétique
k	constante de Von Karmann (k=0,4)
k _s	rugosité de la paroi
K _s	coefficient de Manning-Strickler
p , p'	hauteur d'érosion du dépôt, hauteur de la couche superficielle du dépôt
Р	pression moyenne
Q	débit dans la section de l'écoulement
q _s	débit solide
Re, Re*	nombre de Reynolds, nombre de Reynolds particulaire
R _h	rayon hydraulique
8	section d'écoulement
S	poids specifique
t	unité de temps
<u> </u>	vitesse moyenne dans la section d'ecoulement
u	vitesse moyenne pour une nauteur donnee
u*	vitesse de cisaillement
u, v, w	composantes de la vitesse dans les 3 directions de l'espace
u', v', w'	écart à la moyenne des composantes de la vitesse
Vs	vitesse de chute des particules
x, y, z	composantes spatiales
Y	fraction massique presente dans le melange
0	nauteur de la couche limite laminaire
λ	coefficient de frottement
V	viscosité cinématique
μ	viscosité dynamique
ρ	masse volumique de l'eau
τ, τ*	contrainte de cisaillement, contrainte de cisaillement adimensionnelle
τ _{cr}	contrainte de cisaillement critique
τ_0	contrainte de cisaillement au fond
$\tau_{\rm m}$	contrainte de cisaillement moyenne
τ_{lam} , τ_{turb}	composante laminaire et turbulent de la contrainte de cisaillement
χ	périmètre mouillé

2. Table des figures

Figure I-1 – Le bassin versant du Marais – Exemple de dispositifs de suivis mis en place pour			
l'analyse des eaux ruisselées en surface du bassin4			
Figure I-2 – OPUR : les 6 sites de mesures (ronds bleus)5			
Figure II-1- Exemples de collecteurs dans le réseau d'assainissement du Marais11			
Figure II-2 - Exemples de profils de collecteurs dans les collecteurs du Marais (Ahyerre,1999)			
Figure II-3 - Structure des écoulements secondaires (Viollet et al., 1998)			
Figure II-4 - Influence de la rugosité sur la couche laminaire15			
Figure II-5 – Composantes de la vitesse dans l'espace			
Figure II-6 - Répartition des contraintes de cisaillement avec la profondeur (Yalin, 1977) 18			
Figure II-7 - Canal prismatique (schéma) et contraintes de surface appliquées sur un élément			
de fluide (Julien, 1998)19			
Figure II-8 – Canal hydraulique de Gent			
Figure II-9 – Schéma de l'ADV et ADV en place dans le collecteur Vieille du Temple25			
Figure II-10– Résultats obtenus dans le canal de Gent			
Figure II-11 - Résultats obtenus avec les données ADV en réseau sans dépôt			
Figure II-12 - Résultats obtenus avec les données micro-moulinet en réseau sans dépôt33			
Figure II-13 – Schéma des points de mesure pour les expériences de variabilité spatiale37			
Figure II-14 – Suivi des zones étudiées			
Figure II-15 - Granulométrie du dépôt grossier, dans les deux tronçons étudiés40			
Figure II-16 - Données de vitesse sur Rivoli (29/08/00) et sur Saint-Gilles (22/08/00)42			
Figure II-17 - Mesures ADV et taux de cisaillement sur Saint-Gilles et sur Rivoli			
Figure II-18 – Exemples de distribution des vitesses et des contraintes de cisaillement autour			
d'un obstacle (Julien, 1998)			
Figure II-19 - Vitesse moyenne longitudinale <i>Vx</i> et transversale <i>Vy</i> mesurées à l'ADV45			
Figure III-1 – Typologie des dépôts en réseau d'assainissement			
Figure III-2 – Schéma des pièges à charriage et des « bed traps »			
Figure III-3- Exemple de profil de concentration relevés en réseau d'assainissement unitaire55			
Figure III-4 - Méthodes de prélèvement du « fluid sediment » par différents auteurs			
Figure III-5 – Evolution des profils de concentration en MES en fonction de l'heure de la			
journée, d'après les données mesurées sur Constable Street par Arthur (1996) 56			

