

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 | Examineur |
| 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 Najji 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 ($v < 0,14\text{m/s}$) 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 ($0,2\text{ m/s} < v < 0,5\text{ m/s}$) 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 boîte d'observation encastrée dans la paroi d'un collecteur du Marais a permis de montrer que la 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 remaniements 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 elle 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 sewer-wall, 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 eau-sédiment 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 unitaire »..... | 3 |
| 2.2. Vers un nouveau programme de recherche : « évolution spatiale des caractéristiques et des 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 |

PARTIE II. ETUDE DU TAUX DE CISAILLEMENT EN RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT UNITAIRE 9

| | |
|---|-----------|
| 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 | 28 |
| CHAPITRE 4. RÉSULTATS | 29 |
| 1. ANALYSE DU MATÉRIEL UTILISÉ | 29 |
| 1.1. Comparaison des résultats obtenus suivant le matériel utilisé | 29 |
| 1.2. Incertitudes associées aux matériels utilisés | 30 |
| 1.2.1. Les incertitudes liées à l'appareil..... | 30 |
| 1.2.2. Les incertitudes liées au positionnement de l'appareil..... | 31 |
| 2. ANALYSE DU CALCUL DU CISAILLEMENT SANS DÉPÔTS | 31 |
| 2.1. Analyse des données ADV..... | 31 |
| 2.2. Analyse des données de vitesse du micro-moulinet | 34 |
| 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 | 36 |
| 2.5. Discussion : quelle méthode choisir ? | 38 |
| 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..... | 40 |
| 3.2.1. Collecteur Saint-Gilles | 40 |
| 3.2.2. Collecteur Rivoli..... | 41 |
| 3.3. Analyse des données ADV..... | 44 |
| 3.4. Discussion | 45 |
| CHAPITRE 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES..... | 47 |

| | |
|--|-----------|
| PARTIE III. CARACTÉRISATION DE L'INTERFACE EAU-SÉDIMENT | 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 | 71 |
| 2.3.1. La boîte à prélèvement | 71 |
| 2.3.2. Les analyses physico-chimiques | 72 |
| 3. LE SUIVI DES COLLECTEURS DU MARAIS : RÉSULTATS | 72 |
| 3.1. Nature de l'interface eau – sédiment | 72 |
| 3.2. Caractéristiques physico-chimiques de la couche organique | 74 |
| 3.3. Cartographie de la couche organique..... | 76 |
| 3.3.1. Evolution des dépôts grossiers et de la vitesse moyenne | 77 |
| 3.3.2. Interface eau - sédiment | 78 |
| 3.3.3. Suivi serré de l'amont du collecteur Saint-Gilles | 79 |
| 3.3.4. Suivi des collecteurs Vieille du Temple et Saint-Antoine..... | 80 |
| 3.4. Discussion des résultats | 80 |
| 3.4.1. Comparaison avec la cartographie réalisée par Ahyerre (1999)..... | 80 |
| 3.4.2. Comparaison avec les stocks érodés par temps de pluie | 81 |
| 3.4.3. Taux de cisaillement | 82 |
| 3.5. Conclusions | 83 |
| 4. RÉALISATION D'OBSERVATIONS EN EUROPE | 84 |
| 4.1. Choix des sites..... | 84 |
| 4.1.1. Sites principaux : Dundee, Hildesheim | 84 |
| 4.1.2. Sites complémentaires..... | 85 |
| 4.2. Méthodologie utilisée | 86 |
| 4.3. Résultats..... | 87 |
| 4.3.1. Dundee | 87 |
| 4.3.2. Hildesheim..... | 89 |
| 4.3.3. Marseille..... | 90 |
| 4.3.4. Yorkshire (G-B)..... | 92 |
| 4.4. Conclusions | 92 |
| CHAPITRE 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES..... | 94 |

PARTIE IV. DYNAMIQUE DE L'INTERFACE EAU-SÉDIMENT..... 97

| | |
|---|------------|
| 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..... | 152 |
| 1.1. L'évaluation du taux de cisaillement..... | 152 |
| 1.2. L'interface eau-sédiment dans la bassin versant du Marais..... | 153 |
| 1.3. L'interface eau-sédiment dans des bassins versants hors du Marais..... | 153 |
| 1.4. La dynamique de la couche organique..... | 154 |

| | |
|--|-----|
| 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 VI. BIBLIOGRAPHIE | 159 |
|---------------------------------------|------------|

| | |
|----------------------------------|------------|
| PARTIE VII. ANNEXES | 171 |
|----------------------------------|------------|

| | |
|---|-----|
| 1. NOTATIONS | 172 |
| 2. TABLE DES FIGURES..... | 173 |
| 3. TABLE DES TABLEAUX..... | 177 |
| 4. LE RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT PARISIEN..... | 179 |
| 4.1. Les égouts | 179 |
| 4.2. Les collecteurs..... | 179 |
| 4.3. Les émissaires | 180 |
| 4.4. Fonctionnement du réseau..... | 181 |
| 4.5. Les problèmes liés aux dépôts dans le réseau d'assainissement..... | 181 |
| 5. PHOTOS DES SITES ÉTUDIÉS EN EUROPE | 184 |
| 6. LA VANNE HYDRASS SUR LE COLLECTEUR TOBELEM, À MARSEILLE..... | 185 |
| 7. LA MISE EN PLACE DE LA BOÎTE D'OBSERVATION SUR LE COLLECTEUR SAINT-GILLES, DANS LE MARAIS..... | 186 |

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, la Ville 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 événements 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.

