Spatial variability of characteristics and origines of wet weather polluants in combined servers

Mounira Kafi-Benyahia

▶ **To cite this version:**

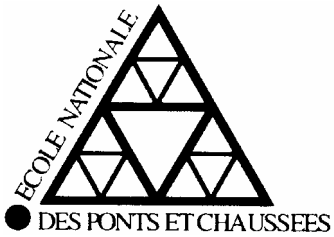
Mounira Kafi-Benyahia. Spatial variability of characteristics and origines of wet weather polluants in combined servers. Sciences of the Universe [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2006. English. NNT : . pastel-00002000

HAL Id: pastel-00002000
https://pastel.hal.science/pastel-00002000

Submitted on 9 Nov 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THESE

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

Spécialité : Sciences et Techniques de l'Environnement

VARIABILITE SPATIALE DES CARACTERISTIQUES ET DES ORIGINES DES POLLUANTS DE TEMPS DE PLUIE DANS LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT UNITAIRE PARISIEN

(Textes)

par

Mounira KAFI-BENYAHIA

Thèse soutenue le 3 mars 2006, devant le jury composé de :

M. Ghassan CHEBBO	Directeur de thèse
Mme Marie-Christine GROMAIRE	Examinateur
M. Bernard CHOCAT	Rapporteur
M. Michel LEGRET	Rapporteur
M.Youssef Georges DIAB	Examinateur

Remerciements

Ce travail de recherche a été mené au Centre d'Enseignement et de Recherche sur la Ville l'Eau et l'Environnement (CEREVE), qui est un laboratoire de recherche commun à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts et l'Université Paris XII-Val de Marne. Il a été réalisé dans le cadre du programme de recherche intitulé «Evolution spatiale des caractéristiques et des origines de polluants dans les réseaux d'assainissement unitaires», coordonné au CEREVE par Monsieur Ghassan CHEBBO et Madame Marie-Christine GROMAIRE.

Cette thèse a été effectuée sous la direction Ghassan CHEBBO, directeur de recherche et Marie-Christine GROMAIRE chargée de recherche.

Je tiens à remercier Ghassan CHEBBO d'avoir suivi et guidé ce travail en apportant conseils et remarques. Je lui exprimer ma gratitude et ma vive reconnaissance.

Je tiens à exprimer l'expression de ma profonde reconnaissance à Marie-Christine GROMAIRE. Elle qui a régulièrement encadré cette thèse et qui a été toujours disponible pour m'orienter et répondre à mes interrogations et mes incertitudes.

Je remercie Monsieur Jean-Marie MOUCHEL directeur du CEREVE et Monsieur Jean Claude DEUTSCH directeur de l'Ecole Doctorale Ville et Environnement, qui m'on accepter dans leurs unités et qui m'ont permis de travailler dans de bonnes conditions.

Je remercie Monsieur Bernard CHOCAT et Monsieur Michel LEGRET d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Je les remercie également de leur lecture attentive et critique.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Youssef Georges DIAB qui a accepté d'être l'examinateur de cette thèse.

Je remercie énormément la Région d'Ile de France d'avoir financer mes études.

Cette recherche a été possible grâce à l'aide financière des organismes suivants : l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, la Ville de Paris, le Syndicat Intercommunal pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne.

Je tiens à remercie tous le personnel du Service d'Assainissement de la ville de Paris pour leur aide technique.

Un merci pour S. CHASTRUSSE, M. SAAD et C. LORGEOUX pour leurs précieuses aides sur sites et au laboratoire.

Merci a tous les CEREVIENS et CEREVIENNES pour l'ambiance chaleureuse, le soutien moral ou technique qu'ils m'ont apporté.

Tout mérite revient à *Samir* mon adorable et tendre époux, pour sa patience et son amour. J'embrasse aussi très fort mon bébé *Hocine,* qui nous a apporté toute la joie du monde.

Je ne peux finir ces remerciements sans rendre hommage à mon défunt père, et remercier énormément mon adorable mère.

Enfin, je ne voudrais pas oublier de remercier énormément mon adorable grande sœur et son époux pour leurs précieuses aides. J'adresse également un merci à mes sœurs et à ma belle famille.

Résumé

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de l'OPUR : « Observatoire des Polluants Urbains en Ile de France ». Il s'appuie sur la mise en place d'un dispositif expérimental sur une série de six bassins versants de taille croissante et de d'occupation du sol comparable, allant du bassin du Marais (41 hectares) jusqu'au site de Clichy (2500 hectares) en suivant l'axe du collecteur de Clichy, à Paris.

Ce dispositif a permis :

- d'étudier la variabilité des flux et de la nature des polluants transférés par temps sec et par temps de pluie, dans les réseaux d'assainissement unitaires, en fonction des caractéristiques et de l'échelle spatiale des bassins versants. Le travail porte notamment sur :
  - ✓ Concentrations moyennes et flux des MES, MVS, DCO, DBO_5, COT, NTK et des métaux lourds Cd, Cu, Pb et Zn.
  - ✓ Nature des polluants : répartition dissous-particulaire, teneurs en polluants et vitesses de chute des particules.
- de comprendre le fonctionnement hydrologique et hydraulique du réseau d'assainissement des bassins versants OPUR et d'étudier les mécanismes de transfert dans les réseaux unitaires.
- d'évaluer la contribution des trois sources "Eaux usées, Eaux de ruissellement et Stocks de dépôt dans le réseau" aux flux polluants de temps de pluie. Cette évaluation a été faite en utilisant une approche de bilan de masse entre l'entrée et la sortie de chaque bassin versant.

Les résultats obtenus indiquent d'une part, une relative homogénéité des flux polluants, de leur nature et des processus dominants sur les six bassins versants étudiés. Ils montrent d'autre part une importante contribution de l'érosion des stocks constitués dans le réseau d'assainissement aux flux des matières en suspension, des matières organiques, du cuivre total, quelque soit la taille du bassin versant. Cette contribution varie, en moyenne, selon le site de mesure, entre 49 et 70% pour les MES, et entre 43 et 71% pour le cuivre total. Pour le cadmium, le plomb et le zinc, les eaux de ruissellement s'avèrent être la source principale.

Mots Clés

Bassin versant expérimental, Réseau d'assainissement unitaire, Rejets urbains de temps de pluie, Echelle spatiale, Eaux de ruissellement, Eaux usées, Dépôts, Sources de pollution,

Abstract

This thesis is registered in the OPUR: “Observatoire des polluants URbains en Ile-de-France”. It relies on the fitting out of an experimental on-site observatory of six urban catchments series of growing size and comparable land use, from the Marais catchment (41 ha) to Clichy site’s (2500 ha), along the axis of the Clichy trunk, in Paris.

This on-site observatory allowed:

- to study nature and flux variability of transferred pollutants by dry and wet weather, in combined sewers, in relation to the characteristics and the spatial scale of urban catchments. The work concerns in particular:
  - flux and mean concentrations of SS, VSS, COD, BOD5, TOC, TKN, and heavy metals (Cd, Cu, Pb, Zn).
  - Particle characteristics: distribution between dissolved and particle bound pollution, pollutant loads in particles and settling velocities.
- to understand the hydraulic and hydrologic functioning of sewer network of the OPUR urban catchments, and to study the transferred mechanisms in combined sewers.
- to evaluate the contribution of the three sources of pollution “urban runoff, wastewater and sewer sediments” to pollutant loads of wet weather. This evaluation was realised by using a mass balance approach between the entry and the exit of each catchment.

The results obtained indicate, a relative homogeneity of pollutant loads, of their characteristics and of the dominant processes on the six studied catchments. They show an important contribution of the sewer deposit erosion to the flux of SS, organic matter and total copper, whatever the size of catchment. This contribution varies, on average, according to the site, from 49 to 79% for SS and from 43 to 71% for total copper. For cadmium, lead, and zinc, urban runoff proves the main source.

Key Words

Experimental urban catchment, Combined sewers, Urban wet weather discharges, Spatial scale, Urban runoff, Waste waters, Sediments, Sources of pollution

Sommaire

INTRODUCTION *21*

1 Contexte *23*

2 Programme de recherche « Evolution spatiale des caractéristiques et des origines des polluants dans les réseaux d'assainissement unitaires » *24*

3 Objectifs de la thèse *27*

PARTIE 1 : CONTEXTE EXPÉRIMENTAL *29*

Chapitre 1 : Bassins versants expérimentaux *31*
1.1 Choix et délimitation des bassins versants 31
1.2 Caractéristiques des bassins versants 32
1.2.1 Caractéristiques morphologiques 32
1.2.2 Occupation des sols 35
1.2.3 Effluents de temps sec et temps de pluie rejetés dans le réseau d'assainissement 42
1.3 Caractéristiques du réseau d'assainissement 43
1.3.1 Description du réseau d'assainissement 43
1.3.2 Fonctionnement du réseau d'assainissement 44
1.3.3 Linéaire et pente 52
1.3.4 Ensablement 53

Chapitre 2 : Caractérisation et équipements des points de mesure *57*
2.1 Caractéristiques géométriques et hydrauliques au niveau des points de mesure 57
2.2 Mesures débitmétriques 60
2.3 Dispositif de prélèvement 61
2.3.1 Prélèvement 61
2.3.2 Asservissement et constitution des échantillons moyens 62
2.4 Couverture pluviométrique 64

Chapitre 3 : Représentativité de l'échantillonnage *66*
3.1 Représentativité des prélèvements 66
3.1.1 Analyse théorique de la représentativité des prélèvements 67
3.1.2 Analyse expérimentale : tests expérimentaux de représentativité des prélèvements 69
3.2 Représentativité de l'échantillon moyen 89

Chapitre 4 : Méthodes analytiques et incertitudes associées *91*
4.1 Protocoles d'analyses et paramètres analysés 91
4.1.1 Protocole d'analyse des vitesses de chute 94
4.2 Incertitudes d'analyses 98
4.2.1 Incertitudes d'analyses des paramètres globaux 99
4.2.2 Incertitudes des métaux lourds 102
4.2.3 Incertitudes des vitesses de chute 106

Conclusions sur le contexte expérimental *111*

PARTIE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE *117*

Chapitre 1 : Introduction *119*

Chapitre 2 : Les entrées *121*
2.1 Les retombées atmosphériques 122
2.2 Le ruissellement urbain 124
2.2.1 Ruissellement des chaussées 125
2.2.2 Ruissellement des toitures 127
2.2.3 Ruissellement d'autres surfaces urbaines (cours, parking…) 130
2.3 Le lavage de voiries 130
2.4 Les eaux domestiques 133

2.5 Les eaux industrielles et commerciales 138

Chapitre 3 : Les stocks de dépôt dans le réseau 142

3.1 Les biofilms 142
3.2 Les dépôts grossiers 143
3.3 L'interface eau – sédiment 144
3.3.1 Dépôt de type C : 144
3.3.2 Les « Near Bed Solids » 144
3.3.3 « Fluid Sediment » 145
3.3.4 Couche organique 145

Chapitre 4 : Les sorties 149

4.1 Effluents de temps sec, aux exutoires de réseaux unitaires 149
4.1.1 Paramètres physiques 149
4.1.2 Concentrations moyennes journalières des MES, des matières oxydables et azotées et des métaux lourds 150
4.1.3 Caractéristiques des particules dans les eaux usées de temps sec 153
4.2 Effluents unitaires de temps de pluie, aux exutoires des réseaux unitaires 157
4.2.1 Caractéristiques des évènements pluvieux étudiés 157
4.2.2 Concentrations des matières en suspension et des matières oxydables et azotées, en moyenne sur l'évènement pluvieux 158
4.2.3 Concentrations des métaux lourds, en moyenne sur l'évènement pluvieux 158
4.2.4 Caractéristiques des particules des effluents unitaires de temps de pluie 160

Chapitre 5 : Contribution des différentes sources aux flux de polluants de temps de pluie 167

5.1 Contribution des différentes sources de pollution aux flux de MES et de matières oxydables, à l'céhelle de l'évènement pluvial 169
5.2 Contribution des différentes sources de pollution aux flux de métaux lourds, à l'échelle de l'événement pluvial 170

Conclusions sur l'étude bibliographique 173

PARTIE 3 : CARACTERISATION DES EAUX URBAINES AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS DE L'OPUR 175

Chapitre 1 : Caractérisation des eaux usées de temps sec aux exutoires des bassins versants OPUR 177

1.1 Introduction 177
1.2 Données disponibles : 177
1.3 Caractéristiques moyennes journalières des eaux usées de temps sec 179
1.3.1 Paramètres physiques et débits moyens journaliers des eaux usées de temps sec 179
1.3.2 Concentrations moyennes journalières des eaux usées de temps sec 181
1.3.3 Flux par Equivalent Homme de NTKd : 187
1.3.4 Variabilité en fonction du jour de la semaine 189
1.3.5 Nature des polluants : 193
1.3.6 Conclusions sur la caractérisation des eaux usées de temps sec 204

Chapitre 2 Caractérisation des eaux unitaires de temps de pluie, aux exutoires des bassins versants OPUR 205

2.1 Données disponibles 205
2.1.1 Campagnes de mesure et paramètres polluants analysés 205
2.1.2 Caractéristiques des événements pluvieux étudiés et variabilité spatiale de la pluie sur la zone OPUR 206
2.2 Débits et paramètres physiques 208
2.3 Concentrations moyennes à l'échelle de l'événement pluvial 211
2.3.1 Concentrations des matières en suspension, des matières oxydables et azotées 211
2.3.2 Concentrations en métaux lourds 213
2.4 Flux par hectare « actif » des paramètres globaux et des métaux lourds 218
2.5 Nature de la pollution liée aux particules 220
2.5.1 Répartition de la pollution entre phase dissoute et particulaire 220
2.5.2 Caractéristiques des particules en suspension 224

2.6 Conclusions sur la qualité des RUTP aux exutoires des bassins versants de l'OPUR 234

PARTIE 4 : SOURCES ET PROCESSUS DE TRANSFERT DANS LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT UNITAIRE PARISIEN 237

INTRODUCTION 239

Chapitre 1 : Bilan hydrologique 241

Chapitre 2 : Variation au cours de la journée des eaux usées de temps sec 245

2.1 Evolution au cours de la journée des débits et des concentrations en DCOt 245
2.2 Variabilité d'un jour de temps sec à un autre 248
2.2.1 Variabilité des débits, des concentrations et des flux des paramètres globaux et des métaux lourds 248
2.2.2 Variabilité des caractéristiques des particules en suspension 250
2.3 Comparaison entre les sites de mesure 254

Chapitre 3 : Analyse des pollutogrammes en conductivité et en turbidité 257

3.1 Analyse des polluotogrammes en conductivité 257
3.1.1 Méthode de calcul 257
3.1.2 Ordres de grandeurs du rapport V_{EU}/Vtot à l'échelle de l'événement pluvieux 260
3.1.3 Analyse des pollutogrammes du rapport V_{EU}/V_{tot} 261
3.2 Analyse des pollutogrammes en turbidité 263
3.2.1 Analyse des pollutogrammes en turbidité 263
3.2.2 Courbes Masse-Volume [M (Vt)] 265

Chapitre 4 : Sources de polluants 269

4.1 Localisation et caractérisation de la couche organique dans la zone OPUR 269
4.2 Méthode d'évaluation des volumes des eaux unitaires, des eaux usées et des eaux de ruissellement 275
4.3 Méthode de calcul des masses des trois sources de pollution 279
4.4 Contribution des différentes sources aux flux des matières en suspension et des matières oxydables et azotées 289
4.5 Contribution des différentes sources en métaux lourds 293
4.5.1 Contribution des différentes sources en métaux lourds totaux 293
4.5.2 Contribution des différentes sources en métaux lourds dissous et particulaires 295
4.6 Teneurs en matières organiques et en cuivre des particules des eaux usées, des eaux de ruissellement et du stock de dépôt dans le réseau 301
4.6.1 Teneurs en matières volatiles en suspension, en DCOp, et en DBO_5p 301
4.6.2 Teneurs en cuivre des particules des eaux usées, des eaux de ruissellement et du stock de dépôt dans le réseau 303
4.6.3 Teneurs en COP et NTKp des particules des eaux usées, des eaux de ruissellement et du stock de dépôt dans le réseau 304
4.6.4 Comparaison des caractéristiques de particules issues de l'échange avec le réseau des bassins versants OPUR avec différents types de dépôts 306

CONCLUSIONS 308

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES 313

1 synthese des principaux resultats 315

1.1 Caractérisation des eaux usées de temps sec, aux exutoires des bassins versants de l'OPUR 315
1.2 Caractérisation des eaux unitaires de temps de pluie, aux exutoires des bassins versants de l'OPUR 316
1.3 Sources de pollution sur les bassins versants de l'OPUR 317

2 Retombées opérationnelles 321

3 perspectives de recherche 323

ANNEXES 345

Liste de figures

Figure 1: délimitation des bassins versants de l'OPUR, et emplacement des points exutoires 32
Figure 2: les bassins versants de l'OPUR et leurs arrondissements 34
Figure 3: carte des courbes de niveaux des bassins versants de l'OPUR 34
Figure 4 : répartition des populations dans chaque bassin versant de l'OPUR 36
Figure 5 : Equivalent Homme de NTKd calculé sur les bassins versants de l'OPUR 39
Figure 6: masses journalières de MES, de matières oxydables et de métaux lourds rejetées par les activités professionnelles payant des redevances à l'AESN (2001) 41
Figure 7 : maillages entre la zone d'étude et les bassins versants voisins et maillages internes à la zone d'étude 45
Figure 8 : maillages en amont du collecteur des Coteaux 49
Figure 9 : localisation des déversoirs d'orage 51
Figure 10 : distribution statistique des pentes sur la zone OPUR 53
Figure 11: relevés d'ensablement sur la zone OPUR Mai 2002 55
Figure 12: relevés d'ensablement sur la zone OPUR Octobre 2003 55
Figure 13 : type de dépôt et pourcentages 56
Figure 14: répartition du linéaire de boue et de sable par catégorie de pente 56
Figure 15 : sections types des principaux colleteurs de l'OPUR 58
Figure 16 : localisation des pluviomètres enregistreurs 65
Figure 17 : type de pluviomètres 65
Figure 18 : système de prélèvement multi-profondeurs 71
Figure 19 : profils verticaux des concentrations des MES, MVS, DCO et des taux de MVS aux exutoires des sites de l'OPUR 73
Figure 20 : courbe de vitesse de chute des particules en suspension 74
Figure 21 : systèmes de prélèvement de référence : tube PVC à gauche, pompe péristaltique à droite 75
Figure 22: vitesses de chute des MES des tests de représentativité des prélèvements, sur les sites amont "Marais, Sébastopol et Quais" 79
Figure 23: vitesses de chute des MES des tests de représentativité des prélèvements, sur les sites amont "Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval" 80
Figure 24 : Influence de la température et de la durée de stockage sur concentrations de l'ammonium 88
Figure 25 : comparaison des concentrations en métaux lourds totaux (pollutogrammes temps sec) 93
Figure 26: protocole VICAS 95
Figure 27: protocole VICPOL 95
Figure 28 : distribution des incertitudes des matières en suspension 99
Figure 29 : courbes des fréquences des incertitudes sur les MES 100
Figure 30 : courbes de distribution des incertitudes sur les MES dont le Cv>8% 100
Figure 31 : distribution des incertitudes de la DCO totale et dissoute 101
Figure 32 : courbes des fréquences des incertitudes sur la DCO totale et dissoute 102
Figure 33 : distribution des incertitudes des métaux totaux "Cuivre, Plomb et Zinc" 103
Figure 34 : courbes des fréquences des incertitudes des métaux totaux (Cu, Pb et Zn) 104
Figure 35 : courbes des fréquences des incertitudes des métaux totaux (Cu, Pb et Zn) 105
Figure 36 : reproductibilité de décantation du protocole VICAS en terme de MES et MVS. 107
Figure 37 : incertitudes sur le pourcentage en masse x ayant une vitesse de chute inférieure à, des MES et MVS, par temps sec et temps de pluie (VICAS) 108
Figure 38 : variation de F(Vc) par rapport à la concentration moyenne (VICPOL) 109
Figure 39 : système étudié 120
Figure 40: Principales entrées dans le réseau d'assainissement unitaire 121

Figure 41: concentrations en métaux lourds dans les eaux de ruissellements de différents types de toitures (D'après Gromaire, 1998) *129*
Figure 42: Vue en coupe de l'interface eau-sédiment (Oms, 2003) *145*
Figure 43 : Système d'observation (Oms, 2003)..... *146*
Figure 44: Image de la couche organique obtenue avec l'endoscope (Oms, 2003)..... *147*
Figure 45 : localisation des sites de mesure parisiens *149*
Figure 46 : vitesses de chutes des matières en suspension dans les eaux usées de temps sec *156*
Figure 47: courbes de vitesses de chute des particules en suspension, dans les eaux unitaires de temps de pluie..... *162*
Figure 48: courbes de vitesses de chute des métaux lourds *163*
Figure 49: teneurs en métaux par classe de vitesse de chute (Michelbach, 1993)..... *164*
Figure 50 : teneurs en métaux par classe de vitesse de chute (Benoist, 1990)..... *165*
Figure 51 : teneurs en métaux par classe de vitesse de chute (Baker, 1997) *165*
Figure 52 : variabilité spatiale des débits de temps sec, par équivalent homme d'azote aux exutoires des six bassins versants étudiés..... *181*
Figure 53 : concentrations moyennes journalières en métaux lourds mesurées dans les effluents de temps sec des sites de l'OPUR..... *184*
Figure 54 : variabilité spatiale des flux en EHN des métaux lourds..... *188*
Figure 55 : variabilité des débits par l/s et des débits en l/EHN entre les jours de semaines et le dimanche *190*
Figure 56 : variabilité des flux en EH d'azote des MES et du COT, entre la semaine et le week-end..... *191*
Figure 57: variabilité des flux journaliers en EH d'azote du Cut et Znt, entre la semaine et le dimanche *192*
Figure 58 : Variabilité des teneurs en DBO_5p et NTKp par temps sec. *196*
Figure 59: Teneurs en métaux lourds des particules des eaux usées de temps sec *197*
Figure 60: vitesses de chute des particules en suspension, mesurées dans les eaux usées de temps sec *199*
Figure 61 : vitesses de chute des particules de carbone organique, mesurées dans les eaux usées de temps sec..... *199*
Figure 62: comparaison entre les vitesses de chute des particules en suspension et des particules du carbone organique particulaire, des eaux usées de temps sec *200*
Figure 63 : distribution des polluants par classe de vitesses de chute..... *201*
Figure 64: variabilité des rapports DCOt/DBOt, DCOp/DBOp, COP/NTKp, dans les effluents de temps sec..... *202*
Figure 65: Concentrations en métaux lourds totaux, mesurées, par temps de pluie, à l'exutoire des bassins d'étude (les données « ruissellement » sont celles mesurées sur le Marais en 1997–1998). *214*
Figure 66 : Flux par hectare actif en métaux lourds mesurés par temps de pluie à l'exutoire des bassins d'étude..... *219*
Figure 67: Répartition de la pollution entre la phase dissoute et la phase particulaire, par temps de pluie...... *221*
Figure 68 : Répartition de la pollution métallique entre la phase dissoute et la phase particulaire, par temps de pluie. *222*
Figure 69 : teneurs en métaux lourds des particules..... *226*
Figure 70: vitesses de chute des matières en suspension dans les effluents de temps de pluie, aux exutoires des bassins versants..... *227*
Figure 71: vitesses de chute du carbone organique dans les effluents de temps de pluie aux exutoires des bassins versants..... *228*

Figure 72: Distribution des polluants par classes de vitesses de chute sur le Marais. *232*
Figure 73: Distribution des polluants par classes de vitesses de chute sur Clichy centre *232*
Figure 74: comparaison des Vc de DCO et Cup entre le Marais et Clichy centre *233*
Figure 75: cycles journaliers des débits et des concentrations de DCOt, mesurés pour les six sites de mesure *246*
Figure 76 : Comparaison de pollutogrammes en DCOt entre les sites de mesure...... *247*
Figure 77 : variabilité des débits d'un jour de temps sec à un autre, mesurés sur Marais et Clichy centre *248*
Figure 78: variabilité des concentrations d'un jour de temps sec à un autre, mesurés sur Clichy aval..... *249*
Figure 79: variabilité des concentrations d'un jour de temps sec à un autre, mesurés sur Clichy centre *249*
Figure 80 : variabilité des pourcentages de la pollution organique et azotées liées aux particules, mesurés aux sites Sébastopol et Quais..... *250*
Figure 81 : variabilité des pourcentages de la pollution métallique liée aux particules, mesurés aux sites Marais et Quais..... *251*
Figure 82 : variabilité d'un jour de temps sec à un autre du rapport MES/NTKd, calculé sur l'ensemble des sites de l'OPUR *253*
Figure 83: comparaison des débits entre les différents sites de l'OPUR..... *254*
Figure 84: comparaison des pollutogrammes moyens des concentrations en DCOt et en Znt, entre les différents sites de l'OPUR..... *255*
Figure 85: comparaison des pollutogrammes moyens des concentrations en NTKt, entre les différents sites de l'OPUR *255*
Figure 86: comparaison des pollutogrammes moyens des pourcentages de la pollution organique et métallique liée aux particules, entre les différents sites de l'OPUR..... *256*
Figure 87: comparaison des teneurs des particules entre les différents sites de l'OPUR..... *256*
Figure 88 : courbe des conductivités en fonction des concentrations de KCl..... *259*
Figure 89 : pollutogrammes du $\%V_{EU}/V_{tot}$ *évalués au Quais et à Clichy centre* *261*
Figure 90 : pollutogrammes du $\%V_{EU}/V_{tot}$ *évalués Coteaux aval et Clichy aval*..... *262*
Figure 91 : pollutogrammes en turbidité mesurés au cours de la pluie du 07Juillet2004-A *263*
Figure 92 : pollutogrammes en turbidité mesurés au cours de la pluie du 30Novembre2003 et 18Avril2004..... *264*
Figure 93: comparaison de l'échange avec le réseau + le ruissellement avec l'hydrogramme *265*
Figure 94 : les six zones des courbes M(V) *266*
Figure 95: courbe M(V) pour l'ensemble des pluies étudiées sur les sites OPUR *268*
Figure 96: zones où il y a risque de présence de la couche organique *270*
Figure 97: Contribution des eaux usées en Cdd, Cud, Pbd et Znd..... *297*
Figure 98: contribution des trois sources en MES et DCOt, en somme des masses sur l'ensemble des évènements pluvieux étudiés.($1^{ière}$ *barre:hypothèse 1,* $2^{ième}$ *barre: hypothèse 2)* *318*
Figure 99: contribution des trois sources en Cuivre total, en somme des masses sur l'ensemble des évènements pluvieux étudiés. ($1^{ière}$ *barre : hypothèse 1,* $2^{ième}$ *barre hypothèse 2)*..... *319*

Liste de tableaux

Tableau 1: caractéristiques des bassins versants étudiés 33
Tableau 2 : surfaces urbaines sur les bassins versants de l'OPUR 35
Tableau 3: surfaces et pourcentages des toitures en zinc et des toitures non zinc présentes sur les bassins versants de l'OPUR 36
Tableau 4: pourcentages des voiries présentes sur les bassins versants de l'OPUR 36
Tableau 5: densités de population et d'emploi sur les bassins versants de l'OPUR 37
Tableau 6: densités de population et d'emploi sur les bassins versants de l'OPUR 39
Tableau 7: principales activités payant des redevances à l'AESN, de la zone OPUR 40
Tableau 8 : ordres de grandeurs des débits des différents rejets d'eau dans le réseau d'assainissement 42
Tableau 9: principaux collecteurs de la zone OPUR 44
Tableau 10: volumes et débits transitant par temps sec et par temps de pluie au niveau des différents maillages 50
Tableau 11 : déversements mesurés entre 2002 et 2004 (SAP, 2003-2004) 52
Tableau 12 : pente de tronçons de collecteur et de petite ligne de la zone OPUR 52
Tableau 13: caractéristiques des sites de l'OPUR 57
Tableau 14: débit moyen journalier, hauteur d'eau maximale journalière et vitesse maximale journalière de temps sec 59
Tableau 15 : débit maximal, hauteur d'eau maximale et vitesse maximale de temps de pluie (Quais, Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval :pluie du 06/07/01, Imax = 200 mm/h, Imoy = 8 mm/h; et Sébastopol: pluie du 02/07/2003) 59
Tableau 16: plages horaires retenues pour l'établissement des pollutogrammes de temps sec 64
Tableau 17 : critères à respecter lors du choix et d'installation d'un préleveur automatique 68
Tableau 18: biais induits lors des prélèvements automatiques et tests réalisés 69
Tableau 19: Profondeurs des prélèvements effectués par le système multi-profondeur 70
Tableau 20 : concentrations moyennes initiales des MES des différents systèmes de prélèvement 77
Tableau 21 : concentrations moyennes initiales des MVS des différents systèmes de prélèvement 77
Tableau 22 : concentrations moyennes initiales de DCO des différents systèmes de prélèvement 78
Tableau 23 : Concentrations en MES, MVS et %MVS/MES des prélèvements d'eau potable et d'eau usée à Coteaux aval 83
Tableau 24 : Concentrations en MES, MVS et %MVS/MES des prélèvements d'eau potable et d'eau usée à Coteaux aval 83
Tableau 25 : influence de la température et de la durée de conservation sur les échantillons d'eau usée 86
Tableau 26 : influence de la température et de la durée de conservation sur les échantillons d'eau usée 86
Tableau 27 : influence de la température et de la durée de conservation sur les échantillons d'eau usée 87
Tableau 28 : volumes (en % du volume total de l'événement pluvieux) non échantillonnés en début et fin de l'événement pluvieux, sur l'ensemble des sites de l'OPUR 90
Tableau 29 : comparaison des concentrations en métaux lourds totaux (moyen temps de pluie) 93
Tableau 30 : incertitudes sur les concentrations des métaux totaux au seuil de 95% 106
Tableau 31 : Evaluation de l'incertitude sur la mesure des vitesses de chute de MES et MVS par temps ses et temps de pluie 108

Tableau 32 : Evaluation de l'incertitude sur la mesure des vitesses de chute, par temps de pluie, VICPOL *110*
Tableau 33: principales caractéristiques des bassins versants étudiés *111*
Tableau 34: principales caractéristiques du réseau d'assainissement *112*
Tableau 35 : Equipements mis en place *113*
Tableau 36: paramètres polluants étudiés, protocoles d'analyses et incertitudes associées *115*
Tableau 37: flux atmosphériques annuels des retombées atmosphériques sèches, en métaux lourds (µg/m^2.an) *122*
Tableau 38 : concentrations des paramètres globaux et des métaux lourds dans les retombées atmosphériques humides *123*
Tableau 39 : flux atmosphériques totaux en métaux lourds (µg/m^2.an) *124*
Tableau 40 : concentrations moyennes des MES, matières organiques et des métaux lourds dans les eaux de ruissellement de chaussées, par temps de pluie *125*
Tableau 41 : teneurs en métaux lourds dans différentes parties des véhicules *126*
Tableau 42 : flux d'émissions de Cu, Pb, et Zn en fonction des types de rues *126*
Tableau 43 : concentrations moyennes en MES, en matières organiques et en métaux lourds dans les eaux de ruissellement des toitures *128*
Tableau 44: concentrations moyennes en MES, en matières organiques et en métaux lourds dans les eaux de ruissellements des cours et parkings *130*
Tableau 45: masses polluantes journalières, par mètre de caniveau, des eaux de nettoyage de voirie *131*
Tableau 46: concentrations en MES, en matières organiques et en métaux lourds, des eaux de nettoyage de voirie *132*
Tableau 47: proportion de DCO, de DBO5 et de métaux lourds liée aux particules dans les eaux de nettoyage *132*
Tableau 48 : flux métalliques engendrés par le lavage de la voirie sur l'ensemble du bassin versant du Marais (Gromaire et al; 2000) *133*
Tableau 49: production des matières fécales et des urines *134*
Tableau 50: masse des MES, de matières organiques et azotées dans les excréments humains (Laak, 1974; Seigrist et al, 1976) *135*
Tableau 51 : charges polluantes des eaux usées domestiques *135*
Tableau 52 : production d'eau usée domestique par type d'usage (1 en Grande Bretagne ; 2 à Malte ; 3 en France) *136*
Tableau 53 : charge polluante des eaux usées domestiques par type d'usage ([1] : Blanic et al (1989) ; [2] : Petit et al (1976) ; [3] : Siegrist et al (1976)) *136*
Tableau 54 : flux métalliques par type d'activité domestique (Comber et Gunn, 1996) *137*
Tableau 55: concentrations en MES, MVS et DCO t+d dans les eaux de différents dispositifs *137*
Tableau 56: contribution des différents dispositifs (Almeida et al, 1999) *138*
Tableau 57 : flux annuels en métaux lourds pour quelques sources *138*
Tableau 58 : concentrations en métaux lourds des effluents industriels et commerciaux *139*
Tableau 59 : concentrations des MES, et des matières organiques et azotées, dans les eaux usées commerciales et industrielles par type d'activité (cellule des contrôles des eaux, 2003) *140*
Tableau 60 : concentrations des métaux lourds, dans les eaux usées commerciales et industrielles par type d'activité (cellule des contrôles des eaux, 2003) *140*
Tableau 61 : concentrations en métaux lourds dans les eaux usées domestiques (Cellules de contrôles des eaux) *141*
Tableau 62 : différents types de dépôts en réseau d'assainissement unitaire *142*
Tableau 63: Caractéristiques du dépôt grossier *143*

Tableau 64: teneurs en métaux lourds dans le dépôt grossier *144*
Tableau 65: Caractéristiques du « fluid sediment » étudié par différents auteurs *145*
Tableau 66: caractéristiques de la couche organique, au Marais *147*
Tableau 67 : paramètres physiques mesurés dans les eaux usées de temps sec *150*
Tableau 68 : concentrations moyennes journalières des paramètres globaux des eaux usées de temps sec *151*
Tableau 69 : concentrations moyennes journalières des métaux lourds des eaux usées de temps sec *153*
Tableau 70 : pourcentage de pollution particulaire des eaux usées de temps sec *154*
Tableau 71 : teneurs en matières organiques et en métaux lourds des particules en suspension des eaux usées de temps sec *154*
Tableau 72 : vitesses de chute des particules en suspension dans les eaux usées de temps sec *155*
Tableau 73 : valeur du rapport DCO/DBO5 des eaux usées de temps sec *156*
Tableau 74 : caractéristiques des évènements pluvieux de la littérature *157*
Tableau 75 : concentrations des paramètres globaux des eaux unitaires, en moyenne sur l'événement pluvieux. *158*
Tableau 76 : concentrations des métaux lourds des eaux unitaires, en moyenne sur l'événement pluvieux. *159*
Tableau 77 : pourcentage de la pollution liée aux particules des eaux unitaires, en moyenne sur l'événement pluvieux *160*
Tableau 78 : teneur en matières oxydables et en métaux des eaux unitaires, en moyenne sur l'événement pluvieux *161*
Tableau 79 : contribution des différentes sources à la pollution organique de temps de pluie (1 : krejci et al, 1987, 2 :Bachoc, 1992 ; 3 : Chebbo, 1992 ; 4 : Gromaire, 1998) *170*
Tableau 80 : contribution des différentes sources à la pollution métallique de temps de pluie à l'exutoire du Marais (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%) (Gromaire, 1998) *171*
Tableau 81 : contribution des différentes sources à la pollution métallique des eaux pluviales unitaires, d'après [LHRSP; 1994] *171*
Tableau 82 : contribution des différents types d'eaux de ruissellement à la masse polluante totale des eaux de ruissellement du bassin versant du Marais (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%) *171*
Tableau 83 : nombre de journées de temps sec échantillonnées par site de mesure et par paramètre polluant *178*
Tableau 84: Paramètres physiques et débits de temps sec à l'exutoire des six bassins versants étudiés. *179*
Tableau 85 : comparaison des débits moyens journaliers au Marais et à Clichy aval *180*
Tableau 86: Concentrations en matières en suspension, en matières organiques et azotées mesurées par temps sec à l'exutoire de nos bassins d'étude *182*
Tableau 87: rappels des concentrations trouvées dans la bibliographie *183*
Tableau 88: rappels des concentrations trouvées dans la bibliographie *186*
Tableau 89 : comparaison des concentrations en métaux lourds des eaux usées et des eaux potables *186*
Tableau 90 : flux par équivalent habitant des paramètres globaux *187*
Tableau 91 : nombre d'équivalent homme de NTKd mesuré la semaine et le dimanche *191*
Tableau 92: Répartition de la pollution entre la phase dissoute et la phase particulaire, par temps sec. *193*
Tableau 93 : répartition de la pollution métallique entre phase dissoute et phase particulaire, par temps sec *193*

Tableau 94: Teneurs en matières organiques des particules, mesurées, par temps sec, à l'exutoire de nos six bassins versants. *195*
Tableau 95 : teneurs en MVS et en MO trouvées dans la littérature *196*
Tableau 96: Vitesses de chute médianes des MES et du COP dans les effluents de temps sec *198*
Tableau 97 : vitesse de chute médiane *202*
Tableau 98: nombre d'évènements pluvieux étudiés pour chaque paramètre polluant, aux exutoires des bassins versants de l'OPUR *205*
Tableau 99: caractéristiques des événements pluvieux échantillonnés *207*
Tableau 100: débits moyen et maximal mesurés aux exutoires des 6 bassins versants au cours des événements pluvieux étudiés, et comparaison avec les débits d'eaux usées calculés sur la période de l'événement pluvieux *209*
Tableau 101 : pH et conductivité mesurés sur les échantillons moyens de temps de pluie. .. *210*
Tableau 102: Concentrations en MES, MO, et NTK, mesurées, par temps de pluie, à l'exutoire des bassins d'étude. *211*
Tableau 103: Rappel des ordres de grandeurs des concentrations des MES et MO et NTK dans les effluents de temps de pluie trouvées dans la littérature *213*
Tableau 104 : Effet potentiel de la disparition de l'essence plombée et de la diminution de retombées atmosphériques de plomb sur les concentrations des eaux de ruissellement du Marais *216*
Tableau 105: Rappel des ordres de grandeurs des concentrations en métaux lourds dans les effluents de temps de pluie trouvées dans la littérature *217*
Tableau 106: Flux par hectare actif en MES, MO, et NTK, mesurées, par temps de pluie, à l'exutoire des bassins d'étude. *218*
Tableau 107 : flux par unité de surface actif mesuré au Marais en 1998 (Gromaire, 1998) *219*
Tableau 108 : Rappel des pourcentages de la pollution organique liée aux particules, mesurées par temps de pluie, trouvées dans la littérature. *221*
Tableau 109: Rappel des pourcentages de la pollution métallique liée aux particules, mesurées par temps de pluie, trouvées dans la littérature. *223*
Tableau 110: Teneurs en matières organiques et azotées des particules mesurées par temps de pluie à l'exutoire de nos six bassins versants. *224*
Tableau 111: Rappel des teneurs en métaux des particules, mesurées, par temps de pluie. . *226*
Tableau 112: vitesses de chute médianes mesurées dans les eaux unitaires de temps de pluie, aux exutoires des bassins de l'OPUR *228*
Tableau 113: rappel des V50 des effluents unitaires de temps de pluie, trouvées dans la littérature *229*
Tableau 114: Vitesses de chute médiane (V50) des polluants mesurées sur le Marais et Clichy centre sur les effluents unitaires de temps de pluie *229*
Tableau 115: % des volumes passés au niveau des DO et des principaux maillages par rapport à la somme des entrées, pendant les campagnes de mesure de temps de pluie *244*
Tableau 116 : nombre de journées de temps sec échantillonnées par site de mesure et par paramètre polluant *245*
Tableau 117 : conductivité moyennes des eaux usées de temps sec des sites OPUR *259*
Tableau 118: %V_{EU}/V_{tot} estimés par la méthode de conductivité et la méthode volumétrique *260*
Tableau 119: caractérisation des courbes M(V) (Betrand-Krajewski et al, 1998) *266*
Tableau 120: longueurs et pourcentages en longueur des collecteurs où il y a la couche organique, sur chaque bassin versant *271*
Tableau 121: collecteurs visités et susceptibles de contenir de la couche organique *272*
Tableau 122 : rapport Zn/Cd mesuré sur le bassin versant du Marais en 2003 et 2004 ..... *274*

Tableau 123: Teneurs en MVS, en COP, NTK, DCO et en métaux lourds mesurées dans la couche organique du collecteur de Lyon, ST Gilles et Vielle du Temple *274*
Tableau 124 : concentrations des eaux de ruissellement du Marais (1997-1998) *283*
Tableau 125: concentrations des eaux de ruissellement trouvées dans littérature *284*
Tableau 126 : concentrations des eaux de ruissellement du Marais (1997-1998) *287*
Tableau 127: contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement, et du stock de dépôt dans le réseau en MES, et MVS (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%) *289*
Tableau 128: contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement, et du stock de dépôt dans le réseau en DCOt, et $DBOt_5$ (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%) *290*
Tableau 129: contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement, et du stock de dépôt dans le réseau en COT, et NTKt (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%) ... *290*
Tableau 130 : Contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement et de l'érosion de dépôts du réseau aux flux de Cdt et Cut, de temps de pluie (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%) *293*
Tableau 131 : Contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement et de l'érosion de dépôts du réseau aux flux de Pbt et Znt, de temps de pluie (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%) *294*
Tableau 132: %Réseau / Ruissellement du Cdd et du Cud, en somme des masses sur l'ensemble des pluies *298*
Tableau 133: %Réseau / Ruissellement du Pbd et du Znd, en somme des masses sur l'ensemble des pluies *298*
Tableau 134: contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement et de l'érosion de dépôts du réseau aux flux de Cdp et Cup, de temps de pluie (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%) *300*
Tableau 135: contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement et de l'érosion de dépôts du réseau aux flux de Pbp et Znp, de temps de pluie (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%) *300*
Tableau 136: teneurs en matières volatiles des particules transférées dans le réseau par temps de pluie *301*
Tableau 137: teneurs en matières organiques des particules transférées dans le réseau par temps de pluie *302*
Tableau 138: teneurs en matières organiques des particules transférées dans le réseau par temps de pluie *302*
Tableau 139: teneurs en cuivre des particules transférées dans le réseau par temps de pluie *303*
Tableau 140: teneurs en COP dans le dépôt érodé sur les bassins versants de l'OPUR *305*
Tableau 141: teneurs en NTKp dans le dépôt érodé sur les bassins versants de l'OPUR *305*
Tableau 142 : teneurs en matières organiques dans la couche organique et le dépôt grossier *306*
Tableau 143 : teneurs en métaux lourds dans la couche organique, le dépôt grossier et les matières fécales *307*

INTRODUCTION

1 CONTEXTE

La maîtrise de la pollution liée aux rejets urbains par temps de pluie (RUTP), qu'ils soient strictement pluviaux ou issus de réseaux unitaires, a pris une place croissante dans les problèmes d'assainissement. Elle est à l'origine d'investissements financiers considérables, dans un objectif de préservation des écosystèmes aquatiques, mais aussi d'application de la directive européenne du 21 mai 1991 et des dispositions réglementaires émanant de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992. Cette réglementation impose en effet le traitement des surverses des réseaux unitaires pour les événements non exceptionnels (Deneuvy, 1995).

Depuis 1970, un grand nombre de recherches consacrées à la pollution des effluents de temps de pluie en milieu urbain ont été réalisées dans différents pays, en s'appuyant, pour beaucoup d'entre elles, sur des campagnes expérimentales relativement lourdes. Les objectifs visés étaient l'évaluation de la pollution liée au ruissellement urbain, l'évaluation des flux véhiculés par les réseaux unitaires et la quantification de l'impact des RUTP sur le milieu récepteur. Les résultats obtenus ont permis de fournir des ordres de grandeurs concernant l'importance de la pollution des RUTP, des éléments partiels sur les caractéristiques et les origines de cette pollution, et des idées vagues et sûrement entachées d'erreurs sur les processus de génération et de transport des polluants.

C'est dans ce contexte que le CEREVE a équipé, en 1995, un bassin versant expérimental dans le quartier du Marais à Paris afin d'améliorer les connaissances concernant les sources, les caractéristiques et les mécanismes de génération et de transport de la pollution des RUTP, dans le cas des réseaux d'assainissement unitaires. Ces travaux rentrent dans le cadre du programme de recherche « génération et transport de la pollution des rejets urbains de temps de pluie en réseau d'assainissement unitaire » mené entre 1994 et 1999 (Chebbo, 2001).

Les résultats obtenus sur ce bassin versant de petite taille (42 ha) ont confirmé d'une part l'importance de la pollution des eaux de ruissellement (en particulier les chaussées et les toitures), et d'autre part le fait que le réseau d'assainissement n'est pas seulement un système de transport mais aussi un réacteur physique, chimique et biologique qui conditionne par ses caractéristiques la qualité des eaux en milieu urbain. A l'issue de ce programme de recherche, il paraissait important d'une part d'approfondir les connaissances concernant les processus dominants sur les surfaces urbaines et dans le réseau d'assainissement, et d'autre part de disposer de mesures fiables à différentes échelles spatiales afin de cerner l'évolution des

caractéristiques et des sources de la pollution des RUTP entre l'amont et l'aval d'un grand bassin versant urbain.

C'est dans ce but que le CEREVE a proposé d'intégrer le bassin du Marais dans une série de bassins versants de taille croissante (bassin versant de plusieurs milliers d'hectares) en utilisant en grande partie le réseau de mesure de la ville de Paris et du SIAAP.

2 PROGRAMME DE RECHERCHE « EVOLUTION SPATIALE DES CARACTERISTIQUES ET DES ORIGINES DES POLLUANTS DANS LES RESEAUX D'ASSAINISSEMENT UNITAIRES »

A l'issue des résultats obtenus sur le Marais, plusieurs interrogations ont été soulevées :

- *En terme d'évolution des flux polluants et des modes de transport des polluants en fonction de l'échelle spatiale :*

  Malgré les connaissances acquises, grâce notamment aux programmes de recherche « Solides en réseaux d'assainissement » (Chebbo, 1992) et "Génération et Transport de la Pollution des RUTP en Réseau d'Assainissement Unitaire" (Chebbo, 2001), il reste bien des questions en suspens et des points à approfondir concernant les caractéristiques des flux polluants transférés par temps de pluie dans les réseaux unitaires.

  Bien que les mesures effectuées à l'exutoire du Marais confirment des résultats antérieurs concernant le rôle majeur des MES comme vecteur de pollution, il apparaît que pour certains composés tels que zinc, DCO, DBO5, la proportion de polluants fixés aux particules est relativement variable d'un événement à un autre (de 65 à 99%). Ce résultat est-il généralisable ou dépend-il de l'occupation du sol ou de la durée de transfert en réseau ?

  Les résultats obtenus à l'exutoire du Marais en terme de vitesse de sédimentation semblent remettre en cause dans une certaine mesure le postulat de « bonne décantabilité » des RUTP. Les vitesses de chute plus faibles mesurées sur le Marais sont-elles spécifiques à ce site, sont-elles susceptibles de varier avec la taille ou l'occupation du sol du bassin versant ou s'expliquent-elles par des différences de protocole de mesure ? Par ailleurs, nous ne disposions au début de cette thèse d'aucune information sur la répartition des masses des différentes espèces polluantes par classes de vitesses de chute des particules.

Par ailleurs, les mesures effectuées sur le bassin versant du Marais ont mis en évidence une évolution importante des flux et des modes de transport des espèces polluantes au cours du transfert dans le réseau unitaire. Par temps sec, on observe une variation des caractéristiques des effluents, liée probablement à des phénomènes d'érosion / sédimentation. Par temps de pluie, on observe entre l'entrée et la sortie du réseau d'assainissement une augmentation des concentrations en MES, DCO, DBO5, une augmentation de la proportion de polluants sous forme particulaire, une augmentation de la vitesse de sédimentation, une augmentation de la teneur en matière organique des particules. Aussi nous paraît-il important de suivre cette évolution pour des durées de transfert en réseau plus longue et d'identifier si les flux et modes de transport des polluants se stabilisent à partir d'une certaine échelle spatiale.

- *En terme d'origines des polluants, en fonction de l'échelle spatiale :*

Dans le cas des réseaux d'assainissement unitaires, on peut distinguer trois origines aux flux polluants des RUTP. Ce sont : la pollution des eaux de ruissellement, les eaux usées de temps sec, l'érosion des stocks de polluants existant à l'intérieur du réseau. Les recherches menées entre 1994 et 1999, sur le bassin versant expérimental du Marais, ont permis de quantifier la contribution de chacune de ces sources à l'échelle de 42 ha.

Les résultats obtenus ont démontré le rôle majeur des stocks constitués à l'intérieur du réseau dans la génération des flux de matière en suspension et de matière organique : sur le bassin versant du Marais, 40 à 80% de la masse de matière en suspension et de matière organique générée au cours d'une pluie provient de l'intérieur du réseau d'assainissement (Gromaire, 1998). Ce stock érodé par temps de pluie (Ahyerre, 1999) correspond, dans le cas du Marais, à une couche organique située au fond des collecteurs, à l'interface eau/sédiment, et constituée essentiellement de matières d'origine fécale, de papiers et de résidus alimentaires (Oms, 2003). Elle se formerait par temps sec dans les zones de faible vitesse d'écoulement, et serait facilement remise en suspension par temps de pluie. Sur le site du Marais elle constitue la principale source de pollution des effluents de temps de pluie.

Les données du Marais ont par ailleurs démontré que les eaux de ruissellement constituaient la principale source de certains micropolluants dans les effluents de temps de pluie. Dans le cas du cadmium, du zinc et du plomb, les flux polluants proviennent

essentiellement des eaux de ruissellement de toiture, du fait de la corrosion des parties métalliques du toit.

Ces résultats obtenus à l'échelle d'un bassin versant de 42 ha soulèvent cependant un certain nombre d'interrogations :

- les résultats obtenus sur le Marais sont-ils extrapolables au reste de l'agglomération parisienne ? En particulier : l'importance du rôle du réseau comme source de matières en suspension et de matière organique est-elle spécifique à ce site d'étude dont le réseau est bien encrassé ? La faible contribution des eaux de ruissellement en terme de MES et de matière organique est-elle spécifique au Marais ? L'importance de la contribution des eaux de ruissellement aux flux de métaux est-elle spécifique au type de toitures du Marais ou est-elle caractéristique de tout Paris ?dans le cas de grands bassins versants, présentant des débits de temps secs nettement plus importants que dans le cas du Marais, la couche organique qui semble localisée uniquement dans des parties de réseau à faible vitesse d'écoulement reste-t-elle la principale source de matière organique des effluents de temps de pluie ?
- peut-on identifier d'autres sources de pollution, par temps de pluie, dans le réseau parisien que la « couche organique » ?

Compte tenue de ces nouvelles interrogations, l'objectif de ce projet de recherche est de faire progresser les connaissances concernant la pollution des effluents de temps sec et de temps de pluie en réseau unitaire, au moyen de campagnes d'échantillonnage et d'observations en continu, sur une durée de 3 à 5 ans, à différentes échelles spatiales.

Le dispositif mis en place permet d'évaluer :

- les évolutions de la nature et des flux de polluants entre l'amont et l'aval d'un grand bassin versant ;
- les mécanismes de transfert des polluants dans les réseaux unitaires;
- l'évolution des sources des polluants et des mécanismes dominants en fonction de l'échelle spatiale.

L'objectif final de ces recherches est la mise au point d'outils d'aide à la compréhension et à la gestion, sur le plan qualitatif et quantitatif, des eaux urbaines. Les enjeux de ce type de programme de recherche sont doubles. Il s'agit d'une part d'orienter des solutions de

traitement de la pollution des eaux de temps de pluie, tant curatives que préventives, et plus généralement de fournir les éléments pour une politique globale de gestion des eaux pluviales.

Cette recherche a donné lieu à quatre thèses de doctorat, dont celle qui fait l'objet de ce rapport :

Thèse	Thème de recherche
Claire OMS (2003)	Localisation, nature et dynamique de l'interface eau-sédiment en réseau d'assainissement unitaire
Vincent ROCHER (2003)	Introduction et stockage des hydrocarbures et des éléments métalliques dans le réseau d'assainissement unitaire parisien
Johnny GASPERY (en cours)	Evolution spatiale de la pollution en hydrocarbures dans les réseaux d'assainissement unitaires
Mounira KAFI-BENYAHIA (2006)	Variabilité spatiale des caractéristiques et des origines des polluants de temps de pluie le réseau d'assainissement unitaire parisien

3 OBJECTIFS DE LA THESE

Compte tenu de ces nouvelles interrogations, les travaux de cette thèse tendent à répondre aux trois principaux objectifs suivants :

- ✓ Intégration du bassin versant du Marais dans une série de bassins versants de taille croissante et d'occupation du sol comparable ;
- ✓ Caractérisation des effluents de temps sec et de temps de pluie ; et étude de la variabilité spatiale des flux et de la nature des polluants, en fonction de la taille du bassin versant et du temps de transfert en réseau. Les polluants suivants seront étudiés : MES, MVS, DCO, DBO_5, COT, NTK, Cd, Cu, Pb, Zn ;
- ✓ Compréhension des mécanismes de transfert dans le réseau et évaluation de la contribution de chacune de ces sources « Eaux usées, Eaux de ruissellement et stock de dépôt contenu dans le réseau » à la pollution de temps de pluie.

La réponse à ces objectifs fait l'objet de ce rapport qui est structuré en quatre parties :

La première partie concerne *le contexte expérimental* et a été consacrée à la mise en place du dispositif expérimental (choix et délimitation des bassins versants expérimentaux,

caractérisation des équipements des points de mesure, représentativité de l'échantillonnage et protocoles analytiques et incertitudes d'analyses).

La seconde partie correspondant à *une synthèse bibliographique* et dans laquelle nous nous sommes intéressées à caractériser chacun des termes suivants: les entrées (caractérisation des différentes entrées dans le réseau d'assainissement unitaire: retombées atmosphériques, eaux de lavage de voiries, eaux de ruissellement de toitures, de chaussées et cours…, apports domestiques et professionnels), le stock dans le réseau (caractérisation des différents types de dépôts contenus dans le réseau) et les sorties (caractérisation des eaux usées de temps sec, et des eaux unitaires de temps de pluie).

La troisième partie destinée à *la caractérisation des eaux usées de temps sec, et des eaux unitaires de temps de pluie*, aux exutoires de différents bassins de tailles croissantes "OPUR".

Nous abordons dans la quatrième partie *la contribution des trois sources "eaux usées, eaux de ruissellement et stocks de dépôt dans le réseau" à la pollution des RUTP*. L'évaluation des pourcentages de contribution a été réalisée au moyen de bilans de masses, qui ont nécessité une étude hydrologique et hydraulique du fonctionnement du réseau des bassins de l'OPUR et une caractérisation des eaux usées de temps sec à différentes périodes de la journée. De plus, une analyse des mécanismes de transfert dans le réseau a été faite sur la base de pollutogrammes de conductivité et de turbidité.

Enfin, nous terminerons par une synthèse des principaux résultats obtenus, et les perspectives pour les recherches futures.

PARTIE 1 : CONTEXTE EXPÉRIMENTAL

Chapitre 1 : Bassins versants expérimentaux

1.1 Choix et délimitation des bassins versants

Pour répondre aux objectifs définis précédemment, nous avons choisi de travailler sur des bassins versants d'échelles spatiales différentes (supérieures à celle du Marais) tout en restant dans un contexte urbanistique relativement homogène, qui est celui de Paris intra-muros et en gardant le bassin versant du Marais comme point de référence.

Par ailleurs, l'idée de suivre un même cheminement d'eau, le long d'un des axes drainant majeurs du réseau parisien a été privilégiée.

Ceci a conduit au principe d'un dispositif expérimental constitué d'un réseau de 6 bassins versants de tailles croissantes, allant du bassin versant du Marais, à l'amont du réseau parisien, jusqu'à l'usine de Clichy à l'aval, en suivant l'axe du collecteur de Clichy.

Ces bassins versants devaient répondre dans l'idéal à un certain nombre de critères : bien délimités, à exutoire unique, muni d'un réseau d'assainissement unitaire et visitable, comportant peu de déversoirs d'orage, et présentant peu de maillages en particulier avec les bassins de la banlieue.

Compte tenu de ceci, et sachant que la Ville de Paris dispose d'un nombre considérable de points de mesure débitmétriques, nous avons souhaité mettre à profit ces points de mesure déjà mis en place.

Ainsi, le dispositif expérimental retenu est constitué des 6 points de mesure présentés en Figure 1:

- 3 points de mesures situés à l'amont du collecteur de Clichy, sur les collecteurs Rivoli, Quais et Sébastopol : Marais, Sébastopol, et Quais (P213);
- 1 point de mesure situé au centre du collecteur de Clichy, à l'amont immédiat de la jonction avec le collecteur des Coteaux : Clichy centre (P219) ;
- 1 point de mesure à l'aval du collecteur des Coteaux, à l'amont immédiat de la jonction avec le collecteur de Clichy : Coteaux aval (P218) ;
- 1 point de mesure situé à l'aval du collecteur de Clichy, peu avant l'usine de Clichy : Clichy aval (P120).

La délimitation des bassins versants de l'OPUR dont les six points de mesure retenus constituent les exutoires (Figure 1) a été réalisée à partir du SIG du réseau d'assainissement parisien (base TIGRE[1]) en tenant compte du sens d'écoulement de l'eau, de la pente du réseau d'assainissement, et des habitations drainées par ce réseau (branchements particuliers…).

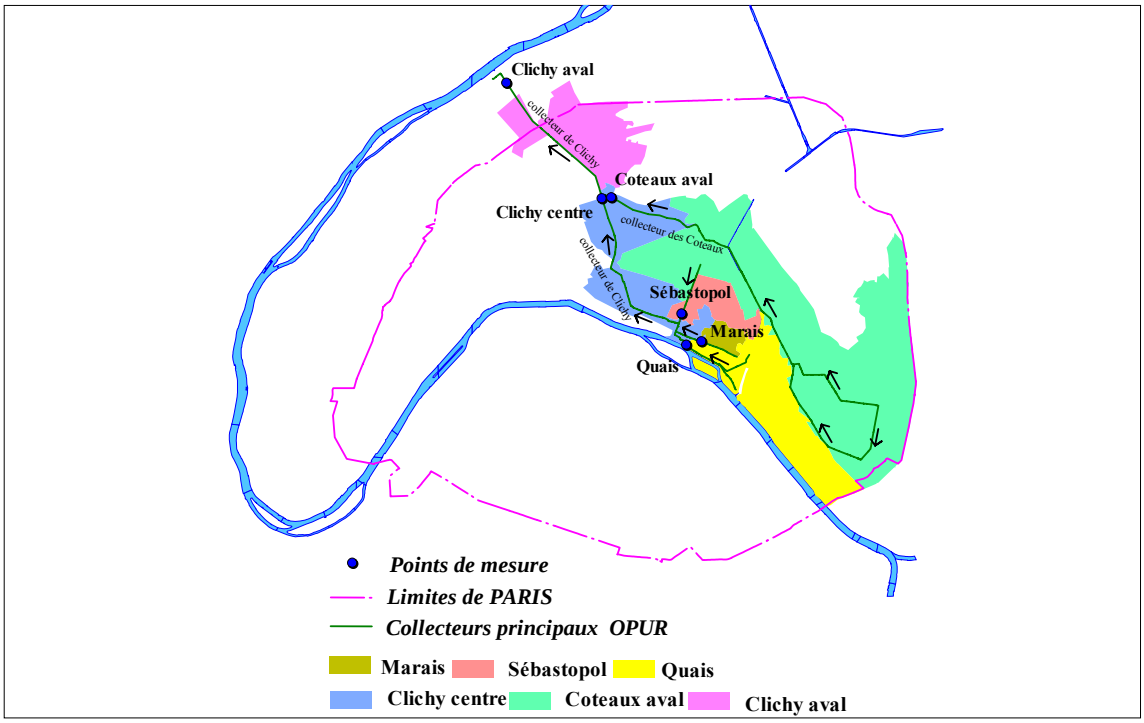


Figure 1: délimitation des bassins versants de l'OPUR, et emplacement des points exutoires

Les bassins versants Marais, Sébastopol et Quais sont en parallèle et non pas emboîtés. Ils constituent les apports en tête du collecteur des Quais. Par ailleurs, le bassin versant Coteaux est en parallèle avec le bassin versant Clichy centre et correspond à un bassin versant de taille et de longueur hydraulique comparables à celui de Clichy centre. Il représente de ce fait un apport majeur au centre du collecteur de Clichy.

1.2 Caractéristiques des bassins versants

1.2.1 Caractéristiques morphologiques

Les principales caractéristiques des bassins versants de l'OPUR sont synthétisées dans le Tableau 1. Ils couvrent des superficies allant de 41 pour le Marais à 2581 ha pour Clichy aval,

[1] Traitement Informatisé de la gestion du Réseau des Egouts

avec des longueurs hydrauliques de 1 à 12,5 Km. Ils se situent en rive droite de Paris et s'étendent sur les arrondissements suivants (Figure 2) : 1er, 2ième, 3ième, 4ième, 8ième, 9ième, 10ième, 11ième, 12ième, 17ième et 18ième, 19ième, 20ième, et les communes : Clichy et St Ouen. La distribution des arrondissements dans chaque bassin versant est présentée en ANNEXE 1.

Bassins versants	Surface (ha)	Arrondissement /Commune	Longueur hydraulique (km)	Coefficient de ruissellement moyen
Marais	41	3ième et 4ième	1	0.71
Sébastopol	113	1er, 2ième, 3ième, 4ième, 10ième et 11ième	2.5	0.73
Quais	402	3ième, 4ième, 11ième et 12ième	5	0.64
Clichy centre	942	1er, 2ième, 3ième, 4ième, 8ième, 9ième, 10ième, 11ième, 12ième, 17ième et 18ième +	9	0.68
Coteaux aval	1315	2ième, 3ième, 10ième, 9ième, 11ième, 12ième, 19ième, 20ième	9	0.67
Clichy aval	2581	1er, 2ième, 3ième, 4ième, 8ième, 9ième, 10ième, 11ième, 12ième, 17ième et 18ième, 19ième, 20ième + Clichy + St Ouen	12.5	0.67

Tableau 1: caractéristiques des bassins versants étudiés

Le coefficient de ruissellement donné pour le Marais (0.71) est celui mesuré expérimentalement par Gromaire (1998) au cours de la campagne de mesure 1996-1997.

Pour les autres bassins versants, le coefficient de ruissellement a été calculé à partir de la ventilation des surfaces entre toitures, voiries et autres surfaces (Tableau 2).

Les coefficients de ruissellement pour les trois types de surface ont été évalués à partir des valeurs théoriques citées dans la littérature et calés de façon à retrouver sur le Marais une valeur moyenne/BV de 0.71 : $C_{toitures}$=0.8, $C_{voiries}$= 0.71, et C_{autres}= 0.46.

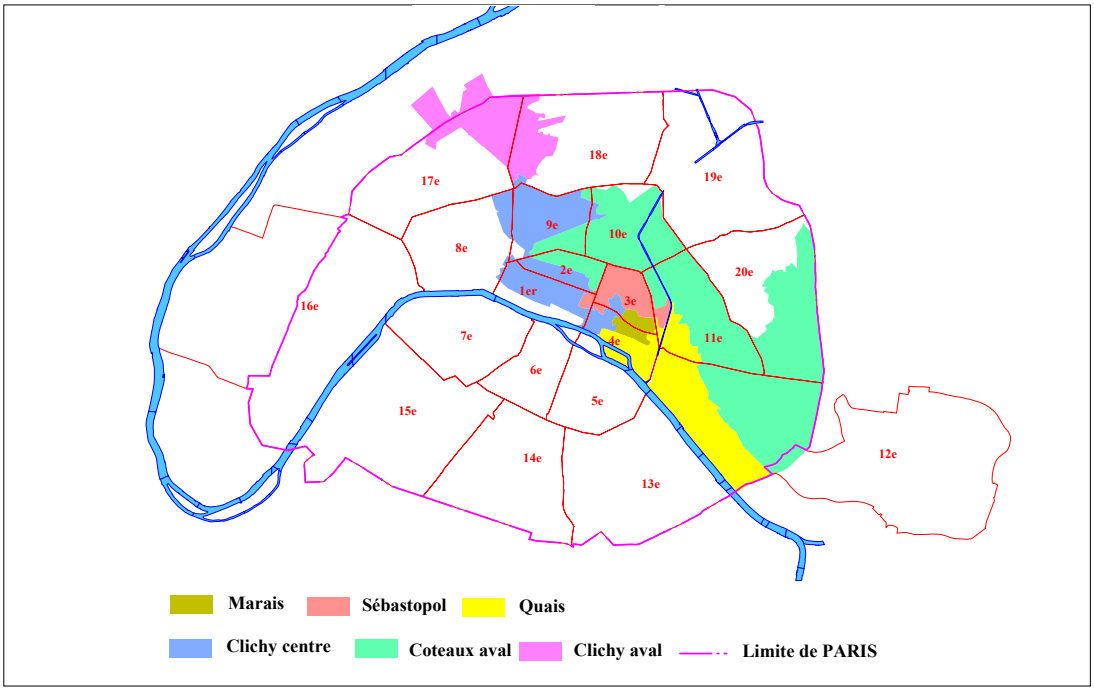


Figure 2: les bassins versants de l'OPUR et leurs arrondissements

La topographie des bassins versants (Figure 3) montre des terrains plats sur les bassins amonts (Marais, Sébastopol et Quais); mais le relief devient plus accentué en allant vers l'aval, notamment sur Coteaux aval et Clichy aval.

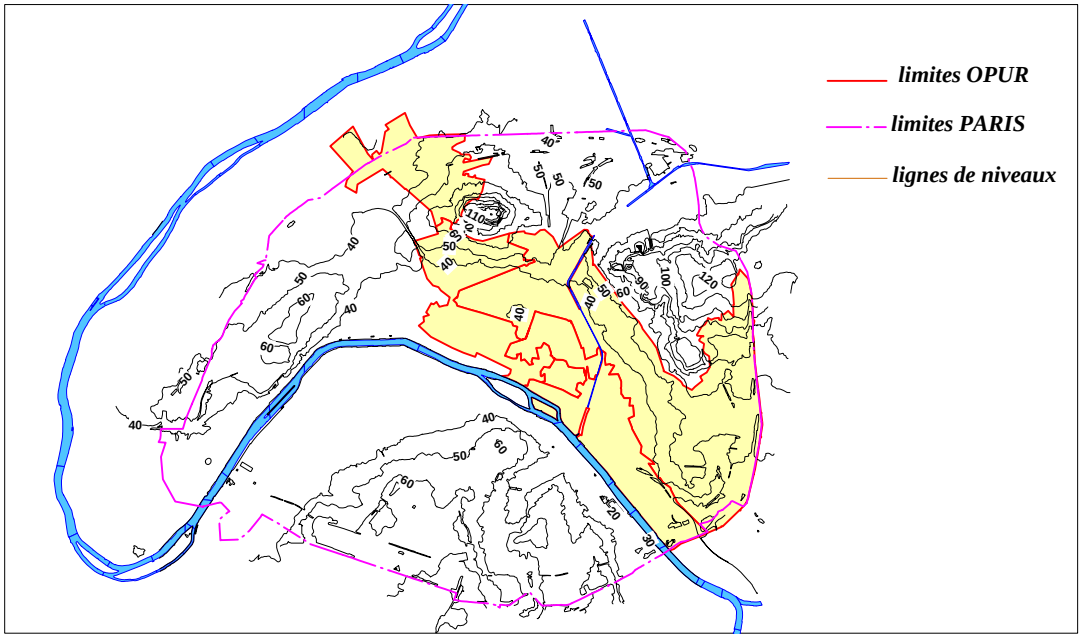


Figure 3: carte des courbes de niveaux des bassins versants de l'OPUR

1.2.2 Occupation des sols

1.2.2.1 Ventilation des surfaces urbaines

Les principales surfaces urbaines présentent sur la zone OPUR sont les toitures, les voiries (trottoirs et chaussées), et les autres qui englobent : « les cours, les espaces verts publics, les cimetières, les voies ferrées… ». Leurs superficies ont été estimées à partir de la BD-topo de l'IGN et des données du cadastre fournies par l'APUR (Tableau 2).

Bassin versant	Surface (ha)			% de la surface totale du BV			Surface totale (ha)
	Toitures	Voiries	Autres	Toitures	Voiries	Autres	
Marais	23	10	8	56%	24%	20%	**41**
Sébastopol	65	33	15	58%	29%	14%	**112**
Quais	136	111	155	34%	28%	39%	**402**
Clichy centre	426	261	254	45%	28%	27%	**942**
Coteaux aval	535	373	408	41%	28%	31%	**1315**
Clichy aval	1068	720	793	41%	28%	31%	**2581**

Tableau 2 : surfaces urbaines sur les bassins versants de l'OPUR

Les toitures représentent plus de 50% de la surface des bassins versants amont (Marais et Sébastopol) à l'exception des Quais et 40 à 45% de la surface des bassins versants aval (Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval). Par ailleurs, les surfaces des voiries présentent des pourcentages comparables (28 à 29%) entre les cinq bassins versants : Sébastopol, Quais, Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval, mais elles représentent un pourcentage un peu moins faible au Marais (24%). En revanche, la surface des « Autres » est variable d'un bassin versant à un autre (14 à 39%). Le bassin versant des Quais est caractérisé par une forte emprise de voies ferrées (21%) et d'espaces verts (6%), ce qui explique une plus faible proportion de toitures (34%) au profit de la catégorie « Autres ».

Les pourcentages des toitures en zinc et non zinc présentes sur chaque bassin versant de l'OPUR se trouvent dans le Tableau 3. Il apparaît que les toitures en zinc et non zinc se répartissent de façon équitable au Marais. Cependant, les toitures en zinc sont plus fréquentes au Sébastopol et à Clichy centre (33% contre 25% au Sébastopol et 24% contre 21% à Clichy centre). Par ailleurs, on remarque que les toitures en zinc sont moins présentes aux trois sites : Quais, Coteaux aval et Clichy aval. Celles-ci représentent respectivement 12%, 15% et 16% de la surface des bassins versants : Quais, Coteaux aval et Clichy aval.

	S toitures en zinc (ha)	S toitures non zinc (ha)	% toitures en zinc-S BV	% toitures non zinc- S BV
Marais	12	12	28	28
Sébastopol	37	28	33	25
Quais	50	86	12	21
Clichy centre	227	199	24	21
Coteaux aval	205	330	16	25
Clichy aval	494	573	19	22

Tableau 3: surfaces et pourcentages des toitures en zinc et des toitures non zinc présentes sur les bassins versants de l'OPUR

L'analyse des pourcentages des voiries montre que les sites Marais et Sébastopol se distinguent par la proportion la plus importante de petites rues (respectivement 30% et 20%) et par une circulation automobile plus faible. Par ailleurs, la circulation automobile semble relativement comparable entre les sites Quais et les trois sites aval.

	% voiries avec 1 voie	% voiries avec 2 voies	% voiries avec 3 voies	% voiries avec 4 voies	% voiries avec plus de 4 voies
Marais	30	63	7	0	0
Sébastopol	20	61	11	4	3
Quais	6	69	11	7	6
Clichy centre	13	66	10	7	4
Coteaux aval	7	73	6	7	6
Clichy aval	10	69	8	7	6

Tableau 4: pourcentages des voiries présentes sur les bassins versants de l'OPUR

1.2.2.2 Population et emploi

La Figure 4 donne pour chaque bassin versant, la population résidente non active et active, et l'excèdent d'emplois par rapport à la population résidente active (c'est la population qui travaille dans le bassin versant sans pour autant y résider).

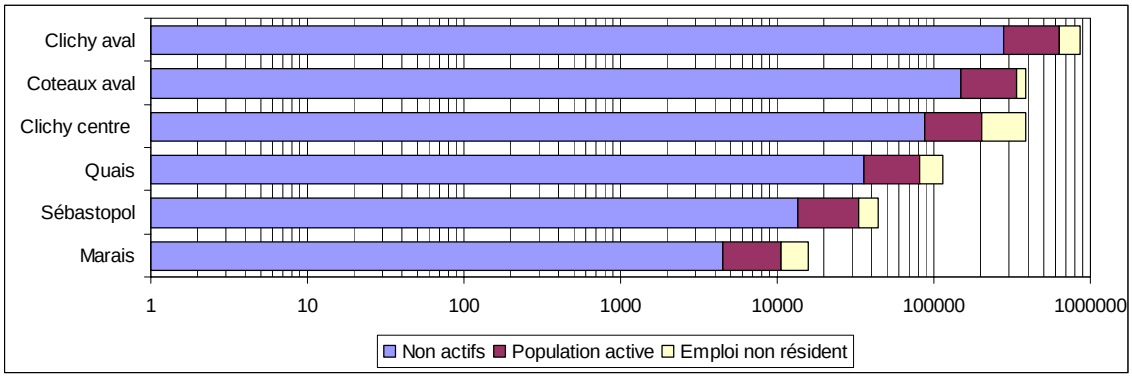


Figure 4 : répartition des populations dans chaque bassin versant de l'OPUR

	Densité de population (hab/ha)	Densité de population active (actif/ha)	Densité d'emploi salarié (emploi/ha)	Densité d'emploi non résident (actif/ha)
Marais	255	147	278	131
Sébastopol	291	170	273	103
Quais	200	110	195	85
Clichy centre	215	122	318	196
Coteaux aval	308	171	213	42
Clichy aval	268	149	242	93

Tableau 5: densités de population et d'emploi sur les bassins versants de l'OPUR

Il s'agit de centres urbains denses avec des densités de population résidente variant entre 200hab/ha à Quais et 308 hab/ha à Clichy centre (Tableau 5).

La densité de population est nettement plus faible au Quais et Clichy centre, ce qui s'explique par une importance de l'emprise non bâtie sur les Quais (voies ferrées et parc de Bercy) et une densité de population relativement faible dans la partie aval du bassin de Clichy centre, autour du quartier de l'opéra.

Le taux d'activité est comparable entre les différents bassins versants avec 55 à 58% d'actifs. En revanche, la densité d'emploi salarié est variable : les valeurs les plus faibles correspondent à Quais (195 emploi/ha) et Coteaux aval (213 emploi/ha), la densité la plus forte est mesurée à Clichy centre (318 emploi/ha), avec une forte densité d'emplois dans la partie aval du bassin versant, correspondant au quartier d'affaire autour de l'opéra.

Le nombre d'emplois est pour tous les bassins versants supérieur à la population active, mais la part d'emploi non résident varie fortement d'un bassin versant à l'autre. Elle est relativement faible sur Coteaux, mais très importante sur Clichy centre.

De ce fait et afin de tenir compte de la production de toute la population présente sur la zone OPUR, l'utilisation du nombre d'habitants pour le calcul des flux peut biaiser nos résultats.

De ce fait, nous suggérons l'utilisation d'un nombre d'équivalent habitants. Cependant, la définition classique de l'équivalent habitant[2], telle que fixée par l'arrêté du 30/12/1981 (Chocat et al, 1997) ou la directive européenne du 21 mai 1991, ne semble pas adaptée.

En effet, elle est basée sur des mesures faites au niveau des STEP, en aval du réseau, et donc non au niveau de la production d'eau usée (au niveau de l'habitation). Elle est basée sur des valeurs par habitant de MES ou de DBO_5, or ces paramètres peuvent être influencés par la sédimentation ou l'érosion au cours du transport dans le réseau.

En se référant à l'étude bibliographique résumée dans le Tableau 17 (§ 2.4), il apparaît que l'azote kjeldahl (NTK) est le paramètre le plus stable dans les effluents domestiques par rapport au MES et aux matières organiques et pourrait être utilisé pour l'estimation de l'équivalent habitant.

L'azote kjeldahl présent dans les eaux usées provient essentiellement des émissions physiologiques dans les urines et les matières fécales (partie 2, chapitre 2.4). Ces émissions physiologiques sont relativement bien connues, d'après (Vienneras ; 2001) elles sont de l'ordre de 11g/j dans les urines et de 1.5 g/j dans les matières fécales. L'azote kjeldahl pourrait de ce fait constituer un bon indicateur du nombre d'individus (résidents, employés ou visiteurs) présents sur le bassin versant. Il est émis très majoritairement sous forme dissoute (Thoburn ; 1984).

Afin de nous affranchir de tous les phénomènes de sédimentation – érosion, nous avons retenu le NTK dissous comme indicateur du nombre d'équivalents habitants.

Ainsi, l'azote kjeldahl peut être utilisé comme un traceur de la production physiologique sur chaque bassin versant.

La distribution dissous-particulaire de l'azote dans les eaux usées d'après une étude bibliographique réalisée par (Vienneras ; 2001) est la suivante : de 80-90% dans l'urine (Berger, 1960 ; Schroeder & Nason, 1971 ; Lentner et Wink, 1981 ; Guyton, 1992 ; Frausto da Silva & Williams, 1997), 50% dans les matières fécales (Trémolières et al, 1961) et 20% dans les eaux grises.

[2] L'équivalent habitant (EH) est la quantité de pollution équivalente à celle engendrée quotidiennement par habitant. L'EH permet de dimensionner les stations d'épuration, entre autre, il permet de déterminer aisément les charges journalières à traiter dans l'installation projetée connaissant l'effectif de la population raccordable à prendre en compte (Besse *et al*, 1989).

Compte tenu de cette répartition et des masses d'azote rejetées annuellement (mentionnées par Vienneras ; 2001), la nouvelle valeur de l'équivalent habitant retenue notée « EHN » est estimée à 12g/hab/j de NTK dissous : 1EHN=12g/hab/j NTKd.

Connaissant la masse d'azote rejetée quotidiennement et la masse d'azote (azote Kjeldahl dissous) produite par chaque bassin versant, on peut calculer un nombre d'équivalents habitants qu'on appellera « Equivalent Homme de NTKd », noté EHN.

Le nombre d'équivalents hommes de NTKd (EHN) calculé sur chaque bassin versant de l'OPUR a été comparé à la population totale et la population totale + la population non résidente et travaillant dans le bassin (Figure 5). Pour cette dernière nous avons considéré qu'elle est supposée passer 10 heures par jour au travail.

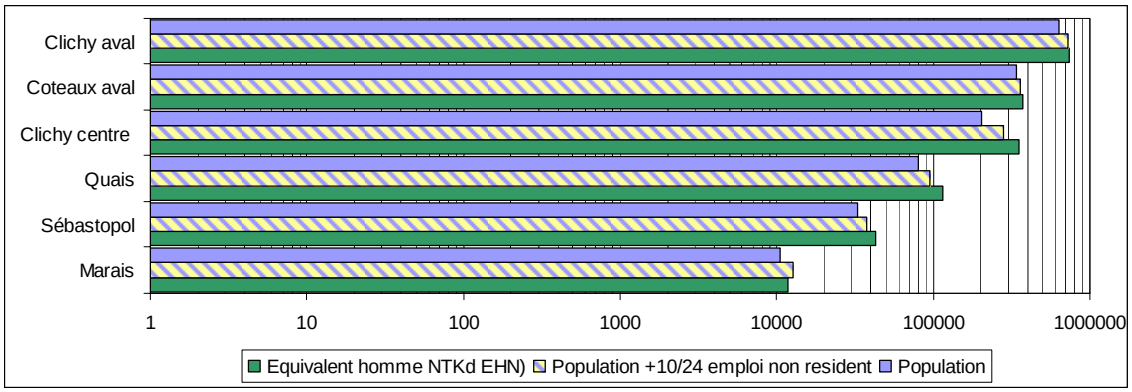


Figure 5 : Equivalent Homme de NTKd calculé sur les bassins versants de l'OPUR

	Densité de population (hab/ha)	Densité EHN (EHN/ha)	Densité Population +10/24Emploi
Marais	255	287	310
Sébastopol	291	376	334
Quais	200	286	235
Clichy centre	215	373	297
Coteaux aval	308	343	325
Clichy aval	268	313	307

Tableau 6: densités de population et d'emploi sur les bassins versants de l'OPUR

Le nombre d'EHN est souvent supérieur à la population résidente. L'écart maximal existant varie de 10 à 42%. Par ailleurs, il est du même ordre de grandeur (sur Marais, Coteaux aval et

Clichy aval) ou supérieur (Sébastopol, Quais et Clichy centre) à la population résidente + 10/24 des emplois non-résidents. Cette différence est sans doute liée au fait que l'EHN prend en compte les touristes et les gens de passage et les émissions d'azote par les activités, qu'on ne comptabilise pas dans le nombre de Population+10/24Emploi.