Figure III-6 - Vue en coupe de l'interface eau-sédiment			
Figure III-7 – Boite d'observation			
Figure III-8 - Schéma de la boite de prélèvement			
Figure III-9 -Accumulation de couche organique par temps sec (Ahyerre,1999)59			
Figure III-10 - Système d'observation			
Figure III-11 - Bassin versant du Marais (contours en pointillé)			
Figure III-12 -Vue en coupe de différents collecteurs du Marais			
Figure III-13 -Sites de prélèvement sur le collecteur Saint-Gilles			
Figure III-14 - Images obtenues avec le système endoscope			
Figure III-15 -Comparaison des charges polluantes de la couche organique75			
Figure III-16 - Dépôts grossiers et hauteur d'eau relevés sur Saint-Gilles76			
Figure III-17 – Dépôts grossiers et hauteur d'eau sur Vieille du Temple			
Figure III-18 -Relevé des vitesses moyennes sur le collecteur Saint-Gilles			
Figure III-19 – Localisation de la couche organique sur Le Marais			
Figure III-20 - Observations réalisées sur l'amont du collecteur Saint-Gilles (02/01)			
Figure III-21 - Cartographie de l'interface eau – sédiment			
Figure III-22 – Evolution du cisaillement le long du collecteur Saint-Gilles			
Figure III-23 – Localisation des sites étudiés			
Figure III-24 – Suivi du tronçon de Samuels Street à Dundee (réalisé par A. Fraser)			
Figure III-25 – Photo du dépôt grossier à Dundee			
Figure III-26 – « NBS » piégés par les « bed-traps » (site de Samuels Street, Mai 2001) 88			
Figure III-27 – Suivi du collecteur d'Hildesheim (28/08/02)			
Figure III-28 – Dépôt grossier et interface eau-dépôt grossier, à Hildesheim (08:30, le			
29/08/02)			
Figure III-29 – Suivi du collecteur Tobelem à Marseille avant la mise en route de la vanne			
Hydrass (située au point 0)			
Figure III-30 – Photos des dépôts dans le collecteur Tobelem, avant la mise en route de la			
vanne (06/09/01)			
Figure III-31 – A gauche, dépôt sédimenté à Mexborough ; à droite, dépôt grossier sédimenté			
dans le Marais92			
Figure III-32 -Proposition de développement de la couche organique dans une « cuvette » du			
dépôt grossier96			
Figure IV-1 - Expérience d'érosion (Piedra-Cueva & Mory, 1995)104			

Figure IV-2 - Evolution des concentrations en MES en fonction du temps, rôle de la		
déposition (Droppo et al., 2001)105		
Figure IV-3 – Schéma de principe du ISEF (Houwing & van Rijn, 1998)106		
Figure IV-4 - Résistance à l'érosion en fonction de la profondeur dans le dépôt (Skipworth et		
<i>al</i> , 1999)107		
Figure IV-5 - Vue en coupe d'un viscosimètre de Couette		
Figure IV-6 - Principe d'un scissomètre avec hélice cruciforme et de l'érosimètre111		
Figure IV-7 - Evolution des MES et du débit durant une pluie (Verbanck,1995)114		
Figure IV-8 - Evolution des MES et du « fluid sediment », de la hauteur d'eau, de la vitesse et		
de la hauteur du dépôt durant une pluie (Ristenpart, 1997)115		
Figure IV-9 - Mécanismes de remise en suspension des dépôts (Ashley et al., 1992)115		
Figure IV-10– Expériences d'érosion menées par (Ahyerre, 1999)117		
Figure IV-11 – Schéma conceptuel de l'érosion de la couche organique (Ahyerre, 1999)121		
Figure IV-12 – Profils de vitesse réalisés sur le site d'observation		
Figure IV-13 – Boîte d'observation mise en place sur le collecteur Saint-Gilles en 2002 124		
Figure IV-14 – Site expérimental du collecteur Saint-Gilles		
Figure IV-15 – Etat du collecteur étudié en décembre 2001		
Figure IV-16 – Evolution des débits pour une journée moyenne de temps sec		
Figure IV-17 – Dispositif de mesures durant une augmentation de débit		
Figure IV-18 – Schéma des expériences réalisées		
Figure IV-19 – Relation liant le débit maximal du à la pluie (Qmax) à l'intensité maximale de		
la pluie (Imax)131		
Figure IV-20 – Chronologie des différentes expériences réalisées		
Figure IV-21 – Détails de la couche organique		
Figure IV-22 – Evolution des dépôts et de la couche organique entre le 07/12/01 et le		
26/03/02		
Figure IV-23 – Evolution par temps sec : remplissage d'un « trou »		
Figure IV-24 – Evolution de la couche organique par temps sec : arrachement d'un « bloc »		
de couche organique137		
Figure IV-25 – Evolution de la couche organique sur 15 jours de temps sec		
Figure IV-26 – Expériences d'injection du 10/04/02 et du 24/05/02		
Figure IV-27 - Expérience d'injection du 24/05/02 (trait plein : interface eau usée – couche		
organique; trait pointillé : interface de l'image précédente)141		