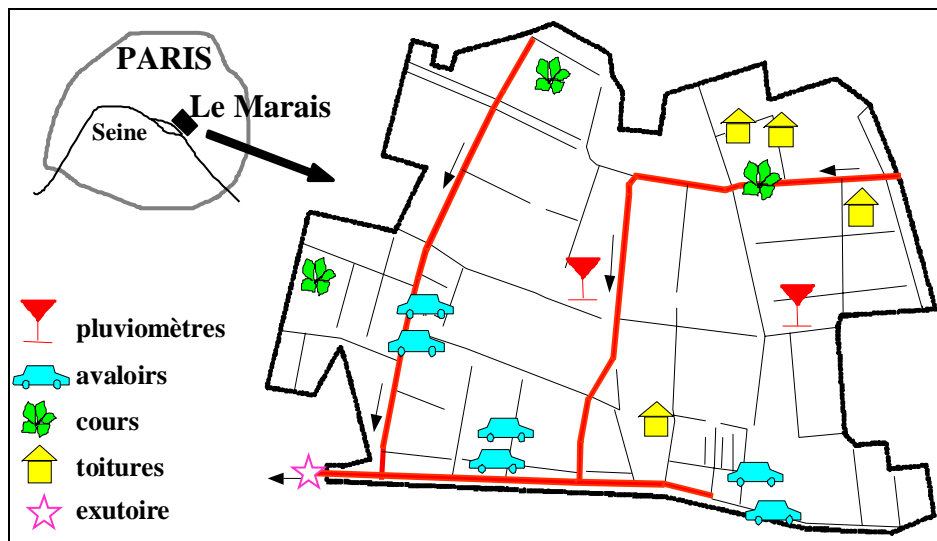


Figure I-1 – Le bassin versant du Marais – Exemple de dispositifs de suivis mis en place pour l'analyse des eaux ruisselées en surface du bassin

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

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.

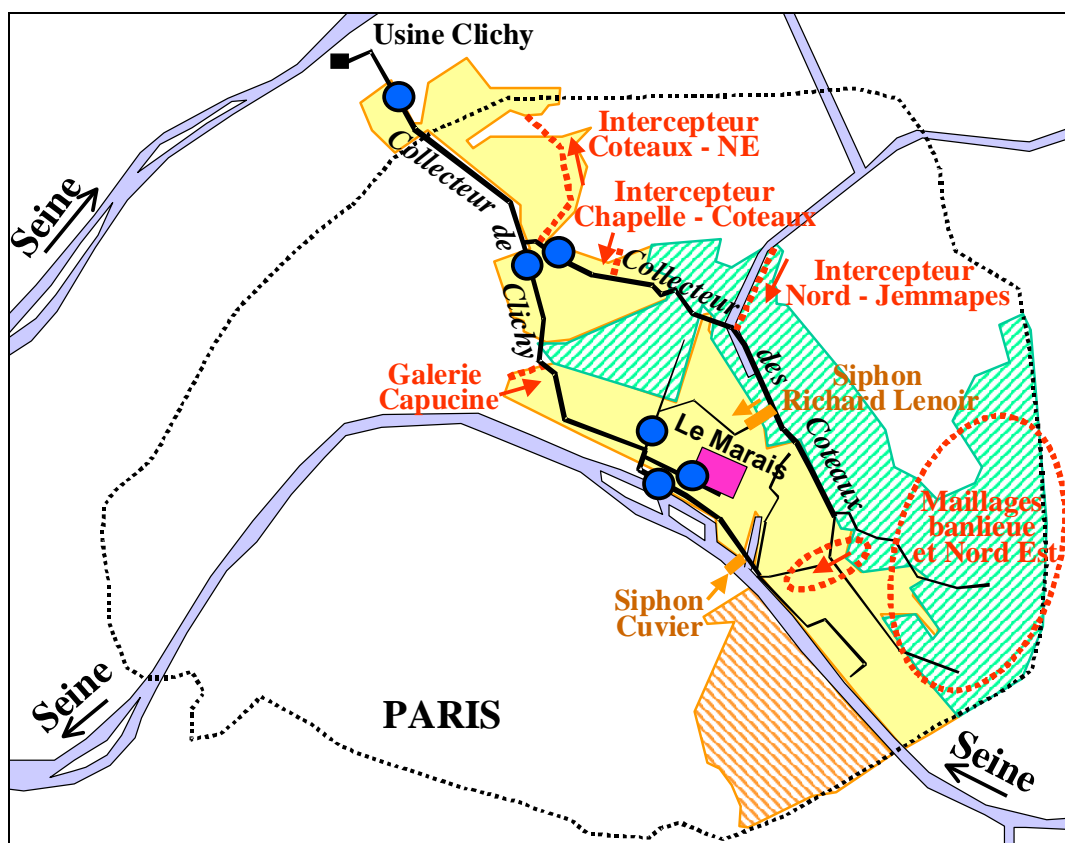


Figure I-2 – OPUR : les 6 sites de mesures (ronds bleus)

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 est-elle 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-à-dire 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 eau-sédiment 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.