Cette comparaison justifie notre choix d'estimation d'une nouvelle valeur de l'équivalent habitant.

Par la suite, tous les paramètres polluants analysés seront normalisés par rapport à cet EH de NTKd.

1.2.2.3 Activités professionnelles

Différentes activités professionnelles sont présentes sur les bassins versants de l'OPUR. Selon la base de données de l'APUR "Paris et ces quartiers", on trouve sur les bassins versants du Marais et Sébastopol des commerces en gros de textiles et de cuir, des petites entreprises, des agences immobilières, des galeries d'art et un grand nombre de restaurants et de cafés. Par ailleurs, nous trouvons à Clichy centre, en plus des restaurants, cafés et grands magasins d'habillement, une forte prédominance des bureaux (entreprises, agences immobilières, banques…). Sur les bassins versants des Quais et des Coteaux on trouve essentiellement des commerces de grandes surfaces, des bureaux et des entreprises de transport (SNCF : gare de Bercy, gare du Nord et gare de l'Est).

Le Tableau 7 donne pour chaque bassin versant, le nombre d'industries recensés dans la liste de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (2001). Il faut noter que cette liste n'est pas exhaustive puisqu'il ne s'agit que des activités professionnelles payant des redevances à l'AESN.

Bassin versant	Nbre	Type d'activité
Sébastopol	12	traitement de surface
Quais	7	traitement de surface, établissement de soin, autres
Clichy centre	35	traitement de surface, établissement de soin, grand magasin, garage, atelier
Coteaux aval	40	traitement de surface, chimie et parachimie, atelier, labo d'analyse, établissement de soins, autres
Clichy aval	83	traitement de surface, chimie et parachimie, atelier, labo d'analyse, établissement de soins, blanchisserie, autres

Tableau 7: principales activités payant des redevances à l'AESN, de la zone OPUR

Les masses journalières en matières en suspension, en matières oxydables et en métaux lourds, rejetées par chaque bassin versant de l'OPUR (à l'exception de celui du Marais), d'après la liste des entreprises recensées par l'AESN (2001) sont représentées dans la Figure 6.

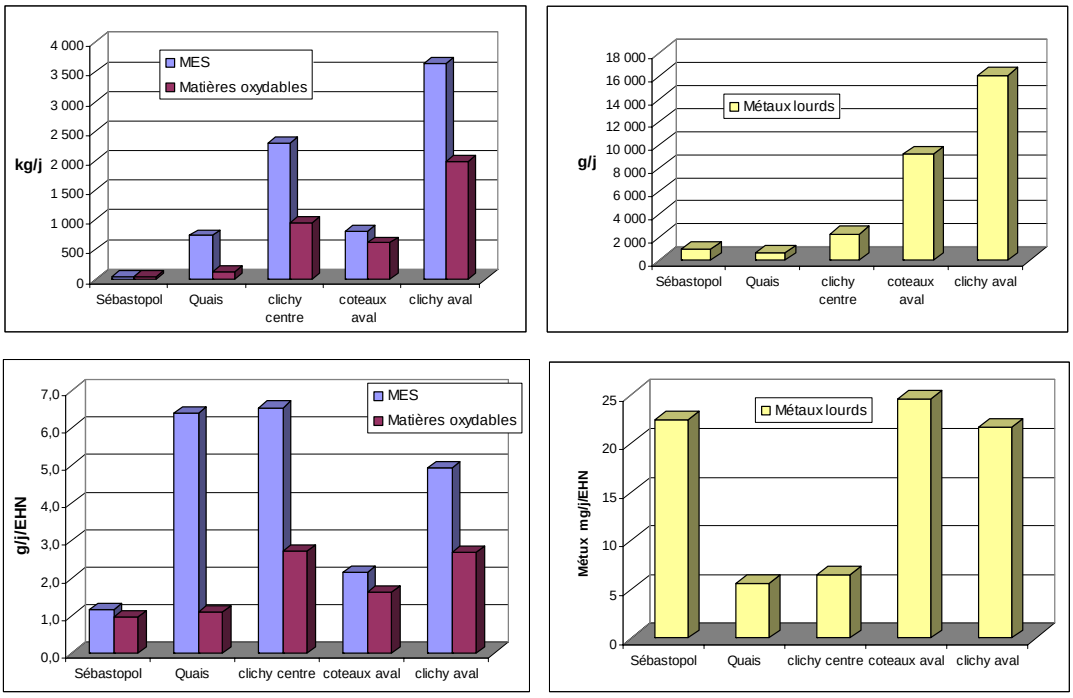


Figure 6: masses journalières de MES, de matières oxydables et de métaux lourds rejetées par les activités professionnelles payant des redevances à l'AESN (2001)

Les bassins versants de Quais et de Clichy centre se caractérisent par des flux en EHN très importants, en comparaison avec Sébastopol et Clichy aval. Par ailleurs, c'est à Clichy centre et Clichy aval qu'on mesure les plus grands flux en matières oxydables.

Cependant, le Sébastopol, Coteaux aval et Clichy aval se distinguent par de très fort flux en métaux lourds. Ces flux sont respectivement de l'ordre de 22, 25 et 22 g/j/EHN. L'analyse des données montre qu'une importante quantité de métaux lourds est rejetée par des entreprises de traitement de surface et par la SNCF.

1.2.3 Effluents de temps sec et temps de pluie rejetés dans le réseau d'assainissement

Les eaux véhiculées par temps sec dans le réseau parisien sont :

- les eaux usées domestiques et industrielles ;
- les eaux claires (potable et non potables) : il s'agit des eaux des réseaux de distribution (fuites du réseau d'eau potable et non potable, eaux de lavage de voirie, arrosage des espaces verts, eaux d'alimentation de réservoirs de chasse) et les eaux naturelles (infiltrations dans les collecteurs et les égouts, rejets de pompage de nappe, exhaure de chantiers).

Les ordres de grandeurs des volumes des différents types d'eau rejetés dans le réseau parisien sont synthétisés dans le Tableau 8. Ces ordres de grandeurs ont été estimés lors de l'étude du diagnostic du fonctionnement du réseau d'assainissement parisien pour l'année 1990.

(m^3/jour/ha)	Rejet d'eau usée (domestiques + Industrielles)	Rejet d'eau non potable	Rejets de fuite du réseau d'eau potable et non potable	Débit d'exhaure	*Débit total de temps sec*
Marais	106	29	29	0	*164*
Sébastopol	179	22	30	11	*243*
Quais	75	24	30	2	*132*
Clichy centre	114	26	31	4	*175*
Coteaux aval	121	18	32	4	*175*
Clichy aval	114	22	30	4	*170*

Tableau 8 : ordres de grandeurs des débits des différents rejets d'eau dans le réseau d'assainissement

Les apports d'origines domestiques et industrielles représentent la plus grande part (de 57-74% du débit total) des eaux rejetées dans le réseau d'assainissement. Par ailleurs, les rejets d'eau non potables (lavage de voirie…) et les rejets de fuite du réseau d'eau potable et non potable sont du même ordre de grandeur et représentent respectivement entre 9-18% et 12-23% du volume total rejeté par temps sec aux exutoires des bassins versants. Les apports d'eau naturelle, en particulier les rejets d'eau de nappe (des rejets provenant essentiellement du réseau RATP, de quelques grands parkings et de quelques grands immeubles) sont très faibles sur l'ensemble des bassins d'étude, à l'exception du Sébastopol.

Toutefois, et selon les bilans des Entrées-Sorties du réseau d'assainissement parisien réalisés par la SAP, la moyenne des écarts mensuels donne chaque année 2,5 millions de m^3 d'eaux parasites non recensées et 1.1 millions de m^3 d'eaux d'exhaure (Bethouart, 2004).

Bethouart (2004) précise par ailleurs que ces apports ne représentent que 12% des volumes sortant en 2004.

Par temps de pluie, aux différents rejets cités précédemment viennent s'ajouter les eaux de ruissellement des toitures, et des différentes surfaces urbaines (cours, terrasses…).

1.3 Caractéristiques du réseau d'assainissement

1.3.1 Description du réseau d'assainissement

La topographie du réseau de la zone OPUR a été réalisée à partir du SIG (Système d'Information Géographique) du réseau d'assainissement parisien (TIGRE : Traitement Informatisé de la Gestion du Réseau des Egouts). Ce SIG constitue une base de données de l'ensemble des éléments constituant le réseau (égouts, collecteurs, déversoirs d'orages, réservoirs de chasse, branchements particuliers, branchements de regards….). Il fournit globalement des informations sur la topographie du réseau (cotes amont et aval des tronçons, pente et longueur des tronçons…) et son descriptif (type d'égout ou de collecteur, dimensions des sections…). Il fournit également des éléments sur son état d'ensablement. Notons que cette base de données est actualisée régulièrement (deux fois/an).

Le réseau d'assainissement de la zone OPUR est unitaire et entièrement visitable. Il est composé de collecteurs (galeries constituées d'une cunette centrale recevant les eaux et de deux banquettes latérales de circulation) et de petites lignes (ou égouts : conduites souterraines de forme ovoïde). La longueur totale des collecteurs est estimée à 39,8 Km et chaque bassin versant comprend les collecteurs à banquettes suivant (Tableau 9) :

Bassin versant	Collecteurs	Longueur totale (m)	L/S (m/ha)
Marais	Rivoli Est, St Gilles, Vieille du Temple	1824	44
Sébastopol	Sébastopol, Centre	2354	21
Quais	Quais, Bastille, Diderot, Rolin, Râpée, de Lyon, Henri V	4880	12
Clichy centre	Clichy, du Temple, Crussol Amelot, Rivoli Ouest, Sébastopol Nord, Petits Champs, Victoire, St Lazare + *tous les collecteurs des basins versants : Marais, Sébastopol et Quais*	19222	20
Coteaux aval	Coteaux, Coteaux branche Wattignies, Coteaux branche St Mandé, Voltaire, Crussol Amelot, Provence, Richer, Hauteville	14867	11
Clichy aval	Clichy + *tous les collecteurs des bassins versants : Marais, Sébastopol, Quais, Clichy centre et Coteaux*	39790	15

Tableau 9: principaux collecteurs de la zone OPUR

On remarque que la densité des collecteurs (i.e des ouvrages de forme ovoïde à banquette) est nettement plus élevée sur le Marais que sur les autres bassins versants.

1.3.2 Fonctionnement du réseau d'assainissement

Le réseau d'assainissement de la zone OPUR contient plusieurs ouvrages de régulation : vannes de maillages, déversoirs d'orage, usines de pompage, siphons…

Ces ouvrages permettent de transférer des volumes d'eau entre les bassins versants d'OPUR eux-mêmes, ou entre nos bassins versants et ceux avoisinants. Ils permettent aussi, notamment les déversoirs d'orage, de rejeter une partie des effluents dans le milieu naturel afin de limier les apports aux réseaux aval et en particulier au niveau de la station d'épuration pendant les évènements pluvieux.

1.3.2.1 Maillages

Plusieurs connections existent entre la zone OPUR et les bassins versants voisins, entraînant potentiellement des pertes et des apports d'eau. Ces apports et ces pertes d'eau existent également entre les différents bassins versants de l'OPUR (maillages internes). Les principaux maillages sont représentés dans la Figure 7. Ceux se trouvant en amont du collecteur des Coteaux sont présentés dans la Figure 8.

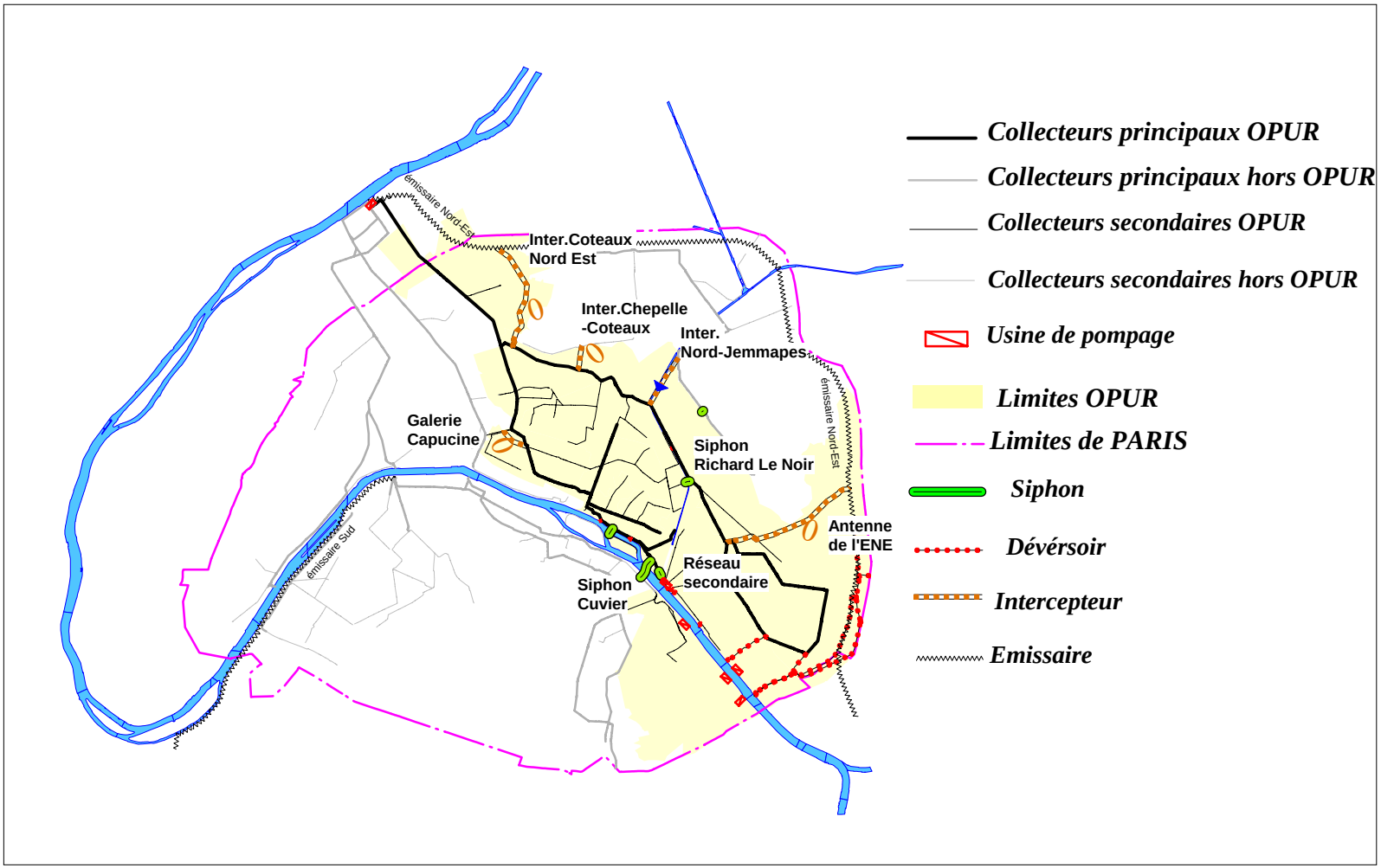


Figure 7 : maillages entre la zone d'étude et les bassins versants voisins et maillages internes à la zone d'étude

Ces maillages sont :

- Maillages entre le collecteur de Clichy et les collecteurs voisins :

Ces maillages sont peu nombreux et permettent de délester les collecteurs d'Asnières et de Coteaux vers le collecteur de Clichy. Ainsi, des apports d'eau depuis des bassins versants extérieurs et entre le bassin versant des Coteaux et ceux des Quais et de Sébastopol se font aux points suivants :

- *Galerie de Capucine et intercepteur Clichy-Capucine* :

  Ce maillage permet de délester le collecteur d'Asnières par temps de pluie ou pendant les périodes de travaux par le biais des baies de déversements. Il représente un apport d'eau d'un bassin versant extérieur vers notre zone d'étude. Les débits traversiers sont négligeables pour les pluies courantes (période de retour d'un mois), mais deviennent plus significatifs pour la période de retour d'un an (voir Tableau 10). Ce maillage n'est muni d'aucun dispositif de régulation, ni de mesure.

- *Connections Coteaux-Mazas via le réseau secondaire :*

  Neufs siphons existent sur les liaisons secondaires entre le collecteur des Coteaux et le bassin versant de Mazas, à l'amont du collecteur des Quais : Breguet, Sedaine, Roquette, Rauch, Rollin pair, Rollin impair, Forge Royale, Delescluze et Charonne. Le fonctionnement de ces siphons assure le délestage du collecteur des Coteaux en période de forte pluie (décennale ou plus), et évite l'envoi des eaux vers le bassin des Quais en période de temps sec. Il s'agit ainsi d'un maillage interne à notre zone d'étude conduisant à un transfert d'effluents des Coteaux vers les Quais pour de fortes pluies uniquement. Par ailleurs, un autre maillage « Coteaux-Diderot » existe et permet le délestage des Coteaux vers l'Usine Mazas (donc vers les Quais) à travers le collecteur Diderot.

- *Siphon Richard Le Noir :*

  Ce siphon permet le délestage du collecteur des Coteaux en période de forte pluie vers le collecteur de Clichy, via le collecteur du Centre et le collecteur Sébastopol. Il s'agit d'un maillage interne à notre zone d'étude, conduisant à un transfert d'effluent du bassin versant Coteaux vers le bassin versant Sébastopol. La capacité du siphon Richard Lenoir a été augmentée en 2004 pour permettre un délestage important du collecteur Coteaux lors des fortes pluies.

- Maillages entre le collecteur des Quais et la rive gauche :

Il s'agit essentiellement des apports de la rive gauche (eaux usées de la nouvelle ZAC, en cours de construction et eaux unitaires du 13^{ième} arrondissement) vers la rive droite à travers le *Siphon Cuvier*. Ce maillage constitue ainsi un apport d'eau d'un bassin versant extérieur (collecteur Bas) à notre zone d'étude vers le bassin versant des Quais (Collecteur des Quais).

Les apports de la rive gauche sont essentiellement des eaux usées. Par ailleurs, la ZAC Rive Gauche est en réseau séparatif et les eaux pluviales sont déversées en Seine. Le débit transitant par le siphon Cuvier en temps de pluie étant limité à environ deux fois le débit de temps sec, la plupart des eaux pluviales restent en rive gauche et transitent alors dans le collecteur Bas.

Les ordres de grandeurs des débits transitant dans le siphon varient entre 0.3 à 0.5 m^3/s par temps sec et 0.8 m^3/s pour une pluie d'une période de retour d'un an. Ce débit représente respectivement environ 50% et 30% du débit mesuré au niveau du collecteur des Quais.

Cependant, cette zone drainée en rive gauche, ne sera pas prise en compte, dans les interprétations des résultats pour les raisons suivantes :

- La ZAC Tolbiac est en cours de construction, ce qui implique une mauvaise connaissance de l'occupation du sol ;
- Toutes les eaux de temps de pluie ne transitent pas par le siphon Cuvier, et restent donc en rive gauche pour transiter dans le collecteur bas ;
- La surface contributive de la rive gauche n'est pas connue de façon précise puisqu'elle varie selon le fonctionnement des vannes constituant le siphon Cuvier.

- Maillages entre le collecteur de Coteaux et les bassins voisins :

Des apports se font depuis la banlieue, depuis le collecteur Nord-Est et depuis le collecteur Chapelle vers le collecteur des Coteaux au niveau des maillages suivants :

- *Connexions avec les réseaux de la banlieue, via le réseau secondaire, à l'amont du collecteur des Coteaux :*

  De nombreuses connections secondaires existent entre l'amont du collecteur des Coteaux et les réseaux d'assainissement de la banlieue, permettant des apports de la banlieue vers le bassin versant Coteaux. Ces connections se font aux niveaux des vannes Netter Branche Sud, Netter Rendez-Vous et Saint mandé (Figure 8). Les deux dernières vannes sont normalement fermées alors que la première vanne est ouverte.

Les eaux de banlieue rejoignent alors dans la Branche Sud puis la branche Wattignies du collecteur des Coteaux.

- *Intercepteur Nord-Jemmapes :*

Il permet de délester le collecteur du Nord vers le collecteur Coteaux, ce qui correspond à un apport d'un bassin versant extérieur vers notre zone d'étude. Cependant ce maillage ne fonctionne que pour des fortes pluies (période de retour d'un an et plus). En fait, la vanne est normalement fermée, mais une liaison secondaire permet de la by-passer pour les fortes pluie.

- *Intercepteur Chapelle-Coteaux :*

Ce maillage qui permet le délestage du collecteur de la Chapelle vers le collecteur des Coteaux par temps de pluie n'est pas en service actuellement. La mise en place d'une gestion automatisée de ce maillage est prévue.

Par ailleurs, des pertes se font du collecteur des Coteaux vers le collecteur Nord Est au niveau de :

- *l'Antenne de l'Emissaire :*

Par temps sec et pour les pluies de période de retour inférieureà 5 ans, l'antenne de l'émissaire assure le transit des eaux du collecteur des Coteaux des deux branches : branche de Saint Mandé et Branche Wattignies vers l'émissaire Nord-Est selon les configurations des vannes Faidherbe et Saint Bernard. Pour les pluies de période de retour supérieure à 5 ans, le sens d'écoulement s'inverse, assurant un délestage de l'émissaire Nord-est vers le collecteur des Coteaux. La configuration normale des vannes est la suivante : Netter RDV et Netter St Mandé fermée et Netter Branche Sud est ouverte ; cependant Saint Bernard est ouverte.

- *l'Intercepteur Coteaux Nord-Est :*

Ce maillage permet lors de fortes pluies, le délestage du collecteur des Coteaux vers le collecteur Nord-Est. Les déversements se font via des baies de déversement latérales. La cote de ces baies étant assez élevée, les déversements sont nuls par temps sec et pour les pluies de période de retour inférieure à 1 an, et faibles pour une période de retour de 1 an.

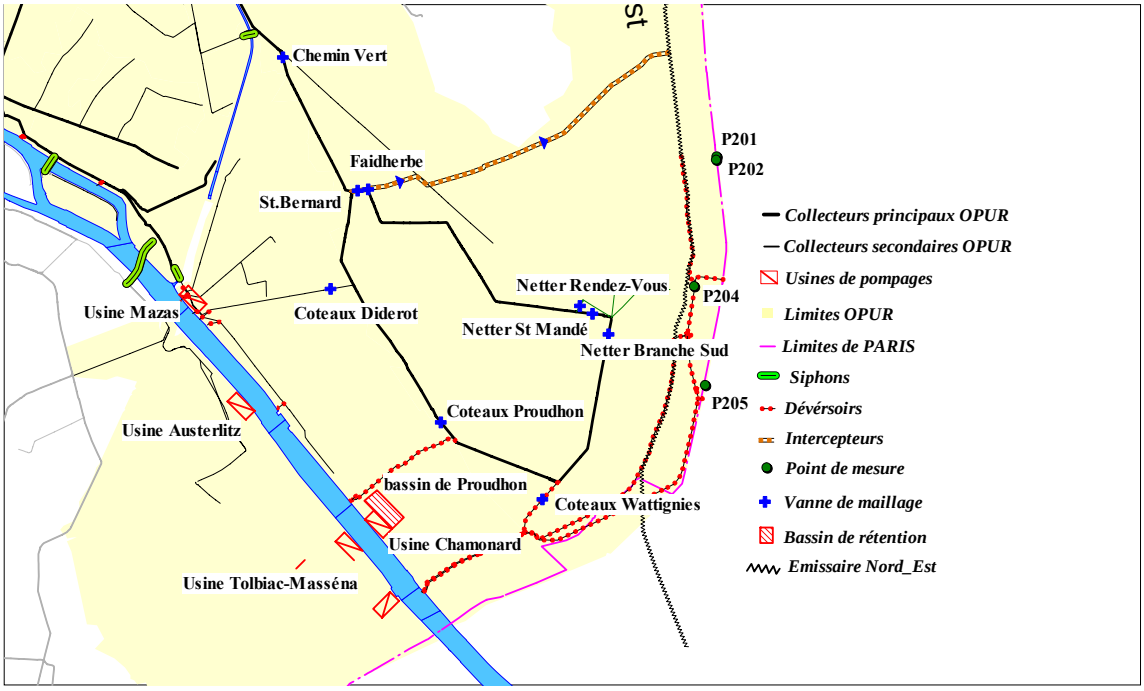


Figure 8 : maillages en amont du collecteur des Coteaux

Le Tableau 10 donne les ordres de grandeurs des volumes et des débits estimés pendant l'étude du diagnostic du fonctionnement du réseau d'assainissement parisien, pour les principaux maillages influençant la zone OPUR.

	Nom	Sens d'écoulement	Qtps sec m3/s	V pluie 1 mois (m3)	Qpointe tps pluie m3/s	V pluie 1 an (m3)	Remarques
Apports de BV ext. vers Clichy	Connections Coteaux-Mazas	Coteaux vers Mazas	0	1589	-	26383	Gestion du bassin amont Coteaux va être revue, mise en place gestion régulée des apports de la banlieue
	Galerie Capucine	Asnières vers Clichy	0	7427	1.7	25218	Baies de déversement
	Intercepteur Clichy-Capucines	Asnières vers Clichy	0	0	0	0	Fermé actuellement
	Siphon Cuvier	De la rive gauche vers col Quais puis Col Clichy	0.3-0.5		1mois / 1 an 0.5- / 0.8		vanne amont et vanne aval
Pertes Coteaux vers autres BV	Antenne de l'Emissaire	Tps sec: Coteaux vers Emissaire Grosses pluies (5-10 ans): Emissaire vers Coteaux	0.1 à 0.5	14979	-2 à +7	8832	
	Intercepteur Coteaux-Nord Est	Délestage col. Coteaux vers NE	0	0	-0.5 à +0.05	621	Baies de déversement
	Siphon Richard Le Noir	Délestage col Coteaux vers col du centre et puis Sébastopol	0.4	-	0.7 / 1.00 0.8 / 3.8		Avant 2004 Après 2004
Apports vers Coteaux	Intercepteur Nord-Jemmapes	Délestage du collecteur Nord vers Coteaux	0	0	2.9	4028	Gestion va être revue
	Intercepteur Chapelle-Coteaux	Délestage du col. de la Chapelle vers Coteaux par temps de pluie	0	0	0	0	Va être automatisé Pas en service actuellement

Tableau 10: volumes et débits transitant par temps sec et par temps de pluie au niveau des différents maillages

1.3.2.2 Déversoirs d'orage

Plusieurs déversoirs d'orage (DO) existent sur la zone OPUR. La plupart de ces DO se trouvent sur l'axe du collecteur de Clichy, en amont du point de mesure des Quais (P213) : Hôtel de Ville, St Paul, Mazas, Marine, Diderot, Traversière, Bercy et Chamonard. Par ailleurs, les déversoirs Vincennes-Charenton (Antenne Wattignies :A) et Proudhon sont situés sur l'axe du collecteur des Coteaux. Ces déversoirs permettent de délester la tête amont du collecteur des Coteaux, pour éviter les surcharges induites par les apports d'eaux provenant de la banlieue (Figure 9).

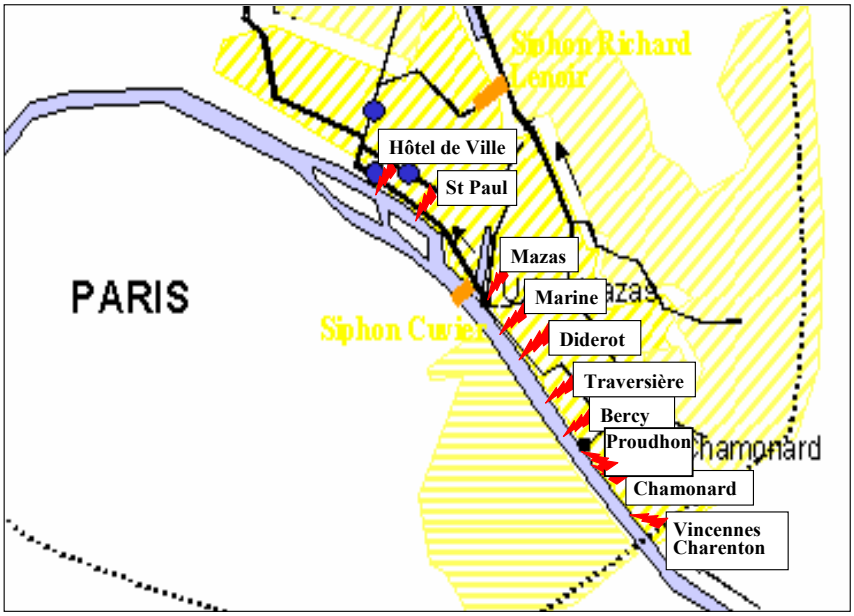


Figure 9 : localisation des déversoirs d'orage

Les volumes mesurés déversés en Seine au niveau des principaux déversoirs d'orage de la zone OPUR, durant les trois dernières années (Tableau 11) montrent des valeurs variables d'une année à une autre et d'un DO à un autre. Les volumes déversés en Seine au niveau des déversoirs situés en amont du site des Quais sont très faibles à l'exception du déversoirs Mazas. Les volumes déversés au DO Vincennes Charenton A apparaissent plus importants. Rappelons, cependant qu'il s'agit essentiellement pour ce DO d'effluent provenant de la banlieue et non d'effluent produits par les bassins versants OPUR.

Déversoir	Collecteur	Bassins versants	Volumes annuels mesurés déversés en Seine (m3)		
			2002	2003	2004
St Paul	Quais	Quais	24 517	6464	14 528
Mazas	Rapée	Quais	83 986	19 411	179 575
Hôtel de Ville	Quais	Quais	-	-	-
Marine	Rapée	Quais	-	-	-
Diderot	Diderot	Quais	-	-	-
Traversière	Rapée	Quais	-	34 609	2751
Bercy	Rapée	Quais	9962	1729	9863
Chamonard	Egouts de Bercy	Quais	14 436	2332	60
Vincennes Charenton A	Coteaux	Coteaux	561 031	123 228	386 177
Proudhon	Coteaux	Coteaux	-	-	-
Total « OPUR »			*590 000*	*188 000*	*694 000*

Tableau 11 : déversements mesurés entre 2002 et 2004 (SAP, 2003-2004)

1.3.3 Linéaire et pente

Les ordres de grandeurs des pentes de tronçons[3] de collecteur et de petite ligne (égouts élémentaires) constituant chaque bassin versant de l'OPUR sont synthétisés dans le Tableau 12.

%	collecteurs	Petites lignes
Marais	-0.03-0.39,(0.06)	0.22-2.83,(0.90)
Sébastopol	0-0.53,(0.08)	0-2.42,(0.58)
Quais	0-0.86,(0.14)	0.11-2.28,(0.61)
Clichy centre	0-0.56,(0.10)	0.15-3.70,(0.84)
Coteaux aval	0.02-1.06,(0.15)	0.20-3.57,(1.09)
Clichy aval	0-0.96,(0.11)	0.18-3.68,(1.04)
1er decile-9ème décile, (médiane)		

Tableau 12 : pente de tronçons de collecteur et de petite ligne de la zone OPUR

La pente médiane des collecteurs est globalement faible. Les pentes médianes les plus faibles se trouvent sur les sites Marais et Sébastopol (de 0.06 et 0.08%), alors que les pentes les plus

[3] Tronçon : partie de collecteur ou de petite lignes située entre 2 points de levés topographiques

fortes se trouvent sur les bassins : Quais, Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval (de 0.10 à 0.15%).

La pente des petites lignes est cependant plus importante. Sa valeur médiane varie entre 0.58% au site de Sébastopol à 1.09% à Coteaux aval. Notons que le site de Coteaux aval se distingue de l'ensemble des sites de l'OPUR par les plus fortes pentes que se soient au niveau des collecteurs ou au niveau des petites lignes.

La distribution statistique des pentes des collecteurs et des petites lignes pour l'ensemble de la zone OPUR (Figure 10) montre que 68% de la longueur totale des collecteurs d'OPUR ont une pente faible qui varie entre 0 et 0.2% et 27% de la longueur ont une pente très faible (<0.05%). Par ailleurs, 4% seulement des petites lignes ont une pente faible (de 0% à 0.2%). En revanche, environ 53% de la longueur des petites lignes ont une très forte pente supérieure à 1%.

Cette distribution statistique des pentes a montré aussi l'existence de contre pentes représentant respectivement 7% et 2% de la longueur totale des collecteurs et des petites lignes.

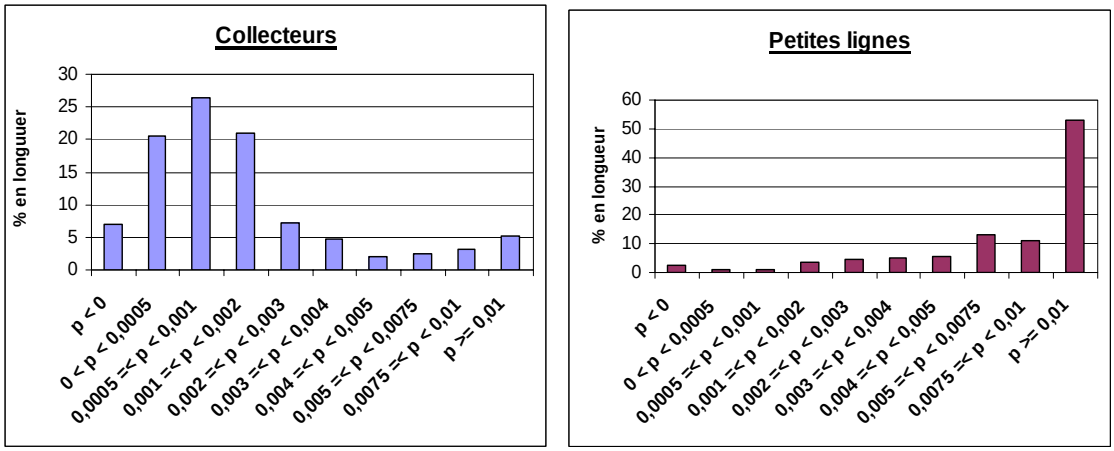


Figure 10 : distribution statistique des pentes sur la zone OPUR

1.3.4 Ensablement

Un relevé grossier du niveau d'ensablement est effectué chaque année par les services de la Ville de Paris (égoutiers) et les données sont enregistrées dans la base TIGRE. Les deux cartes présentées dans la Figure 11 et Figure 12 représentent les relevés d'ensablement de Mai 2002 et Octobre 2003.

On observe sur la première carte que les endroits où la hauteur de sable est très importante (représentant plus de 40% de la hauteur de la cunette) sont très rares. Environ la moitié des collecteurs ne contiennent pas ou contiennent très peu de dépôt.

Par ailleurs, les collecteurs où une quantité relativement importante de dépôt existe (10-40% de la hauteur de la cunette) sont :

- Saint Gilles et Vieille du Temple (dans le bassin versant du Marais),
- Sébastopol centre (dans bassin versant Sébastopol),
- Voltaire (dans le bassin versant des Coteaux),
- Rollin, Lyon, Diderot et Râpé (dans le bassin versant des Quais),
- Rivoli ouest et Montmartre (dans le bassin versant de Clichy centre).

La comparaison avec les relevés du mois d'Octobre 2003 montre une évolution des hauteurs du dépôt. En effet, de nombreuses zones (collecteurs : Vielle du Temple, Sébastopol, Rollin et Lyon, Voltaire…) où il y avait antérieurement du dépôt ne le contiennent plus. Ceci est expliqué au Marais par les travaux de curage réalisés en Février-Mars 2003 et à Sébastopol par les travaux de réhabilitation (à partir de la fin Juillet 2003). En revanche, d'autres collecteurs se sont encrassés tel est le cas du collecteur du Centre.

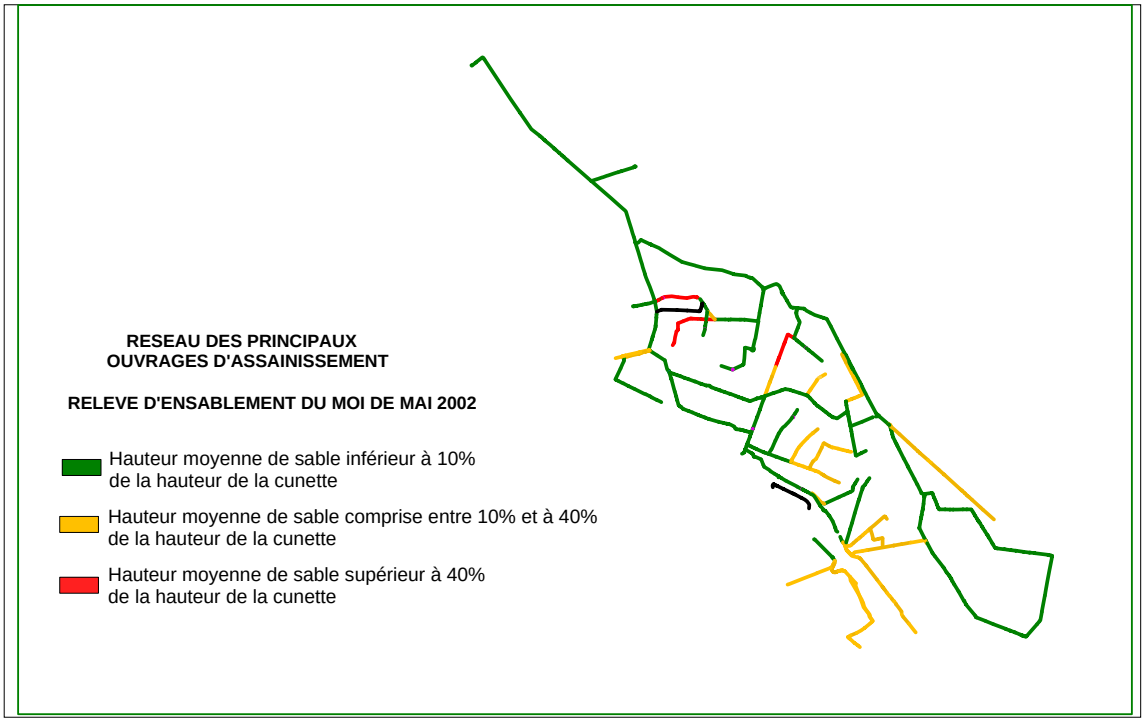


Figure 11: relevés d'ensablement sur la zone OPUR Mai 2002

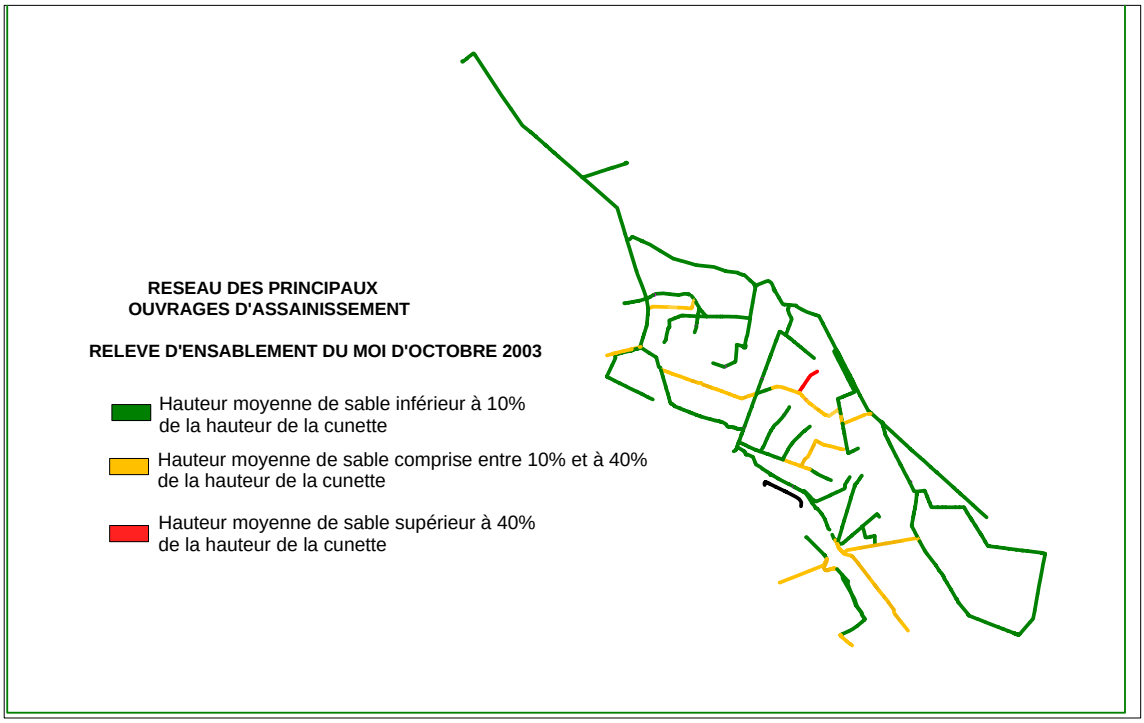


Figure 12: relevés d'ensablement sur la zone OPUR Octobre 2003

L'analyse des relevés d'ensablement effectués par les équipes d'égoutiers de la SAP et enregistrés dans la base TIGRE (base de données TIGRE, 2003-version d'août) montre qu'environ 50% de la longueur total du réseau (collecteurs et petites lignes) contiennent un "dépôt".

Sept types de dépôt sont répertoriés : boue, sable, graisse, encombrants, flottants (papiers, sac en plastique…), liants, et torches.
La Figure 13 donne pour chacun de ces types de "dépôt" le pourcentage du linéaire de réseau qui en est affecté.

On remarque que le sable et les encombrants sont chacun présent sur une longueur moyenne de l'ordre de 22% de la longueur totale du réseau. Cependant, la boue, les liants et les graisses ne sont pas très présents (3%, 4% et 0.81% de la longueur totale du réseau) et correspondent plutôt à des dépôts ponctuels.

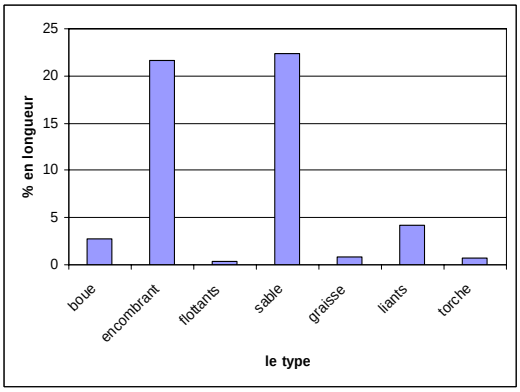


Figure 13 : type de dépôt et pourcentages du linéaire de réseau qui en est affecté

La distribution statistique du linéaire de boue et de sable par catégorie de pentes des collecteurs et des petites lignes (Figure 14) montre qu'il n'y a pas de relation entre la pente et la présence de "dépôt". Par ailleurs, 7% seulement du linéaire de boue et 4% du linéaire de sable sont situé dans des tronçons de pente inférieure à 0.05%.

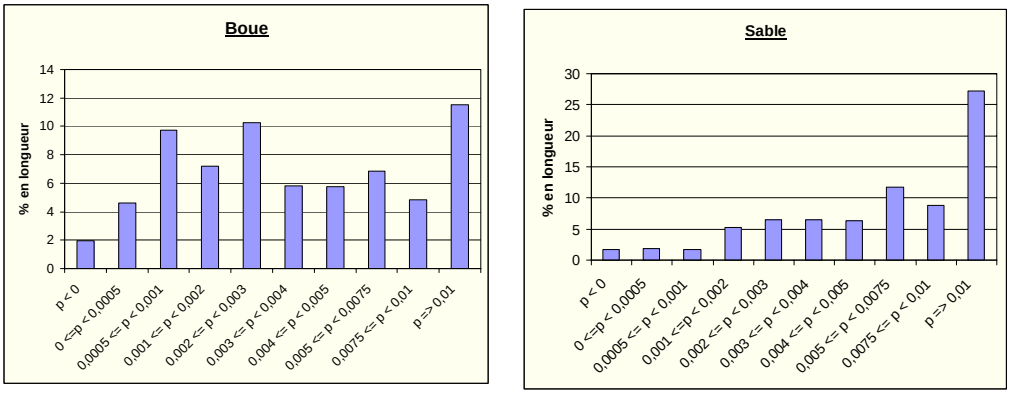


Figure 14: répartition du linéaire de boue et de sable par catégorie de pente

Chapitre 2 : Caractérisation et équipements des points de mesure

2.1 Caractéristiques géométriques et hydrauliques au niveau des points de mesure

Les six sites de mesure de l'OPUR (Figure 1) se trouvent sur les collecteurs à banquettes suivants : Rivoli (bassin versant du Marais), Sébastopol (bassin versant du Sébastopol), Quais (Quais ou P213), Coteaux (Coteaux aval ou P218) et Clichy (bassins versant de Clichy centre ou P219 et Clichy aval ou P218). La plupart de ces collecteurs sont de grandes tailles et leurs dimensions au niveau des sections de mesure sont représentées dans la Figure 15.

Les sites de l'OPUR se trouvent à des profondeurs allant de 3 à 35m. Les deux sites Clichy centre et Coteaux aval se trouvent en effet à des profondeurs considérables et où la profondeur entre le point de mesure et le regard d'accès dépasse les 30m. Par ailleurs, le dénivelé entre la prise d'eau et le préleveur est important (jusqu'à 5.7 m) (Tableau 13).

Bassin versant	Profondeur du site de mesure (m)	Prélèvement	
		Dénivelé (m)	Longueur tuyau (m)
Marais	3	3	20
Sébastopol	4	3.5	7
Quais	6	3.5	15
Clichy centre	33	5.7	9
Coteaux aval	35	5.3	10
Clichy aval	4	3	11

Tableau 13: caractéristiques des sites de l'OPUR

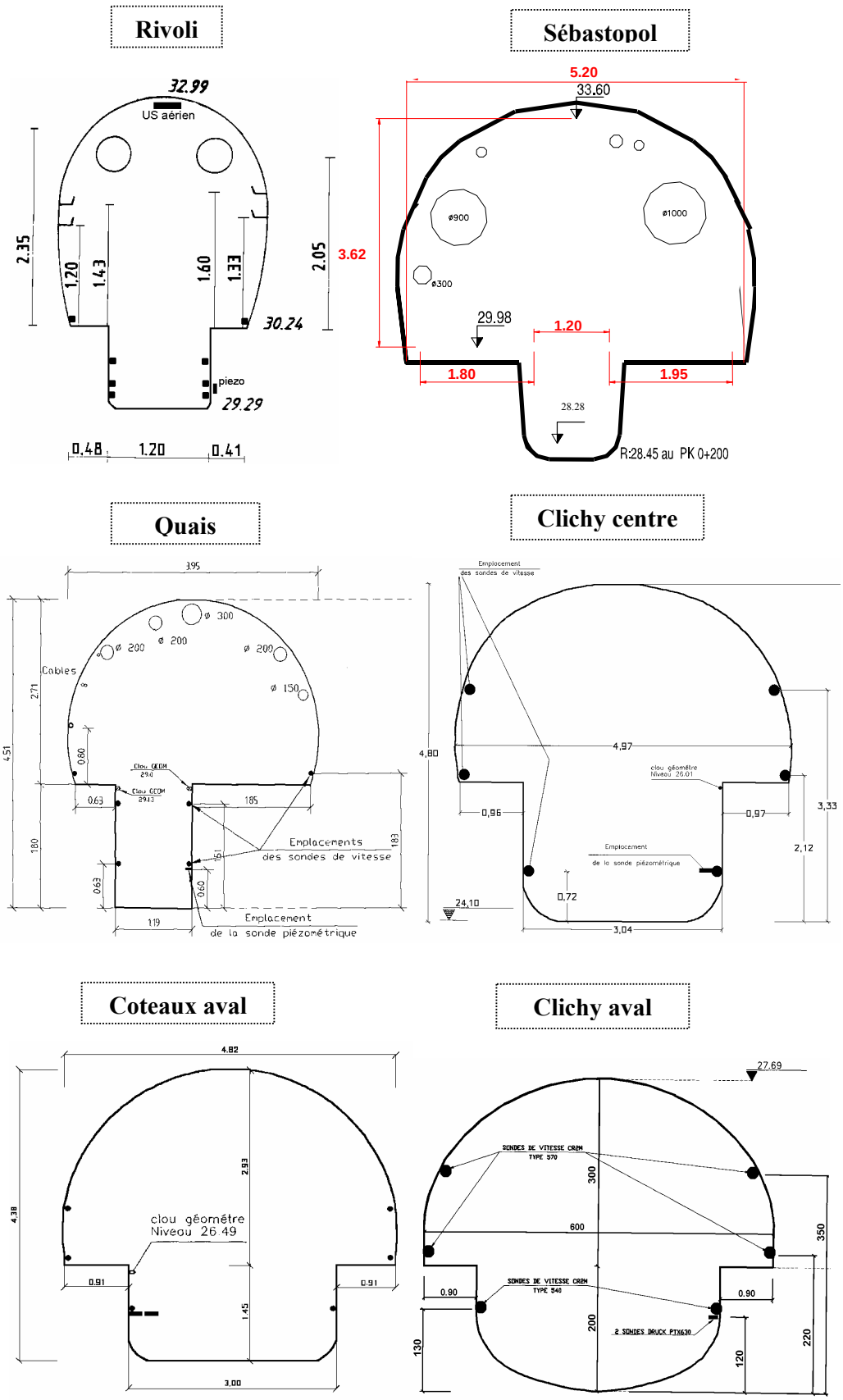


Figure 15 : sections types des principaux colleteurs de l'OPUR

Les ordres de grandeur des débits, hauteurs et vitesses de temps sec et de temps de pluie au niveau des points de mesure choisis sont indiqués dans les Tableau 14 et Tableau 15.

Ces ordres de grandeurs sont basés pour les sites Quais, Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval sur les mesures réalisées en 2001 par la Division Gestion des Flux de la Section de l'Assainissement de Paris. Pour les deux sites Sébastopol et Marais, il s'agit de données acquises par le CEREVE lors de la campagne de mesure 2003 pour le Sébastopol et celle de 1996-1997 pour le Marais.

Point de mesure	Débit moyen journalier (m3/s)	Hauteur d'eau maximale journalière (m)	Vitesse maximale journalière (m/s)
Marais	0.05–0.08	0.2–0.3	0.4-0.5
Sébastopol	0.18-0.22	0.49-0.52,(0.5)	0.66-0.73,(0.68)
Quais	0.5–1.0,(0.7)	1.2–2.1,(1.4)	0.6-1.0,(0.7)
Clichy centre	1.8–3.3,(2.4)	1.2–3.3,(1.8)	0.3–1.1,(0.7)
Coteaux aval	1.9–3.2,(2.4)	0.7–2.3,(1.0)	0.5–1.6, (1.2)
Clichy aval	3.9–8.3,(4.4)	2.1–4.2,(2.9)	0.3–1.3,(0.7)
minimum–maximum,(moyenne)			

Tableau 14: débit moyen journalier, hauteur d'eau maximale journalière et vitesse maximale journalière de temps sec

Point de mesure	Débit maximal (m3/s)	Hauteur d'eau maximale (m)	Vitesse maximale (m/s)
Marais	2.1	2.0	0.9
Sébastopol	*2.8*	*1.4*	*1.7*
Quais	3	2.9	0.9
Clichy centre	17.3	5.7	1.4
Coteaux aval	23.7	4.9	1.9
Clichy aval	42	5.3	2.1

Tableau 15 : débit maximal, hauteur d'eau maximale et vitesse maximale de temps de pluie (Quais, Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval :pluie du 06/07/01, Imax = 200 mm/h, Imoy = 8 mm/h; et *Sébastopol: pluie du 02/07/2003*)

Le débit moyen de temps sec augmente proportionnellement avec la taille des bassins versants, de 0.07 m3/s au Marais à 4.4 m3/s à Clichy aval. Tous les sites de mesures sont caractérisés par des vitesses d'écoulement relativement élevées, tant par temps sec que par temps de pluie. Ces vitesses élevées sont favorables à un bon mélange des effluents dans la section et à l'absence d'ensablement au niveau des points de mesure.

Une mise en charge des collecteurs au niveau des points de mesure Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval s'est produite lors de la pluie la plus forte observée en 2001. Il s'agit de la pluie forte du 06-07 juillet 2001, dont les caractéristiques sont les suivantes : hauteur totale 77 mm, durée 10 heures, intensité maximale 200 mm/h.

Sur les sites Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval, on observe une fluctuation importante des hauteurs maximales et vitesses maximales, d'une journée de temps sec à une autre. Ces fluctuations sont sans doute imputables à l'influence de l'usine de Clichy située à l'aval.

2.2 Mesures débitmétriques

Chaque point de mesure est équipé d'un débitmètre, assurant la mesure des vitesses d'écoulement et des hauteurs d'eau, et le calcul des débits en temps réel.

Pour les sites Quais, Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval, il s'agit des équipements permanents mis en place par la SAP dans le cadre de la surveillance et de la gestion automatisée du réseau d'assainissement. Ce sont des débitmètres CR2M, modèle SAB 600 ASN. La vitesse d'écoulement est mesurée par temps de transit des ultrasons en trois hauteurs de la section d'écoulement. La hauteur d'eau est mesurée par un ou deux capteurs de pression DRUCK, modèle PTX 630. Une centrale d'acquisition permet le calcul et l'enregistrement de la valeur moyenne des vitesses, hauteurs et débits sur des pas de temps de 3 à 6 minutes. L'entretien et la maintenance de ces équipements sont assurés de façon régulière par la société SEMERU. Les données sont transmises par liaison téléphonique au centre de gestion des flux de la SAP, où elles sont filtrées, archivées et validées.

Pour le site du Marais, il s'agit du débitmètre Ultraflux mis en place dans le cadre du précédent programme de recherche. La vitesse d'écoulement est mesurée par temps de transit des ultrasons en quatre hauteurs de la section d'écoulement. La hauteur d'eau est mesurée par un capteur de pression Endress&Hauser et par un ultrason aérien. La valeur moyenne des vitesses, hauteurs et débits est enregistrée au pas de temps de 2 minutes. Les données sont transmises au CEREVE par liaison MODEM. L'entretien et la maintenance de ces équipements sont assurés par le CEREVE.

Au début du programme de recherche, le site Sébastopol a été équipé, d'un débitmètre CR2M comparable à ceux mis en place par la SAP sur les autres sites de mesures. L'entretien et la maintenance de ces équipements ont été assurés par le CEREVE. Les données enregistrées

sont collectées sur place au moyen d'un ordinateur portable, aucune liaison modem n'ayant pu être installée.

2.3 Dispositif de prélèvement

2.3.1 Prélèvement

Chaque site de mesure a été équipé de deux appareils de prélèvement automatique, asservis aux mesures hydrauliques et permettant chacun la constitution d'échantillons moyens de grand volume ou le prélèvement fractionné en 24 flacons.

Les préleveurs des sites Marais et Quais sont fixes, réfrigérés, de marque Bühler. Ils ont été installés dans des locaux techniques jouxtant le collecteur, ce qui permet leur alimentation en 220V et facilite l'accès pour la maintenance et la collecte des échantillons. Les préleveurs des Quais peuvent être munis d'un monoflacon de 40 litres ou de 24 flacons de 1 litre. Ceux du Marais sont munis l'un de 24 flacons de 3 litres, l'autre d'un monoflacon de 100 litres.

Sur les sites Sébastopol, Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval, il s'agit de préleveurs portables, Bühler, installés à l'intérieur du réseau d'assainissement. Ces préleveurs sont alimentés sur batteries et non réfrigérés. Ils peuvent être munis d'un monoflacon de 25 litres ou de 24 flacons de 1 litre.

Les préleveurs ont été installés de façon à réduire au minimum la distance et la hauteur de prélèvement, tout en veillant à ce qu'ils soient hors d'eau par temps de pluie. La distance de prélèvement varie entre 7 et 20 m suivant le site, et le dénivelé entre 3 et 5.7 m. Compte tenu des conditions de prélèvement et des vitesses d'aspiration souhaitées, les pompes à vide équipant en standard les préleveurs Bülher ont toutes été remplacées par des pompes à vide plus puissantes.

Les prélèvements sont effectués alors par pompe à vide, avec une vitesse de prélèvement supérieure à 0.75 m/s pour un tuyau de diamètre 12 mm et un dénivelé de 5.5 m. Le tuyau est purgé par injection d'air avant et après chaque prélèvement. La pente du tuyau de prélèvement a été maintenue croissante entre la prise d'eau et le préleveur, de façon à faciliter la purge du tuyau.

La prise d'eau a été fixée par suspension depuis la voûte. Ce système de fixation très souple crée peu d'obstacles à l'écoulement et facilite l'auto-nettoyage du tuyau. Il permet de plus une

variation de la hauteur de la prise d'eau avec la hauteur d'eau. Par temps sec, le point de prélèvement est situé environ a mi-hauteur d'eau.

2.3.2 Asservissement et constitution des échantillons moyens

2.3.2.1 Mode d'asservissement

Le mode d'asservissement souhaité était :

- déclenchement des préleveurs sur un seuil de hauteur. Ce seuil est légèrement supérieur au niveau maximal de temps sec et est régulièrement ajusté en fonction des fluctuations des niveaux de temps sec;
- fréquence de prélèvement proportionnelle au volume d'eau écoulé dans le collecteur, de façon à assurer la constitution d'un échantillon moyen représentatif.

Cependant ce mode d'asservissement n'a pas pu être mis en œuvre puisque les débitmètres en place (à l'exception de celui du Marais) ne permettaient pas un asservissement proportionnel au volume.

Par ailleurs, nous avons essayé d'asservir les préleveurs proportionnellement à la hauteur d'eau. Cependant, compte tenu de l'instabilité de la relation Hauteur/Débit et de la remarquable variation de la hauteur de temps sec d'un jour à l'autre sur nos site de mesure du fait de : l'influence de l'usine de Clichy et de la gestion des émissaires par le SCORE, pour les sites aval; et de l'influence de l'usine de pompage Mazas pour le site des Quais; ce mode de d'asservissement a été abonné. Ainsi, le mode d'asservissement retenu au final est le suivant :

- Pour les campagnes de temps sec :
    - Déclenchement des prélèvements à 08:00 (heure légale).
    - Prélèvement à pas de temps de 10mn, à raison de 6 échantillons par flacon (soit 1 flacon par heure);
    - Constitution d'un échantillon moyen par regroupement proportionnel au volume écoulé des échantillons horaires.
- Pour les campagnes de temps de pluie :
    - Déclenchement et arrêt sur seuil de hauteur d'eau ;

- Fréquence d'échantillonnage : sur le Marais, les prélèvements étaient proportionnels au volume écoulé. En revanche, ils étaient à pas de temps fixe (de 3 à 5 min) sur les autres sites, à raison de 6 échantillons par flacon de 1 litres (soit 1 flacon toutes les 18mn sur les sites Sébastopol et Quais et 1 flacon toutes les 30mn sur les sites Coteaux aval, Clichy centre et Clichy aval). Les seuils de prélèvement sont fixés et réajustés en fonction des fluctuations des niveaux d'eau de temps sec des journées précédant l'événement pluvieux étudié.
- Après l'événement, regroupement manuel des flacons proportionnellement au volume écoulé pour constituer un échantillon moyen.

2.3.2.1 Constitution des échantillons moyens

Afin d'obtenir un échantillon moyen représentatif de la journée ou d'une période de la journée (matin, après midi, soir) ou encore de l'événement pluvieux, nous avons procédé à un regroupement des flacons prélevés :

- *Pour l'échantillon moyen journalier ou moyen sur l'événement pluvieux :*
  - Calcul des volumes passés durant les périodes de prélèvements de chaque flacon à partir de l'hydrogramme de la journée de temps sec ou de l'événement pluvieux ;
  - Calcul du volume d'échantillon à prendre dans chaque flacon. Ce volume est pris proportionnel à celui écoulé dans le collecteur, en tenant compte du volume maximal passé pendant la journée ou durant l'événement et du volume maximal prélevé dans chaque flacon.
- *Pour les pollutogrammes :*

La constitution de pollutogrammes à 24 tranches horaires n'était pas possible du fait de la lourdeur des analyses. Nous avons opté pour un regroupement des échantillons en 5 tranches horaires par jour.

Des pollutogrammes complets (en 24 tranches horaires) en DCO ont été réalisés sur chaque site de mesure pour une journée. Ces derniers ont été comparés avec les hydrogrammes de débit et ont permis de déterminer pour chaque site de mesure 5 plages horaires types représentatives de la journée (Tableau 16) :

Site	Plages horaires				
Marais	7h-11h	11h-18h	18h-1h	1h-4h	4h-7h
Sébastopol	8h-11h	11h-18h	18h-0h	0h-3h	3h-8h
Quais			18h-0h	0h-5h	5h-8h
Clichy centre			18h-1h	1h-4h	4h-8h
Coteaux aval					
Clichy aval					

Tableau 16: plages horaires retenues pour l'établissement des pollutogrammes de temps sec

La première étape pour la constitution des pollutogrammes en tranches horaires est similaire à celles suivies pour la constitution de l'échantillon moyen. La seconde démarche consiste à regrouper les échantillons horaires en 5 échantillons moyens de plages horaires différentes.

Des fiches techniques ont été dressées en ANNEXE 2 pour chaque site de mesure. Elles comprennent chacune des détails relatifs aux équipements de mesure, aux conditions d'installation et au mode d'asservissement.

2.4 Couverture pluviométrique

La couverture pluviométrique sur les bassins versants OPUR est assurée par un réseau de 14 pluviomètres présentés en Figure 16. Il s'agit de 12 pluviomètres du réseau de la SAP et de 2 pluviomètres complémentaires mis en place par le CEREVE, l'un se trouve sur le bassin versant du Marais et le second près des points de mesure Clichy centre et Coteaux aval.

Les pluviomètres enregistreurs mis en place sont munis d'augets basculants (Figure 17). Ils respectent généralement les critères d'installation en zone urbaine (terrain plat, sous les vents dominants…).

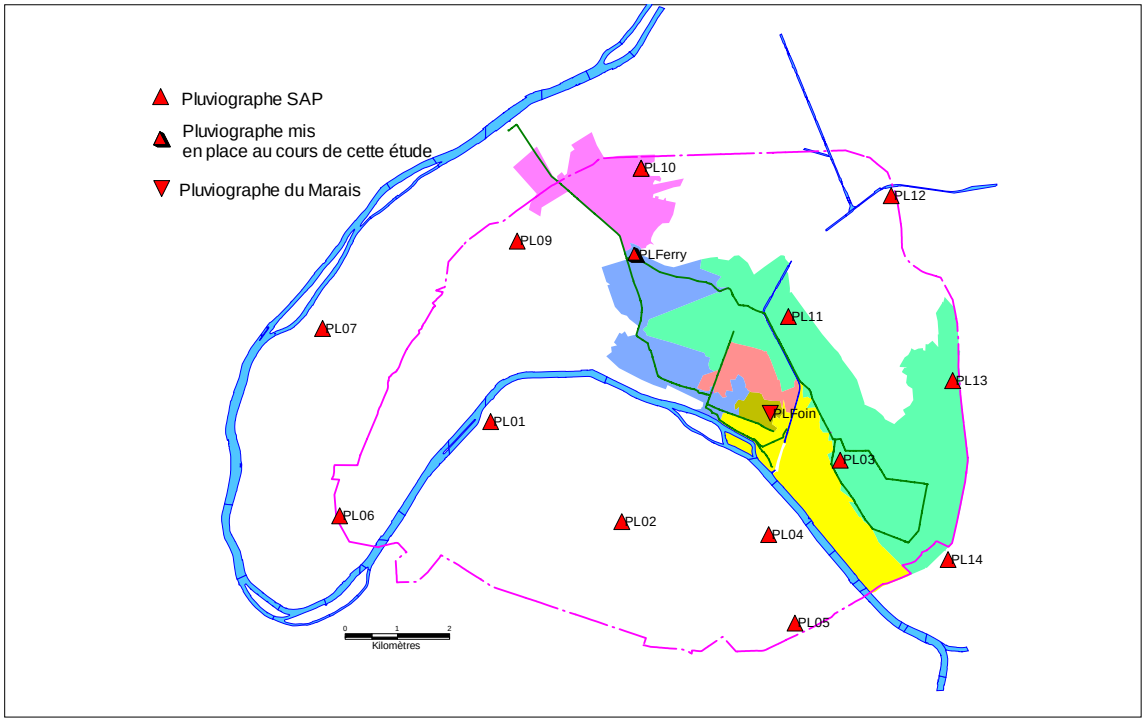


Figure 16 : localisation des pluviomètres enregistreurs

Ce réseau pluviométrique permet d'avoir une bonne représentativité de la distribution des pluies sur Paris, grâce notamment au tracé des courbes isohyètes.

Cependant, pour un calcul plus précis des lames d'eau moyennes sur notre zone d'étude, la mise en place d'un pluviomètre supplémentaire, sur la zone centrale du bassin versant de Clichy (1er ou 2^{ième} arrondissement) en été souhaitable. Cependant, malgré nos recherches, nous n'avons pas trouvé d'emplacement adéquat pour cet appareil.

Les données pluviométriques sont récupérées en temps réel et différé pour le réseau pluviométrique du service de l'assainissement de Paris, alors que celles des pluviomètres du Marais et de Place Clichy sont récupérées en temps différé.

Ces pluviomètres permettent de définir les caractéristiques des évènements pluvieux sur chaque bassin versant de l'OPUR.

Figure 17 : type de pluviomètres mis en place

Chapitre 3 : Représentativité de l'échantillonnage

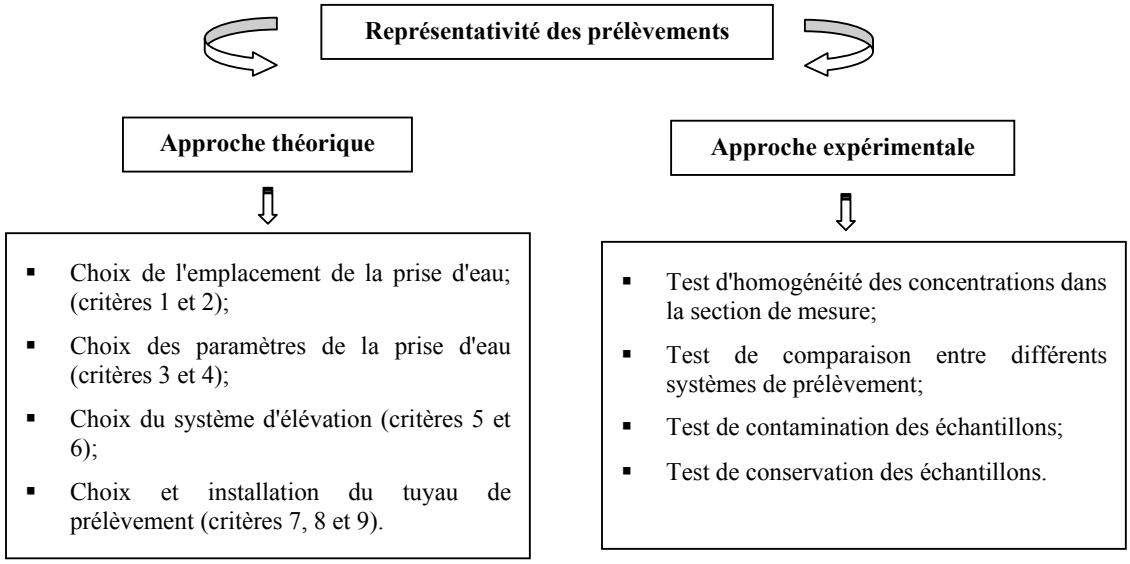
3.1 Représentativité des prélèvements

Compte tenu des caractéristiques des sites de mesure de l'OPUR (grands collecteurs profonds à très profonds, vitesses d'écoulement importantes, collecteurs pouvant se mettre en charge durant les événements pluvieux, accessibilité difficile jusqu'au point de mesure, …), la mise en place et le choix des équipements expérimentaux s'est avérée une tache lourde et difficile.

Nous avons veillé lors de l'installation des équipements de mesure, à respecter les consignes et les règles recommandées pour réduire au maximum les sources d'erreurs. Cependant, une installation idéale n'est pas souvent réalisable puisque le choix des caractéristiques techniques du matériel est limité par les performances du matériel existant sur le marché, et que les conditions d'installation et de fonctionnement sont en partie imposées par la configuration du site de mesure.

Dans l'objectif de quantifier et de limiter au mieux les biais induits au cours de la procédure expérimentale, nous avons suivi deux approches : une approche théorique basée sur des critères théoriques de choix et d'installation d'un échantillonneur automatique (Bertrand-Krajewski et al; 2000); et une approche expérimentale complémentaire (basée sur la réalisation de tests expérimentaux) destinée mettre en évidence et à quantifier les incertitudes liées à la représentativité des prélèvements (Kafi-Benyahia *et al*, 2004).

L'organigramme suivant synthétise les étapes des deux approches :



3.1.1 Analyse théorique de la représentativité des prélèvements

Dans l'approche théorique, nous nous sommes basés sur une série de neufs critères proposés par (Bertrand-Krajewski *et al*, 2000). La synthèse de cette étude est présentée dans le Tableau 17.

Sur les neufs critères étudiés, deux seulement ne peuvent être respectés. Il s'agit des critères 3 (Vitesse de prélèvement ≥ Vitesse de d'écoulement) et 9 (Volume de tuyau ≤ Volume de l'échantillon prélevé). Le critère 3 est partiellement respecté sur les sites Sébastopol, Clichy centre et Clichy aval, cependant il n'est pas respecté à Coteaux aval où les vitesses d'écoulement sont très importantes. Le non-respect de ce critère conduit théoriquement à une ségrégation des particules. Toutefois, les tests expérimentaux que nous allons réaliser permettront d'évaluer ce biais. Compte tenu de l'erreur maximale (9-22%) due au non-respect du critère 9 (calculée selon la surestimation des concentrations proposée par (De Heer ; 1992)), le biais induit n'est pas très élevé, de plus le phénomène de bulle d'air n'a pas été observé.

Type de critère	Etude			Validation
Critère 1 : Emplacement de la section de mesure : éviter les sections à très faibles vitesses d'écoulement, et celles situées à l'aval d'un coude ou d'un raccordement de 2 conduites	-V d'écoulement de temps sec >0.3m/s, -Sections de mesure à +50m des affluents les plus proches			Respecté sur tous les sites
Critère 2 : Emplacement de la prise d'eau par rapport à la hauteur dans le collecteur : placer la prise d'eau à une profondeur 40-60% de la colonne d'eau et une distance suffisante des parois de la cunette	Système de fixation par suspension			
Critère 3 : Vitesse de prélèvement ≥ Vitesse de d'écoulement	V sec	Vmax pluie	Vprél	Respecté sauf Coteaux aval par temps sec et par temps de pluie, et Sébastopol, Clichy centre et Clichy aval par temps de pluie ⇒ *possibilité de ségrégation des particules à l'entrée de la prise d'eau*
	0.33-0.63	0.32-0.78	1.0	
	0.31-0.68	0.68-1.69	0.8	
	0.18-0.71	0.69-0.94	1.0	
	0.56-0.95	0.7-1.65	(<0.8)*	
	1.11-1.37	1.12-1.79	0.7	
	0.6-0.85	0.72-1.5	(<0.8)*	
Critère 4 : Ne pas utiliser des crépines				Respecté sur tous les sites
Critère 5 : Vitesse de prélèvement ≥ 10*Vitesse de sédimentation	Vc90 des MES<0.005m/s (Gromaire,98) << V prélèvement			
Critère 6 : Vitesse de prélèvement ≥ Vitesse d'affouillement	Vitesse limite d'écoulement horizontale sans dépôt (V_L) =0.4m/s (Gromaire, 98) <V prélèvement			
Critère 7 : Tuyau de prélèvement rigide, sans goulots d'étranglement ni courbures vives et suit une pente ascendante entre la prise d'eau et le préleveur				
Critère 8 : Diamètre de tuyau de prélèvement ≥ 12mm				
Critère 9 : Volume de tuyau ≤ Volume de l'échantillon prélevé	V' prélevé	V' tuyau	Surestimation (%)	Non respecté ⇒ risque de *phénomène de flottation*
	0.75	2.26	14	
	0.3	0.79	11	
	0.75	1.70	9	
	0.3	1.02	17	
	0.3	1.13	19	
	0.3	1.24	22	
V : vitesse en m/s, V' : volume en l, x-y :minimum-maximum ; * non mesurée				

Tableau 17 : critères à respecter lors du choix et d'installation d'un préleveur automatique

3.1.2 Analyse expérimentale : tests expérimentaux de représentativité des prélèvements

Le problème fondamental d'un échantillonnage automatique en réseau d'assainissement est la représentativité des échantillons collectés, par rapport à la concentration moyenne réelle de l'effluent dans la section de mesure. De plus, plusieurs facteurs peuvent induire des biais lors de l'échantillonnage automatique. De ce fait, une approche expérimentale est nécessaire. Cette dernière permet de compléter l'approche théorique notamment pour évaluer les erreurs induites par le non-respect de certains critères. Pour cela une série de tests expérimentaux a été réalisée au niveau de chaque point de mesure (Tableau 18).

Biais potentiel	***Tests réalisés***
Prélèvement ponctuel dans la section de mesure, ne correspondant pas à la moyenne de l'effluent dans la section	Test d'homogénéité des concentrations dans la section de mesure
Ségrégation des particules au niveau de la prise d'eau	Test de comparaison entre différents systèmes de prélèvement
Contamination par contact avec l'échantillon précédent ou par des croissances de biofilms dans le tuyau ; contamination par les matériaux du préleveur	Test de contamination
Modification de l'échantillon entre le prélèvement et l'analyse	Test de conservation

Tableau 18: biais induits lors des prélèvements automatiques et tests réalisés

3.1.2.1 Homogénéité des concentrations dans la section de mesure

Dans l'objectif de voir l'existence ou non d'une stratification de l'effluent au niveau des sections de mesure, des prélèvements à différentes profondeurs ont été effectués sur les sites de l'OPUR.

Le système de prélèvement « multi-profondeurs » utilisé est constitué (Figure 18) :

- d'un tube en PVC ∅63 démontable, muni d'orifices aux profondeurs choisies, et dans lequel sont introduits les tuyaux de prélèvement ;
- d'un système de fixation constitué d'une planche en bois fixée sur la banquette et de tiges de fixation ;
- d'un bac contenant : trois flacons de prélèvement (500ml) reliés chacun d'une part à un flacon tampon de 5l, et d'autre part à un tuyau de prélèvement qui plonge dans l'eau ;
- d'une pompe à vide électrique qui marche sur une batterie 24V.

Le prélèvement s'effectue en commençant par créer le vide dans le grand flacon de 5L au moyen de la pompe (pendant 30 à 40 secondes). Quand le vide créé est suffisant, on ouvre la vanne (1) tout en continuant de pomper et une aspiration de l'eau se produit. La puissance de la pompe ne permettant pas le prélèvement simultané aux trois profondeurs, les prélèvements ont donc été réalisés de façon successive. Une purge par injection d'air a été effectuée avant et après chaque prélèvement.

Une estimation des vitesses de prélèvement aux différentes profondeurs a été réalisée au laboratoire dans des conditions « similaires » à celles du collecteur (même hauteur de prélèvement et même longueur de tuyaux) et a donné des valeurs variant entre 1.6 et 2.2 m/s. Ces vitesses sont nettement supérieures aux vitesses d'écoulement, ce qui indique que le critère 3 (voir Tableau 7) est respecté.

Ce test a été réalisé sur tous les sites, à l'exception de Clichy aval pour des raisons de sécurité. Les profondeurs auxquelles ont été effectuées les prélèvements se trouvent dans le Tableau 19).

Site	Profondeurs de prélèvement à partir du fond (cm)		
	Profondeur1	Profondeur2	Profondeur3
Marais	10	25	40
Sébastopol	10	40	55
Quais	10	40	70
Clichy centre	10	80	130
Coteaux aval	10	55	*
*le niveau d'eau est inférieur au niveau auquel était prévu le prélèvement			

Tableau 19: Profondeurs des prélèvements effectués par le système multi-profondeur.

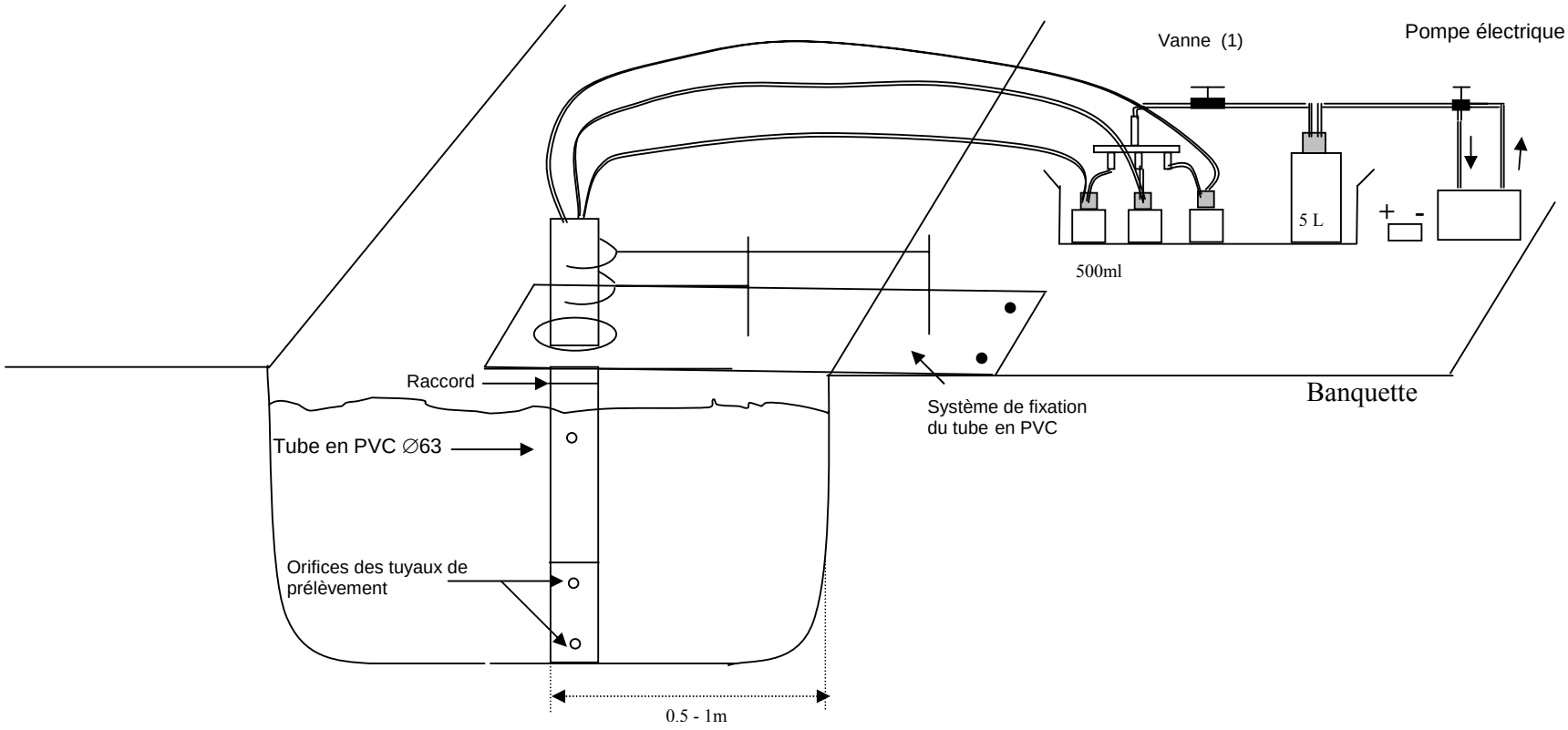
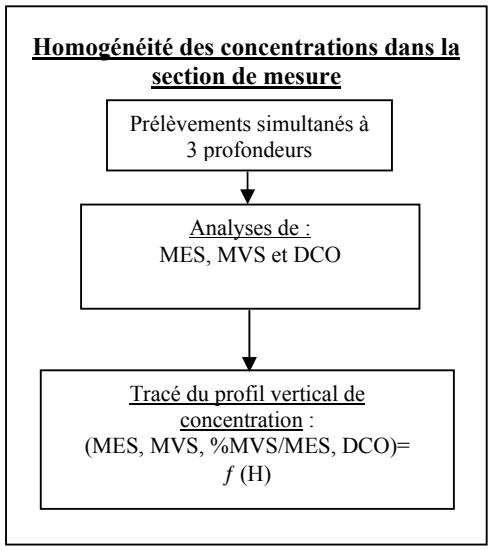


Figure 18 : système de prélèvement multi-profondeurs

Les prélèvements ont été réalisés à un pas de temps fixe de 5mn pendant une heure et mélangés pour constituer un échantillon moyen pour chaque profondeur. Ces échantillons ont été analysés en terme de MES, MVS et DCO. La mesure de vitesse de chute a été réalisée pour deux profondeurs à chaque fois.

