

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.

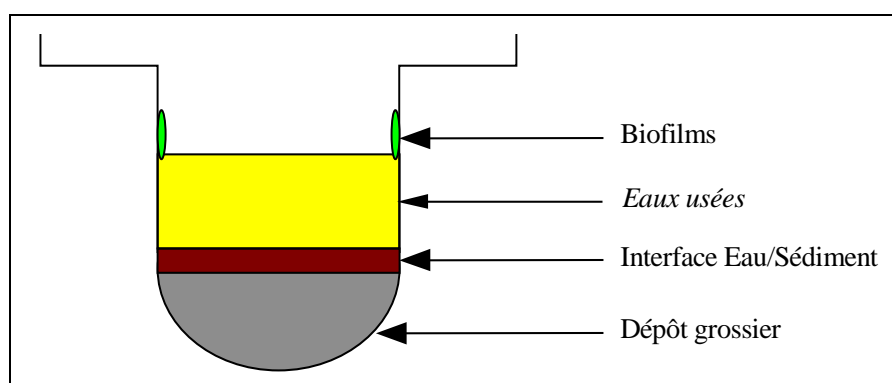


Figure III-1 – Typologie des dépôts en réseau d'assainissement

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

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 eau-sédiment. 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 boîtes 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 boîtes 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 boîtes affleure ainsi au niveau du nouveau radier constitué (cf. Figure III-2).

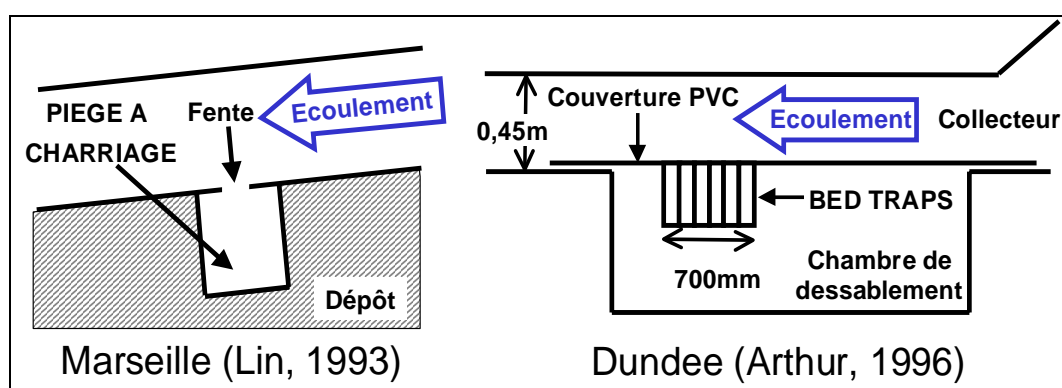


Figure III-2 – Schéma des pièges à charriage et des « bed traps »

Les solides piégés par Lin (1993) ont des caractéristiques physiques proches des dépôts grossiers prélevés à Marseille ($d_{50} = 630 \mu\text{m}$, masse volumique $> 2000 \text{ kg/m}^3$). 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 d'échantillonnage	Population drainée (habitants)	ρ_{humide} (kg/m^3)	$\rho_{\text{sèche}}$ (kg/m^3)	MV/MS (%)	DCO/DBO ₅
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 peuvent apporter des explications aux différences observées sur les solides prélevés :

- Lin (1993) a construit des « bed traps » avec une fente de $L_{bt} = 10 \text{ cm}$ 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).

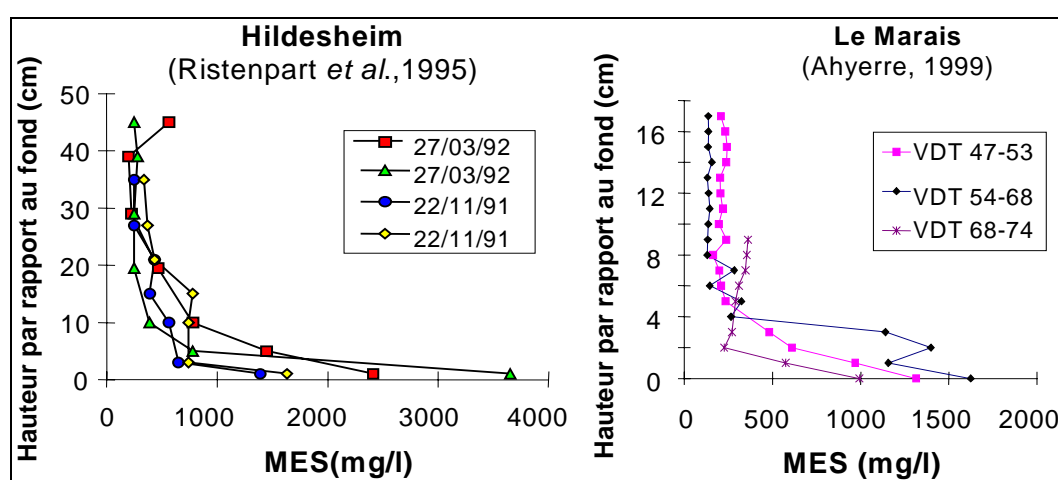


Figure III-3- Exemple de profil de concentration relevés en réseau d'assainissement unitaire

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 appareils utilisés. On remarque que le système mis au point par Verbanck (1993) ne permet pas de prélever simultanément à plusieurs profondeurs.

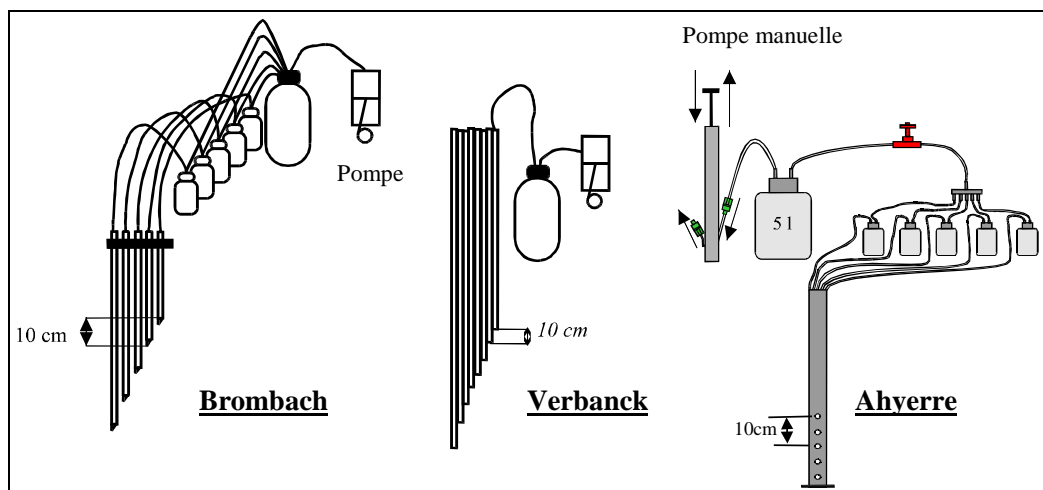


Figure III-4 - Méthodes de prélèvement du « fluid sediment » par différents auteurs

