

PARTIE IV. Dynamique de l'interface eau-sédiment

CHAPITRE 1. Introduction

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CHAPITRE 2. Etude bibliographique : les dépôts cohésifs

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

1. Le comportement dynamique des dépôts cohésifs

1.1. Etude des boues dans les estuaires

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

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

1.1.1.1. Formation des boues

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

1.1.1.2. Consolidation des boues

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

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

hydrauliques varient peu, la zone de fluide à forte concentration peut se déposer et former une couche de boue fluide plus dense.

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

1.1.1.3. Erosion des boues

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

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

1.1.1.4. Le rôle des floccs

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

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

D'après Lick et Huang (1993) la vitesse de chute des floccs est fonction des conditions qui ont conduit à leur formation. Ainsi, dans un écoulement donné, un flocc peut avoir une vitesse de chute plus faible que le même flocc constitué dans un écoulement avec un cisaillement au fond

plus fort ou une concentration plus forte. Ils notent que la formation des floccs est d'autant plus rapide, et le diamètre d_{50} d'autant plus petit, que le cisaillement au fond ou la concentration en MES sont importants.

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

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

1.1.2. Modélisation du transport de sédiments cohésifs en estuaire

1.1.2.1. Description générale des modèles utilisés

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

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

$$E = E_0 \cdot \left((\tau_o / \tau_{cr})^n - 1 \right)^m \quad \text{Équation IV-1}$$

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

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

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

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

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

1.1.2.2. Mesure de la résistance des boues d'estuaire

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

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

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

1.2. Etudes des dépôts cohésifs en laboratoire

1.2.1. Tests sur des boues d'estuaires

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

1.2.1.1. Expression du taux d'érosion

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

$$E = M \cdot \left(\frac{\tau_o - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \right) \quad \text{Équation IV-3}$$

avec E : flux d'érosion surfacique (kg.m⁻².s⁻¹)

M : coefficient d'érodabilité (kg.m⁻².s⁻¹)

τ_o , τ_{cr} : contrainte de cisaillement à la paroi et critique (N.m⁻²)

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

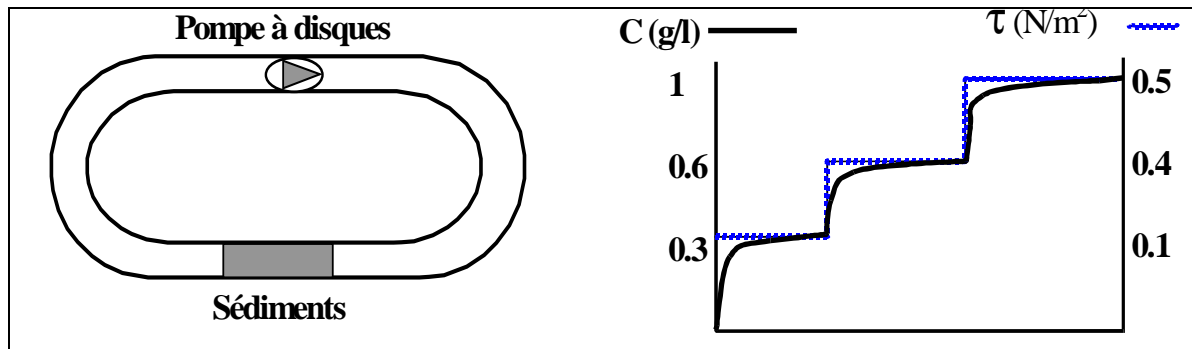


Figure IV-1 - Expérience d'érosion (Piedra-Cueva & Mory, 1995)

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

$$E = E_o \cdot \exp\left(\alpha(\tau_o - \tau_{cr})^{1/2}\right) \quad \text{Équation IV-4}$$

avec τ_o : contrainte appliquée à la paroi ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)

τ_{cr} : résistance au cisaillement du dépôt ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)

α : facteur de proportionnalité, fonction de la température

1.2.1.2. Phénomène de déposition

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

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

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

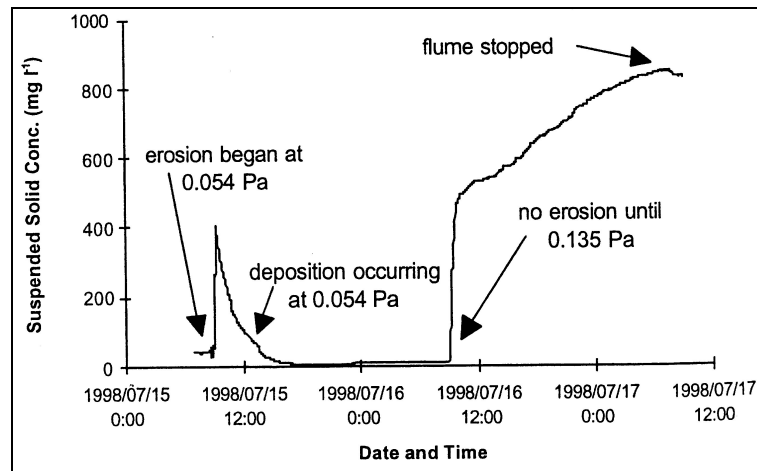


Figure IV-2 - Evolution des concentrations en MES en fonction du temps, rôle de la déposition (Droppo *et al.*, 2001)

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

1.2.1.3. Consolidation biologique

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

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

1.2.1.4. Expériences d'érosion

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

kaolinite, mais il est destiné à réaliser des expériences en estuaire. Dans ce système, le taux de cisaillement est déterminé à partir du profil de vitesse mesuré, en considérant une distribution logarithmique dans la section. Cet appareil permet la mesure du taux de cisaillement minimum à exercer sur un dépôt pour initier son érosion (taux de cisaillement critique).

Les expériences menées sur de la kaolinite ont montré que, après 6 jours de consolidation, la densité du dépôt ainsi que sa résistance au cisaillement augmente avec la profondeur.

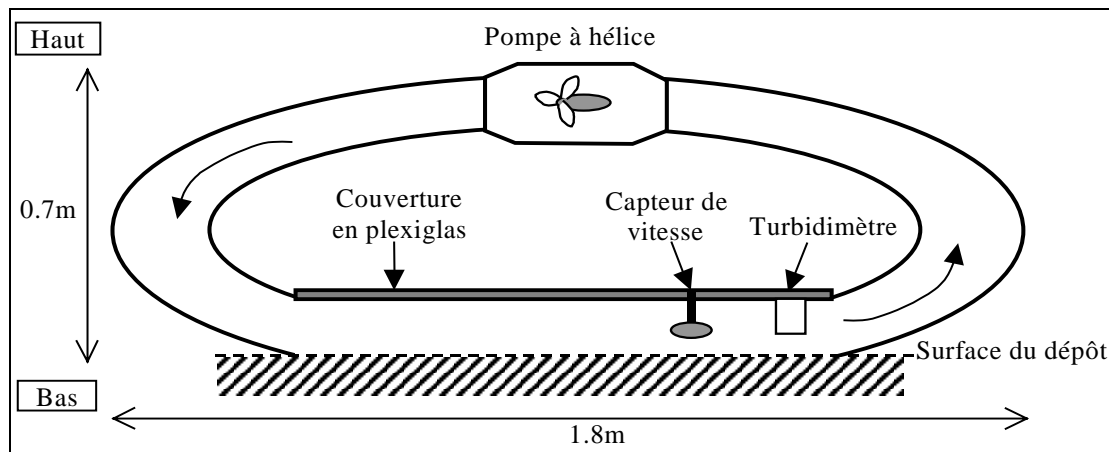


Figure IV-3 – Schéma de principe du ISEF (Houwing & van Rijn, 1998)

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

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

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

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

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

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

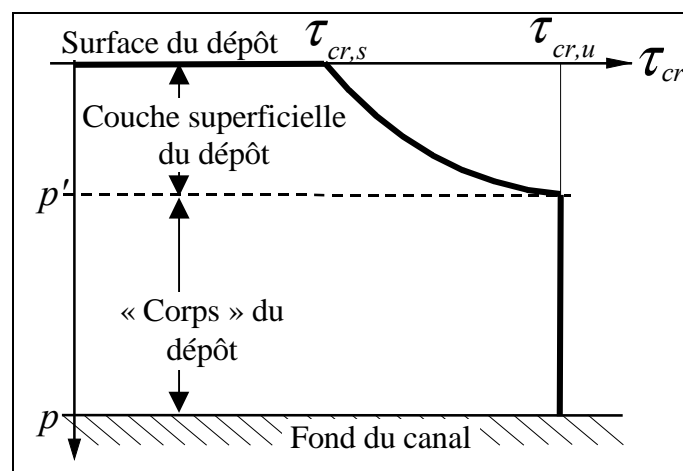


Figure IV-4 - Résistance à l'érosion en fonction de la profondeur dans le dépôt (Skipworth *et al.*, 1999)

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

$$\tau_{cr} = \frac{p^{1/q} (\tau_{cr,u} - \tau_{cr,s})}{p'^{1/q}} + \tau_{cr,s} \quad \text{Équation IV-5}$$

avec τ_{cr} : contrainte de cisaillement critique

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

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

p : hauteur d'érosion du dépôt

p' : hauteur de la couche superficielle du dépôt

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\tau_{cr} = K \cdot \tau_y^a \quad \text{Équation IV-6}$$

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

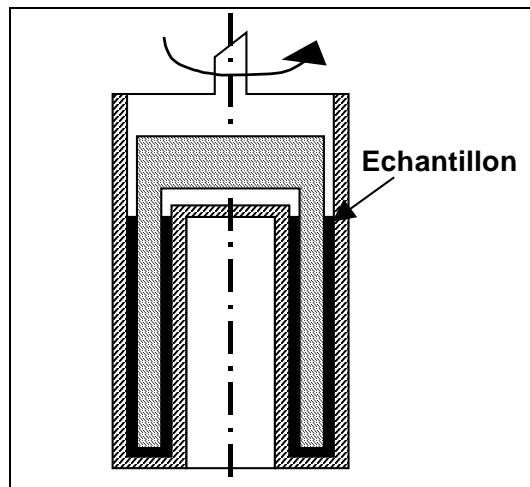


Figure IV-5 - Vue en coupe d'un viscosimètre de Couette

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

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

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

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

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

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

1.2.3.2. Sédiments provenant de Dundee (Ecosse)

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

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

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

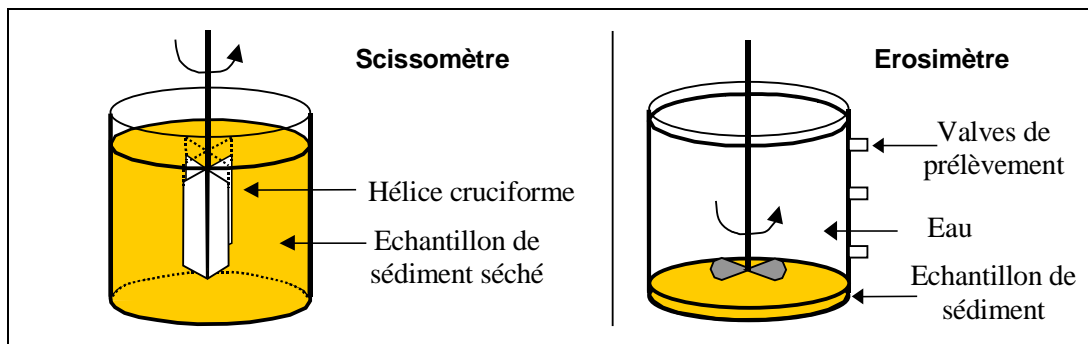


Figure IV-6 - Principe d'un scissomètre avec hélice cruciforme et de l'érosimètre

McGregor *et al.* (1993) ont utilisé un érosimètre sur des sédiments de type A ($d_{50} = 0.25$ mm à 0.60 mm) provenant du réseau de Dundee pour étudier le relargage des polluants durant l'érosion des dépôts de type A. L'échantillon de dépôt est placé au repos dans un cylindre (cf. Figure IV-6) avec de l'eau. Une pale rotative (52 mm x 11 mm) à vitesse contrôlée permet de soumettre le dépôt à différents taux de cisaillement. Les matières remises en suspension sont prélevées dans la colonne d'eau pour analyse. Trois taux de cisaillement ont été testés correspondant à un régime turbulent lisse (0.56 N.m^{-2} ; 0.17 N.m^{-2}) et à un régime laminaire (0.06 N.m^{-2}) : plus le cisaillement est important et plus les concentrations en DBO_5 , DCO et MVS augmentent dans la colonne d'eau. Ces expériences permettent de mettre en évidence une érosion partielle des dépôts de type A à partir de faibles taux de cisaillement.