L'organigramme suivant donne de façon synthétique les principales étapes de ce test :



Ce test a permis de tracer des profils verticaux de concentration des MES, MVS, DCO et des teneurs en MVS (Figure 19). Ces profils montrent globalement :

- pas de gradient important des concentrations avec la profondeur;
- une légère augmentation des concentrations près du fond (à 10cm), ce phénomène reste marginal compte tenu de l'incertitude d'analyse pour les MES, mais apparaît nettement pour la DCO;
- à l'exception du Marais, les teneurs en MVS sont homogènes dans la section de mesure. Au Marais, les particules près du fond paraissent un peu moins organiques que dans le reste de la section.

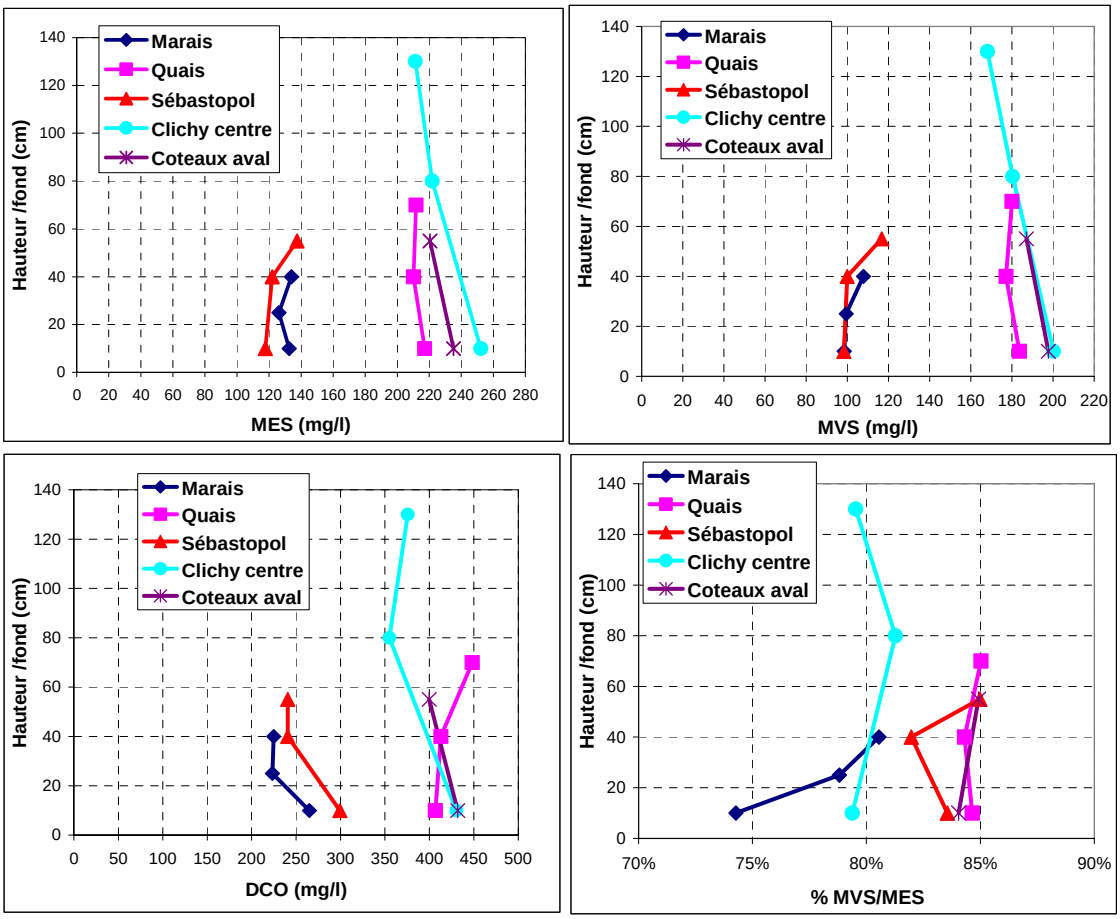


Figure 19 : profils verticaux des concentrations des MES, MVS, DCO et des taux de MVS aux exutoires des sites de l'OPUR

Des courbes de vitesses de chute des matières en suspension à deux profondeurs de chaque section de mesure ont été tracées (Figure 20). Celles en matières volatiles en suspension varient de façons similaires.

Pour le site Sébastopol, les courbes de vitesse de chute ne font pas apparaître de différence de la nature des particules entre les profondeurs 10 et 55cm. En revanche, sur les sites Marais, Quais et Coteaux aval, les particules prélevées près du fond présentent une vitesse de chute plus élevée.

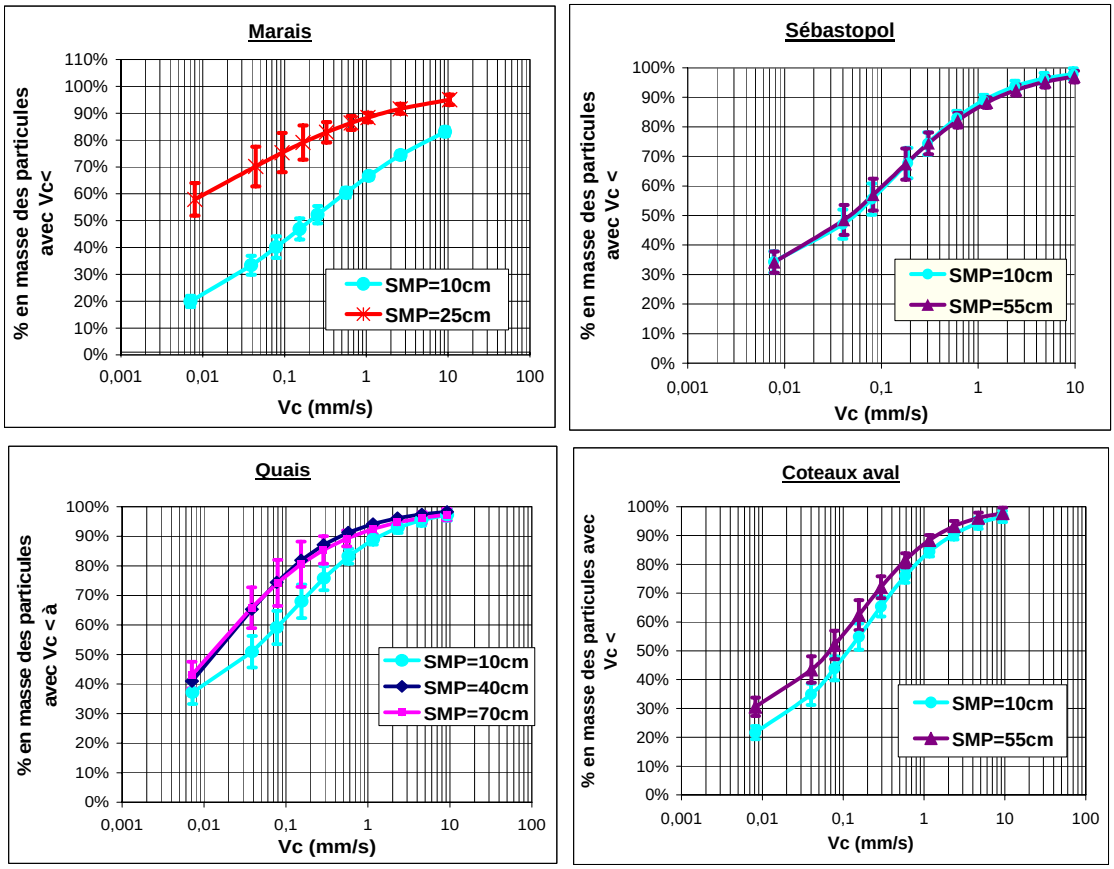


Figure 20 : courbe de vitesse de chute des particules en suspension

Ce test a été réalisé par temps sec, et nous espérons avoir un bon mélange de l'effluent unitaire par temps de pluie du fait des fortes vitesses d'écoulement.

3.1.2.2 Transport des échantillons entre la prise d'eau et le flacon

Afin de mettre en évidence d'éventuels problèmes liés à la ségrégation des particules au niveau de la prise d'eau et au transport des échantillons dans le tuyau de prélèvement deux types de tests ont été effectués :

- test de comparaison entre les préleveurs automatiques mis en place et deux systèmes de prélèvement de référence (prélèvement manuel par un tube PVC lesté et prélèvement par une pompe péristaltique ou par le système multi-profondeur) ;
- test de contamination des échantillons par encrassement des tuyaux de prélèvement.

3.1.2.2.1 Test de comparaison entre différents systèmes de prélèvements

Dans l'objectif d'évaluer expérimentalement le biais lié à la ségrégation des particules au niveau de la prise d'eau, un test de comparaison entre les préleveurs en place et les systèmes de référence « tube PVC » et « pompe péristaltique » a été effectué.

Les deux systèmes de référence (Figure 21) ont été choisis parce qu'ils satisfont les critères suivants :

- absence de problèmes de flottation ;
- vitesses de prélèvement élevées limitant ainsi la ségrégation des particules au niveau de la prise d'eau ; la vitesse de prélèvement de la pompe péristaltique est 1m/s, alors que celle du tube PVC a été évaluée dans des conditions de laboratoire à 0.89m/s ;
- distance de transport nulle pour le tube PVC et très faible pour la pompe péristaltique (environ 3m), conduisant ainsi à la suppression des risques de modification de l'échantillon au cours de son transport dans le tuyau de prélèvement.

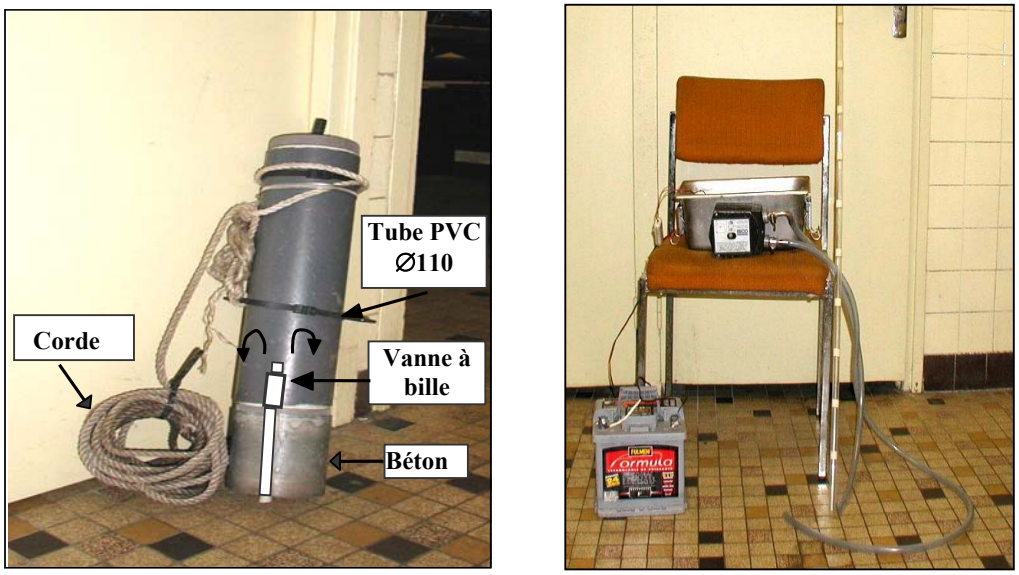
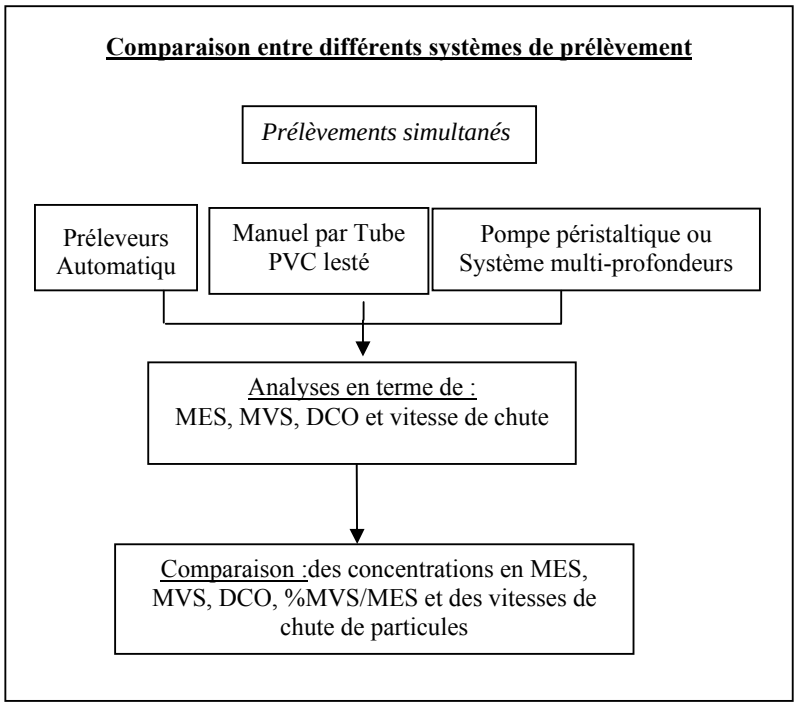


Figure 21 : systèmes de prélèvement de référence : tube PVC à gauche, pompe péristaltique à droite

Les prélèvements avec les différents systèmes ont été réalisés au même pas de temps et pendant la même période : 2 à 5 mn pendant 30 à 60 mn. Le volume prélevé à chaque pas de

temps était égal à 500 ml. Pour chaque système de prélèvement, ces échantillons élémentaires ont été mélangés pour constituer un échantillon moyen de grand volume. Cet échantillon moyen a été ensuite analysé en terme de MES, MVS, DCO et vitesse de chute.
Le schéma suivant synthétise les principales étapes de ce test :



Ce type de test a été réalisé 1 à 2 fois sur chaque site de mesure et a conduit aux conclusions suivantes (Tableau 20, Tableau 21, Tableau 22) :

- les concentrations en matières en suspension et matières volatiles en suspension des deux préleveurs automatiques sont généralement du même ordre de grandeur compte tenu de l'incertitude d'analyse (±10%). L'écart plus important obtenu à Clichy aval pour le test 2 uniquement (28%) est peut être imputable à une contamination de l'échantillon ;
- les concentrations des MES et MVS obtenues avec les préleveurs automatiques correspondent à celles obtenues avec les systèmes de prélèvement de référence (aux incertitudes d'analyse près) pour les sites Marais, Sébastopol, Quais, et pour le test 1 sur Clichy centre et Clichy aval ; En revanche, des surestimations des concentrations avec les préleveurs automatiques ont été observées sur Coteaux aval et pour le test 2 à Clichy centre et Clichy aval. Ces surestimations ont pu être expliquées par la suite par une contamination des échantillons due à un encrassement des tuyaux de prélèvement (voir test de contamination) ;

- les concentrations de DCO des préleveurs sont généralement comparables entre les préleveurs. Cependant, elles sont supérieures à celles mesurées par le tube PVC, en particulier pour Coteaux aval (28% d'écart maximal), Clichy aval et Clichy centre (pour le 2ième préleveur).

MES (mg/l)	1er Préleveur		2ième Préleveur		Tube PVC		Pompe péristaltique	Système multi-profondeurs					
	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test1	Prof1		Prof2		Prof3	
								Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2
Marais	127	-	151	-	**	-	-	133	-	126	-	134	-
Sébastopol	144	-	143	-	**	-	-	118	-	122	-	137	-
Quais	282	*	281	204	294	203	-	-	217	-	210	-	212
Clichy centre	227	268	244	266	224	206	221	-	252	-	222	-	211
Coteaux aval	374	337	372	*	296	232	274	-	235	-	220	**	
Clichy aval	232	227	245	290	211	204	222	-		-		-	
-pas de test réalisé ; *pas de prélèvement; **hauteur d'eau insuffisante													

Tableau 20 : concentrations moyennes initiales des MES des différents systèmes de prélèvement

MVS (mg/l)	1er Préleveur		2ième Préleveur		Tube PVC		Pompe péristaltique	Système multi-profondeurs					
	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test1	Prof1		Prof2		Prof3	
								Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2
Marais	96	-	113	-	**	-	-	98	-	99	-	108	-
Sébastopol	119	-	119	-	**	-	-	98	-	100	-	117	-
Quais	220	*	218	178	224	203	-	-	184	-	177	-	180
Clichy centre	189		200	210	190	164	185	-	200	-	180	-	168
Coteaux aval	283		293	*	241	189	223	-	198	-	187	**	
Clichy aval	194		199	239	174	166	186	-		-		-	
-pas de test réalisé ; *pas de prélèvement; **hauteur d'eau insuffisante													

Tableau 21 **:** concentrations moyennes initiales des MVS des différents systèmes de prélèvement

DCO (mg/l) (Test 2)	1er Préleveur	2ième Préleveur	Tube PVC	Système multi-profondeurs		
				Prof1	Prof2	Prof3
Marais	218	239	**	265	223	225
Sébastopol	296	269	**	299	241	241
Quais	465	463	457	407	413	448
Clichy centre	378	423	359	430	355	376
Coteaux aval	532	*	416	432	400	*
Clichy aval	414	431	332	-	-	-
-pas de test réalisé ; *pas de prélèvement; **hauteur d'eau insuffisante						

Tableau 22 : concentrations moyennes initiales de DCO des différents systèmes de prélèvement

Les courbes de vitesses de chute des particules en suspension sont présentées dans la Figure 22 et la Figure 23. Celles en MVS sont similaires. Ces résultats montrent :

- une importante différence entre les deux préleveurs automatiques au site du Marais. Cette dernière concorde avec une différence entre les deux profondeurs 10 et 25 cm du système multi-profondeur;
- les particules des préleveurs automatiques des deux sites Sébastopol et Quais décantent avec des vitesses de chute comparables à celles prélevées par le système multi-profondeurs et le tube PVC;
- les vitesses de chute des particules du test 1, prélevées par les différents systèmes de prélèvement sur les sites aval sont généralement relativement comparables. En revanche, celles mesurées au cours du test 2 sur les sites Clichy centre et Coteaux aval laissent supposer qu'il y a contamination.

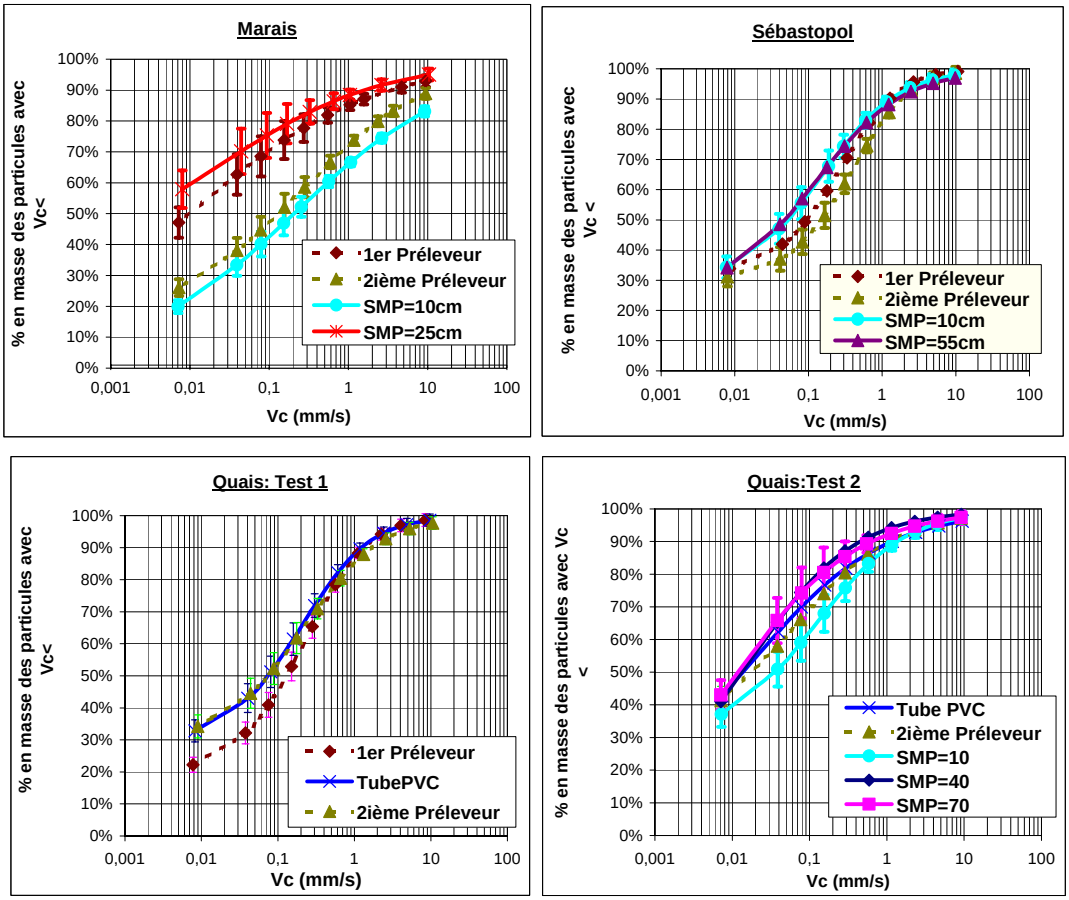


Figure 22: vitesses de chute des MES des tests de représentativité des prélèvements, sur les sites amont "Marais, Sébastopol et Quais"

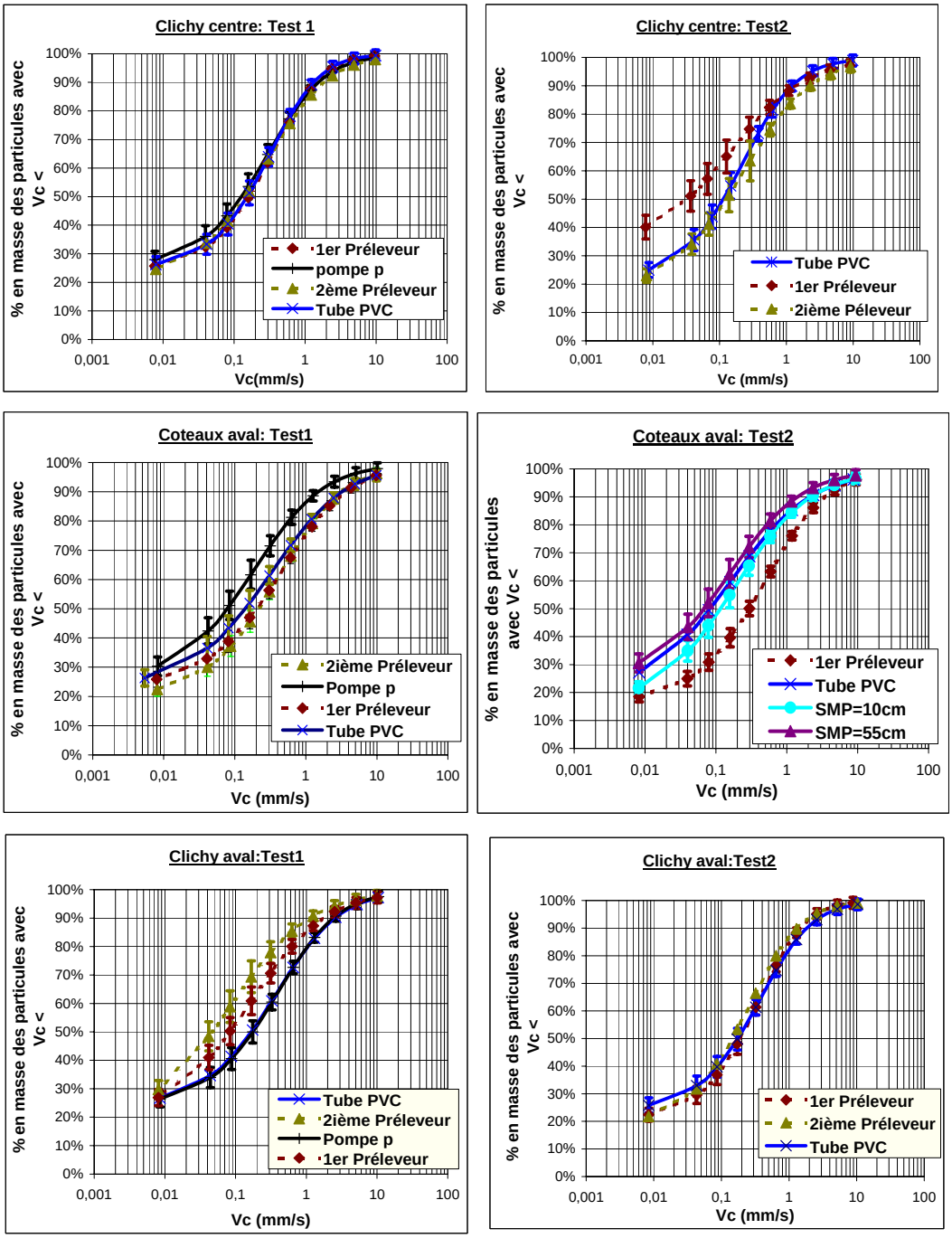


Figure 23: vitesses de chute des MES des tests de représentativité des prélèvements, sur les sites amont "Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval"

A l'issue de ces résultats, nous n'avons pas observé de sous-estimation des concentrations dans les échantillons des préleveurs, ni de sous-estimation systématique des vitesses de chute ce qui nous permet de conclure à l'absence de problème de ségrégation au niveau de la prise d'eau ou de sédimentation au cours du transport dans le tuyau de prélèvement. En revanche, une contamination par encrassement des tuyaux de prélèvement est suspectée pour certains tests.

3.1.2.2.2 Test de contamination

Aux phénomènes de ségrégation et de sédimentation qui conduisent à la modification des échantillons dans le système de transport, s'ajoute le phénomène de contamination.

Plusieurs sources de contamination des échantillons prélevés peuvent être distinguées :

- *Contamination par les dépôts au fond du collecteur et par le biofilm des parois :*

Les biofilms se forment sur les parois du collecteur et sont facilement arrachés lors des périodes pluvieux. En effet, la quantité de biofilm pouvant être arrachée pendant les pluies d'intensité faible à moyenne et de longue durée, est estimée à environ 30% du biofilm présent sur les parois (De Heer, 1992). Ce type de contamination a été éliminé dès le départ par un emplacement de la prise d'eau à une distance suffisante des parois et à peu près au milieu de la section de mesure ;

- *Contamination par érosion de biofilms et de certains dépôts formés dans le tuyau de prélèvement :*

Le biofilm se développe rapidement sur les surfaces intérieures des tuyaux de prélèvement lorsque les préleveurs automatiques ne sont pas en fonctionnement pendant une longue période. Et il peut se détacher lors des prélèvements et contaminer les échantillons. Pour les eaux usées, (De Heer, 1992) note que les dépôts augmentent linéairement jusqu'à un maximum de 1 à 2 g/cm² en 47 jours, et qu'au-delà de cette période, le détachement des plaques de biofilms compense la croissance des dépôts.

Cette contamination peut être évaluée en réalisant des blancs sur les préleveurs avant et après la campagne de mesure.

- *Contamination due aux matériaux du préleveur* :

Ce type de contamination peut se produire lors du contact de l'échantillon avec le tuyau, les flacons et le bouchon du flacon de prélèvement. Cette contamination concerne le plus souvent

les micropolluants mais peut être évitée en utilisant des matériaux appropriés selon le type d'analyse à effectuer. Pour cela il faut éviter d'utiliser des pièces métalliques pour prélever des échantillons destinés à des analyses de métaux (à cause des phénomènes de corrosion qui libèrent des métaux), et des pièces plastiques pour les analyses des hydrocarbures. Il convient également de nettoyer les parties du préleveur en contact avec l'effluent après chaque événement pluvieux échantillonné.

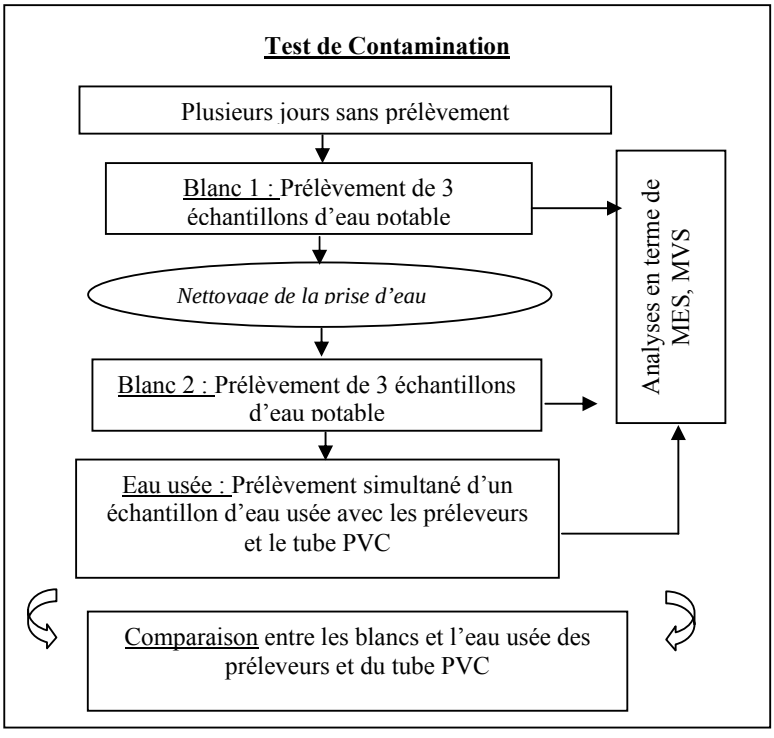
Ce type de contamination peut être évalué par des prélèvements de blanc lors de l'installation des échantillonneurs automatiques et pendant la campagne de mesure.

Les préleveurs utilisés pour cette étude comportent certes quelques pièces en verre (bol doseur) et en plastique (tuyau, flacons) mais, compte tenu de la durée de contact avec les échantillons qui est très courte, les biais peuvent être négligés (De Heer, 1992).

- *Contamination au contact de l'échantillon précédent :*

Ce type de contamination est limité du moment qu'une purge à l'air comprimé avant et après chaque prélèvement est réalisée par les préleveurs mis en place.

L'analyse des différents types de contamination pouvant affecter la représentativité des échantillons a permis de trouver les solutions possibles pour l'éviter. Afin d'évaluer expérimentalement la contamination par encrassement des tuyaux des prélèvements, un test de contamination a été réalisé. Ce dernier est synthétisé dans le schéma suivant :



La première étape de ce protocole qui consiste au prélèvement des blancs 1 après plusieurs jours de non fonctionnement des préleveurs est destinée à la confirmation de l'encrassement des tuyaux des prélèvements. La seconde étape (prélèvement des blancs 2) sert à nettoyer les tuyaux, alors que la dernière étape, (prélèvements d'eau usée et comparaison avec le système de référence tube PVC) permet de voir l'efficacité du nettoyage par les prélèvements d'eau propre.

Ce test a été réalisé sur les sites de Clichy centre et Coteaux aval. Notons que la dernière étape de ce protocole n'a pas été réalisée sur Clichy centre. Les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau 23 et le Tableau 24 .

Coteaux aval	Blanc 1		Blanc 2		Effluent de temps sec		
	1ier Pré	2ième Pré	1ier Pré	2ième Pré	1ier Pré	2ième Pré	Tube PVC
MES (mg/l)	910	592	300	61	259	266	241
MVS (mg/l)	527	350	245	48	217	225	197
%MVS/MES	58	59	82	79	84	85	82

Tableau 23 : Concentrations en MES, MVS et %MVS/MES des prélèvements d'eau potable et d'eau usée à Coteaux aval

Clichy centre	Blanc 1		Blanc 2	
	1ier Pré	2ième Pré	1ier Pré	2ième Pré
MES (mg/l)	300	658	66	83
MVS (mg/l)	227	424	56	71
%MVS/MES	76	64	85	86

Tableau 24 : Concentrations en MES, MVS et %MVS/MES des prélèvements d'eau potable et d'eau usée à Coteaux aval

Les très fortes concentrations des premiers blancs (jusqu'à 900 mg/l pour les MES et 700 m/l pour les MVS) qui succèdent à une période de plusieurs semaines de non-fonctionnement des préleveurs confirment qu'une contamination importante des échantillons s'est produite. L'aspect des échantillons prélevés (eaux troubles mélangées à des plaques de dépôt) montre qu'il s'agit d'une érosion du biofilm formé dans le tuyau.

Une nette diminution des concentrations des blancs 2 est observée, bien que ces blancs restent nettement contaminés (60 à 80 mg/l de MES, et même 300 mg/l de MES pour le préleveur 1 du site de Coteaux aval qui était plus encrassé au départ).

La comparaison entre les concentrations des eaux usées des préleveurs et celles du tube PVC après une série de 6 prélèvements d'eau potable montre des valeurs comparables, indiquant qu'il n'y a plus de contamination notable et que les prélèvements d'eaux propres permettent le nettoyage des tuyaux de prélèvements.

De ce fait, nous allons éviter cette contamination, d'une part en nettoyant et en mettant hors d'eau les tuyaux des prélèvements avant chaque période de non-fonctionnement; et en réalisant des prélèvements d'eau propre avant le début de chaque campagne de mesure d'autre part.

Un test similaire à celui-ci a été réalisé par Gromaire (1998) sur les eaux usées du Marais. La différence entre les deux tests consiste à réaliser une série de prélèvements alternés entre l'eau distillée et l'eau usée afin d'évaluer une éventuelle contamination liée au contact entre prélèvements successifs, notamment une vidange incomplète du tuyau. Les principaux résultats montrent que la contamination des MES et des matières oxydables par formation de dépôt ou croissance de biofilms dans les tuyaux de prélèvements était négligeable sauf pour les échantillons très peu chargés : effluents nocturnes de temps sec. Ce résultat est en partie contraire à celui trouvé dans le cadre de cette recherche. Ceci est probablement lié à la période de repos des préleveurs qui dans notre cas était assez importante (de l'ordre de plusieurs semaines), alors qu'elle était de l'ordre de 8 jours sur le Marais en 1998.

Une légère contamination par contact avec l'échantillon précédent a été détectée (Gromaire, 1998), cependant elle est sans conséquence sur les concentrations des échantillons moyens. Par ailleurs, en ce qui concerne les métaux lourds, la contamination due à l'encrassement des tuyaux ou aux matériaux du préleveur est négligeable sauf pour le plomb où la contamination serait équivalente à la concentration des effluents nocturnes de temps sec.

3.1.2.3 Modification des échantillons entre le prélèvement et l'analyse

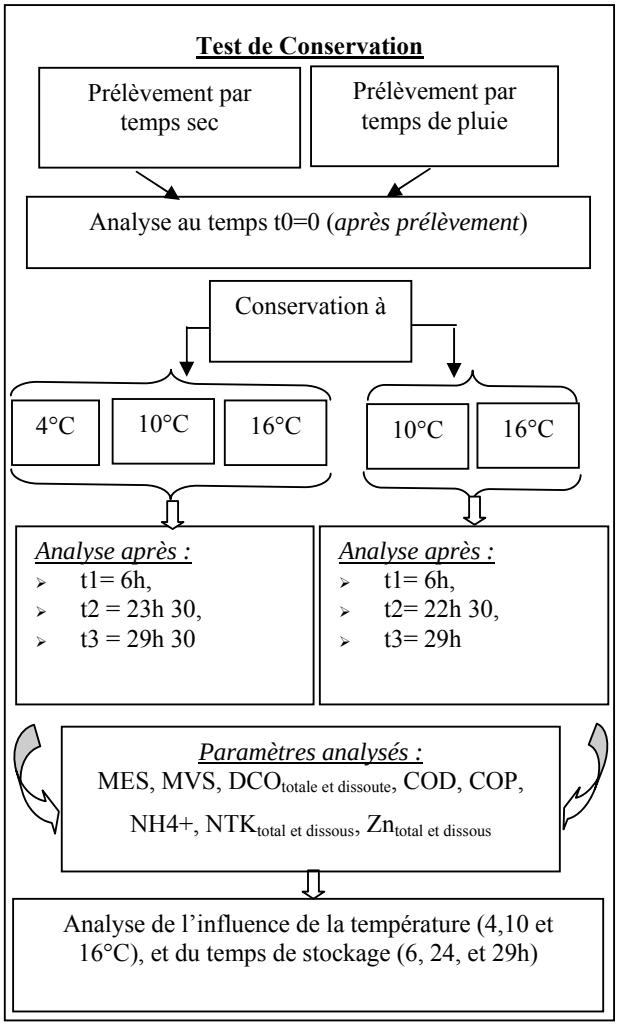
La durée et la méthode de conservation des échantillons prélevés dans le réseau d'assainissement peuvent influencer les résultats des analyses (De Heer, 1992). Dans le but de déterminer l'influence de la température et de la durée de stockage, des tests de conservation ont été réalisés sur des échantillons d'effluents de temps sec et de temps de pluie de la zone OPUR. Les températures testées sont 4° (correspond à la température de la réfrigération des préleveurs fixes), 10° et 16°C. Le choix de ces valeurs a été déterminé après analyses d'une

série d'enregistrements en continu des températures dans les collecteurs des sites de l'OPUR (la température varie généralement entre 10 et 16° en hiver et augmente de quelques degrés en été selon la profondeur à laquelle se trouve les préleveurs).

Rappelons que les durées typiques avant l'analyse par temps sec et par temps de pluie sont :

- temps sec : 28h pour le 1er flacon prélevé, et 4h pour le dernier ;
- temps de pluie : elle varie selon l'événement pluvieux et les site de mesure, entre 6h et 24h.

Le schéma suivant résume les principales étapes de ce protocole.



Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 25, le Tableau 26, et le Tableau 27, et la Figure 24.

Après 6h	**Effluent de temps sec**				**Effluent de temps de pluie**		
	$C_{initiale}$	*4°C*	*10°C*	*16°C*	$C_{initiale}$	*10°C*	*16°C*
MES(mg/l)	180	177 (-1%)	180 (0%)	176 (-2%)	136	134 (-1%)	136 (0%)
MVS(mg/l)	158	155 (-2%)	155 (-1%)	151 (-4%)	104	107 (4%)	105 (1%)
DCOt(mg/l)	292	311 (7%)	306 (5%)	310 (6%)	236	225 (-5%)	224 (-5%)
DCOd(mg/l)	93	90 (-4%)	87 (-6%)	85 (-8%)	70	72 (2%)	71 (1%)
%DCOp/DCOt	68	71	71	72	70	68	69
COT(mg/l)	115	113 (-2%)	111 (-3%)	112 (-3%)	74	75 (2%)	79 (7%)
NTKt(mg/l)	34.9	34.5(-1%)	34.2(-2%)	34.6(-1%)	13.3	13.2 (-1%)	13.3 (0%)
NTKd(mg/l)	29	28.5(-2%)	27.6(-5%)	28.6(-2%)	10.1	10 (-1%)	9.9 (-2%)
%NTKp/NTKt	17	17	19	17	24	25	26
Znt(µg/l)	615	650 (6%)	660 (7%)	670 (9%)	980	990 (1%)	1115 (14%)
Znd(µg/l)	110	118 (7%)	125 (14%)	121 (10%)	470	410 (-13%)	410 (-13%)
%Znp/Znt	82	80	81	82	52	59	63
x (x%) : concentration moyenne sur 2 à 5 répliquas selon le paramètre (écart = (Cmoy-Cinit)/Cinit)							

Tableau 25 : influence de la température et de la durée de conservation sur les échantillons d'eau usée

Après 24h	**Effluent de temps sec**				**Effluent de temps de pluie**		
	$C_{initiale}$	*4°C*	*10°C*	*16°C*	$C_{initiale}$	*10°C*	*16°C*
MES(mg/l)	180	188 (5%)	188 (5%)	189 (5%)	136	140 (3%)	147 (8%)
MVS(mg/l)	158	167 (6%)	162 (3%)	162 (3%)	104	114 (10%)	120 (16%)
DCOt(mg/l)	292	317 (9%)	290 (-1%)	291 (0%)	236	232 (-1%)	226 (-4%)
DCOd(mg/l)	93	86 (-7%)	60 (-35%)	64 (-31%)	70	52 (-26%)	50 (-29%)
%DCOp	68	73	79	78	70	78	78
COT(mg/l)	115	107 (-7%)	108 (-6%)	106 (-8%)	74	69 (-7%)	67 (-9%)
NTKt(mg/l)	34.9	34.5(-1%)	33.9 (-3%)	34.8 (0%)	13.3	13.3 (0%)	13.1 (-2%)
NTKd(mg/l)	29	28.4(-2%)	26 (-11%)	26.2 (-10%)	10.1	8.8 (-13%)	8.4 (-17%)
%NTKp	17	18	23	25	24	34	36
Znt(µg/l)	615	655 (7%)	670 (9%)	645 (5%)	980	1130 (15%)	1140 (16%)
Znd(µg/l)	110	128 (17%)	115 (5%)	85 (-23%)	470	440 (-6%)	390 (-17%)
%Znp	82	80	83	87	52	61	66
x (x%) : concentration moyenne sur 2 à 5 répliquas selon le paramètre (écart = (Cmoy-Cinit)/Cinit)							

Tableau 26 : influence de la température et de la durée de conservation sur les échantillons d'eau usée

Après 29h	**Effluent de temps sec**				**Effluent de temps de pluie**		
	$C_{initiale}$	*4°C*	*10°C*	*16°C*	$C_{initiale}$	*10°C*	*16°C*
MES(mg/l)	180	184 (2%)	197 (9%)	189 (5%)	136	158 (16%)	166 (22%)
MVS(mg/l)	158	159 (1%)	175 (11%)	164 (4%)	104	119 (15%)	121 (17%)
DCOt(mg/l)	292	326 (12%)	275 (-6%)	275 (-6%)	236	227 (-4%)	218 (-8%)
DCOd(mg/l)	93	85 (-9%)	58 (-37%)	56 (-40%)	70	39 (-44%)	34 (-52%)
%DCOp	68	74	79	80	70	83	85
COT(mg/l)	115	112 (-3%)	101 (-12%)	101 (-12%)	74	72 (-3%)	76 (3%)
NTKt(mg/l)	35	34 (-1%)	33 (-7%)	32 (-8%)	13.3	13 (0%)	14 (3%)
NTKd(mg/l)	29	28 (-3%)	26 (-12%)	25 (-12%)	10.1	7.4 (-27%)	6.8 (-33%)
%NTKp	17	19	22	21	24	44	51
Znt(µg/l)	615	675 (10%)	680 (11%)	720 (17%)	980	1130 (3%)	1140 (5%)
Znd(µg/l)	110	130 (19%)	113 (3%)	75 (-31%)	470	440 (-6%)	380 (-19%)
%Znp	82	81	83	90	52	60	66
x (x%) : concentration moyenne sur 2 à 5 répliquas selon le paramètre (écart = (Cmoy-Cinit)/Cinit)							

Tableau 27 : influence de la température et de la durée de conservation sur les échantillons d'eau usée

Les principales conclusions à retenir sont :

- pas de modification significative des échantillons après une courte durée de conservation (6h) ;
- une tendance après environ une journée de conservation à l'augmentation des concentrations totales des MES, MVS et du Zn et à la diminution de celles de la DCO, du COT et du NTK ;
- les concentrations totales des paramètres polluants varient généralement peu jusqu'à 29 heures de conservation quelque soit la température de stockage. Les évolutions les plus importantes sont mesurées pour les MES et MVS des effluents de temps de pluie stockés à 10°C ou 16°C: augmentation de la concentration 16-22% pour les MES et de 15-17% pour les MVS, ce qui est supérieur à l'incertitude d'analyse ;
- les concentrations des paramètres dissous (DCOd, NTKd, et Znd) sont fortement influencées par la température et la durée de conservation. Les concentrations dissoutes diminuent progressivement avec l'augmentation de la durée et des températures de stockage. L'écart par rapport à la concentration initiale de DCOd varie après 24h de conservation, de –7% à –35% pour des températures allant de 4°C à 16°C.
- la distribution Dissous/Particulaire est elle aussi sensible à la température et la durée de stockage (en particulier pour l'azote kjeldahl des effluents, tant par temps sec que par temps de pluie). La proportion de particulaire a tendance à augmenter avec la durée et la

température de conservation. Cette augmentation représente après 29h de conservation entre +9% et +21% pour la DCO, entre –1% et +27% pour le zinc alors qu'elle varie entre –12% et +100% pour le NTK. A l'exception de l'azote kjeldahl, l'évolution de la distribution Dissous/Particulaire ne semble pas affecter beaucoup les résultats. Les analyses en terme de distribution dissous-particulaire de NTK doivent être pris avec précaution lors des interprétations;

- les concentrations en NH_4^+ sont très sensibles à la durée et à la température de conservation. L'évolution du NH_4^+ est très rapide, même à 4°C (16-20% d'écarts ont été mesurés après 6 h de conservation et plus de 100% après une journée, pour des températures variants entre 10 et 16°C ; notons que ces écarts peuvent atteindre les 180%). Ce résultat est attribuable à l'ammonification de l'azote organique (notamment l'urée contenue dans les eaux usées) dans les heures qui suivent le prélèvement.

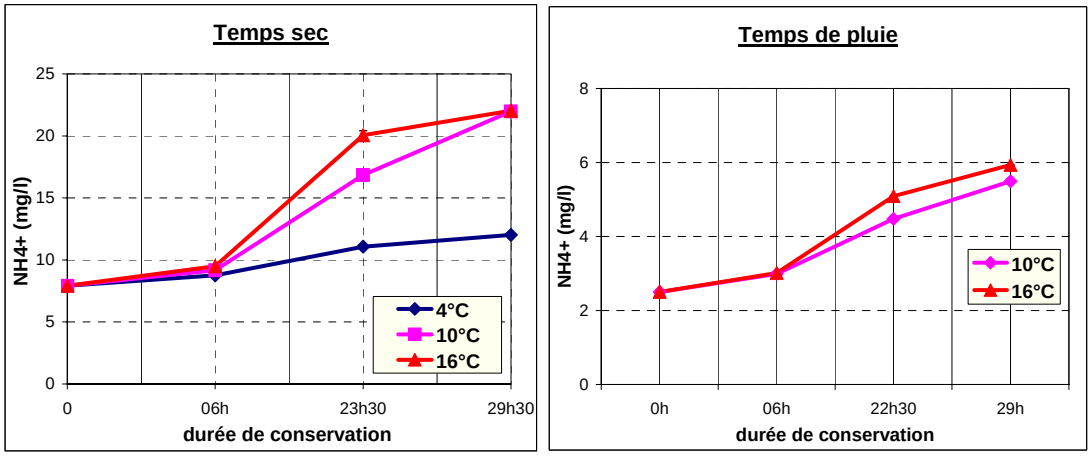


Figure 24 : Influence de la température et de la durée de stockage sur concentrations de l'ammonium

Les résultats sur les concentrations totales de la DCO sont comparables avec ceux obtenus par De Heer (1992) où les valeurs de DCOt varient très peu après 24h de conservation jusqu'à des températures de 20°C. Les écarts calculés sur les MES et l'azote kjeldahl sont inférieurs à ceux estimés par Ranchet (1980) et Grange (1983) [±30% sur les MES et -17% à 0% sur le NTK après une journée de conservation à 4°C].

En ce qui concerne la DBO_5, De Heer (1992) trouve que le stockage de 24 h ou plus des échantillons destinés à cette analyse provoque de fortes déviations ; et qu'après 24h de conservation, il n'y a pas de différence entre un stockage à 3 et à 20°C.

Pour les échantillons destinés à la mesure des vitesses de chute, une conservation à température ambiante de 20°C influe fortement sur les courbes de vitesses de chute selon Jaumouillié (2002), en particulier sur les particules les plus fines qui tendent à floculer facilement et deviennent ainsi plus lourdes et décantent plus vite.
Jaumouillié (2002) calcule un écart maximal de 25% sur le pourcentage de particules ayant une vitesse de chute inférieure à 0.02mm/s après 2 jours de conservation et montre que cet écart passe à 75% après 4 jours de conservation pour les mêmes vitesses de chute. En revanche, cette erreur devient très faible quand les échantillons sont conservés à 4°C.

Compte tenu de ces résultats, nous avons décidé de ne pas effectuer d'analyses d'ammonium. Par ailleurs, les échantillons destinés aux autres types d'analyse doivent être analysés le plus rapidement possible après leur arrivée au laboratoire : le jour même.

3.2 Représentativité de l'échantillon moyen

Les concentrations moyennes des échantillons moyens de temps de pluie peuvent être biaisées suite à une perte d'information due à la détermination du début et de la fin de l'événement pluvieux. En effet, le déclenchement et l'arrêt des prélèvements sur seuil de hauteur d'eau peuvent induire une perte d'information :

- en début de l'événement pluvieux, liée à la durée entre le moment de dépassement du seuil et le début de l'événement ;
- en fin d'événement pluvieux, liée à la durée entre le moment du passage sous le seuil et la fin de l'événement.

Une évaluation de cette perte en début et fin de la pluie a été réalisée en terme de volume écoulé sur chaque site de mesure et pour l'ensemble des événements pluvieux étudiés (Tableau 28).

	Durée évènement	V écoulé avant dépassement du seuil (%)	V écoulé après le dernier prélèvement (%)
Marais	01:37-12:19,(4:10)	2-26,(9)	4-29,(12)
Sébastopol	02:12-2:55,(02:30)	1-4,(2)	2-41,(26)
Quais	03:02-10:42,(05:29)	0-1,(1)	0-18,(11)
Clichy centre	02:42-11:36,(06:38)	0-6,(3)	3-31,(16)
Coteaux aval	02:00-11:30,(04:56)	0-22,(4)	1-31,(15)
Clichy aval	06:10-10:55,(08:03)	0-44,(16)	4-34,(15)
x-y: minimum-maximum, (moyenne) sur l'ensemble des évènements pluvieux			

Tableau 28 : volumes (en % du volume total de l'événement pluvieux) non échantillonnés en début et fin de l'événement pluvieux, sur l'ensemble des sites de l'OPUR

Le volume écoulé avant le dépassement du seuil est faible aux sites de mesure Sébastopol, Quais et Clichy centre, et ne dépasse pas 8%, au maximum. Par ailleurs, ce volume reste souvent faible (ne dépasse pas les 10% par rapport au volume total écoulé) aux sites Marais, Coteaux aval et Clichy aval, sauf pour 1 à 2 évènements pluvieux.

Le volume écoulé entre le dernier prélèvement et la fin de l'événement pluvieux est cependant plus important et cela sur l'ensemble des sites de mesure et pour un nombre non négligeable d'évènements pluvieux, à cause de la lente décroissance des débits en fin de pluie. Il représente pour les cas extrêmes jusqu'à 30 à 40% du volume total écoulé durant l'événement pluvieux.

Pour les évènements pluvieux où la perte d'information en début et en fin d'événement pluvieux est importante une surestimation ou sous-estimation des concentrations mesurées peut se produire. Ces évènements pluvieux devront être traités avec précaution, notamment lors de calcul des bilans de masses (partie 4).

Chapitre 4 : Méthodes analytiques et incertitudes associées

4.1 Protocoles d'analyses et paramètres analysés

Pour la quantification des flux polluants les paramètres suivants sont analysés :

- Matières en suspension : MES et MVS ;
- Matières oxydables : Demande chimique en oxygène (DCO), demande biochimique en oxygène (DBO_5), et carbone organique (CO) ;
- Métaux lourds : Cadmium (Cd), Cuivre (Cu), Plomb (Pb), et Zinc (Zn) ;
- Matières azotées : azote Kjeldahl (NTK).

Ces paramètres sont les plus caractéristiques des effluents de temps sec et de temps de pluie des réseaux d'assainissement unitaires.

De plus, pour la caractérisation de ces flux polluants, les paramètres suivants sont étudiés :

- Distribution entre phase dissoute et particulaire ;
- Nature des particules. Pour cela, on étudie :
    - Les teneurs en polluants des particules.
    - Les vitesses de chute des particules en suspension ;
    - La distribution des polluants par classes de vitesse de chute ;

Cette caractérisation fournit des éléments intéressants pour la conception et le dimensionnement des ouvrages de traitements des eaux urbaines, et pour l'élaboration des modèles de calcul des flux polluants. Elle facilite la compréhension des processus se produisant dans les réseaux unitaires.

Pour compléter la quantification et la caractérisation des flux polluants, des paramètres explicatifs sont aussi analysés, tels que :

- Conductivité : elle est considérée comme un traceur des eaux pluviales, elle servira pour l'évaluation de la proportion d'eau usée dans les effluents unitaires ;
- pH : ce paramètre semble important pour comprendre les réactions chimiques et pour la distribution entre les phases dissoutes et particulaires ;
- Turbidité : elle permet de comprendre la distribution temporelle des polluants.

La procédure analytique suivie pour chaque paramètre polluant est la suivante (le détail des différents protocoles se trouve en ANNEXE 3) :

Paramètre polluant	Protocole d'analyse : norme
MES, MVS	AFNOR NF T90-105 et NF T90-029 et : • Pour les MES : Filtration sur filtre en fibre de verre GFF Whatmann, séchage à 105°C ; • Pour les MVS : et Calcination à 525°C des filtres ayant servis à la détermination des MES
DBO_5	AFNOR (NF, T90-103) + dosage électrochimique de l'oxygène dissous à t=0 et après 5 jours d'incubation à 20°C
DCO	Micro méthode (méthode HACH)
NTK	AFNORD (NF EN 25663 ISO 5663)
COD	Mesure du dioxyde de carbone libéré après oxydation chimique du carbone organique par spectrométrie IR
COP	Calcination à 1000°C du filtre ayant servis à la détermination des MES, et mesure par spectrométrie IR, après l'avoir débarrassé de son carbone inorganique par acidification
Métaux lourds	Spectrométrie ICP-AES ou ICP-MS, mais avant il y a minéralisation : ▪ 2003-2004: par mélange nitrique –perchlorique et chauffage sur banc de sable; ▪ à partir de 2005: utilisation d'une eau régale, mélange nitrique –chlorhydrique et chauffage en bombe micro-onde fermé.
Vitesses de chute	Protocole VICAS, Protocole VICPOL (Gromaire et al, 2003), basé sur le principe de la suspension homogène

Notons que les analyses en métaux lourds et en NTK ont été sous-traitées dans deux laboratoires :

- 2003-2004 : dans le laboratoire SGS-Multilab;
- à partir de 2005 : dans le laboratoire IEEB (Institut Européen de l'Environnement de Bordeaux).

Le protocole d'analyse des métaux totaux et dissous appliqué aux échantillons OPUR entre 2003-2004 découle de la norme NF EN ISO 11885 et/ou FD T90-112 mais avec des modifications faites à notre demande selon le protocole de minéralisation développé par (Garnaud, 1999). Le protocole utilisé à partir de 2005 par IEEB suit complètement la norme. Ainsi, la différence qui existe entre les protocoles d'analyse des deux laboratoires se trouve au niveau de la minéralisation : la minéralisation des échantillons totaux se fait par digestion acide à chaud de l'échantillon brut en 2003-2004 et les acides utilisés correspondent à un mélange d'acides nitriques, perchloriques, alors qu'elle se fait par digestion dans un four à

micro-ondes à partir de 2005, et les acides utilisés correspond à une eau régale. De ce fait, nous avons voulu voir l'effet de cette différence sur les concentrations en métaux lourds.

Une comparaison entre les résultats SGS et ceux obtenus au laboratoire du CEREVE à Créteil pour les mêmes échantillons a été réalisée, car ce dernier laboratoire applique la même méthode de minéralisation que le laboratoire IEEB (digestion par four à micro-ondes).

Cette comparaison a été faite sur des échantillons moyens et des pollutogrammes à différentes tranches horaires, de temps sec et de temps de pluie (Tableau 29 et Figure 25).

Pluie du 07/07/04-B	Marais		Clichy centre		Coteaux aval		Clichy aval	
µg/l	SGS	CEREVE	SGS	CEREVE	SGS	CEREVE	SGS	CEREVE
Cdt	1.80	1.39	1.00	1.43	2.4	1.7	1.5	1.82
Cut	300	244	80	152	210	194	210	229
Pbt	506	418	294	253	340	285	289	378
Znt	2530	1951	1600	1251	2180	1619	1850	1770

Tableau 29 : comparaison des concentrations en métaux lourds totaux (moyen temps de pluie)

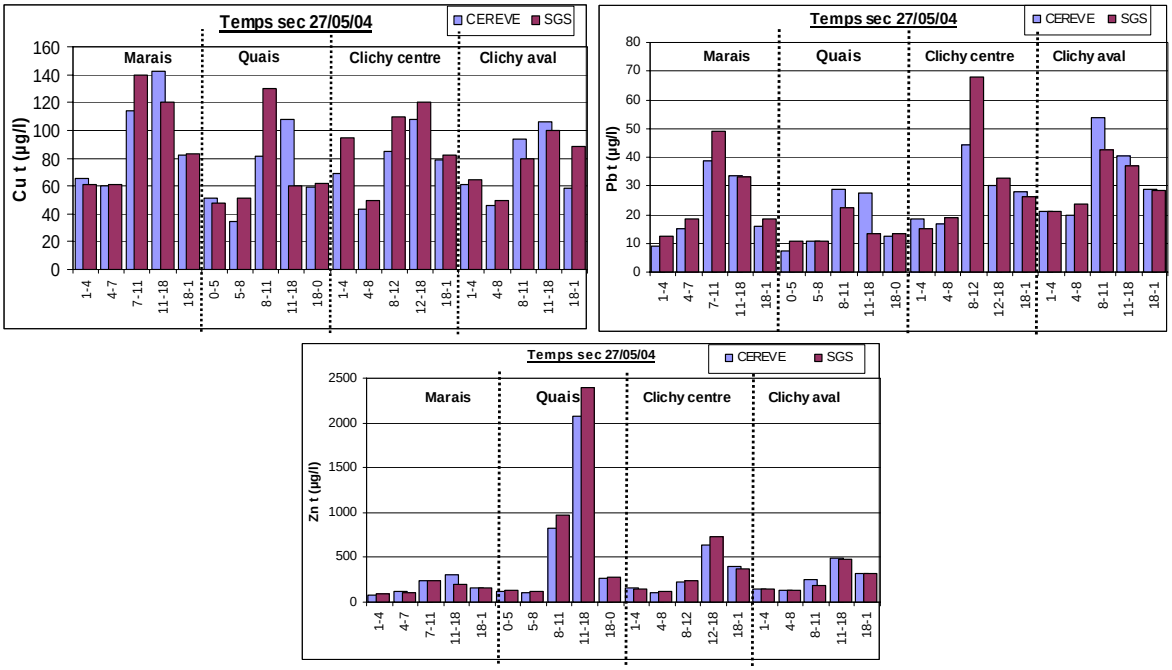


Figure 25 : comparaison des concentrations en métaux lourds totaux (pollutogrammes temps sec)

Mis à part quelques valeurs ponctuelles, les concentrations en métaux lourds sont généralement comparables. Les concentrations de métaux totaux sont globalement du même

ordre de grandeur tant par temps sec que par temps de pluie. Ce résultat montre que le protocole de minéralisation ne semble pas avoir une influence sur les valeurs des concentrations.

4.1.1 Protocole d'analyse des vitesses de chute

Deux protocoles sont utilisés pour la détermination des vitesses de chute des particules : protocole VICAS et protocole VICPOL, (Gromaire et al, 2003). Tous les deux fonctionnent sur le principe de la suspension homogène.

- VICAS (Gromaire et al, 2003) : ce protocole (Figure 26) consiste à déterminer la masse *M(t)* des particules décantées au fond d'une colonne entre *0* et *t* (0,1min, 2min, 4min, ……24h). Au temps initial, les particules sont réparties uniformément sur toute la hauteur de sédimentation et sont supposées décanter de manière indépendante les unes des autres, sans former d'agrégats et sans diffusion. La courbe *M(t)* est déterminée selon la formule suivante développée par (Chebbo, 1992 ; Chancelier et al., 1998) :

$$M(t) = S(t) + t\frac{dM(t)}{dt}$$

avec

M(t) : masse cumulée de particules décantées au pied de la colonne entre t=0 et t,(valeur connue par la mesure)

S(t) : masse de particules décantées entre t=0 et t ayant une vitesse de chute supérieure à h/t, où h est la hauteur d'eau dans la colonne, (valeur recherchée)

tdM/dt : masse de particules décantées au temps t ayant une vitesse de chute inférieure à h/t.

Une fois que la courbe S(t) déterminée, elle est transformée en une courbe F(Vs) qui indique le pourcentage cumulé F de la masse totale de particules avec une vitesse de chute inférieure à Vs.

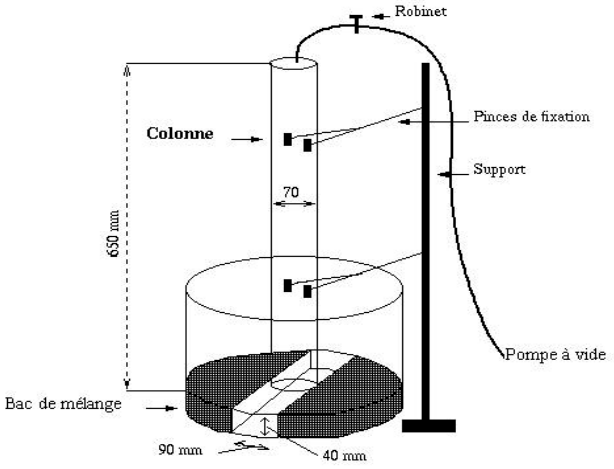


Figure 26: protocole VICAS

▪ VICPOL (Gromaire et al, 2003) : ce protocole (Figure 27) consiste à déterminer la concentration *C(ti)* des particules en suspension après un temps *ti* de décantation, à une hauteur fixe *h,* d'une ou plusieurs colonnes de sédimentation. Le pourcentage des particules ayant une vitesse de chute inférieure à *Vsi = h/ti* est alors déterminé par *F(Vsi) = 100*C(ti)/C0*.ou C_0 est la concentration au temps 0.

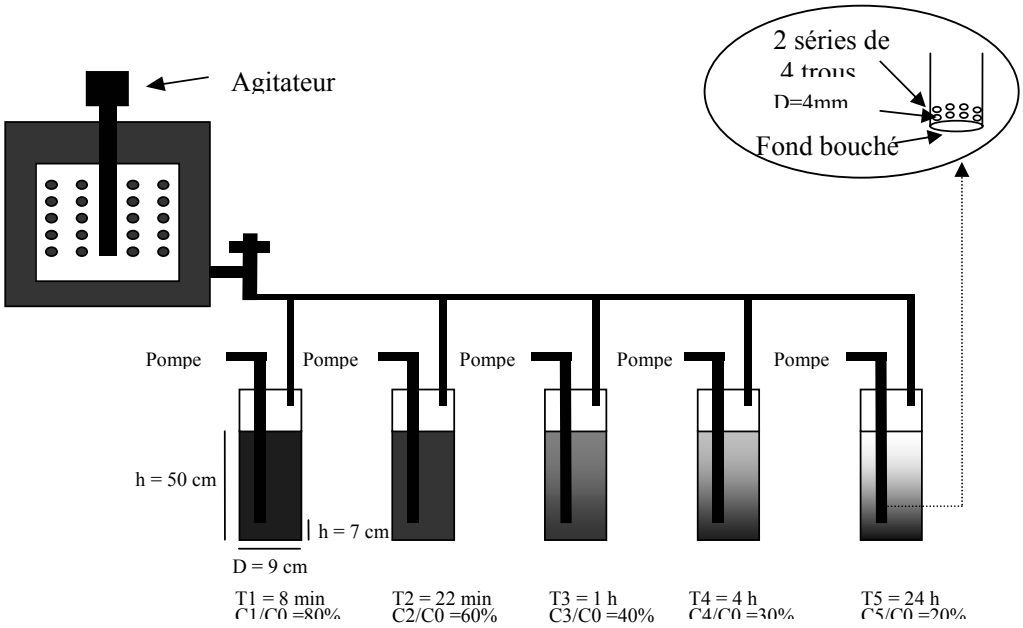
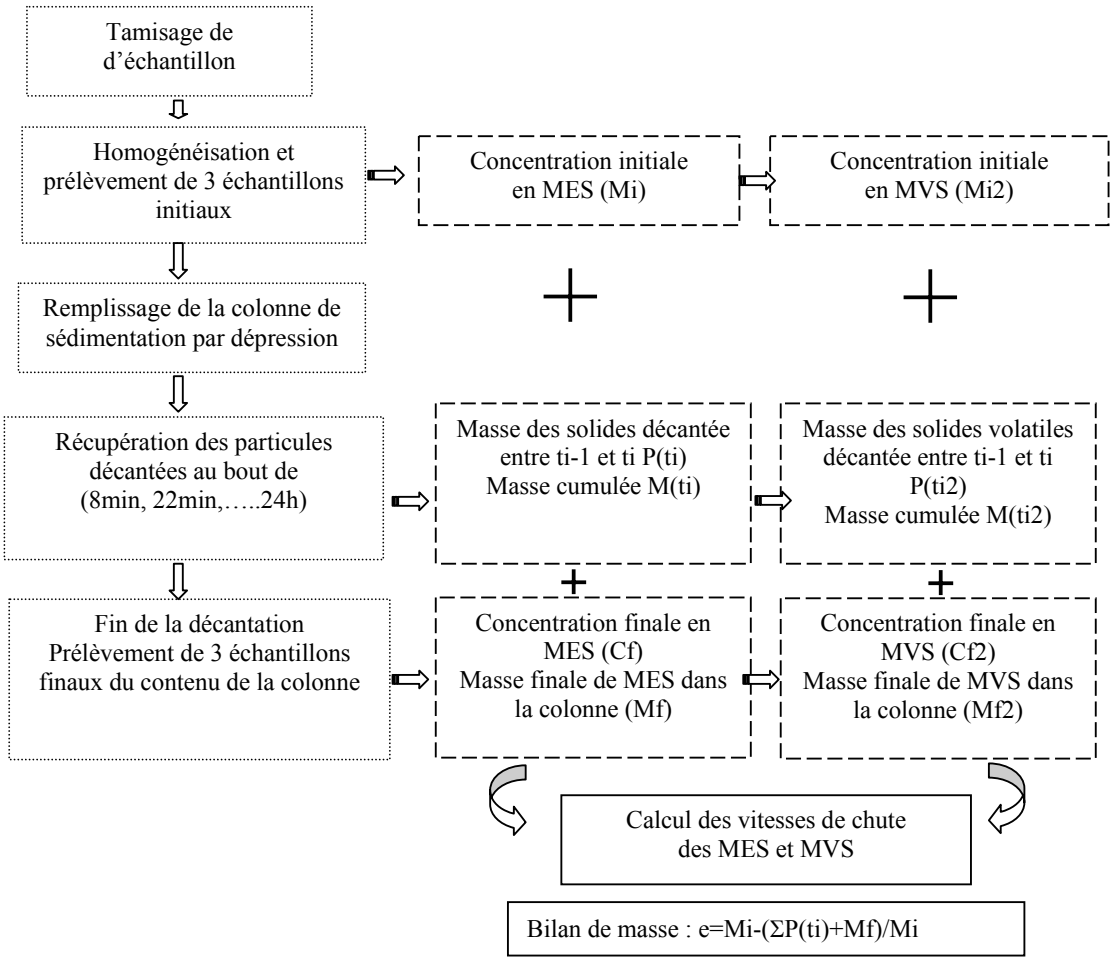


Figure 27: protocole VICPOL

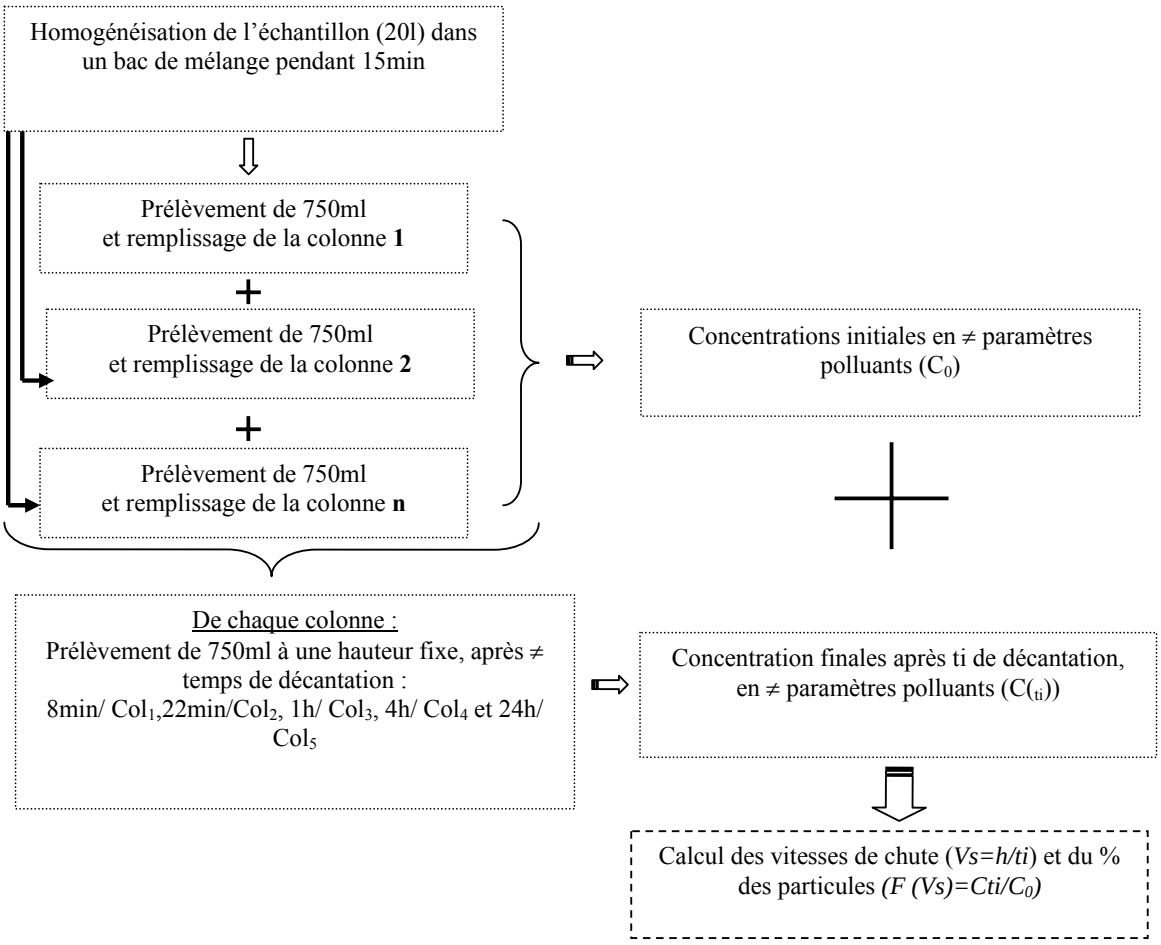
4.1.1.1 Protocole d'analyse VICAS

Les différentes étapes du protocole VICAS sont synthétisées dans le schéma suivant



4.1.1.2 Protocole d'analyse VICPOL

Les différentes étapes du protocole VICPOL sont synthétisées dans le schéma suivant :



Une comparaison entre les deux protocoles a été réalisée sur un échantillon d'effluent de temps de pluie, et elle ne fait pas apparaître de différence significative entre les distributions des vitesses de chute des MES (Gromaire et al, 2003).

4.2 Incertitudes d'analyses

Nous allons essayer dans cette partie d'évaluer les incertitudes d'analyses pour les principaux paramètres polluants mesurés dans le cadre de cette recherche.

Les incertitudes liées à l'analyse des échantillons sont souvent évaluées par des tests de répétabilité sur N répliquas. Le nombre de répliquas préconisé est d'au moins 10, et il est recommandé de réaliser deux répétitions (selon la norme expérimentale XP T 90-210, 1999).

Cependant, cette méthode ne peut être appliquée pour tous les paramètres polluants à cause de la lourdeur et du coût des analyses. De ce fait, nous proposons d'estimer les incertitudes à partir d'une série importante de dupliquas ou triplicas.

Considérons Ci1, Ci2 et Ci3 les concentrations des répliquas (dupliquas ou des triplicas) d'analyse d'un échantillon de concentration réelle Ci ; tels que

$$C_{i1} = C_i(1+\alpha_{i1}),\ C_{i2} = C_i(1+\alpha_{i2}), \text{ et } C_{i3} = C_i(1+\alpha_{i3})$$

Nous faisons l'hypothèse que les incertitudes d'analyse α sont tirées dans une loi normale, de moyenne nulle et d'écart type σ (hypothèse 1). Notre méthode consiste ensuite à caler l'écart type σ de cette loi normale à partir des données expérimentales Cij.

Soit « C_v » le coefficient de variation de nos répliquas d'analyse défini par :

$$C_v = \frac{ET}{Cm} \quad \textbf{Équation 1}$$

avec :

ET et Cm : respectivement l'écart type et la concentration moyenne entre les dupliquas et/ou triplicas des analyses ;

Alors l'équation 1 devient

$$C_v = \frac{EcartType(C_{i1}, C_{i2}, C_{i3})}{moyenne(C_{i1}, C_{i2}, C_{i3})} = \frac{EcartType[C_{i1}(1+\alpha_{i1}), C_{i2}(1+\alpha_{i2}), C_{i3}(1+\alpha_{i3})]}{[C_i(1+\alpha_{i1}) + C_i(1+\alpha_{i2}) + C_3(1+\alpha_{i3})]/3} \quad \textbf{Équation 2}$$

Afin de vérifier l'hypothèse 1 posée précédemment, nous avons établi, à partir de nos échantillons de répliquas, la distribution empirique des coefficients de variation C_v. Cette distribution a ensuite été comparée à la distribution théorique obtenue à partir de l'hypothèse 1 et de l'équation 2 : 1000 valeurs de concentrations Ci ont été tirées dans une loi uniforme couvrant la gamme des concentrations du paramètre étudié, et pour chaque Ci trois valeurs

α_{i1}, α_{i2}, et α_{i3} ont été tirées dans une loi normale N(0, σ) et le coefficient C_{vi} correspondant est calculé. Afin de caler au mieux les deux courbes plusieurs valeurs d'écarts type σ ont été testées variant entre 3 et 30%.

Cette méthode a été appliquée pour les paramètres polluants suivants : MES, DCO totale et dissoute, et les métaux lourds totaux (cuivre, plomb et zinc).

4.2.1 Incertitudes d'analyses des paramètres globaux

4.2.1.1 Incertitudes d'analyses des matières en suspension

Sur la base d'une série de 168 triplicas de MES, nous avons représenté la distribution empirique des coefficients de variation « C_v » en fonction des concentrations moyennes mesurées expérimentalement (Figure 28). Cette distribution montre qu'il n'y a pas de relation entre les concentrations Ci et le coefficient de variation Cv, et que dans la plupart des cas, le Cv est inférieure à 10%.

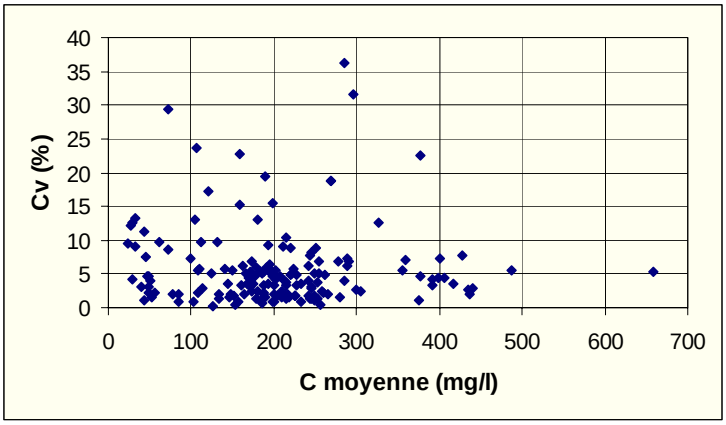


Figure 28 : distribution des incertitudes des matières en suspension

La Figure 29 représente les courbes des fréquences des coefficients de variation théoriques calculés en testant trois écarts types σ = 5, 10, et 15% et comparées à la courbe expérimentale.

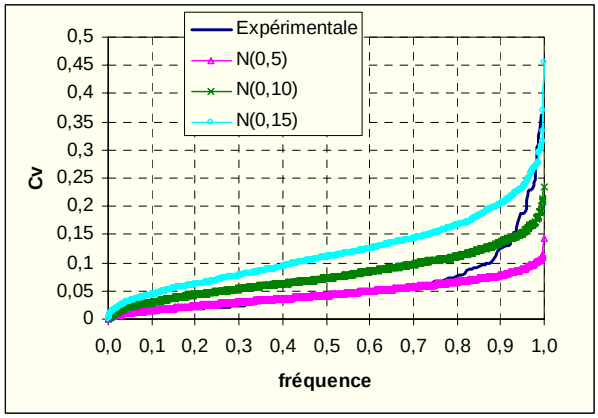


Figure 29 : courbes des fréquences des incertitudes sur les MES

Pour les fréquences ≤ 0.8, la distribution expérimentale correspond avec la distribution obtenue par un tirage d'erreurs α_i dans une loi normale N(0, σ=5%). En revanche, pour une fréquence > 0.8, le Cv empirique augmente nettement plus vite qu'il ne le devrait selon notre hypothèse 1. A l'analyse des données, ces Cv correspondent à des cas où l'un des triplicas parait significativement différent des deux autres.

Nous avons de ce fait sélectionné les triplicas pour lesquels Cv > 8%, et pour chacun de ces triplicas nous avons éliminé le répliquas qui présentait le plus grand écart par rapport aux deux autres. On obtient alors la distribution présentée en Figure 30.