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 <i>et al.</i> (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

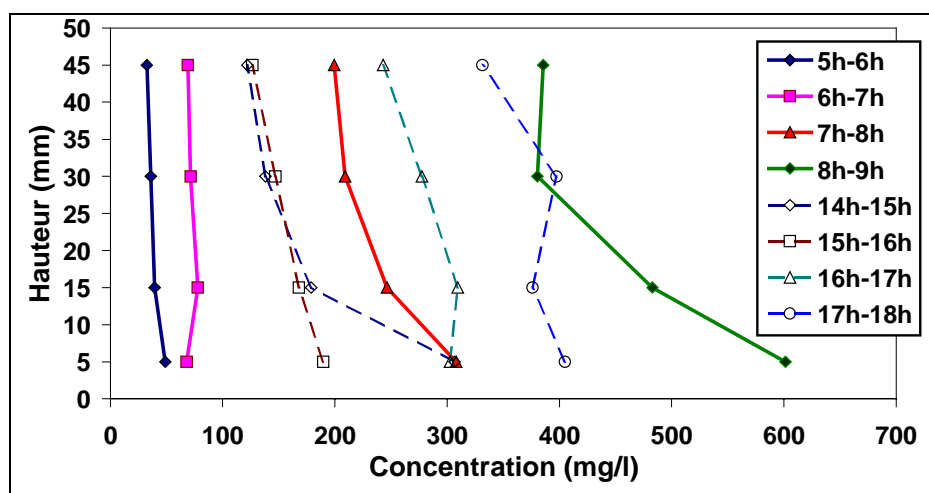


Figure III-5 – Evolution des profils de concentration en MES en fonction de l'heure de la journée, d'après les données mesurées sur Constable Street par Arthur (1996)

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).

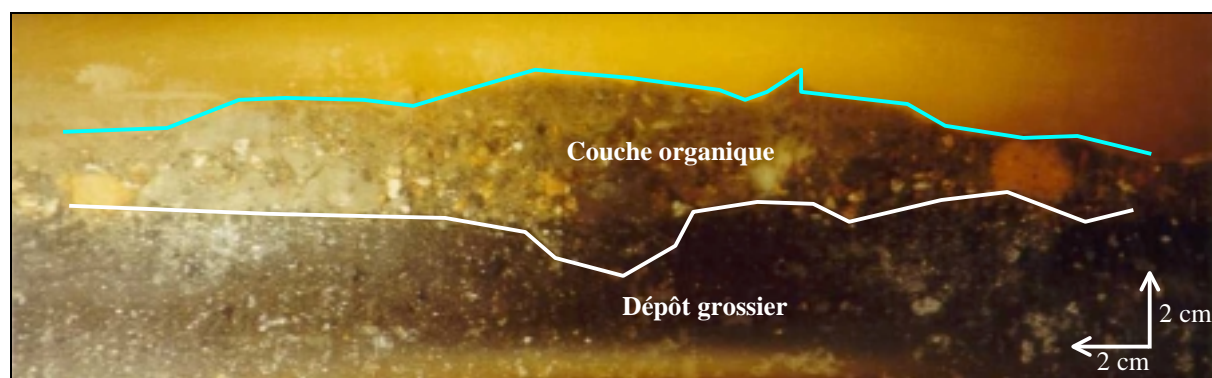


Figure III-6 - Vue en coupe de l'interface eau-sédiment

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 boîte 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 boîte est vitrée et un miroir incliné à 45°, à l'intérieur de la boîte, permet d'observer l'interface eau/sédiment. La hauteur du miroir dans la boîte est ajustable grâce à des cales. Un couvercle étanche permet de laisser la boîte dans l'égout durant de longues périodes.

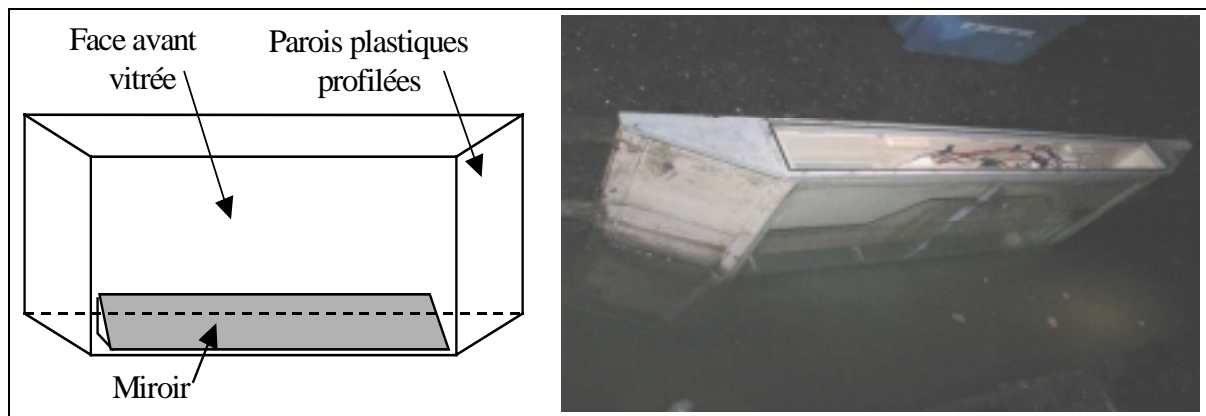


Figure III-7 – Boîte d'observation

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

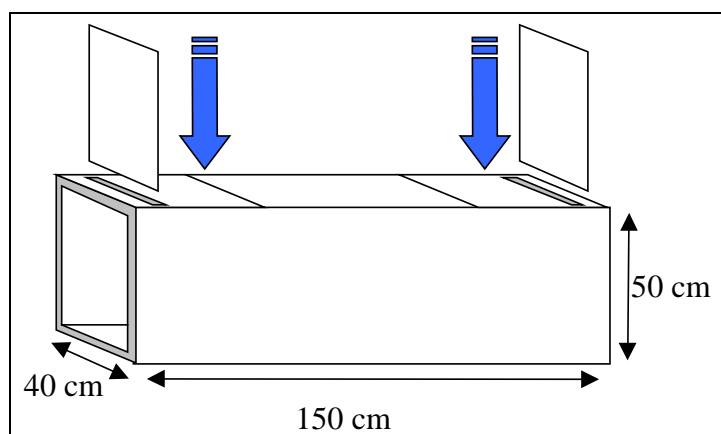


Figure III-8 - Schéma de la boîte de prélèvement

Le système est placé dans la cunette et enfoncé dans le dépôt grossier suivant la direction de l'écoulement. La boîte 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 boîte afin d'isoler l'échantillon. L'eau usée piégée dans la boîte 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 à 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).