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

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

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

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

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

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

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

1.3. Conclusion

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

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

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

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

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

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

2. La dynamique de l'interface eau-sédiment en réseau d'assainissement

unitaire : études et modélisation

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

2.1.1. avec une vanne de chasse

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

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

2.1.2. durant une pluie réelle

Verbanck (1995) a observé une pluie réelle sur un tronçon de collecteur à Bruxelles. L'augmentation de la concentration en MES est simultanée à l'augmentation de débit dans le tronçon (cf. Figure IV-7). Cependant le pic de MES dure moins longtemps que le pic de débit. L'analyse des MES circulant durant le pic de débit montre que les particules sont de *nature*

très organique (taux de MVS : 80 % à 90 %), notamment pour les classes granulaires allant de 0.5 mm à 2 mm, ce qui ne correspond pas aux particules des dépôts grossiers. L'origine de ces particules est le « dense undercurrent ».

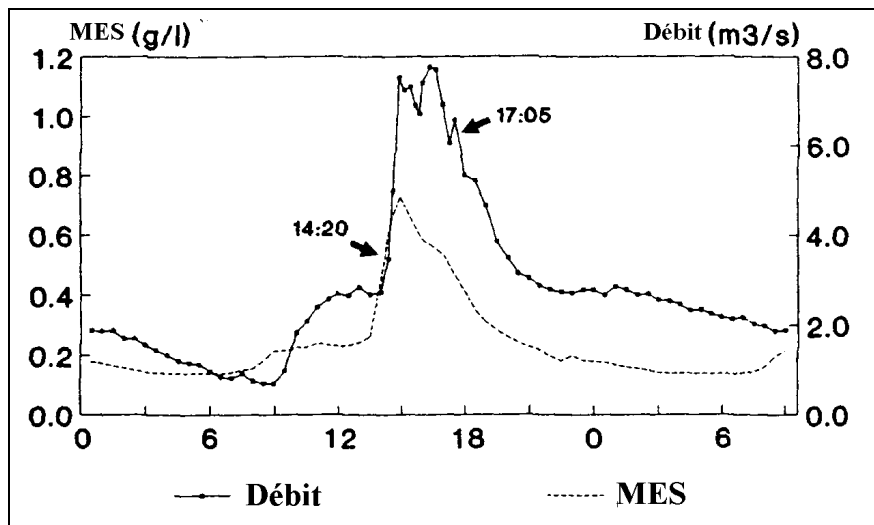


Figure IV-7 - Evolution des MES et du débit durant une pluie (Verbanck,1995)

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

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

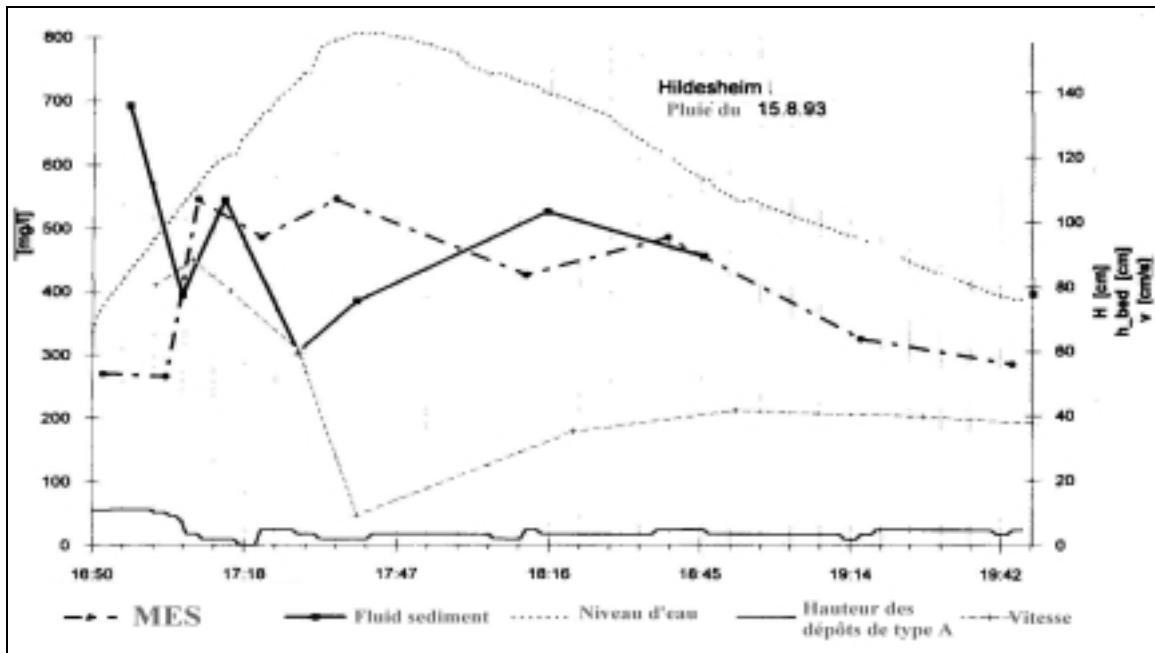


Figure IV-8 - Evolution des MES et du « fluid sediment », de la hauteur d'eau, de la vitesse et de la hauteur du dépôt durant une pluie (Ristenpart, 1997)

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

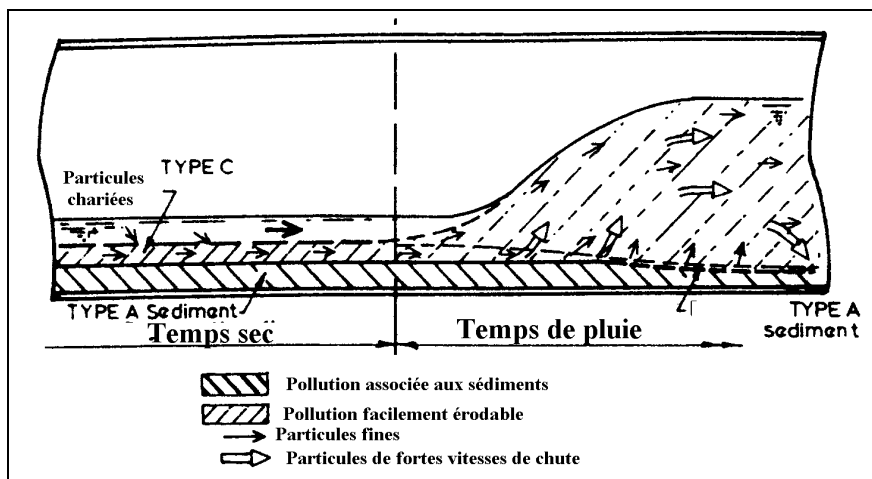


Figure IV-9 - Mécanismes de remise en suspension des dépôts (Ashley *et al.*, 1992)

2.1.3. Avec des augmentations artificielles du débit

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

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

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

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

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

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

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

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

Sur le collecteur étudié, l'érosion de la couche organique débute avec un taux de cisaillement ponctuel très faible ($\tau = 0,05 \text{ N.m}^{-2}$), ce qui montre que la couche organique a une très faible résistance à l'érosion. De plus, l'expérience (A) montre que la couche organique est fortement érodée lors des augmentations de débit et que, plus le cisaillement est important, plus la quantité de matière érodée est importante : ces observations indiquent que l'érosion est liée au taux de cisaillement appliqué en surface de la couche organique. L'analyse des particules érodées durant cette expérience révèle que les particules érodées évoluent au cours de l'expérience : plus le cisaillement est important, plus la teneur en matière volatile diminue. L'expérience (B) montre que la quantité de matière érodable à un seuil de cisaillement donné est limitée : un même taux de cisaillement appliqué deux fois de suite n'entraîne que très peu d'érosion à la seconde application.

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

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

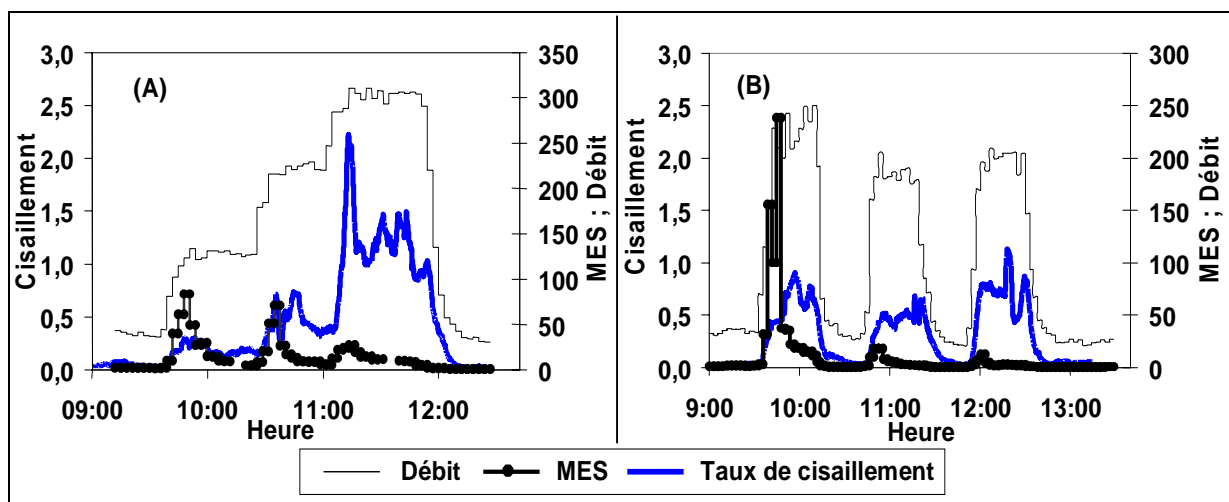


Figure IV-10– Expériences d'érosion menées par (Ahyerre, 1999)

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

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

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

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

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

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

$$MES_{flush} = MES_{TS} + MES_{NBS} + MES_{TypeA} \quad \text{Équation IV-7}$$

2.2.1.1. Contribution des MES de temps sec

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

2.2.1.2. Contribution des NBS

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

$$C_v = -105.73 + 2.55 \times 10^{-3} \left(\frac{I_r \cdot TSSS}{D_r} \right) + 0.2023 \left(\frac{y_o}{y_{\max}} \right) + 47.808 \left(\frac{\tau_o}{\tau_b} \right) + 120.45 \left(\frac{\rho_d}{\rho_w} \right) \quad \text{Équation IV-8}$$

avec :

C_v ... Concentration volumique en particules (ppm)

$\left(\frac{I_r \cdot TSSS}{D_r} \right)$... I_r : intensité maximale de la pluie (mm/h) ; D_r : hauteur totale précipitée (mm) ; $TSSS$: durée de temps sec précédente (h) ;

$\left(\frac{y_o}{y_{\max}} \right)$... Ratio de la hauteur moyenne de l'écoulement sur la hauteur maximale de l'écoulement

$\left(\frac{\tau_o}{\tau_b} \right)$... Ratio du taux de cisaillement moyen (calculé à partir de la vitesse moyenne de l'écoulement) sur le taux de cisaillement au fond (calculé à partir de la vitesse d'écoulement à 50mm au-dessus du fond)

$\left(\frac{\rho_d}{\rho_w} \right)$... Ratio de la masse volumique sèche des « near bed solids » sur la masse volumique de l'eau (~1000 kg/m³)

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

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

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

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

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

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

2.2.1.3. Contribution du dépôt grossier

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

2.2.1.4. Application à une expérience d'augmentation de débit

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

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

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

2.2.2. Modèle pour la couche organique

Ahyerre (1999) a fait un calcul des masses de particules érodées et accumulées durant une durée de 3 ½ années à partir d'un schéma conceptuel (cf. Figure IV-11). L'objectif de cette modélisation était de tester la validité du taux d'accumulation déterminé expérimentalement sur le Marais par Ahyerre (1999). Pour cela :

- les masses de couche organique accumulées sur les 3 ½ années ont été estimées à partir du taux d'accumulation linéaire expérimental déterminé par (Ahyerre,1999) pour le bassin versant du Marais (cf. Partie 2. Chapitre 2.1.2.). Les durées de temps sec ont été déterminées à partir des séries pluviométriques mesurées durant cette période.
- les masses érodées pour chaque événement pluvieux ont été estimées à partir de l'Equation 4-10 :

$$\text{MES} = 482,07.Q_{max} + 29,65.TS + 2,09.I_{max} - 11,10.I_{moy} + 29,88 \quad \text{Équation IV-10}$$

avec Q : débit à l'exutoire (m^3/s) ; I_{max} : intensité maximale de la pluie (mm/h) ; I_{moy} : intensité moyenne de la pluie (mm/h) ; TS : la durée de temps sec (jours). Cette relation a

été calée sur une série de 30 évènements pluvieux, grâce aux données recueillies par Gromaire (1998) sur le Marais.