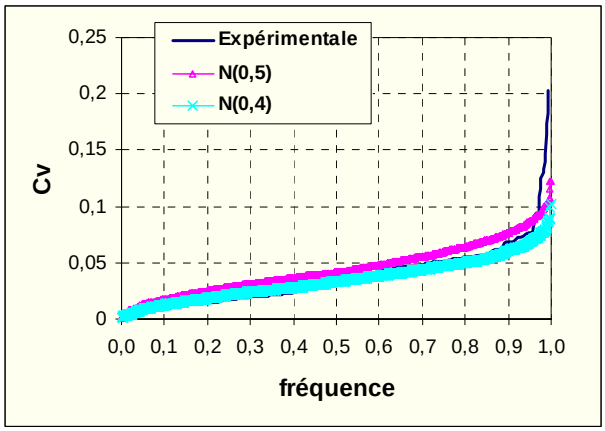


Figure 30 : courbes de distribution des incertitudes sur les MES dont le Cv>8%

Pour une fréquence ≤ 0.95, la distribution expérimentale correspond avec celle simulée à partir d'une erreur relative normale et d'écart type σ=4%. L'incertitude d'analyse au seuil de confiance de 95% correspond alors à E95 = ±2σ = ±8%. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle trouvée par Gromaire (1998) (±10%), au moyen de tests de répétabilité.

Par la suite, lors de la validation des données, le critère Cv ≥ 8% sera systématiquement utilisé pour détecter d'éventuelles erreurs analytiques et éliminer le répliqua présentant l'écart le plus important.

4.2.1.2 Incertitudes d'analyses de la DCO totale et dissoute

De même que pour les matières en suspension, la distribution des coefficients de variation a été établie à partir d'une série de 52 dupliquas pour la DCO totale et 47 dupliquas pour la DCO dissoute (Figure 31). Dans la plupart des cas, le Cv est inférieur à 10% mais atteint expérimentalement 35% pour la DCO totale et 48% pour la DCO dissoute.

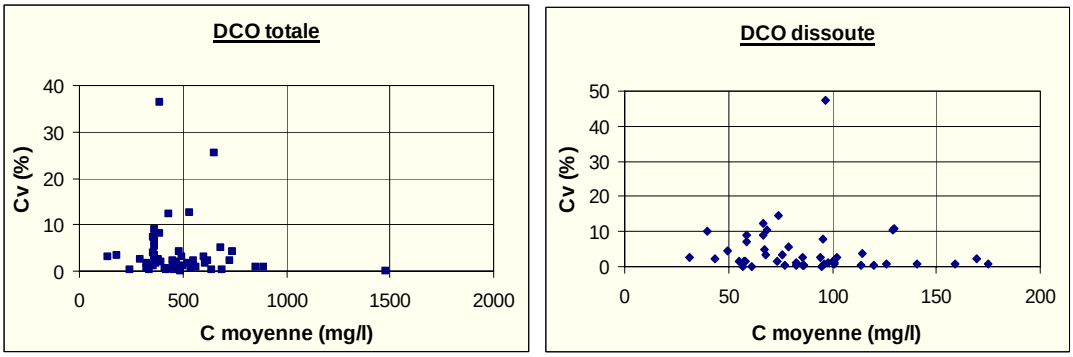


Figure 31 : distribution des incertitudes de la DCO totale et dissoute

Les distributions des fréquences des coefficients de variation expérimentaux et des coefficients de variation théoriques obtenues par tirages aléatoires d'erreurs dans des lois normales d'écart type σ = 3, 5, 10 et 15% sont représentées dans la Figure 32. On observe que la distribution empirique suit une distribution issue d'une loi normale d'écart type égale à 5 % jusqu'à des fréquences ≤ 0.85 pour la DCO totale. Cependant, pour la DCO dissoute, il apparaît que la courbe des distributions expérimentales coïncide avec la courbe de la loi normale d'écart type égale 3% pour des fréquences ≤ 0.7 et 7% pour des fréquences comprises entre 0.75 et 0.98.

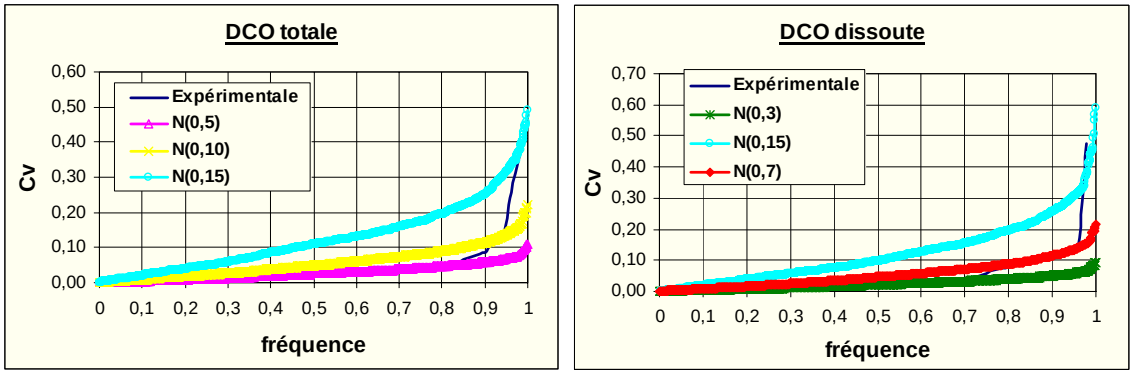


Figure 32 : courbes des fréquences des incertitudes sur la DCO totale et dissoute

L'incertitude d'analyse est donc estimée à ±10% pour la DCO totale. Elle varie par contre entre ±6% et ±14% pour la DCO dissoute.

L'incertitude sur la DCO totale est comparable à celle trouvée par Gromaire (1998), en revanche celle sur la DCO dissoute parait supérieure (≤ ±10%).

4.2.1.3 Incertitudes d'analyses des MVS et DBO5 (Gromaire, 1998)

L'incertitude d'analyse des matières volatiles en suspension et de la demande biochimique en oxygène a été évaluée par Gromaire (1998) à partir des tests de répétabilité. Trois séries de tests ont été réalisées pour les MVS et un seul pour la DBO_5. Les résultats obtenus donne une incertitude d'analyse inférieure ou égale à ±6%.

4.2.2 Incertitudes des métaux lourds

L'incertitude d'analyse des métaux lourds (Cu, Pb et Zn) a été évaluée selon la même méthode que les MES, à partir d'une série d'une cinquantaine de triplicas d'analyse. Notons qu'il s'agit uniquement des métaux totaux, la quantité de triplicas de mesure disponible pour les analyses des métaux dissous était insuffisante.

La distribution empirique des coefficients de variation Cv en fonction des concentrations moyennes mesurée expérimentalement pour les trois métaux est représentée dans la Figure 33.

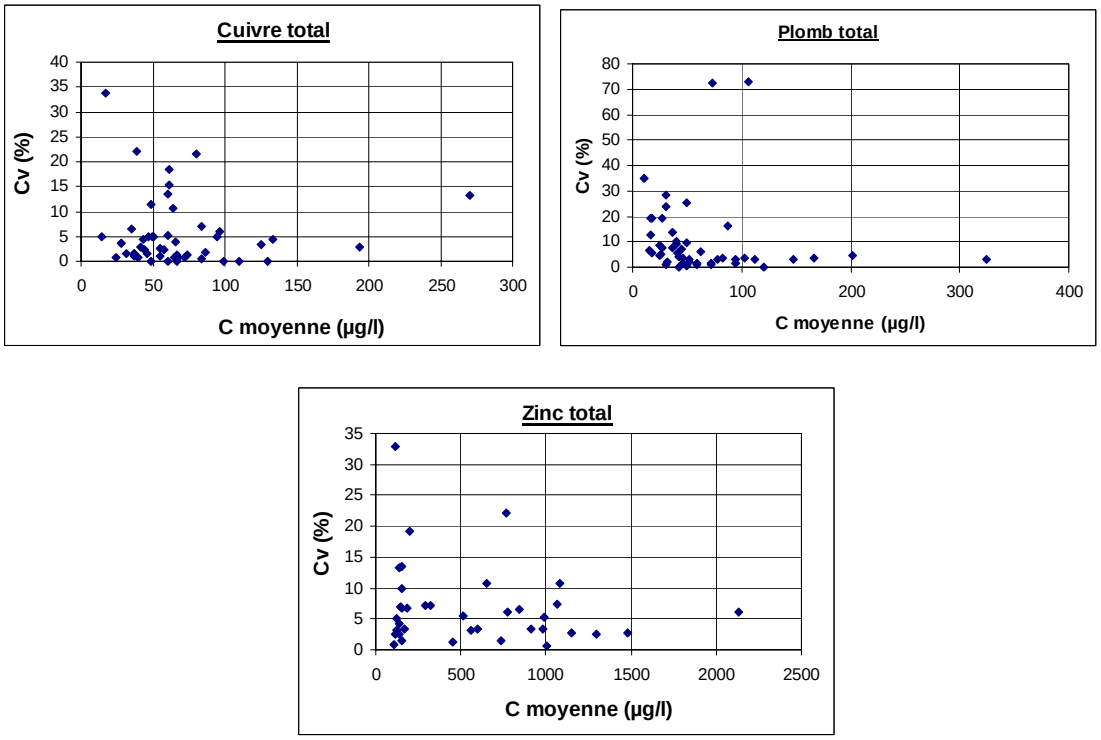


Figure 33 : distribution des incertitudes des métaux totaux "Cuivre, Plomb et Zinc"

Dans la plupart des cas, le coefficient de variation entre les triplicas est inférieur à 20% pour le Cut et Znt et inférieur à 30% pour le Pbt. Par ailleurs, on peut trouver parfois des échantillons avec des Cv très élevés.

La Figure 34 représente les courbes des fréquences des coefficients de variation théoriques calculés en testant plusieurs valeurs d'écarts types variant de 5 à 30% et comparées à la courbe expérimentale.

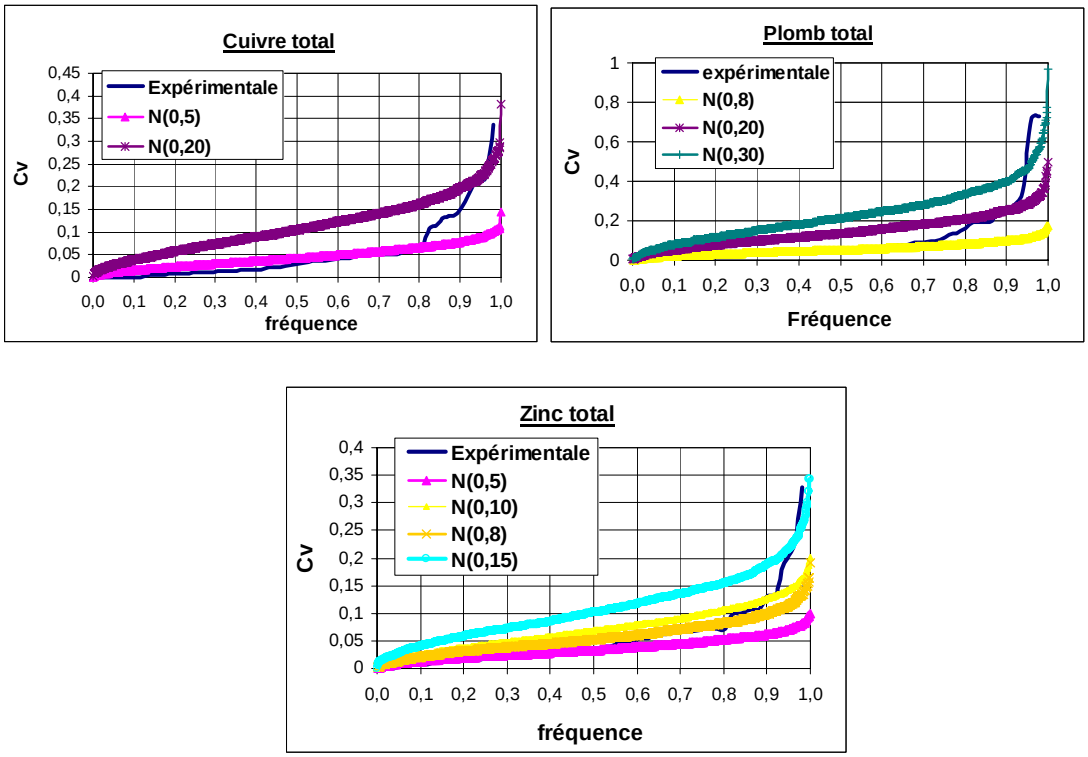


Figure 34 : courbes des fréquences des incertitudes des métaux totaux (Cu, Pb et Zn)

Pour les fréquences ≤ 0.8 pour le cuivre, ≤ 0.70 pour le plomb, la distribution expérimentale correspond avec la distribution issue d'une loi normale de moyenne nulle et d'écart type égale à 5% pour le cuivre, 8% pour le plomb. En revanche, pour des fréquences > 0.7, le Cv augmente progressivement, et d'après l'analyse des séries de triplicas, il s'avère que ces Cv correspondent à des cas où l'un des triplicas est différent des deux autres.

Par ailleurs, pour le zinc on observe pour des fréquences ≤ 0.55 que la courbe des distributions expérimentales coïncide avec celle issue d'une loi normale N(0,5), alors que pour les fréquences comprises entre 0.55 et 0.90, elle correspond avec celle issue de la loi normale N(0,8).

Comme pour les MES, nous avons sélectionné les triplicas qui possèdent un Cv supérieur à 10% pour le Cut et Pbt, et > 5% pour le Znt le, et pour chacun de ces triplicas nous avons éliminé le répliquas qui présente le plus grand écart par rapport aux deux autres. Les distributions des fréquences obtenues figurent dans la Figure 35.

On remarque généralement que pour les fréquences ≤ 0.9, la distribution expérimentale correspond avec celle simulée à partir d'une erreur relative normale et d'écart type 8% pour le Pbt et 3% pour le Znt. Par ailleurs, dans le cas du Cut, pour les fréquences ≤ 0.5, la distribution expérimentale correspond avec celle simulée à partir d'une erreur relative normale et d'écart type 2%, cependant pour les fréquences comprises entre 0.5 et 0.95, elle correspond à la distribution simulée à partir d'une erreur relative normale et d'écart type 4%.

L'incertitude d'analyse au seuil de confiance de 95% varie entre ±4% et ±8% pour le cuivre total, ±16% pour le plomb total et ±6% pour le zinc.

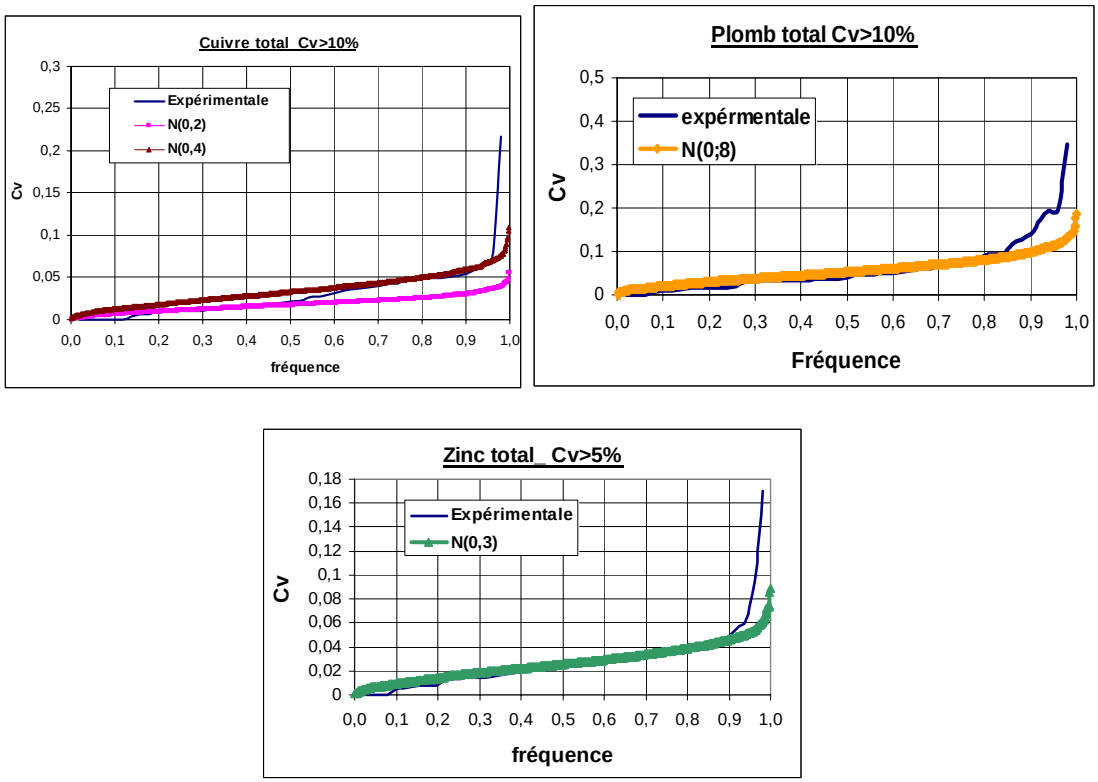


Figure 35 : courbes des fréquences des incertitudes des métaux totaux (Cu, Pb et Zn)

La comparaison avec les valeurs obtenues par Garnaud (1999) et Bhouri (2003) (Tableau 30) indique que nos incertitudes sont inférieures à celles obtenues par Garnaud (1999), dans la mesure où nous réalisons des triplicas et nous détectons les valeurs aberrantes.
Cependant, à l'exception du zinc, les incertitudes du Cut (respectivement du Pbt) sont inférieures (respectivement supérieures) à celles trouvées par Bhouri (2003).

Incertitude (%)	Cuivre total	Plomb total	Zinc total
Notre étude	±4 à ±8	±16	±6
Bhouri, 2003	±16	±10	±6
Garnaud, 1999	±11[1] à ±46[2]	±23[3]	±16[4]
1: concentrations en cuivre ≤70µg/l ; 2 : concentrations en cuivre comprises entre 70 et 300µg/l ;3 : concentrations en plomb≤500µg/l;4 : concentrations en zinc≤6000µg/l			

Tableau 30 : incertitudes sur les concentrations des métaux totaux au seuil de 95%

Notons qu'il n'était pas souvent possible de faire des triplicas de métaux et par conséquent le risque d'avoir parfois une valeur erronée existe. Ces points devront être détectés grâce à la validation des données.

4.2.3 Incertitudes des vitesses de chute

Les incertitudes sur la mesure des vitesses de chute ont été évaluées à partir des tests de répétabilité sur des échantillons de temps sec (pour VICAS) et de temps de pluie (pour VICAS et VICPOL).

Ces tests ont permis d'évaluer les incertitudes de mesure sur les valeurs de déciles Vx[4] et sur le pourcentage x des solides (% en masse) ayant une vitesse de chute inférieure à Vx.

Si l'on suppose que la valeur mesurée d'un décile Vx (respectivement d'un pourcentage de masse x) suit une loi de Gauss, alors l'incertitude au seuil de confiance 95% sur une mesure de Vx (respectivement d'un pourcentage de masse x) peut être estimée par la formule :

$$E95 = \pm \frac{t\sigma}{moy}$$

avec :

σ : écart type des valeurs Vx (respectivement x) pour les N répliquas de mesure ;

moy : moyenne de Vx (respectivement x) sur les N répliquas de mesure ;

t : valeur de Student pour une fréquence de 0.95 et degré de liberté de (N-1).

4.2.3.1 Incertitudes de mesure des vitesses de chute mesurées par le protocole VICAS

La reproductibilité du protocole VICAS a été évaluée sur un échantillon d'effluents de temps sec et de temps de pluie. Les paramètres analysés sont les MES et les MVS. La mesure des

[4] Le décile Vx est la vitesse de chute non atteinte par x% de la masse des particules.

vitesses de chute a été réalisée en six répliquas, en utilisant six colonnes VICAS en parallèle (Figure 36).

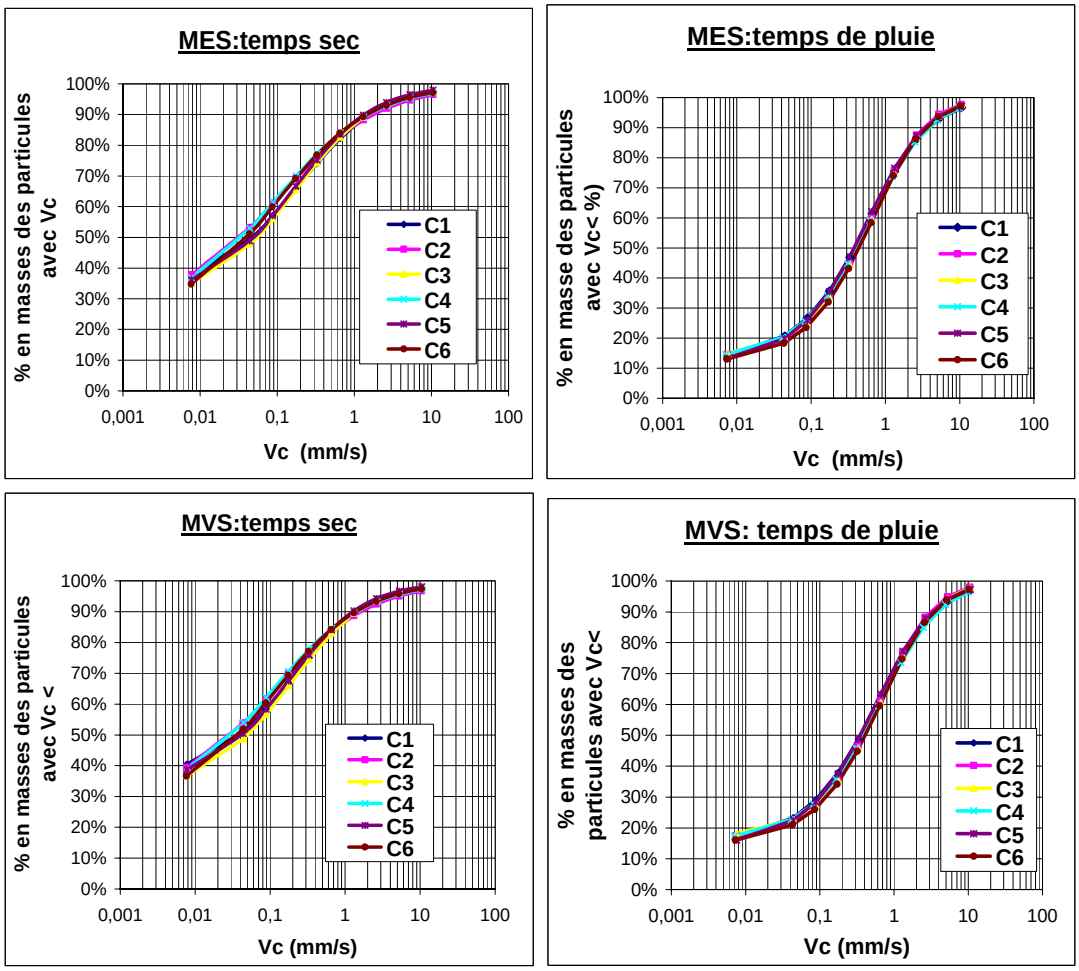


Figure 36 : reproductibilité de décantation du protocole VICAS en terme de MES et MVS

Ces tests montrent une bonne répétabilité des vitesses de chute des matières en suspension et des matières volatiles en suspension tant par temps sec que par temps de pluie.

A partir de ces courbes nous avons évalué les incertitudes sur la mesure des vitesses de chute des MES et des MVS, au seuil de confiance 95%. La valeur de Student dans notre cas (N=6) pour une fréquence de 0.95 et un degrés de liberté de (N-1)=5 est t = 2.57.

Les incertitudes d'analyse (E95) sur les $F(Vc)^5$, des MES et MVS sont présentées dans le Tableau 31 et la Figure 37.

	Temps sec				Temps de pluie			
Nbre de répliquas	6							
	MES		MVS		MES		MVS	
Concentration initiale (mg/l)	168		142		430		311	
% dont V <	σ/moy	E 95	σ/moy	E 95	σ/moy	E 95	σ/moy	E 95
% < 0,01mm/s	4,1%	±10,5%	3,5%	8,9%	5,8%	±14,8%	4,7%	±12,1%
% < 0,04 mm/s	4,2%	±10,7%	3,8%	9,8%	4,2%	±10,9%	3,4%	±8,7%
% < 0,1 mm/s	3,7%	±9,5%	3,6%	9,4%	4,5%	±11,7%	2,8%	±7,2%
% < 0,4 mm/s	1,1%	±2,9%	1,5%	4,0%	2,8%	±7,2%	2,8%	±7,1%
% < 1 mm/s	0,9%	±2,2%	0,6%	1,6%	1,2%	±3,0%	1,9%	±5,0%
% < 4 mm/s	0,8%	±2,0%	0,8%	2,0%	0,6%	±1,4%	0,8%	±2,1%
% < 10 mm/s	0,8%	±2,0%	0,6%	1,4%	0,7%	±1,7%	0,7%	±1,7%

Tableau 31 : Evaluation de l'incertitude sur la mesure des vitesses de chute de MES et MVS par temps ses et temps de pluie

Les incertitudes E95 sur les F(Vc) des MES et des MVS de temps sec et de temps de pluie diminuent lorsque Vc augmente (Figure 37).

L'incertitude d'analyse sur les F(Vc) des MES varie entre ±2% et ±10.7% par temps sec et entre ±1.4% et 14.8% par temps de pluie. Celles des MVS varient entre ±1.4% et ±9.8% par temps sec et entre ±1.7% et 12.1% par temps de pluie.

Les incertitudes mesurées sur les vitesses de chute des matières en suspension sont souvent largement inférieures à celles trouvées par Lucas et al (1998). Ceci peut être expliqué par le fait que les tests de répétabilité réalisés par Lucas et al (1998) ont été effectués sur des échantillons de dépôts de bassins de décantation remis en suspension dans l'eau et non sur de l'effluent unitaire brut.

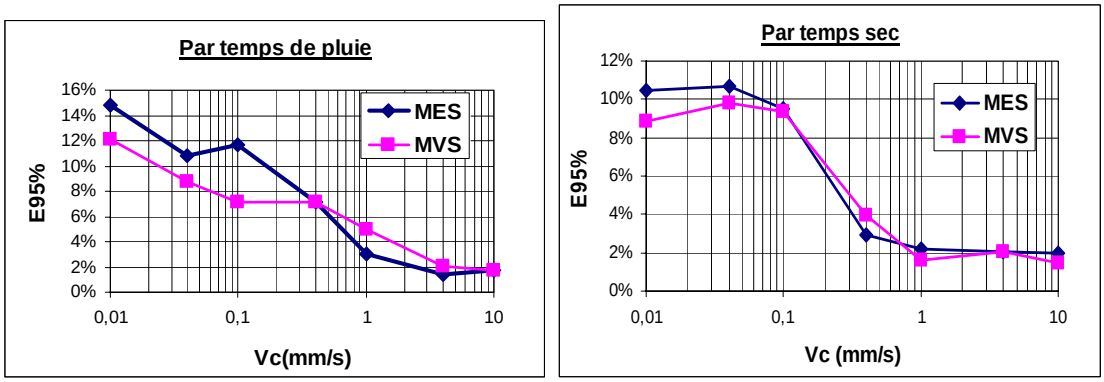


Figure 37 : incertitudes sur le pourcentage en masse x ayant une vitesse de chute inférieure à, des MES et MVS, par temps sec et temps de pluie (VICAS)

[5] F(Vc) : pourcentages des MES ayant une vitesse de chute inférieure à Vc

4.2.3.2 Incertitudes de mesure des vitesses de chute mesurées par le protocole VICPOL

La répétabilité du protocole VICPOL a été évaluée sur des échantillons d'effluents unitaires de temps de pluie et pour trois temps de décantation : 8min, 22min et 4h. Pour chacun de ces temps de décantation, dix répliquas de décantation sont réalisés en parallèle dans dix colonnes VICPOL. Les paramètres analysés sont : MES, MVS et/ou COP, et DCO.

La Figure 38 représente les variations du pourcentage F(Vc) pour les temps de décantation 8min, 22min et 4h, comparés à ceux obtenus par (Bouhri, 2003).

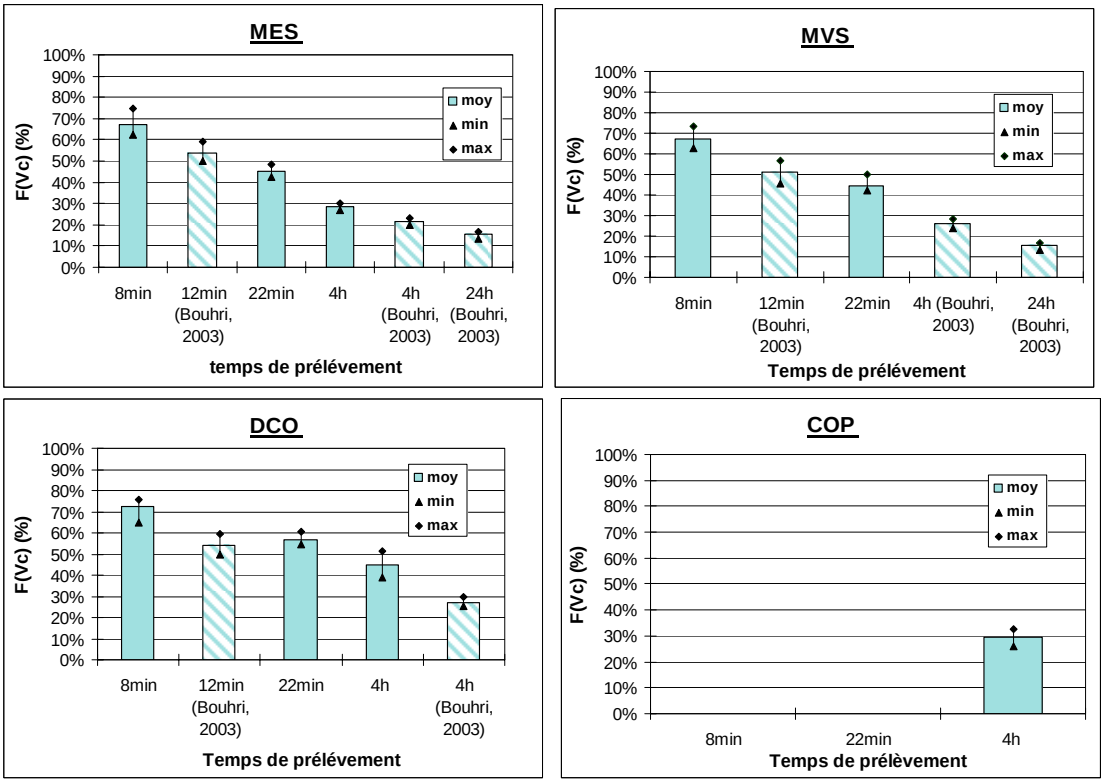


Figure 38 : variation de F(Vc) par rapport à la concentration moyenne (VICPOL)

L'écart maximal de F(Vc) par rapport à la moyenne de tous les répliquas de mesure est de ±8% pour les MES, ±6% pour les MVS, ±4% pour la DCO et ±4% pour l'unique test du COP. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par (Bouhri, 2003).

L'incertitude de mesure au seuil de confiance de 95% sur les pourcentages $F(Vx) = \frac{C(t_x)}{C_0}$ ayant une vitesse de chute inférieure à $V_x = \frac{H}{t_x}$ a été calculée avec une valeur de Student

égale à 2.26 à un degré de liberté de (N-1)=9, pour les temps de décantation 8 et 22min et avec un t=2.36 pour le temps de décantation 4h (car seulement huit répliquas ont été réalisés pour ce temps N-1=7). Les résultats obtenus figurent dans le Tableau 32.

	Polluant	MES		MVS		DCO		COP	
	Nbre de répliquas	10		10		10		8	
	Vc< à (mm/s)	σ/moy	E95	σ/moy	E95	σ/moy	E95	σ/moy	E95
Cette étude	0.834	6.12%	±14%	5.43%	±12%	5.56%	±13%	-	-
	0.299	3.51%	±8%	3.51%	±8%	3.51%	±8%	-	-
	0.028	3.96%	±9%	-	-	8.89%	±21%	6.66%	±16%
Bouhri (2003)	0.148	4.2%	±13%	-	-	-	-	-	-
	0.028	6.22	±20%	5.5%	±17%	7.2%	±23%	-	-
	0.005	9.24	±29%	4.58%	±15%	-	-	-	-

Tableau 32 : Evaluation de l'incertitude sur la mesure des vitesses de chute, par temps de pluie, VICPOL

Les incertitudes maximales de mesure sur les F(Vc) des MES, MVS, DCO et COP sont de l'ordre de ±14% pour les MES, de ±12% pour les MVS et de ±21% pour la DCO. L'incertitude du COP pour le seul test effectué est de l'ordre ±16%. Ces incertitudes paraissent plus faibles que celles trouvées par (Bouhri, 2003), ce qui s'explique sans doute par le faible nombre de répliquas faits par Bouhri (4) qui induisait une valeur très forte de Student.

Conclusions sur le contexte expérimental

Le principe d'un dispositif expérimental constitué d'une série de 6 bassins versants de taille croissante, allant du bassin versant du Marais jusqu'en amont de l'Usine de Clichy a été retenu. Ce dispositif permettra la constitution d'une base de données riche et fiable sur les flux polluants en réseau d'assainissement unitaire à différentes échelles spatiales.

Les principales caractéristiques des bassins versants choisis et leur système d'assainissement sont synthétisées le Tableau 33 et le Tableau 34 (délimitation des bassins versants, topographie, occupation des sols, population, types des rejets, descriptif et fonctionnement du réseau d'assainissement…).

Bassins versants	Surface (ha)	Arrondissement /Commune	Population (milliers d'habitant)	Occupation du sol	Répartition des surfaces urbaines (%)			C de ruissellement moyen
					T	V	A	
Marais	41	3ième et 4ième	10 523	Résidentiel+ activité du secteur tertiaire	56	24	20	0.71
Sébastopol	113	1er, 2ième, 3ième, 4ième, 10ième et 11ième	32 871		58	29	14	0.73
Quais	402	3ième, 4ième, 11ième et 12ième	94 806		34	28	39	0.64
Clichy centre	942	1er, 2ième, 3ième, 4ième, 8ième, 9ième, 10ième, 11ième, 12ième, 17ième et 18ième +	217 226		45	28	27	0.68
Coteaux aval	1315	2ième, 3ième, 10ième, 9ième, 11ième, 12ième, 19ième, 20ième	390 591		41	28	31	0.67
Clichy aval	2581	1er, 2ième, 3ième, 4ième, 8ième, 9ième, 10ième, 11ième, 12ième, 17ième et 18ième, 19ième, 20ième + Clichy + St Ouen	692 490		40	28	32	0.67
T : toitures, V : voirie, A : autres « espaces et jardins publics, cimetières, cours… »								

Tableau 33: principales caractéristiques des bassins versants étudiés

Réseau d'assainissement	Type de réseau	Sections	Pentes moyennes		Ensablement (relevés ensablement 2003)	maillages	Déversoirs d'orage
			collecteurs	Petites lignes			
Marais	Unitaire, visitable	Ovoïdes et ovoïdes à banquettes	(0.06)	(0.90)	Pas de dépôt à relativement important dans les parties amont des collecteurs	-	-
Sébastopol			(0.08)	(0.58)		Siphon Richard le Noir	-
Quais			(0.14)	(0.61)		Siphon Cuvier	Hôtel de Ville, St Paul, Mazas, Marine, Traversière, Bercy et Chamonard
Clichy centre			(0.10)	(0.84)		Siphon Richard le Noir+ Siphon Cuvier + galerie capucine	Tous les DO du BV des Quais
Coteaux aval			(0.15)	(1.09)		• En Amont (Vannes) : Netter RDV, St Mandé, et Branche Sud + Coteaux Wattignies + Coteaux Proudhon + Coteaux Diderot + Faidherbe et St Bernard • Au centre : Richard le Noir + Chemin vert • En aval : Intercepteur Nord Jemmapes + Intercepteur Chapelle Coteaux amont +Intercepteur Coteaux Nord Est	Proudhon et Vincennes - charenton
Clichy aval			(0.11)	(1.04)		Tous les maillages des BV	Tous les DO des BV
(x): valeur moyenne							

Tableau 34: principales caractéristiques du réseau d'assainissement

Le choix et l'installation des équipements expérimentaux nécessaires pour les mesures hydrauliques, l'évaluation des caractéristiques des pluies et les prélèvements des échantillons (Tableau 35) était une tache lourde et difficile, compte tenu des caractéristiques des sites de mesure (grands collecteurs profonds à très profonds, accessibilité difficile jusqu'aux points de mesure, vitesses d'écoulement importantes, collecteurs pouvant se mettre en charge pendant les évènements pluvieux…). Ainsi, la mise en place du dispositif expérimental est généralement un compromis entre le respect des consignes et des règles permettant de réduire au maximum les sources d'erreurs et les caractéristiques techniques des matériaux, leurs coûts et leurs disponibilités sur le marché.

Bassin versant	Equipements existants sur place		
	débitmétrie	Prélèvement	Pluviométrie
Marais	01 Débitmètre (type Ultraflux)	02 Préleveurs automatiques fixes (type PP92 réfrigéré et Vegamon 94)	01 pluviomètre (Pl Foin)
Sébastopol	01 Débitmètre (type CR2M)	02 Préleveurs automatiques, portables	01 pluviomètre (Pl Foin)
Quais		02 Préleveurs automatiques, fixes réfrigéré (type PP92)	03 pluviomètres (Pl Foin + Pl 03 +Pl 14)
Clichy centre		02 Préleveurs automatiques, portables	04 pluviomètres (Pl Foin +Pl Ferry + Pl 03 +Pl 14)
Coteaux aval			06 pluviomètres (Pl Foin +Pl Ferry + Pl 03 + Pl 11 + Pl 13+ Pl 14)
Clichy aval			07 pluviomètres (Pl Foin +Pl Ferry + Pl 03 +Pl 10+ Pl 11 + Pl 13+ Pl 14)

Tableau 35 : Equipements mis en place

Afin de quantifier et limiter au mieux les biais induits au cours de la procédure expérimentale, deux approches ont été adoptées : une approche théorique basée sur l'étude des critères de choix et d'installation d'un préleveur automatique, cités dans la littérature (Bertrand-Krajewski et al, 2000) et une approche expérimentale complémentaire, basée sur la réalisation de tests expérimentaux.

Sur les neufs critères étudiés, deux seulement ne peuvent être respectés. Il s'agit des critères 3 (Vitesse de prélèvement > Vitesse d'écoulement) et 9 (Volume tuyau ≤ volume échantillon prélevé). Le critère 3 est partiellement respecté sur les sites Sébastopol, Clichy centre et Clichy aval, cependant il n'est pas respecté à Coteaux aval où les vitesses d'écoulement sont très importantes. Le non-respect de ce critère conduit théoriquement à une ségrégation des particules. Toutefois, les tests expérimentaux que nous avons réalisés permettent d'évaluer ce biais. Compte tenu de l'erreur maximale (9-22%) due au non-respect du critère 9 (calculée selon la surestimation des concentrations proposée par (De Heer ; 1992)), le biais induit n'est pas très élevé, de plus le phénomène de bulle d'air n'a pas été observé.

Par ailleurs, les tests réalisés ont montré :

- Une homogénéité satisfaisante des concentrations dans les différentes sections de mesure;

- Une bonne représentativité des échantillons prélevés quand les tuyaux de prélèvement sont propres;
- L'absence de ségrégation des particules prélevées à l'entrée de la prise d'eau;
- L'existence d'une contamination des échantillons par encrassement des tuyaux de prélèvement, suite à l'érosion de biofilm formés à l'intérieur des tuyaux, lorsque les prèleveurs ne sont pas en fonctionnement pendant une longue période;
- la température et la durée de stockage influent fortement sur les concentrations de NH_4^+ (plus –100% d'écart par rapport à la valeur initiale), et sur les paramètres dissous, et par conséquent sur la distribution dissous/particulaire.

Ces tests (sauf ceux de conservation) ont été réalisés par temps sec. Par temps de pluie on peut s'attendre à avoir un meilleur mélange des effluents dans la section de mesure. Nous avons remédié aux problèmes de contamination des échantillons par encrassement du tuyau de prélèvement, en effectuant des séries de prélèvement d'eau usée puis d'eau propre avant chaque campagne de prélèvement. Hors période de mesure, les tuyaux de prélèvement ont été nettoyés à l'eau propre et seront mis hors de l'eau. Compte tenu des résultats des tests de conservation, nous avons décidé de ne pas effectuer des analyses de NH_4^+, par ailleurs, les échantillons prélevés ont été analysés immédiatement après leur arrivé au laboratoire (le jour même).

Toutefois, d'autres erreurs sont inévitables notamment celles dues à la perte d'information en début et en fin d'événement pluvieux. Cette source d'incertitude peut conduire pour quelques pluies à une surestimation ou une sous-estimation des concentrations moyennes mesurées qu'il faudrait d'ailleurs interpréter avec précaution.

Pour la caractérisation des effluents unitaires de la zone OPUR, plusieurs paramètres polluants ont été analysés selon les protocoles indiqués dans Tableau 36, et les incertitudes qui leurs sont associées ont été déterminées.

Paramètre polluant	Protocole d'analyse : norme	Incertitudes d'analyses	
MES, MVS	AFNOR NF T90-105 et NF T90-029 et : • Pour les MES : Filtration sur filtre en fibre de verre GFF Whatmann, séchage à 105°C ; • Pour les MVS : et Calcination à 525°C des filtres ayant servis à la détermination des MES	MES	±8%
DBO_5	AFNOR (NF, T90-103) + dosage électrochimique de l'oxygène dissous à t=0 et après 5 jours d'incubation à 20°C	-	
DCO	Micro méthode (méthode HACH)	±10%	
NTK	AFNORD (NF EN 25663 ISO 5663)	-	
COD	Mesure du dioxyde de carbone libéré après oxydation chimique du carbone organique par spectrométrie IR	-	
COP	Calcination à 1000°C du filtre ayant servis à la détermination des MES, et mesure par spectrométrie IR, après l'avoir débarrassé de son carbone inorganique par acidification	-	
Métaux lourds	Spectrométrie ICP-AES ou ICP-MS, mais avant il y a minéralisation : ▪ 2003-2004 : par mélange nitrique –perchlorique et chauffage sur banc de sable; ▪ à partir de 2005 : utilisation d'une eau régale, mélange nitrique –chlorhydrique et chauffage en bombe micro-onde fermé.	Cut	±4 à ±8%
		Pbt	±16%
		Znt	±6
Vitesses de chute	Protocole VICAS, Protocole VICPOL (Gromaire et al, 2003), basé sur le principe de la suspension homogène	MES	±2 à ±15%
		MVS	±1.5 à ±12

Tableau 36: paramètres polluants étudiés, protocoles d'analyses et incertitudes associées

PARTIE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 : Introduction

Les travaux réalisés sur le bassin versant expérimental du Marais (1995-2000) ont montré une évolution des caractéristiques des eaux unitaires entre l'entrée et la sortie du réseau d'assainissement : augmentation des concentrations en MES et en matières oxydables, diminution des concentrations des métaux lourds, augmentation de la proportion de polluants liés aux particules. Cette différence entrée-sortie sur ce petit bassin versant est conditionnée par deux phénomènes :

- les processus se déroulant dans le réseau d'assainissement.
- la production qui diffère en fonction de l'occupation du sol.

Ces résultats ont été obtenus sur un petit bassin versant, que deviennent ils à des échelles spatiales plus grandes ? Que se passe t-il pour des bassins versants d'occupation de sol différentes ? Est –ce qu'il va y avoir variabilité ou stabilisation des caractéristiques des eaux unitaires ?

La réponse à ces interrogations fournit des éléments pour la gestion des flux, le dimensionnement des ouvrages de traitement des RUTP. Elle permet également de mieux comprendre les phénomènes se déroulant dans le réseau d'assainissement unitaire.

Pour apporter des éléments de réponse à ces interrogations, nous proposons d'étudier un système composé de trois principaux compartiments (Figure 39):

- Les entrées : elles correspondent aux retombées atmosphériques, aux eaux de lavage des voiries, aux eaux de ruissellement sur les différentes surfaces urbaines, et aux eaux usées domestiques et industrielles.
- Les stocks de dépôt : plusieurs types dépôts se forment par temps sec dans le réseau d'assainissement unitaire : dépôt grossier, biofilms et couche organique. Ces dépôts sont remis en suspension pendant les évènements pluvieux et contribuent à la pollution des RUTP.
- Les sorties : se sont les effluents de temps sec et de temps de pluie.

Par ailleurs, il est intéressant d'étudier la contribution des différentes sources «Eaux usées, eaux de ruissellement et stocks de dépôt du réseau » à la pollution des RUTP.

Nous allons traiter dans cette synthèse bibliographique des données de :

- concentrations et de flux des matières en suspension, des matières organiques et azotées et des métaux lourds ;
- caractéristiques des particules : répartition dissous-particulaire, teneur des particules, et vitesse de chute.

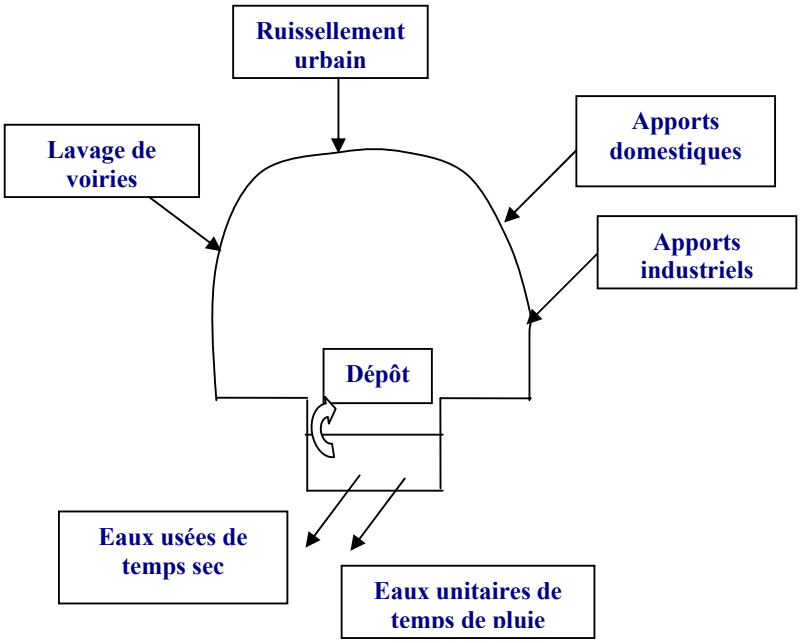


Figure 39 : système étudié

Chapitre 2 : Les entrées

Les principales entrées dans le réseau d'assainissement unitaire sont synthétisées dans la Figure 40. Il s'agit essentiellement des retombées atmosphériques (entrée indirecte), de ruissellement urbain, de lavage de voiries et d'apports domestiques et professionnels.

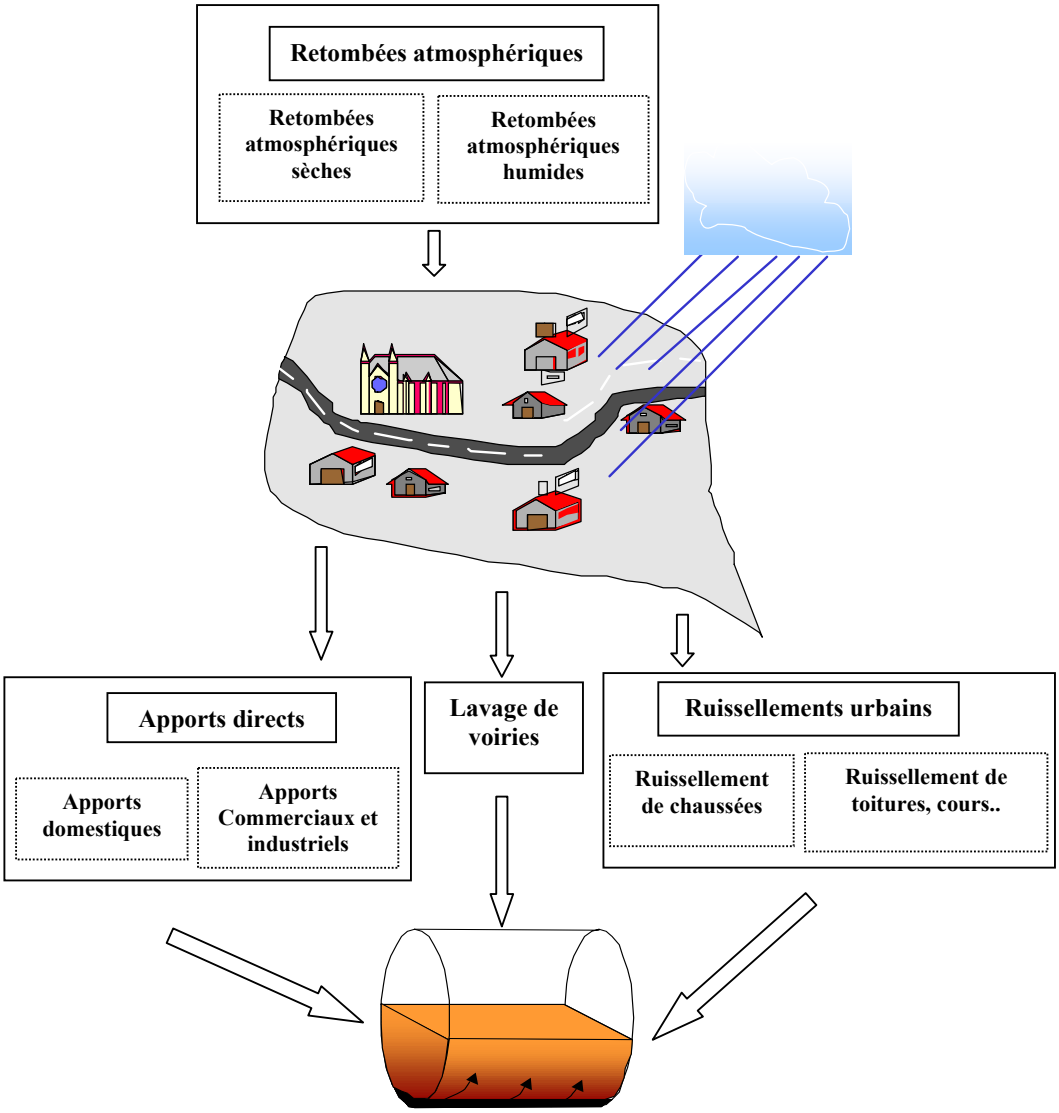


Figure 40: Principales entrées dans le réseau d'assainissement unitaire

2.1 Les retombées atmosphériques

Les polluants atmosphériques possèdent deux origines : naturelle (incendie, érosion des sols, volcanisme,…) et anthropique (chauffage domestique, usines industrielles et d'incinération d'ordures ménagères, trafic automobile…..). Ces polluants se manifestent par des retombées atmosphériques sèches et humides.

Les retombées atmosphériques sèches sont les retombées au sol des polluants atmosphériques gazeux et particulaires. Ces retombées font intervenir des processus physico-chimiques complexes dépendant de deux principaux paramètres (Zobrist et al, 1993 ; Golomb et al, 1997a) :

- La nature des particules, et plus particulièrement le type de source émettrice, la taille et la composition des particules et leur vitesse de chute ;
- les conditions extérieures : météorologiques (température, vitesse de vent, …), et la nature des milieux récepteurs (herbes, sol, surface perméable, …).

Les données en terme de retombées atmosphériques trouvées dans la littérature concernent essentiellement les métaux lourds et les hydrocarbures.

Les retombées atmosphériques sèches constituent un apport en particules fines, en hydrocarbures, en micropolluants organiques et surtout en métaux lourds.

Les études réalisées pour quantifier la pollution atmosphérique sèche (Tableau 37) ont montré qu'elle contient d'importantes quantités d'éléments métalliques.

Les retombées atmosphériques sèches sont variables d'un site de mesure à un autre. Ceci peut s'expliquer par une hétérogénéité de la production métallique particulaire et par la proximité des sites de mesure par rapport aux sources d'émission.

Références		Cadmium	Plomb	Cuivre	Zinc
Revitt, 1990	zone résidentielle (banlieue Londres)	332	6614	1745	6110
Garnaud et al, 2001	Chatou	270	20500	5400	47600
	Créteil	840	29300	18300	83200
	Paris	150	26400	7800	38900

Tableau 37: flux atmosphériques annuels des retombées atmosphériques sèches, en métaux lourds ($\mu g/m^2.an$)

Notons que les dépôts secs qui se déposent par temps sec sont remis en suspension par temps de pluie sous l'effet de la pluie. Par ailleurs, d'autres mécanismes peuvent intervenir pour remobiliser les polluants, tels que le balayage des rues, le nettoyage des places de marchés, le vent (Ball et al, 2000).

La densité du trafic automobile, la localisation des industries, et la direction du vent ont une influence non négligeable sur le dépôt des retombées atmosphériques sèches, en particulier les métaux lourds. De plus, la masse de polluants accumulée tend à augmenter avec la longueur de la période de temps sec précédent l'événement pluvieux.

Les retombées atmosphériques humides correspondent essentiellement à la pluie. Le lessivage de l'atmosphère par les eaux météoriques détermine la pollution de l'eau de pluie à l'instant où elle touche le sol.

Les ordres de grandeurs des concentrations des MES, des matières organiques, et des métaux dans les retombées atmosphériques humides, mesurés en zones urbaines en Allemagne [1], et en France : les Ulis et Maurepas [2], Chatou, Créteil, Paris, Fontainebleau [3], se trouvent dans le Tableau 38.

	[1] (Freitag et al, 1987 ; Göttle, 1978 ; Hahn, 1995)	[2] (Grange et Deutsch, 1986)	[3] (Garnaud, 2001)
MES(mg/l)	-	1-16	-
DCO(mg/l)	-	2-7	-
Cd(µg/l)	1-3	0.15-2.4	0.03-3.32
Pb(µg/l)	30-110	1.2-12.1	0.8-28.4
Cu(µg/l)	7-150	<7-33.4	1.1-13.7
Zn(µg/l)	50-150	4-198	2-82.4

Tableau 38 : concentrations des paramètres globaux et des métaux lourds dans les retombées atmosphériques humides

Les résultats en terme de concentrations de métaux lourds dans les retombées atmosphériques humides sont très variables entre les sites de mesure. Cette variabilité est fonction des sources locales émettrices de polluants, des conditions météorologiques, des caractéristiques des sites de prélèvements, et aussi des méthodes d'échantillonnage et d'analyse.

Les flux annuels des retombées atmosphériques totales en métaux lourds, mesurés dans des zones fortement urbanisées et d'autres faiblement urbanisées sont synthétisés dans le Tableau 39. Les flux mesurés en zones faiblement urbanisées sont relativement comparables entre les différents sites de mesure. Ceux mesurés en zones fortement urbanisées sont cependant très variables, quelque soit le métal étudié. Cette différence est attribuée à la proximité des sources métalliques par rapport aux différents sites de mesure.

Références	Cadmium	Plomb	Cuivre	Zinc
Lawlor et Tipping, 2003[1]	80	2400	1200	7200
Hovmand et Kemp, 1998[1]	52	1300	860	10500
Migon et al, 1997[1]	66	3139	2190	-
Garnaud et al , 2001[2]	200-1090	3050-3910	7900-24700	46000-112900
Golomb et al , 1997a[2]	270	1850	2500	7800
Wong et al, 2003[2]	70	12700	18600	104000
1 : zone faiblement urbanisée, 2 : zone fortement urbanisée,				

Tableau 39 : flux atmosphériques totaux en métaux lourds ($\mu g/m^2.an$)

La contribution des retombées atmosphériques totales (sèches et humides) à la charge métallique véhiculée par les eaux de ruissellement urbaines varie entre 20-79% pour le cuivre et de 1-17% pour le zinc (Garnaud, 1999). Par ailleurs, la contribution du dépôt sec par rapport au dépôt atmosphérique total selon Garnaud (1999) est assez importante quelque soit le métal étudié (60 à 90%).

2.2 Le ruissellement urbain

Le ruissellement des différentes surfaces urbaines (chaussées, toitures, cours ..) a été souvent étudié à cause des flux importants en polluants qu'il transfère jusqu'au réseau d'assainissement (WRc, 1994, Gromaire et Garnaud, 1998-1999).

2.2.1 Ruissellement des chaussées

Ce type de ruissellement contribue à l'apport des métaux lourds par temps sec (balayage et lavage des rues, des places de marchés), et par temps de pluie (lessivage des rues, trottoirs..).

Le ruissellement des chaussées constitue une source importante à la pollution des eaux unitaires (Thornton et al 2001). Plusieurs sources peuvent être distinguées (USEPA, 1972) :

- La perte des systèmes de lubrifications des véhicules ;
- La dégradation des pneus et des freins ;
- Les entretiens des routes et leur dégradation ;
- Les précipitations ;
- Les dépôts atmosphériques (dépôts secs).

Les concentrations des MES, des matières organiques et des métaux lourds dans les eaux de ruissellement de chaussées, de bassins versants de tailles différentes sont résumées dans le Tableau 40. Quelle que soit la taille du bassin versant, le ruissellement des voiries se caractérise par de fortes concentrations en MES, en MO et en métaux lourds. D'après (Xanthopoulos et al ; 1993), 90% des MES transférées dans le réseau d'assainissement proviendraient de la voirie.

Quel que soit le paramètre polluant étudié, les concentrations de ruissellement des chaussées sont variables d'un site de mesure à un autre. L'importance de la pollution des eaux de ruissellement des voiries varie en fonction de l'occupation du sol et l'intensité du trafic routier.

pays	référence	MES (mg/l)	DCO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	Cadmium (µg/l)	Plomb (µg/l)	Cuivre (µg/l)	Zinc (µg/l)
France	Gromaire (1998)	97	135	31	0.5	138	63	560
	Laurensot (1998)	538	436	79	-	100	80	300
Allemagne	Xanthopoulos et Hahn (1993)	564	49		6.4	311	108	603
	Dierkes und Geiger (2000)	-	-	-	1.6	28	125	-
USA	Pitt et al. (1995)	49	-	-	37	43	280	58

Tableau 40 : concentrations moyennes des MES, matières organiques et des métaux lourds dans les eaux de ruissellement de chaussées, par temps de pluie

L'apport en Cu, Pb et Zn des eaux de ruissellement de chaussées provient essentiellement de l'usure des plaquettes de freins des véhicules (Sörme et al, 2002 ; et Legret et al, 1999) (Tableau 41).

mg/Kg	Cd		Cu		Pb		Zn	
	[1]	[2]	[1]	[2]	[1]	[2]	[1]	[2]
Freins	-	2.7	62050	142000	11405	3900	12450	21800
Pneus	-	2.6	-	1.8	-	6.3	-	10250
Huile	<1	0.2	<1	0.5	<1	3.3	400-800	0.5
[1] : Sörme et al (2002) ; [2] : Legret et al (1999)								

Tableau 41 : teneurs en métaux lourds dans différentes parties des véhicules

En plus du trafic routier, la dégradation des chaussées et le type des rues peuvent participer à l'apport en métaux lourds. Muschack (1999) a calculé les flux d'émissions du Cu, Pb, et Zn dans différents types de rue se trouvant en zone urbaine (rue résidentielle, route principale, autoroute) (Tableau 42). Il apparaît clairement que plus la route est fréquentée, et plus la dégradation des chaussées est importante, et plus grande sera la quantité de métaux dégagée.

Type de rue	Abrasion totale (Kg/ha de route/an)	Cu (g/ha de route/an)	Pb (g/ha de route/an)	Zn (g/ha de route/an)
Rue résidentielle	2148	110	219	352
Route principale	7665	391	782	1257
Autoroute	10000	510	1020	1640

Tableau 42 : flux d'émissions de Cu, Pb, et Zn en fonction des types de rues

Le plomb et le zinc des eaux de ruissellement des voiries sont majoritairement associés aux particules. Gromaire (1998) estime respectivement la proportion de cuivre, de plomb et de zinc liée aux particules, dans les eaux de ruissellement de chaussées à 67%, 97% et 52%. Laurensot (1998) trouve un résultat similaire pour les mêmes métaux : 62% pour le Cu, 95% pour le Pb et 75% pour le zinc.

2.2.2 Ruissellement des toitures

Le ruissellement des toitures peut être considéré comme très polluant tout comme le ruissellement des chaussées (Herrmann et al, 1994 ; Förster, 1999). Les effets de cette pollution sont d'autant plus importants quand les sources de la pollution sont les matériaux de fabrication des toitures elles-mêmes (Förster, 1999).

Förster, (1999) a trouvé que les concentrations en zinc dans les eaux de ruissellement des toitures en feuille de zinc sont 2 à 3 fois supérieures à celles des eaux de ruissellement de toitures fabriquées sans aucun métal (exemple les toitures en ciment fibreux).

De nombreuses études ont été réalisées pour caractériser la pollution des eaux de ruissellement de toitures (Tableau 43).

D'après ces données, les eaux de ruissellement de toitures contiennent de faibles quantités de matières en suspension et en matières organiques, en comparaison avec les eaux de voiries. En effet, la charge moyenne par évènement pluvieux est de 0.85Kg/ha pour les MES, 0.24 Kg/ha pour la DCO et 0.12 Kg/ha pour la DBO5 (Sakakibara, 1996).

En revanche, les eaux de ruissellement des toitures se caractérisent par des concentrations en métaux lourds significatives. Ces concentrations sont variables d'un site de mesure à un autre.

Les concentrations en métaux lourds mesurées par Gromaire (1998) dans les eaux de ruissellement des toitures du Marais sont largement supérieures à celles mesurées dans les eaux de voiries. Cependant, l'inverse se produit à Nancy (Laurensot, 1998) où les concentrations du Pb et du Cu mesurées dans les eaux de ruissellement des toitures sont inférieures à celles des voiries. Ceci peut être liée aux types de toitures étudiées.

	Références	MES (mg/l)	DCO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	Cadmium (µg/l)	Plomb (µg/l)	Cuivre (µg/l)	Zinc (µg/l)
France	Gounou (2004)	-	-	-	1.4	1485	1620	9353
	Gromaire (1998)	17	27	4	1.3	493	37	3422
	Laurensot (1998)	-	-	-	-	60	20	3000
Allemagne	Xanthopoulos et Hahn (1993)	60	22	-	1	104	235	24
	Förster and Herrmann (1996)	43.2	-	-	-	-	-	-
	Gieska et al.(2000)	-	-	-	-	21.5	33.6	2580
Japon	Sakai et al.(1996)	-	5.7	1.8	-	-	-	-
Netherlands	Van Dam et al.(1989)	-	-	-	0.5	10.1	5.7	33.4

Tableau 43 : concentrations moyennes en MES, en matières organiques et en métaux lourds dans les eaux de ruissellement des toitures

Les concentrations en métaux lourds dans les eaux de ruissellement de différents types de toitures (tuile, zinc, ardoise) ont été mesurées par Gromaire (1999) (Figure 41).

Ces résultats montrent que la corrosion des toitures métalliques ou des éléments de toitures métalliques conduit à des concentrations très élevées en métaux lourds. Le Cd, et le Zn contenus dans les eaux de ruissellement peuvent provenir des toitures en zinc, le Cu provient des toitures munies de gouttières en cuivre alors que le Pb provient des toitures contenant des parties faites en plomb.

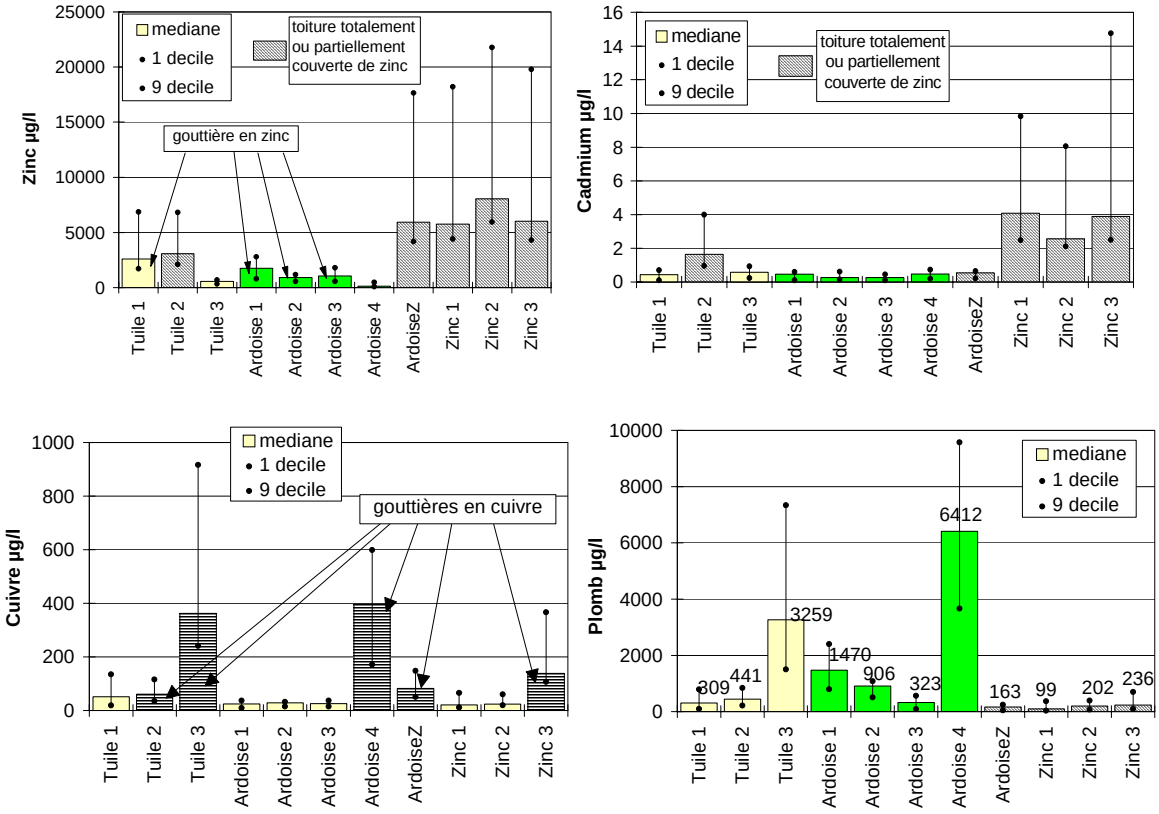


Figure 41: concentrations en métaux lourds dans les eaux de ruissellements de différents types de toitures (D'après Gromaire, 1998)

En plus du ruissellement des toitures, le ruissellement de la pluie sur les façades des bâtiments et le mobilier urbain peuvent constituer une source de métaux lourds vers le réseau.

Davis et al (1999) montrent que le plomb provient essentiellement des bâtiments à façade en bois peint (en moyenne 520µg/m^2), ce qui amène à dire que les peintures sont également une source en Pb. Il a trouvé que le Cu provenait des façades en brique (47µg/m^2), alors que les bâtiments dont l'extérieur est fait en brique (2100µg/m^2) et en bois peint (2800µg/m^2) sont une source importante en zinc.

Le plomb dans les eaux de ruissellement des toitures est essentiellement sous forme particulaire (en moyenne : 75% selon Laurensot, et 85% selon Gromaire). Par ailleurs, le zinc se trouve sous forme dissoute. La proportion de zinc liée aux particules est en moyenne de l'ordre de 20% selon Laurensot et 11% selon Gromaire. Le cuivre se répartit de façon équitable entre les deux phases.

2.2.3 Ruissellement d'autres surfaces urbaines (cours, parking…)

Les concentrations en MES et en métaux lourds (à l'exception du Zn) des eaux de ruissellement aux niveaux des cours (Gromaire, 1998) sont largement inférieures à celles mesurées dans les eaux de ruissellement des parkings (Pitt et al, 1995) (Tableau 44). Les parkings constituent ainsi une source importante d'apport en Cd, Cu et Pb.

			MES (mg/l)	DCO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	Cadmium (µg/l)	Plomb (µg/l)	Cuivre (µg/l)	Zinc (µg/l)
France	Cours	Gromaire (1998)	40	63	14	0.8	27	112	577
USA	parkings	Pitt et al. (1995)	110	-	-	37	43	280	58

Tableau 44: concentrations moyennes en MES, en matières organiques et en métaux lourds dans les eaux de ruissellements des cours et parkings

La répartition dissous-particulaire au niveau des cours montre qu'à l'exception du zinc, les trois autres métaux sont majoritairement sous forme particulaire. Les pourcentages de la pollution métallique liée aux particules sont en moyenne respectivement de l'ordre de 90% pour le Cd, 65% pour le Cu, 92% pour le Pb et 46% pour le Zn (Gromaire, 1998).

2.3 Le lavage de voiries

Cette partie concerne essentiellement le nettoyage des voiries à Paris, et plus particulièrement sur le bassin versant du Marais ($3^{ième}$ et $4^{ième}$ arrondissement). Le lavage des voiries et des trottoirs à Paris est assuré par les services de la Mairie de Paris, et il se fait selon plusieurs façons :

- Lavage manuel : ce type de lavage est quotidien et consiste en un lavage des caniveaux par ouverture des bornes fontaines et un balayage des trottoirs ;
- Le lavage au jet d'eau sous-pression : il est réalisé par une arroseuse-laveuse munie d'un jet d'eau. L'eau utilisée est celle des bornes fontaines. La fréquence du nettoyage varie entre 2 et 5 fois par semaine selon les voiries;
- Le nettoyage par aspiration mécanique: ce nettoyage se fait par des aspiratrices de chaussées motorisées équipées d'un gicleur servant à humecter la chaussée devant

l'engin, d'une buse d'aspiration centrale et de deux brosses rotatives balayant une largeur de 1 à 2m. Ce nettoyage est réalisé quotidiennement, sauf le week-end.

Plusieurs campagnes de prélèvement d'eaux de lavage de voiries par temps sec ont été réalisées : Gromaire (1998), Garnaud (1999), Rocher (2003) et Gounou (2004). Le nettoyage au cours de ces campagnes s'est effectué avec balayage humide des caniveaux et l'utilisation d'un jet d'eau sous pression. Ainsi, le lavage se fait sur des portions de chaussées comprenant le trottoir, le caniveau et une demie route.

Les échantillons prélevés ont été analysés en terme de MES, MVS, DCO, DBO_5, métaux lourds, et HAP.

Les masses polluantes produites par unité de longueur mesurées par Gromaire (1998) sont synthétisées dans le Tableau 45.

Les masses des MES et des matières oxydables varient d'un facteur 3 à 4 d'un site de mesure à un autre et d'une journée de mesure à une autre, et d'un facteur 7 à 30 dans le cas des métaux lourds.

	Eaux de nettoyage de voirie, Marais		
	1er déc.	médiane	9ème déc.
Volume (l/m)	9.5	13.8	34.9
MES (g/m)	0.82	1.64	3.1
MVS (g/m)	0.36	0.92	1.46
DCO (gO2/m)	1.18	2.54	5.04
DBO5 (gO2/m)	0.34	0.67	1.41
Cd (µg/m)	1.29	2.58	10.99
Cu (mg/m)	0.33	0.62	1.33
Pb (mg/m)	0.63	1.06	7.55
Zn (mg/m)	1.93	4.57	8.91

Tableau 45: masses polluantes journalières, par mètre de caniveau, des eaux de nettoyage de voirie

Les concentrations en MES, en matières organiques et en métaux lourds mesurées dans les eaux de lavage des voiries du Marais sont regroupées dans le Tableau 46.

Quelque soit le métal étudié, les concentrations mesurées par Garnaud (1999) sont largement inférieures à celles mesurées par Rocher (2003) et Gounou (2004). On observe par ailleurs, que les valeurs mesurées par Gounou (2004) sont très fortes. Cette différence peut être attribuée à la méthode de prélèvement.

(µg/l)	MES	MVS	DCO	DBO5	Cadmium	Plomb	Cuivre	Zinc
Gromaire (1998)	31-216, (97)	16-115, (50)	54-313, (179)	12-113, (52)	-	-	-	-
Garnaud (1999)	-	-		-	0.06-0.55, (0.2)	35-318, (94)	13-87, (38)	148-537, (212)
Rocher (2003)	-	-		-	3.25-4.7, (3.8)	512-621, (562)	300-382, (339)	1096-1296, (1107)
Gounou (2004)	-	-		-	4.5-12.6, (8.6)	929-4535, (1808)	555-1202, (803)	3912-10142, (5499)
x-y,(z) : 1er decile-9^{ième} décile,(médiane)								

Tableau 46: concentrations en MES, en matières organiques et en métaux lourds, des eaux de nettoyage de voirie

Les concentrations métalliques totales dans les eaux de lavage des rues du Marais sont relativement homogène d'un site à un autre, mais présentent des variations significatives au sein d'un même site. Ces variations sont dues aux volumes d'eau utilisés, à la durée et à l'intensité du balayage (Garnaud, 1999).

La comparaison avec les eaux potables montre qu'à l'exception du cuivre, les concentrations des trois autres métaux dans les eaux de lavage de voirie sont nettement supérieures (4-8 fois). Ce résultat peut indiquer que le Pb et le Zn pourraient provenir essentiellement de la circulation automobile, par temps sec. En qui ce concerne le Cu, sa concentration dans les eaux de ruissellement de voirie est 3 fois inférieure à celle de l'eau potable. Il semble donc que ce métal provient de la corrosion des tuyaux d'alimentation des habitations.

Les matières oxydables et le cuivre véhiculés par les eaux de lavage des voiries se répartissent de façon équitable entre la phase dissoute et particulaire. En revanche, le Cd, Pb et Zn sont essentiellement transportés sous forme particulaire (Gromaire et Garnaud) (voir Tableau 47).

	1er décile	médiane	9ème décile
% DCO particulaire	43	59	74
% DBO5 particulaire	39	47	64
% Cd particulaire	59	94	97
% Cu particulaire	28	50	71
% Pb particulaire	68	90	98
% Zn particulaire	52	77	87

Tableau 47: proportion de DCO, de DBO5 et de métaux lourds liée aux particules dans les eaux de nettoyage

Les flux en MES, en matières organiques et en métaux par jour et par mètre linéaire de chaussée, des eaux de nettoyage de voirie du bassin versant du Marais estimés par (Gromaire et al; 2000) (Tableau 48) indique que le lavage de voirie est susceptible d'apporter des quantités importantes de métaux, de MES et de matières organiques vers le réseau.

Ces quantités sont cependant considérablement variables d'une journée à une autre, et d'une rue à une autre.

	1er décile	médiane	9ème décile
MES (g/m/j)	0.08	1.1	3.6
MVS (g/m/j)	0.4	0.9	1.5
DCO (g d'O_2/m/j)	1.2	2.5	5.0
DBO_5 (g d'O_2/m/j)	0.3	0.5	1.4
Cd (µg/m/j)	1.3	2.6	11.0
Cu (mg/m/j)	0.3	0.6	1.3
Pb (mg/m/j)	0.6	1.1	7.5
Zn (mg/m/j)	1.9	4.6	8.9

Tableau 48 : flux métalliques engendrés par le lavage de la voirie sur l'ensemble du bassin versant du Marais (Gromaire et al; 2000)

La comparaison entre les flux polluants apportés par les eaux de lavage des rues et ceux apportés par les eaux de ruissellement de voirie par temps de pluie montre que les masses médianes, par unité de surface, des MES, MVS et des matières organiques sont généralement comparables. En revanche, les masses des métaux lourds des eaux de ruissellement par temps de pluie sont 5 fois supérieures aux masses des eaux de lavage de voiries par temps sec (Gromaire et al, 2000).

Par ailleurs, Gromaire (1998) trouve que les masses en métaux lourds issues du lavage des voiries sont très faibles par rapport à celles des toitures et élevées par rapport aux cours pour le plomb, le cuivre et le zinc, à l'échelle d'un évènement pluvieux.

2.4 Les eaux domestiques

Les eaux usées correspondent à des eaux ayant été utilisées par l'homme et peuvent être d'origine soit domestique soit industrielle (Chocat ; 1997, Valiron ; 1992). Les eaux domestiques sont celles utilisées pour des usages domestiques (lavabo, évier, WC, douches et

salle de bain, machine à laver…), alors que les eaux industrielles correspondent aux eaux utilisées dans le cadre d'une production industrielle (activités artisanales ou commerciales…) et peuvent être mélangées aux eaux en provenance des toilettes,…. A ces deux types d'eau, se rajoute les eaux résultantes du lavage des chaussées, des caniveaux et des places des marchés, les eaux d'infiltration, et les eaux des réservoirs de chasse.

Les volumes totaux des eaux mesurées entre 1992 et 1994 aux trois principales stations d'épuration de l'agglomération Parisienne (Achères-Seine Aval-, Valenton-Seine Amont- et Noisy-Le-Grand-Marne Aval-) sont en moyenne de l'ordre de 300 l/hab/j (Fievet et al, 1998). Toutefois, ceux d'eaux domestiques mesurées, en France, en sortie d'habitation entre 1975 et 1980 (citées dans Artières ; 1987) varient entre 80 et 100 l/hab/j et sont fonction de l'équipement sanitaire de l'habitation.

Les eaux usées domestiques sont composés d'apports physiologiques, d'apports divers (eaux vannes de toilettes, déchets solides rejetés dans les toilettes…), et d'eaux à usage domestiques (de lavabo, de bains et de douche, de lave vaisselle…).

Les apports physiologiques sont essentiellement les matières fécales et les urines humaines. Environ 30- 45kg de matières fécales humides sont produites par personne et par année, soit 10-15kg de matières sèches fécales (Lentner et al, 1981).

La production journalière moyenne par habitant d'urine et de matières fécales est respectivement de l'ordre de 1060ml/hab/j et 112g/hab/j (Tableau 49).

	[Laak ; 1974]		[Almeida et al ; 1999]	[Vinneras, 2001)
	1 adulte	1 enfant	Moyenne pour 8 adultes et 2 enfants	
Matières fécales (g/hab/j)	130	90	115	110
Urines (ml/hab/j)	1200	800	1120	-

Tableau 49: production des matières fécales et des urines

Almeida et al (1999) donnent les masses de matières en suspension, de matières organiques et azotées pour 1ml d'urine et 1g de matière fécale (Tableau 50) (Laak, 1974, Seigrist et al, 1976). D'après ces ordres de grandeurs, il apparaît que les matières fécales sont une source importante de MES et de DCO en comparaison avec l'urine. En parallèle, l'urine constitue une source de matières azotées.

mg	1 g de matière fécale	1 ml d'urine
MES	208	21
DCO	287	17,5
NH3-N	1.5	2.49
NO3-N	0,03	0,012

Tableau 50: masse des MES, de matières organiques et azotées dans les excréments humains (Laak, 1974; Seigrist et al, 1976)

Plusieurs études ont été réalisées en France et à l'étranger pour déterminer les flux polluants des eaux usées domestiques rejetés par jour et par habitant. Ces dernières sont groupées dans le Tableau 51. Celles effectuées en France ont été réalisées en zones d'habitat (quartier résidentiels et petites communes rurales), sur des eaux usées sans eaux claires, ni eaux industrielles.

(g/hab/j)		MES	DCO	DBO5	NTK
Rambaud et al (1997)	France	35	75	40	6
Bureau Vértitas et SIVOM de Metz (1994)	France	42-51	82-103	37-47	9-11
Pujol et al (1990)	France	25-30	75-80	30-35	8-9
Blanic et al (1989)	France	28	89	34	9
Besse *et al* (1989)	France	41	98	37	10
Ministère de l'environnement du Québec (1989)	Canada	60	-	50	10

Tableau 51 : charges polluantes des eaux usées domestiques

D'après cette sélection bibliographique, la charge polluante en matières en suspension, générée quotidiennement par habitant, varie entre 25 et 60 g/hab/j, celle en DBO_5 est de l'ordre de 30 à 50 g/hab/j, alors que la masse en azote est de 6 à 11 g/hab/j. on remarque par ailleurs que les valeurs mesurées en France sont inférieures à celles mesurées à l'étranger.