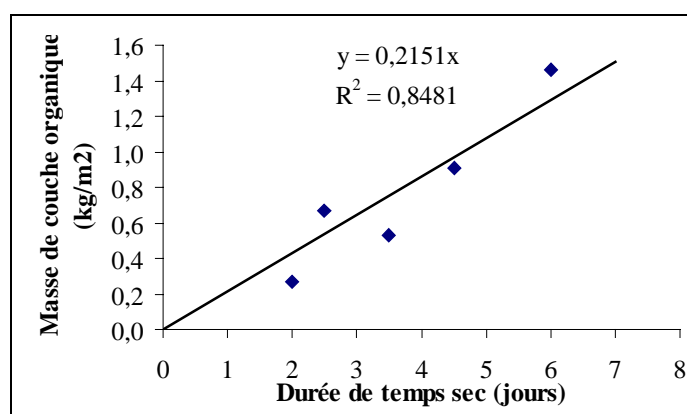


Figure III-9 -Accumulation de couche organique par temps sec (Ahyerre,1999)

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 $0,4 \text{ N/m}^2$.

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 un 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 %
Matières solides	Bactéries, cellules intestinales mortes	7,5 %
	Résidus non-digérés (protéines, cellulose...)	7,5 %
	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 *et al.*, 1976)

2.2.1.4. Notion d'Equivalent Habitant

Les rejets des particuliers sont un mélange d'eaux domestiques (vaisselle, lessive) et d'eaux-vannes (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 <i>et al.</i> , 1996)	110
Poste cuisine, d'après Siegrist <i>et al.</i> (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 des particules	54 %	0,83 gO ₂ /g	0,47 gO ₂ /g	V ₈₀ = 0,37 cm/s V ₅₀ = 0,02 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 caractéristiques 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 croît avec un taux d'accumulation de 116 kg/jour et son seuil d'érosion est de l'ordre de $0,4 \text{ N/m}^2$;
- la couche organique est présente dans les zones où le taux de cisaillement est inférieur à $0,1 \text{ N/m}^2$.

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 paraît 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.

CHAPITRE 3. Caractérisation et localisation de l'interface

eau – sédiment

1. Système d'observation avec un endoscope

Le système d'observation portable 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.

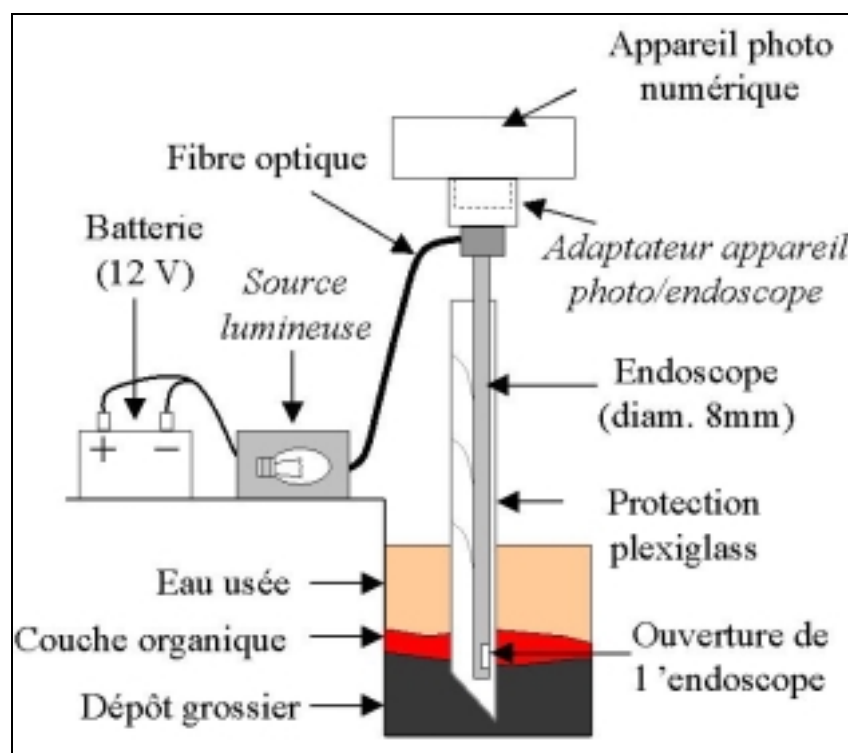


Figure III-10 - Système d'observation

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 photos des sédiments peuvent donc être prises sur le site : la zone observée a un diamètre de 4 mm.

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.

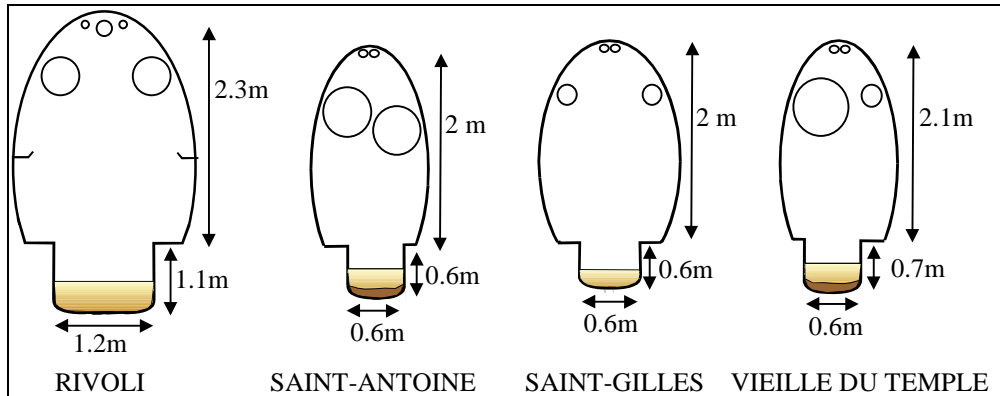


Figure III-12 -Vue en coupe de différents collecteurs du Marais

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 :

- Collecteur Vieille du temple 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.

- Collecteur St Gilles 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%.

- Collecteur Saint-Antoine/Rivoli 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 mêmes 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 (niveau 1) 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 boîte 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 boîte 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 $\rho_{sèche_apparente}$ 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 $\rho_{particulaire}$ 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 boîte 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.