Figure IV-28 – Evolution des hauteurs de couche organique, durant les expériences		
d'injection du 10/04/02 et du 25/04/02142		
Figure IV-29 – Débit dans le collecteur Saint-Gilles, journée du 14/05/02143		
Figure IV-30 – Mode d'érosion combiné « charriage et remise en suspension » de la couche		
organique sur Saint-Gilles148		
Figure VII-1 - Plan du réseau d'assainissement parisien, 1908179		
Figure VII-3 - Vue en coupe d'égouts élémentaires		
Figure VII-5 - Vue en coupe de collecteurs "à bateau"		
Figure VII-7 - Exemple de collecteur envahi par des "flottants"		
Figure VII-9 - Vanne Hydrass en fonctionnement à Paris (à gauche) et à Marseille (au milieu,		
à droite)182		

3. Table des tableaux

Tableau II-1 – Valeurs de Bs pour les différents types d'écoulement (Yalin, 1977 ;			
Hollingshead et Rajaratnam, 1980)18	,		
Tableau II-2 – Caractéristiques des écoulements appliqués dans le canal de Gent23			
Tableau II-3 – Caractéristiques des écoulement étudiés sur les sites sans et avec dépôt2			
Tableau II-4 – Valeurs du taux de cisaillement (en N/m ²) en différentes sections (expérience			
du 18/04/00 à Gent))		
Tableau II-5 – Résultats du calage des profils théoriques de vitesse aux profils mesurés avec			
le micro-moulinet et taux de cisaillement τ (N/m ²)			
Tableau II-6 – Taux de cisaillement Erreur! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des			
codes de champs de mise en forme. sur Rivoli (J: pente du fond, Je: pente			
d'énergie))		
Tableau II-7 – Variabilité spatiale du taux de cisaillement sur Vieille du Temple	,		
Tableau II-8 – Comparaison du taux de cisaillement déterminé à partir d'un profil			
logarithmique complet ou avec 4 points de mesures	,		
Tableau II-9 – Diamètres caractéristiques du dépôt dans les deux tronçons étudiés40)		
Tableau II-10 – Résultats de la méthode des profils logarithmiques de vitesses41			
Tableau III-1 - Caractéristiques du dépôt grossier 52	,		
Tableau III-2 – L'interface eau/sédiment à travers l'Europe			
Tableau III-3 – Données recueillies sur trois collecteurs de Dundee (Arthur, 1996)54			
Tableau III-4 – Caractéristiques du « fluid sediment » étudié par différents auteurs)		
Tableau III-5 - Données physiologiques61			
Tableau III-6 -Composition des eaux usées (Siegrist et al., 1976)	,		
Tableau III-7 – Equivalent Habitant			
Tableau III-8 – Matières Sèches apportées au réseau du Marais, par les rejets des particuliers			
Tableau III-9 -Comparaison des particules entraînées par le lavage des rues			
Tableau III-10 - Masses apportées au réseau du Marais, par le lavage des rues			
Tableau III-11- Caractéristiques physico-chimiques de la couche organique, site de			
prélèvement PK650 et PK60074			
Tableau III-12 – Caractéristiques des sites étudiés, en Europe			
Tableau III-13 – Echantillons prélevés à Hildesheim)		