La production en eau usée par type d'usage domestique est présentée dans le Tableau 52. Les résultats de cette étude bibliographique montrent une production totale allant de 84 à 117 l/hab/j. Selon le type d'usage, les toilettes contribuent fortement à l'apport en eaux usées, suivies des bains et des douches.

(l/hab/jour)	WC	Evier de cuisine	lavabo	Bain et douche	Machine à laver	Autres	*Total*
Bulter (1995)[1]	31	13	13	28	17	-	*102*
Gatt (1993)[2]	29	15	9	25	16	-	*94*
Blanic et al (1989)[3]	20	12	-	26	26	-	*84*
Hall et al (1988)[1]	37	-	-	19	13	48	*117*

Tableau 52 : production d'eau usée domestique par type d'usage (**1** en Grande Bretagne ; **2** à Malte ; **3** en France)

Les charges polluantes en MES, en matières oxydables et azotées dans les eaux domestiques en fonction du type d'usage (eaux de vannes, eaux de cuisine, …) (Tableau 53) montrent que la plus grande part des matières en suspension, des matières organiques et azotées proviennent essentiellement des eaux vannes, de cuisine et de lessive. Cependant, la plus faible charge provient généralement des eaux de bains.

(g/hab/j)	MES			DCO			DBO5			Azote		
références	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
Eaux vannes	16	8	13	29	22	-	9	12	11	7	3	4
Eaux de cuisine	23	7	9	17	26	-	10	12	21	0.3	0.8	0.9
Eaux de lessive	7	5	11	29	20	-	9	8	15	0.7	0.3	0.8
Eaux de bain	3	3	2	11	6	-	5	2	3	0.8	0.2	0.3

Tableau 53 : charge polluante des eaux usées domestiques par type d'usage ([1] : Blanic *et al* (1989) ; [2] : Petit *et al* (1976) ; [3] : Siegrist *et al* (1976))

Les flux métalliques journaliers par habitant mesurés dans les eaux usées domestiques (Tableau 54) par (Comber et Gunn, 1996) montrent pour ce bassin versant que les matières fécales (toilettes) représentent une source majeure de Cd, Cu et Zn. Cependant, le Pb provient essentiellement des eaux de lave linge.

Par ailleurs, il semble que les quantités de métaux lourds dans les eaux de bains ne sont pas négligeables devant les autres sources.

(µg/hab/j)	Cd	Cu	Pb	Zn
Eaux de Lave linge	11	977	515	4452
Eaux de Lave vaisselle	1.3	8	6	42
Eaux de lavage de vaisselle à la main	7.8	<20	46	110
Eaux de bains	13.1	67	45	1095
Eaux de toilette (matières fécales)	48	2104	121	11400
total	*81.2*	*3176*	*733*	*17 999*

Tableau 54 : flux métalliques par type d'activité domestique (Comber et Gunn, 1996)

Les apports divers peuvent contenir de la matière organique notamment les tampons et serviettes hygiéniques, les bâtonnets cure-oreilles, le papier toilette…

Ashley (1999) estime en Grande Bretagne que 56 000 tonnes de matières plastiques et d'objets à usage sanitaire sont rejetées annuellement dans les toilettes et 2 500 000 de tampons et 1 400 000 serviettes hygiéniques sont rejetées quotidiennement dans les égouts. La quantité de papier toilette utilisée par personne et par an est de l'ordre de 8.5kg (Anonymus, 1994). Cependant, seulement 90% soit 7.7kg/hab/an est rejetée dans les toilettes.

La pollution associée au papier toilette a été évaluée au cours des travaux de Almeida et al (1999). Ils se trouvent que 546 mg de MES par feuille de papier, 526 mg de MVS par feuille de papier et 706 mg de DCOt par feuille de papier sont associées au papier toilette.

Les apports à usage domestique contribuent à l'apport des matières organiques. Les concentrations des MES, MVS, et de la DCO totale et dissoute dans les eaux domestiques par différents types d'usage sont synthétisées dans le Tableau 55.

g/m3	MES	MVS	DCOt	DCOd
Eaux de Bain	54	9	210	184
Eaux de lavabo	181	72	298	221
Eaux de douche	200	153	501	221
Eaux de cuisine	235	196	1079	644
Eaux de machine à laver	165	97	1815	1164

Tableau 55: concentrations en MES, MVS et DCO t+d dans les eaux de différents dispositifs

Ces valeurs montrent que les eaux de cuisines se caractérisent par de fortes concentrations en matières en suspension et en matières organiques; en revanche, les eaux de machine à laver se distinguent des autres dispositifs par des concentrations en matières organiques très élevées.

Par ailleurs, si on tient compte de tous les apports (physiologiques, eaux de toilette, eaux de différents dispositifs) (Tableau 56), il est clair que les eaux de toilette sont une source majeure des matières organiques et NH3-N. Par contre se sont les eaux de cuisine qui sont régulièrement à l'origine des nitrates rejetées dans le réseau (Almeida et al, 1999).

%	MES	DCOt	NH3-N	NO3-N
Eaux de toilettes	77.4	43.9	97.1	3.8
Eaux de Bain	1.3	2.5	0.6	15.3
Eaux de lavabo	2.1	1.7	0.1	10.7
Eaux de douche	5.1	6.4	0.7	24.6
Eaux de cuisine	10.1	23.2	0.3	38
Eaux de machine à laver	4.0	22.3	1.2	7.6

Tableau 56: contribution des différents dispositifs (Almeida et al, 1999)

2.5 Les eaux industrielles et commerciales

Les eaux usées commerciales et industrielles et en particulier celles des restaurants, contiennent des quantités importantes de matières organiques. Les produits utilisés par les coiffeurs, les esthéticiens, en parfumerie, les produits pharmaceutiques, les plastifiants, les conservateurs, les antioxydants ou encore les solvants utilisés dans les industries ou dans les commerces constituent une source de matières organiques.

Les flux annuels en Cd, Cu, Pb et Zn pour différentes sources commerciales et industrielles sont présentés dans le Tableau 57 (Sörme et Lagerkvist, 2002), à l'échelle de quatre villes suédoises.

(Kg/an)	Cd	Cu	Pb	Zn
Grandes entreprises	0.47	87	21	200
Lavage de voiture	7.7	300	240	2300
Dentistes	-	-	-	-
Conduites et robinets	-	1200	-	200
totale	8.17	1587	261	2700

Tableau 57 : flux annuels en métaux lourds pour quelques sources

D'après Sörme et Lagerkvist (2002), le lavage des voitures peut être considéré comme une source principale pour l'apport en Cd, Pb et Zn. Par ailleurs, le Cu a tendance de provenir de la corrosion du réseau de tuyauterie.

Les concentrations en métaux lourds dans les eaux usées d'origine commerciale et industrielle, pour différents pays européens sont synthétisées dans le Tableau 58.

	Type d'industrie ou de commerce	Concentrations (µg/l)	pays	références
Cd	▪ Tous secteurs	3-1250	Allemagne	Wilder et al 1997
	▪ Industrie pétrolière	300-400	Grèce	NTUA, 1985
Cu	▪ Tous secteurs	37-26000	Allemagne	Wilder et al 1997
	▪ Industries électriques et de métaux	5000-10000	Grèce	NTUA, 1985
	▪ Magasins d'artisanat	20500	Italie	EBAV, 1996
	▪ Bijouteries	700-1900		
Pb	▪ Tous secteurs	<50-13400	Allemagne	Wilder et al 1997
	▪ Industries électriques et de métaux	50	Grèce	NTUA, 1985
	▪ Magasins de céramique	6000	Italie	EBAV, 1996
Zn	▪ Tous secteurs	30-133000	Allemagne	Wilder et al 1997
	▪ Industries électriques et de métaux	60-2830	Grèce	NTUA, 1985
	▪ Bijouteries	1000	Italie	EBAV, 1996

Tableau 58 : concentrations en métaux lourds des effluents industriels et commerciaux

Ces concentrations sont très variables selon le site de mesure et le type d'industrie ou de commerce.

Les concentrations des eaux rejetées par différentes activités industrielles et commerciales (les entreprises de traitement de surface, les restaurants, les commerces de vêtements, de chaussures, les hôpitaux…) à Paris sont regroupées dans le Tableau 59 et le Tableau 60. Ces valeurs varient considérablement selon le type d'activité, en particulier les concentrations en métaux lourds.

Les concentrations en métaux lourds des eaux industrielles et commerciales sont largement supérieures à celles des eaux usées domestiques (Tableau 61).

mg/l	MES	DCO	DBO5	NTK
Traitement de surface	30-399, (163)	132-871, (468)	-	-
Etablissement soins	146-489, (135)	157-1112, (373)	29-239, (106)	16-74, (33)
Restauration	118-1481, (506)	461-2837, (1400)	181-1380, (511)	20-142, (70)
Pressing et teinturerie	164-963, (327)	321-1920, (614)	(334)	26-84, (59)
Blanchisserie	141-376, (165)	322-853, (404)	-	12-63, (35)
Ateliers	170-1636, (742)	504-1452, (945)	402-831, (617)	86-182, (147)
Garage	166-1054, (457)	838-2204, (1630)	-	54-128, (89)
Laboratoire photo	262-1228, (864)	571-3402, (1331)	166-827, (291)	62-44, (139)
Laboratoire d'analyse	20-834, (151)	67-986, (359)	7-447, (166)	14-122, (58)
Autres	(697)	(1630)	(458)	(89)
x-y,(z) : 1er decile-9^{ième} décile,(médiane)				

Tableau 59 : concentrations des MES, et des matières organiques et azotées, dans les eaux usées commerciales et industrielles par type d'activité (cellule des contrôles des eaux, 2003)

µg/l	Cd	Cu	Pb	Zn
Traitement de surface	14-19, (17)	130-1408, (490)	51-59, (55)	222-902, (410)
Etablissement soins	<8	50-180, (90)	<50-60	134-500, (250)
Restauration	-	-	-	-
Pressing et teinturerie	-	-	-	-
Blanchisserie	-	-	-	-
Ateliers	<8	91-212, (155)	<50	367-482, (435)
Garage	<8	104-424, (300)	58-700, (80)	270-732, (390)
Laboratoire photo	-	-	-	-
Laboratoire d'analyse	<8	54-236, (70)	58-106, (90)	135-580, (325)
Autres	<9	390	250	650
x-y,(z) : 1er decile-9^{ième} décile,(médiane)				

Tableau 60 : concentrations des métaux lourds, dans les eaux usées commerciales et industrielles par type d'activité (cellule des contrôles des eaux, 2003)

µg/l	1er décile	médiane	9ième décile
Cd	-	0.2	-
Cu	91	92	101
Pb	15	19	31
Zn	86	92	422

Tableau 61 : concentrations en métaux lourds dans les eaux usées domestiques (Cellules de contrôles des eaux)

Chapitre 3 : Les stocks de dépôt dans le réseau

Différents types de dépôts peuvent être présents dans le réseau d'assainissement unitaire. Ces dépôts sont au nombre de trois (Tableau 62) (Crabtree, 1989) :

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

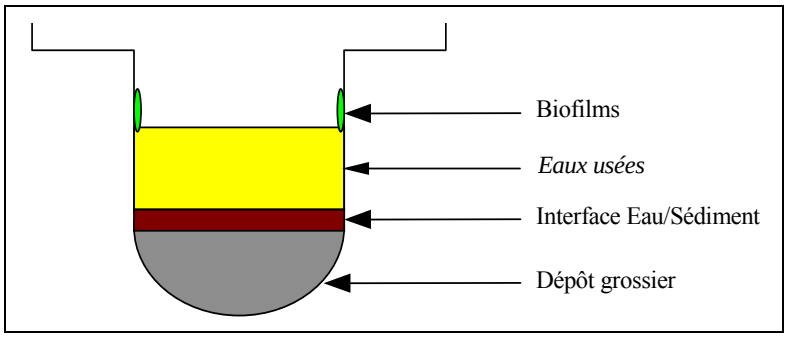


Tableau 62 : différents types de dépôts en réseau d'assainissement unitaire

3.1 Les biofilms

Le biofilm est un film qui se forme sur les parois du réseau. Il est constitué de microorganismes, de substances extracellulaires, de matières organiques et inorganiques (sable et zéolite) (Flemming ; 1995).

Les biofilms se développent par temps sec le long des parois du réseau, au niveau de la zone de battement des eaux, et sont susceptibles d'être arrachés complètement ou partiellement par temps de pluie. Ils se forment sur une épaisseur de quelques millimètres et leurs masses dépendent fortement des conditions hydrauliques de temps sec.

La croissance moyenne des biofilms, en sept jours de temps sec diffèrent selon les études : Gutekunst (1988) trouve 1.7 à 2.2 g/m2/j alors que Dauber et Novak (1982) calculent 7 à 30 g/m2/j. Cette croissance s'accélère avec la durée de temps sec. En effet, un taux de croissance de 57g/m2/j a été mesuré sur une période de 3 semaines de temps sec (Gutekunst, 1988.)

La masse totale des biofilms varie de 10 à 60 g.M.S/m^2. Il faut noter que les caractéristiques physico-chimiques des parois des collecteurs, notamment leur rugosité, sont des facteurs déterminants pour l'apparition du biofilm, cependant ces conditions n'ont aucun effet sur la masse maximale du biofilm ni sur sa sensibilité vis-à-vis de l'érosion (Wolf et Reiff ; 1996).

Les biofilms présentent une teneur élevée en matière organique. Krejci (1987) cite une teneur moyenne en DCO de l'ordre de 0.8 g d'O_2/g. Le taux de matières volatiles varie entre 30 et 60% (Gutekunst, 1988). Par ailleurs, les biofilms seraient très chargés en métaux lourds et en micropolluants. Les valeurs mesurées par Gutekunst (1988) pour des biofilms croissant dans un collecteur d'eaux usées domestiques sont de 4 à 10 mg/kg pour le cadmium, 150 à 300 mg/kg pour le cuivre, 150 à 500 mg/kg pour le plomb et 1000 à 2000 mg/kg pour le zinc.

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

3.2 Les dépôts grossiers

Les dépôts grossiers se déposent sur le fond des collecteurs, dans les endroits où les écoulements sont relativement lents (Oms, 2003).

Plusieurs études ont été réalisées afin de caractériser le dépôt grossier (Ahyerre, 1999 ; Ristenpart et al, 1995 ; Laplace, 1991 ; Verbanck, 1992, Crabtree, 1989). Les résultats obtenus montrent que ce dernier est de nature très minérale : 3-15% de MV (Tableau 63).

	MV (%)	DCO (gO_2/g)	DBO_5 (gO_2/g)	Masse Volumique (kg/m^3)	Teneur en eau (%)
Le Marais (Ahyerre, 1999)	3-13	0,06-0,22	0,01-0,06	2600	41 -65
Hildesheim (Ristenpart *et al.*,1995)	9	0,01-0,27	0,01-0,09	1495	--
Marseille (Laplace, 1991)	2	--	--	2680	15
Bruxelles (Verbanck, 1992)	2-6	--	--	1510	21
Dundee (Crabtree, 1989)	3-15	0,02	0,01	1720	27

Tableau 63: Caractéristiques du dépôt grossier

Les teneurs en métaux lourds du dépôt grossier sur trois sites se trouvant sur le bassin Marais et un site sur celui des Quais sont nettement supérieures aux teneurs mesurées par Michelbach et Whörle (1993) (Tableau 64).

µg/g MS	Cd	Cu	Pb	Zn
Marais et Quais (2003-2004)	2-11, (3)	426-1279, (687)	579-3996, (1271)	1145-4622, (2864)
Michelbach et Wöhrle (1993)	0.3	30	20	260

Tableau 64: teneurs en métaux lourds dans le dépôt grossier

3.3 L'interface eau – sédiment

Plusieurs chercheurs ont identifié les stocks de matière organique situés à l'interface eau-sédiment. Ainsi, différentes appellations ont été définies :

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

3.3.1 Dépôt de type C :

C'est un dépôt composé de particules fines se formant dans des zones d'*eaux mortes*, seul ou au-dessus de dépôt grossier. Ce dépôt se caractérise par des MVS et des teneurs en DCO respectivement de l'ordre de 50% et 76 g/Kg (Crabtree, 1989).

3.3.2 Les « Near Bed Solids »

Se sont des solides transportés près du fond de l'écoulement, en surface des dépôts grossiers. Les prélèvements de ce type de dépôt se font au moyen des « bed traps ». Les études réalisées sur 3 collecteurs de Dundee (Arthur, 1996) montrent que les MVS des solides piégés sont très variables d'un site de mesure à un autre, mais il semble que sur deux de ces collecteurs, on se trouve en présence de particules de nature largement organique. Par ailleurs, les solides piégés par Lin (1993) sur le collecteur 13 à Marseille possèdent des MVS proches du dépôt grossier.

3.3.3 « Fluid Sediment »

L'interface eau-sédiment est aussi considérée comme un « fluid sediment », caractérisé par un saut de concentration en MES près du fond. Le « fluid sediment » n'est pas présent dans tous les collecteurs. Il n'est pas facile de prédire les lieux où on peut le trouver. Selon Ristenpart *et al*. (1995), le fluid sediment est susceptible d'être présent dans des zones de fort ralentissement (par exemple à l'amont des zones de confluence de deux collecteurs).

Les caractéristiques du « fluid sediment » sont présentées dans le Tableau 64. Tous les auteurs ont relevé une importante concentration en MES près du fond mais les concentrations maximales en MES sont variables d'un site à l'autre.

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

Tableau 65: Caractéristiques du « fluid sediment » étudié par différents auteurs

3.3.4 Couche organique

Cette couche a été identifiée au départ par Ahyerre (1999) sur le bassin versant du Marais, comme étant une couche de matière organique et de papiers, située en surface des dépôts grossiers minéraux. Par la suite, elle a été étudiée par Oms (2003) (Figure 42) : caractérisation, localisation et dynamique.

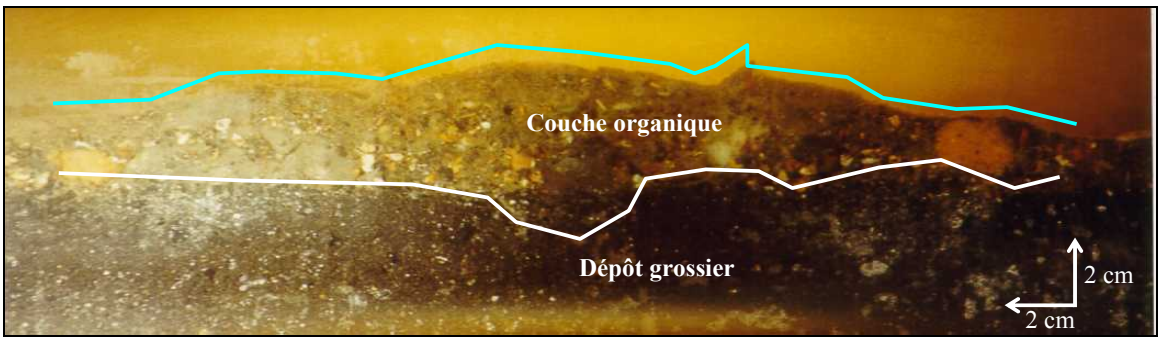


Figure 42: Vue en coupe de l'interface eau-sédiment (Oms, 2003)

3.3.4.1 Localisation, nature et caractéristiques de la couche organique

La présence de la couche organique a été détectée sur les parties amont de trois collecteurs du bassin versant du Marais : St Gilles et Vielle du Temple et Rivoli. Cette couche apparaissait dans les zones où la pente du radier et la vitesse d'écoulement étaient faibles, et dans des endroit où il y avait des creux dans le dépôt grossier. Ainsi, Oms (2003) a défini des critères nécessaires pour trouver la couche organique. Il s'agit de la pente et de la vitesse d'écoulement. Ces deux derniers doivent être respectivement inférieures à 0.05% et 0.14 m/s.

Afin d'identifier la nature de cette couche, un système d'observation « endoscope » (Figure 43) a été utilisé par Oms (2003). Ce dernier permet d'avoir une surface d'approche aussi petite que possible afin de ne pas perturber la couche organique, qui selon Ahyerre (1999) a été décrit comme une couche très peu résistante et facilement érodable.

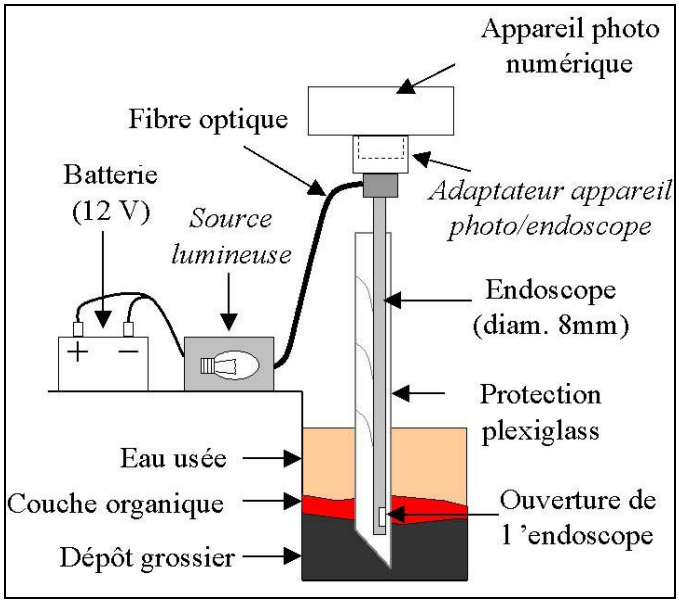


Figure 43 : Système d'observation (Oms, 2003)

Ce système a permis de visualiser plusieurs types de dépôt, parmi lesquels, se trouve la couche organique : A l'interface entre l'eau et le dépôt grossier on observe dans certaines zones une couche immobile composée de particules plus grosses que dans le dépôt grossier mais avec des contours mal définis. Les particules ont des couleurs brunes et orangées. La hauteur de cette couche varie entre 2 cm et 15 cm (Figure 44).

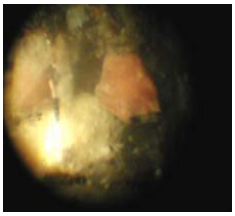


Figure 44: Image de la couche organique obtenue avec l'endoscope (Oms, 2003)

Des prélèvements de la couche organique ont été réalisés avec la boite de prélèvement conçu par Ahyerre (1999). Les caractéristiques de cette couche sont synthétisées dans le Tableau 66. Les teneurs en MVS et en matières organiques indiquent que la couche est de nature très organique.

Les teneurs en polluants de la couche organique mesurées par Oms (2003) sont très comparables à celles mesurées par Ahyerre (1999).

	Ahyerre (1999)	Oms (2003)
MV (g/g)	0.60-0.75,(0.69)	0.63-0.80,(0.76)
DCO/MES (gO_2/gMS)	0.9-1.43,(1.19)	0.8-1.8,(1.5)
DBO_5 /MES (gO_2/gMS)	0.19-0.36,(0.3)	0.25-0.55,(0.4)
DCO/DBO_5	3.9-4.9	-

Tableau 66: caractéristiques de la couche organique, au Marais

3.3.4.2 Dynamique de la couche organique

Pour une meilleure compréhension des phénomènes et des mécanismes de formation et d'érosion de la couche organique, 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.

Le système d'observation utilisé est celui conçu par Ahyerre (1999) lequel a subi quelques modifications par Oms (2003) afin d'obtenir de meilleurs résultats : vitrage, prise d'image, éclairage, mise en place dans l'égout…

Les résultats obtenus montrent 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 ;

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.

Chapitre 4 : Les sorties

4.1 Effluents de temps sec, aux exutoires de réseaux unitaires

Cette étude bibliographique concerne des bassins versants urbains denses, peu industrialisés et drainés par un réseau d'assainissement unitaire. La plupart d'entre eux se situent en France : en particulier à Paris (Marais, Mazas, Coteaux amont, P208[6], Clichy aval) (voir Figure 45), en région parisienne (Bièvre, Amont de la STEP de Colombes, Amont de la STEP d'Achères), à Nancy, Nantes, Marseille, d'autres à l'étranger (Bruxelles, Londres et Corée du Sud, Allemagne « entrée de STEP »). Les caractéristiques des différents bassins étudiés figurent en ANNEXE 4.

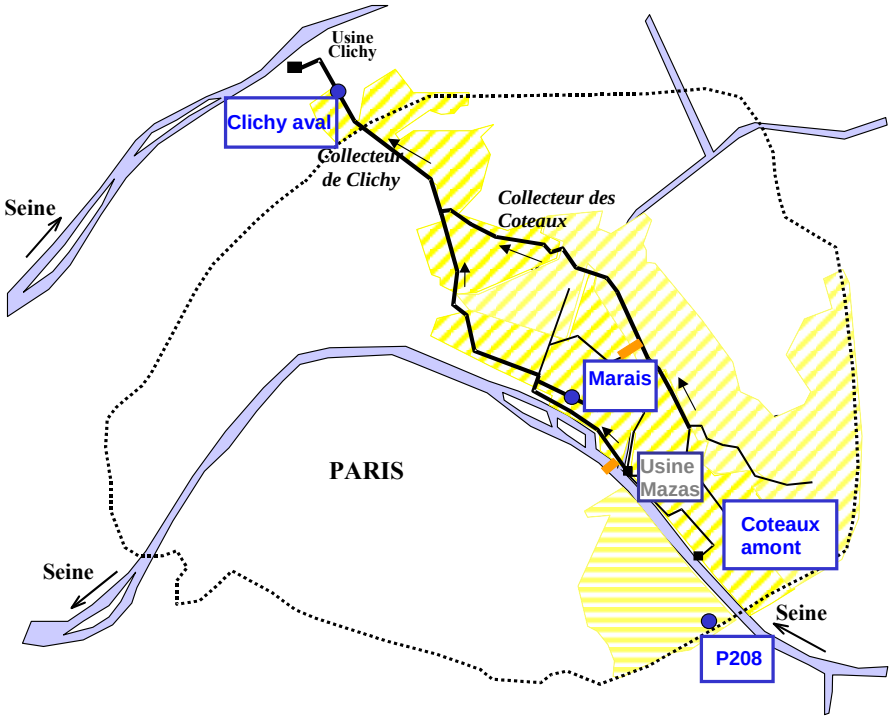


Figure 45 : localisation des sites de mesure parisiens

4.1.1 Paramètres physiques

Le Tableau 67 donne les ordres de grandeurs de la conductivité et du pH des eaux usées de temps sec, à l'aval de réseaux unitaires.

Paramètres physiques	Marais [1]	Amont de la STEP de Colombes [5]	Boudonville (Nancy) [7]	Entrée de STEP, en Allemagne [13]
pH	7.7-7.9, (7.8)	7.5-8.5, (8)	7.1-8.4	7.1-8.5, (7.9)
Conductivité (µS/cm)	864-1009, (960)	830-1100, (1010)	900-972, (944)	-

[1]=Gromaire, 1998 - [5]=Données SIAAP ; 2002 – [7]= LHRSP et Laurensot ; 1998 – [13]= Brombach et al, 2001.
Minimum -Maximum, (Moyenne).

Tableau 67 : paramètres physiques mesurés dans les eaux usées de temps sec

Le pH et la conductivité moyenne ainsi que leurs fourchettes de variations, mesurées dans les eaux usées sont comparables d'un site de mesure à un autre. Leurs valeurs moyennes respectives varient de 7.8 à 8 et de 940 à 1000 µS/cm.

4.1.2 Concentrations moyennes journalières des MES, des matières oxydables et azotées et des métaux lourds

Les concentrations moyennes journalières des matières en suspension, des matières volatiles en suspension, des matières oxydables et azotées et des métaux lourds (Cadmium, Cuivre, Plomb et Zinc), mesurées dans les eaux usées de temps sec sont synthétisées dans le Tableau 68 et le Tableau 69.

[6] Il se trouve sur l'antenne Wattignies du déversoir Vincennes Charenton

Concentrations (mg/l)			MES	MVS	DCO	DBO_5	COT	NTK
Ile de France	Marais [1]		111-194, (157)	91-166, (133)	246-465, (375)	115-212, (117)	-	-
	Mazas [2]		96-239, (146)	-	193-782, (292)	64-106, (88)	-	20-27, (24)
	Coteaux amont [3]		78-151, (109)	-	152-298 (240)	72-137 (105)	-	14-36, (26)
	P208 [2]		40-258, (166)	-	96-582, (347)	30-220, (134)	-	24-58, (42)
	Clichy aval [2-a]		160-372, (223)	-	196-471, (321)	108-185, (139)	-	26-36, (30)
	Bièvre [4]		74-403, (207)	-	175-572, (346)	55-215, (124)	-	22-40, (30)
	Amont STEP Colombes [5]		106-432, (186)	68-380, (125)	189-486, (318)	71-212, (130)	37-181, (92)	18-37, (30)
	Amont STEP Achères[7] [6]	E1	108-758, (244)	-	193-565, (363)	78-270, (153)	-	28-49, (39)
		E2	114-477, (291)	-	364-741, (589)	180-340, (261)	-	46-60, (45)
		E3	222-667, (460)	-	572-809, (688)	190-470, (297)	-	46-73, (61)
		E4	149-412, (267)	-	285-613, (462)	48-240, (185)	-	36-58, (51)
		E5	146-434, (257)	-	300-573, (422)	94-335, (186)	-	42-58, (49)
Nancy	Boudonville [7]		115-263, (185)	-	380-564, (477)	172-183, (178)	-	-
Belgique	Emissaire de Bruxelles [10]		(292)	-	(473)	-	-	-
Corée du Sud	BV1 BV2 BV3 [12]		53.3 56.9 105.6	-	190.6 142.5 233.7	52.8 50.3 87.3	-	11.3 23.9 4.7

[1] : Gromaire, 1998- [2-a] : données SIAAP, 1996 - [3] : Philippe et Ranchet, 1987, LROP, 1980- [4]: LROP et al. ; 1989- [5] : données SIAAP, 2002 ; [6] : données SIAAP, 2003-2004- [7] : LHRSP et Laurensot ; 1998- [8] : Vervank, 1995- [12] : Lee and Bang, 2000-
Minimum -Maximum, (Moyenne)

Tableau 68 : concentrations moyennes journalières des paramètres globaux des eaux usées de temps sec

Les concentrations en MES, en matières oxydables et azotées sont relativement comparables entre les différents bassins versants parisiens. Une légère augmentation en fonction de l'échelle spatiale apparaît néanmoins entre le Marais et Clichy aval pour les MES et la DBO_5.

La qualité des eaux usées de temps sec, aux exutoires des bassins versants parisiens (à l'exception de Coteaux amont) est relativement comparable à celle des eaux usées en amont

de la STEP de Colombes, à Bièvre, Boudonville et à Bruxelles. En revanche, les concentrations des eaux usées de temps sec des bassins versants de la Corée du Sud sont nettement plus faibles que l'ensemble des valeurs de la littérature ; et une évolution en fonction de la taille du bassin versant est observée pour les MES.

Les effluents des émissaires en amont de la STEP d'Achères semblent plus chargés en comparaison avec les effluents parisiens.

Les concentrations des eaux usées de temps sec, mesurées aux exutoires des différents bassins versants trouvés dans la littérature varient beaucoup d'une journée de temps sec à une autre, en particulier celles des émissaires. Cette variabilité au niveau des émissaires est probablement liée aux apports d'effluents de la banlieue.

Les concentrations en métaux lourds sont assez variables entre les bassins parisiens. Ceci est probablement imputable aux activités industrielles présentes sur chaque bassin versant.

Les concentrations en Cd, en Cu et Zn aux niveaux des émissaires sont comparables. Cependant, celles en Pb sont assez variables d'un émissaire à un autre.
Nous remarquons par ailleurs, que le site de Boudonville se distingue de l'ensemble des sites de mesure par des concentrations en métaux lourds faibles (en particulier pour le Pb). Ceci peut être liée à l'occupation du sol et par conséquent à une présence moindre d'activités industrielles rejetant les métaux.

La variabilité d'une journée de temps sec à une autre est très marquée en ce qui concerne les concentrations de tous les métaux lourds étudiés.

[7] E1: émissaire de Clichy_Achères_Bezons, E2: émissaire de Clichy_Achères_Argenteuil, E3 :émissaire de Saint-Denis_Achères, E4 : émissaire de Sèvres-Achères-Ruiel, E5 : émissaire de Sèvres-Achères-Nanterre

Concentrations (µg/l)			Cd	Cu	Pb	Zn
Ile de France	Marais [1]		0.1-0.5, (0.3)	32-133, (73)	5-21, (12)	57-274, (156)
	Mazas [2]		-	-	27-64, (45)	199-691, (412)
	P208 [2]		-	-	35-270, (115)	112-2247, (462)
	Coteaux amont [3]		0.4-10, (5)	-	19-80, (45)	250-570, (415)
	Clichy aval [2-a]		-	-	25-80, (57)	179-737, (397)
	Amont STEP Colombes [5]		(3)	59-108, (79)	50-92, (52)	105-433, (221)
	Amont STEP Achères [6]	E1	3-9, (3.1)	5-156, (82)	25-61, (40)	41-802, (200)
		E2	(3)	53-103, (79)	25-42, (27)	83-375, (196)
		E3	(3)	60-143, (96)	25-58, (33)	22-516, (232)
		E4	(3)	54-97, (73)	(25)	24-309, (162)
		E5	(3)	14-133, (61)	25-45, (26)	20-461, (151)
Nancy	Boudonville [7]		-	(51)	(13)	(117)
Coré du Sud	BV1 BV2 BV3 [12]		-	-	220 230 -	-

[1] : Gromaire, 1998- [2-a] : données SIAAP, 1996 - [3] : Philippe et Ranchet, 1987, LROP, 1980- [5] : données SIAAP, 2002 ; [6] : données SIAAP, 2003-2004- [7] : LHRSP et Laurensot ; 1998- [12] : Lee and Bang, 2000
Minimum -Maximum, (Moyenne).

Tableau 69 : concentrations moyennes journalières des métaux lourds des eaux usées de temps sec

4.1.3 Caractéristiques des particules dans les eaux usées de temps sec

4.1.3.1 Répartition des polluants entre phase dissoute et particulaire

La pollution de temps sec est généralement liée aux particules (Tableau 70). En moyenne, 60 à 90 % des matières oxydables et des métaux lourds transportés par les eaux usées sont sous forme particulaire.

% de pollution liée aux particules	Marais [1]	Amont STEP Colombes [5]	Boudonville [7]	Emissaire de Bruxelles [10]	[9]
% DCO	60-81,(67)	48-81, (66)	-	(72)	(68)
% DBO_5	57-77,(65)	-	-	-	(67)
% Cd	100*	-	-	-	-
% Cu	90-94,(93)	-	(65)	-	-
% Pb	73-97,(89)	-	(70)	-	-
% Zn	76-82,(81)	-	(60)	-	-
[1] : Gromaire, 1998- [5] : données SIAAP, 2002 - [10] : Verbanck, 1995- [11] : Ainger et al, 1997, cité dans Maksimovic, 2001. Minimum -Maximum, (Moyenne). *les concentrations du Cdd sont inférieures au seuil de détection					

Tableau 70 : pourcentage de pollution particulaire des eaux usées de temps sec

4.1.3.2 Teneurs en matières oxydables et en métaux lourds

Les teneurs en matières organiques et en métaux lourds des MES des eaux usées de temps sec sont synthétisées dans le Tableau 71.

Les particules des effluents de temps sec du Marais paraissent plus riches en matières organiques (DCO et DBO5) que celles des autres sites de mesure.

Les teneurs en matières oxydables et en matières volatiles restent comparables entre les différents sites de la littérature (Amont STEP Colombes, Verbanck (1995), et Ainger et al ; 1997 cité dans Maksimovic et 2001). Ces teneurs montrent cependant, que les particules des eaux usées de temps sec sont de nature organique.

Teneurs des particules	Marais [1]	Amont STEP Colombes [5]	Emissaire de Bruxelles [10]	[9]
MVS/MES(g/g)	0.78-0.92,(0.86)	0.5-0.9, (0.68)		(0.8)
DCOp/MES(gd'O_2/g)	1.34-2.09,(1.64)	0.55-2.16, (1.19)	(1.16)	(1.25)
DBO_5p/MES(gd'O_2/g)	0.52-1.05,(0.78)	-	-	(0.67)
Cdp/MES(mg/kg)	1-2.14,(1.8)	-	-	-
Cup/MES(mg/kg)	345-633,(414)	-	-	-
Pbp/MES(mg/kg)	48-73,(60)	-	-	-
Znp/MES(mg/kg)	648-948,(751)	-	-	-
[[1] : Gromaire, 1998- [5] : données SIAAP, 2002 - [10] : Verbanck, 1995- [11] : Ainger et al, 1997, cité dans Maksimovic, 2001. Minimum -Maximum, (Moyenne).				

Tableau 71 : teneurs en matières organiques et en métaux lourds des particules en suspension des eaux usées de temps sec

4.1.3.3 Vitesse de chute des particules

Un certain nombre d'études ont été réalisées pour l'estimation des vitesses de chute des particules des eaux usées de temps sec. On cite par exemple celles faites en France par Chebbo (1992), Gromaire (1998), et Jaumouillié (2002), ou encore celles réalisées à l'étranger, plus précisément, en Allemagne (Michelbach, 1992) et aux Etats Unis (Pisano, 1996). Cependant, ces dernières se sont basées sur des principes de mesure différents et ont conduit à des résultats différents. Cette divergence des résultats est probablement liée, d'une part, au type de protocole, et d'autre part aux caractéristiques du site.

Pour une meilleure comparaison entre les vitesses de chutes, seuls les sites où les Vc ont été mesurées par un même protocole (VICAS-CEREVE, 1995) seront citées.

Le Tableau 72 donne des ordres de grandeurs des vitesses de chute des particules en suspension dans les eaux usées de temps sec. Les vitesses de chute des matières en suspension sont très variables d'un site de mesure à un autre.

MES (mm/s)	Marais [1]	Cordon bleu [9-a]	Jardin des plantes [9-b]
V50	0.01-0.12, (0.06)	0.02	0.03
V80	0.54-1.17, (0.75)	0.27-0.57	0.2-0.6
Minimum-maximum, (moyenne)			

Tableau 72 : vitesses de chute des particules en suspension dans les eaux usées de temps sec

La Figure 46 représente les courbes de vitesses de chute des particules en suspension mesurées dans les eaux usées de temps sec du Marais (Gromaire, 1998) et des deux sites Nantais « Cordon Bleu » et « Jardin Des Plantes » (Jaumouillié, 2002). Cette comparaison montre que les courbes de vitesses de chute mesurées aux deux sites Nantais coïncident avec l'enveloppe supérieure du fuseau des courbes mesurées au Marais. Par ailleurs, les deux sites nantais possèdent des courbes de Vc très similaires. Cette différence entre les résultats peut être liée d'une part aux caractéristiques des sites de mesure, et d'autre part au nombre de mesures réalisées.

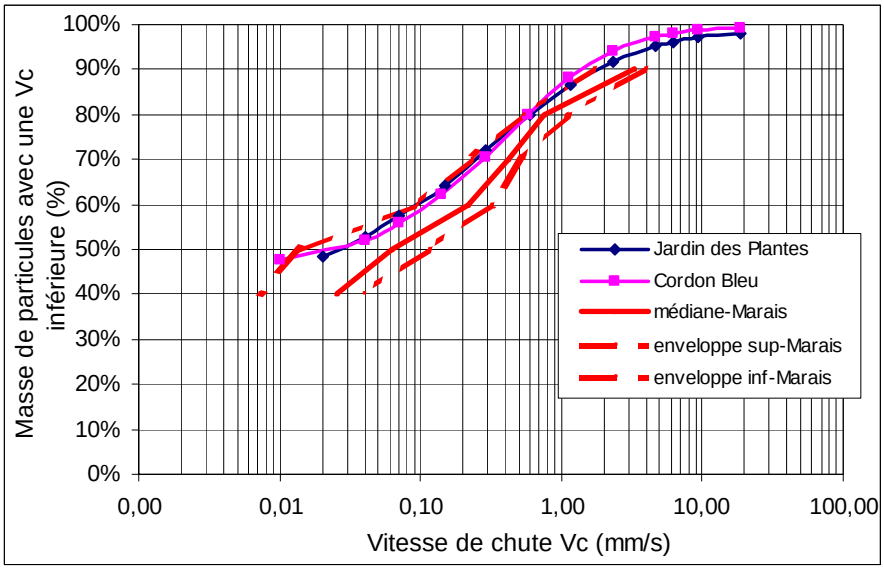


Figure 46 : vitesses de chutes des matières en suspension dans les eaux usées de temps sec

4.1.3.4 Rapport DCO/DBO5

Pour une meilleure caractérisation des eaux usées de temps sec, le rapport DCO/DBO_5, traduisant la biodégradabilité de l'effluent a été calculé (Tableau 73). Ce dernier est généralement du même ordre de grandeur entre les différents sites de mesure. Il varie en moyenne entre 2.1 et 2.9.

site		DCO/DBO_5
Marais [1]		1.5-2.6, (2.1)
Mazas [2]		2.2-4.5, (2.8)
P208 [2]		2.1-4.4, (2.9)
Clichy Aval [2-a]		1.1-3.7 (2.4)
Amont STEP Colombes [5]		1.6-3.8, (2.5)
Amont STEP Achères [6]	E1	1.9-3.3, (2.4)
	E2	1.9-2.8, (2.3)
	E3	1.9-3.8, (2.6)
	E4	2.1-5.9, (2.7)
	E5	1.6-3.7, (2.4)
Bièvre [4]		2.6-3.6, (2.9)
[1] : Gromaire, 1998- [2-a] : données SIAAP, 1996 – [5] : données SIAAP, 2002 ; [6] : données SIAAP, 2003-2004. Minimum -Maximum, (Moyenne).		

Tableau 73 : valeur du rapport DCO/DBO5 des eaux usées de temps sec

4.2 Effluents unitaires de temps de pluie, aux exutoires des réseaux unitaires

Cette étude bibliographique concerne des bassins versants d'échelle spatiale croissante se trouvant dans Paris Intra-Muros (Marais, Coteaux amont et surverse de l'usine de Clichy) et un site situé sur l'antenne Wattignies allant vers le déversoir Vincennes Charenton (P208) ; et d'autres bassins versants localisés en Ile de France, à Nancy, en Espagne et en Corée du Sud. Leurs caractéristiques se trouvent en ANNEXE 5.

.

4.2.1 Caractéristiques des évènements pluvieux étudiés

Les caractéristiques des évènements pluvieux (hauteur totale précipitée, Intensité moyenne, Intensité maximale et durée moyenne) trouvés dans la littérature sont résumées dans le Tableau 74.

L'analyse de ces valeurs montre une variabilité dans les caractéristiques entre les différents sites de mesure. Par ailleurs ces évènements peuvent être considérés comme étant de faible ampleur. Toutefois, l'on remarque que les évènements pluvieux enregistrés sur le bassin versant des Coteaux et ceux d'Ile de France sont faibles par rapport à ceux mesurés au Marais.

Caractéristiques des évènements pluvieux	Hauteur d'eau (mm)	I moy (mm/h)	Imax5 ou Imax* (mm/h)	Durée moy (h : mn)
Marais [1]	1.3-20.8, [5.9]	0.7-42, [3.7]	1.2-89.6, [12]	[1 :45]
Coteaux amont [3]	0.2-24.4,[5.4]	1-6.5, [2.2]	-	0 :12-7 :55 ;[2 :02]
BV d'Iles de France [13]	2.6-11.4	0.9-1.9	4.8-8.4	-
Boudonville [7]	2-11.5, [3]	-	6-18*, [12]*	0 :20-3 :00
Santiago de Compostela [15]	4-17.6	-	2.4-17.4*	-
[1] :Gromaire ; 1998 - [3] : Philippe et Ranchet, 1987, LROP, 1980- [7] : LHRSP et Laurensot ; 1998- [13]:Saget ; 1994, - [15] : Diaz-Fierros et al. ; 2002. Minimum-Maximum, [Médiane]				

Tableau 74 : caractéristiques des évènements pluvieux de la littérature

4.2.2 Concentrations des matières en suspension et des matières oxydables et azotées, en moyenne sur l'évènement pluvieux

Les ordres de grandeurs des concentrations des eaux unitaires, en moyenne sur l'événement pluvieux, figurent dans le Tableau 75.

L'analyse de ces valeurs ne montre aucune tendance de la variabilité des concentrations en fonction de la taille du bassin versant. Les concentrations moyennes à l'échelle de l'évènement pluvial sont assez variables d'un site de mesure à un autre.

Une forte variabilité d'un événement pluvieux à un autre est remarquée. Celle-ci peut être liée aux caractéristiques de la pluie, et à la durée de temps sec précédente.

Concentrations (mg/l)		MES	MVS	DCO	DBO_5	NTK
France	Marais [1]	87-874,(273)	53-514,(179)	100-1084,(377)	27-362,(154)	-
	Coteaux amont [3]	118-509,(243)	-	126-582,(276)	37-113(78)	-
	P208 [2]	117-263,(112)	-	108-338,(259)	25-99,(72)	5-20,(14)
	Surverse de l'usine de Clichy [2-b]	92-484,(250)	-	112-433,(278)	35-140,(78)	7-26,(17)
	BV Ile de France [13]	267-570, (421)	(215)	381-632,(478)	118-231,(153)	24-29,(27)
	Boudonville [7]	[472]	-	[851]	[236]	-
Coré du Sud [12]	BV1	656	-	367	130	14
	BV2	74		163	86	12
	BV3	557		278	122	12
Espagne [14]	Santiago de Compostela	281-394,(309)	-	306-537,(394)	103-220,(155)	17-43,(31)

[1] : Gromaire, 1998 -[2] : données SIAAP, 1996 - [2-b] et [13] : Saget et al, 1994, base Qastor [3] :Philippe et Ranchet ; 1987, LROP ; 1980 - [7] : LHRSP et Laurensot ; 1998 - .[12] :Jun Ho Lee et Ki Woong Bang ; 2000-.[14] : Diaz-Fierros et al. ; 2002 -.
Minimum -Maximum, (Moyenne), [Médiane]

Tableau 75 : concentrations des paramètres globaux des eaux unitaires, en moyenne sur l'événement pluvieux.

4.2.3 Concentrations des métaux lourds, en moyenne sur l'évènement pluvieux

Les concentrations en cadmium, cuivre, plomb et zinc, mesurées dans les effluents unitaires de temps de pluie de différents bassins versants urbains se trouvent dans le Tableau 76.

Ces concentrations sont plus variables d'un site de mesure à un autre. Les valeurs les plus faibles sont souvent mesurées au Marais (pour le Cd), à Boudonville et aux bassins versant de

la Corée du Sud (pour le Pb) et à P208 (pour le Pb et le Zn). Par ailleurs, les concentrations les plus fortes sont mesurées dans les effluents des BV d'Ile de France pour le Cd et le Pb.

Ces différences entre les bassins versants peuvent être expliquées par des activités industrielles minimes, par un trafic automobile moins dense ou par l'absence de toitures fabriquées en métaux lourds.

Quelque soit le site considéré, et quelque soit le métal mesuré, une grande variabilité d'une pluie à une autre est observée. Cette dernière est certainement liée à la présence d'activités industrielles susceptibles de rejeter des métaux lourds, à l'intensité du trafic automobile, ou encore aux caractéristiques des évènements pluvieux qui visiblement sont différents d'un bassin versant à un autre.

Une augmentation en fonction de l'échelle spatiale semble apparaître cependant entre le Marais et Clichy pour l'ensemble des métaux étudiés. Cette dernière est d'autant plus marquée pour le cadmium.

Concentrations (µg/l)		Cd	Cu	Pb	Zn
France	Marais [1]	0.5-4.9, (1.5)	31-269, (117)	77-505, (211)	817-3503, (1530)
	Coteaux amont [3]	1.2-20,(10)	-	90-390,(260)	910-2660,(1850)
	P208 [2]	-	-	101-182,(135)	383-740,(598)
	Surverse de l'usine de Clichy [2-b]	1-9,(3)	58-318,(153)	59-832,(259)	824-4360,(1752)
	BV Ile de France [13]	6-26,(13)	-	198-566,(393)	837-2276,(1395)
	Boudonville [7]	-	(16)	(99)	(631)
Coré du Sud [12]	BV1	-	-	90	-
	BV2			10	
	BV3			40	

[1] : Gromaire, 1998 -[2] : données SIAAP, 1996 - [2-b] et [13] : Saget et al, 1994, base Qastor [3] :Philippe et Ranchet ; 1987, LROP ; 1980 - [7] : LHRSP et Laurensot ; 1998 - .[12] :Jun Ho Lee et Ki Woong Bang ; 2000-
Minimum -Maximum, (Moyenne)

Tableau 76 : concentrations des métaux lourds des eaux unitaires, en moyenne sur l'événement pluvieux.

4.2.4 Caractéristiques des particules des effluents unitaires de temps de pluie

4.2.4.1 Répartition de la pollution entre phase dissoute et particulaire

Plusieurs études (Chebbo, 1992 ; Chocat et Eurydice, 1997 ; Gromaire, 1998) ont montré que les particules sont le principal vecteur de la pollution organique et métallique des effluents unitaires de temps de pluie.

Ainsi, les proportions de la pollution particulaire mesurées dans les effluents unitaires de temps de pluie d'un certain nombre de bassins versants sont représentées dans le Tableau 77.

% de pollution liée aux particules	Marais [1]	Clichy [2-b]	Boudonville [7]	Collecteur 13 [8]
% DCO	64-94,(82)	-	-	83-92
% DBO_5	59-95,(80)	-	-	83-91
% NTK	-	-	-	78-80
% Cd	90-100,(99)	49-86,(73)		-
% Cu	87-99,(96)	83-98,(91)	(95)	-
% Pb	91-99,(86)	66-97,(87)	(98.5)	82-99
% Zn	38-99,(88)	65-90,(80)	(97)	-
[1]=Gromaire, 1998 - [2-b] : Saget et al, 1994, base Qastor [7]= LHRSP et Laurensot ; 1998 - .[8] : Chebbo ;1992. Minimum -Maximum, (Moyenne)				

Tableau 77 : pourcentage de la pollution liée aux particules des eaux unitaires, en moyenne sur l'événement pluvieux

En moyenne, plus de 80% des matières organiques et 40 à 99% (voire 100% pour le cadmium) des métaux sont transportés sous forme particulaire.

4.2.4.2 Teneurs en matières oxydables et en métaux lourds

Les teneurs en matières volatiles, en matières oxydables et en métaux lourds des particules en suspension dans les eaux unitaires de temps de pluie sont synthétisées dans le Tableau 78.

Les particules véhiculées par temps de pluie, aux exutoires des bassins versants trouvés dans la littérature sont de nature organique.

Les fourchettes de variation des teneurs en matières oxydables sont beaucoup plus larges sur le Marais que sur le Collecteur 13.

Toutefois, il apparaît globalement qu'en moyenne, les teneurs en métaux lourds sont comparables entre les sites parisiens. En revanche, les teneurs mesurées par (Michelbach et

al ; 1992) semblent beaucoup plus faibles que les teneurs mesurées sur les deux sites parisiens.

Les teneurs en Pb et en Zn des effluents du Marais et de Clichy sont supérieures aux teneurs maximales autorisées pour l'utilisation agricole des boues (800 mg/Kg pour le Pb et 3000 mg/Kg pour le Zn), posant ainsi un problème pour les boues résultantes d'une épuration des eaux de temps de pluie.

Teneurs des particules	Marais [1]	Clichy aval [2-b]	Collecteur 13 [8]	Bad Mergendheim [17]
MVS/MES (g/g)	0.41-0.84,(0.67)	-	0.24-0.55	-
DCOp/MES (gd'O_2/g)	0.7-1.73,(1.22)	-	0.93-1.34	-
DBO_5/MES (gd'O_2/g)	0.18-0.8,(0.48)	-	0.23-0.6	-
Cdp/MES (mg/kg)	3-8,(14)	4-17,(12)	-	1.55-6.52
Cu/pMES (mg/kg)	300-900,(500)	358-726,(571)	-	73-187
Pbp/MES (mg/kg)	400-2100,(900)	329-1873,(964)	-	33-294
Znp/MES (mg/kg)	3900-12100,(6877)	2692-9643,(6068)	-	1136-1880
[1]=Gromaire, 1998 - [2-b] :Saget -base Qastor ; 1994 - [8] Chebbo 92 et Saget -94- [15] : Michelbach et al ; 1992. Minimum -Maximum, (Moyenne).				

Tableau 78 : teneur en matières oxydables et en métaux des eaux unitaires, en moyenne sur l'événement pluvieux

4.2.4.3 Vitesses de chute des particules dans les eaux unitaires de temps de pluie

Compte tenu de la forte variabilité des résultats concernant les vitesses de chute, nous nous sommes contentés de présenter ceux où un même protocole de mesure avait été utilisé, en l'occurrence le protocole VICAS. Ces résultats sont représentés dans la Figure 46, et concernent les sites de La Molette (Ruscassier, 1996), Le Marais (Gromaire, 1998), Cordon Bleu (Jaumouillié, 2002), « Vincennes, Jules Guesdues et Champigny Eglise » (DSEA 94, 2003) et Sarge-Le-Mans (Chebbo et al, 2003).

Les caractéristiques des sites de mesure ainsi que celles des événements pluvieux étudiés figurent en ANNEXE 5.

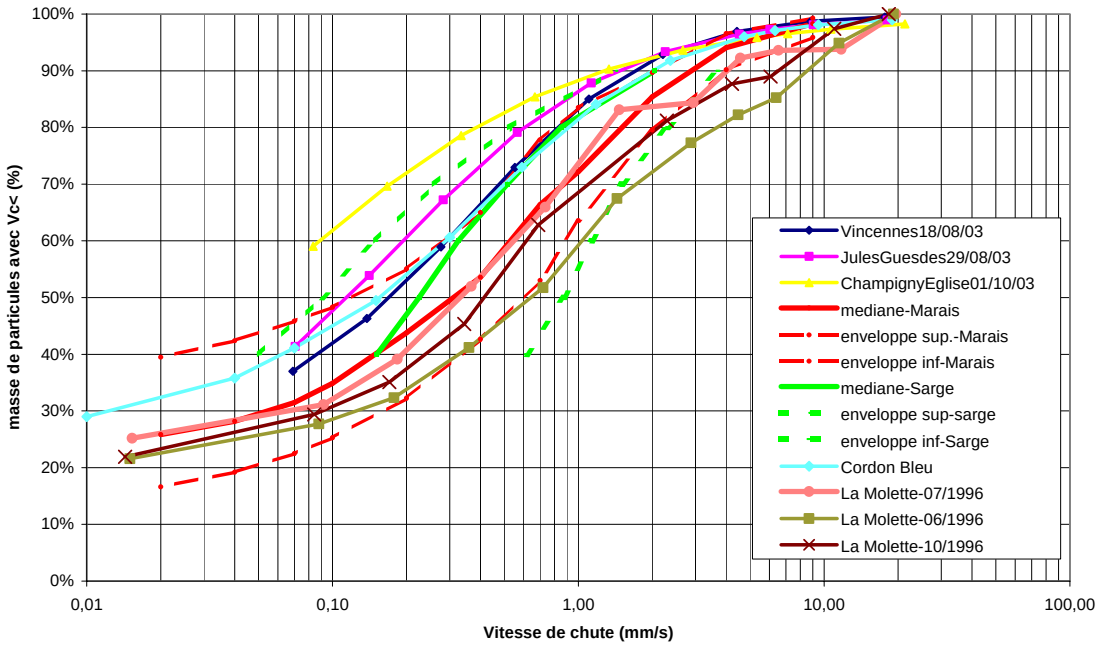


Figure 47: courbes de vitesses de chute des particules en suspension, dans les eaux unitaires de temps de pluie

Une importante variabilité d'un évènement pluvieux à un autre des vitesses de chute des MES apparaît sur les sites du Marais et de Sarge-Le-Mans.

La comparaison entre les différents sites de mesure montre que la majorité des courbes de vitesses de chute sont comprises dans le fuseau du Marais et de Sarge-Le-Mans. D'ailleurs, plusieurs d'entre elles sont superposées. La vitesse médiane V50 varie entre 0.09 et 0.9 mm/s.

Par ailleurs, les particules en suspension des eaux unitaires de temps de pluie des sites du Marais, Sarge-Le-Mans et La Molette décantent avec des vitesses de chute plus élevées que celles de Cordon bleu et des sites de la DSEA 94.

4.2.4.4 Distribution des polluants par classe de vitesses de chute

Très peu de données existent sur la distribution des polluants par classe de vitesse de chute de chute des particules en suspension.

Les courbes de vitesses de chute des métaux lourds (Pb, Cu et Zn) trouvées dans la littérature ont été mesurées par Michelbach (1992), Baker (1997) et Benoist (1990), et sont représentées dans la Figure 48.

Ces résultats sont très divergents. Les courbes de vitesses de chute obtenues par les trois protocoles (principe de la couche surnageante par Michelbach et Baker et celui de la suspension homogène pour Benoist) sont très différentes. Ces différences remarquables peuvent être attribuées : au principe de mesure, à l'échantillon utilisé et à la gamme de vitesse de chute au sein d'un même échantillon.

Par ailleurs, les faibles pourcentages en masse correspondants aux faibles vitesses de chute, mesurés par Michelbach (1992) pour les trois métaux, peuvent être expliqués par le fait que les particules ayant des vitesse très faibles (<3.6m/h) n'ont pas été prises en compte dans l'établissement des courbes de vitesses de chute.

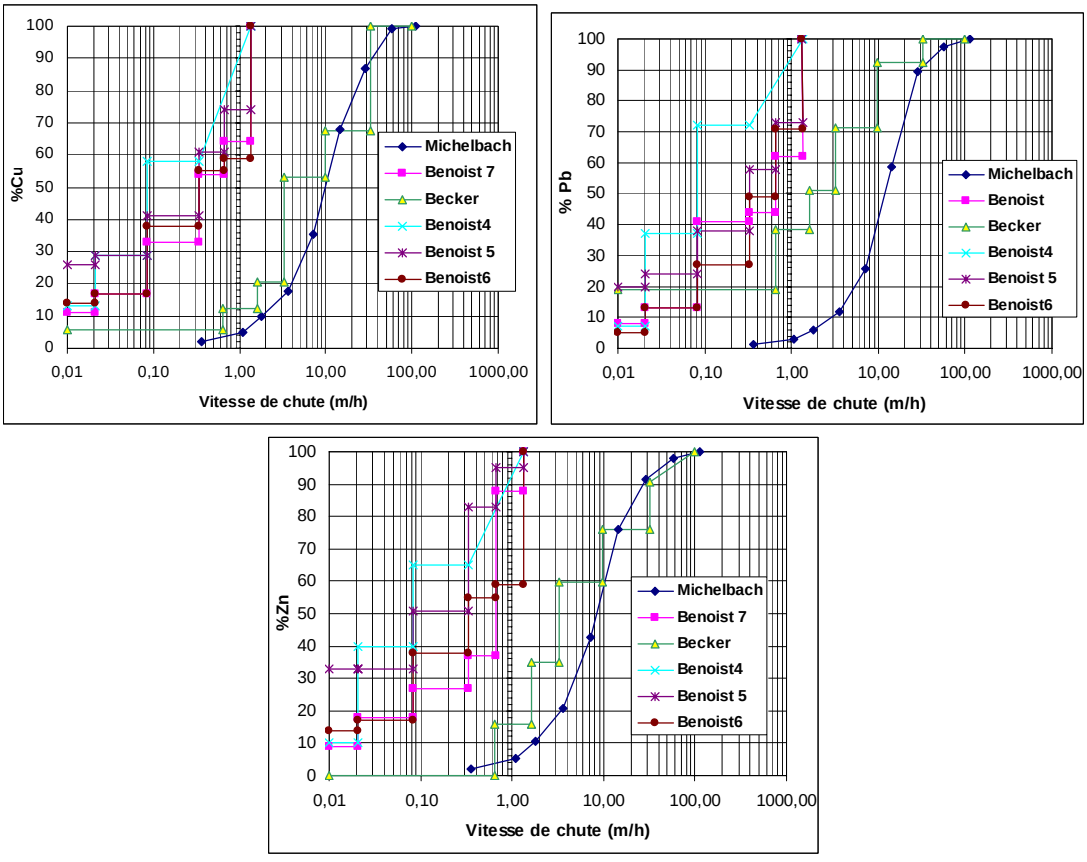


Figure 48: courbes de vitesses de chute des métaux lourds

Des courbes de teneurs en métaux lourds ont été tracées par (Michelbach, 1992 ; Benoist, 1990, et Baker, 1997) (voir Figure 49, Figure 50, Figure 51).

Les résultats de Michelbach (1992) montrent que les particules ayant des vitesses de chute les plus fortes possèdent les concentrations en MES et les teneurs en métaux lourds plus élevées. En revanche, les résultats obtenus par Benoist (1990) et Baker (1997) sont complètement différents, et il est difficile de remarquer une nette tendance.

Ces différences peuvent être liées à la différence dans les protocoles de mesure ou encore aux caractéristiques de l'événement pluvieux et ceux des sites de mesure

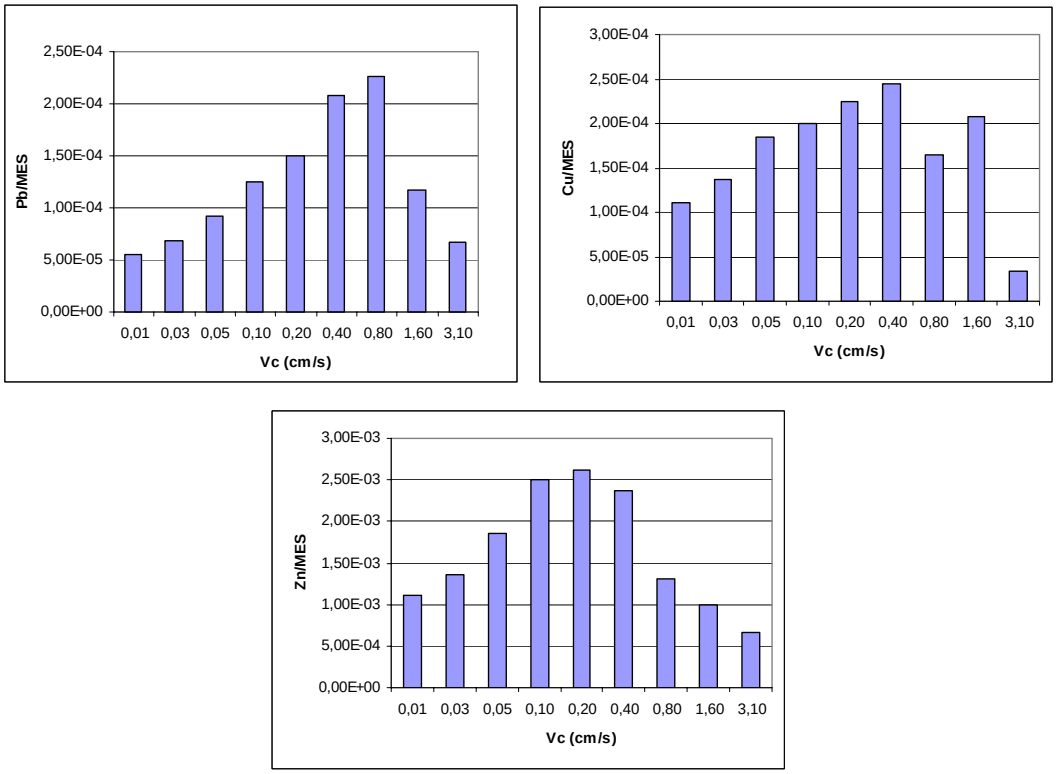


Figure 49: teneurs en métaux par classe de vitesse de chute (Michelbach, 1993)

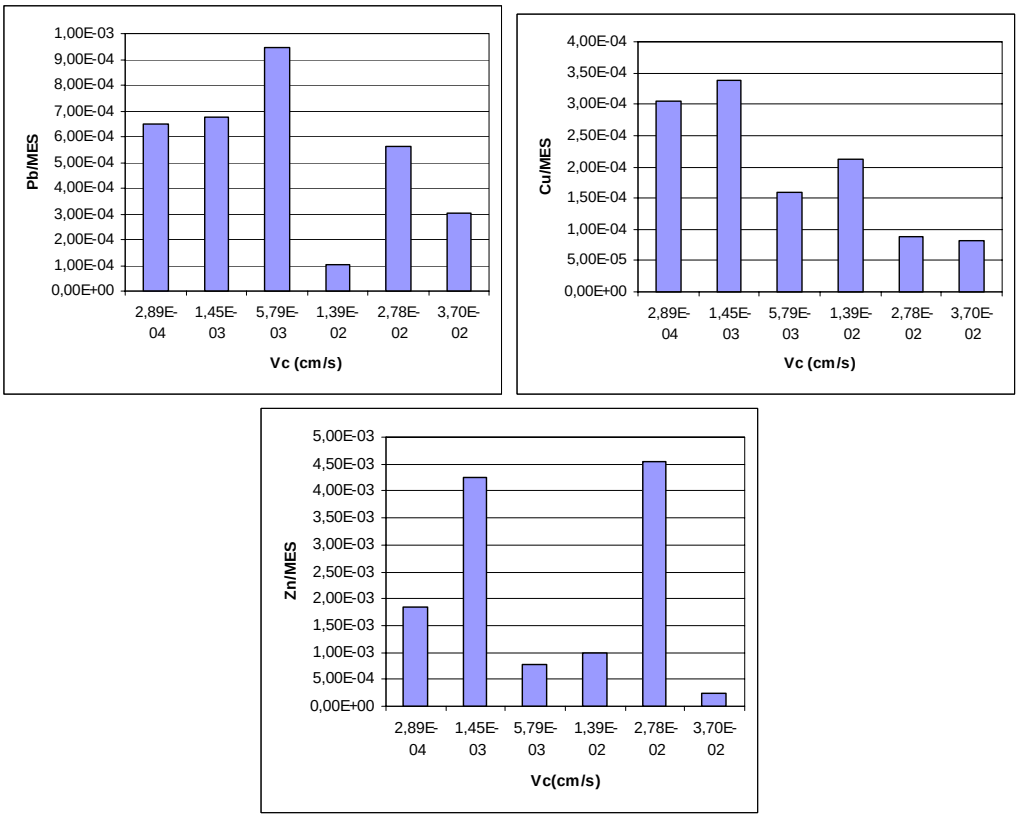


Figure 50 : teneurs en métaux par classe de vitesse de chute (Benoist, 1990)

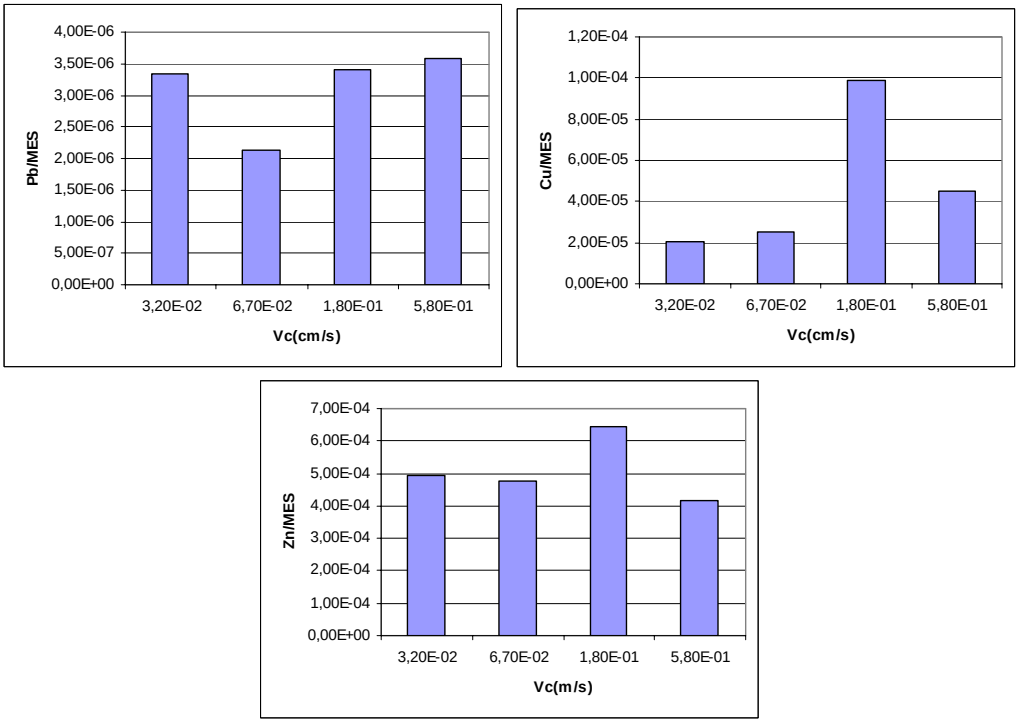


Figure 51 : teneurs en métaux par classe de vitesse de chute (Baker, 1997)

Compte tenu de ceci, il est difficile d'établir une tendance nette en terme de distribution des MES ou encore en terme de métaux par classes de vitesse de chute des particules.

A l'issue de cette analyse, il apparaît que jusqu'à présent, on ne dispose pas de données fiables sur la distribution des polluants par classe de vitesse de chute. Et par conséquent, il serait intéressant au cours de cette étude, de donner des ordres de grandeurs sur les Vc de différents polluants tels que : MES et MVS, DCO, COP, NTK, et métaux lourds. Et de regarder l'évolution de cette distribution en fonction de l'échelle spatiale.

Chapitre 5 : Contribution des différentes sources aux flux de polluants de temps de pluie

Trois sources de pollution de temps de pluie ont été déterminées, à l'exutoire des réseaux d'assainissement unitaires : les eaux usées, les eaux de ruissellement et le stock de dépôt contenu dans le réseau.

Plusieurs études réalisées ont évalué la contribution de ces trois sources de pollution : Krejci (1987), Bachoc (1992), Chebbo (1992), LHRSP (1994), et Gromaire (1998). Chacune de ces études utilisait une méthode de calcul différente et basée sur quelques hypothèses.

Krejci (1987), Bachoc (1992), et Chebbo (1992) ont suivi des méthodes indirectes :

- Pour Krejci et al (1987), les masses de pollution provenant des eaux usées ont été évaluées à partir des flux mesurés par temps sec et celles des eaux de ruissellement ont été calculées à partir des concentrations moyennes annuelles mesurées dix ans plus tôt à l'exutoire d'un bassin versant séparatif proche du site pilote.
- L'évaluation de Bachoc (1992) est basée sur les masses et les teneurs en matières volatiles des MES transférées à l'exutoire du BV 13 et sur les hypothèses suivantes :
  - la proportion de solides provenant des eaux usées est négligeable ;
  - la contribution des eaux de ruissellement pour ces deux pluies est supérieure à la contribution moyenne annuelle calculée par [Chebbo ; 92] ;
  - la teneur en matières volatiles des particules en suspension dans les eaux de ruissellement est comprise entre 17% (correspondant à la valeur maximale relevée, pour un événement, à l'exutoire de 4 bassins versants séparatifs, plutôt périurbains) et 35% (valeur double de la précédent, pour tenir compte du fait que, le BV 13 étant situé en centre ville, ces eaux de ruissellement sont sans doute plus organiques) ;
  - la teneur en matières volatiles des solides provenant des dépôts en réseau est inférieure à celles des particules en suspension dans les eaux usées, soit 80%.
- Chebbo (1992) a évalué la masse totale de pollution véhiculée par temps de pluie à l'exutoire du réseau unitaire à partir des concentrations moyennes annuelles des effluents de temps d'orage de quatre sites unitaires. La masse des eaux usées a été évaluée à partir des flux mesurés par temps sec à l'exutoire de ces mêmes sites, et de la durée de pluie

annuelle. La masse apportée par les eaux de ruissellement a été calculée à partir du volume total écoulé par temps de pluie à l'exutoire du réseau unitaire auquel on affecte la concentration moyenne annuelle établie à partir des mesures effectuées à l'aval de sept réseaux d'assainissement séparatifs.

En revanche, LHRSP (1994) et Gromaire (1998) ont adopté une méthode directe :

- L'étude faite par LHRSP (1994) concerne les métaux lourds. Les concentrations métalliques dans les eaux de ruissellement ont été mesurées sur des échantillons moyens prélevés au niveau de trois avaloirs drainant trois rues à trafic différent et de neuf gouttières de toiture. La masse totale de métaux produite par le bassin versant a été mesurée à l'exutoire. La masse de métaux due aux eaux usées a été déduite de la valeur mesurée par temps sec, au cours d'une seule journée de mesure.
- En ce qui concerne l'étude réalisée par Gromaire (1998), la contribution des trois sources à été évaluée pour les MES, les matières oxydables et les métaux lourds, en suivant la méthode suivante :
  - Les flux de polluants des eaux usées transférées au cours de l'événement étaient identiques à ceux mesurés à l'exutoire du bassin versant par temps sec, à la même saison, pour le même type de journée (jour de semaine ou samedi ou dimanche) et à la même heure de la journée.
  - Les masses de polluants dans les eaux de ruissellement ont été évaluées à partir du volume ruisselé et des concentrations mesurées pour l'événement pluvieux en question au niveau de 4 à 11 toitures, de 3 chaussées et de 3 cours expérimentales.
  - La masse à l'exutoire du bassin versant a été évaluée à partir du volume d'eau unitaire et de la concentration moyenne mesurée pour l'événement pluvieux, à l'exutoire du bassin. Enfin, l'échange avec le réseau a été évalué par différence entre la masse totale véhiculée à l'exutoire et la masse apportée par les eaux de ruissellement et les eaux usées de temps sec.

5.1 Contribution des différentes sources de pollution aux flux de MES et de matières oxydables, à l'échelle de l'évènement pluvial

Les pourcentages de contribution des trois sources à la pollution de temps de pluie, en terme de MES, de matières oxydables sont synthétisés dans le Tableau 79.

Selon Krejci et al (1987) environ 60% des MES, DCO et COT proviennent du réseau. Par ailleurs, les eaux de ruissellement produiraient respectivement 35% et 20% de la masse des MES et de matières organiques. Alors que les eaux usées contribueraient seulement à hauteur de 6% des masses de MES et de 20% des masses des matières organiques.
Bachoc (1992) trouve que 30 à 44% des MES transférées à l'exutoire du BV 13 proviennent des dépôts présents dans le réseau. Les particules de dépôt érodées par temps de pluie possèdent une nature fortement organique, avec une teneur en MVS de 60 à 80.
Les résultats des travaux de Chebbo (1992) à l'échelle annuelle montrent que le ruissellement est la source majeure de MES et de DCO (respectivement 56 et 45%), alors que les eaux usées sont la principale source de DBO_5 (55%). Par ailleurs, l'échange avec le réseau ne représente que 20% de la masse de pollution annuelle des eaux unitaires.

Par ailleurs, Gromaire montre que pour les MES et les matières organiques, la pollution des eaux de ruissellement du bassin versant représente moins de 30% de la pollution totale véhiculée au cours d'une pluie à l'exutoire. Cette pollution est due majoritairement au ruissellement des chaussées, qui génère 40 à 70% de la masse totale de particules et de la matière organique des eaux de ruissellement. La contribution des eaux usées à la masse de MES, MVS, DCO et DBO_5 produite au cours d'une pluie varie fortement d'un événement pluvieux à l'autre. Elle varie en moyenne entre 21 et 39%. Par ailleurs, Gromaire confirme le rôle primordial des stocks de pollution présents à l'intérieur du réseau unitaire, comme source de pollution des eaux de temps de pluie. Dans le cas du Marais, 30 à 80% de la masse polluante en MES, MVS, DCO et DBO5 est attribuable aux stocks du réseau. De plus, le réseau contribue à l'apport de matière organique sous forme particulaire (36 à 81% pour la DCOp et 39 à 85% pour la DBO5).

%	Eaux usées				Ruissellement				Réseau			
	1	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**
MES	(6)	-	20	4-43, [21]	(35)	-	56	9-25, [15]	(59)	30-44	24	40-81, [69]
MVS	-	-	-	6-53, [28]	-	-	-	6-18, [12]	-	-	-	38-82, [63]
DCO	(20)	-	33	9-62, [34]	(22)	-	45	10-29, [15]	(58)	-	22	26-72, [51]
DBO5	-	-	55	11-63, [39]	-	-	23	5-12, [7]	-	-	22	32-80, [54]
COT	(18)	-	-	-	(20)	-	-	-	(62)	-	-	-
x-y,[z] = 1er décile-9^{ième} décile, [médiane], x-y :min-max , x :(moyenne),												

Tableau 79 : contribution des différentes sources à la pollution organique de temps de pluie (**1** : krejci et al, 1987, **2** :Bachoc, 1992 ; **3** : Chebbo, 1992 ; **4** : Gromaire, 1998)

Ces différentes études ont mis en évidence l'importance de la contribution des dépôts en réseaux d'assainissement unitaires à la pollution de temps de pluie. En parallèle, d'autres études ont montré que cette contribution est liée à l'érosion d'un stock de matière organique situé à l'interface entre les eaux usées et les dépôts du réseau : « l'interface eau-sédiment » (Crabtree, 1989 ; Ristenpart *et al*., 1995 ; Verbanck, 1995 ; Arthur, 1996; Ahyerre, 1999). L'étude la plus récente (Ahyerre, 1999) sur le Marais a permis d'identifier le type de dépôt contribuant à la pollution de temps de pluie. Pour cela, une comparaison entre les particules érodées et les particules en stock dans le réseau a été faite. Cette comparaison a montré que les charges particulaires en polluants organiques de la couche organique identifiée à l'interface eau-sédiment sont très proches de celles des particules érodées, et les masses de polluants accumulées dans la couche organique à l'échelle annuelle ou à l'échelle de l'évènement pluvieux sont du même ordre de grandeurs que les masses érodées dans le réseau. Ceci indique que la couche organique est la principale source de la pollution de temps de pluie, à l'échelle du bassin versant du Marais.

5.2 Contribution des différentes sources de pollution aux flux de métaux lourds, à l'échelle de l'événement pluvial

La contribution des différentes sources à la pollution métallique des eaux unitaires de temps de pluie est présentée dans le Tableau 80, le Tableau 81, et le Tableau 82.

%	Cadmium			Cuivre			Plomb			Zinc		
	1er déc.	méd.	9ème déc.	1er déc.	méd.	9ème déc.	1er déc.	méd.	9ème déc.	1er déc.	méd.	9ème déc.
Eaux usées	1	4	8	3	17	41	0	1	4	0	2	4
ruissellement	57	105	190	20	34	72	104	142	185	146	163	204
Réseau	-114	-13	39	11	45	67	-86	-43	-5	-108	-70	-46

Tableau 80 : contribution des différentes sources à la pollution métallique de temps de pluie à l'exutoire du Marais (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%) (Gromaire, 1998)

%	Toitures	Voirie	Eaux usées	Réseau
Cd	44	56	0	0
Cu	24	54	19	3
Pb	33	32	31	4
Zn	72	12	13	3

Tableau 81 : contribution des différentes sources à la pollution métallique des eaux pluviales unitaires, d'après [LHRSP; 1994]

%	Cadmium			Cuivre			Plomb			Zinc		
	1er déc.	méd.	9ème déc.	1er déc.	méd.	9ème déc.	1er déc.	méd.	9ème déc.	1er déc.	méd.	9ème déc.
Toitures	84%	88%	92%	48%	64%	85%	80%	88%	93%	88%	93%	96%
Cours	3%	5%	8%	3%	5%	8%	2%	3%	7%	1%	2%	5%
Voirie	4%	7%	10%	11%	32%	43%	4%	9%	17%	2%	5%	7%

Tableau 82 : contribution des différents types d'eaux de ruissellement à la masse polluante totale des eaux de ruissellement du bassin versant du Marais (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%)

Selon l'étude de LHRSP (1994), les masses en Cd, Cu, Pb et Zn proviendraient en grande partie des eaux de ruissellement. Les eaux usées constitue une source mineure, sauf pour le plomb où 31% viendrait des eaux usées. Par ailleurs, le réseau constitue une source mineure de métaux lourds.