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

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

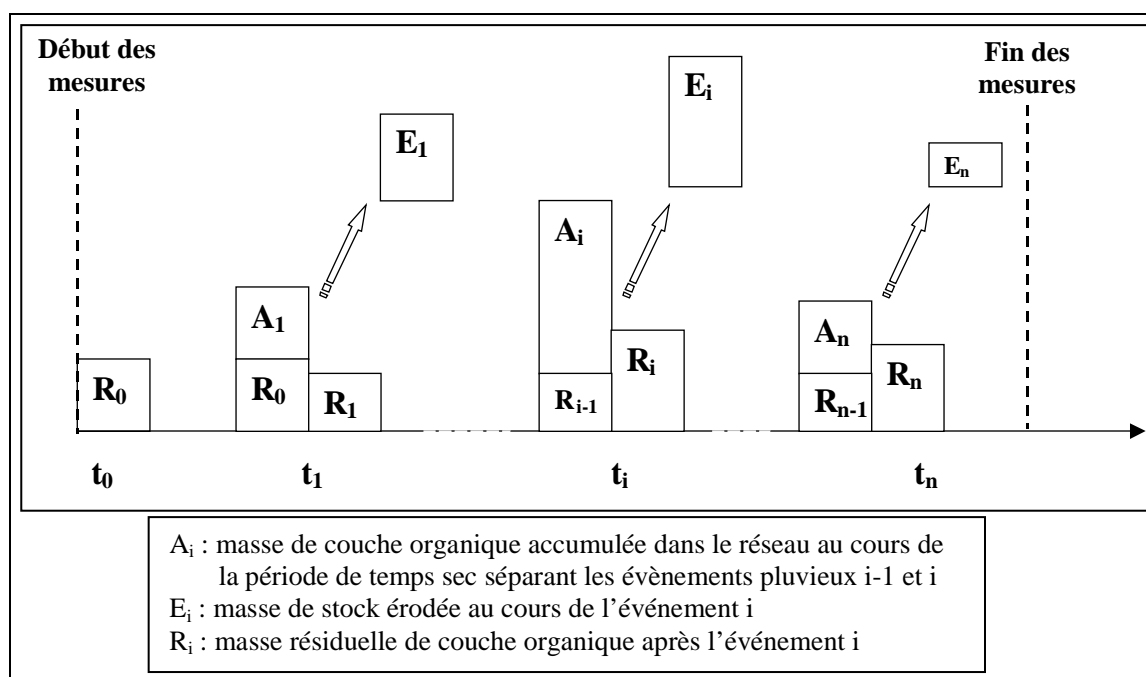


Figure IV-11 – Schéma conceptuel de l'érosion de la couche organique (Ahyerre, 1999)

3. Conclusions

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

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

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

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

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

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

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

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

CHAPITRE 3. Observation de la dynamique de l'interface

eau - sédiment

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

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

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

1. Dispositif d'observation mis en place dans le Marais

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

1.1. Le système d'observation « Ahyerre 1999 »

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

Le système d'observation présente cependant plusieurs inconvénients :

- a) la vitre s'encrasse rapidement et doit donc être nettoyée régulièrement, ce qui peut perturber l'interface eau-sédiment ;
- b) la boîte ne dispose d'aucun système de prises de vue intégré, les observations nécessitent donc la présence de personnel sur le site ;
- c) la largeur de la boîte crée une accélération de l'écoulement face à la zone d'observation.

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

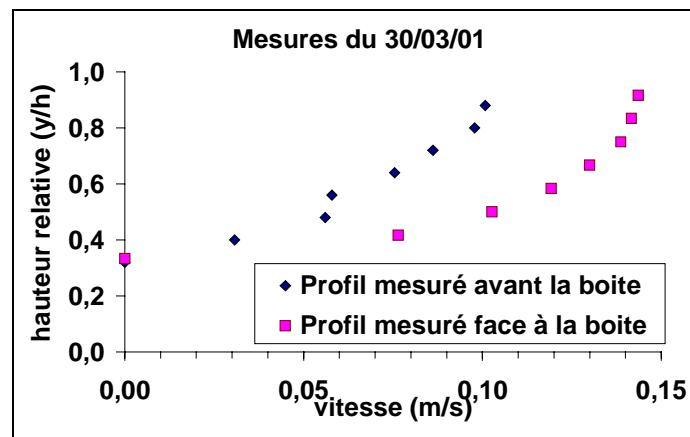


Figure IV-12 – Profils de vitesse réalisés sur le site d'observation

1.2. Le nouveau système d'observation

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

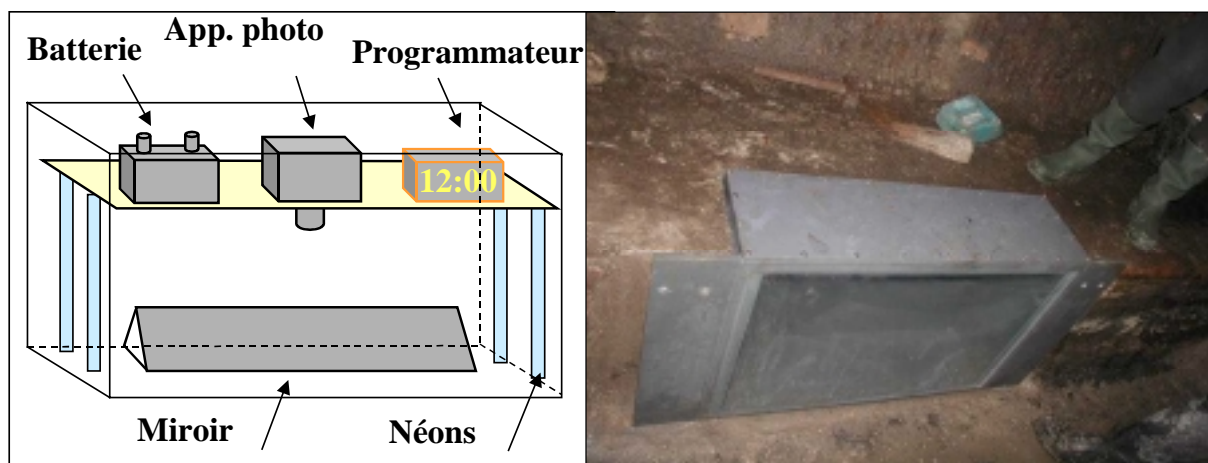


Figure IV-13 – Boîte d'observation mise en place sur le collecteur Saint-Gilles en 2002

1.2.1. Vitrage

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

1.2.2. Prise d'image

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

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

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

1.2.3. Eclairage

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

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

1.2.4. Alimentation électrique du système

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

1.2.5. Mesure du débit

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

1.2.6. Mesure de la pluviométrie

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

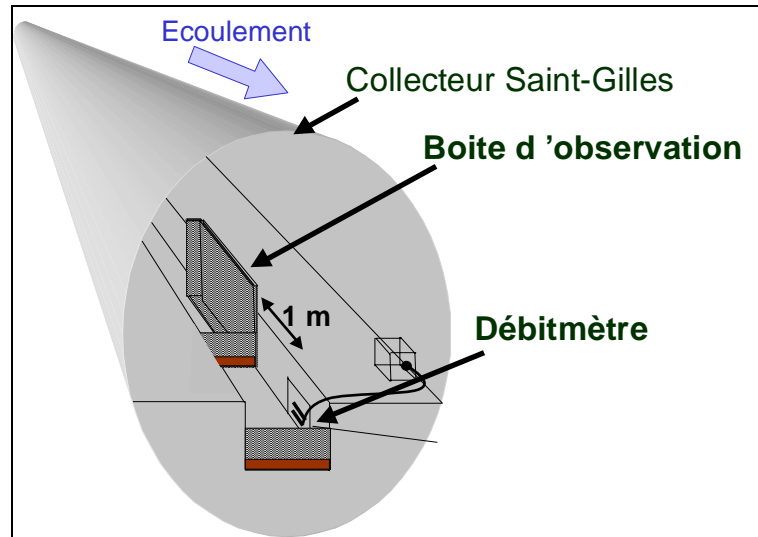


Figure IV-14 – Site expérimental du collecteur Saint-Gilles

1.3. Site de mesure

1.3.1. Choix du site

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

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

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

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

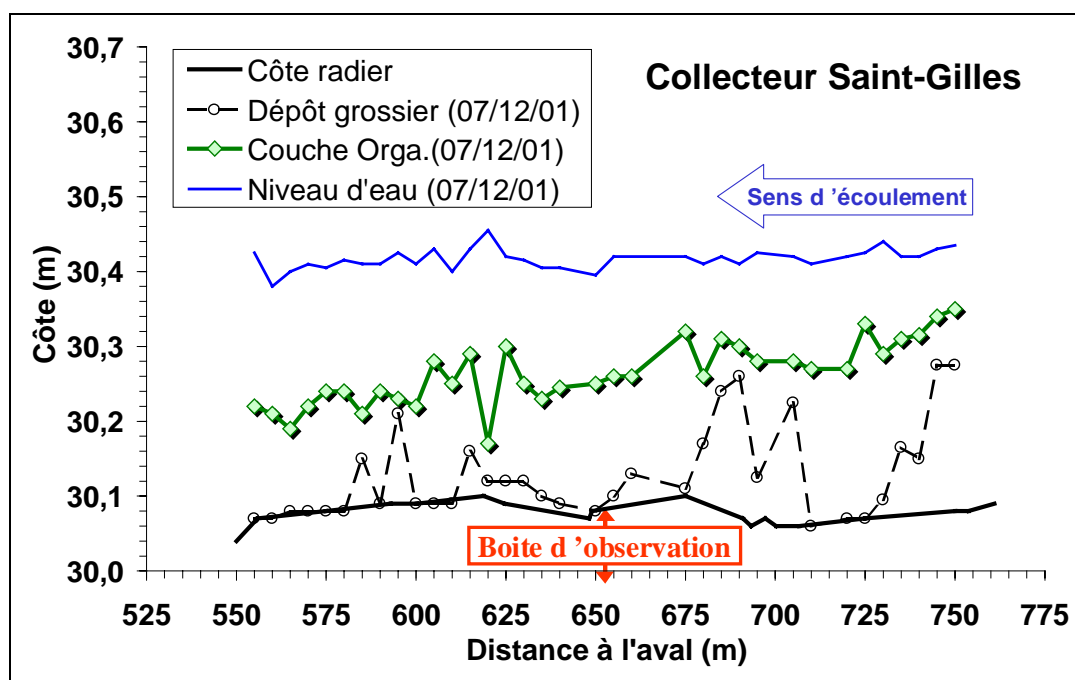


Figure IV-15 – Etat du collecteur étudié en décembre 2001

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

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

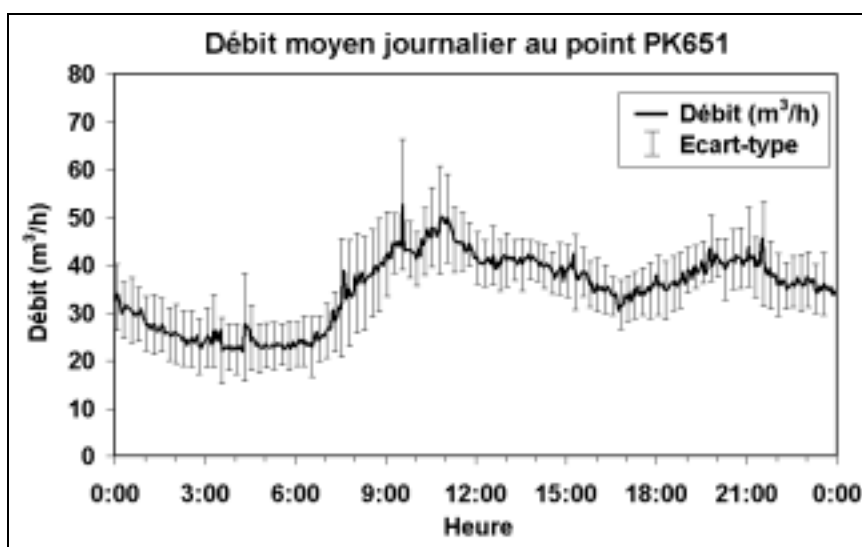


Figure IV-16 – Evolution des débits pour une journée moyenne de temps sec

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

- un pic matinal qui atteint un maximum entre 9h00 et 12h00 à $50\text{m}^3/\text{h}$;

- un creux nocturne qui atteint son minimum entre 3h00 et 6h00 du matin à 22 m³/h.