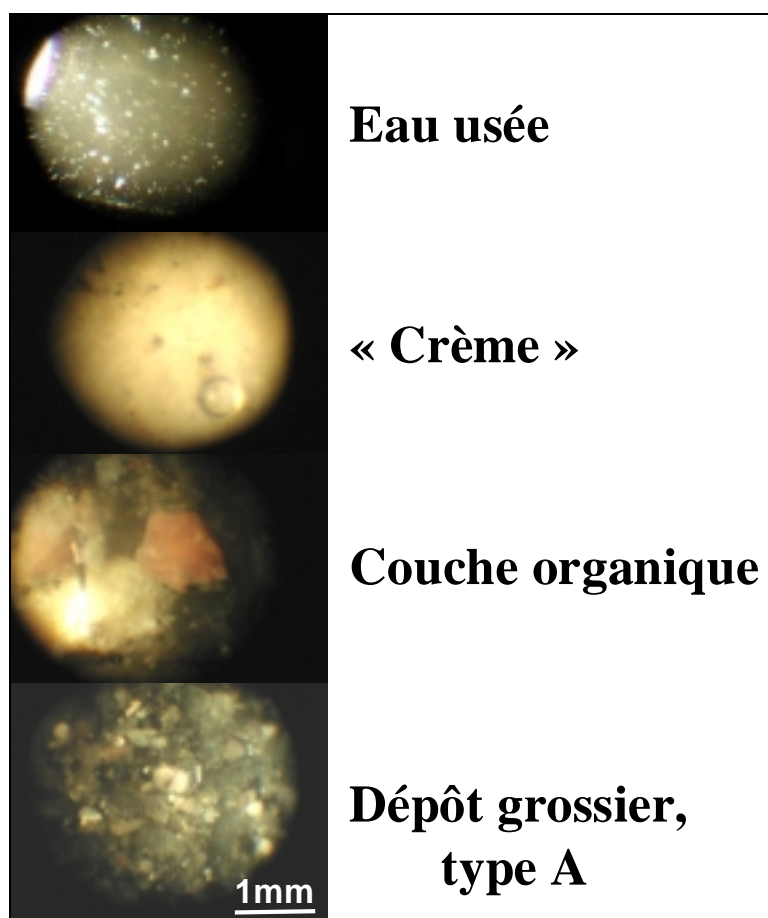


Figure III-14 - Images obtenues avec le système endoscope

Nous n'avons pas réussi à prélever et à analyser la « crème » avec la boîte 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
DBO₅	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/DBO₅	gO ₂ /gMS	2,7	4,1	3,4	--	1,6	3,9
ρ_{humide}	kg/m ³	1046	1249	1026	1116	1135	1315
$\rho_{sèche_apparente}$	kg/m ³	137	226	167	118	165	285
$\rho_{particulaire}$	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 avoir 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 %).

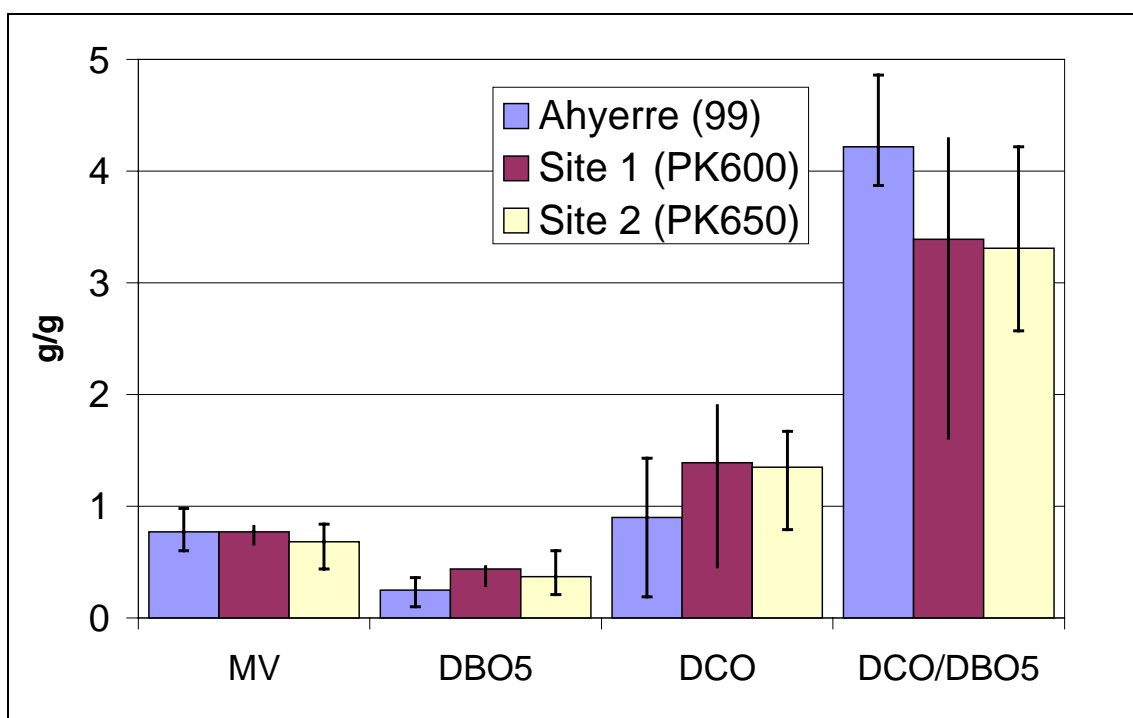


Figure III-15 -Comparaison des charges polluantes de la couche organique

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 particulières 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.