Les évaluations du pourcentage de contribution des trois sources à la pollution de temps de pluie faites par Gromaire concordent avec celles trouvées par LHRSP (1994) pour le Cd, Pb et Zn. En effet, les eaux de ruissellement contribuent fortement à l'apport de ces trois métaux lourds. En revanche, le cuivre semble provenir du réseau d'assainissement. En ce qui concerne les eaux usées, celles-ci constituent une source mineure quelque soit le métal étudié.

Par ailleurs, Gromaire montre que les toitures constituent la principale source de pollution métallique du bassin versant : plus de 80% de la masse de cadmium, de plomb et de zinc contenue dans la totalité des eaux de ruissellement du bassin, et plus de 50% de la masse de cuivre.

Elle montre également que les masses de cadmium, plomb et zinc apportées au réseau par les eaux de ruissellement seraient supérieures à celles mesurées à l'exutoire, ce qui signifierait une perte métallique par stockage dans le réseau. Pour le cuivre au contraire, elle observe un apport provenant des stocks du réseau.

En revanche, elle a mis en évidence la disparition massive des métaux dissous durant leur transfert en réseau et l'apport de masses significatives de cadmium, cuivre et zinc particulaire durant ce même transfert. Ce phénomène est sans doute dû à un changement de phase des métaux dissous après leur entrée dans le réseau.

Les études réalisées pour l'évaluation des pourcentages de contribution de différentes sources à la pollution de temps de pluie, en particulier celles menées par Gromaire (1998) aboutissent à la conclusion suivante : le réseau d'assainissement n'est pas seulement un système de transfert mais un réacteur physico-chimique qui conditionne la qualité des eaux de temps sec et de temps de pluie.

Conclusions sur l'étude bibliographique

L'analyse bibliographique concernant les caractéristiques des effluents unitaires de temps sec et de temps de pluie, véhiculés aux exutoires des bassins versants urbains de différentes tailles, nous a permis de souligner l'importance de la pollution générée par temps pluie.

Ces données bibliographiques donnent des ordres de grandeur sur les concentrations et la nature des polluants (distribution dissous-particulaire, teneurs des particules, vitesses de chute), mais sont souvent marquées d'un manque en ce qui concerne les vitesses de chute des particules et la distribution des polluants par classes de vitesses de chute, nécessaires pour le traitement des flux polluants.

De plus, ces données bibliographiques ne nous ont pas permis d'établir une tendance claire sur l'évolution des caractéristiques des polluants en fonction de la taille du bassin versant et de son occupation du sol, tant par temps sec que par temps de pluie. Et c'est d'ailleurs dans cet objectif que la présente étude va être orientée.

De plus, cette synthèse bibliographique a mis en évidence l'importance de la contribution des dépôts du réseau d'assainissement à la pollution de temps de pluie, notamment la couche organique. De ce fait, nous nous demandons si c'est le cas à l'échelle d'autres bassins versants de tailles et d'occupation du sol différentes.

Nous allons essayer par le biais de cette recherche d'étudier la variabilité spatiale des caractéristiques et des origines de polluants, entre l'amont et l'aval d'un réseau unitaire constitué de six bassins versants urbains de taille croissante et d'occupation de sol relativement homogène.

PARTIE 3 : CARACTERISATION DES EAUX URBAINES AUX EXUTOIRES DES BASSINS VERSANTS DE L'OPUR

Chapitre 1 : Caractérisation des eaux usées de temps sec aux exutoires des bassins versants OPUR

1.1 Introduction

Le dispositif expérimental mis en place dans le cadre de cette étude a permis la caractérisation des eaux usées de temps sec, aux exutoires des six basins versants. Cette caractérisation vise à étudier la variabilité des caractéristiques (flux et nature) des eaux usées de temps sec en fonction de l'échelle spatiale : à l'échelle d'une journée, et au cours de la journée. Les résultats ainsi obtenus fournissent des éléments pour l'évaluation des bilans de masse. Ils permettent d'estimer la masse d'eaux usées supposée passée au cours de l'évènement pluvieux, aux exutoires de chaque bassin versant.

1.2 Données disponibles :

Plusieurs campagnes de mesure, représentatives des différents jours de la semaine, ont été réalisées par temps sec, aux exutoires des six bassins versants étudiés :

- Entre octobre et novembre 2002 (1^{ière} campagne) : trois journées étudiées ;
- Entre février et mars 2003 (2^{ième} campagne) : quatre journées étudiées ;
- Entre mars et mai 2004 (3^{ième} campagne) : trois journées étudiées ;
- Entre mars et avril 2005 (4^{ième} campagne) : trois journées étudiées;

Nous avons réussi à collecter pour quatre journées de temps sec, des échantillons simultanément sur l'ensemble des six sites de mesure. Pour les onze autres journées, seule une partie (2 à 5) des six sites a été échantillonnée simultanément, du fait de difficultés techniques (liées aux préleveurs, à l'asservissement…), et de la mise hors service de certains sites durant les travaux de réhabilitation.

Pour chaque jour de mesure, 24 échantillons moyens horaires ont été prélevés à pas de temps constant de 10 mn. Un regroupement de ces échantillons horaires proportionnellement au débit écoulé en échantillons moyens journaliers et/ou en pollutogrammes de 5 tranches horaires a été effectué avant les analyses.

Le Tableau 83 donne pour chaque site de mesure et pour chaque paramètre polluant étudié le nombre de journées de temps sec échantillonnées. Le récapitulatif des campagnes de mesure de temps sec (site de mesure, nombre de journées, type d'échantillon, paramètres analysés) est donné en ANNEXE 6.

	MES	MVS	DCO	DBO	COT	NTK	Cd	Cu	Pb	Zn	pH	Conductivité
Marais	10	10	10	6	10	9	8	9	8	9	6	9
Sébastopol	10	10	10	5	6	4	6	6	6	6	7	8
Quais	8	8	8	7	8	7	6	7	7	7	4	8
Clichy centre	13	13	13	8	12	9	7	8	7	8	7	11
Coteaux	8	8	8	6	8	5	5	5	5	5	5	6
Clichy aval	11	11	11	6	10	10	7	8	8	9	7	11

Tableau 83 : nombre de journées de temps sec échantillonnées par site de mesure et par paramètre polluant

Il faut noter qu'une validation des données a été réalisée sur l'ensemble des sites de mesure. Cette dernière nous a conduit à éliminer entre 1 à 4 journées sur les sites Marais (travaux de curage sur le Marais conduisant à des très forts débits), Coteaux aval et Clichy aval (travaux de réhabilitation sur le collecteur Coteaux-centre générant des débits faibles et des concentrations très fortes).

Les résultats obtenus donnent les caractéristiques moyennes journalières eaux usées de temps sec:

- Paramètres physiques et débits moyens journaliers;
- Concentrations moyennes journalières des matières en suspension, des matières volatiles en suspension, des matières oxydables et azotées et des métaux lourds;
- Flux par Equivalent Homme de NTKd des MES, de matières oxydables et de métaux lourds;
- Nature des polluants : répartition dissous-particulaire, teneurs et vitesses de chute des particules, rapports caractéristiques.

1.3Caractéristiques moyennes journalières des eaux usées de temps sec

1.3.1 Paramètres physiques et débits moyens journaliers des eaux usées de temps sec

Le Tableau 84 donne des ordres de grandeurs de la conductivité, du pH et des débits moyens journaliers mesurés aux exutoires des six bassins étudiés.

	Marais	Sébastopol	Quais	Clichy centre	Coteaux aval	Clichy aval
Débit mesuré (l/s)	44-231, [74]	173-210, [194]	524-901, [820]	1434-3027, [2610]	969-1769, [1565]	3129-3945, [3586]
Débit corrigé (l/s)	42-74, [48]	173-210, [194]	417-629, [479]	1658-2680, [2095]	969-1769, [1565]	2575-3925, [3579]
pH	8.54-8.60, [8.57]	8.12-8.2, [8.18]	8.07-8.23, [8.21]	8.06-8.47, [8.27]	8.11-8.21, [8.13]	8.13-8.55, [8.23]
Conductivité (µS/cm)	905-1084, [1003]	1198-1389, [1265]	982-1145, [1051]	1051-1197, [1121]	1148-1167, [1150]	1073-1184, [1120]
1er décile-9ème décile, [médianes] sur l'ensemble de la campagne de mesure de temps sec.						

Tableau 84: Paramètres physiques et débits de temps sec à l'exutoire des six bassins versants étudiés.

Les débits moyens journaliers mesurés à l'exutoire augmentent proportionnellement avec la taille du bassin versant. Ils varient en médiane entre 74 l/s au Marais (bassin versant de 41 ha) à 3586 l/s à Clichy aval (bassin de 2500 ha).

Ces débits varient considérablement d'un jour de temps sec à un autre. Cette variabilité est à relier aux contraintes d'exploitation du réseau qui conduisent à des modifications du fonctionnement hydraulique du réseau :

- Travaux de curage au Marais,
- Apports ± importants par le Siphon Cuvier,
- Travaux sur le collecteur d'Asnières et déviation d'une partie des eaux vers Clichy centre,
- Travaux sur les collecteurs « Sébastopol et Coteaux » conduisant à la déviation des eaux et limitation des débits dans ces collecteurs.

Par ailleurs, la valeur médiane des débits moyens journaliers corrigés par rapport aux débits transitant par le Siphon Cuvier (Quais, Clichy centre et Clichy aval), et validés après élimination des journées anormales, augmente proportionnellement avec la taille du bassin

versant. Elle varie de 48 l/s au Marais (bassin versant de 41 ha) à 3579 l/s à Clichy aval (bassin de 2500 ha).

La variabilité de ces débits d'un jour de temps sec à un autre est largement moins importante que celle des débits bruts, mais reste cependant assez importante en particulier pour les grands bassins versants (52%, 42% et 40% d'écart entre le 1er et le 9ème décile respectivement à Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval). Cette variabilité est attribuée aux variations mineures du mode de gestion du réseau (fonctionnement des maillages) et aux variations dans la production des eaux usées et des eaux claires.

Les débits mesurés actuellement sur le site du Marais sont du même ordre de grandeur de ceux mesurés par Gromaire (1998) (voir Tableau 85).

Les débits médians mesurés actuellement à Clichy aval sont comparables à ceux mesurés pendant l'étude du diagnostic du réseau d'assainissement parisien (SAP, 1996). Cependant, la variabilité d'un jour de temps sec des débits au cours de cette étude est importante en comparaison avec celle de l'étude diagnostique. Ceci est sans doute lié aux travaux réalisés dans le réseau.

Site	Débit (l/s)
Marais : 1996-1997 (Gromaire, 1998)	48-77
Clichy aval (2002-2005)	2575-3925, [3579]
Clichy aval : étude diagnostique (SAP,1996)	3532-3967, [3881]
1er décile-9ème décile, [médianes]	

Tableau 85 : comparaison des débits moyens journaliers au Marais et à Clichy aval

Les débits moyens journaliers par équivalent homme d'azote (EHN[8]) (Figure 52) varient relativement peu d'un site de mesure à un autre (en médiane de 398 à 458 l/EH), et paraissent nettement plus stables dans le temps que les débits moyens journaliers. Ceci montre que la production d'eau usée est relativement stable dans le temps et dans l'espace.

[8]C'est le nombre d'Equivalent Homme de NTKd: 1EHN=12g/hab/j NTKd

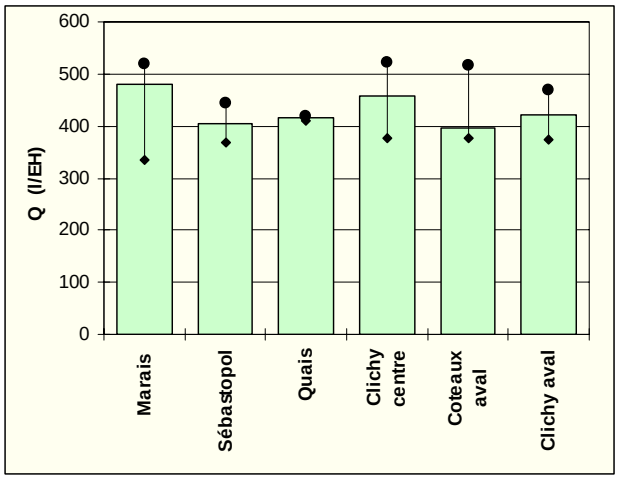


Figure 52 : variabilité spatiale des débits de temps sec, par équivalent homme d'azote aux exutoires des six bassins versants étudiés

Le pH des eaux usées de temps sec est stable d'un site de mesure à un autre et d'un jour à un autre : il varie de 8.13 à 8.57. De même, la conductivité varie peu d'un jour à l'autre. Elle est quasi identique pour les trois bassins versants aval (la médiane varie entre 1120 à 1150µS/cm) mais parait plus variable entre les trois bassins amont (la médiane varie entre 1003 à 1265µS/cm).

Ces valeurs de pH et de conductivité concordent avec celles mesurées sur d'autres sites Boudonville (LHRSP et Laurensot; 1998), en amont de la STEP de Colombes et en amont d'une STEP en Allemagne (Brombach et al, 2001) et paraissent constituer un invariant des eaux usées.

1.3.2 Concentrations moyennes journalières des eaux usées de temps sec

1.3.2.1 Concentrations moyennes journalières en MES, MVS, DCO, DBO_5, COT et NTK

Les concentrations mesurées dans les effluents de temps sec des six bassins versants d'étude sont synthétisées dans le Tableau 86. Les graphiques des concentrations figurent en ANNEXE 7.

Concentrations (mg/l)	MES	MVS	DCO	DBO_5	COT	NTK
Marais	153-252, [218]	134-228, [188]	359-597, [535]	132-198, [156]	100-154, [140]	28-47, [29]
Sébastopol	158-204, [170]	134-188, [155]	334-409, [353]	120-200, [183]	89-114, [104]	35-36, [36]
Quais	173-238, [188]	148-205, [159]	347-597, [388]	166-230, [185]	108-164, [113]	35-42, [37]
Clichy centre	166-221, [189]	145-189, [167]	322-477, [402]	138-200, [191]	96-121, [109]	31-42, [38]
Coteaux aval	201-211, [214]	174-209, [177]	395-511, [427]	141-174, [158]	120-139, [126]	38-40, [40]
Clichy aval	191-243, [208]	168-205, [177]	340-473, [403]	162-201, [190]	102-126, [113]	34-43, [36]
1^{er} décile-$9^{ème}$ décile, [médianes], sur l'ensemble de la campagne de mesure de temps sec						

Tableau 86: Concentrations en matières en suspension, en matières organiques et azotées mesurées par temps sec à l'exutoire de nos bassins d'étude

Les concentrations médianes des effluents de temps sec en matières en suspension varient entre 170 et 218 mg/l, celles en DCO oscillent entre 353 et 535 mg/l. Par ailleurs, les concentrations en matières azotées varient entre 29 et 40mg/l.

Les fourchettes de variation des concentrations en matières en suspension, en matières oxydables et azotées sont comparables sur les différents sites de mesure. Cependant, la valeur médiane de la DCO et du COT mesurée au Marais semble nettement plus élevée que sur les autres sites de mesure.

Les concentrations médianes mesurées au Marais au cours de cette étude (sauf la DBO_5t) sont supérieures à celles mesurées par Gromaire (1998) sur le même site de mesure (Tableau 87).

Les valeurs médianes mesurées par temps sec à Coteaux aval sont supérieures aux concentrations mesurées sur le collecteur des Coteaux par (LROP ; 1980). Cette différence est peut être liée au fait que les concentrations moyennes des effluents en 1980 étaient mesurées en amont du collecteur des Coteaux. Les concentrations médianes mesurées à Coteaux aval au cours de cette étude sont relativement comparables aux concentrations moyennes mesurées sur le P208 (situé sur l'antenne Wattignies du déversoir Vincennes –Charenton) (SAP, 1996).

Par ailleurs, les effluents de temps sec des Quais et de Clichy aval paraissent un peu plus chargés que les effluents quantifiés lors de l'étude du diagnostic du réseau d'assainissement parisien (SAP, 1996). Ces différences pourraient peut être expliquer par les actions menées

par la SAP pour diminuer les eaux claires, avec notamment la régulation ou l'arrêt des réservoirs de chasses.

Par ailleurs, les concentrations des effluents de temps sec des sites de l'OPUR paraissent relativement comparables aux concentrations des effluents en amont de la STEP de Colombes, mais elles sont inférieures à celles mesurées en amont de la STEP d'Achères. Cette variation est peut être imputable à la variabilité des apports de la banlieue.

La variabilité d'un jour de temps sec à un autre est importante quelque soit le site de mesure. Elle est cependant plus marquée sur les sites amont que sur ceux se trouvant en aval. L'écart entre le 1er et le 9^{ième} décile varie de 39% au Marais à 21% à Clichy aval pour les MES.

Concentrations (mg/l)	MES	MVS	DCO	DBO_5	COT	NTK
Marais (Gromaire, 1998)	111-194, (157)	91-166, (133)	246-465, (375)	115-212, (117)	-	-
Mazas (SAP, 1996)	96-239, (146)	-	193-782, (292)	64-106, (88)	-	20-27, (24)
Coteaux (Philippe et Ranchet, 1987)	78-151, (109)	-	152-298 (240)	72-137 (105)	-	14-36, (26)
P208 (SAP, 1996)	40-258, (166)	-	96-582, (347)	30-220, (134)	-	24-58, (42)
Clichy aval (SAP, 1996)	160-372, (223)	-	196-471, (321)	108-185, (139)	-	26-36, (30)
min-max, (moyenne)						

Tableau 87: rappels des concentrations trouvées dans la bibliographie

1.3.2.2 Concentrations moyennes journalières en métaux lourds (Cd, Cu, Pb et Zn)

Les concentrations moyennes journalières en métaux lourds (Cd, Cu, Pb et Zn) mesurées aux exutoires des différents bassins versants de l'OPUR sont représentées dans la Figure 53 et ANNEXE 8 .

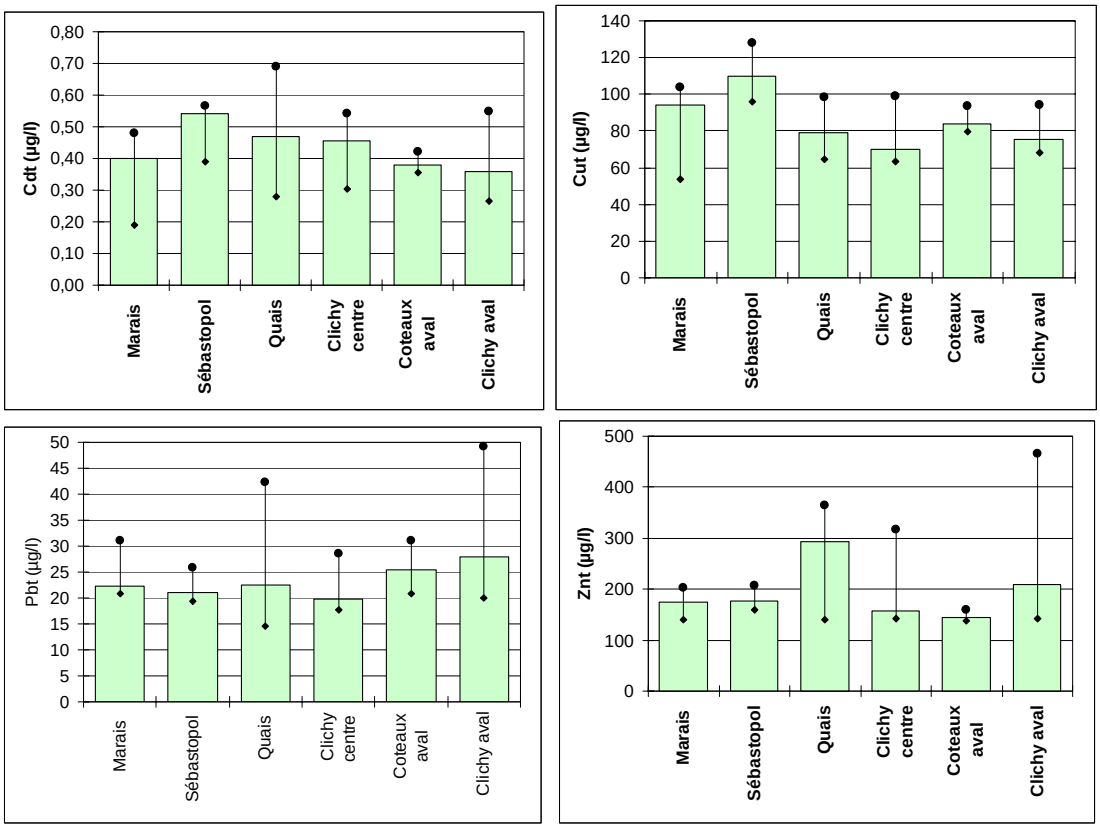


Figure 53 : concentrations moyennes journalières en métaux lourds mesurées dans les effluents de temps sec des sites de l'OPUR

Les concentrations en métaux sont variables d'un site de mesure un autre. Les valeurs médianes du cuivre varient de 70 à 110 µg/l suivant le site de mesure, alors que celles du zinc oscillent entre 144 et 292 µg/l.

Le bassin versant du Sébastopol se distingue par de fortes concentrations en Cd et Cu. Celui du Quais présente des concentrations en Zn nettement supérieures à celles mesurées sur les autres bassins versants. Il présente aussi pour certaines journées de temps sec de fortes concentrations en Pb. De même, le site de Clichy aval se démarque par les concentrations en Pb et Zn.

Ces différences entre les bassins versants sont à relier à l'occupation du sol, elles peuvent être dues :

- Aux apports des activités professionnelles. Selon la liste des activités industrielles payant des redevances à l'agence de l'eau Seine-Normandie, le nombre d'activités industrielles

rejetant les métaux lourds, notamment de traitement de surface peuvent expliquer les fortes concentrations mesurées aux sites Sébastopol et Coteaux aval;

- Aux apports de nettoyage des voiries qui varient suivant l'intensité du trafic routier.

De grandes fluctuations d'un jour à un autre ont été remarquées sur la majorité des sites. On note ainsi de très fortes variations en Cd, Pb et Zn respectivement aux sites des Quais et de Clichy aval (écart maximal entre le 1^{ier} et le 9^{ième} décile est de 59% pour le Pb et de 70% pour le Zn). Ces variations sont sans doute à relier à des rejets industriels ponctuels.

Les concentrations médianes journalières en métaux lourds mesurées actuellement au Marais sont légèrement supérieures d'un facteur 1.1 à 1.8 à celles trouvées par Garnaud (1999). Celles en Pb et en Zn mesurées sur les Quais sont cependant largement inférieures (environ d'un facteur 2) aux concentrations mesurées à l'usine Mazas, en 1996. Cette différence peut être expliquée par une diminution du nombre d'activités industrielles et une diminution des rejets en métaux lourds dans le réseau d'assainissement entre 1996 et maintenant.

Les concentrations en métaux mesurées à Coteaux (Philippe et Ranchet, 1987; LROP, 1980) et au P208 (SAP, 1996) sont supérieures aux concentrations mesurées sur l'ensemble des sites de mesure. Ceci peut être dû au fait que les mesures de 1980 concernent seulement la partie amont du collecteur des Coteaux et plus particulièrement les apports en provenance de la banlieue, et aussi et surtout au fait que les apports en métaux industriels ont baissé depuis 1980. En revanche, celles mesurées à Boudonville semblent plus faibles que ce qu'on mesure sur nos sites. Ceci est probablement lié à l'occupation des sols, et par conséquent à une présence moindre d'activités industrielles rejetant les métaux lourds.

Concentrations (µg/l)	Cd	Cu	Pb	Zn
Marais (Gromaire, 1998)	0.1-0.5, (0.3)	32-133, (73)	5-21, (12)	57-274, (156)
Mazas (SAP, 1996)	-	-	27-64, (45)	199-691, (412)
Coteaux (Philippe et Ranchet, 1987)	0.4-1.0, (5)	-	19-80, (45)	250-270, (462)
P208 (SAP, 1996)	-	-	35-270, (115)	112-2247, (462)
Clichy aval (SAP, 1996)	-	-	25-80, (57)	179-737, (397)
Boudonville (LHRSP et Laurensot; 1998)	-	(51)	(13)	(117)
min-max, (moyenne)				

Tableau 88: rappels des concentrations trouvées dans la bibliographie

La comparaison entre les concentrations en métaux lourds mesurées dans les effluents de temps sec de la zone OPUR et celles mesurées dans les eaux potables du bassin versant du Marais (Garnaud, 1999) (Tableau 89) montrent que nos valeurs en Pb et Zn sont nettement supérieures (d'un facteur 2.5 à 3.5 sur les médianes). En revanche, nos concentrations en Cu sont du même ordre de grandeur que les concentrations dans l'eau potable.

µg/l	Cd	Cu	Pb	Zn
Eaux usées de temps sec « OPUR » (cette étude)	0.36-0.54, [0.54]	70-110, [82]	20-28, [23]	144-292, [175]
Eaux potables « Marais » (Garnaud, 1999)	nd	31-179, [121]	3-27, [9]	4-92, [51]
min-max,[médiane] ; nd : non détecté :< 0.01µg/l				

Tableau 89 : comparaison des concentrations en métaux lourds des eaux usées et des eaux potables

1.3.3 Flux par Equivalent Homme de NTKd :

1.3.3.1 Flux par équivalent habitant des matières en suspension et des matières organiques

Les flux par équivalent homme de NTKd[9] (partie 1, chapitre 1 : §1.2.2.2) des MES, MO et NTK calculés sur l'ensemble des sites de l'OPUR sont synthétisés dans le Tableau 90. Les graphiques se trouvent en ANNEXE 9.

Flux (g/EHN)	MES	MVS	DCO	DBO_5	COT
Marais	76-108, [81]	65-96, [72]	183-249, [195]	68-95, [78]	48-67, [52]
Sébastopol	60-88, [69]	49-81, [65]	130-176, [146]	52-86, [64]	37-52, [42]
Quais	72-86, [75]	61-72, [62]	143-195, [156]	66-84, [73]	44-57, [47]
Clichy centre	74-90, [86]	62-78, [75]	144-203, [169]	63-107, [95]	43-51, [48]
Coteaux aval	81-114, [82]	68-100, [71]	164-221, [177]	65-67, [61]	49-64, [51]
Clichy aval	82-101, [86]	70-85, [74]	147-188, [158]	75-88, [78]	41-52, [47]
1^{er} décile-$9^{ème}$ décile, [médianes], sur l'ensemble de la campagne de mesure de temps sec.					

Tableau 90 : flux par équivalent habitant des paramètres globaux

Les flux moyens journaliers par EHN varient respectivement entre 69 et 86 g/EHN pour les MES et entre 146 et 195 g/EHN pour la DCO. Ces flux sont comparables entre les différents sites de mesure, indiquant une origine commune des MES et des matières oxydables sur les différents bassins versants, de type domestique.

La comparaison avec les valeurs de EH utilisés usuellement pour le calcul des STEP (selon le décret du 10/12/1991): 1EH=80g MES/hab/j, =60g DB05 /hab/j, =15g NTK/hab/j, montre des flux du même ordre de grandeur sur l'ensemble des sites de mesure.

L'analyse des données montre que les flux les plus faibles sur le Sébastopol sont dus aux concentrations particulaires et non dissoutes. Ceci est peut être imputable à une sédimentation

[9] Le flux par EH de NTKd est estimé selon la formule suivante : (concentration du paramètre polluant/concentration de NTKd) * EHN, avec EHN: équivalent homme de NTKd. = 12gd'N de NTKd.

dans le réseau. En effet, les collecteurs et les petites lignes possèdent des pentes faibles, sur ce bassin versant.

Cependant, il n'y a pas de différence notable entre le bassin versant du Marais qui est caractérisé par de très faibles pentes de ses collecteurs et les trois bassins aval (Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval), ce qui conduit à penser que le phénomène de sédimentation par temps sec n'est pas plus fort au Marais que sur les grands bassins versants.

La variabilité des flux par EHN d'un jour de temps sec à un autre reste cependant assez importante notamment au Marais et à Coteaux aval.

1.3.3.2 Flux par équivalent habitant des métaux lourds

Les flux par équivalent homme de NTKd du cadmium, cuivre, plomb et zinc calculés sur les sites de l'OPUR sont représentés dans la Figure 54 et ANNEXE 10.

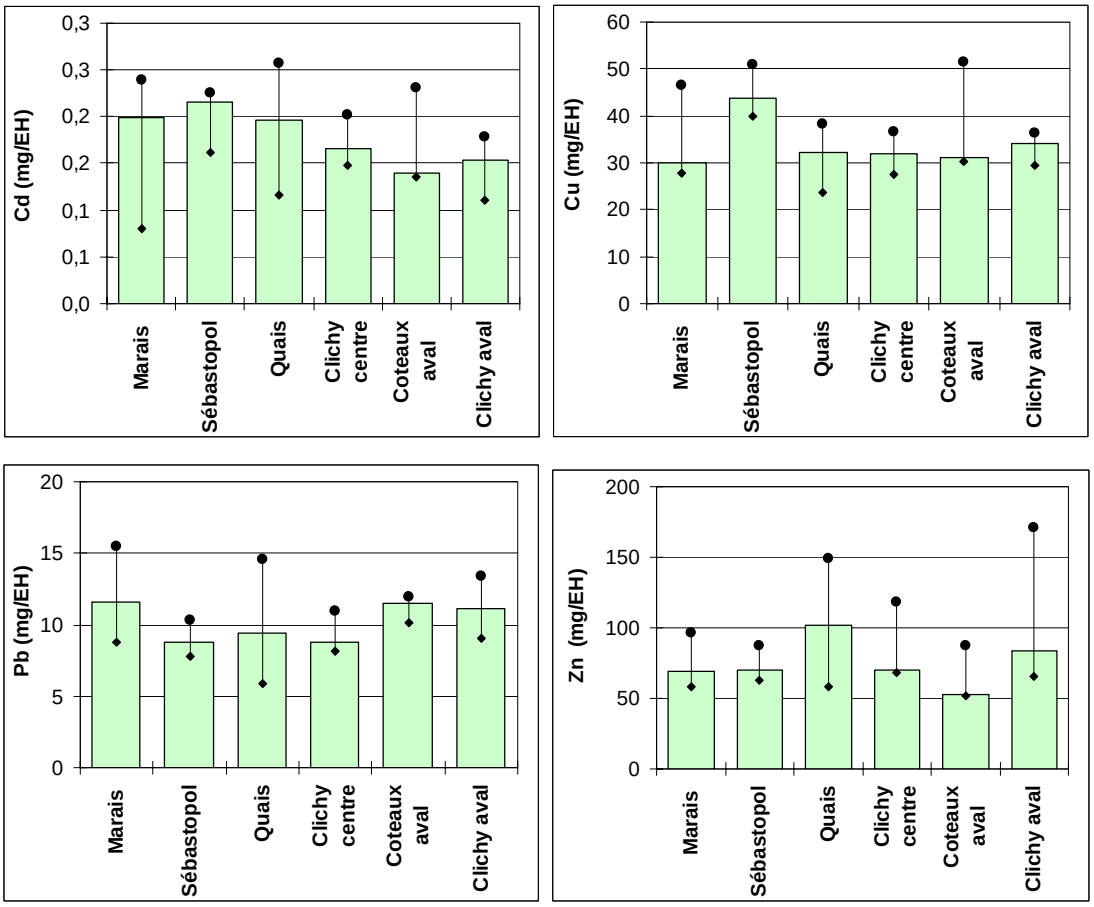


Figure 54 : variabilité spatiale des flux en EHN des métaux lourds

Comme pour les concentrations, les flux en métaux lourds rapportés au nombre d'équivalent habitant d'azote sont variables d'un site à un autre et d'un jour à un autre, ce qui montre que les différences de concentrations entre les bassins versants sont dues aux apports non domestiques (activités professionnelles ou nettoyage de voirie).
Les flux par EH d'azote du Cd sont plus élevés sur les trois bassins amont. Ceux en Cu sont nettement plus élevés à Sébastopol (44 mg/EHN) et ceux en Zn au Quais (102 mg/EHN). Cependant, en ce qui concerne le Pb, les plus forts flux par EHN sont mesurés au Marais et à Coteaux aval (12 mg/EHN). Cette différence des flux entre les bassins versants de l'OPUR est à relier au le nombre d'activités polluantes rejetant des métaux lourds et notamment celles qui font du traitement de surface.

Cependant, si les rejets des activités industrielles (de traitement de surfaces notamment) recensés par l'AESN peuvent expliquer les valeurs élevées en Cd et en Cu pour Sébastopol (le rejet moyen annuel en métaux lourds de ces activités a été évalué à 20 mg/j/EHN –voir partie 1 : Chapitre 1 :§1.2.2.3), ainsi que la forte variabilité d'un jour à un autre des rejets de Cd et Cu sur Coteaux aval avec des valeurs élevées pour certains jours, elles n'expliquent pas l'importance des rejets de Zn sur Quais et Clichy aval. Pour le site Quais, il est cependant possible qu'il y ait une influence des activités industrielles situées en rive gauche, via les apports par le siphon Cuvier. Enfin, une partie des rejets de métaux est certainement imputable aux activités professionnelles diverses (pressing, labo de photos, garages, labo d'analyses, petits ateliers) pour lesquels nous ne disposons pas de suffisamment d'informations.

1.3.4 Variabilité en fonction du jour de la semaine

Une comparaison des débits (en l/s par équivalent habitant d'azote) entre les jours de semaine (Lundi à Vendredi) et le Dimanche a été réalisée sur l'ensemble des sites de mesure (Figure 55). Par ailleurs, il faut noter qu'on dispose de très peu de données de dimanche (1 à 2) et par conséquent ces résultats sont à prendre avec précaution.
Les débits en l/s mesurés le dimanche varient très peu par rapport à ceux mesurés les jours de semaines, sauf au site des Quais et au Marais. Cette baisse de débit le week-end sur le Quais et le Marais est sans doute due aux variations de la population (qui ne travaille pas le week-end) et aux activités professionnelles. Il est cependant surprenant de ne pas l'observer sur le Sébastopol et Clichy centre où les densités d'emploi non-résident sont pourtant très élevées.

Sur les sites Sébastopol, Quais et Clichy centre, les débits moyens par EHN mesurés entre les jours de semaine et le dimanche sont comparables. La baisse des débits par EHN le week-end au Marais et à Coteaux aval est probablement due aux activités professionnelles qui ferment le Dimanche.

Les débits moyens journaliers et les flux moyens par EHN varient beaucoup en fonction du jour de la semaine, en comparaison avec ceux mesurés les week-ends.

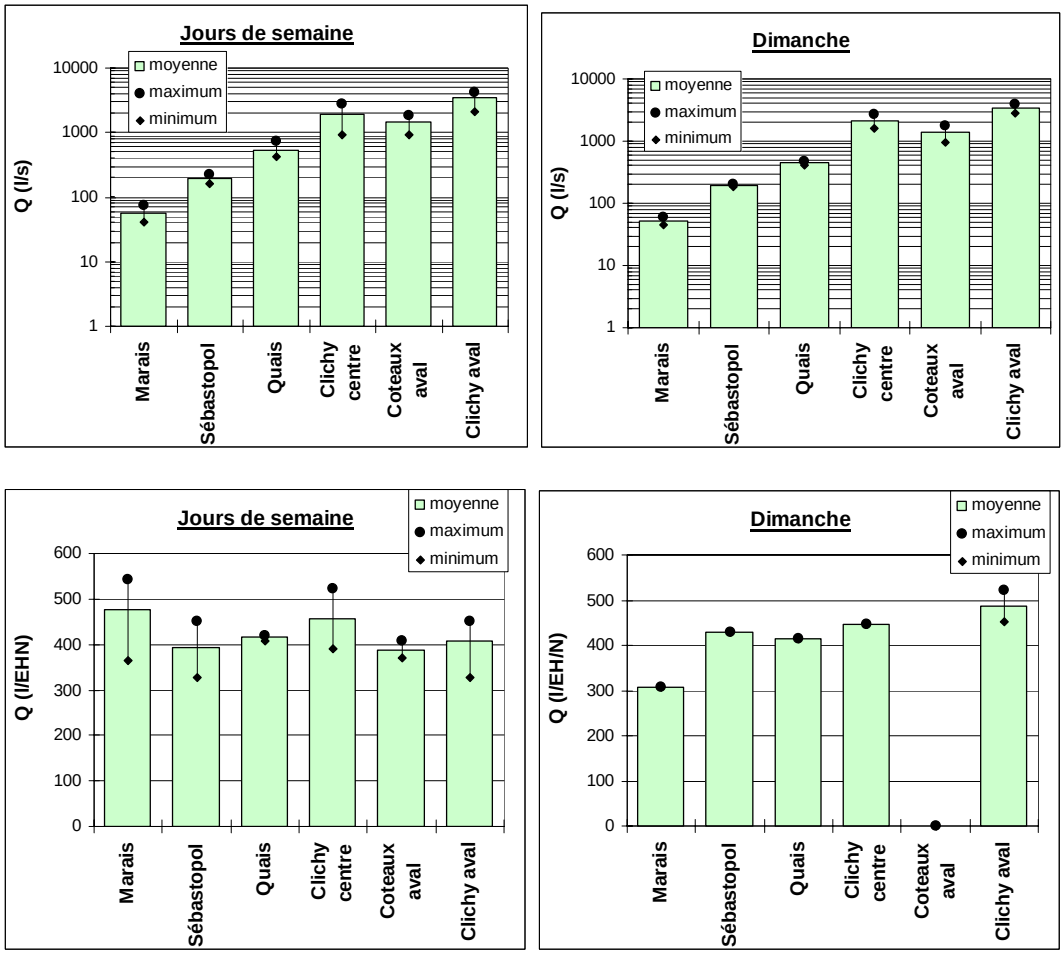


Figure 55 : variabilité des débits par l/s et des débits en l/EHN entre les jours de semaines et le dimanche

Le nombre d'équivalents habitants de NTKd (Tableau 91) varie généralement peu entre la semaine et le dimanche sauf sur deux sites : Quais et Clichy aval, où une forte baisse est observée le week-end. La variabilité en fonction du jour de la semaine est plus forte sur les sites : Marais, Coteaux aval et Clichy aval.

Nbre d'EHN	Marais	Sébastopol	Quais	Clichy centre	Coteaux aval	Clichy aval
Jours de semaine	8390-12894, (10678)	41199-43177, (42099)	114513-152340, (127489)	210930-58956, (390456)	368980-383641, (376311)	572067-961870, (753624)
dimanches	12257	36698	99621	398981	-	(557793)
1er décile-9ième décile, (moyenne)						

Tableau 91 : nombre d'équivalent homme de NTKd mesuré la semaine et le dimanche

A l'exception du Marais, les flux moyens journaliers par EHN de matières en suspensions et de matières organiques, mesurés le dimanche sont légèrement inférieurs à ceux mesurés la semaine, mais l'écart reste faible (Figure 56). C'est à Coteaux aval que cette baisse est le plus marqué avec un écart de l'ordre de 17% pour les MES et 20% pour le COT.

Le Marais se distingue par des flux en EHN de MES et de matières oxydables comparables voir supérieurs le dimanche par rapport aux jours de semaines. Ces écarts restent cependant peu significatifs compte tenu des incertitudes d'analyse.

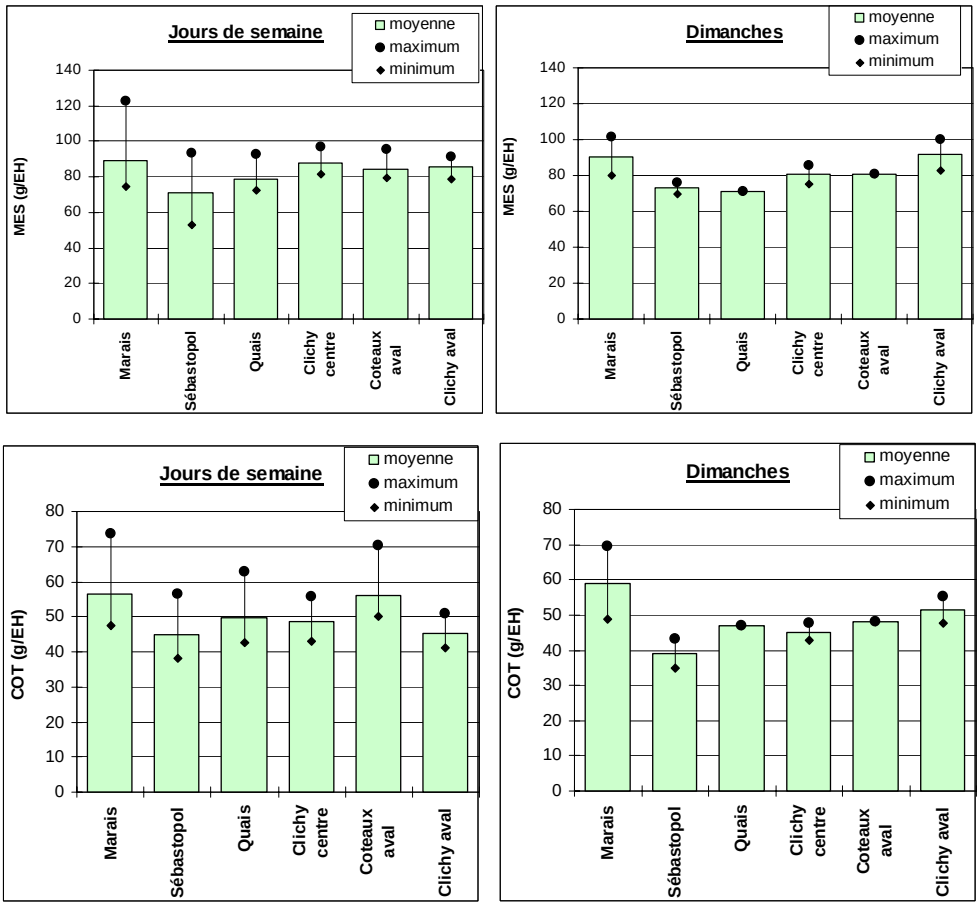


Figure 56 : variabilité des flux en EH d'azote des MES et du COT, entre la semaine et le week-end

Notons que la variabilité des flux journaliers entre la semaine et le week-end enregistrée au Marais au courant de cette étude concorde avec celle mesurée par Gromaire (1998) plus précisément pour la campagne de mesure de janvier–97.

Les flux journaliers par EH des métaux lourds mesurés le dimanche sont dans la plupart des cas inférieurs à ceux mesurés les autres jours de semaine (Figure 57, et ANNEXE 11).

La différence entre le dimanche et la semaine est nettement plus marquée pour le Cdt et Znt où l'écart dépasse souvent les 50%. Cette plus faible production le dimanche confirme l'origine industrielle d'une partie des métaux, y compris dans le cas des Quais et de Clichy aval, pour lesquels la liste de AESN ne nous avait pas permis d'identifier d'activités industrielles majeurs.

Ces résultats sont toutefois à interpréter avec précaution compte tenu du faible nombre de données pour le dimanche.

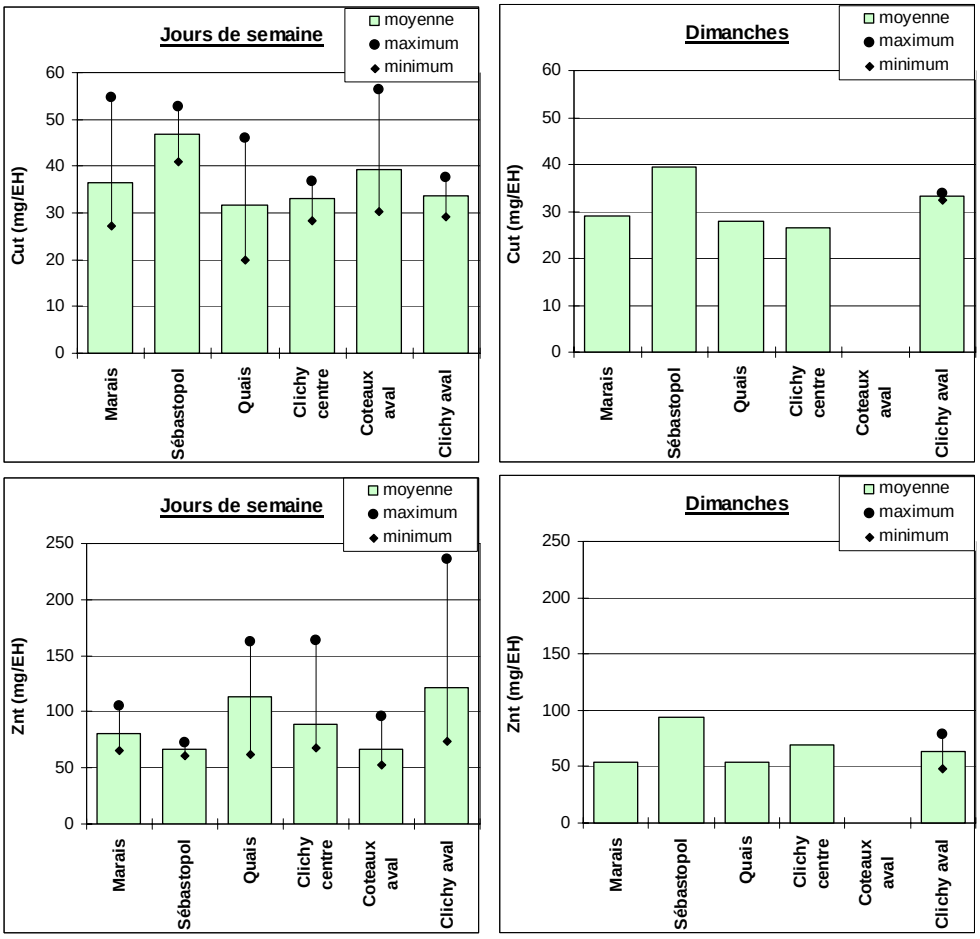


Figure 57: variabilité des flux journaliers en EH d'azote du Cut et Znt, entre la semaine et le dimanche

1.3.5 Nature des polluants :

1.3.5.1 Répartition de la pollution des eaux usées entre phase dissoute et phase particulaire :

Les résultats concernant la proportion de pollution des eaux usées liée aux particules sont synthétisés en Tableau 92 et Tableau 93. (Les graphiques de la répartition Dissous/Particulaire se trouvent en ANNEXE 12).

Pourcentages de pollution liée aux particules	% DCOp/DCOt	%DBO_5p/DBO_5t	% COP/COT	% NTKp/NTKt
Marais	70-76,[73]	66-71,[69]	64-74,[69]	18-22,[18]
Sébastopol	70-80,[76]	68-81,[78]	67-80,[72]	15-20,[16]
Quais	69-74,[74]	62-74,[70]	68-74,[71]	17-21,[19]
Clichy centre	78-86,[81]	70-83,[77]	75-81,[77]	19-27,[22]
Coteaux aval	78-84,[81]	67-76,[72]	76-80,[79]	17-43,[18]
Clichy aval	80-82,[81]	72-79,[76]	73-79,[77]	16-30,[23]
Marais (Gromaire, 1998)	*60-81,(67)*	*57-77,(65)*	-	-
1er décile-9ème décile, [médianes], sur l'ensemble de la campagne de mesure de temps sec, *min-max,(moyenne)*				

Tableau 92: Répartition de la pollution entre la phase dissoute et la phase particulaire, par temps sec.

Pourcentages de pollution liée aux particules	% Cdp/Cdt	% Cup/Cut	% Pbp/Pbt	% Znp/Znt
Marais	47-83,[75]	68-89,[78]	84-88,[87]	43-66,[56]
Sébastopol	32-77,[62]	73-83,[78]	80-85,[82]	40-69,[47]
Quais	61-79,[73]	76-91,[88]	80-95,[91]	62-82,[75]
Clichy centre	46-86,[69]	85-94,[89]	74-92,[87]	37-78,[69]
Coteaux aval	66-73,[68]	84-90,[87]	79-90,[89]	56-76,[68]
Clichy aval	60-72,[67]	86-97,[91]	71-96,[87]	52-80,[71]
Marais (Garnaud, 1999)	*100**	*90-94,(93)*	*73-97,(89)*	*76-82,(81)*
1er décile-9ème décile, [médianes] sur l'ensemble de la campagne de mesure de temps sec, *min-max,(moyenne)*				

Tableau 93 : répartition de la pollution métallique entre phase dissoute et phase particulaire, par temps sec

Il ressort de ces résultats, qu'en médiane, 69 à 81 % des matières oxydables et 47 à 91% des métaux lourds sont transportés sous forme particulaire. La proportion d'azote particulaire quant à elle varie entre 16 et 23%, ce qui apparaît normal puisque le NTK (constitué d'azote organique et d'ammonium) dans les eaux usées est majoritairement sous forme de NH_4^+.

Par ailleurs, on observe que le Cu et le Pb sont très largement particulaires (78 à 91%). Pour le Cd et le Zn, la fraction particulaire domine, mais la distribution est variable d'un jour à l'autre, et la fraction dissoute peut être importante sur certains échantillons.

La répartition dissous-particulaire des matières oxydables varie peu d'un jour de temps sec à un autre et d'un site de mesure à un autre. Celle des matières azotées est stable sur les trois sites amont, mais assez fluctuante pour les sites aval, notamment le Coteaux aval.

La légère augmentation de la proportion des matières organiques et des matières azotées particulaires à l'aval peut être liée à l'absence de réfrigération. En revanche, le pourcentage du Cu et Zn particulaire présente une évolution avec l'échelle spatiale qui ne semble pas s'expliquer par les conditions de conservation de l'échantillon (rappelons que les préleveurs de Quais sont réfrigérés, et ceux de Sébastopol ne le sont pas), et qui pourrait traduire une adsorption des métaux dissous sur les MES au cours du transport en réseau.

Les pourcentages de polluants particulaires mesurés au cours de cette étude sont supérieurs à ceux mesurés par Gromaire (1998) pour les matières oxydables, et sont inférieurs à ceux trouvés par Garnaud (1999) pour les métaux lourds, en particulier pour le Zn.

Les métaux « Cu, Pb et Zn » transportés dans les effluents de temps sec des sites de l'OPUR sont en revanche plus particulaires que ceux mesurés à Boudonville (LHRSP et Laurensot; 1998).

Ces différences sont peut être dues à des différences de techniques d'analyses. En effet, on travaille ici avec des concentrations très faibles, parfois très proches ou inférieures aux limites de quantification pour le dissous. Les analyses en ICP-MS permettent peut être une évaluation plus exacte de ces métaux dissous que le dosage SAA utilisé par Garnaud (1999).

1.3.5.2 Caractéristiques des particules en suspension dans les eaux de temps sec

1.3.5.2.1 Teneurs en matières organiques :

Les teneurs en matières organiques des particules en suspension mesurées dans les eaux usées de temps sec sont présentées dans le Tableau 94 et ANNEXE 13.

Teneurs sur les particules	MVS/MES (g/g)	DCOp/MES (g O_2/g)	DBO_5p/MES (g O_2/g)	COP/MES (g C/g)	NTKp/MES (g N/g)
Marais	0.86-0.90, [0.88]	1.64-1.89, [1.71]	0.52-0.63, [0.57]	0.40-0.46, [0.43]	0.027-0.042, [0.034]
Sébastopol	0.84-0.90, [0.88]	1.48-1.62, [1.54]	0.48-0.79, [0.64]	0.34-0.48, [0.44]	0.029-0.043, [0.034]
Quais	0.85-0.89, [0.85]	1.36-1.67, [1.56]	0.58-0.76, [0.66]	0.41-0.48, [0.46]	0.030-0.042, [0.038]
Clichy centre	0.85-0.90, [0.89]	1.48-1.90, [1.62]	0.49-1.04, [0.76]	0.39-0.49, [0.45]	0.031-0.056, [0.045]
Coteaux aval	0.85-0.89, [0.88]	1,47-1.92, [1.6]	0.44-0.60, [0.52]	0.44-0.48, [0.45]	0.029-0.081, [0.03]
Clichy aval	0.83-0.88, [0.86]	1.44-1.78, [1.54]	0.54-0.71, [0.64]	0.39-0.49, [0.40]	0.028-0.056, [0.040]
1er décile-9ème décile, [médianes], sur l'ensemble de la campagne de mesure de temps sec					

Tableau 94: Teneurs en matières organiques des particules, mesurées, par temps sec, à l'exutoire de nos six bassins versants.

Les matières en suspension des eaux usées de temps sec sont fortement organiques avec des teneurs en MVS de l'ordre de 83 à 90%.

Les teneurs en MVS et en DCOp des particules diffèrent peu d'un site à un autre. Celles en DBO_5p, COP et NTKp, par contre, augmentent légèrement en fonction de la taille des bassins versants le long de l'axe de Clichy (Figure 58).

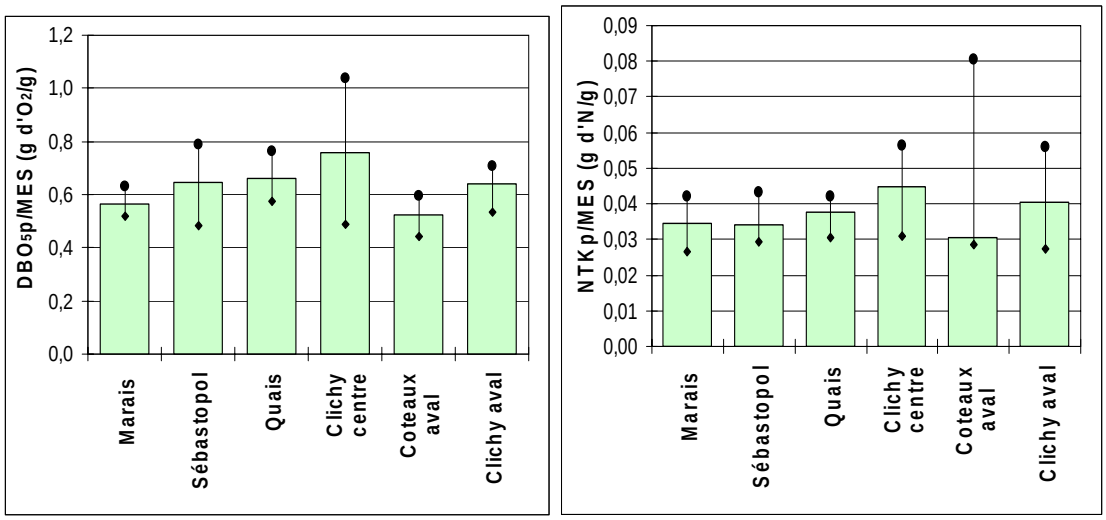


Figure 58 : Variabilité des teneurs en DBO_5p et NTKp par temps sec.

Ces teneurs sont stables d'un jour à l'autre pour les MVS, mais assez variables pour la DCOp et le COP.

Par ailleurs, une très forte variabilité d'un jour à un autre a été remarquée sur tous les sites pour les teneurs en DBO5p et en NTKp, en particulier à Clichy centre et Coteaux aval.
Les teneurs en MVS et en DCOp du Marais sont du même ordre de grandeur que celles trouvées par Gromaire (1998). En revanche, celles en DBO_5p sont plus faibles.
Les teneurs en MVS et DCOp des particules des effluents de temps sec des sites de l'OPUR sont généralement supérieures à celles trouvées dans la littérature (Tableau 95).

	Marais (Gromaire, 1998)	Amont STEP Colombes (SIAAP, 2002) ; Emissaire de Bruxelles (Verbanck, 1995) ; Ainger et al, (2001)
MVS/MES	0.78-0.92, (0.86)	(0.68)-(0.8)
DCOp/MES	1.34-2.09,(1.64)	(1.16)-(1.25)
DBO5p/MES	0.52-1.05,(0.78)	(0.67)

Tableau 95 : teneurs en MVS et en MO trouvées dans la littérature

1.3.5.2.2 Teneurs en métaux lourds :

Les graphiques suivants (Figure 59) représentent les teneurs en métaux lourds mesurées sur les MES des effluents de temps sec des six sites de mesure (voir également ANNEXE 14).

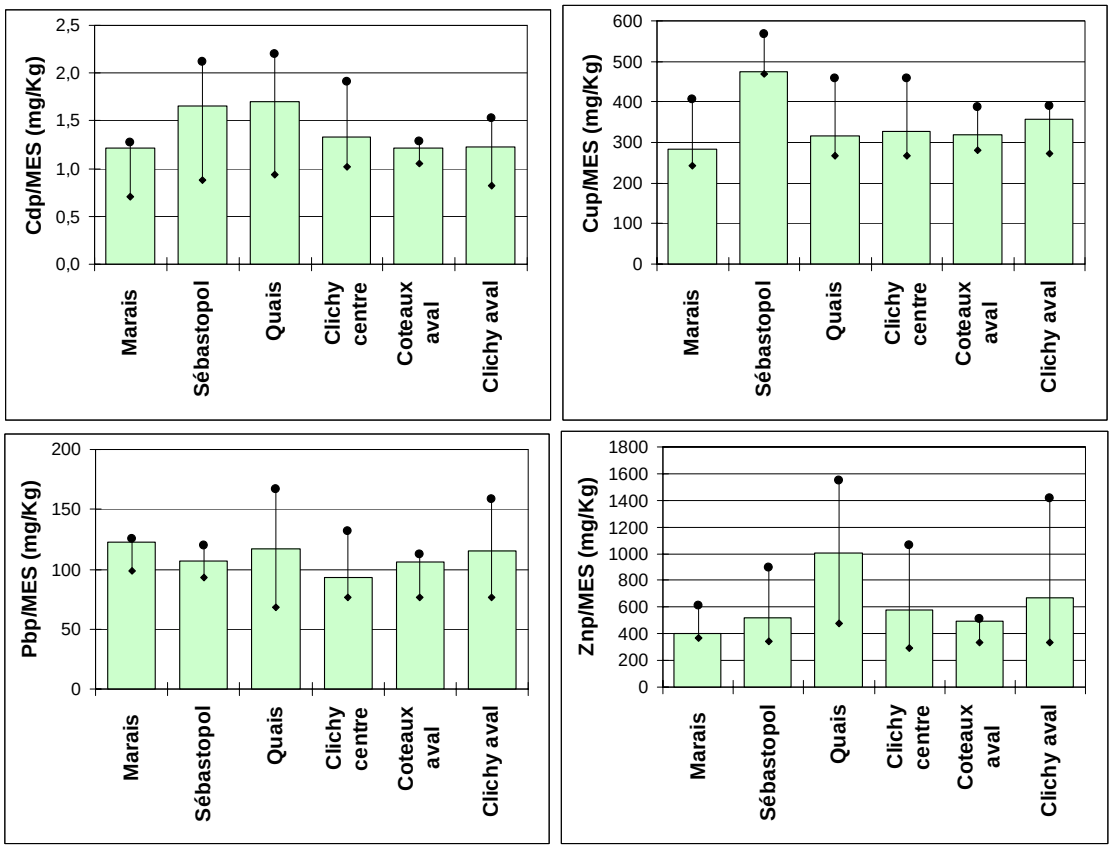


Figure 59: Teneurs en métaux lourds des particules des eaux usées de temps sec

Les teneurs en métaux lourds suivent les mêmes tendances que ce qui a déjà été observé en terme de concentration et de flux par EHN.

Les teneurs en métaux lourds sont variables d'un site de mesure à un autre. Les teneurs en cuivre varient entre 284 et 476 mg/Kg ; celles du zinc, varient entre 398 et 1006 mg/Kg.

Le bassin versant du Sébastopol se distingue par les plus fortes teneurs en Cd et Cu. Celui des Quais présente de fortes teneurs en Cd et des teneurs en Zn nettement supérieures à celles trouvées sur les autres bassins versants. Il présente aussi de fortes teneurs en Pb pour certaines journées. Quant à Clichy aval, ce dernier se démarque par des teneurs élevées en Pb et Zn.

Les teneurs en métaux lourds sont très fluctuantes d'un jour à l'autre. Cette forte variabilité est probablement liée à des apports industriels ponctuels.

A l'exception du plomb, nos teneurs particulaires en métaux lourds sont globalement inférieures aux teneurs obtenues par Garnaud (1999) sur le site du Marais, ce qui est une conséquence de la plus forte proportion de métaux dissous mesurés dans notre cas.

1.3.5.2.3 Vitesses de chute des particules :

Les courbes de vitesses de chute mesurées pour les matières en suspension dans les eaux usées de temps sec (Tableau 96 et Figure 60) montrent que les particules en suspension décantent avec des vitesses de chute V50[10] variant entre 0.009 et 0.065 mm/s. Le carbone organique particulaire (Figure 61) décante avec des V50 allant de moins 0.009 à 0.05 mm/s. Bien que, pour une même journée de mesure, des différences entre sites apparaissent (Figure 60), on n'observe pas de différence de comportement systématique. La fourchette des vitesses V50 est comparable entre les différents sites OPUR (Tableau 96)

V50 (mm/s)	Marais	Sébastopol	Quais	Clichy centre	Coteaux aval	Clichy aval
Nbre MES	3	2	2	2	1	1
Nbre COP	2	-	2	1	-	1
MES	0.009-0.060	0.032-0.065	0.016-0.036	0.016-0.048	0.045	0.028
COP	<0.009-0.055	-	0.008-0.027	0.011	-	0.019
Minimum-maximum						

Tableau 96: Vitesses de chute médianes des MES et du COP dans les effluents de temps sec

[10] V50: vitesse de chute non atteinte par 50% des particules en masse

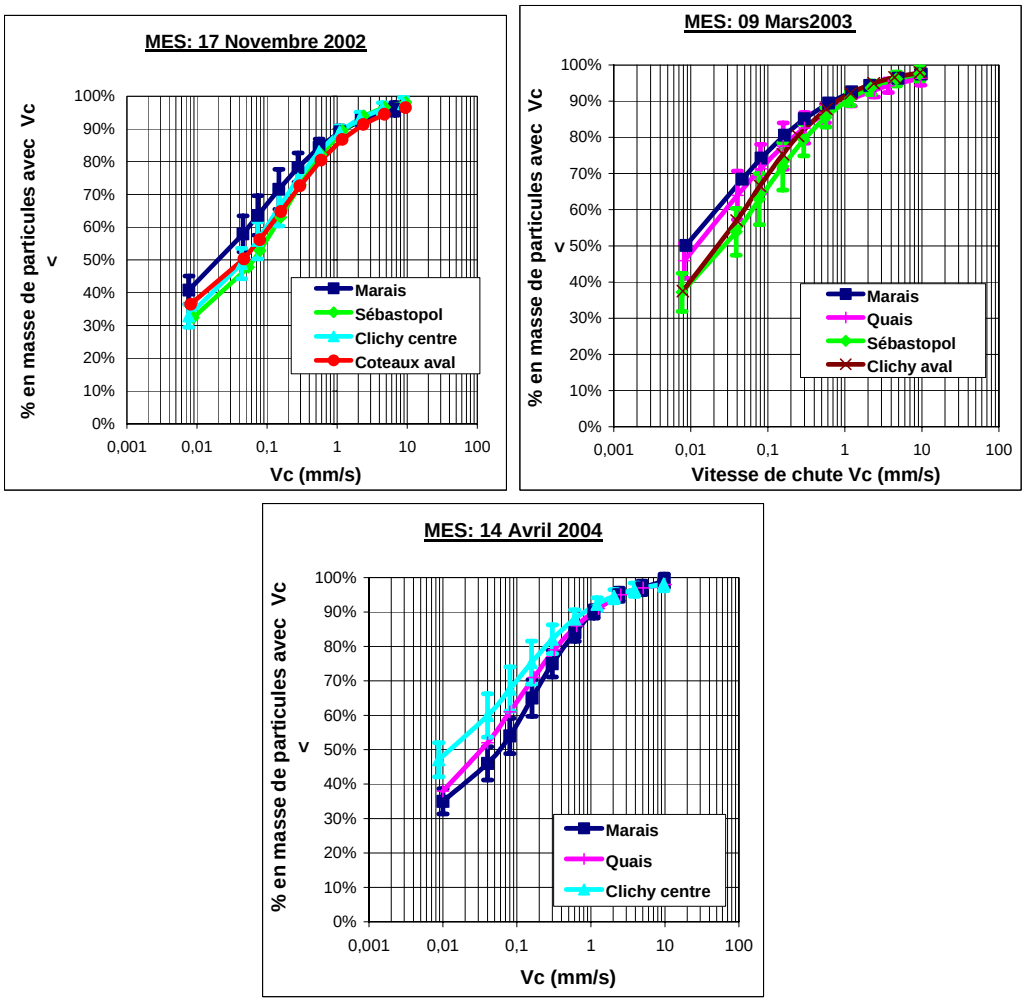


Figure 60: vitesses de chute des particules en suspension, mesurées dans les eaux usées de temps sec

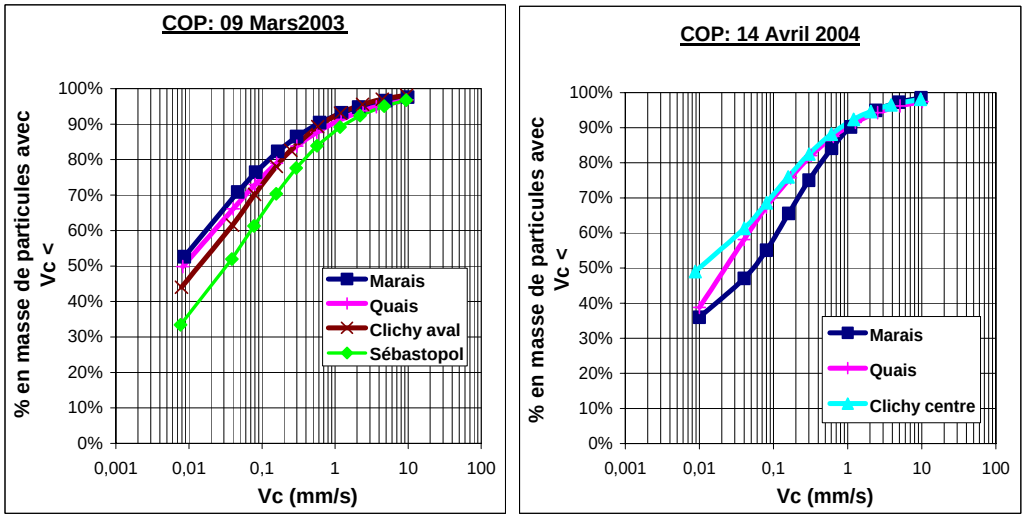


Figure 61 : vitesses de chute des particules de carbone organique, mesurées dans les eaux usées de temps sec

La comparaison entre les matières en suspension et le carbone organique particulaire fait apparaître des vitesses de chute quasi identiques (Figure 62), ce qui montre une distribution relativement homogène du COP sur les différentes classes de MES.

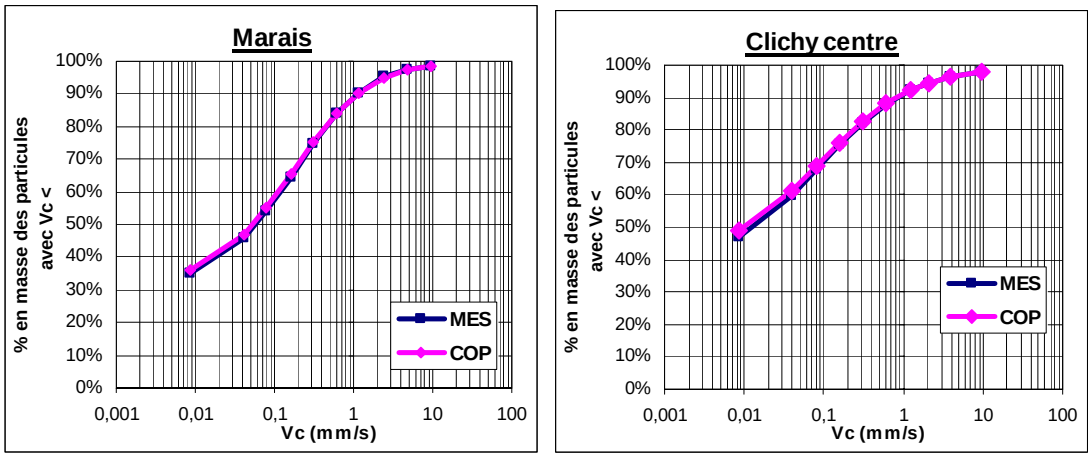


Figure 62: comparaison entre les vitesses de chute des particules en suspension et des particules du carbone organique particulaire, des eaux usées de temps sec

Les vitesses de chute mesurées au Marais actuellement se trouvent dans le fuseau de celles mesurées par Gromaire (1998). De plus, les particules en suspension des eaux usées des sites de l'OPUR décantent avec des vitesses de chute comparables à celles mesurées sur les deux sites nantais (Jardin des plantes et Cordon bleu) par Jaumouillié (2002).

1.3.5.2.4 Distribution des polluants par classes de vitesses de chute

La distribution par classes de vitesses de chute des polluants suivants : MES, MVS, DCO COP, Cu, Pb, et Zn a été étudiée pour la journée 14 Avril-04 et sur trois sites : Marais, Quais et Clichy centre (Figure 63 et ANNEXE 15). Les données pour le plomb n'ont cependant pas pu être exploitées suite à des résultats aberrants d'analyse.

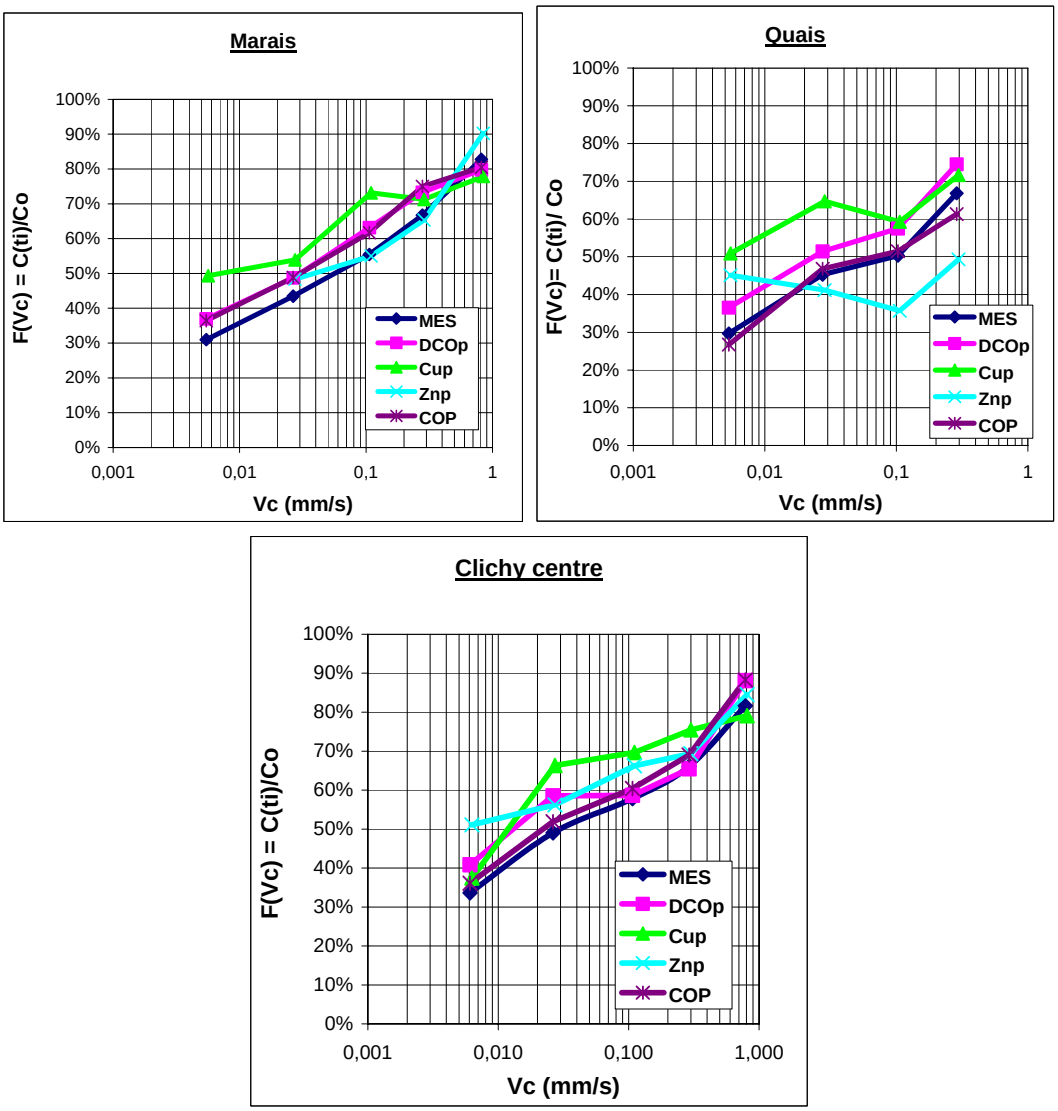


Figure 63 : distribution des polluants par classe de vitesses de chute

Les courbes de vitesses de chute des MES, DCOp et COP possèdent généralement la même allure. En revanche, celles en métaux lourds « Cu et Zn » présentent des comportements différents par rapport aux autres polluants.

La comparaison entre les vitesses de chute médianes (Tableau 97) montre que les MES décantent plus vite que la DCOp et le COP, en particulier sur le site des Quais où la V50 est 4.8 fois plus importante que celle de DCOp et 1.5 que celle du COP.

Les vitesses de chute médianes du cuivre et du zinc sont généralement plus faibles (2 à 24 fois) que celles des matières en suspension.

Vc50 (mm/s)	MES	DCOp	COP	Cup	Znp
Marais	0,06	0,023	0,023	0,006	0,034
Quais	0,12	0,025	0,08	0,005	-
Clichy centre	0,03	0,013	0,023	0,014	<0,006

Tableau 97 : vitesse de chute médiane

1.3.5.2.5 Signatures des effluents de temps sec

Pour mieux caractériser les effluents de temps sec, nous avons procédé au calcul de quelques rapports caractéristiques. Les résultats obtenus figurent dans les graphiques suivants (Figure 64) :

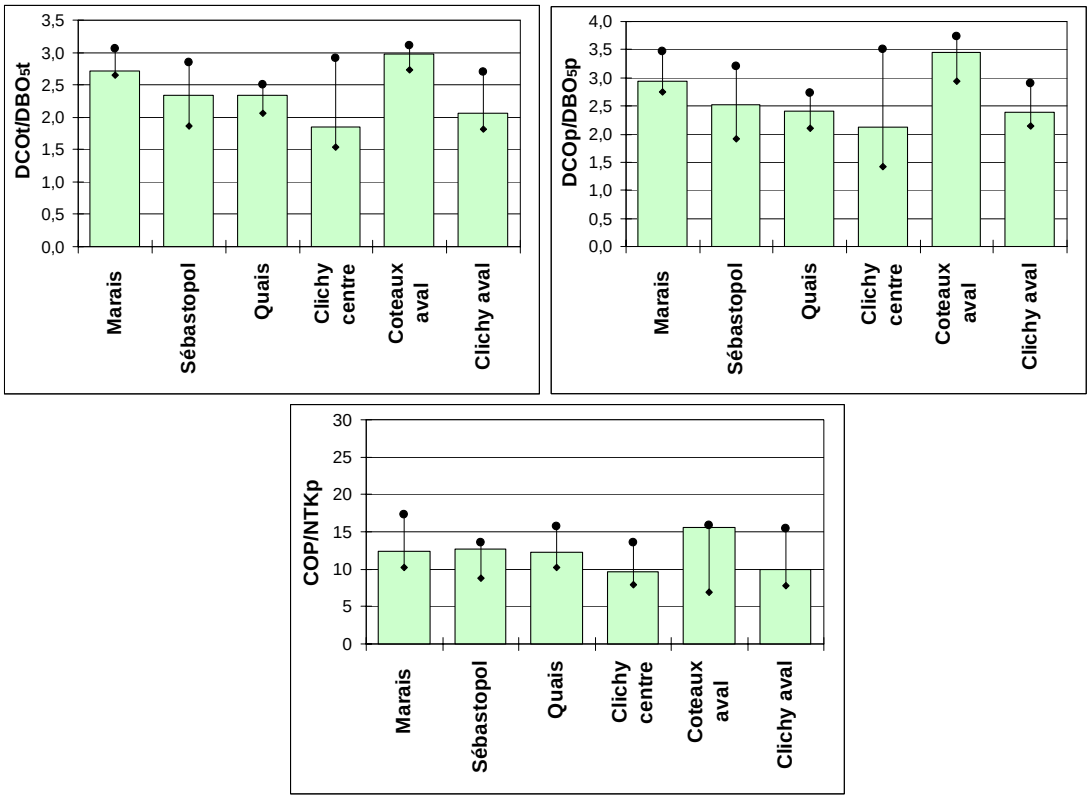


Figure 64: variabilité des rapports DCOt/DBOt, DCOp/DBOp, COP/NTKp, dans les effluents de temps sec

Le rapport DCOt/DBOt qui traduit la biodégradabilité des effluents et le rapport DCOp/DBO5p semblent décroître de l'amont vers l'aval du collecteur de Clichy. Ils sont significativement plus forts à Coteaux aval où leurs valeurs médianes respectives sont égales à 3 et 3.4.

Le rapport COP/NTKp est très comparable entre les trois sites amonts (en moyenne 12.44), mais apparaît supérieur à celui mesuré dans les effluents de temps sec des sites aval : Clichy centre et Clichy aval.

L'analyse de la variabilité spatiale de ces rapports montre que la nature des particules évolue légèrement vers l'aval, et que le site de Coteaux aval se distingue sensiblement des cinq autres sites.

1.3.6 Conclusions sur la caractérisation des eaux usées de temps sec

Le dispositif mis en place a permis la caractérisation des eaux usées de temps sec aux exutoires des bassins versants de l'OPUR :

- Les débits moyens journaliers augmentent proportionnellement avec la taille du bassin versant de 48l/s au Marais à 3579l/s à Clichy aval. Ceux en équivalant habitant varient par contre relativement peu d'un site de mesure à un autre et leur ordre de grandeur varie entre 398 et 458 l/EH.

- Les effluents de temps sec aux exutoires des 6 bassins versants possèdent des pH et des conductivités comparables. Leurs valeurs médianes respectives varient de 8.13 à 8.57, de 1003 à 1265µS/cm.

- Les concentrations et les flux par EHN des MES, des matières organiques sont généralement comparables entre les différents sites de mesure. Ceux en métaux lourds sont cependant plus variables. Cette variabilité est liée à l'occupation du sol notamment aux apports des activités professionnelles et dans une moindre mesure sans doute au nettoyage des voiries.

- Une variabilité considérable d'un jour de temps sec à un autre est observée sur l'ensemble des paramètres polluants étudiés. Elle peut être due d'une part, aux contraintes d'exploitation du réseau d'assainissement, et d'autre part aux apports d'activités professionnelles ponctuelles.

- Les particules des eaux usées de temps sec véhiculent en médiane 69 à 81% des matières oxydables, 16 à 23% des matières azotés, et 47 à 91% des métaux lourds. Cette répartition dissous-particualire parait stable entre l'amont et l'aval du collecteur de Clichy.

- Les particules des effluents de temps sec sont fortement organiques avec des teneurs en MVS variant entre 83 et 90%. Ces particules sont cependant riches en cuivre et zinc. Les teneurs médianes en Cu et en Zn des particules varient respectivement entre 284 et 476 mg/Kg et entre 398 et 1006 mg/Kg.

Les particules des eaux usées décantent avec des vitesses de chute faibles et relativement comparables entre les différents sites de mesure. Les V50 des MES oscillent entre 0.009 et 0.065 mm/s.

.