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

1.3.3. Caractéristiques des pluies affectant le site

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

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

Tableau IV-4 – Caractéristiques des pluies entre le 1^{er} mars 2002 et le 24 mai 2002

On constate une absence de pluie durant plusieurs semaines entre le 21/03/02 et le 18/04/02. Les intensités maximales des pluies s'étalent sur une large gamme (de 0.8 mm/h à 55.4 mm/h) et le débit maximum observé dans le collecteur Saint-Gilles est de 157 m³/h.

2. Expériences réalisées

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

2.1. Suivi en continu sur plusieurs journées

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

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

2.2. Suivi en continu durant des augmentations de débit

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

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

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

2.2.1. Méthode d'injection

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

2.2.2. Dispositif de mesures

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

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

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

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

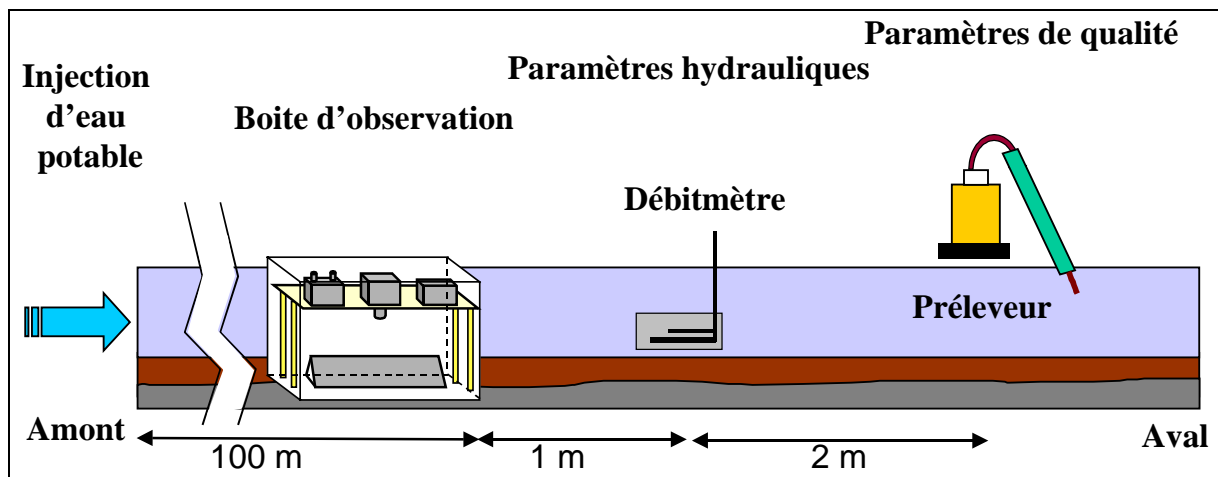


Figure IV-17 – Dispositif de mesures durant une augmentation de débit

2.2.3. Schémas d'injection réalisés

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

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

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

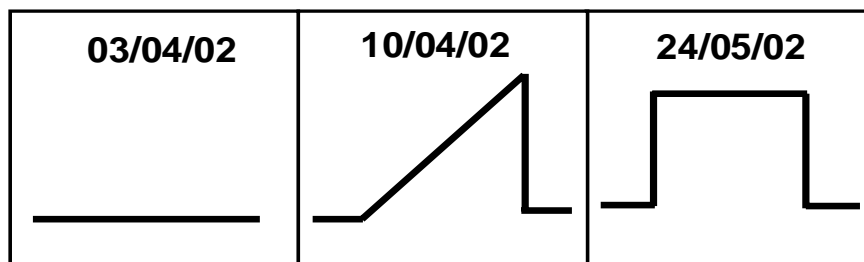


Figure IV-18 – Schéma des expériences réalisées

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

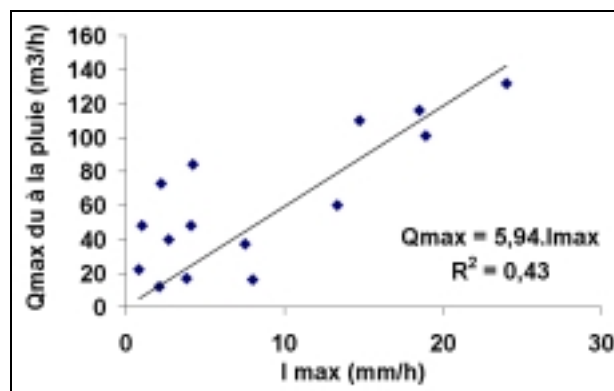


Figure IV-19 – Relation liant le débit maximal du à la pluie (Qmax) à l'intensité maximale de la pluie (Imax)

2.2.4. Mesure des paramètres de qualité

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

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

$$\phi_{\text{érodé}}(t) = \phi_{\text{transit}}(t) - \phi_0 \quad \phi_{\text{transit}}(t) = C(t) \cdot Q(t) \quad \phi_0(t) = C_0(t) \cdot Q_0(t)$$

avec :

$\phi_{\text{érodé}}(t)$: flux de particules érodées (g/s)

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

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

$C(t)$: concentration en polluants pendant l'expérience (g/m^3)

$C_0(t)$: concentration en polluants des eaux de temps sec du 03/04/02 (g/m^3)

$Q(t)$: débit pendant l'expérience (m^3/s)

$Q_0(t)$: débit de temps sec du 03/04/02 (m^3/s)

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

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

2.3. Données recueillies

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

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

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

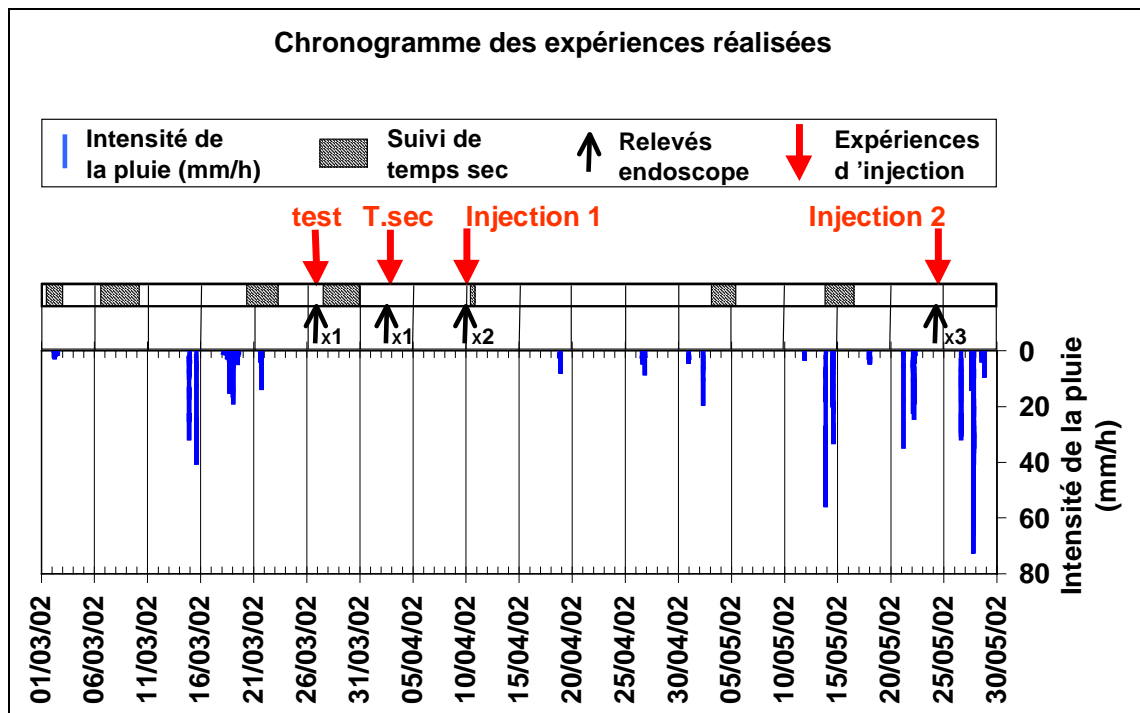


Figure IV-20 – Chronologie des différentes expériences réalisées

3. Résultats

3.1. Description de la couche organique

3.1.1. Devant la boîte

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

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

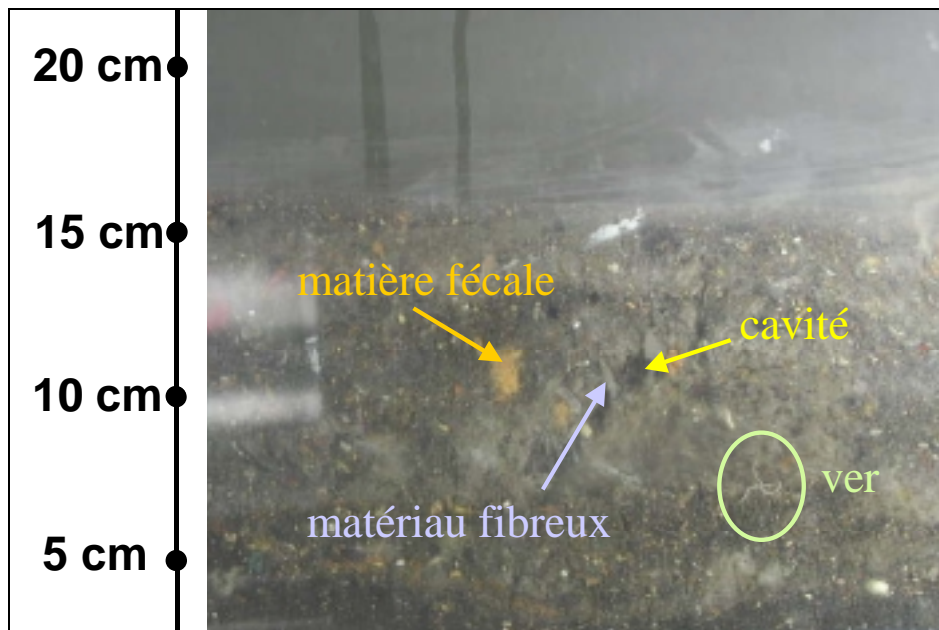


Figure IV-21 – Détails de la couche organique

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

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

3.1.2. Sur le tronçon

Sur le tronçon étudié, à l'amont de Saint-Gilles, la couche organique comble les dépressions du dépôt grossier (cf. Figure IV-22). Les hauteurs de couche organique diminuent vers l'aval. Les « trous » visibles dans la couche sont dus à des entrées latérales d'égouts élémentaires.

La Figure IV-22 permet de visualiser l'évolution des dépôts entre le 07/12/01 et le 26/03/02 : on constate que le dépôt grossier et la couche organique se sont décalés de 5m vers l'aval. La présence de flottants le 26/03/02 entre les points pk680 et pk720 perturbe la mesure des hauteurs de couche organique juste à l'amont des flottants. En effet, on relève une hauteur de couche relativement faible ce qui est probablement lié au passage de l'écoulement sous les flottants.