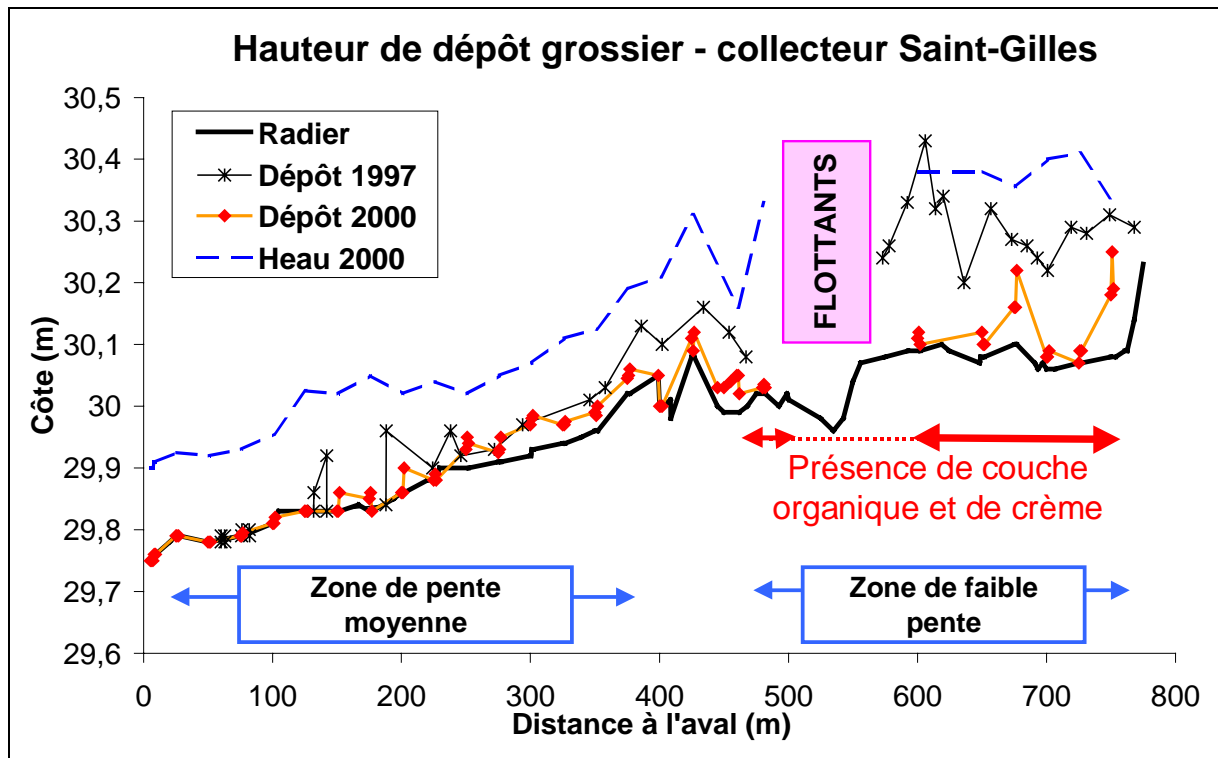


Figure III-16 - Dépôts grossiers et hauteur d'eau relevés sur Saint-Gilles

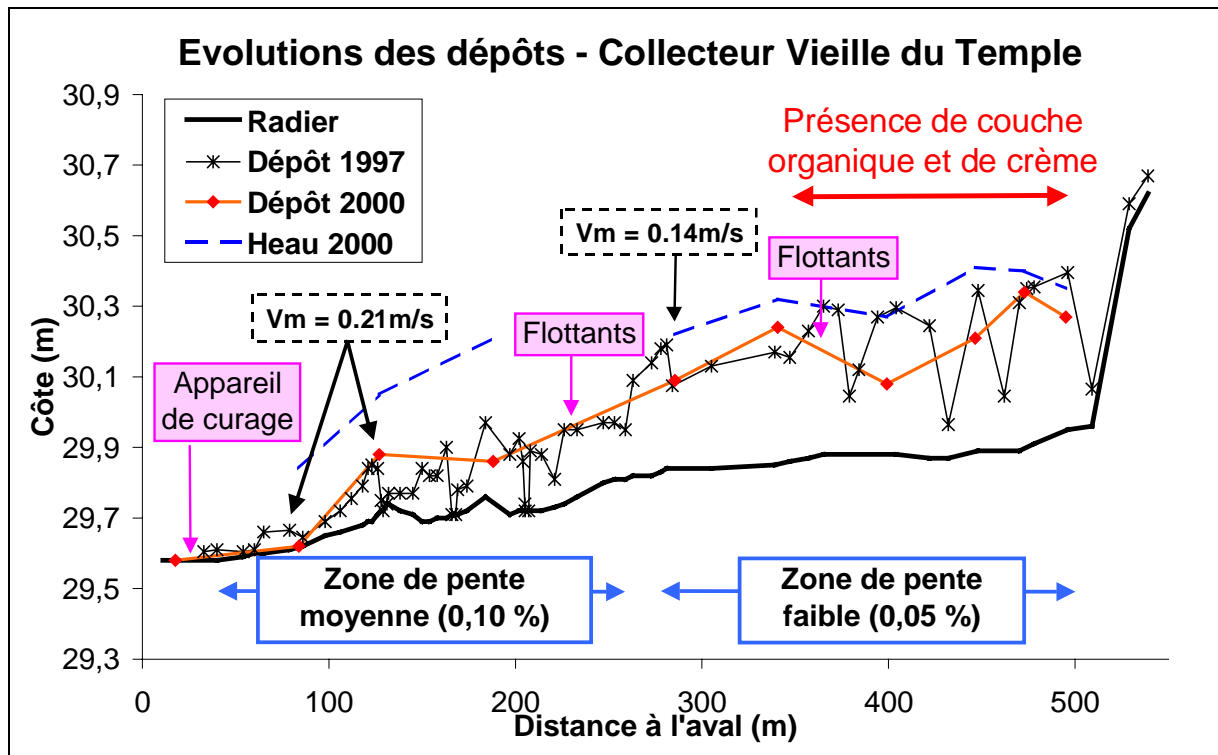


Figure III-17 – Dépôts grossiers et hauteur d'eau sur Vieille du Temple

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.

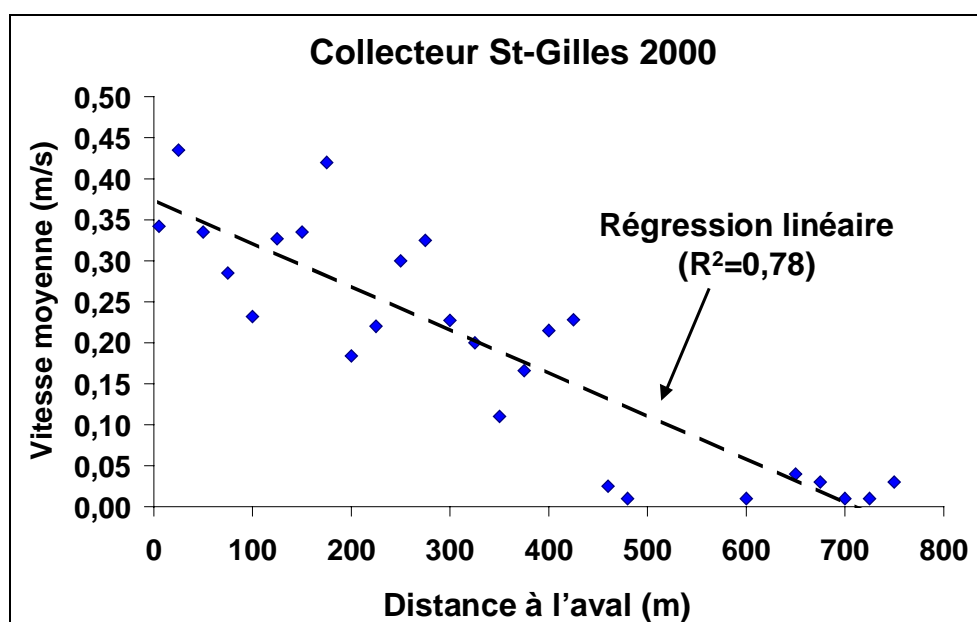


Figure III-18 -Relevé des vitesses moyennes sur le collecteur Saint-Gilles

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.