Chapitre 2 Caractérisation des eaux unitaires de temps de pluie, aux exutoires des bassins versants OPUR

2.1 Données disponibles

2.1.1 Campagnes de mesure et paramètres polluants analysés

15 événements pluvieux ont été étudiés entre octobre 2003 et avril 2005. Le nombre de pluies échantillonnées varie cependant d'un site de mesure à un autre, du fait de la mise hors service de certains sites durant les travaux de réhabilitation (Quais et Sébastopol) et des problèmes techniques.

Les échantillons prélevés ont été analysés en terme de :

- pH, conductivité et turbidité ;
- MES, MVS, DCO totale et dissoute, DBO_5 totale et dissoute, COP, COD et NTK total et dissous, métaux lourds totaux et dissous (Cadmium, Cuivre, Plomb et Zinc);
- Vitesse de chute.

Les données obtenues ont été exploitées en terme de :

- Concentrations totales et dissoutes;
- Flux par unité de surface active ;
- Distribution entre phase dissoute et particulaire ;
- Nature des particules :
  - teneurs en polluants des particules ;
  - vitesses de chute des particules en suspension ;
  - distribution des polluants par classe de vitesse de chute.

Le nombre des pluies collectées au courant de cette étude est présenté dans le Tableau 98, et un bilan des campagnes de mesure de temps pluie a été dressé en ANNEXE 16

	MES	MVS	DCO	DBO_5	COT	NTK	Cd	Cu	Pb	Zn
Marais	15	15	13	9	13	10	9	10	10	10
Sébastopol	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Quais	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Clichy centre	14	14	13	10	13	11	10	11	11	11
Coteaux aval	9	9	9	9	9	9	8	8	8	8
Clichy aval	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

Tableau 98: nombre d'évènements pluvieux étudiés pour chaque paramètre polluant, aux exutoires des bassins versants de l'OPUR

Par ailleurs, les campagnes de temps sec réalisées (entre octobre 2002 et mars 2005) (paragraphe I) qui ont permis la caractérisation des eaux usées de temps sec aux exutoires de chaque bassin versant ont montré des caractéristiques relativement homogènes des eaux usées d'un site de mesure à un autre, nous permettant ainsi d'obtenir un ordre de grandeur sur la qualité des eaux usées de temps sec, qui nous servira de référence dans cette partie. Nous ferons également référence pour les eaux de ruissellement aux résultats obtenus sur le site du Marais par Gromaire (1998). Ces données pourraient être considérées comme représentatives des eaux de ruissellement de la zone OPUR.

2.1.2 Caractéristiques des événements pluvieux étudiés et variabilité spatiale de la pluie sur la zone OPUR

L'événement pluvieux a été défini comme une précipitation d'une hauteur totale supérieure à 1 mm et séparée de l'événement précédent par une durée de temps sec d'au moins 30 min. Cette définition correspond à celle retenue lors du précédent programme de recherche "Génération et Transport de la pollution des Rejets Urbains de Temps de Pluie en Réseau d'Assainissement Unitaire" sur le Marais (1995-1998), afin d'avoir une homogénéité de la base de données.

A partir des données pluviométriques recueillies sur la zone OPUR, les caractéristiques suivantes sont calculées pour chaque pluie : Hauteur d'eau (Htot) ; Durée (D) ; Intensité moyenne (Imoy) ; Intensité maximale (Imax) ; Durée de Temps sec précédent la pluie (DTS).

Pour les grands bassins versants où la durée d'écoulement après la fin de la pluie peut être largement supérieure à 30mn (entre 2h et 6h), il n'était pas toujours possible de séparer les échantillons correspondant à des évènements successifs. De ce fait, un événement pluvieux équivalent a été défini. Il correspond à la somme des événements successifs et possède les caractéristiques suivantes :

- hauteur totale : somme des hauteurs des pluies;
- durée : somme des durées des pluies ;
- intensité moyenne : somme des hauteurs / somme des durées ;
- intensité maximale : intensité maximale sur toutes les pluies ;
- temps sec précédent la pluie : durée de temps sec précédent la première pluie.

Le Tableau 99 indique les ordres de grandeurs des caractéristiques des événements pluvieux échantillonnés. Il s'agit de la moyenne, de la valeur minimale et de la valeur maximale calculée à partir des mesures ponctuelles sur les 15 pluviomètres couvrant la zone OPUR. Les pluies étudiées sont de caractéristiques différentes mais correspondent pour la plupart à des précipitations de faibles ampleurs, précédées par des durées de temps sec relativement courtes.

	H (mm)	Imoy ($mm.h^{-1}$)	Imax ($mm.h^{-1}$)	Durée (h:min)	DTS (jour)
minimum	2	1	3	0:09	1
Moyenne	8	5	29	3:01	4
maximum	24	32	109	10:24	15

Tableau 99: caractéristiques des événements pluvieux échantillonnés

Cependant, l'analyse des données pluviométriques recueillies sur la zone OPUR a montré, pour certains événements pluvieux, une hétérogénéité spatiale des pluies. Compte tenu de cette variabilité, une analyse approfondie de la distribution spatiale de la pluie était nécessaire, ainsi que le calcul de la pluviométrie moyenne à l'échelle de chaque bassin versant.

Les caractéristiques (hauteur totale, intensité moyenne, intensité maximale, durée de la pluie et durée de temps sec précédente) des événements pluvieux étudiés ont été calculées en moyenne spatiale sur chaque bassin versant en appliquant la même méthode de distribution spatiale que dans le logiciel MOUSE. Chaque bassin versant est découpé en sous bassin versants hydrologiques de quelques dizaines d'hectares (sous bassins versants identiques à ceux définis dans le modèle MOUSE du réseau parisien). On affecte à chacun de ces sous bassins versants i la pluviométrie mesurée sur le pluviomètre le plus proche géographiquement. La valeur moyenne de la hauteur (H_{moy}) ou de l'intensité moyenne (I_{moy}), l'intensité maximale, la durée de la pluie et la durée de temps sec précédente sont ensuite calculées comme suit :

$$H_{moy} = \sum(H_i * S_i) \Big/ \sum S_i \; ; \; I_{moy} = \sum(H_i * S_i) \Big/ \sum(D_i * S_i)$$

$$I_{\max moy} = \sum(I_{\max i} * S_i) \Big/ \sum S_i \; ; \; DP_{moy} = \sum(D_i * S_i) \Big/ \sum S_i \; ; \; DTS_{moy} = \sum(DST_i * S_i) \Big/ \sum S_i$$

avec

Hi : hauteur totale de la pluie sur le sous bassin i ;

Si : surface du sous bassin versant i ;

Di : durée de la pluie sur le sous bassin i ;

Imaxi : intensité maximale sur le sous bassin i ;

DSTi : durée de temps sec sur le sous bassin i

Les caractéristiques pluviométriques moyennes estimées pour chaque événement pluvieux étudié se trouvent en ANNEXE 17. Il ressort de ces résultats que 35 à 40% des pluies sont fortement hétérogènes spatialement. Par ailleurs, des gradients sont observés entre les bassins amont et aval. Les gradients en hauteur moyenne varient entre 27 et 49%, pour une même pluie.

2.2Débits et paramètres physiques

Les ordres de grandeurs des débits mesurés aux exutoires des bassins versants pour l'ensemble des événements pluvieux échantillonnés entre 2003 et 2005 sont synthétisés dans le Tableau 100. A titre indicatif, nous donnons également les ordres de grandeurs des débits d'eaux usées qui se seraient écoulés à ces exutoires par temps sec, pendant la durée des événements pluvieux étudiés (calculés à partir de données mesurées par temps sec, sur la plage horaire de l'événement pluvieux).

Les débits mesurés sur les effluents unitaires de temps de pluie varient proportionnellement à l'échelle spatiale des bassins versants, la valeur médiane augmentant de 179 l/s au Marais à 6568 l/s à Clichy aval.

Les débits par hectare actif sont du même ordre de grandeur entre les sites amont et Clichy centre (de 5 à 6 l/s/ha actif). En revanche, ils sont plus faibles aux sites Coteaux aval et Clichy aval (3 à 4 l/s/ha actif). Ces faibles flux peuvent être expliqués par le délestage du collecteur de Coteaux vers l'Antenne de l'Emissaire Nord-Est.

La variabilité des débits d'une pluie à une autre traduit la diversité des caractéristiques pluviométriques des événements étudiés. Les valeurs des rapports entre le débit moyen ou maximal au cours de l'événement pluvieux et le débit de temps sec permettent d'évaluer

l'importance des événements pluvieux étudiés : il s'agit pour la plupart d'événements faibles à modérés, générant un débit moyen de l'ordre de 1.4 à 2.5 fois le débit de temps sec, et des débits de pointe de l'ordre de 1.95 à 5 fois le débit de temps sec. Sur les sites Marais, Coteaux aval et Clichy aval un à trois événements à fort débit de pointe ont été échantillonnés (Qmax/Qeu = 13 à 31). On ne dispose pas d'événement de ce type sur les sites Sébastopol, Quais et Clichy centre.

	Marais	Sébastopol	Quais	Clichy centre	Coteaux aval	Clichy aval
Débit moyen de l'événement pluvieux Qm (l/s)	129 – 351, [179]	299 –915, [447]	1086-1700, [1495]	3354 – 5633, [4144]	1534-3693, [2069]	5033 – 8932, [6568]
Débit / ha actif Qactif (l/s/ha)	4-12, [6]	4-11, [5]	4-6, [5]	4-9, [6]	2-7, [3]	3-7, [4]
Débit maximal de l'événement pluvieux Qmax (l/s)	215 –956, [350]	383 – 1292, [680]	1380-2566, [1495]	4234 – 9681, [5654]	2506- 11113, [3812]	5390 – 25807, [11590]
Débit moyen d'eaux usées au cours de l'événement pluvieux Qeu (l/s)	34 –142, [69]	200 – 541, [272]	436-791, [518]	2575 – 3405, [2829]	905 – 3043, [1181]	2.61 – 5.18, [3.61]
Qm / Qeu	1.6 – 6.4, [2.3]	1.01 – 2.2, [1.4]	1.6 – 3.9, [2.5]	1.2 – 2.3, [1.4]	1.3 – 3.3, [1.7]	1.3 – 3.2, [1.7]
Qmax / Qeu	2.5 – 16, [5.0]	1.5 – 4.1, [2.0]	2.0 – 5.8, [3.1]	1.5 – 4.2, [1.9]	1.9 – 8.7, [3.1]	1.6 – 5.7, [2.3]
1er décile –9ième décile, [médiane] sur l'ensemble de la campagne de mesure						

Tableau 100: débits moyen et maximal mesurés aux exutoires des 6 bassins versants au cours des événements pluvieux étudiés, et comparaison avec les débits d'eaux usées calculés sur la période de l'événement pluvieux

Les caractéristiques des effluents unitaires en terme de pH et de conductivité sont données dans le Tableau 101.

Le pH des eaux unitaires de temps de pluie est du même ordre de grandeur entre les différents bassins versants. Il varie relativement peu d'un événement pluvieux à un autre, avec des valeurs entre 7.2 et 8.2. Le pH des effluents de temps de pluie est légèrement inférieur au pH de temps sec qui est situé entre 8.1 et 8.5, les valeurs les plus faibles correspondant aux événements pluvieux les plus forts.

	Marais	Sébastopol	Quais	Clichy centre	Coteaux aval	Clichy aval
pH	7.6-8.2, [7.9]	7.7-8.2, [7.9]	7.6-8.1, [7.9]	7.4-8.1, [7.7]	7.2-8.1, [7.7]	7.6-8.0, [7.8]
Conductivité moyenne au cours de l'événement pluvieux Km (µS/cm)	303-652, [435]	705-851, [789]	387-819, [501]	513-928, [733]	370-781, [550]	303-816, [634]
Conductivité médiane des eaux de temps sec Keu (µS/cm)	956	1265	1051	1122	1150	1120
Keu / Km	1.5 – 3.2 [2.2]	1.5 – 1.8 [1.6]	1.3 – 2.7 [2.1]	1.2 – 2.2 [1.5]	1.5 – 3.2 [2.1]	1.4 – 4.0 [1.8]
1er décile –9ième décile, [médiane] sur l'ensemble de la campagne de mesure						

Tableau 101 : pH et conductivité mesurés sur les échantillons moyens de temps de pluie.

La conductivité des effluents de temps de pluie varie dans une large gamme d'un événement pluvieux à l'autre. Elle reste toujours inférieure à celle des eaux usées de temps sec. Elle est d'autant plus faible que l'événement pluvieux est fort et donc que la proportion d'eau usée dans l'effluent est faible. La conductivité de l'effluent fournit donc un indicateur de la proportion eaux usées / eaux pluviales de l'effluent. Pour les échantillons des événements pluvieux étudiés, le rapport entre conductivité des eaux usées de temps sec et conductivité moyenne au cours de l'événement pluvieux varie entre 1.3 et 4, avec une valeur médiane entre 1.5 et 2.2 suivant les sites. Ces valeurs sont en cohérence avec le rapport des débits temps de pluie / temps sec (Qm/Qeu) présenté précédemment.

2.3Concentrations moyennes à l'échelle de l'événement pluvial

2.3.1 Concentrations des matières en suspension, des matières oxydables et azotées

Les concentrations moyennes au cours de l'événement pluvieux des matières en suspension, des matières organiques et azotées sont présentées dans le Tableau 102 (voir également ANNEXE 18).

Concentrations (mg/l)	MES	MVS	DCOt	DBO_5t	COT	NTKt
Marais	196-462, [303]	152-333, [227]	294-739, [496]	108-290, [241]	73-200, [139]	13-30, [23]
Sébastopol	263-409, [322]	150-300, [202]	386-594, [480]	151-231, [177]	119-169, [150]	22-32, [28]
Quais	186-356, [265]	140-244, [165]	292-514, [336]	120-216, [125]	73-160, [104]	18-32, [24]
Clichy centre	187-320, [250]	148-257, [206]	307-482, [408]	119-207, [151]	85-140, [123]	15-35, [28]
Coteaux aval	277-401, [381]	211-325, [283]	409-682, [569]	140-209, [190]	130-199, [158]	20-36, [30]
Clichy aval	203-297, [259]	142-216, [169]	286-487, [386]	102-201, [140]	83-141, [112]	14-31, [25]
Eaux usées de temps sec	158-240, [196]	142-216, [165]	319-477, [370]	131-218, [183]	96-128, [109]	29-40, [35]
Eaux de ruissellement (Gromaire, 1998)	30-75, [36]	15-40, [20]	43-113, [56]	8-25, [11]	-	-

1^{er} décile-$9^{ème}$ décile, [médianes] sur l'ensemble de la campagne de mesure.

Tableau 102: Concentrations en MES, MO, et NTK, mesurées, par temps de pluie, à l'exutoire des bassins d'étude.

Les concentrations en MES, MVS, DCO, COT et NTK sont comparables entre les différents sites, à l'exception du site de Coteaux qui se distingue par des valeurs systématiquement plus élevées. De même, les concentrations de DBO_5 sont du même ordre de grandeurs entre les sites étudiés, exception faite du Marais qui présente des DBO_5 plus élevées. Les concentrations médianes de MES et de DBO_5 varient respectivement entre 250 et 381 mg/l et entre 125 et 241 mg/l, suivant le site de mesure.

La variabilité d'une pluie à une autre est importante pratiquement pour tous les paramètres polluants étudiés.

Les concentrations moyennes à l'échelle de l'événement pluvieux des matières en suspension et des matières organiques des eaux unitaires sont équivalentes ou supérieures à celles des

eaux usées de temps sec. Elles sont dans tous les cas très largement supérieures aux concentrations mesurées par Gromaire (1998) pour les eaux de ruissellement du bassin versant du Marais. Cette comparaison confirme l'importance de la pollution engendrée par temps de pluie. Elle suggère par ailleurs, quel que soit le bassin versant étudié, un apport de particules et de matières oxydables provenant d'une source autre que les eaux usées et le ruissellement, probablement de l'érosion de sédiment à l'intérieur du réseau d'assainissement.
L'azote se distingue des autres paramètres polluants par des concentrations dans les effluents de temps de pluie toujours inférieures à celles des eaux usées, traduisant une dilution des eaux usées. En effet, les eaux usées sont la principale source d'azote par temps de pluie, les concentrations en NTK des eaux de ruissellement étant très faibles (les valeurs citées dans la littérature pour les eaux de ruissellement urbaines sont en général inférieures à 5 mg/l). On note cependant que le rapport [NTK] eaux usées / [NTK] temps de pluie est en médiane de 1.2 à 1.5 suivant le site de mesure, ce qui reste inférieur aux rapports de conductivité Keu / Km ou de débit Qm / Qeu qui sont respectivement de l'ordre de 1.5 à 2.2 et de 1.4 à 2.3. Une source d'azote complémentaire aux eaux usées est donc à prendre en compte : azote des eaux de ruissellement mais probablement aussi azote des dépôts organiques érodés dans le réseau.

Les concentrations des effluents de temps de pluie mesurées actuellement sur le Marais sont systématiquement supérieures à celles mesurées par Gromaire (1998) sur le même site de mesure (Tableau 103).

Les concentrations en matières en suspension et en matières oxydables mesurées sur les sites Coteaux aval et Clichy aval au cours de cette étude sont elles aussi supérieures aux concentrations mesurées respectivement à Coteaux par Philippe et Ranchet (1987) et LROP (1980), au P208 (sur l'antenne Wattignies du déversoir Vincennes Chatenton) par la SAP (1996) et à Clichy par Saget-base Qastor (1994).

Par ailleurs, les concentrations des effluents de temps de pluie des bassins versants de l'OPUR se trouvent dans la fourchette de variation des concentrations des bassins versants d'Ile de France de la base Qastor. Quant aux concentrations des sites étrangers, mis à part les MES et le NTKt, nos sites de mesure se caractérisent par des concentrations plus élevées.

Concentrations (mg/l)	MES	MVS	DCO	DBO_5	NTK
Marais (Gromaire, 1998)	121-192, [221]	87-331, [140]	190-639, [331]	81-262, [139]	-
Coteaux, P208 et Clichy aval (Philippe et Ranchet ; 1987, LROP ; 1980, SAP, 1996 et Saget -base Qastor ; 1994)	(112)-(250)	-	(259)- (278)	(72)	(14)
BV Ile de France (Saget - base Qastor ; 1994)	(267)-(570)	(215)	(381)-(632)	(118)-(231)	(24)-(29)
Santiago de Compostela et Coré (Diaz-Fierros et al. ; 2002 et Jun Ho Lee et Ki Woong Bang ; 2000)	(309)	-	(193)- (394)	(93)- (155)	(11)-(31)

Tableau 103: Rappel des ordres de grandeurs des concentrations des MES et MO et NTK dans les effluents de temps de pluie trouvées dans la littérature

2.3.2 Concentrations en métaux lourds

Les concentrations en métaux lourds (Figure 65 et ANNEXE 19) font apparaître des variations d'un site de mesure à un autre plus importantes que pour les paramètres globaux. Les plus fortes valeurs sont généralement mesurées aux exutoires du Marais, Sébastopol et Coteaux aval. Les concentrations médianes en cuivre varient entre 100 et 210 µg/l alors que celles en zinc oscillent entre 1020 et 1600 µg/l.

Une diminution des concentrations de cadmium total (de 1.55 µg/l en médiane au Marais à 0.90 µg/l à Clichy Centre) apparaît néanmoins entre l'amont et le milieu du collecteur de Clichy.

Cette variabilité entre les sites de mesure est sans doute liée aux types de toitures et à l'intensité de la circulation automobile.

Les sites Marais et Sébastopol qui possèdent les plus forts pourcentages de surface de toitures en zinc (respectivement 28% et 33%) correspondent effectivement aux sites avec les plus fortes concentrations en Cd et Zn, par temps de pluie. Cependant, le pourcentage de surface des toitures en zinc ne permet pas d'expliquer à lui seul la variabilité de Cd et Zn entre les différents sites de mesure. Ainsi à Coteaux aval qui a une surface de toits en zinc parmi les plus faibles (16%) présente les concentrations en Cd et Zn les plus fortes.

La circulation automobile ne parait pas être non plus un facteur explicatif suffisant: à l'exception du Marais et du Sébastopol qui se distinguent par une proportion importante de

petites rues et une circulation automobile plus faible, le trafic automobile semble relativement comparable entre Clichy centre et Coteaux.

Dans le cas du Cu, le profil de concentration observé sur les différents sites de mesure est comparable à celui observé pour les eaux usées de temps sec : les concentrations les plus fortes sont mesurées à Sébastopol, Marais et Coteaux aval, alors que les concentrations les plus faibles sont mesurées sur Quais, Clichy centre et Clichy aval. Ceci laisse penser qu'il y a peut être une contribution du dépôt du réseau formés par temps sec.

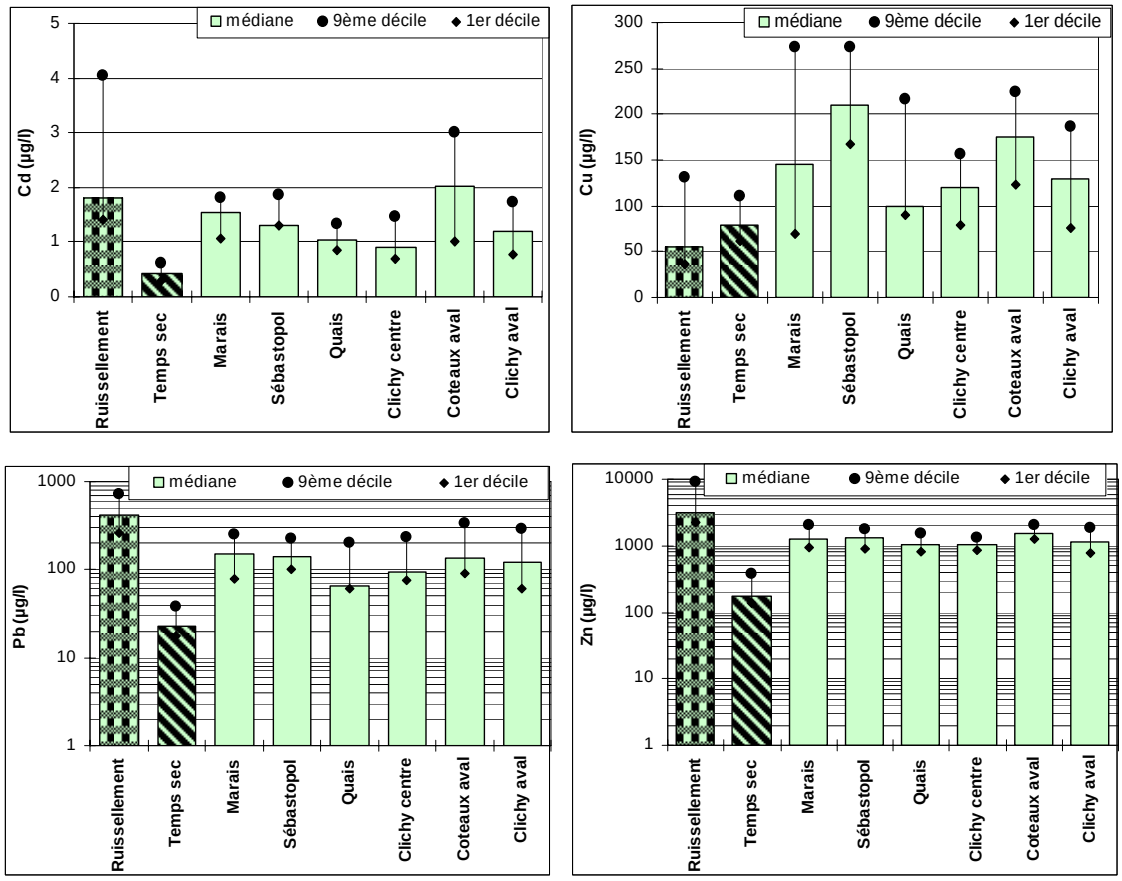


Figure 65: Concentrations en métaux lourds totaux, mesurées, par temps de pluie, à l'exutoire des bassins d'étude (les données « ruissellement » sont celles mesurées sur le Marais en 1997–1998).

Une grande variabilité d'un événement pluvieux à un autre existe quel que soit le site étudié et quel que soit le métal analysé. Cette variabilité d'un évènement à l'autre est plus importante que la variabilité entre les différents sites de mesure.

Comme on le voit sur les graphiques, deux groupes de métaux peuvent être distingués. Le premier groupe concerne le cuivre où les concentrations dans les eaux unitaires sont supérieures à celles des eaux usées et des eaux de ruissellement. Le second groupe comprend le cadmium, le plomb et le zinc, pour les quels les concentrations dans les effluents de temps de pluie sont très supérieures à celles des eaux usées (d'un facteur d'environ 10) mais restent pour tous les sites nettement inférieures aux concentrations mesurées pour les eaux de ruissellement du Marais (Garnaud, 1999).

La représentativité des eaux de ruissellement du Marais pour les autres bassins versants a été confirmée sur la base d'une analyse approfondie des plans d'occupation du sol. Cette analyse a montré une occupation des sols généralement homogène entre les bassins versants (Partie1 : Chapitre 1 : §1.2.2.1).

Les bilans de masse "Entrée-Sortie" calculés sur le bassin versant du Marais par Garnaud, (1999) et Gromaire (1998) avaient montré que la majeure partie du Cu provient essentiellement du réseau suite à l'érosion du dépôt formé par temps sec, alors que le Cd, Pb et Zn proviennent quasi totalement du ruissellement et se perdent en partie au cours de son transfert dans le réseau par des phénomènes d'adsorption. Les concentrations observées sur les différents sites OPUR laissent supposer que ces mêmes phénomènes ont lieu pour toute la zone OPUR.

Les concentrations médianes en cadmium mesurées sur le Marais au cours de cette étude sont généralement comparables à celles mesurées en 1999, alors que nos valeurs médianes de Cu sont supérieures à celles mesurées en 1999 (19% d'écart entre les valeurs médianes) et celles en Pb et Zn sont plus faibles (29% et 16% d'écart entre les valeurs médianes respectivement pour le Pb et le Zn). Cette différence peut être due à plusieurs causes :

- des fluctuations d'échantillonnage (c'est à dire due au fait qu'on n'a pas le même échantillon de pluies) ;
- une disparition progressive de l'essence plombée ;
- une diminution des retombées atmosphériques de Cd et de Pb. En effet, une diminution d'un facteur 2.5 pour le Cd et d'un facteur 3 pour le Pb a été constatée sur le site du Marais, entre 1997 et 2002 (Azimi, 2004), mais pas de diminution des flux atmosphériques de Cu et Zn.

Dans le cas du plomb, nous avons cherché à estimer l'effet de la disparition de l'essence plombée et de la diminution de retombées atmosphériques sur les concentrations des eaux de ruissellement du Marais. Pour cela les hypothèses suivantes ont été nécessaires :

- une diminution d'un facteur 3 des retombées atmosphériques de plomb (Azimi, 2004) ;
- on considère les contributions médianes de retombées atmosphériques calculées par Garnaud (1999) respectivement pour les toits et les cours : 20%et 25% pour les retombées sèches et 80% et 75% pour retombées humides ;
- pour les voirie, on considère qu'il n'y a pas du tout d'émission automobile de plomb et par conséquent la concentration voirie est prise égale à la concentration des cours.

Les résultats obtenus sont présentés dans Tableau 104 et montrent que la disparition de l'essence plombée et de la diminution des retombées atmosphériques de plomb conduisent à une diminution de 16% des concentrations des eaux de ruissellement du Marais par rapport à celles mesurées en 1996-1997.

	Toitures	Chaussée	Cours	Total BV
Volume/volume ruissellement BV (%)	0.62	0.23	0.15	1
Concentration médiane 1996-1997 (µg/l)	569	156	108	405
Hypothèse de concentration minimaliste pour 2003-2005 (µg/l)	493	90	90	340
			écart	-16%

Tableau 104 : Effet potentiel de la disparition de l'essence plombée et de la diminution de retombées atmosphériques de plomb sur les concentrations des eaux de ruissellement du Marais

Les concentrations de Cd trouvées dans la littérature sont largement supérieures aux concentrations mesurées sur nos bassins versants. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces données sont anciennes et sans doute lié à de forte diminution des rejets industriels de cadmium depuis (notamment une diminution des retombées atmosphériques) (Azimi et al, 2004). Par ailleurs, nos concentrations de Cu se trouvent dans la fourchette de variation de la littérature. En revanche, nos concentrations en Pb paraissent plus faibles que celles citées dans la bibliographie. Alors que celles en Zn se trouvent dans la fourchette supérieures que les concentrations de la littérature.

Concentrations (µg/l)	Cd	Cu	Pb	Zn
Marais (Garnaud,1999)	0.8-3.3,[1.5]	58-208,[117]	132-377, [211]	1024-3343,[1530]
Coteaux, P208 et Clichy aval (Philippe et Ranchet ; 1987, LROP ; 1980 ; SAP, 1996 et Saget -base Qastor ; 1994)	(3)-(10)	(153)	(133)-(260)	(598)- (1850)
BV Ile de France (Saget - base Qastor ; 1994)	(6)-(13)	-	(198)-(566)	(837)-(2276)

Tableau 105: Rappel des ordres de grandeurs des concentrations en métaux lourds dans les effluents de temps de pluie trouvées dans la littérature

2.4Flux par hectare « actif » des paramètres globaux et des métaux lourds

Les flux par hectare « actif » de matières en suspensions, des matière organiques et azotées et de métaux lourds ont été estimés pour chaque bassin versant (Tableau 106 et Figure 66) (voir aussi ANNEXE 20 et ANNEXE 21)

La surface active est la surface qui a contribuée réellement au ruissellement, pendant l'événement pluvieux. Nous l'avons estimée ici comme étant le produit de la surface totale du bassin versant et de son coefficient de ruissellement (Cr). Notons que les Cr utilisé sont ceux corrigés compte tenu de l'occupation du sol. Par ailleurs, pour les pluies qui ont été échantillonnées pendant des périodes de travaux, les surfaces prises pour le calcul des flux tiennent compte de la déviation des eaux.

Flux (kg/ha_actif)	MES	MVS	DCO	DBO_5	COT	NTK
Marais	15-56, [31]	11-43, [19]	23-90, [45]	12-38, [18]	7-23, [13]	1.3-3.9, [1.9]
Sébastopol	22-52, [26]	18-36, [21]	37-62, [40]	10-21, [12]	13-26, [16]	1.8-3.8, [2.5]
Quais	13-39, [21]	9-27, [14]	21-56, [28]	9-20, [13]	6-15, [8]	1.4-3.0, [2.0]
Clichy centre	23-60, [32]	20-43, [30]	38-86, [57]	14-27, [22]	11-21, [17]	2.4-4.1, [3.4]
Coteaux aval	10-85, [28]	8-68, [19]	16-143, [41]	5-43, [12]	5-39, [11]	0.9-5.4, [2.0]
Clichy aval	20-55, [34]	14-36, [24]	36-80, [55]	17-25, [21]	9-21, [15]	2.0-4.2, [3.2]
1^{er} décile-$9^{ème}$ décile, [médiane] sur la période de la campagne de mesure						

Tableau 106: Flux par hectare actif en MES, MO, et NTK, mesurées, par temps de pluie, à l'exutoire des bassins d'étude.

Les flux médians de matières oxydables et azotées par hectare actif sont assez variables d'un site de mesure à un autre. Ainsi, les flux médians par unité de surface active de MES et de DBO_5 varient respectivement de 21 à 34 kg/ha actif et de 12 à 21 kgO2/ha actif.

Les plus faibles flux sont souvent mesurés à Quais et Coteaux aval, alors que les plus forts flux sont estimés à Clichy centre et Clichy aval.

Les plus faibles flux à Quais peuvent s'expliquer par le fait que sur ce bassin versant, il y une importante surface de voies ferrées et un grand espace vert : ces surfaces ne contribuent peut être pas du tout au ruissellement et par conséquent le coefficient de ruissellement estimé est sans doute surestimé.

Par ailleurs, les flux mesurés Coteaux aval sont sans doute sous-estimés à cause du délestage du collecteur de Coteaux vers l'Antenne de l'Emissaire Nord-Est.

Les flux par hectare actif de métaux lourds sont variables d'un site de mesure à un autre. Les plus fortes valeurs sont souvent mesurées au Sébastopol et Clichy.

Les flux en Cd et en Zn varient respectivement entre 0.07 et 0.21 g/ha actif et entre 96 et 202g/ha actif.

Les flux par unité de surface actif varient considérablement d'une pluie à une autre.

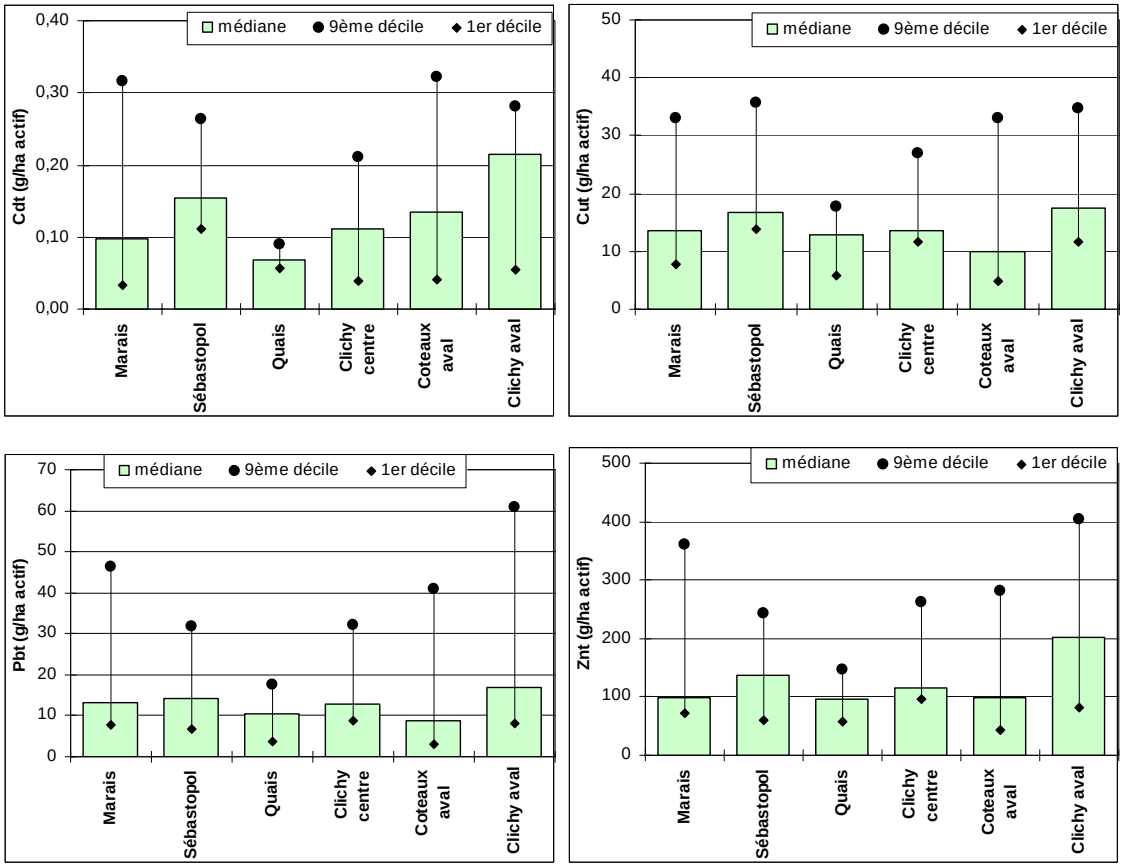


Figure 66 : Flux par hectare actif en métaux lourds mesurés par temps de pluie à l'exutoire des bassins d'étude

Les flux par hectare actif calculé sur le Marais pour cadmium, le plomb et le zinc sont généralement du même ordre de grandeur que ceux estimés par Gromaire (1998). Ceux en cuivre sont cependant largement supérieurs (Tableau 107).

Flux (g/ha actif)	Cd	Cu	Pb	Zn
Marais (1998)	0.05-0.23,[0.13]	4-21,[7]	5-38,[15]	66-249,[121]

Tableau 107 : flux par unité de surface actif mesuré au Marais en 1998 (Gromaire, 1998)

2.5Nature de la pollution liée aux particules

2.5.1 Répartition de la pollution entre phase dissoute et particulaire

2.5.1.1 Distribution Dissous / particulaire des matières oxydables et azotées

La proportion de DCO, DBO_5, COT et NTK liée aux particules, en moyenne sur l'événement pluvieux est synthétisée dans la Figure 67 et (ANNEXE 22).

En médiane, 79 à 87% des matières organiques transportées à l'exutoire des bassins versants OPUR sont sous forme particulaire. La proportion de l'azote liée aux particules varie entre 32 et 45% en médiane suivant le site de mesure, et peut être expliquée par le mélange avec les eaux usées où le NTK est essentiellement présent sous forme de NH_4^+.

La répartition entre la phase dissoute et la phase particulaire ne varie pas avec l'échelle spatiale. Cette distribution dissous/particulaire est de plus relativement stable d'un événement pluvieux à un autre pour la matière oxydable. Elle est plus variable pour le NTK, en fonction de la proportion d'eaux usées contenues dans les effluents de temps de pluie. En effet, cette dernière varie considérablement d'une pluie à une autre.

Les pourcentages de pollution organique et azotée liée aux particules mesurés dans les effluents unitaires de temps pluie sont généralement supérieurs à ceux mesurés dans les eaux usées de temps sec et à ceux des eaux de ruissellement, traduisant un apport de matière organique particulaire et d'azote particulaire en provenance des dépôts.

Les pourcentages de pollution organique liée aux particules concordent avec ceux trouvés par Gromaire (1998) sur le Marais et Chebbo (1992) au Collecteur 13 à Marseille (Tableau 108).

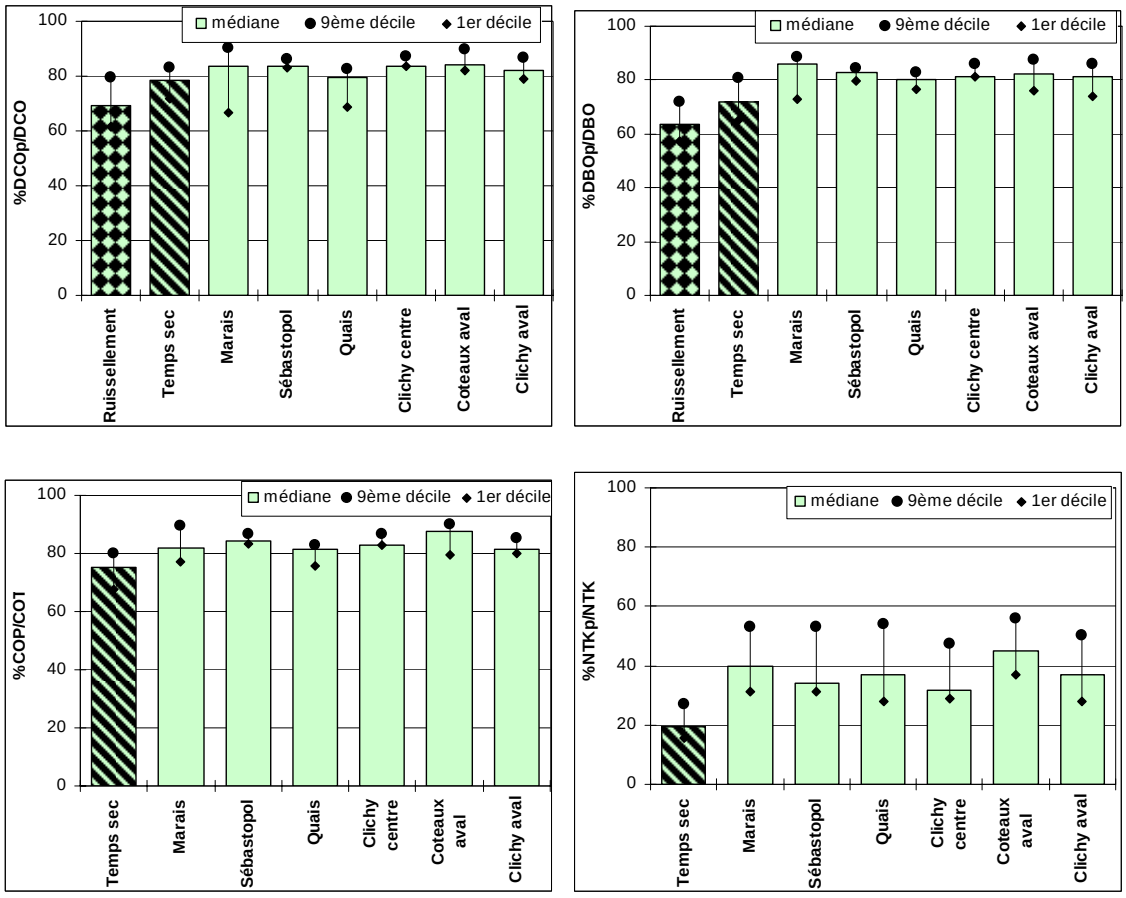


Figure 67: Répartition de la pollution entre la phase dissoute et la phase particulaire, par temps de pluie.

Pourcentages de pollution liée aux particules	%DCOp/DCOt	$\%DBO_5p/DBO_5t$
Marais (Gromaire, 1998)	64-94,(82)	59-95,(80)
Collecteur 13 à Marseille (Chebbo, 1992)	83-92	83-91
1^{er} décile-$9^{ème}$ décile, (moyenne)		

Tableau 108 : Rappel des pourcentages de la pollution organique liée aux particules, mesurées par temps de pluie, trouvées dans la littérature.

2.5.1.2 Distribution Dissous / particulaire des métaux lourds

Les pourcentages de la pollution métallique liée aux particules en suspension sont représentés dans la Figure 68 (voir également ANNEXE 23).

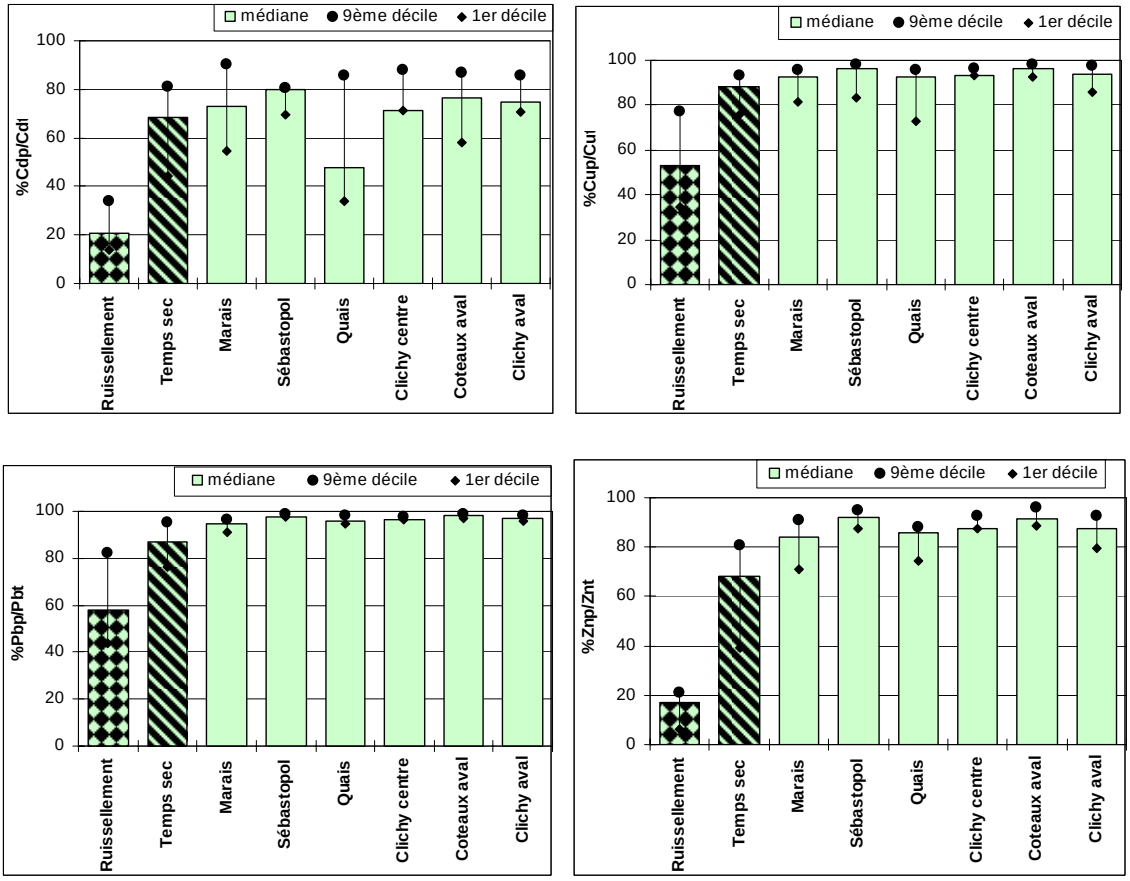


Figure 68 : Répartition de la pollution métallique entre la phase dissoute et la phase particulaire, par temps de pluie.

Les particules s'avèrent toujours le principal vecteur de pollution métallique dans les eaux unitaires aux exutoires des bassins versants de l'OPUR.

Le pourcentage de plomb lié aux particules est supérieur à 95% quel que soit le site et l'événement pluvieux. Cette proportion est un peu plus variable d'un événement à l'autre dans le cas du cuivre et du zinc, cependant la proportion de cuivre et de zinc sous forme particulaire est supérieure à 84% pour 90% des événements étudiés. Elle varie en médiane suivant le site de mesure entre 92% et 96% pour le cuivre, entre 84% et 92% pour le zinc.

Pour le cadmium, la fraction dissoute varie dans une plus large gamme d'un événement pluvieux à l'autre. En médiane sur l'ensemble des événements, 48 à 80% du cadmium est sous forme particulaire, suivant le site de mesure.

Les pourcentages de la pollution métallique liée aux particules ne varient pas significativement en fonction de l'échelle spatiale (la proportion de Cu, Pb et Zn particulaire semble augmenter très légèrement vers l'aval). Ils sont globalement plus élevés que ceux des eaux usées de temps sec et des eaux de ruissellement.

Les pourcentages de métaux sous formes particulaire mesurés sur le Marais sont du même ordre de grandeur que ceux trouvés par Garnaud (1999).

Il faut noter que les pourcentages de Cd particulaire mesurés sur le Marais au cours de cette étude sont nettement plus faibles que ceux mesurés précédemment en 1997 et 1998 (plus de 93% du cadmium sous forme particulaire selon Garnaud, 1999) sur le même site : en effet alors que les concentrations en cadmium total sont comparables au cours des deux périodes, les concentrations en cadmium dissous mesurées en 2003 – 2005 sont 5 à 10 fois supérieures à celles de 1997- 1998.

Les pourcentages des métaux particulaires mesurés aux exutoires des sites OPUR sont généralement comparables à ceux mesurés en 1994 sur les eaux de surverse de l'usine Clichy (base Qastor Saget, 1994).

Pourcentages de pollution liée aux particules	% Cdp/Cdt	% Cup/Cut	% Pbp/Pbt	% Znp/Znt
Marais (Garnaud, 1999)	93-100, [99]	91-99, [96]	90-99,[97]	67-98,[88]
Clichy (Saget, 1994)	[61]	84-93, [96]	76-96, [90]	70-89,[81]
1^{er} décile-$9^{ème}$ décile, [médianes]				

Tableau 109: Rappel des pourcentages de la pollution métallique liée aux particules, mesurées par temps de pluie, trouvées dans la littérature.

2.5.2 Caractéristiques des particules en suspension

2.5.2.1 Teneurs en matières oxydables et azotées

Les teneurs médianes en matières volatiles des MES de temps de pluie sont de l'ordre de 0,72 à 0,8 g/g, celles en DCOp varient de 1.14 à 1.45 gO_2/g alors que celles en azote oscillent de 0,03 à 0,04 gN/g (Tableau 110 et ANNEXE 24). Comme pour les pourcentages de la pollution liée aux particules, ces teneurs ne varient pas significativement avec la taille des bassins versants.

Les teneurs en matières oxydables sont assez variables d'une pluie à autre et en particulier sur Marais et Clichy centre.

Les particules des eaux unitaires de temps de pluie transportées aux exutoires des bassins versants de l'OPUR paraissent de nature légèrement moins organique que celle des eaux usées de temps sec; mais elles ont une nature nettement plus organique que les particules des eaux de ruissellement. Ceci peut être expliqué par le mélange avec les eaux usées mais aussi peut être lié à l'érosion d'un stock organique dans le réseau.

Teneurs sur les particules	MVS / MES (g/g)	DCO p / MES (g O_2/g)	DBO_5 p / MES (g O_2/g)	COP / MES (g C/g)	NTK p / MES (g N/g)
Marais	0.62-0.83,[0.76]	0.89-1.65,[1.45]	0.44-0.76,[0.49]	0.25-0.45, [0.39]	0.03-0.04,[0.03]
Sébastopol	0.71-0.81, [0.76]	1.01-1.49, [1.27]	0.36-0.68, [0.44]	0.34-0.4, [0.39]	0.02-0.04, [0.03]
Quais	0.66-0.76, [0.72]	0.94-1.33, [1.14]	0.37-0.67, [0.42]	0.3-0.4, [0.33]	0.03-0.05, [0.03]
Clichy centre	0.68-0.83,[0.80]	1.09-1.86,[1.32]	0.39-0.75,[0.48]	0.29-0.47, [0.39]	0.03-0.05,[0.04]
Coteaux aval	0.64-0.8,[0.76]	1.13-1.52,[1.28]	0.3-0.49,[0.44]	0.32-0.46, [0.38]	0.03-0.04,[0.03]
Clichy aval	0.6-0.78,[0.73]	0.97-1.48,[1.38]	0.35-0.61,[0.45]	0.25-0.41, [0.39]	0.03-0.05,[0.04]
Eaux usées de temps sec	0.84-0.9, [0.88]	1.47-1.89, [1.6]	0.47-0.83, [0.61]	0.39-0.48, [0.44]	0.03-0.05, [0.04]
Eaux de ruissellement (Gromaire,1998)	0.4-0.59, [0.54]	0.73-1.29, [1.05]	0.11-0.24, [0.19]	-	-
Marais (Gromaire, 1998)	0.55-0.78, [0.68]	0.92-1.48, [1.23]	0.3-0.65, [0.47]	-	-
Collecteur 13 (Chebbo, 1992)	0.24-0.55	0.93-1.34	0.23-0.6	-	-
1^{er} décile-$9^{ème}$ décile, [médianes] sur l'ensemble de la campagne de mesure					

Tableau 110: Teneurs en matières organiques et azotées des particules mesurées par temps de pluie à l'exutoire de nos six bassins versants.

Les teneurs en matières volatiles et en DCOp mesurées dans les effluents unitaires de temps de pluie du Marais (2003-2005) sont légèrement plus élevées que celles mesurées par Gromaire (1998). Celles en DBO_5 sont par contre du même ordre de grandeur. Les matières en suspension véhiculées par temps de pluie aux exutoires des sites de l'OPUR présentent des teneurs en matières volatiles élevées en comparaison de celles trouvées dans la bibliographie (Chebbo, 1992). Cependant, les teneurs en DCO et DBO_5 restent relativement comparables.

2.5.2.2 Teneurs en métaux lourds

Les MES échantillonnées par temps de pluie aux exutoires des six bassins versants de la zone OPUR sont chargées en métaux lourds. Ces teneurs métalliques sont variables d'un événement pluvieux à l'autre mais varient relativement peu en médiane en fonction du site de mesure (Figure 69 et ANNEXE 25).

Comme pour les concentrations métalliques, deux groupes peuvent être distingués. Un premier comprenant les teneurs en cuivre qui sont plus élevées dans les effluents unitaires de temps de pluie par rapport à celles des effluents de temps sec et équivalentes ou peu inférieures à celles des eaux de ruissellement. Et un deuxième groupe englobant les trois métaux restants Cd, Pb et Zn avec des teneurs d'eaux de ruissellement largement supérieures à celles des eaux unitaires et des eaux usées de temps sec.

Les teneurs particulaires du Cd, Pb et Zn mesurées actuellement sur le Marais sont nettement inférieures à celles trouvées par Gromaire (1998). En revanche, les teneurs en cuivre restent comparables.

Cette plus faible contamination métallique des MES correspond à des concentrations métalliques équivalentes entre 1997-1998 et 2002-2005, une distribution dissous-particulaire identique, mais s'accompagnant de concentrations en MES plus élevées.

Selon Gromaire (1998) la forte contamination métallique des MES mesurées par temps de pluie à l'exutoire du Marais serait liée à l'adsorption des métaux dissous provenant des eaux de ruissellement sur les MES (MES des eaux usées et MES érodés dans le réseau d'assainissement).

Nos résultats dénotent d'un apport de métaux lourds par les eaux de ruissellement comparable entre les deux périodes mais d'une plus forte érosion de sédiments du réseau à l'heure actuelle.

Nos teneurs (sauf celles en cadmium) sont largement supérieures aux teneurs métalliques particulaires trouvées par (Michelbach et al ; 1992).

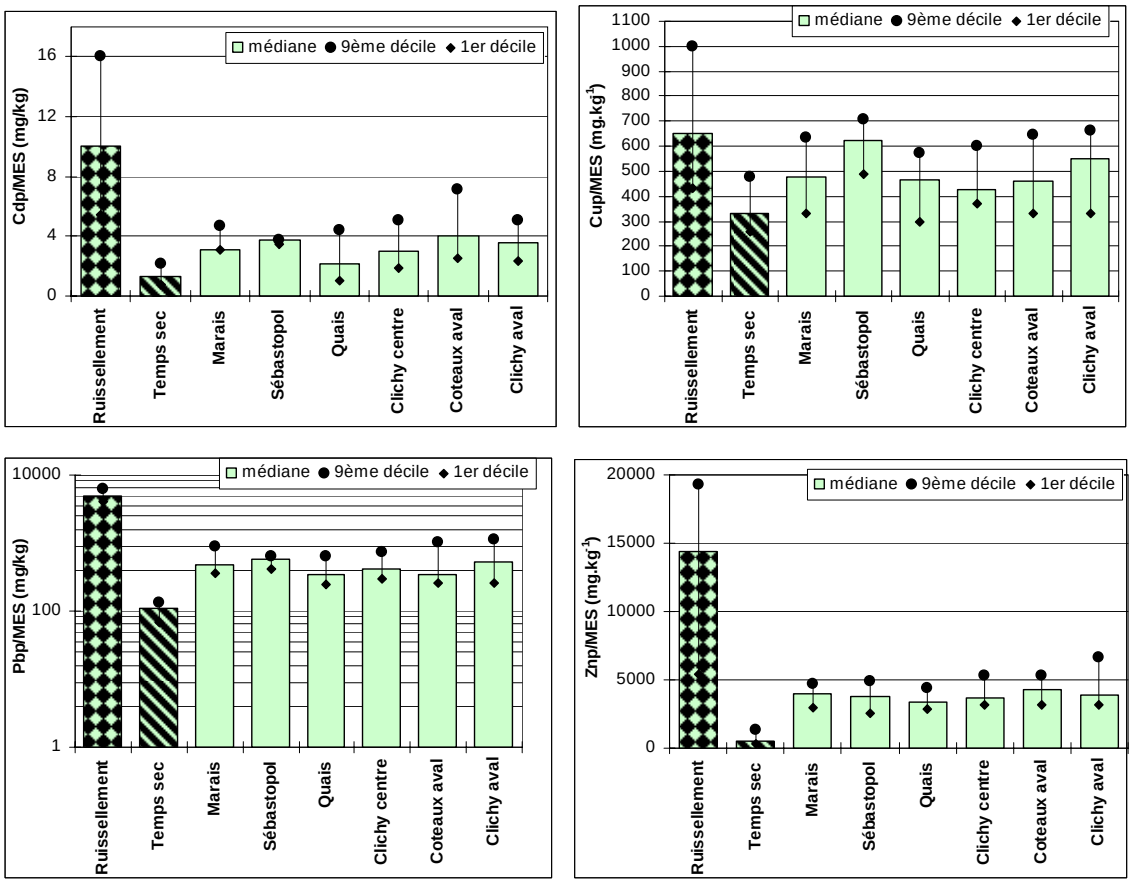


Figure 69 : teneurs en métaux lourds des particules

Teneurs sur les particules	Cd p / MES (mg/Kg)	Cu p / MES (mg/Kg)	Pb p / MES (mg/Kg)	Zn p / MES (mg/Kg)
Marais (Gromaire, 1998)	4-11, [8]	390-700, [500]	600-1600, [900]	4700-9000, [6900]
Clichy (Saget, 1994)	6-17, [12]	420-681, [612]	433-1755,[704]	3421-8765,[6018]
Bad Mergendheim (Michelbach et al ; 1992)	1.55-6.52	73-187	33-294	1136-1880
1er décile-9ème décile, [médianes]				

Tableau 111: Rappel des teneurs en métaux des particules, mesurées, par temps de pluie.

2.5.2.3 Vitesses de chute des particules en suspension

Les vitesses de chute des particules en suspension (selon le protocole VICAS) mesurées aux exutoires des bassins versants pour certains événements pluvieux sont présentées dans la Figure 70.

Il apparaît que les particules en suspension des eaux unitaires du Marais décantent beaucoup plus vite que celles des autres sites de mesure. En revanche, celles des trois sites aval (Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval) semblent sédimenter avec les mêmes vitesses de chute. Ceci peut être probablement du à une plus forte proportion d'eau usée en allant vers l'aval.

Cette différence peut être également liée au fait que les dépôts érodés entre l'amont et l'aval sont de nature différente, ou que les particules érodées ont subi une désagrégation au cours de leur transport dans le réseau, ou encore par l'effet des bassins de dessablement se trouvant tout le long des collecteurs de la zone OPUR.

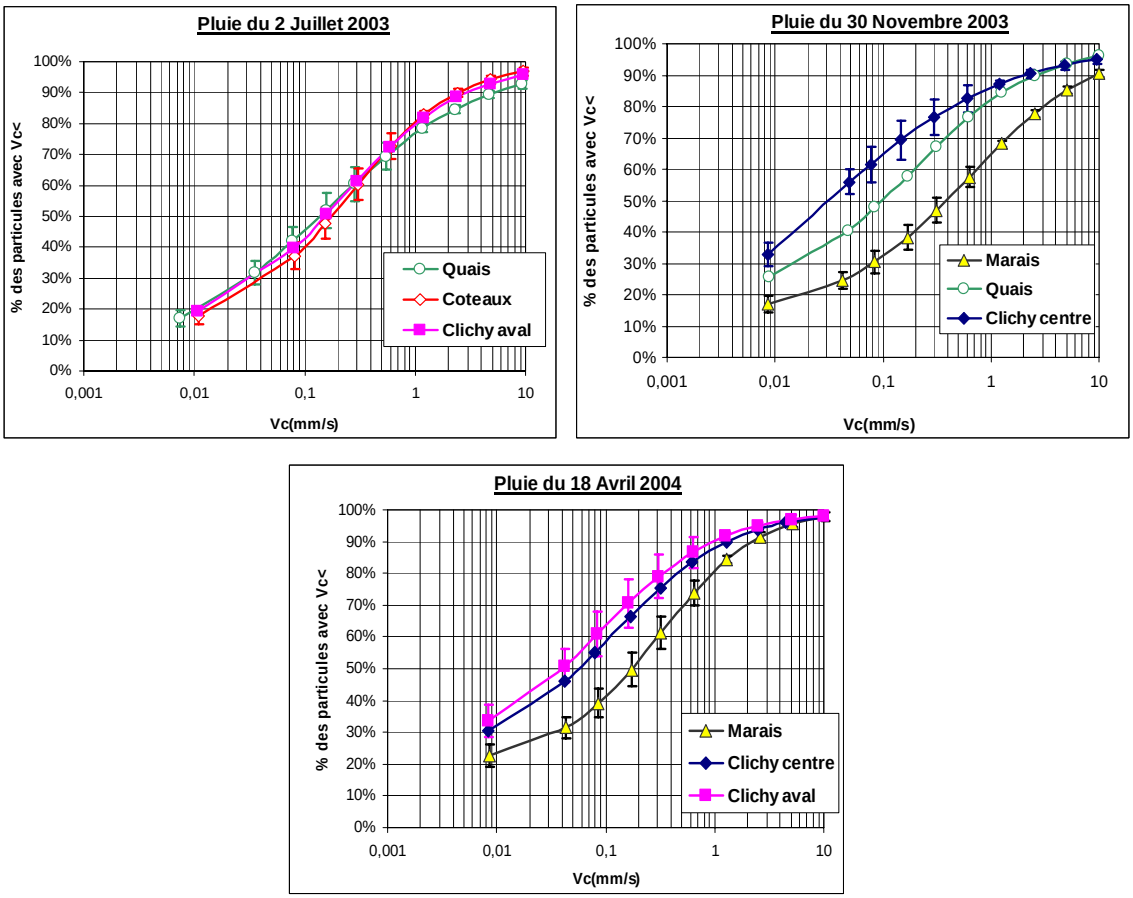


Figure 70: vitesses de chute des matières en suspension dans les effluents de temps de pluie, aux exutoires des bassins versants

Comme pour les vitesses de chute des MES, le carbone organique du Marais décante beaucoup plus vite en comparaison avec celui des autres sites de mesure. Par ailleurs, les vitesses de chute du COP sur les différents sites aval sont du même ordre de grandeur (Figure 71).

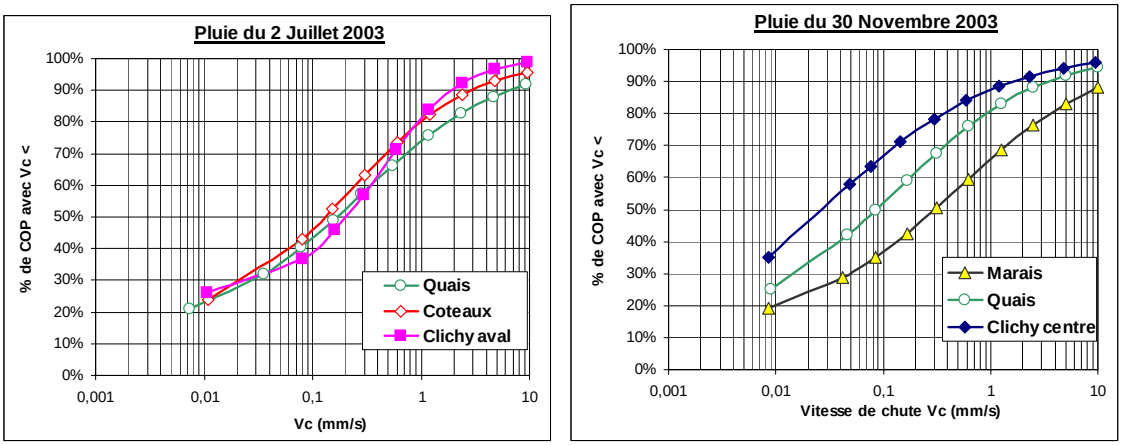


Figure 71: vitesses de chute du carbone organique dans les effluents de temps de pluie aux exutoires des bassins versants

Le Tableau 112 donne des ordres de grandeur des vitesses de chute médianes (V50) des matières en suspension et du carbone organique. Les vitesses de chute médianes mesurées sur le Marais sont dans la même fourchette que celles obtenues lors de la précédente campagne de mesure, en 1997 – 1998. Les vitesses de chute du carbone organique sont quasi identiques à celles des matières en suspension.

V50 (mm/s)	Marais	Quais	Clichy centre	Coteaux aval	Clichy aval
Nbre mesures	5	2	3	1	2
MES (Min-Max)	0,18-0,4	0,08-0,16	0,03-0,31	0,15	0,04-0,16
COP (Min-Max)	0,15-0,32	0,08-0,16	0,03-0,30	0,13	0,04-0,15

Tableau 112: vitesses de chute médianes mesurées dans les eaux unitaires de temps de pluie, aux exutoires des bassins de l'OPUR

Les vitesses de chute médianes des MES mesurées dans les effluents de temps de pluie des sites de l'OPUR sont largement inférieures à celles mesurées avec le même protocole sur le bassin de La molette en 1996 et se trouvent dans la limite inférieure des vitesses de chutes des particules du site Sarge-Le-Mans, en 2003. En revanche, elles sont du même ordre de

grandeur que les vitesses mesurées par la DSEA 94 (2003), au niveau de plusieurs déversoirs d'orage (Tableau 113).

V50 (mm/s)	Marais (Gromaire, 1998)	La molette (Ruscassier, 1996)	Sarge-Le-Mans (Chebbo et al, 2003)	Cordon bleu (Jaumouillié, 2002)	Vincennes, Jules Guesdues et Champigny Eglise (DSEA 94, 2003)
MES	0,12-0,59, [0.32]	0.34-0.66, (0.48)	0.09-0.88, (0.23)	0.15	< 0.08-0.18
min-max; (moyenne), [médiane]					

Tableau 113: rappel des V50 des effluents unitaires de temps de pluie, trouvées dans la littérature

Les vitesses de chute des MES mesurées sur chaque site de mesure et pour l'ensemble des évènements pluvieux concernées figurent en ANNEXE 26.

2.5.2.4 Distribution des polluants par classe de vitesses de chute

La distribution des effluents de temps de pluie par classes de vitesses de chute a été étudiée sur les deux sites : Marais et Clichy centre. En effet le protocole de mesure utilisé (VICPOL) nécessite un volume important d'eau, qui n'a pas pu être atteint sur les autres sites de mesure. Les courbes de vitesse de chute obtenues pour 2 à 11 événements pluvieux, pour les paramètres MES, MVS, DCO, COP, NTK, Cu, Pb, Zn sont présentées dans la Figure 72 et Figure 73.

Le Tableau 114 récapitule les valeurs des vitesses de chute médianes mesurées sur le Marais et Clichy centre pour l'ensemble des pluies étudiées.

V50 (mm/s)	MES	MVS	DCOp	COP	NTKp	Cup	Pbp	Znp
Nbre	11	5	4	6	5	7	7	7
Marais	0.21-1.04; (0.50)	0.29-0.58; (0.42)	0.19-0.61; (0.38)	0.18-0.99; (0.50)	0.03-0.25; (0.11)	0.15-0.50; (0.34)	0.05-0.87; (0.37)	0.03-0.64; (0.21)
Nbre	6	4	2	2	2	2	2	2
Clichy centre	0.10-0.50; (0.25)	0.09-0.31; (0.16)	0.07-0.27	0.29-0.32,	<0.006-0.007	0.03-0.13,	0.06-0.17,	0.03-0.10,
min-max, (moyenne),								

Tableau 114: Vitesses de chute médiane (V50) des polluants mesurées sur le Marais et Clichy centre sur les effluents unitaires de temps de pluie

On peut observer sur l'ensemble des événements pluvieux étudiés que les matières en suspension et les matières volatiles en suspension chutent avec des vitesses similaires. Par ailleurs, la DCO particulaire et le COP décantent généralement avec la même vitesse de chute que celle des MES.

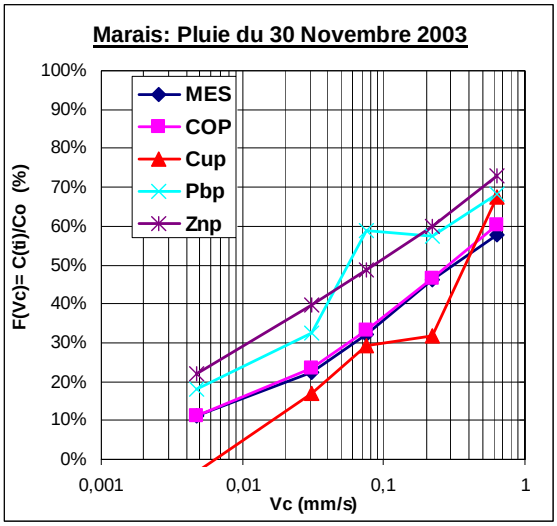
En revanche, les vitesses de sédimentation de l'azote particulaire sont systématiquement inférieures à celles des MES. Ce paramètre présente, avec le zinc, les vitesses de chute les plus faibles.

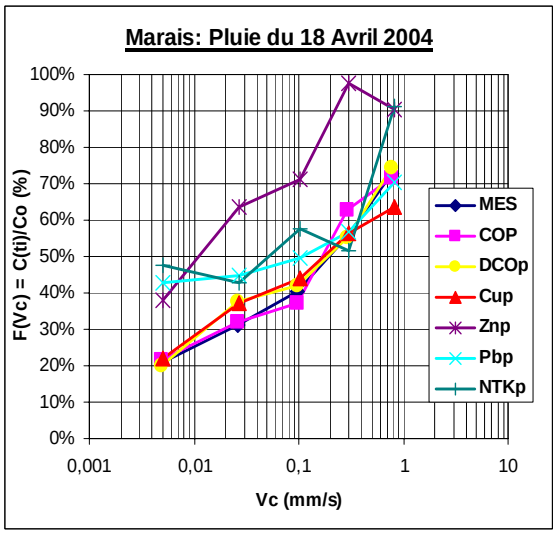
Dans le cas des métaux particulaires, des différences de comportement claires ont été remarquées d'une part entre les trois métaux Cu, Pb et Zn, et d'autre part entre les métaux et les MES.

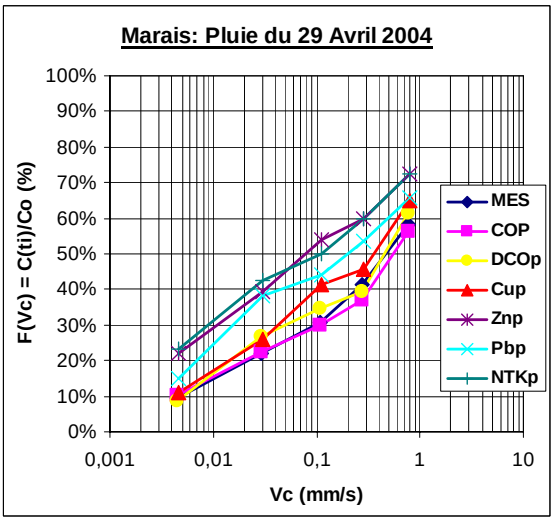
La comparaison des vitesses de chute des trois métaux montre globalement que le cuivre particulaire a tendance à décanter avec une vitesse de chute plus grande que celles du plomb et du zinc pour la période allant de 2003 à 2004. Cependant, il chute avec des vitesses comparables ou inférieures à celles du Pb pour les évènements pluvieux de 2005.

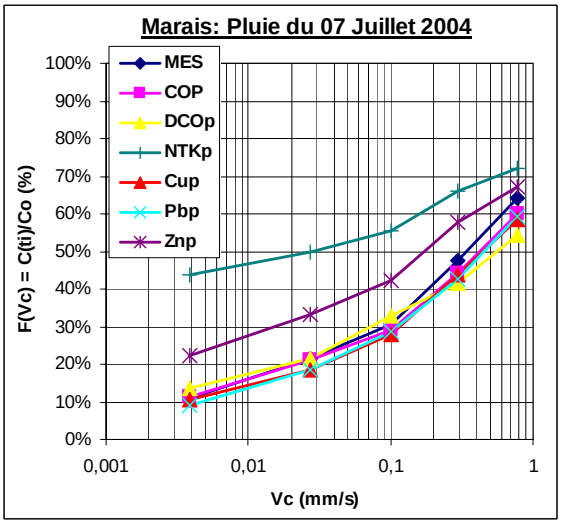
Par ailleurs, la comparaison avec les courbes des MES montre que :

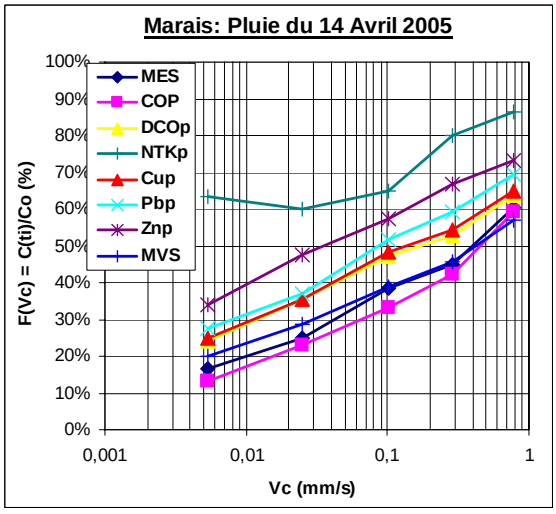
- les vitesses de chute du cuivre sont relativement du même ordre de grandeur que celles des MES entre 2003-2004. Elles leurs sont inférieures en 2005;
- le plomb chute avec des vitesses de chute plus faibles que celles des MES (d'un facteur d'au moins 2 sur le V50) ;
- les vitesses de chute du zinc sont largement plus faibles que celles des matières en suspension (d'un facteur 2 à 14 pour le V50).

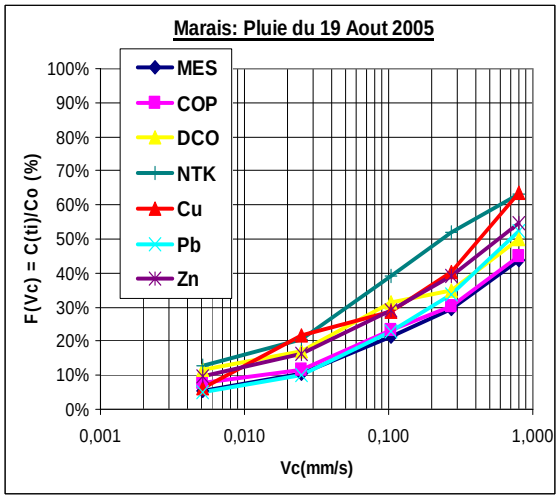

Marais: Pluie du 30 Novembre 2003
F(Vc)= C(ti)/Co (%)
Vc (mm/s)
MES
COP
Cup
Pbp
Znp


Marais: Pluie du 18 Avril 2004
F(Vc) = C(ti)/Co (%)
Vc (mm/s)
MES
COP
DCOp
Cup
Znp
Pbp
NTKp


Marais: Pluie du 29 Avril 2004
F(Vc) = C(ti)/Co (%)
Vc (mm/s)
MES
COP
DCOp
Cup
Znp
Pbp
NTKp


Marais: Pluie du 07 Juillet 2004
F(Vc) = C(ti)/Co (%)
Vc (mm/s)
MES
COP
DCOp
NTKp
Cup
Pbp
Znp


Marais: Pluie du 14 Avril 2005
F(Vc) = C(ti)/Co (%)
Vc (mm/s)
MES
COP
DCOp
NTKp
Cup
Pbp
Znp
MVS


Marais: Pluie du 19 Aout 2005
F(Vc) = C(ti)/Co (%)
Vc(mm/s)
MES
COP
DCO
NTK
Cu
Pb
Zn

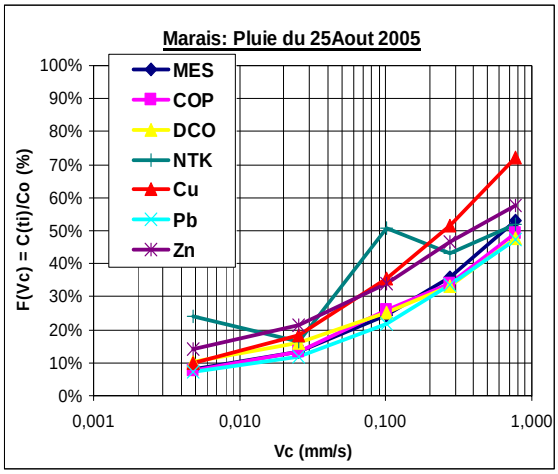


Figure 72: Distribution des polluants par classes de vitesses de chute sur le Marais.

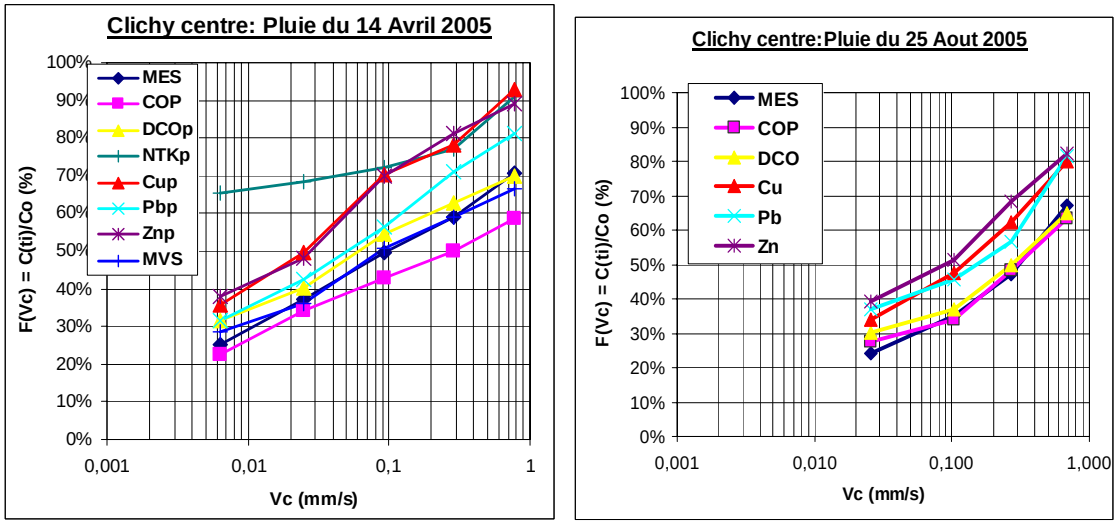


Figure 73: Distribution des polluants par classes de vitesses de chute sur Clichy centre

D'après nos résultats, l'efficacité du traitement par décantation des MVS, des matières organiques et du Cuivre semble généralement comparable à celles des MES. En revanche, il faut s'attendre à une efficacité plus faible pour le Pb et surtout pour le Zn et le NTK particulaires. Rappelons de plus que le NTK est majoritairement sous forme dissoute et que pour le Zn la fraction dissoute peut représenter jusqu'à 20%, ce qui limite encore l'efficacité de la dépollution par décantation simple pour ces deux paramètres.

La comparaison de la distribution des polluants entre le Marais et Clichy centre pour les pluies étudiées (Figure 74) (voir également ANNEXE 27) fait apparaître que les particules en suspension, les particules organiques et azotées et les métaux lourds particulaires des effluents

unitaires du site du Marais décantent souvent plus vite (d'un facteur 2 à 4) que les particules des effluents de temps de pluie de Clichy centre. Ceci peut signifier que la nature des dépôts érodés est différente entre le Marais et Clichy centre.

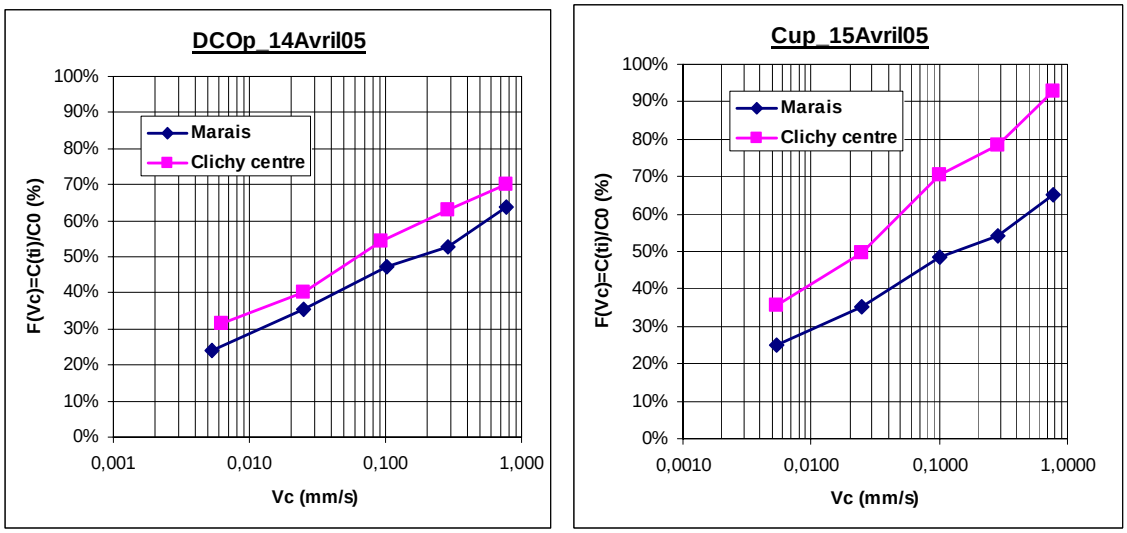


Figure 74: comparaison des Vc de DCO et Cup entre le Marais et Clichy centre

2.6 Conclusions sur la qualité des RUTP aux exutoires des bassins versants de l'OPUR

La qualité des effluents unitaires de temps de pluie des bassins versants de la zone OPUR confirme une nouvelle fois l'importance de la pollution des RUTP.