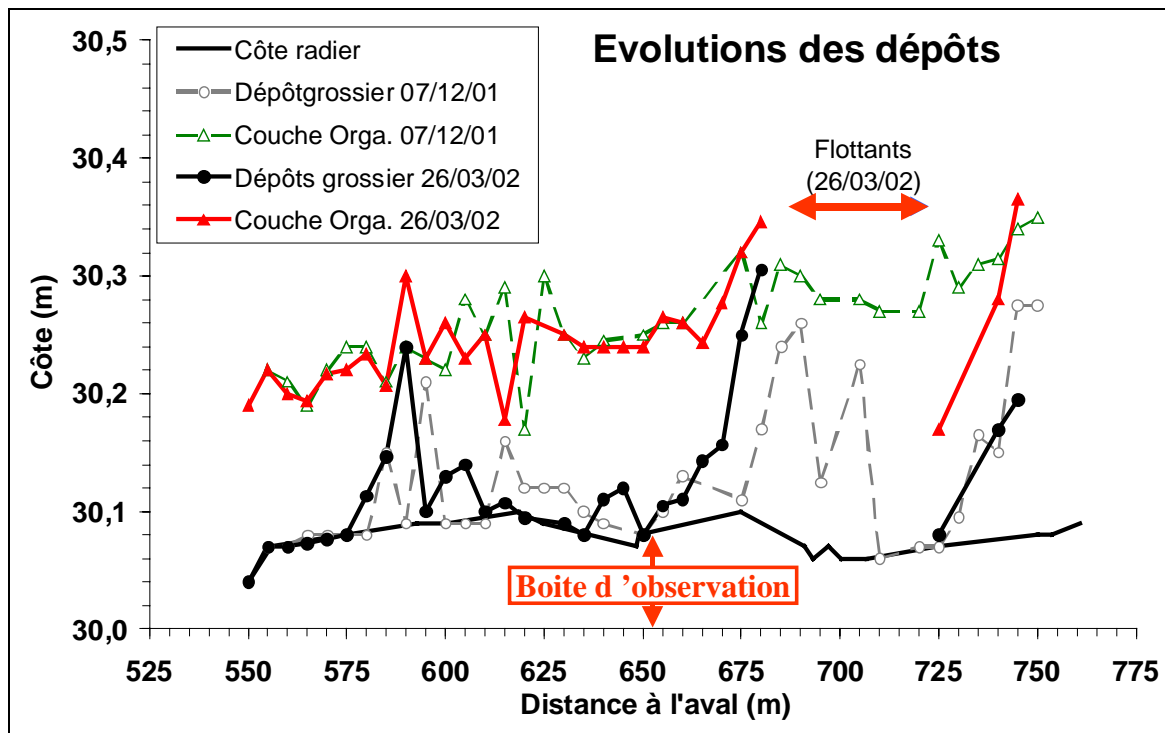


Figure IV-22 – Evolution des dépôts et de la couche organique entre le 07/12/01 et le 26/03/02.

3.2. Evolutions de la couche par temps sec

3.2.1. Evolutions devant la boîte

Les six séries de photos prises sur plusieurs journées ont été analysées. Sur quelques journées, on constate que la couche tend vers une hauteur stable.

Deux cas de figure sont apparus suivant les conditions initiales devant la boîte :

- *Condition 1 : hauteur de couche régulière devant la boîte*

Pas de variations notables dans la journée. Un état d'équilibre est atteint.

- *Condition 2 : creux devant la boîte*

Remplissage du creux par couches successives en quelques heures (cf. Figure IV-23). Une fois le creux rempli, la couche s'accumule par couche successives jusqu'à une hauteur d'équilibre. Les couches récentes sont claires, puis elles foncent jusqu'à avoir la même teinte que le reste du stock.

Cependant des phénomènes avec une courte durée de vie apparaissent dans la couche organique. Nous avons relevé trois cas significatifs :

- *Cas 1 : perturbation liée au passage d'un gros élément*

On observe le passage de gros éléments à l'interface eau-sédiment. Ces éléments (papiers journaux, sacs plastiques,...) sont transportés à la surface de la couche organique et

déstructurent la couche sur une épaisseur variant de 0,5 cm à 4 cm lors de leur passage, créant des creux qui sont rapidement comblés (quelques heures).

- *Cas 2 : expansion et tassements*

Durant la journée, on observe des variations dans les hauteurs de couche (des phénomènes d'expansion et de tassement) qui ne sont pas liées à l'apport ou à l'érosion de matière. Ces variations n'ont pas pu être reliées aux paramètres hydrauliques mesurés.

- *Cas 3 : arrachement*

La Figure IV-23 présente une séquence de photos représentant un phénomène observé durant une période de temps sec (dans la nuit du 2 au 3 Mars 2002) : on observe un phénomène d'expansion de la couche durant 1 heure (entre 01h15 et 02h15), suivi de l'arrachement en 30 minutes d'un bloc de couche d'environ 10 cm de long (entre 02h15 et 02h45). Enfin, le « creux » laissé par le bloc arraché est rapidement comblé (environ 2 heures) par un nouvel apport de matières (entre 03h00 et 04h15). Aucune variation notable de débit n'a été relevée durant cet épisode. Ce phénomène a été observé sur deux autres séries de photos avec moins d'amplitude (les creux mesuraient seulement 2 à 3 cm de profondeur) et toujours sans modification apparente des paramètres hydrauliques. Il semble donc que ce soit un phénomène aléatoire ou lié à une évolution biologique.

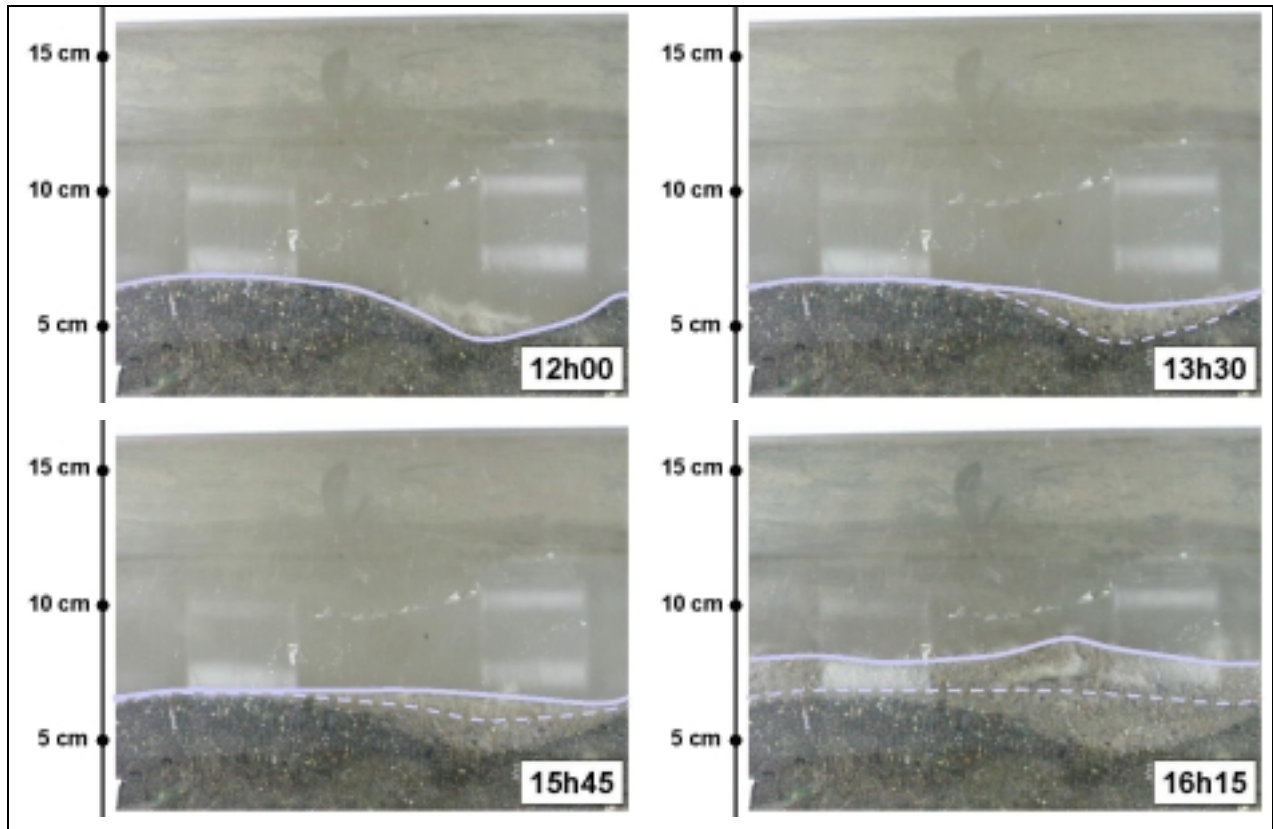


Figure IV-23 – Evolution par temps sec : remplissage d'un « trou »

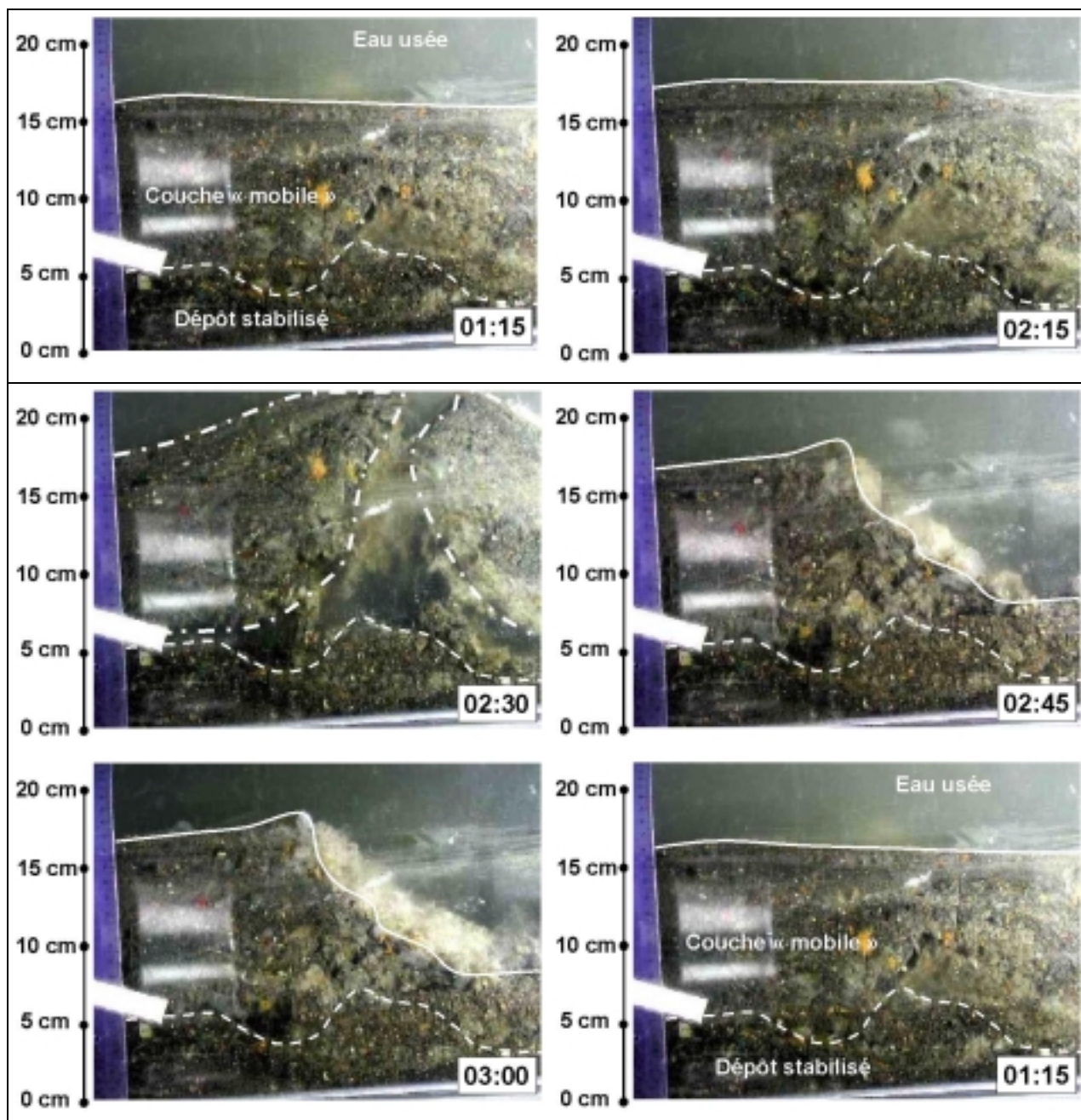


Figure IV-24 – Evolution de la couche organique par temps sec : arrachement d’un « bloc » de couche organique

3.2.2. Evolutions sur le tronçon

Trois suivis à l’endoscope ont été réalisés les 27/03/02, 03/04/02 et 10/04/02 sur un tronçon de 40m. Le premier suivi a été réalisé une heure après l’expérience « test » d’injection et la période étudiée n’a pas comporté d’épisode pluvieux. On observe qu’il n’y a pas eu d’évolution notable des hauteurs de couche entre les trois dates.