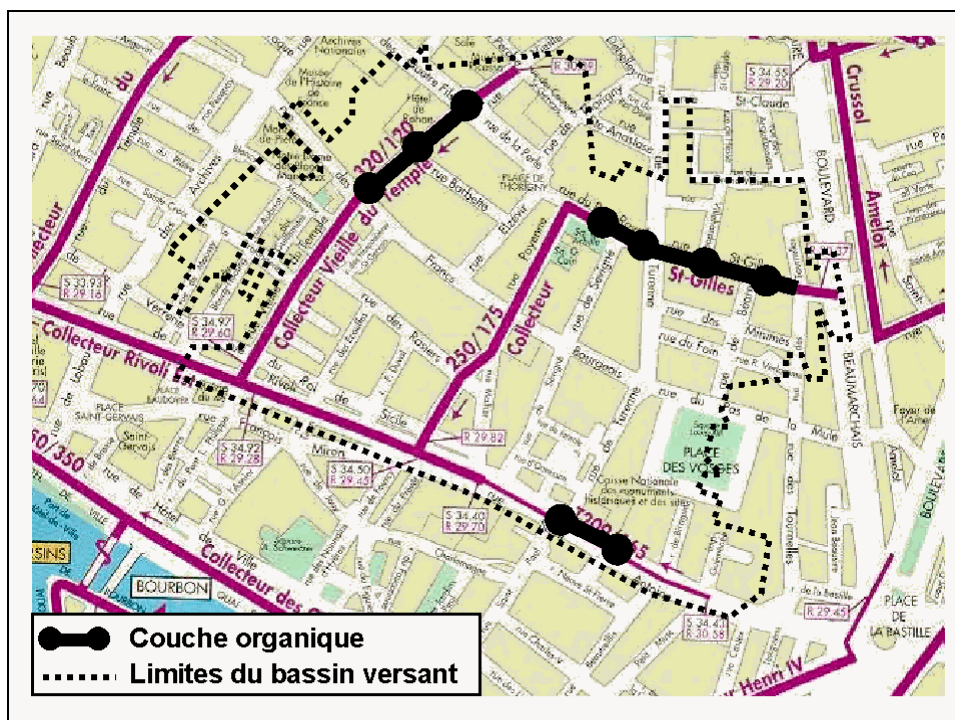


Figure III-19 – Localisation de la couche organique sur Le Marais

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 ($I_{max} = 90 \text{ mm/h}$, $I_{moyen} = 5,7 \text{ mm/h}$, durée = 34 min.) et du 24/01/01 ($I_{max} = 40 \text{ mm/h}$, $I_{moyen} = 4,5 \text{ mm/h}$, 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.

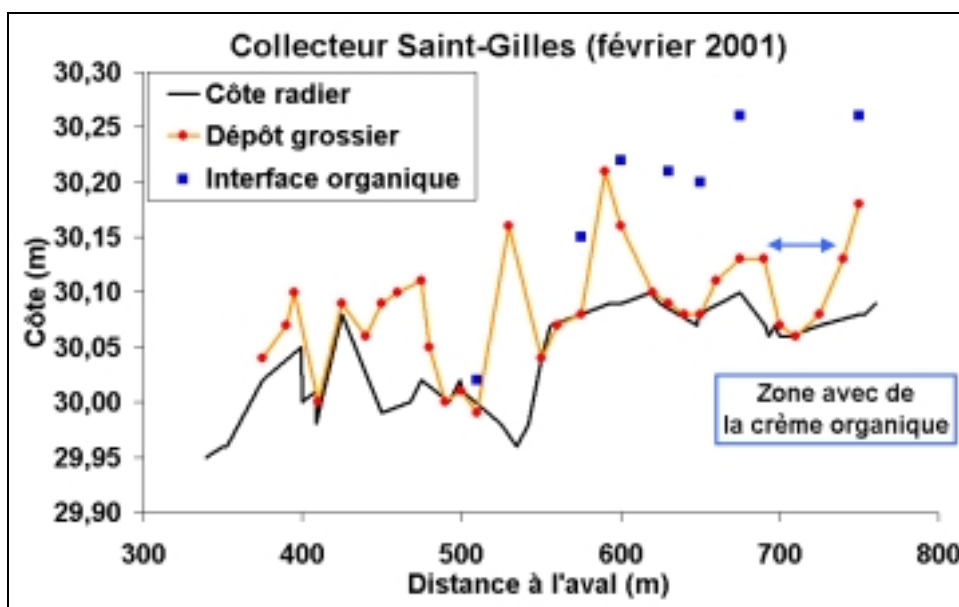


Figure III-20 - Observations réalisées sur l'amont du collecteur Saint-Gilles (02/01)

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 inexploitable 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.

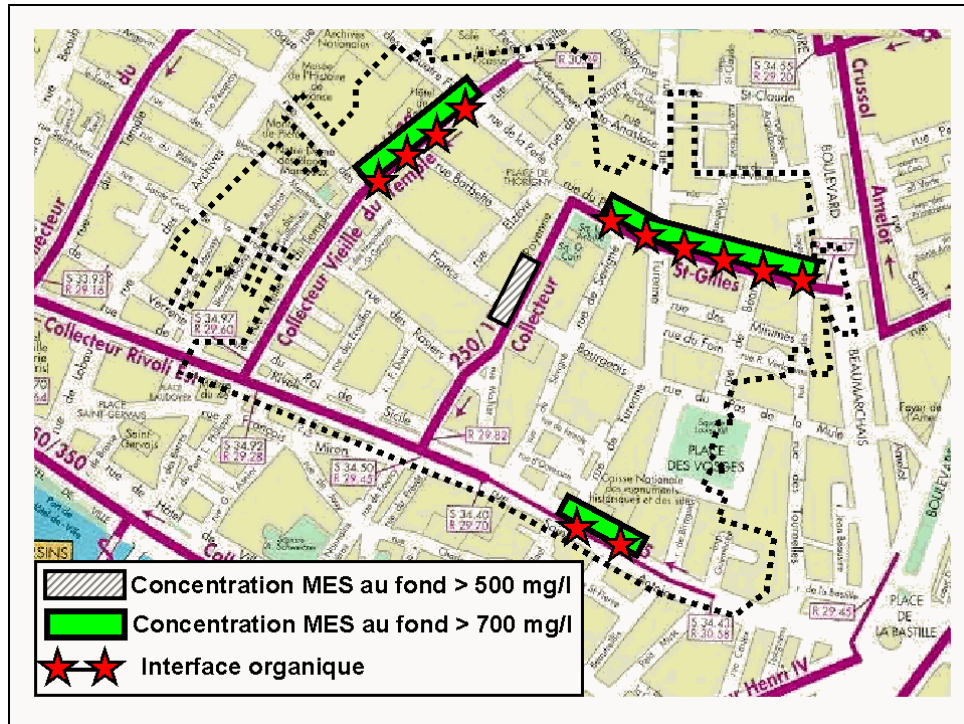


Figure III-21 - Cartographie de l'interface eau – sédiment

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 m³ 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 événement 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).

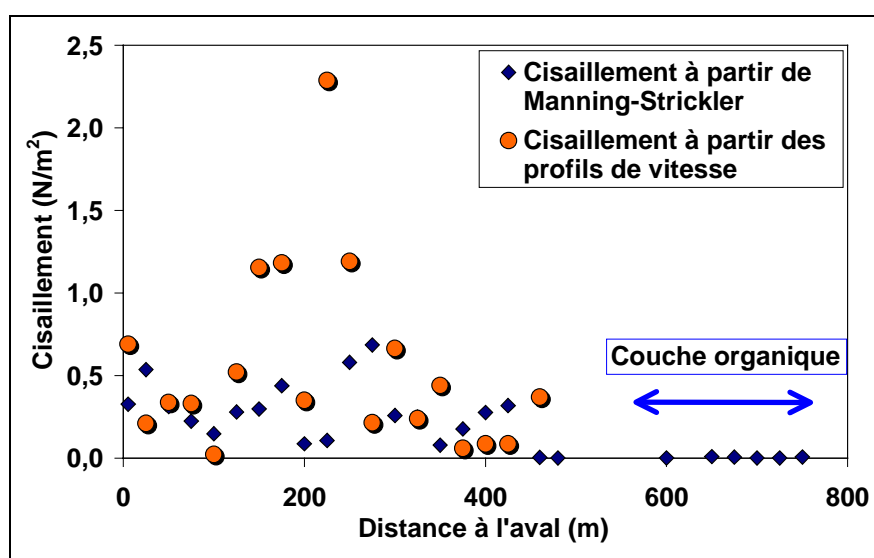


Figure III-22 – Evolution du cisaillement le long du collecteur Saint-Gilles

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 :