Tableau IV-1 - Rigidité initiale de la vase d'Entzheim et contrainte de cisaillement critique, et	n
fonction des concentrations testées, à partir des données de (Beyer, 1989)11	0
Tableau IV-2 – Expériences réalisées par DeSutter (2000)112	2
Tableau IV-3- Analyses des dépôts étudiés (Hrissanthou et Hartmann, 1998)110	6
Tableau IV-4 – Caractéristiques des pluies entre le 1 ^{er} mars 2002 et le 24 mai 200212	8
Tableau IV-5 – Nature des particules érodées et des particules de la couche organique 14	0
Tableau IV-6 – Estimations des masses et volumes érodés sur le tronçon complet (100m) 142	2

4. Le réseau d'assainissement parisien

La plus grande partie de notre étude porte sur le bassin versant du Marais, à Paris. Nous présentons ici quelques caractéristiques du système d'assainissement parisien.

Le réseau d'assainissement parisien a été développé au cours du XIXème siècle sous l'impulsion d'Haussmann et sous la direction de Belgrand (cf. Figure VII-1). C'est un réseau qui a été conçu pour être entièrement visitable.



Figure VII-1 - Plan du réseau d'assainissement parisien, 1908

Dans le réseau d'assainissement parisien on distingue les égouts élémentaires, les collecteurs et les émissaires.

4.1. Les égouts

Les égouts sont des galeries souterraines de forme ovoïde, d'une largeur maximale de 1,75 m aux naissances (cf. Figure VII-2). Ils recueillent les eaux usées et les eaux pluviales. Ils servent aussi de galerie technique pour le passage des conduites d'eau, câbles téléphoniques,... Les égouts élémentaires ont une longueur totale de 1430 km.

4.2. Les collecteurs

Les collecteurs se décomposent en deux catégories : les collecteurs secondaires et les collecteurs principaux qui reçoivent les eaux des collecteurs secondaires (cf. Figure VII-3). Chaque collecteur draine un bassin versant. Ces ouvrages convergent vers Clichy, à l'exception du collecteur du Nord. Les collecteurs représentent 150 km d'ouvrage.

On compte 4 collecteurs principaux en rive droite (Clichy, Asnières, Marceau, Nord) qui reprennent une partie des eaux de la rive gauche par l'intermédiaire de siphons passant sous la Seine et 2 collecteurs principaux en rive gauche (Bièvre, Bas). Les collecteur principaux représentent environ 40 km de canalisation.

Ce sont des galeries constituées d'une cunette centrale recevant les eaux et de deux banquettes latérales de circulation. La largeur des cunettes des collecteurs varie entre 0,60 m et 4 m pour les collecteurs principaux. Les pentes d'écoulement sont faibles, elles varient entre 0,02 % et 0,08 %.



Figure VII-2 - Vue en coupe d'égouts élémentaires



Figure VII-3 - Vue en coupe de collecteurs "à bateau"

4.3. Les émissaires

Les émissaires sont des ouvrages circulaires de grand diamètre (3 à 4 m) qui assurent le transport des effluents jusqu'à l'usine d'Achères. Il y en a deux : l'émissaire Nord-Est qui draine les eaux de banlieue ainsi que du $12^{\text{ème}}$, $18^{\text{ème}}$, $19^{\text{ème}}$ et $20^{\text{ème}}$ arrondissement, et l'émissaire Sud qui draine les eaux de la rive gauche de la Seine et du $16^{\text{ème}}$ arrondissement. L'émissaire Nord-Est joint l'usine de Charenton à l'usine de Clichy. Ils représentent 22 km de canalisation.

4.4. Fonctionnement du réseau

Le fonctionnement du réseau est complexe. Il s'agit à la base d'un réseau ramifié qui a progressivement évolué avec la ville et sa population et qui, à l'heure actuelle, fonctionne comme un réseau partiellement maillé. Le maillage permet d'assurer une redistribution des débits d'un collecteur vers un autre, au moyen de vannes, afin d'éviter la mise en charge d'un ou de plusieurs collecteurs. Il faut aussi noter qu'une partie du réseau est « régulée » ce qui signifie que les débits circulant dans cette partie du réseau sont gérés par des vannes de régulation automatiques.