Un suivi a également été réalisé avant l'expérience d'injection du 24/05/02. Malgré les pluies relevées au mois de mai 2002 (cf. Tableau IV-4), les hauteurs de couche organique sont sensiblement les mêmes qu'en avril 2002, excepté un « trou » de 6 cm au point pk670.

Il semble donc que, sur le tronçon de collecteur étudié, la couche organique ait atteint une hauteur d'équilibre stable dans le temps et que ce niveau se maintienne malgré les épisodes pluvieux.

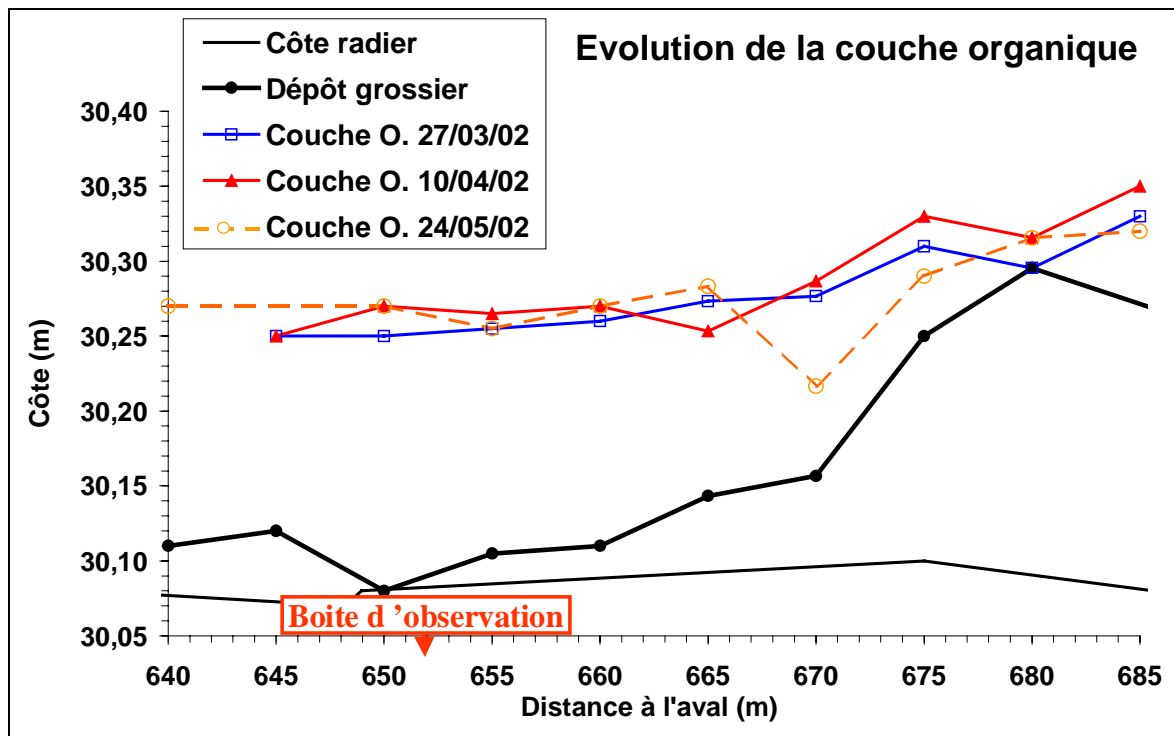


Figure IV-25 – Evolution de la couche organique sur 15 jours de temps sec

3.2.3. Conclusion

La couche organique observée possède un état d'équilibre qui se caractérise par une hauteur de couche stable. Localement, elle subit des perturbations liées à des événements aléatoires, comme le transport de gros éléments dans le collecteur, qui sont suivis par une « accumulation » : les trous formés dans la couche organique par l'expérimentateur ou par le passage de gros éléments près du fond (de 5 cm à 10 cm d'épaisseur) sont comblés rapidement, en quelques heures. En dehors de ces phénomènes locaux, aucun phénomène d'accumulation notable n'a été observé, durant les périodes de temps sec, sur le tronçon étudié.

3.3. Evolutions de la couche durant des augmentations de débit

3.3.1. Injections d'eau

3.3.1.1. Estimation des débits, des flux de particules et des teneurs particulières

La Figure IV-26 présente l'évolution des débits et des flux de MES transités au cours des deux expériences d'injections.

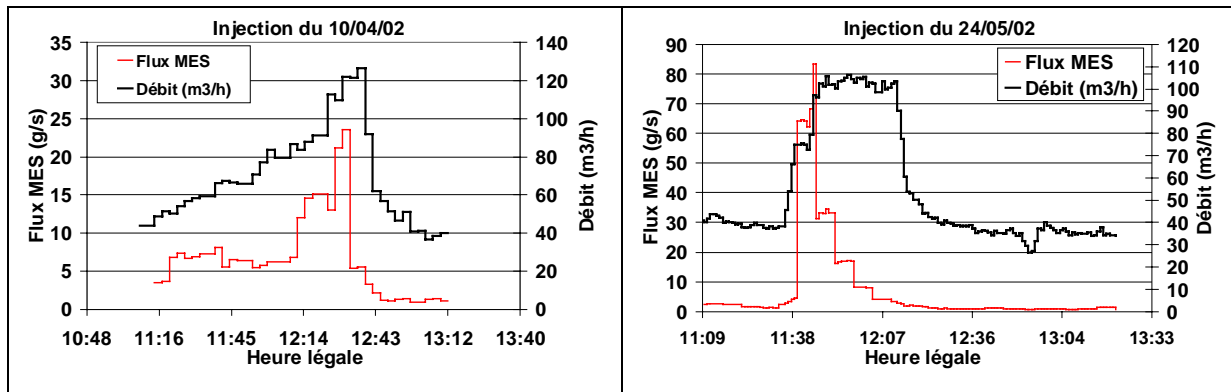


Figure IV-26 – Expériences d'injection du 10/04/02 et du 24/05/02

Durant l'injection du 10/04/02, on constate une augmentation du flux de MES (de 4 g/s à 8 g/s) au début de l'injection, à 11h20. Malgré une augmentation régulière du débit de 50 m³/h à 80 m³/h, le flux reste stable. L'augmentation suivante (de 8 g/s à 15 g/s) se produit à 12h15 lorsque le débit dépasse 85 m³/h. Enfin, une troisième augmentation (de 15 g/s à 24 g/s) à lieu à 12h25, lorsque le débit dépasse 110 m³/h. La masse de particules érodées entre 11h20 et 12h15 est équivalente à la masse érodée entre 12h15 et 12h45. Cette expérience met en évidence la présence de plusieurs seuils d'érosion pour la couche organique (trois seuils ont été observés).

Durant l'expérience du 24/05/02 on constate que le flux de MES connaît son maximum (90 g/s) au début du palier de débit puis il diminue. Le flux de MES durant cette expérience atteint des valeurs maximales très supérieures au flux de MES relevé durant l'expérience du 10/04/02 : les particules sont érodées en quantité plus importante, très rapidement. On peut avancer deux hypothèses pour expliquer cette différence :

- le 10/04/02, la couche organique a été érodée progressivement et les quantités disponibles en fin d'expérience (12h25) sont réduites alors que le stock disponible était « intact » au début de l'expérience du 24/05/02 (11h40) ;
- la couche organique érodée le 24/05/02 est récente (pluie précédente : 22/05/02), elle n'a pas eu le temps de se consolider et elle est donc remise en suspension plus facilement que la couche organique du 10/04/02 qui s'est construite durant 10 journées de temps sec.

	MVS/MES (%)	DCO/MES (g/g)
Expérience du 26/11/98 et 02/01/98 <i>Ahyerre et al. (2001)</i>	70 à 75	1.2 à 1.3
Couche organique Vieille du Temple <i>Ahyerre et al. (2001)</i>	69	1.2
Expérience du 10/04/02 et 24/05/02	75 à 78	1.6 à 1.8
Couche organique Saint-Gilles	77	1.5

Tableau IV-5 – Nature des particules érodées et des particules de la couche organique

Les teneurs particulaires en MVS et DCO sont présentées dans le Tableau IV-5. On constate que les particules érodées au cours des augmentations de débit ont des teneurs en MVS et en DCO qui correspondent aux teneurs trouvées dans la couche organique prélevée sur Saint-Gilles. Ces résultats sont cohérents avec ce qui avait été observé par *Ahyerre et al. (2001b)* sur le collecteur Vieille du Temple. On peut en déduire que les particules érodées sont issues de la couche organique présente sur le tronçon.

La masse totale de particules érodées, et transitant en suspension, est de 30 kg durant l'expérience du 10/04/02 et elle est de 45 kg pour l'expérience du 24/05/02. Pour l'expérience du 10/04/02, la durée de temps sec ayant précédé l'expérience est de 10 jours et pour l'expérience du 24/05/02, elle est de 2 jours. La durée de temps sec ne semble pas avoir donné lieu à une augmentation de la masse de couche organique disponible puisqu'on trouve moins de particules érodées durant l'expérience où la durée de temps sec est la plus importante. Cependant, les schémas d'injection sont distincts : le 10/04/02, le débit maximal atteint (127 m³/h) est maintenu durant 10 minutes alors que, le 24/05/02, il est maintenu durant 40 minutes à 103 m³/h. Il n'est donc pas possible de conclure à partir d'une comparaison directe.

3.3.1.2. Evolutions devant la boîte

Durant l'expérience du 10/04/02, devant la boîte, on observe le passage de nombreuses matières en charriage. Ce phénomène débute 5 minutes après l'augmentation de débit. La couche organique n'évolue pas devant la boîte durant l'injection. Après l'arrêt de l'injection, le débit décroît rapidement, et on observe une accumulation rapide de matières au-dessus de la couche organique (gain de 3 cm d'épaisseur en 7 minutes), devant la boîte.

Pour l'expérience du 24/05/02 (cf. Figure IV-27), un creux d'environ 5 cm de profondeur et 10 cm de largeur a été fait devant la boîte d'observation avant le début de l'injection à 10h15. On constate que le « trou » est comblé en quelques minutes (entre 11h39 et 11h42), au moment du pic de MES, par des particules qui se déplacent près du fond. L'analyse des

photos montre également une égalisation de l'épaisseur de couche organique entre 11h50 et 13h22.

Ces expériences montrent que des particules sont mises en charriage par les augmentations de débit, qu'elles migrent le long du collecteur et qu'elles s'arrêtent dans des zones favorables comme des « trous » présents dans la couche organique.