- $MVS / MES = 63 \% \text{ à } 80 \%$ (médiane = 76 %)
- $DCO / MES = 0,8 \text{ g/g à } 1,8 \text{ g/g}$ (médiane = 1,5 g/g)
- $DBO_5 / MES = 0,25 \text{ g/g à } 0,55 \text{ g/g}$ (médiane = 0,4 g/g)
- Teneur en eau = 80 % à 89 % (médiane = 84 %)
- $\rho_{\text{sèche_apparente}} = 129 \text{ kg/m}^3 \text{ à } 256 \text{ kg/m}^3$ (médiane = 166 kg/m^3)
- $\rho_{\text{humide}} = 1038 \text{ kg/m}^3 \text{ à } 1282 \text{ kg/m}^3$ (médiane = 1125 kg/m^3)

Les charges particulières 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 ($v < 0,14 \text{ m/s}$) 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 (Crabtree, 1989 ; Ashley *et al.*, 1992 ; Arthur, 1996) ;
- à Hildesheim en Allemagne (Ristenpart, 1995).

Le site de Bruxelles a dû 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 une 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	Hildesheim	Le Marais
Surface du Bassin	245 ha	739 ha	42 ha
Population	13,300	100,000	12,372
Type d'égouts (sur la zone étudiée)	Section ovoïde, en brique	Section circulaire, en béton	Cunette, en béton
Hauteur du collecteur	90 cm	85 cm	2 m
Pente	0,06 %	-0,056 %	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

4.3.1.1. Site principal

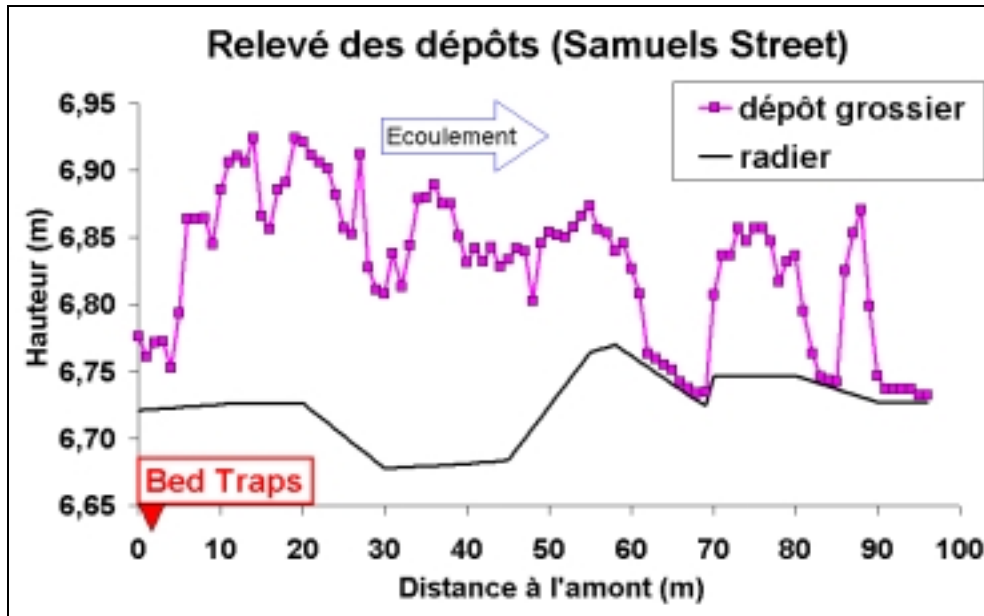


Figure III-24 – Suivi du tronçon de Samuels Street à Dundee (réalisé par A. Fraser)

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.

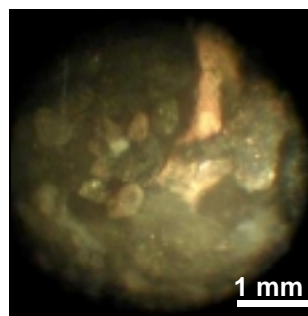


Figure III-25 – Photo du dépôt grossier à Dundee

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 détritits 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 $DCO/MS = 2,2 \text{ g/g}$. 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 $0,15 \text{ m/s}$ 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 éparpillées 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 dû 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 5 m 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.

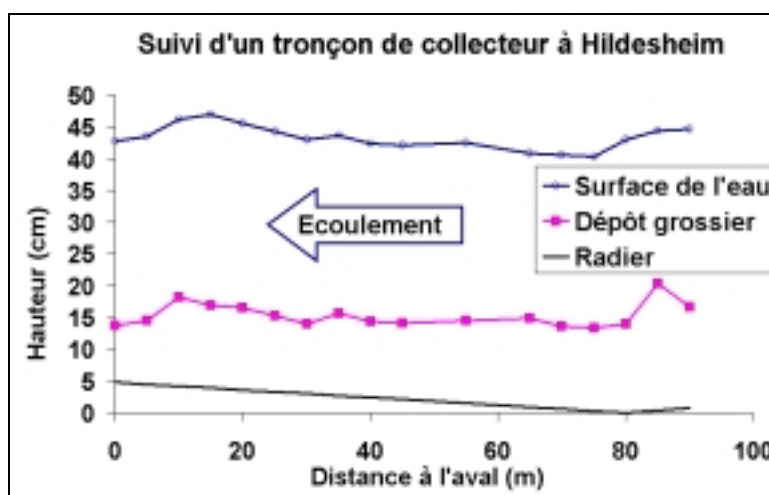


Figure III-27 – Suivi du collecteur d'Hildesheim (28/08/02)

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 au-dessus du dépôt grossier. Enfin, des matières organiques dispersées ont été observées en un point, au niveau d'une arrivée latérale.

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

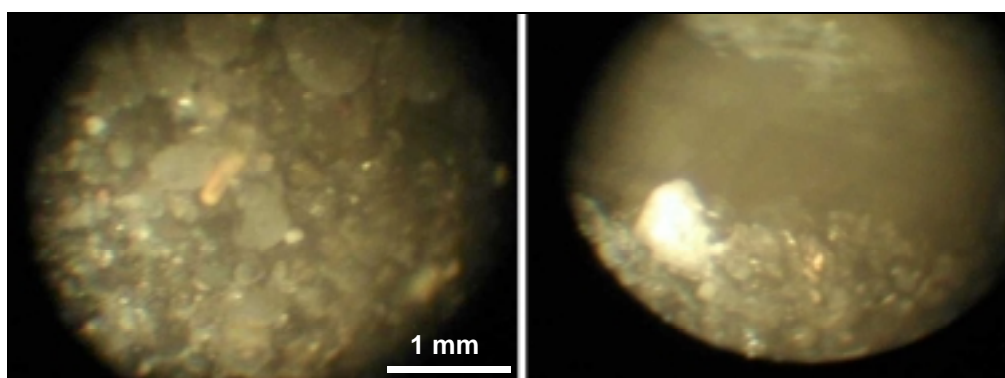


Figure III-28 – Dépôt grossier et interface eau-dépôt grossier, à Hildesheim (08:30, le 29/08/02)

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).