4.5. Les problèmes liés aux dépôts dans le réseau d'assainissement

Les gestionnaires du réseau parisien connaissent depuis longtemps les problèmes liés aux dépôts. Les "sables" sont constitués par des solides, de différentes nature, qui s'accumulent dans les ouvrages du réseau d'assainissement et qui sont à l'origine de dysfonctionnements du réseau : modification de l'hydraulique, obstruction de canalisations, dégagements de gaz toxiques. La donnée d'ensablement est entrée dans une base de données appelée TIGRE par les égoutiers de la Ville de Paris au cours de leurs visites dans le réseau. Cette donnée peut être entrée sur des pas de 50m, voire de 10m. Elle se présente sous la forme d'une hauteur de dépôt avec la possibilité de distinguer différents types de dépôts : sables, boues, graisses, flottants,...(cf. Figure VII-4). Le service de la Ville de Paris peut ainsi évaluer les volumes de dépôts présents dans les collecteurs et prévoir des campagnes de curage pour remédier aux situations critiques.



Figure VII-4 - Exemple de collecteur envahi par des "flottants"

Pour limiter l'ensablement et réduire ainsi le curage des canalisations plusieurs solutions sont mises en œuvre :

• Améliorer le système dès la conception

Le premier point consiste à dimensionner les réseaux dès la conception pour être autocurants : le facteur limitant est la vitesse d'écoulement. Des tests sont menés dans le réseau parisien pour recouvrir certaines cunettes avec des matériaux glissants afin de réduire la rugosité des parois pour limiter les possibilités de formation de sables.

• Améliorer l'existant

Dans les réseaux existants l'une des solutions mises en place actuellement pour limiter l'ensablement consiste à provoquer la formation des dépôts dans des endroits déterminés, les bassins de dessablement, afin de pouvoir les extraire facilement. Ces bassins consistent en un approfondissement de la section de l'ouvrage ou de la cunette des collecteurs. Cet agrandissement de la section de l'écoulement provoque un ralentissement favorable à la déposition des matières en transit. On en trouve plus d'une centaine sur le réseau parisien, ils représentent un volume de stockage de 5900 m³.

Une autre méthode consiste à placer des réservoirs de chasse en tête ou au niveau haut d'une petite ligne. Ces réservoirs sont des réserves d'eau non potable libérées brutalement dans la cunette de l'égout et entraînant les déchets sur quelques dizaines de mètres. On compte environ 6000 réservoirs de chasse à Paris.

Des systèmes de vannes automatiques "Hydrass" (cf. Figure VII-5) sont aussi utilisés sur de petits collecteurs. En position fermée la vanne retient les eaux jusqu'à un seuil. Quand le seuil est atteint, la vanne bascule et libère la quantité d'eau stockée derrière la vanne pour assurer un nettoyage de l'aval par effet de chasse.



Figure VII-5 - Vanne Hydrass en fonctionnement à Paris (à gauche) et à Marseille (au milieu, à droite)

Enfin, l'utilisation de bouches d'égout sélectives permet de retenir en surface les gros solides tels que des bouteilles, canettes, journaux,... et empêchent ainsi leur pénétration dans le réseau. Les bouches sont ensuite nettoyées avec le reste de la chaussée par le service d'entretien de la voirie.

Cependant ces solutions restent insuffisantes et on trouve des dépôts dans près de 90 % du réseau d'assainissement. Ces dépôts ont des hauteurs variables allant de quelques centimètres à un mètre (collecteur "rempli" de dépôts).

5. Photos des sites étudiés en Europe



Dundee : le site de Samuels Street

Hildesheim :

Le collecteur étudié avec une arrivée de petit collecteur :



6. La vanne Hydrass sur le collecteur Tobelem, à Marseille



La vanne est mise en place





La vanne bascule : l'eau stockée à l'amont est déversée

La vanne se remet en place jusqu'au prochain basculement



7. La mise en place de la boite d'observation sur le collecteur Saint-Gilles,

dans le Marais