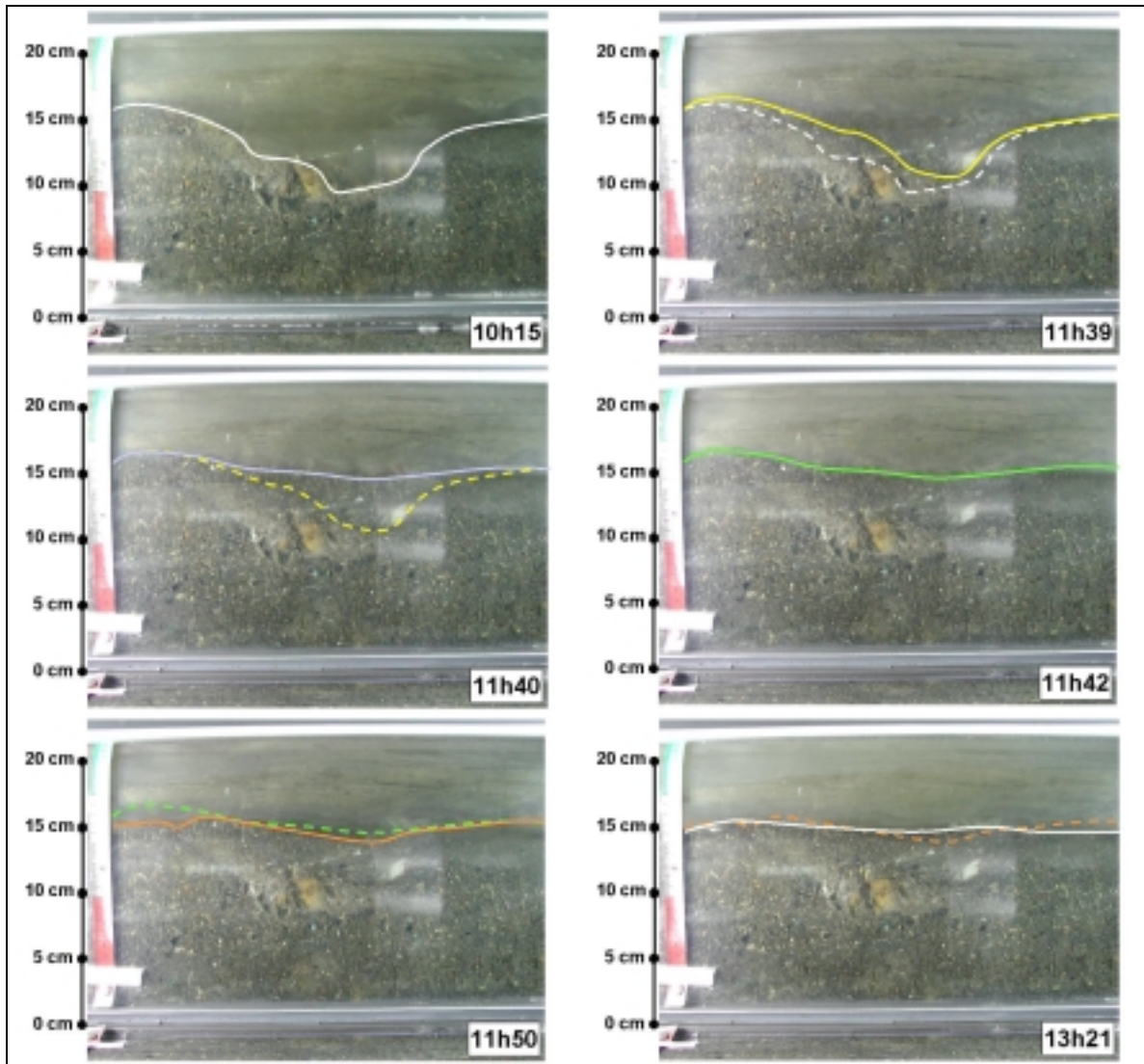


Figure IV-27 - Expérience d'injection du 24/05/02 (trait plein : interface eau usée – couche organique; trait pointillé : interface de l'image précédente)

3.3.1.3. Evolutions sur le tronçon

La masse volumique de la couche organique a été déterminée grâce à plusieurs prélèvements réalisés sur le collecteur Saint-Gilles (cf. Partie 2.Chapitre 3.). A partir de ces données, nous avons évalué le volume de couche organique érodé durant les expériences du 10/04/02 et du 24/05/02 ainsi que l'épaisseur de couche organique érodée, en considérant une érosion uniforme sur le tronçon (cf. Tableau IV-6).

On constate qu'avec une érosion « répartie », l'épaisseur de couche érodée est de l'ordre de 5 mm. Ces variations d'épaisseur ne sont pas discernables avec un suivi à l'endoscope.

	10/04/02	24/05/02
Masse de particules érodées, transitant en suspension	30 kg	45 kg
Volume « érodé » de couche organique sur le tronçon	200 dm ³	300 dm ³
Épaisseur « érodée » de couche organique sur le tronçon	3 mm	5 mm

Tableau IV-6 – Estimations des masses et volumes érodés sur le tronçon complet (100m)

Lors de l'expérience du 10/04/02 (cf. Figure IV-28) nous avons réalisé un profil endoscope sur les 50 m à l'amont de la boîte avant et après l'expérience d'injection. On observe peu de différences entre les deux suivis : il semble qu'il y ait eu déplacement d'une partie de la couche organique vers l'aval. Le bilan sur les variations des hauteurs de couche, sur le tronçon, est globalement nul : on peut estimer que les volumes de couche organique n'ont pas évolué mais ont été « redistribués » sur les 50 m suivis.

Pour l'expérience du 24/05/02 (cf. Figure IV-28), nous avons réalisé un profil endoscope sur le tronçon à l'amont de la boîte avant, après (entre 12h15 et 12h30) et 1 heure après l'injection (entre 13h10 et 13h25). Immédiatement après l'injection, on observe que certaines zones se sont déplacées ou « étalées » vers l'aval du tronçon et que le « trou » présent dans la couche organique avant l'expérience (pk670) a été en partie comblé durant l'expérience. Le second relevé après l'expérience révèle que la couche a encore subi des variations, mais à une échelle moindre montrant qu'il subsiste du charriage après l'arrêt de l'injection.

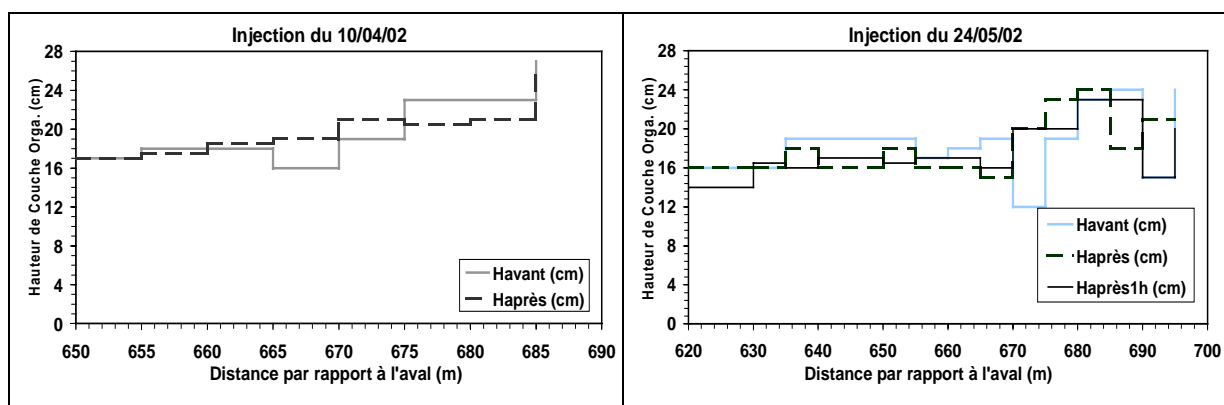


Figure IV-28 – Evolution des hauteurs de couche organique, durant les expériences d'injection du 10/04/02 et du 25/04/02

On constate que l'érosion de la couche organique ne se produit pas de manière uniforme à la surface du tronçon concerné par l'augmentation de débit. A partir de ces relevés, on estime que 420 dm³ de couche organique ont disparu sur les 50 mètres étudiés, le 24/05/02. Il semble qu'on ait érodé autant de couche organique sur 50 mètres que sur la longueur totale du

tronçon. Cet écart avec les valeurs estimées à partir des flux de MES sur 100 mètres met en évidence le rôle du charriage au cours des augmentations de débit : en effet, les particules charriées ne sont pas prises en compte par le système de prélèvement mis en place dans les expériences.

3.3.2. Durant une vraie pluie (dispositif de suivi de temps sec en place)

Le dispositif d'observation sur plusieurs journées a permis de suivre les évolutions de la couche organique durant une vraie pluie le 14/05/02 avec des clichés toutes les 15 minutes. Le débit atteint une valeur maximale de 135 m³/h à 13h15 et à 14h15 dans le collecteur.

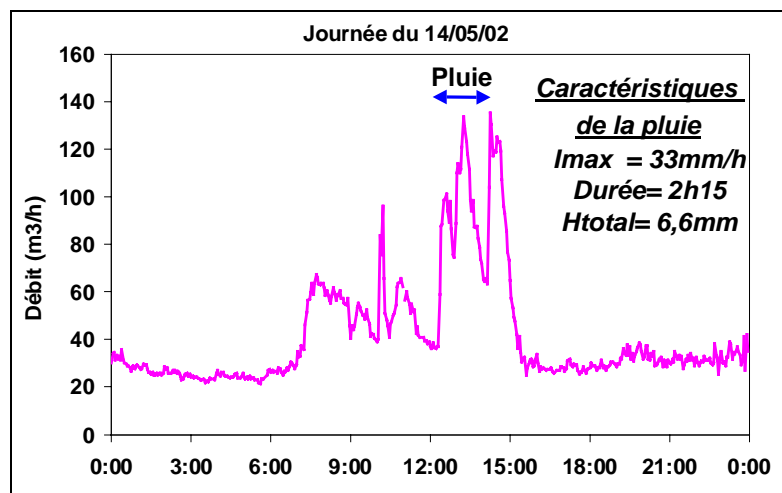


Figure IV-29 – Débit dans le collecteur Saint-Gilles, journée du 14/05/02.

Durant la phase d'augmentation du débit (12h00 à 14h00), la couche organique devant la boîte est légèrement déplacée vers l'aval et des fissures apparaissent dans la couche organique. Entre 14h15 et 14h30, on observe l'arrachement d'un morceau de couche de 1,5 cm de haut sur 10 cm de long dans la partie amont de la zone photographiée et la déposition d'une épaisseur de couche de 1 cm de haut sur 8 cm de long dans la partie aval de la zone photographiée. On peut supposer qu'il s'agit du même « morceau » de couche qui a été déplacé par l'écoulement.

Durant les heures qui suivent (entre 14h30 et 21h00), la couche reste stable et on n'observe pas de phénomène d'accumulation devant la boîte.

3.3.3. Conclusion

Les augmentations de débit sur le tronçon étudié provoquent une augmentation des particules en suspension : il y a donc érosion sur le tronçon étudié. L'étude des caractéristiques des particules en suspension montre que les particules érodées sont issues de la couche organique. Les observations réalisées révèlent que l'érosion de la couche organique n'est pas uniformément répartie le long du tronçon : il peut y avoir érosion en un point et accumulation

en un autre point. On assiste donc à des phénomènes locaux, probablement liés à des singularités hydrauliques ou à des particularités physiques locales de la couche organique (ex : présence de poche,...). De plus, on constate un déplacement vers l'aval de la couche organique durant les augmentations de débit montrant que le transport par charriage joue un rôle important dans le processus d'érosion de la couche organique.

4. Discussion : la modélisation de la couche organique

Les observations réalisées permettent de tirer un certain nombre de conclusions et de remarques sur la couche organique et son comportement par temps sec et durant des augmentations de débit.

4.1. Caractérisation de la couche organique

Les modèles considèrent généralement les sédiments comme étant composé de matériaux avec une composition homogène et une épaisseur constante. Les observations que nous avons réalisées montrent que ces hypothèses doivent être utilisées avec précautions.

4.1.1. Composition de la couche organique

Les observations et les prélèvements ont montré que la couche organique est un ensemble de plusieurs éléments (matières organiques, matières minérales, papiers,...). Cette nature composite a sans doute une influence sur le comportement de la couche car elle présente des éléments qui ont des caractéristiques physiques différentes d'un point à un autre. Les observations à l'endoscope n'ont pas permis de distinguer une évolution dans la nature de la couche organique le long des tronçons étudiés.

De plus, des épisodes de renouvellement de la couche organique ont été observés : des déstructurations de la couche (arrachements de blocs de couche, passage de gros éléments près du fond...) conduisant à la formation de « trous » dans la couche sont suivis d'un remplissage rapide par de la matière nouvelle assurant ainsi un renouvellement partiel de la couche organique. Ces phénomènes n'ont pas pu être reliés à des paramètres hydrauliques, ils sont susceptibles d'être de nature aléatoire.

Enfin, la présence d'une activité biologique (vers) au sein de la couche organique a été relevée. Ils tiennent probablement un rôle dans les phénomènes de consolidation de la couche organique à cause des « tunnels » qu'ils creusent à l'intérieur de celle-ci. Le brunissement de la couche organique observé au cours des expériences peut être imputé en partie à des phénomènes de dégradations biologiques.

4.1.2. Variations verticales, dans l'épaisseur de la couche organique

Plusieurs auteurs ont développé des hypothèses sur une structure stratifiée de la couche organique :

- Ahyerre (1999) a constaté que la teneur en MVS des particules érodées diminuait au cours du temps durant les expériences d'érosion. Il en a déduit que la couche organique était constituée de plusieurs couches de plus en plus minérales avec la profondeur.
- Skipworth *et al.* (1999) ont mis en évidence l'existence d'une couche faiblement résistante située dans la partie supérieure du dépôt et une augmentation de la résistance avec la profondeur du dépôt : la couche superficielle s'érode à partir d'un taux de cisaillement inférieur au taux de cisaillement critique nécessaire pour éroder le cœur du dépôt (cf. Equation 4-4).