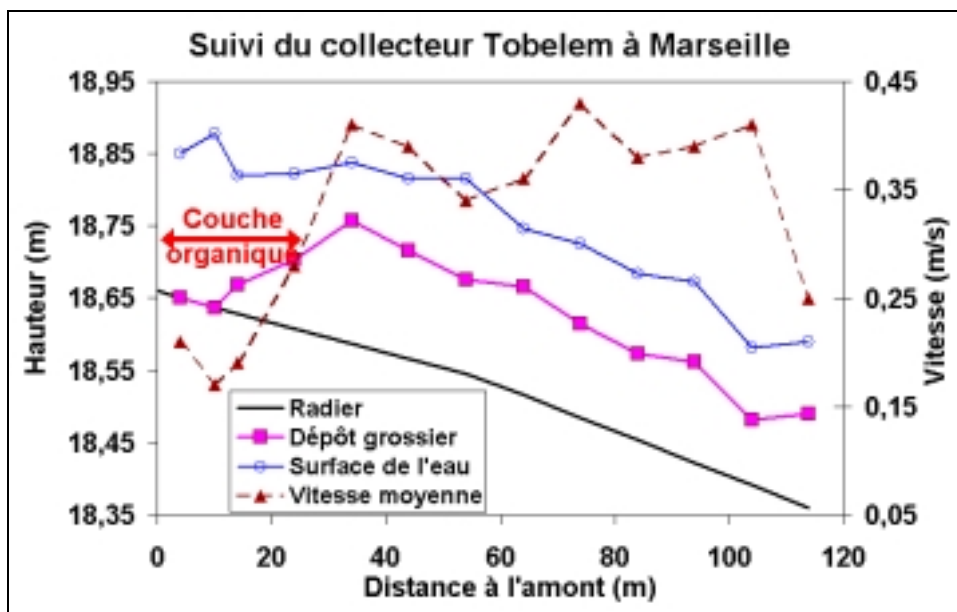


Figure III-29 – Suivi du collecteur Tobelem à Marseille avant la mise en route de la vanne Hydrass (située au point 0).

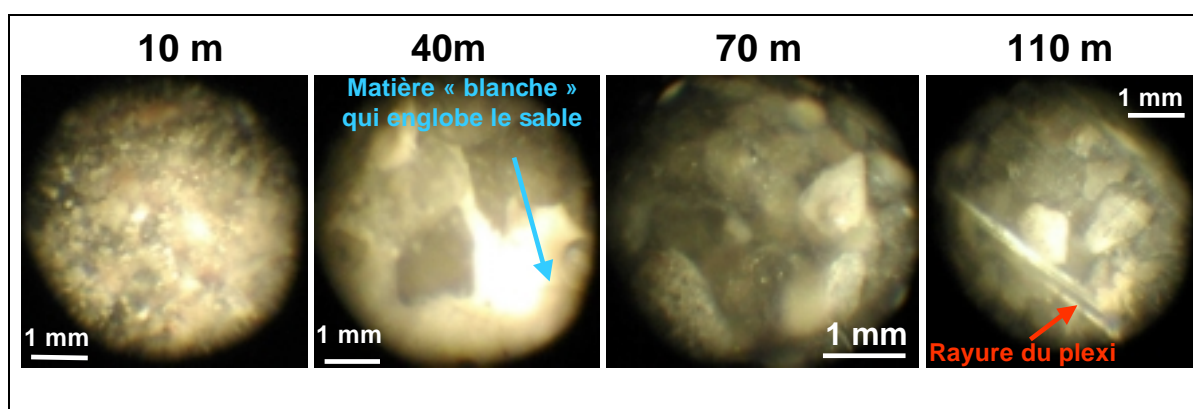


Figure III-30 – Photos des dépôts dans le collecteur Tobelem, avant la mise en route de la vanne (06/09/01)

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 éparpillées 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.

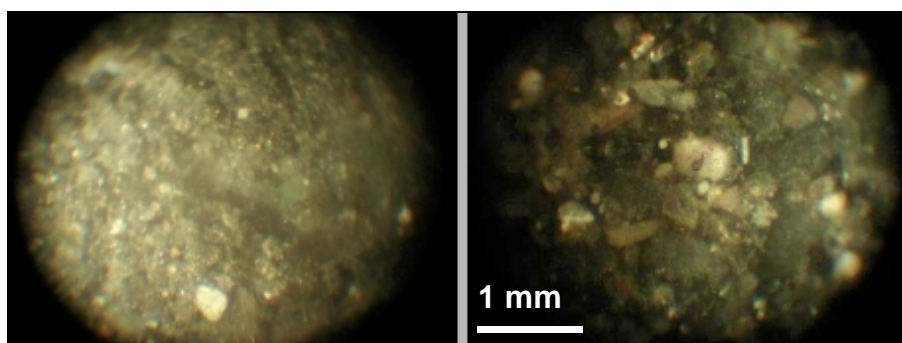


Figure III-31 – A gauche, dépôt sédimenté à Mexborough ; à droite, dépôt grossier sédimenté dans le Marais.

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 désagréation 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 : $1,5 \text{ gO}_2/\text{g}$; DBO₅/MS : $0,4 \text{ gO}_2/\text{g}$) 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.

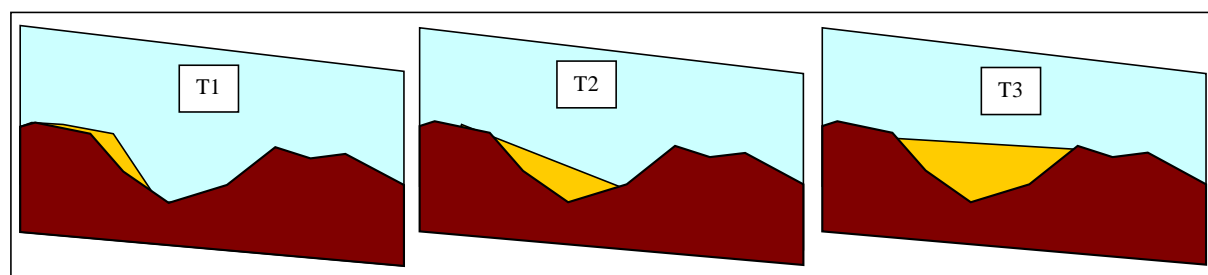


Figure III-32 -Proposition de développement de la couche organique dans une « cuvette » du dépôt grossier