Les observations faites durant les expériences montrent que les épisodes de remplissage de trous s'effectuent souvent par couches successives. De plus, nous avons observé plusieurs seuils d'érosion pour la couche organique durant les expériences d'injection d'eau.

Ces observations permettent d'accréditer la théorie développée par Ahyerre (1999) et Skipworth *et al.* (1999). Enfin, les phénomènes aléatoires qui assurent une régénération partielle des matières constituant la couche organique permettent d'appuyer l'hypothèse d'une strate superficielle ayant un comportement différent du corps de la couche organique.

4.1.3. Variations longitudinales de l'épaisseur de la couche organique

Les suivis à l'endoscope du tronçon de collecteur ont montré que l'épaisseur de la couche organique varie d'un point à un autre. La boîte d'observation a permis de mettre en évidence les épisodes de remplissage de « trous ». Les différentes épaisseurs de couche observées correspondent à des formes dans le dépôt grossier : les grandes épaisseurs de couche (15 cm à 18 cm) correspondent à des « creux » et les zones avec de faibles épaisseurs de couche (2 cm à 5 cm) correspondent à des « dunes ».

De plus, nous avons constaté que les arrivées latérales sur le collecteur Saint-Gilles coïncidaient avec de faibles épaisseurs de couche organique ce qui peut être imputé aux perturbations hydrauliques liées au débit incident.

4.2. Dynamique de la couche organique par temps sec

4.2.1. L'accumulation est-elle une fonction de la durée de temps sec ?

Les bilans effectués à l'échelle d'un bassin versant à Paris par Ahyerre (1999) ainsi qu'à Dundee par Arthur (1996) ont montré que la quantité de MES érodées par temps de pluie est

une fonction de la durée de temps sec précédente. De plus, Ahyerre (1999) a mis en évidence l'accumulation linéaire de la couche organique avec un taux de croissance de $215 \text{ g/m}^2/\text{j}$.

Les expériences menées sur le collecteur Saint-Gilles ont été réalisées avec une couche constituée dès le début des observations. Par temps sec, des phénomènes rapides d'accumulation ont été observés jusqu'à un état d'équilibre de la hauteur de couche organique : ces épisodes concernent des « trous » dans la couche organique.

On note que la croissance de la couche paraît plus rapide avec les observations à l'endoscope (expérience du 24/05/02) ou avec la boîte d'observation que le taux de croissance évalué par Ahyerre (1999). Cet écart peut s'expliquer par les conditions initiales des observations réalisées : sur Vieille du Temple les expériences visaient à étudier la constitution de la couche organique tandis que sur Saint-Gilles les expériences ont permis d'étudier le comportement d'une couche déjà constituée. Ces deux cas concernent donc des échelles de temps et d'espace différents : ce sont donc deux études complémentaires qui ont été menées sur le bassin du Marais.

Néanmoins, on doit s'interroger sur la densité de la couche organique : nos observations se rapportent à des volumes de couche organique alors que les expériences de Ahyerre (1999) se rapportent à des masses de couche organique. Il est probable que la couche organique subisse des variations de densité en son sein et qu'à un même volume on puisse associer deux masses différentes. Les observations réalisées ne permettent donc pas de conclure définitivement sur le taux d'accumulation de la couche organique.

4.2.2. Y a-t-il corrélation entre phénomènes observés et hydraulique de temps sec ?

Les observations ont mis en évidence des phénomènes tels que l'arrachement de morceaux de couche suivis de remplissage rapide des trous formés. Ces phénomènes n'étaient pas corrélés avec les paramètres hydrauliques mesurés (vitesse, hauteur d'eau), il faut donc pencher pour un phénomène de type aléatoire lié aux inhomogénéités de la couche organique ou à des circonstances extérieures (passage de gros éléments sur le fond, présence de flottants,...). Le facteur déclenchant n'a pas pu être mis en évidence avec nos expériences.

Une hypothèse sur la structure de la couche organique, basée sur les observations de Tait *et al.* (2002) sur des sédiments issus de réseau d'assainissement ainsi que sur les observations de De Wit et Kanenbourg (1997) sur des sédiments d'estuaires, peut être émise pour expliquer ce type de phénomènes : si on suppose l'existence d'une strate « résistance et imperméable » en surface de la couche organique et structurée grâce à des biofilms ou à des fibres telles que les papiers, alors cette couche peut amener à des conditions de pressions différentes entre le cœur

de la couche et les eaux usées. Les différences de pression pourraient ainsi expliquer le développement de « poches » à l'intérieur de la couche et les fissurations qui conduisent à l'arrachement de morceaux de couche organique. Dans cette hypothèse, les sillages des vers peuvent créer des zones de faiblesse structurelle favorable à la fissuration.

Enfin, il n'a pas été observé de variation de hauteur de la couche organique durant le pic de débit de temps sec, devant la boîte. Différentes hypothèses peuvent être proposées pour expliquer l'augmentation de MES relevée par Gromaire (1998) à l'exutoire du bassin versant du Marais :

- le pic de débit correspond également au pic de production ainsi qu'à la période de lavage des rues ce qui conduit à une augmentation des MES. Cette hypothèse peut être réfutée au vue des résultats obtenus par Gromaire *et al.* (2000) ;
- le pic de débit donne lieu à une érosion de la couche organique mais de façon localisée ;
- des matières sont transportées en charriage et ne sont donc pas prises en compte par les bilans de masse qui sont effectués sur le transport en suspension. Durant le pic de débit, les matières transportées près du fond sont désagrégées et remises en suspension. Elles sont alors prises en compte au niveau des préleveurs.

4.3. Dynamique de la couche organique par temps de pluie

4.3.1. Y a-t-il corrélation entre phénomènes observés et hydraulique de temps de pluie ?

Les résultats des expériences d'injection de débit s'accordent avec les expériences réalisées par Ahyerre *et al.* (2001,b). On observe que le flux de MES est directement lié aux conditions hydrauliques régnant dans le collecteur : il y a un pic de MES au moment où il y a un pic de débit dans le tronçon étudié ou au moment de l'augmentation brusque du débit. Ces variations correspondent à des variations du taux de cisaillement dans le collecteur.

Ce type d'observation est cohérent avec la relation de Partheniades (cf. Equation 4-3), qui est généralement utilisée pour décrire les phénomènes d'érosion de sédiments cohésifs.

Cette relation suppose l'existence d'un seuil de cisaillement critique à partir duquel la couche organique s'érode. Nous avons pu vérifier au cours des expériences d'injection d'eau qu'il existait plusieurs seuils d'érosion pour la couche organique : ces différents seuils correspondent sans doute à différentes zones dans le tronçon de collecteur, zones qui correspondent elles-mêmes à des qualités différentes de couche organique (âge, composition, volume disponible,...) car nous avons pu constater que l'hypothèse d'une couche homogène et répartie uniformément sur un tronçon de collecteur n'était pas valide.

4.3.2. L'érosion se produit-elle de façon homogène ?

Les relevés à l'endoscope avant et après les expériences d'injection ont montré que l'érosion ne se produit pas de manière homogène sur toute la surface du dépôt mais de façon discontinue. Certaines zones semblent plus sensibles que d'autres à l'érosion. Elles correspondent sans doute à des zones de plus faible résistance au cisaillement. Plusieurs causes peuvent être avancées pour expliquer la présence de plusieurs zones : variations dans la composition de la couche, présence d'éléments faiblement résistants en surface de la couche (par exemple, des matières fécales) ou, encore, zones de forte turbulence hydraulique.

5. Conclusions et perspectives

Grâce à l'utilisation de la boîte d'observation et de l'endoscope durant des périodes de temps sec et durant des augmentations de débit (injections d'eau, pluie), dans le collecteur Saint-Gilles, il est apparu que :

- la couche organique est un matériau composé de particules de natures très différentes (eau, papiers, matières fécales, matériaux granulaires, ...) qui abrite une activité biologique (présence de vers)
- par temps sec, la couche organique tend vers une hauteur d'équilibre stable et elle remplit les creux du dépôt grossier. Elle subit des remaniements locaux, liés à des perturbations aléatoires, internes ou externes à la couche organique (passage de gros éléments près du fond,...).
- durant les augmentations de débit, la couche organique est en partie érodée et transportée en suspension mais elle est également transportée par charriage (cf. Figure IV-30).
- le pic de débit correspond aux pics d'érosion de la couche organique et les flux de MES révèlent la présence de plusieurs seuils d'érosion .

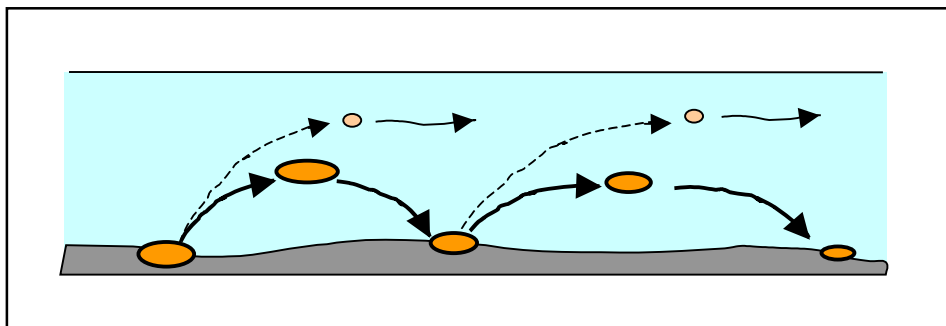


Figure IV-30 – Mode d'érosion combiné « charriage et remise en suspension » de la couche organique sur Saint-Gilles

L'étude menée soulève de nouvelles questions sur la nature et le comportement de la couche organique. Différentes expériences pourraient être réalisées pour y répondre :

- étudier le « vieillissement » de la couche organique en fonction du temps grâce à des prélèvements à différents âges ou à des carottages cryogéniques, ce qui permettrait une analyse des variations de la composition, de la densité et de la teneur en eau ;
- étudier les variations de qualité en fonction de la hauteur de couche afin de déterminer s'il existe une réelle stratification à l'intérieur de la couche organique ;
- étudier la reconstitution de la couche organique dans un collecteur après le curage d'un tronçon entier afin de mener une étude sur le taux d'accumulation de la couche organique à grande échelle ;
- des capteurs de pression sur le fond du collecteur ou contre une paroi latérale afin d'étudier des phénomènes de variations de pression internes à la couche.

CHAPITRE 4. Conclusions et perspectives

L'étude bibliographique menée dans cette partie a montré que, malgré l'identification des paramètres influant sur les termes de cohésion et donc de résistance des dépôts organiques, le comportement des sédiments cohésifs est complexe et encore mal connu.

L'étude expérimentale que nous avons menée sur le Marais a permis d'apporter un éclairage nouveau sur les mécanismes qui conduisent à la constitution et à l'érosion des stocks de matières organiques à l'interface eau-sédiment.

Nous avons pu constater que la couche organique n'est pas un élément homogène. Elle est composée de plusieurs matériaux et, vraisemblablement, elle est stratifiée. Nos observations se sont limitées à une petite portion de collecteur, mais il apparaît que des facteurs, autres que le taux de cisaillement, entrent en jeu dans le comportement de l'interface étudiée. Ainsi, dans les processus qui conduisent à l'érosion de la couche organique, il faut probablement considérer les jeux de pression internes et externes à la couche organique mais il faut également tenir compte du facteur « aléa » qui modifie les qualités de la couche organique localement.

En conclusion, il apparaît que l'interface eau-sédiment est un élément complexe à modéliser sous forme de modèles déterministes car pour rendre compte de la complexité des phénomènes, il faudrait une quantité très importante de données. Or il est difficile de recueillir beaucoup de données de bonne qualité en réseau d'assainissement.

Dans ce cadre, les résultats obtenus par Ahyerre (1999) à partir d'un schéma conceptuel semblent prometteurs et les connaissances nouvelles sur la couche organique amenées par des expérimentations sur le terrain permettront vraisemblablement d'affiner les concepts, les hypothèses et les paramètres des relations utilisées dans ce type de modèles.

Remerciements

Nous tenons à remercier très vivement Johan Glasser et Laura Dieupart-Ruel, étudiants du DEA « Sciences et Techniques de l'Environnement », qui ont participé activement à cette partie du projet de recherche.