Les concentrations et les flux en MES, en matières oxydables et azotées mesurées aux exutoires des bassins versants par temps de pluie sont comparables entre les différents sites de mesure. Ceux en métaux lourds sont cependant plus variables.

Deux groupes de paramètres peuvent être distingués : Le premier groupe concerne les matières en suspension, la matière oxydable, l'azote et le cuivre où les concentrations dans les eaux unitaires sont supérieures ou égales à celles des eaux usées et nettement supérieures à celles des eaux de ruissellement ce qui conduit à une suspicion de la contribution du dépôt pour tous les sites de mesure. Le second groupe comprend le cadmium, le plomb et le zinc, avec des concentrations dans les eaux unitaires de temps de pluie 2 à 9 fois supérieures à celles des eaux usées de temps sec mais néanmoins très inférieures à celles des eaux de ruissellement.

Les particules s'avèrent dans tous les cas le principal vecteur de la pollution organique et métallique (selon le site 79 à 87% des matières organiques et 48 à 98% des métaux en médiane sont transportées sous forme particulaire) des effluents unitaires de temps de pluie, aux exutoires des bassins versants unitaires. Ces particules sont généralement de nature organique (0.72 à 0.8 g/g pour les MVS). Cependant, elles ont des teneurs en métaux lourds importantes (en médiane de 429 à 551 mg/Kg de cuivre et 3400 à 4280 mg/Kg de zinc) par rapport à celles des eaux usées de temps sec.

La répartition dissous - particulaire et la nature des particules est globalement stable d'un site de mesure à un autre.

Les vitesses de chute des matières en suspension varient en fonction de l'échelle spatiale. Il apparaît que les particules des sites amont (Marais) décantent avec des vitesses plus élevées que celles des sites aval (Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval). Ceci laisse supposer que l'érosion des dépôts du réseau ne se fait pas de la même façon entre le Marais et les sites aval, ou que les dépôts érodés sont de nature différentes.

Les résultats obtenus en terme de vitesse de chute des particules montrent que l'efficacité du traitement par décantation des MVS, des matières organiques et du Cuivre semble généralement comparable à celles des MES. En revanche, il faut s'attendre à une efficacité plus faible pour le Pb et surtout pour le Zn et le NTK particulaires.

PARTIE 4 : SOURCES ET PROCESSUS DE TRANSFERT DANS LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT UNITAIRE PARISIEN

INTRODUCTION

Trois principales sources à la pollution des RUTP en réseau d'assainissement unitaire peuvent être distinguées : les eaux de ruissellement, les eaux usées de temps sec, et l'érosion des stocks de polluants existant à l'intérieur du réseau.

L'étude réalisée par Gromaire (1998) sur le bassin versant du Marais a montré que 40 à 60% des matières en suspension et des matières organiques proviennent du dépôt du réseau. Par ailleurs, Ahyerre (1999) a mis en évidence qu'une couche de matière organique, se constituant par temps sec à l'interface eau - sédiment, est la principale source de la pollution en MES et en matières organiques transportée par temps de pluie à l'exutoire de ce bassin versant. Une localisation et une identification de cette couche a donc été réalisée sur ce petit bassin versant (Ahyerre, 1999; Oms, 2003).

Cependant, cette source de pollution par temps de pluie identifiée dans le réseau d'assainissement du Marais, est-t-elle la principale source à des échelles spatiales plus grandes (bassins versants de l'OPUR), et la nature des dépôts érodés sur les bassins versants de l'OPUR est-t-elle identique ou non à celle du dépôt organique identifié sur le Marais?

Pour répondre à ces interrogations et pour une meilleure évaluation de la contribution des trois sources à la pollution de temps de pluie, il semble nécessaire d'essayer de comprendre ce qui se passe réellement dans le réseau d'assainissement unitaire. Pour cela, nous allons nous intéresser, en premier lieu, à mieux comprendre le fonctionnement hydrologique et hydraulique de la zone OPUR. Nous nous intéresserons, en second lieu, aux mécanismes de transfert au cours de l'évènement pluvieux et à l'échelle de la journée par temps sec. Enfin, une évaluation de contribution de chacune des trois sources sera réalisée.

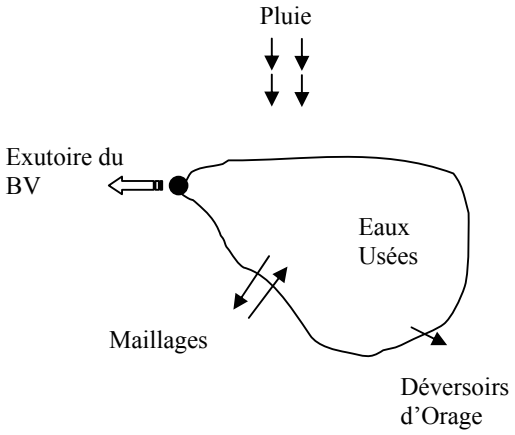
Pour ce faire :

- Des bilans hydrologiques ont été estimés sur l'ensemble des bassins versants et pour chaque évènement pluvieux étudié. Ces bilans permettent la détermination des origines des volumes d'eaux mesurés aux exutoires et le devenir des eaux précipitées.
- Une étude de la variation au cours de la journée, des caractéristiques des eaux usées de temps sec a été réalisée sur chaque bassin versant. Cette dernière sert à estimer la masse des eaux usées véhiculée aux exutoires, pendant l'évènement pluvieux.

- Une analyse des pollutogrammes en conductivité et en turbidité a été faite. La première permet l'évaluation de la proportion d'eau usée contenue dans les effluents unitaires. Alors que la seconde est destinée à la compréhension de la distribution temporelle des matières en suspension, en fonction de l'échelle spatiale.
- Une évaluation des pourcentages de contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement, et des stocks de sédiment contenu dans le réseau a été réalisée.

Chapitre 1 : Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique a pour objectif de mieux comprendre, pour chacune des journées de temps sec et des pluies étudiées, le fonctionnement hydrologique et hydraulique de la zone OPUR. Il s'agit de déterminer l'origine des volumes d'eaux unitaires mesurés aux exutoires des bassins versants, et le devenir des eaux précipitées sur les bassins versants, en tenant compte de toutes les entrées et les sorties de la zone OPUR. Ce bilan est nécessaire pour une évaluation plus précise des flux par unité de surface active, de la production du bassin versant et pour l'établissement des bilans en masses de polluants à l'échelle de chaque bassin versant.



De ce fait, une connaissance de l'état de fonctionnement des différents maillages (vannes, siphon…) et déversoirs d'orage existant sur notre zone d'étude est indispensable.

La configuration du réseau (fournie par les services de la Section d'Assainissement de la ville de Paris) au courant des campagnes de mesure de temps de pluie a été dressée en ANNEXE 28. Cette dernière change d'une journée de temps sec à un autre et d'une pluie à une autre.

Le bilan hydrologique peut s'écrire sous la forme suivante :

- Pour un événement pluvieux :

$$V_{ruis} + V_{EU_{bv}} = V_{exut} + V_{DO} \pm V_{Maillages}$$

avec

- V_{ruis} : volume d'eaux de ruissellement produit par le bassin versant. Il peut être calculé à partir de la hauteur d'eau moyenne précipitée sur le bassin versant, la surface du bassin versant et son coefficient de ruissellement moyen
- V_{EUbv} : volume des eaux usées produites par le bassin versant pendant la durée de l'événement pluvieux ;

- Vexut : volume mesuré à l'exutoire du bassin versant pendant la durée de l'événement pluvieux
- V_{DO} : volumes déversés en Seine au niveau des différents déversoirs de la zone OPUR au cours de l'événement pluvieux. Ces DO qui sont au nombre de 10 se situent tous en amont de la zone OPUR.
- $V_{Maillages}$: volumes passés au niveau des maillages entre bassins versants pendant la durée de l'événement pluvieux. Les maillages représentent les différentes connections entre la zone OPUR et les bassins versants avoisinants et peuvent être des vannes, des siphons…. Les volumes passés aux niveaux des maillages peuvent être des volumes ramenés vers la zone OPUR ou des volumes évacués de la zone OPUR.

- Pour une journée de temps sec :

$$V_{EU\,bv} = V_{EUexut} + V_{DO} \pm V_{Maillages} \approx V_{EUexut}$$

avec

- V_{EUbv} : volume des eaux usées produites par le bassin versant pendant la journée de temps sec
- V_{EUexut} : volume mesuré à l'exutoire du bassin versant pendant la journée de temps sec
- $V_{Maillages}$: volumes passés au niveau des maillages entre bassins versants pendant la journée de temps sec

En temps normal, il n'y a pas de déversement au niveau des DO par temps sec. De plus la plupart des maillages ne sont pas actifs par temps sec, à l'exception des siphon Cuvier et Richard Lenoir, ainsi que l'antenne de l'émissaire. Les volumes transités par les maillages et DO sont donc en général négligeables par temps sec, cependant, suite aux opérations d'entretien ou de réhabilitation du réseau, certains maillages et DO peuvent devenir actifs pendant des périodes de temps limitées. Les bilans hydrauliques sont donc vérifiés pour toutes les journées de temps sec étudiées.

Les bilans hydrologiques ont été établis pour chaque bassin versant et pour l'ensemble des pluies étudiées. Les écarts entre les entrées et les sorties (Sorties - Entrées / Sorties) sont synthétisés en ANNEXE 29 (voir également ANNEXE 30).

Nous avons constaté que les écarts entre les sorties et les entrées, pour un nombre non négligeable d'évènement pluvieux sont très forts, en particulier sur les sites Quais et Coteaux aval. Ils indiquent le plus souvent un manque d'eau à l'exutoire.

Pour les évènements pluvieux où les écarts sont importants, une analyse plus approfondie a été faite. Cette dernière a révélé pour chaque pluie la source d'erreur possible :

- hétérogénéité de la pluie : 20% à + de 60% d'écart entre les pluviomètres sur la hauteur d'eau précipitée a été observé pour quelques pluies ;
- travaux de réhabilitation : les travaux de réhabilitation réalisés sur le collecteur Sébastopol branche sud ont nécessité la déviation des effluents amont du collecteur des Quais vers la rive gauche via le siphon Cuvier (février-avril 2004). Cependant, les apports aval ont été refoulés par pompage vers le collecteur d'Asnières. De même, les apports du collecteur de Rivoli ont été pompés vers le collecteur de Clichy amont. Ceci indique donc que pendant le mois d'avril 2004, les apports du bassin versant des Quais ne sont pas pris en compte dans les volumes mesurés à Clichy centre et Clichy aval. De plus, il n'y avait pas d'apports de la rive gauche.

  Par ailleurs, les travaux de réhabilitation sur Coteaux ont nécessité la fermeture de la vanne Chemin vert et par conséquent tous les apports amont du collecteur de Coteaux sont déviés vers l'Antenne de l'Emissaire Nord-Est. Les apports centraux ont été refoulés vers le bassin de dessablement Quais de Jemmapes.

Compte tenu de cette analyse, les bilans hydrologiques ont permis d'identifier pour la plus part des évènements pluvieux, l'origine des eaux mesurées à l'exutoire de chaque bassin versant et le devenir des eaux précipitées.

Ils ont permis d'estimer pour chaque pluie les volumes d'eaux unitaires, d'eaux usées et d'eau de ruissellement. Ainsi, le bilan hydrologique est considéré comme acceptable lorsque le rapport (Sorties-Entrées)/Sorties $\leq \pm 25\%$, et les volumes pris en compte sont ceux mesurés à l'exutoire. Au-delà de cet écart, plusieurs étapes sont réalisées (cohérence du volume d'eau usée par rapport à celui estimé avec la méthode de conductivité, variabilité spatiale de la pluie…) pour déterminer les volumes des eaux usées, des eaux de ruissellement et des eaux unitaires. Cette partie sera cependant détaillée un plus loin (§4.2).

L'importance des volumes transités aux niveaux des principaux déversoirs d'orage et maillages qui étaient actifs au cours des campagnes de mesure de temps de pluie est indiquée dans le Tableau 115.

%	Déversoirs d'orage			Siphon cuvier			Apports Banlieue			Antenne de l'Emissaire Nord Est			Nord Jemmapes		
	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max	min	moy	max
Quais		-0.1		+7	+12	+18	-			-			-		
Clichy centre	-0.01	-1	-3	+2	+6	+13	-			-			-		
Coteaux aval	-3	-9	-15	-			+11	+18	+26	-20	-41	-68	+6	+7	+8
Clichy aval	-1	-4	-7	+1	+4	+17	+5	+8	+12	-9	-19	-33	+3	+3	+4
+: apport d'eau vers le bassin versant, -: perte d'eau du bassin versant															

Tableau 115: % des volumes passés au niveau des DO et des principaux maillages par rapport à la somme des entrées, pendant les campagnes de mesure de temps de pluie

Les volumes passés au niveau des déversoirs d'orage sont faibles sur l'axe Quais-Clichy, mais sont plus important à Coteaux aval. Les volumes déversés en amont du collecteur de Coteaux (DO Vincennes-Charenton) représentent en moyenne 9% du volume des entrées et correspondent essentiellement aux apports en provenance de la banlieue.

Les volumes passés à travers le siphon Cuvier représentent en moyenne 4 à 6% de la somme des entrées, et peuvent atteindre 18% pour certains évènements pluvieux.

Par ailleurs, les apports de la banlieue semblent plus importants, en particulier sur Coteaux aval où ils représentent en moyenne 18% des entrées.

Quant aux volumes transitant dans l'antenne de l'émissaire Nord-Est (AENE), ils sont considérables. 19 et 41% du volume des entrées sur Clichy aval et Coteaux aval sont déviées vers l'AENE. Ces volumes sont en partie ceux de la banlieue.

Chapitre 2 : Variation au cours de la journée des eaux usées de temps sec

L'étude de la variation au cours de la journée des eaux usées de temps sec fournit des éléments pour l'évaluation des masses d'eau usée supposées passer au cours de l'évènement pluvieux.

Pour étudier la variation des caractéristiques des polluants à l'échelle de la journée, 2 à 6 journées de pollutogrammes de temps sec ont été échantillonnées (Tableau 83). Ces pollutogrammes ont été analysés en terme de concentrations de MES, de matières oxydables (DCO, DBO_5, COP), de NTK et de métaux lourds (Cu, Pb et Zn).

Par ailleurs, un pollutogramme en DCOt de 24 tranches horaires a été analysé sur chaque site de mesure. La réalisation de tels pollutogrammes en d'autres paramètres polluants n'était pas possible à cause de la lourdeur des analyses.

	MES	MVS	DCO	DBO	COT	NTK	Cd	Cu	Pb	Zn
Marais	5	5	5	2	5	5	-	4	4	4
Sébastopol	5	5	3	2	2	2	-	2	2	2
Quais	5	5	4	2	3	3	-	4	4	4
Clichy centre	8	8	8	4	7	6	-	5	5	5
Coteaux aval	5	5	3	1	3	2	-	3	3	3
Clichy aval	6	6	6	2	6	6	-	5	5	5

Tableau 116 : nombre de journées de temps sec échantillonnées par site de mesure et par paramètre polluant

2.1 Evolution au cours de la journée des débits et des concentrations en DCOt

Les pollutogrammes en DCO totale réalisés sur les différents sites de mesure (Figure 75) font apparaître un cycle journalier des concentrations similaires au cycle journalier des débits. Ces pollutogrammes sont en phase avec les débits pour les sites amont, alors qu'un décalage apparaît pour les trois sites aval, les pics de concentrations étant en retard d'au moins 1h sur les pics de débits. Sur les Quais, les débits font apparaître des fluctuations qui correspondent aux cycles de fonctionnement des pompes de l'usine Mazas située en amont. Ces cycles de pompages ne se représentent pas sur les concentrations en DCO.

On remarque que les valeurs maximales sont mesurées entre 7h et 10h pour les sites amont, avec une légère augmentation autour de 14h et 18h. En revanche, pour les trois sites aval, les

pics de concentrations en DCO sont observés entre 8h et 12h avec une très légère diminution vers 13h. Une augmentation autour de 20h a été aussi remarquée. Par ailleurs, les valeurs minimales sont en général mesurées entre 3h et 7h.

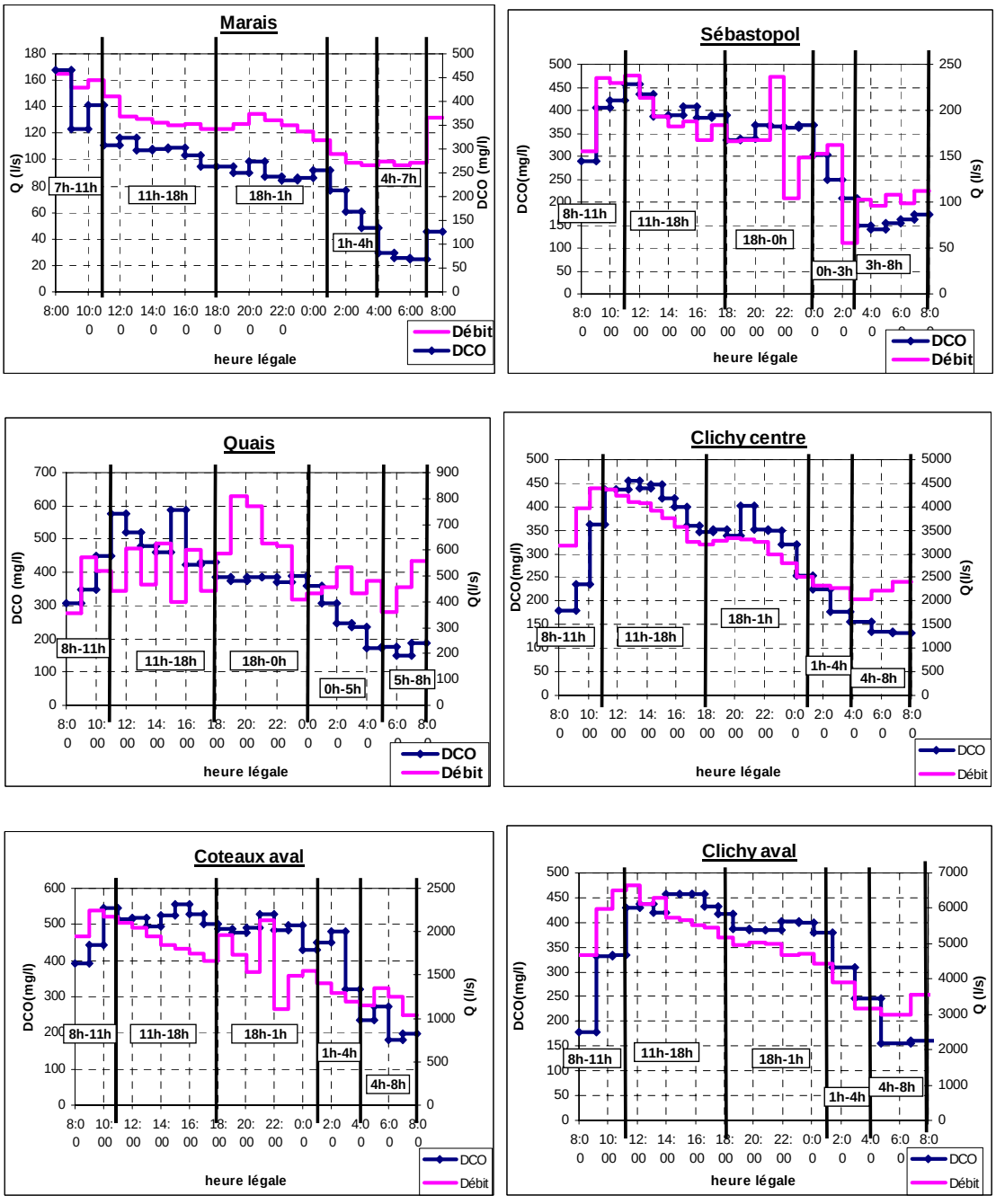


Figure 75: cycles journaliers des débits et des concentrations de DCOt, mesurés pour les six sites de mesure

La comparaison des pollutogrammes en DCO pour les six sites de mesure (Figure 76) montre une allure relativement similaire des concentrations au cours de la journée. A l'exception du Marais, les pics de concentrations débutent généralement en même temps, sur l'ensemble des sites de mesure (entre 10 et 11h).

La durée des pics de concentrations varie entre 3 et 4h aux sites amont, cependant, elle est relativement plus longue sur les sites aval (4 à 6h).

Cette comparaison fait apparaître des concentrations journalières en DCOt plus élevées aux sites des Quais et de Coteaux aval et plus faibles au Marais.

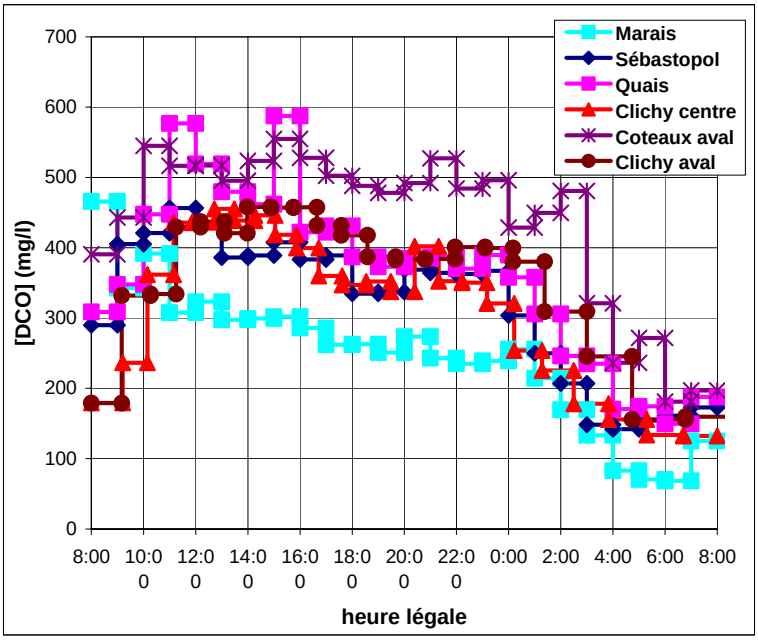


Figure 76 : Comparaison de pollutogrammes en DCOt entre les sites de mesure.

Les pollutogrammes en DCOt étudiés précédemment ont permis de diviser chaque journée de temps sec étudiée en 5 tranches horaires représentatives de la production ou de l'activité journalière : matin, après-midi, soirée, début de nuit et minima nocturne (voir Figure 76). Et par conséquent, ils ont servi pour le regroupement des 24 échantillons horaires en échantillons moyens caractéristiques d'une période de la journée.

2.2 Variabilité d'un jour de temps sec à un autre

2.2.1 Variabilité des débits, des concentrations et des flux des paramètres globaux et des métaux lourds

L'étude des pollutogrammes en terme de débit, de concentration et de flux horaire (ANNEXE 31, ANNEXE 32 et ANNEXE 33), sur chaque site de mesure a permis de dresser la liste des remarques suivantes :

- Les débits mesurés au cours de la journée (Figure 77) varient généralement dans une large gamme, d'un jour de temps sec à un autre, en particulier sur Clichy centre et Coteaux aval. Les plus fortes valeurs sont mesurées entre 7h-11h sur le Marais, entre 8h-11h sur Sébastopol et Quais et entre 8h jusqu'à 18h sur les sites aval ;

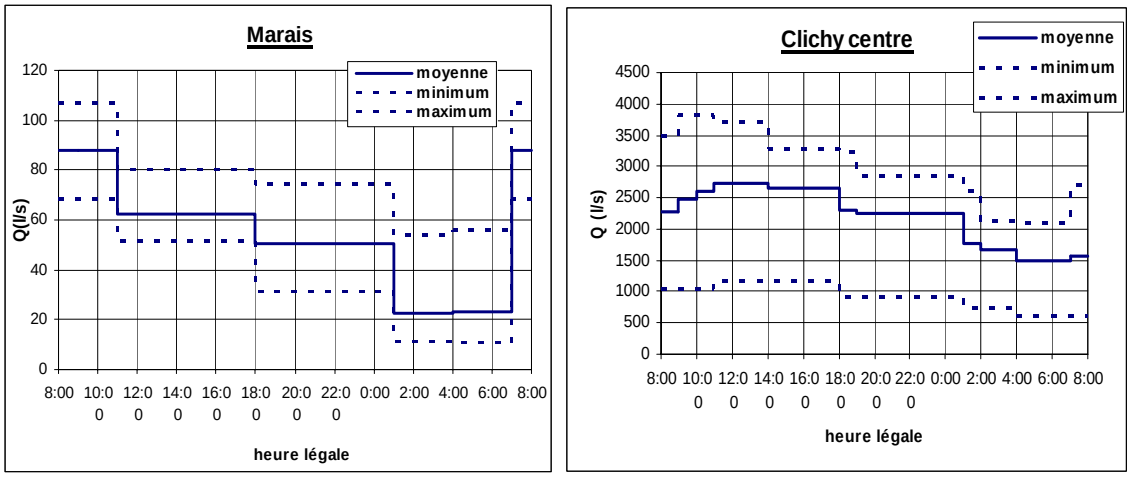


Figure 77 : variabilité des débits d'un jour de temps sec à un autre, mesurés sur Marais et Clichy centre

- Les concentrations et les flux horaires des matières en suspension et des matières oxydables varient généralement de façon similaire au cours de la journée (Figure 78). Ceux en métaux lourds possèdent cependant des comportements assez différents sur les sites Quais, Clichy centre et Clichy aval, notamment le plomb total (Figure 79) ;

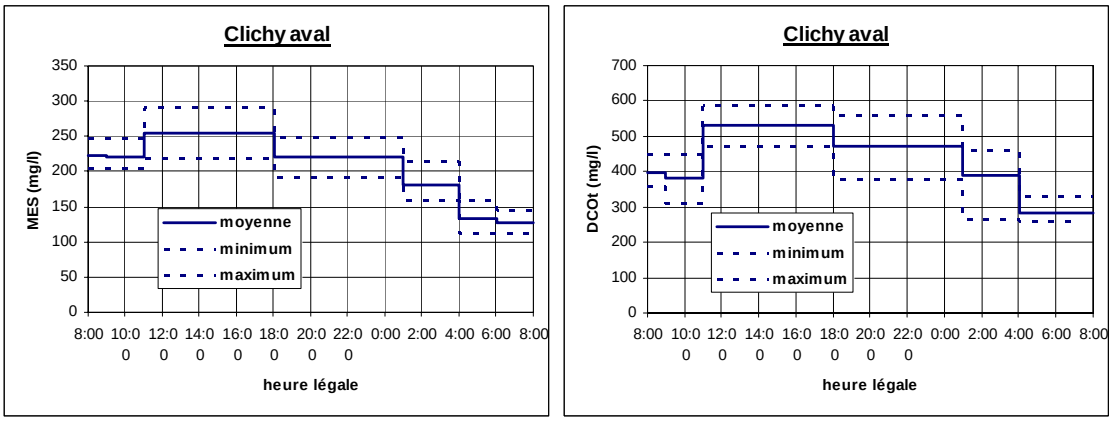


Figure 78: variabilité des concentrations d'un jour de temps sec à un autre, mesurés sur Clichy aval

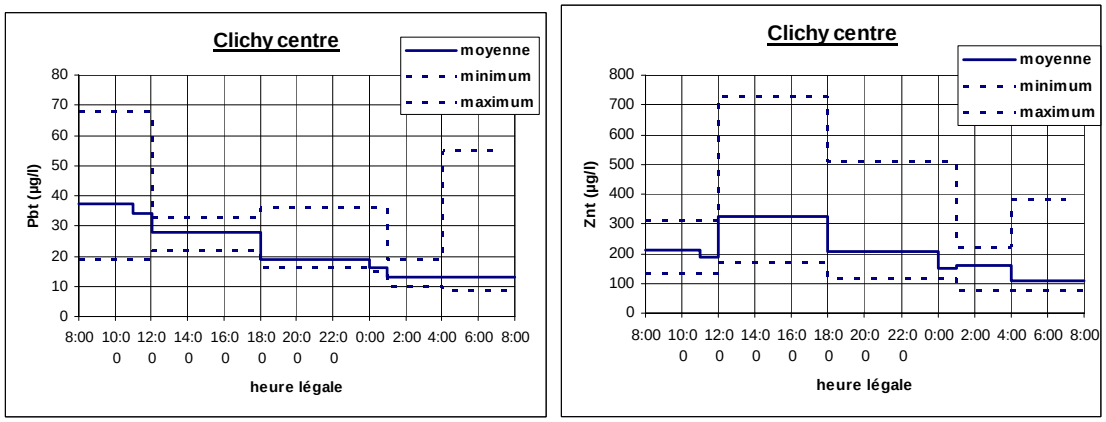


Figure 79: variabilité des concentrations d'un jour de temps sec à un autre, mesurés sur Clichy centre

- Les variations des débits au cours de la journée épousent globalement celles des concentrations des paramètres polluants aux trois sites amont et à Coteaux aval. L'allure des pollutogrammes de concentrations mesurées aux sites Clichy centre et Clichy aval est quasi similaire à celle des hydrogrammes, mais avec une différence au niveau de la période de production des pics. Les pics de débit sont visiblement en avance d'une heure sur les pics de concentration à Clichy centre et d'environ 2h à Clichy aval ;
- La variabilité d'un jour de temps sec à un autre des pollutogrammes de flux est moins importante que celles des concentrations aux sites Marais, Sébastopol et Coteaux aval. Cependant, l'inverse est vrai aux sites Quais, Clichy centre et Clichy aval. Ainsi, selon le site se seront plutôt les pollutogrammes en flux (Marais, Sébastopol et Coteaux aval) ou

en concentrations (Quais, Clichy centre et Clichy aval) qui seront utilisés pour l'évaluation de la masse des eaux usées supposées passer pendant l'évènement pluvieux.

2.2.2 Variabilité des caractéristiques des particules en suspension

- Le pourcentage de la pollution organique et métallique liée aux particules varie généralement au cours de la journée de 3 à 27 unités de pourcentages (ANNEXE 34). Ce pourcentage semble cependant plus stable au cours de la journée pour la pollution azotée (6 à 12 unités de pourcentages) que pour la pollution organique (3 à 24, 5 à 27 et 7 à 27 unités de pourcentages pour respectivement les pourcentages en DCO, DBO et COP) (Figure 80).

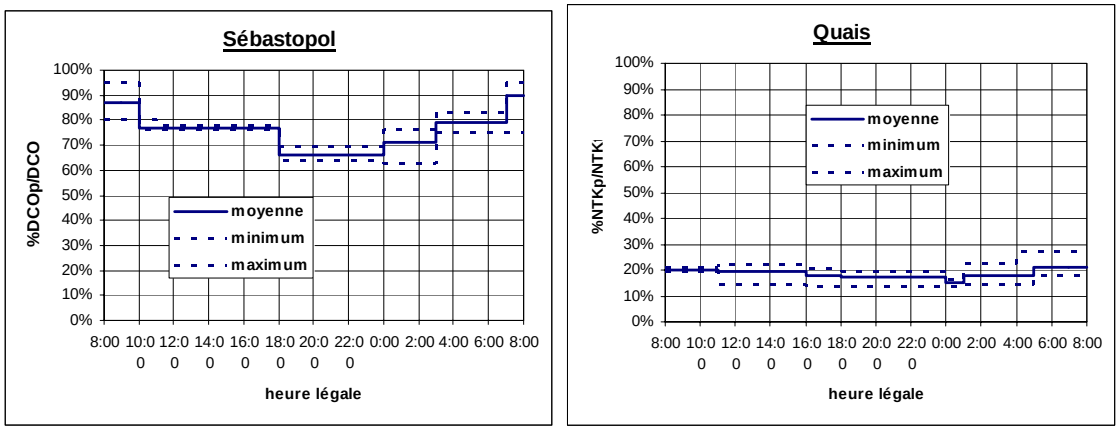


Figure 80 : variabilité des pourcentages de la pollution organique et azotées liées aux particules, mesurés aux sites Sébastopol et Quais

La distribution dissous-particulaire du cuivre et du plomb paraît généralement plus stable, que celle du zinc qui varie entre 10 et 30 unités de pourcentages au cours de la journée (Figure 81).

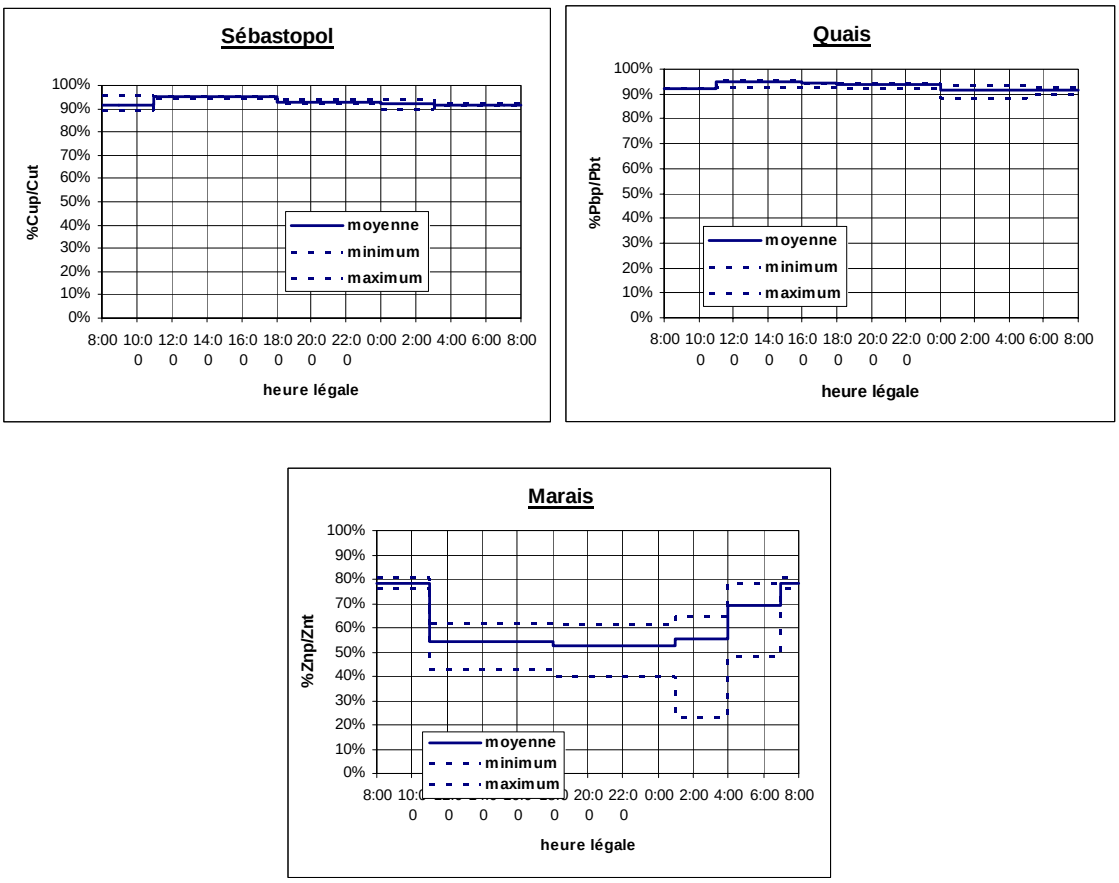


Figure 81 : variabilité des pourcentages de la pollution métallique liée aux particules, mesurés aux sites Marais et Quais

La proportion de la pollution organique et azotée liée aux particules la plus élevée est mesurée entre 7h et 11h aux sites amont, alors qu'elle est plus importante entre 8h et 11h aux sites aval.

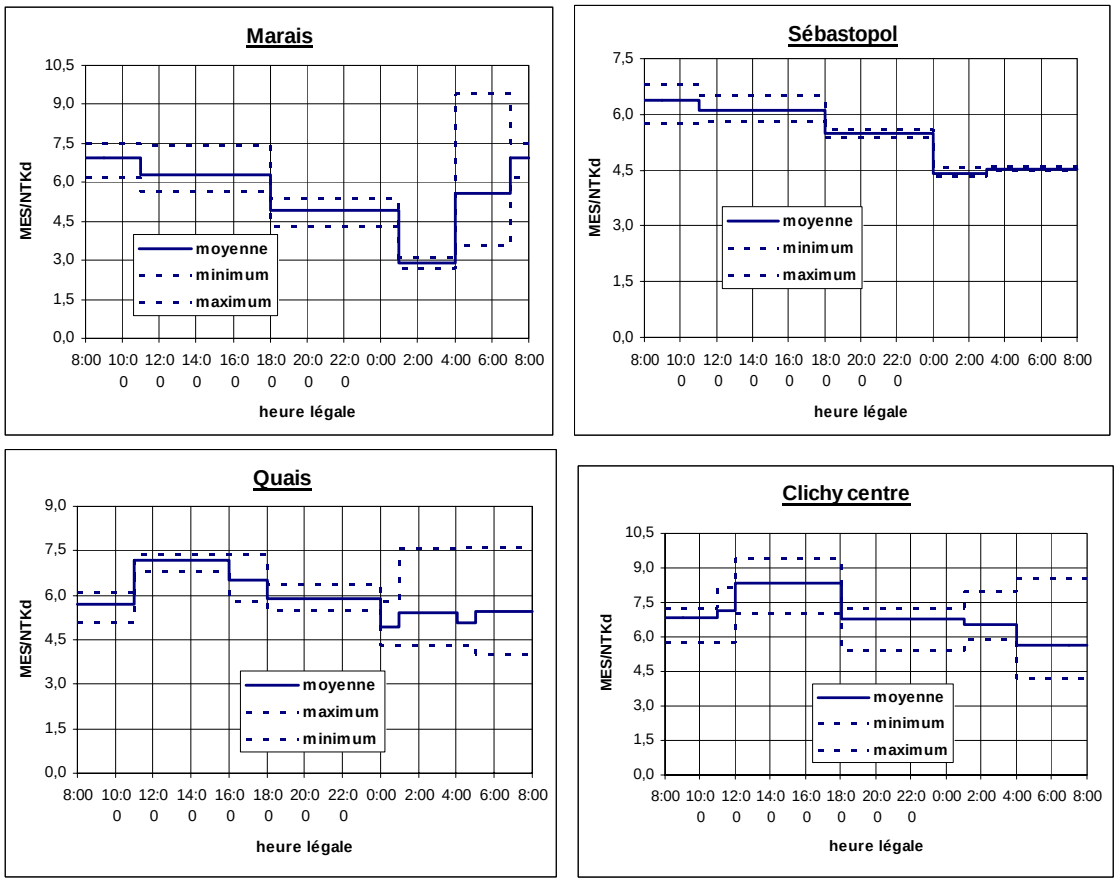
Enfin, les pourcentages de pollution oxydable liée aux particules semblent plus stables d'une journée de temps sec à une autre que les pourcentages de la pollution métallique particulaire.

- Les teneurs particulaires en matières oxydables, en azote et en métaux mesurées dans les eaux usées de temps sec (ANNEXE 35) évoluent au cours de la journée généralement de façon inverse par rapport au débit, et par conséquent l'augmentation rapide du débit s'accompagne par une diminution des teneurs, ce qui fait penser à une production de particules de nature plus minérale en début de journée.

Les teneurs en tous les paramètres polluants sont très variables d'une journée à une autre et en particulier celles en métaux lourds.

Le rapport MES/NTKd (Figure 82) varie considérablement au cours de la journée, sur l'ensemble des sites de mesure. Il oscille, en moyenne entre 3 à 7 au Marais et 5.5 à 8 à Clichy aval.

Le rapport MES/NTKd suit généralement les variations de débit. Il augmente avec l'augmentation de celui-ci, traduisant ainsi une érosion des sédiments du réseau durant les pics de débits et/ou une sédimentation durant la période nocturne.



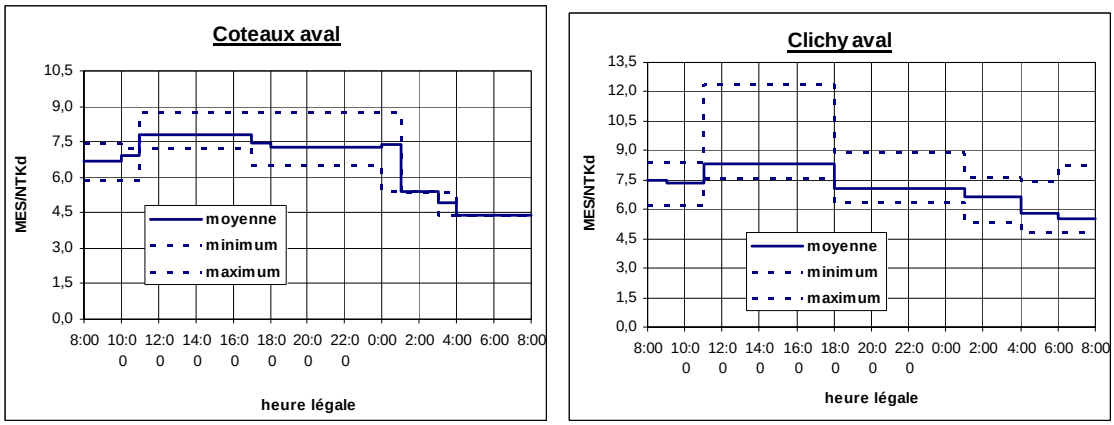


Figure 82 : variabilité d'un jour de temps sec à un autre du rapport MES/NTKd, calculé sur l'ensemble des sites de l'OPUR

2.3 Comparaison entre les sites de mesure

La comparaison des pollutogrammes entre les six sites de mesure montre que (ANNEXE 36, ANNEXE 37, ANNEXE 38) :

- A l'exception du Marais, le cycle journalier des débits (Figure 83) diffère assez peu d'un site de mesure à un autre et la différence existante concerne essentiellement les pointes. En effet, on voit que les pics se produisent entre 7h-11h au Marais et entre 8h-12h aux Sébastopol et Quais ; alors qu'ils durent plus longtemps aux sites aval (entre 8h-18h) ;

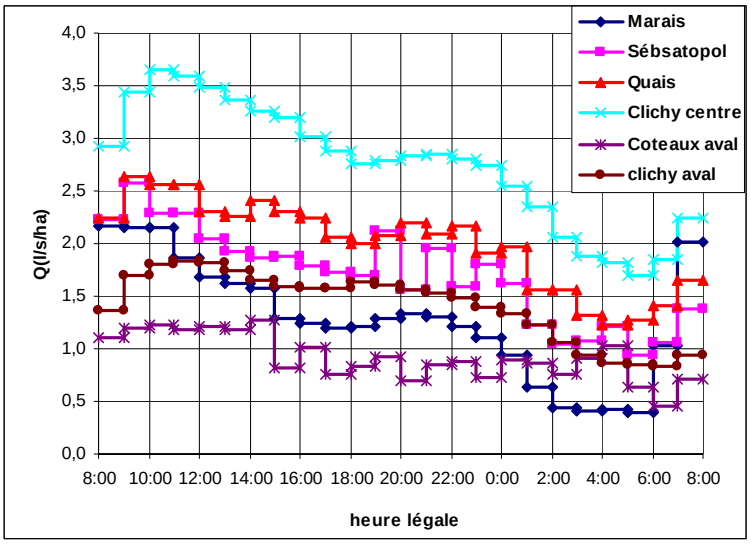


Figure 83: comparaison des débits entre les différents sites de l'OPUR

- Les pollutogrammes en concentration des matières en suspension et des matières oxydables possèdent généralement la même allure (Figure 84). Ceux en métaux lourds par contre diffèrent d'un site de mesure à un autre;

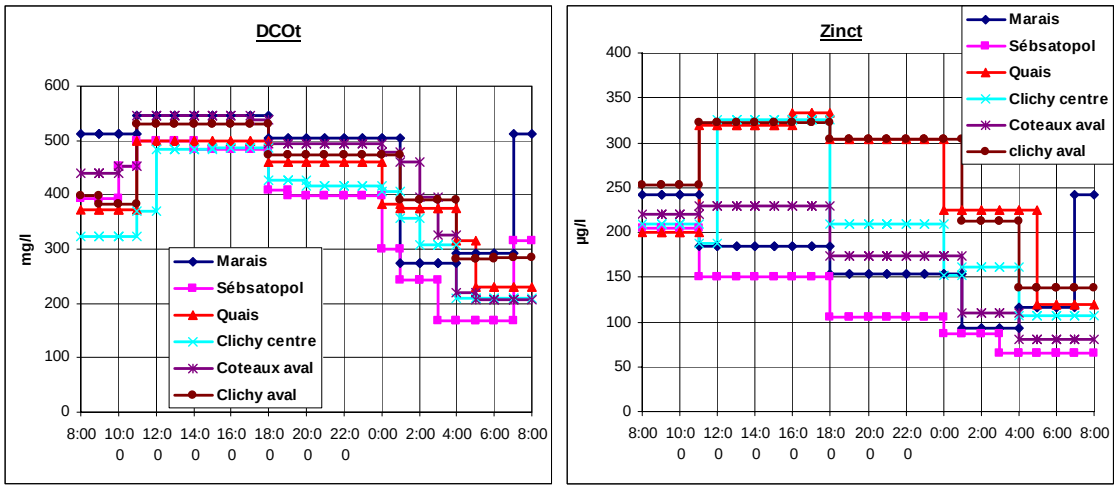


Figure 84: comparaison des pollutogrammes moyens des concentrations en DCOt et en Znt, entre les différents sites de l'OPUR

- Les pics de concentrations azotées se produisent entre 7h-11h pour l'ensemble des sites de l'OPUR, sauf aux deux sites aval : Clichy centre et Clichy aval (Figure 85); où ils se manifestent beaucoup plus tard (vers 11h) ;

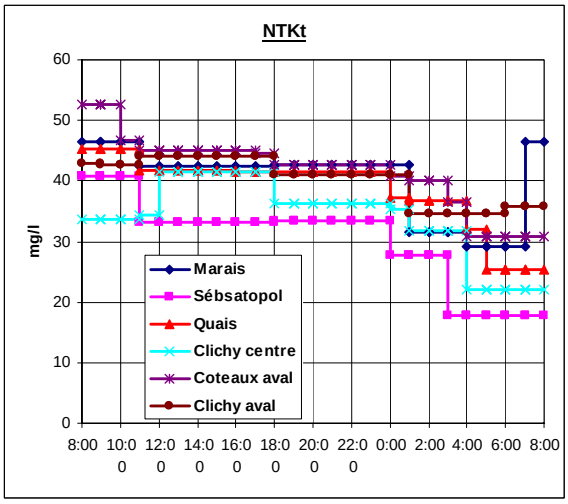


Figure 85: comparaison des pollutogrammes moyens des concentrations en NTKt, entre les différents sites de l'OPUR

- La distribution dissous-particlaire des matières organiques varie généralement de façon comparable entre les sites de l'OPUR, cependant celle des matières azotées et des métaux lourds varie différemment entre les différents sites de mesure (Figure 86);

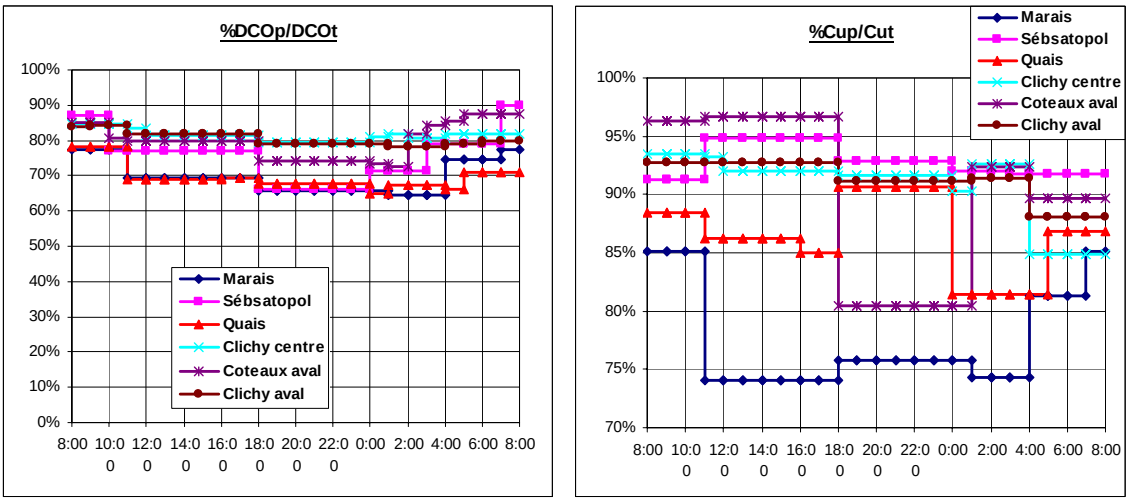


Figure 86: comparaison des pollutogrammes moyens des pourcentages de la pollution organique et métallique liée aux particules, entre les différents sites de l'OPUR

- Les variations des teneurs des matières volatiles en suspension, des matières organiques et azotées sont relativement comparables entre les sites de l'OPUR. En revanche, les pollutogrammes des teneurs des métaux lourds varient différemment entre les sites de mesure, en particulier celles du zinc (Figure 87);

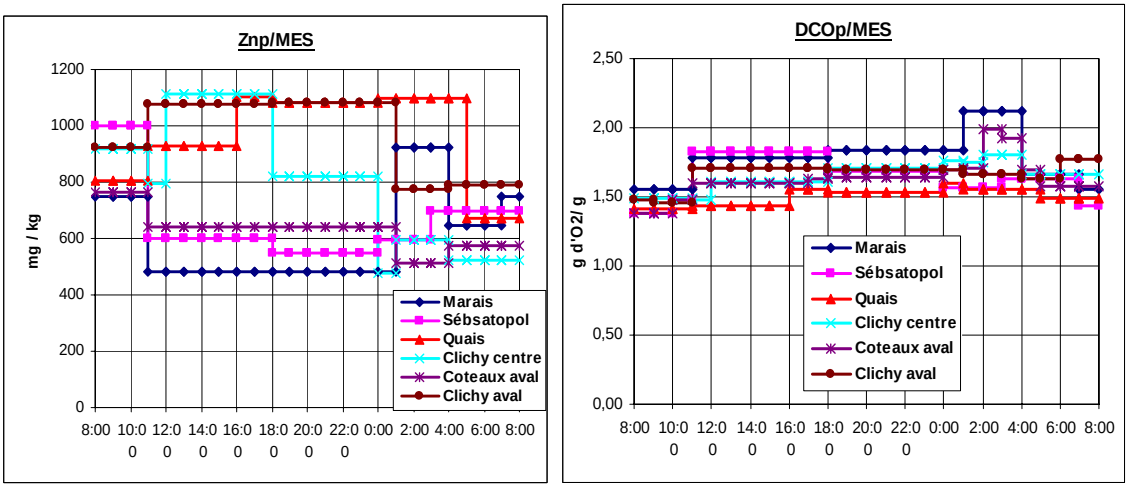


Figure 87: comparaison des teneurs des particules entre les différents sites de l'OPUR

Chapitre 3 : Analyse des pollutogrammes en conductivité et en turbidité

3.1 Analyse des pollutogrammes en conductivité

Les données de conductivité sont utilisées ici comme un traceur des eaux usées. Elles permettent d'évaluer, en moyenne sur l'ensemble de l'événement pluvieux (à partir de la conductivité de l'échantillon moyen), mais également tout au long de l'événement pluvieux (à partir des pollutogrammes de conductivité établis flacon par flacon), la proportion d'eaux usées présente dans l'effluent.

L'analyse des pollutogrammes en conductivité permet de voir, en particulier sur les grands bassins versants, l'existence ou non au début de la pluie d'un phénomène de « piston » (les eaux pluviales poussent-elles les eaux usées ?). Elle permet également de vérifier si, à la fin de l'événement pluvieux, on retrouve un effluent dont les caractéristiques sont celles des eaux usées ou s'il y a persistance d'une fraction d'eau pluviale.

La proportion d'eaux usées évaluée à partir de la mesure de conductivité est également comparée à la proportion d'eaux usées estimée à partir des débits mesurés par temps sec, pour la même plage horaire. Ceci permet de vérifier si les débits d'eaux usées véhiculés aux exutoires au cours d'un événement pluvieux sont identiques à ceux que l'on aurait mesurés par temps sec ou si des phénomènes dynamiques importants affectent le transfert des eaux usées.

3.1.1 Méthode de calcul

L'approche utilisée (appelée méthode de conductivité) est de calculer la proportion d'eaux usées contenue dans l'effluent au cours de l'événement pluvieux ($\%V_{EU}/V_{tot}$), à partir de la conductivité de l'effluent de temps de pluie Ktot, celle des eaux usées de temps sec Keu et celle estimée pour les eaux de ruissellement Kr. Pour ce faire, deux hypothèses sont faites :

- La conductivité des eaux usées et celle des eaux de ruissellement sont supposées constantes au cours de la pluie,
- Les eaux du ruissellement du Marais sont supposées représentatives, en terme de conductivité, de la qualité des eaux de ruissellement de tout Paris, donc de la zone OPUR.

Et nous avons procédé comme suit :

- Evaluation du rapport V_{EU}/V_{tot} :

Soient

V_{tot} : volume des eaux unitaires de temps de pluie ;

V_{EU} : volume des eaux usées ;

V_R : volume des eaux pluviales ou des eaux de ruissellement ;

K_{tot} : conductivité des eaux unitaires ;

K_{EU} : conductivité des eaux usées ;

K_R : conductivité des eaux de ruissellement.

On a:

$$V_{tot} = V_{EU} + V_R \qquad \text{Équation 3}$$

et

$$K_{tot} = \frac{(K_{EU} * V_{EU}) + (K_R * V_R)}{V_{EU} + V_R} \qquad \text{Équation 4}$$

Il est facile d'en déduire le rapport V_{EU}/V_{tot} (équation 3) :

$$\frac{V_{EU}}{V_{tot}} = \frac{K_{tot} - K_R}{K_{EU} - K_R} \qquad \text{Équation 5}$$

Notons par ailleurs, que l'équation 2 suppose une relation linéaire entre la conductivité et la dilution. D'après les données fournies dans la norme 27 888 NFEN ISO 7888, nous avons tracé la relation entre la conductivité et la concentration en KCl (Figure 88).

Cette courbe montre que la relation entre la conductivité et la dilution n'est pas linéaire pour des conductivités allants de 0 à 24800 µS/cm. En revanche, elle est linéaire (avec un coefficient de corrélation R^2= 0.99) pour des conductivités inférieures ou égales à 1500 µS/cm. Ce qui correspond à notre cas où les conductivités des eaux usées de temps sec et de temps de pluie varient en médiane entre 400 et 1300µS/cm.

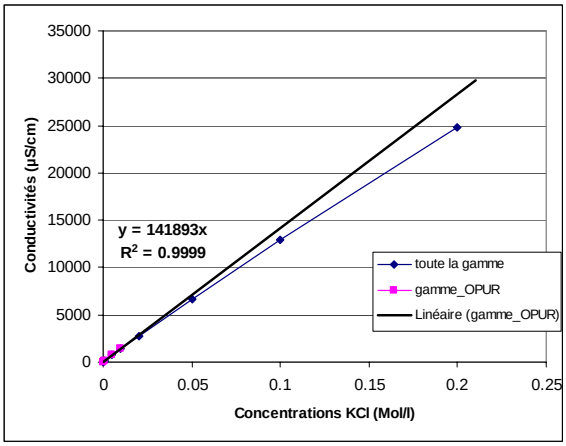


Figure 88 : courbe des conductivités en fonction des concentrations de KCl

Pour chaque site de mesure et compte tenu de la variabilité faible des conductivités mesurées (Tableau 2, partie 3), la conductivité des eaux usées est supposée constante et prise égale à la moyenne des valeurs mesurées sur les échantillons moyens journaliers de temps sec de ce site (Tableau 117).

µS/cm	Marais	Sébastopol	Quais	Clichy centre	Coteaux aval	Clichy aval
Conductivité	1003	1265	1051	1121	1150	1120

Tableau 117 : conductivité moyennes des eaux usées de temps sec des sites OPUR

La conductivité des eaux de ruissellement Kr a été estimée à partir des données mesurées en 1997 – 1998, sur un grand nombre d'échantillons d'eaux de ruissellement de voirie, de cours et de toitures. Pour chacun des événements pluvieux étudiés en 1997-1998, une conductivité moyenne, pondérée par le volume de ruissellement sur chaque type de surface, a été calculée pour la globalité des eaux de ruissellement du Marais. Cette conductivité varie entre 56 et 141µS/cm suivant l'événement pluvieux.

Nous supposons que ces conductivités sont identiques sur tout Paris, et afin de prendre en compte la variabilité d'une pluie à une autre, deux hypothèses sont posées :

- Hypothèse 1 (hypothèse basse) : correspond à la valeur minimum de la conductivité des eaux de ruissellement du Marais; $K_R = 56\mu S/cm$
- Hypothèse 2 (hypothèse haute) : correspond à la valeur maximale de la conductivité des eaux de ruissellement du Marais; $K_R = 141\mu S/cm$

Ainsi, on peut calculer pour l'échantillon moyen et pour chaque échantillon constituant le pollutogramme en conductivité et dans les deux cas (hypothèse basse et & hypothèse haute),

le rapport V_{EU}/V_{tot}, ce qui permet de tracer une enveloppe de la courbe de variation de V_{EU}/V_{tot} en fonction du temps.

Les résultats de cette méthode sont ensuite comparés à ceux obtenus par la méthode volumétrique qui consiste à établir directement le rapport V_{EU}/V_{tot} à partir des volumes d'eau usée mesurés par temps sec et supposés passer pendant la pluie et les volumes totaux d'eau unitaire.

3.1.2 Ordres de grandeurs du rapport V_{EU}/Vtot à l'échelle de l'événement pluvieux

Le Tableau 118 indique les ordres de grandeurs du rapport V_{EU}/Vtot, en moyenne sur l'événement pluvieux, obtenus par les deux méthodes et pour l'ensemble des événements pluvieux étudiés. Les rapports V_{EU}/Vtot pour chaque pluie et sur chaque site de mesure figurent dans ANNEXE 39.

	Méthode de conductivité		Méthode volumétrique
	Hypothèse basse (1)	Hypothèse haute (2)	
Marais	34-66,(45)	27-63,(40)	18-64,(44)
Sébastopol	53-61,(60)	49-58,(57)	36-61,(41)
Quais	33-77,(45)	27-75,(40)	23-54,(35)
Clichy centre	43-81,(62)	38-79,(59)	46-81,(60)
Coteaux aval	29-66,(45)	23-63,(41)	24-78,(47)
Clichy aval	29-71,(60)	23-69,(57)	41-76,(66)
1er décile-9ième décile, (médiane) sur la campagne de mesure.			

Tableau 118: $\%V_{EU}/V_{tot}$ estimés par la méthode de conductivité et la méthode volumétrique

A partir des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Il y a peu de différence entre l'hypothèse basse et haute;
- En moyenne sur l'événement pluvieux, les proportions d'eaux usées calculées par la méthode volumétrique sont en général cohérentes avec celles estimées à partir de la conductivité. Les volumes d'eaux usées écoulés aux exutoires au cours des événements pluvieux ne paraissent pas affectés par l'hydrodynamique de temps de pluie, quelle que soit la taille du bassin versant;
- Des différences importantes entre les proportions d'eaux usées calculées par les deux méthodes apparaissent sur quelques événements isolés. Ces différences peuvent avoir deux origines :
    - ✓ une mauvaise évaluation du volume d'eaux usées par la méthode volumétrique. L'erreur est dans la plupart des cas imputables à des différences de mode de

fonctionnement du réseau entre temps sec et temps de pluie. Les volumes d'eaux usées transités aux niveaux des maillages au cours de la pluie peuvent dans ce cas être très différents de ce qu'on a évalué par temps de sec;

- ✓ une différence importante entre les périodes d'échantillonnage et la période de l'évènement pluvieux. C'est le cas pour quelques évènements ou une fraction du volume de l'événement pluvieux s'est écoulée avant le déclenchement ou après l'arrêt des préleveurs.

A l'issue de ces résultats, les volumes d'eaux usées, calculés à partir des données de temps sec, seront utilisés par la suite dans nos calculs de bilan de flux polluants à l'échelle de l'événement pluvieux. Cependant, pour les évènements pluvieux où il n'y a pas de cohérence entre les deux méthodes, les volumes d'eau usée utilisés correspondront à ceux calculés par la méthode de conductivité.

3.1.3 Analyse des pollutogrammes du rapport V_{EU}/V_{tot}

L'analyse des courbes de variation au cours de l'événement pluvieux du rapport V_{EU}/Vtot (ANNEXE 40) établies à partir des deux méthodes (volumétrique et de conductivité) a permis de dresser la liste des remarques suivantes :

- Les deux hypothèses de conductivité conduisent généralement à des courbes ayant la même allure; tandis que la courbe issue de la méthode volumétrique traduit parfois une dynamique différente (Figure 89);

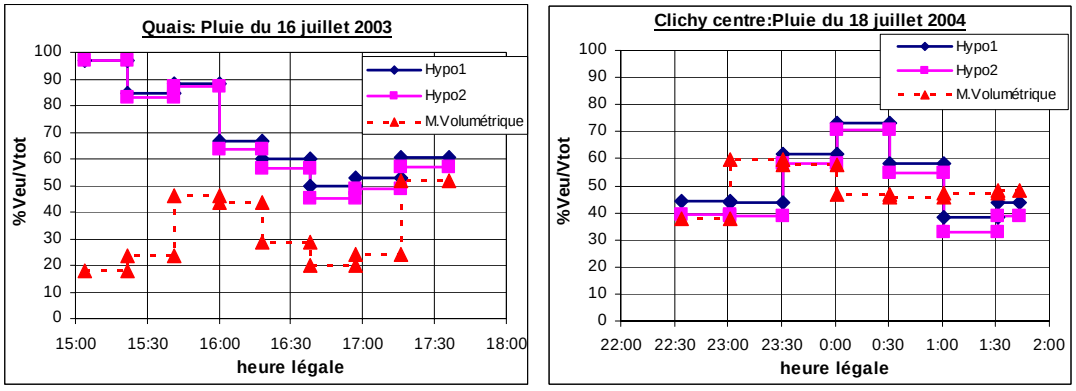


Figure 89 : pollutogrammes du %V_{EU}/V_{tot} évalués au Quais et à Clichy centre

- Pour un certain nombre d'événements pluvieux, le calcul volumétrique tend à sous estimer la proportion d'eaux usées dans l'effluent en début d'événement pluvieux, et surtout à surestimer cette proportion d'eaux usées en fin d'événement pluvieux (Figure 90);

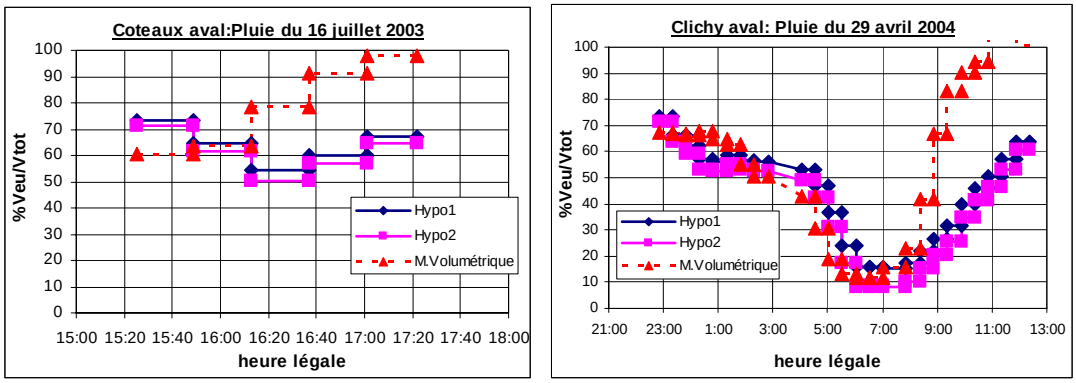


Figure 90 : pollutogrammes du $\%V_{EU}/V_{tot}$ évalués Coteaux aval et Clichy aval

- La conductivité en début de l'événement pluvieux est nettement inférieure à la conductivité des eaux usées de temps sec, sur l'ensemble des bassins versants indiquant l'absence de phénomène de « chasse » du stock d'eaux usées;
- La conductivité mesurée en fin d'événement pluvieux reste systématiquement inférieure à celle des eaux usées de temps sec, traduisant la présence d'une « traîne » non négligeable d'eaux pluviales, qui continuent à s'écouler après la fin de la période de prélèvement, alors même que le niveau d'eau et le débit ont retrouvé leur valeur normale de temps sec. La proportion d'eaux pluviales contenues dans l'effluent unitaire en fin d'événement atteint couramment 30 à 40%.

Il est vraisemblable selon ce résultat que par temps de pluie, le stock des eaux usées contenu dans le réseau est évacué au cours de l'événement pluvieux, et qu'il est remplacé par un stock d'eau pluviale, qui se vidange progressivement après la fin de l'événement pluvieux. Les effluents écoulés après la fin de l'événement pluvieux, et qui rejoignent la STEP sont donc susceptibles d'avoir une nature assez différente de celles des eaux usées.

3.2 Analyse des pollutogrammes en turbidité

L'analyse des pollutogrammes en turbidité est utilisée pour une meilleure compréhension de la distribution temporelle des matières en suspension au cours de la pluie, en fonction de l'échelle spatiale.

La turbidité est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières colloïdales et en suspension; ce qui permet d'établir une relation entre les MES et la turbidité.

3.2.1 Analyse des pollutogrammes en turbidité

Cette analyse consiste à superposer d'une part, les pollutogrammes en conductivité et turbidité avec les hydrogrammes (ANNEXE 41); et d'autre part, à comparer les pollutogrammes en turbidité entre les différents sites de mesure (ANNEXE 42). Cette analyse a montré :

- La turbidité en début d'évènement pluvieux est souvent supérieure à celle des eaux usées de temps sec, indiquant qu'une remise en suspension des particules déposées au fond du collecteur s'est produite. Celle en fin d'évènement pluvieux est par contre plus faible que celles des eaux usées de temps sec (Figure 91) ;

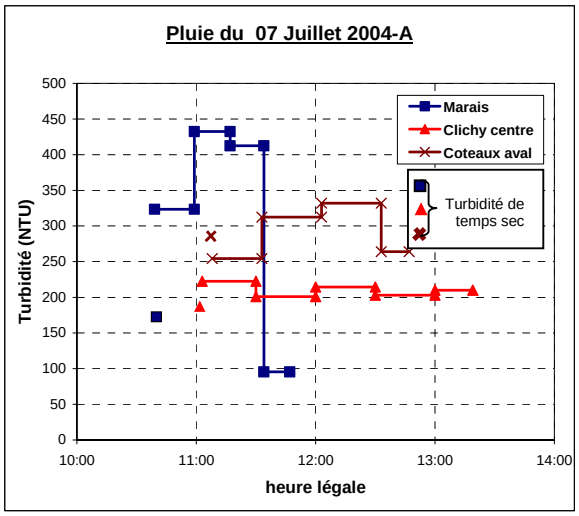


Figure 91 : pollutogrammes en turbidité mesurés au cours de la pluie du 07Juillet2004-A

- La variation de la turbidité au cours de la pluie suit en général celle du débit. En effet, les pics de turbidité coïncident généralement avec ceux de débits. Ainsi, l'érosion est souvent plus forte en début de l'évènement pluvieux ou au moment des pics de débit ;

- La comparaison des pollutogrammes de turbidité entre les sites de mesure montre des différences que ce soit en terme d'ordre de grandeur ou en terme de variation au cours de l'évènement pluvieux. Ce qui indique que l'érosion des particules déposées sur les surfaces urbaines au fond des collecteurs ne se fait pas avec la même ampleur sur l'ensemble des sites de mesure. Cette érosion varie également sur un même site, d'une pluie à une autre (Figure 92). Il faut noter que le Marais se distingue en général par des pics de turbidité beaucoup plus marqués que sur les sites aval.

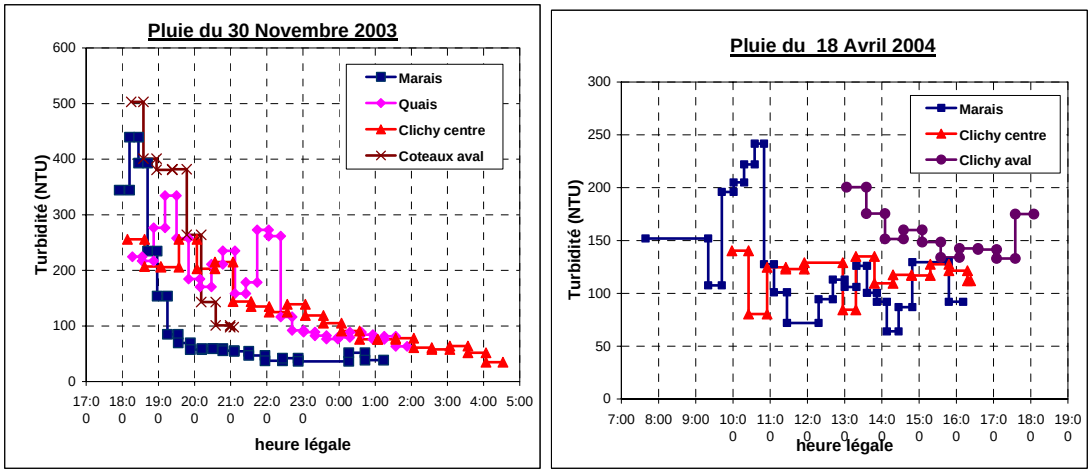


Figure 92 : pollutogrammes en turbidité mesurés au cours de la pluie du 30Novembre2003 et 18Avril2004

Dans le but de comprendre mieux les phénomènes d'érosion et de sédimentation se produisant dans le réseau d'assainissement unitaire, nous avons déduit la part des eaux usées en utilisant les volumes d'eau usée issus de la méthode volumétrique (en débit et en turbidité) des eaux unitaires de temps de pluie. Le pollutogramme obtenu traduit le comportement « érosion ou sédimentation » des particules mises en suspension sous l'effet de la pluie, sur les surfaces urbaines et dans le réseau.

L'analyse des pollutogrammes obtenus (ANNEXE 44) montre que le fort débit s'accompagne souvent d'une forte érosion des particules. En effet, sur l'ensemble des sites de mesure, et pour la plupart des pluies étudiées, une forte érosion a été remarquée durant les pics de débit. Par ailleurs, une diminution de l'érosion voir une sédimentation se produit au fur et à mesure que le débit diminue.

En revanche, dans le cas des pluies successives, l'érosion la plus importante se produit toujours au premier pic de débit quelle que soit son ampleur, tel est le cas de la pluie du 18 avril 2004 sur le Marais et la pluie du 29-30 avril 2004 sur Clichy aval (Figure 93).

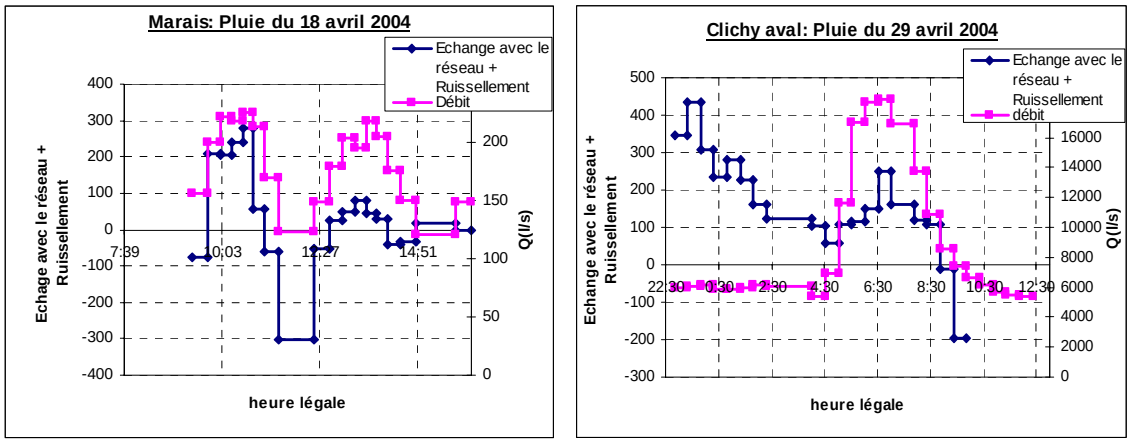


Figure 93: comparaison de l'échange avec le réseau + le ruissellement avec l'hydrogramme

Ce résultat concorde avec celui trouvé par Oms (2003) qui montre que le pic de débit correspond aux pics d'érosion de la couche organique et que plusieurs seuils d'érosion peuvent se produire au cours de l'événement pluvieux.

3.2.2 Courbes Masse-Volume [M (Vt)]

3.2.2.1 Principe

Les courbes M (Vt) permettent d'étudier l'évolution des masses polluantes en fonction du volume écoulé au cours de l'évènement pluvieux. Elles fournissent des éléments pour le dimensionnement des ouvrages de traitement de la pollution de temps de pluie.

Ces courbes représentent le % de la masse M (t) cumulée à l'instant t en fonction du % du volume V(t) cumulé à l'instant t (Geiger, 1984 ; Stotz et al, 1984):

$$M(t) = \frac{\text{masse cumulée au temps t}}{\text{masse totale au cours de l'événement}} = \frac{\int_{u=0}^{t} C(u)Q(u)du}{\int_{u=0}^{D} C(u)Q(u)du}$$

où D est la durée de l'événement,

$$V(t) = \frac{\text{volume cumulé au temps t}}{\text{volume total de l'événement}} = \frac{\int_{u=0}^{t} Q(u)du}{\int_{u=0}^{D} Q(u)du}$$

De nombreuses études ont été réalisées sur les courbes Masse-Volume (Thornto et Saul, 1987; Geiger, 1984). Et pour mieux les interpréter, Saget et al (1996), Betrand-Krajewski et al (1998) proposent d'approximer ces courbes par des fonctions de la forme : $M=V^b$ et de les classer en fonction de la valeur de b en six catégories. Ces dernières correspondent aux six zones de graphe M (V) représentées dans la Figure 94 et le Tableau 119.

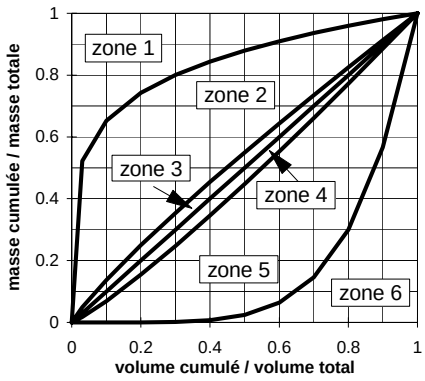


Figure 94 : les six zones des courbes M(V)

Valeur de b		Zone	Ecart de M(V) par rapport à la bissectrice	
b < 1	0 < b ≤ 0.185	1	Ecart positif	Fort
	0.185 < b ≤ 0.862	2		Moyen
	0.862 < b ≤ 1	3		Négligeable
b > 1	1 < b ≤ 1.159	4	Ecart négatif	Négligeable
	1.159 < b ≤ 5.395	5		Moyen
	5.395 < b	6		Fort

Tableau 119: caractérisation des courbes M(V) (Betrand-Krajewski et al, 1998)

La classification proposée par Saget et al (1996), Betrand-Krajewski et al (1998) permet de mieux interpréter les courbes M(V) en se référant à l'écart entre ces courbes et la bissectrice. En effet, une courbe M(V) proche de la diagonale traduit une répartition quasi uniforme de la masse de polluante sur l'ensemble du volume de la pluie. Alors qu'une courbe M(V) éloignée vers le haut de la diagonale (au dessus) traduit une proportion de la masse plus élevée dans la première fraction du volume; cependant, une courbe M(V) incurvée vers le bas de la diagonale (au dessous) traduit une proportion de la masse plus élevée dans la dernière fraction du volume.

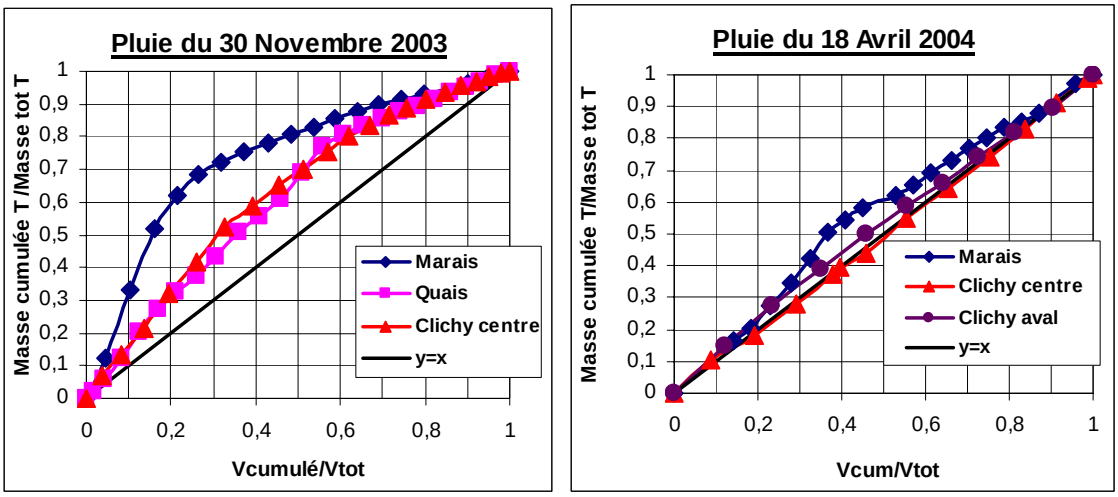
3.2.2.2 Application au cas des pollutogrammes en turbidité des sites OPUR

Pour pouvoir tracer les courbes Masse – Volume, nous avons utilisé les pollutogrammes en turbidité mesurés pour chaque événement pluvieux. Ces courbes ont été établies sur l'ensemble des bassins versants, à l'exception du site Sébastopol qui a été mis hors service pour des travaux de réhabilitation.

L'analyse de ces courbes M(V) (Figure 95 et ANNEXE 45) montre que toutes les courbes M(Vt) se trouvent en zone 2, 3 et 4 selon la classification de Bertrand-Krajewski et al (1998). La majorité se trouve en zone 3 et 4, présentant un écart faible par rapport à la bissectrice, ce qui traduit une répartition relativement uniforme de la masse polluante sur l'ensemble du volume de l'évènement pluvieux.

Seule la pluie du 30 Novembre 2003 se démarque, en particulier sur le Marais, avec une fraction de masse en début d'évènement pluvieux plus importante (70% de la turbidité dans les premiers 30% du volume au Marais). Ce cas reste cependant exceptionnel.

Les courbes M(Vt) d'une même pluie sont comparables, pour les grands bassins versants (Clichy centre, Coteaux aval, Clichy aval).



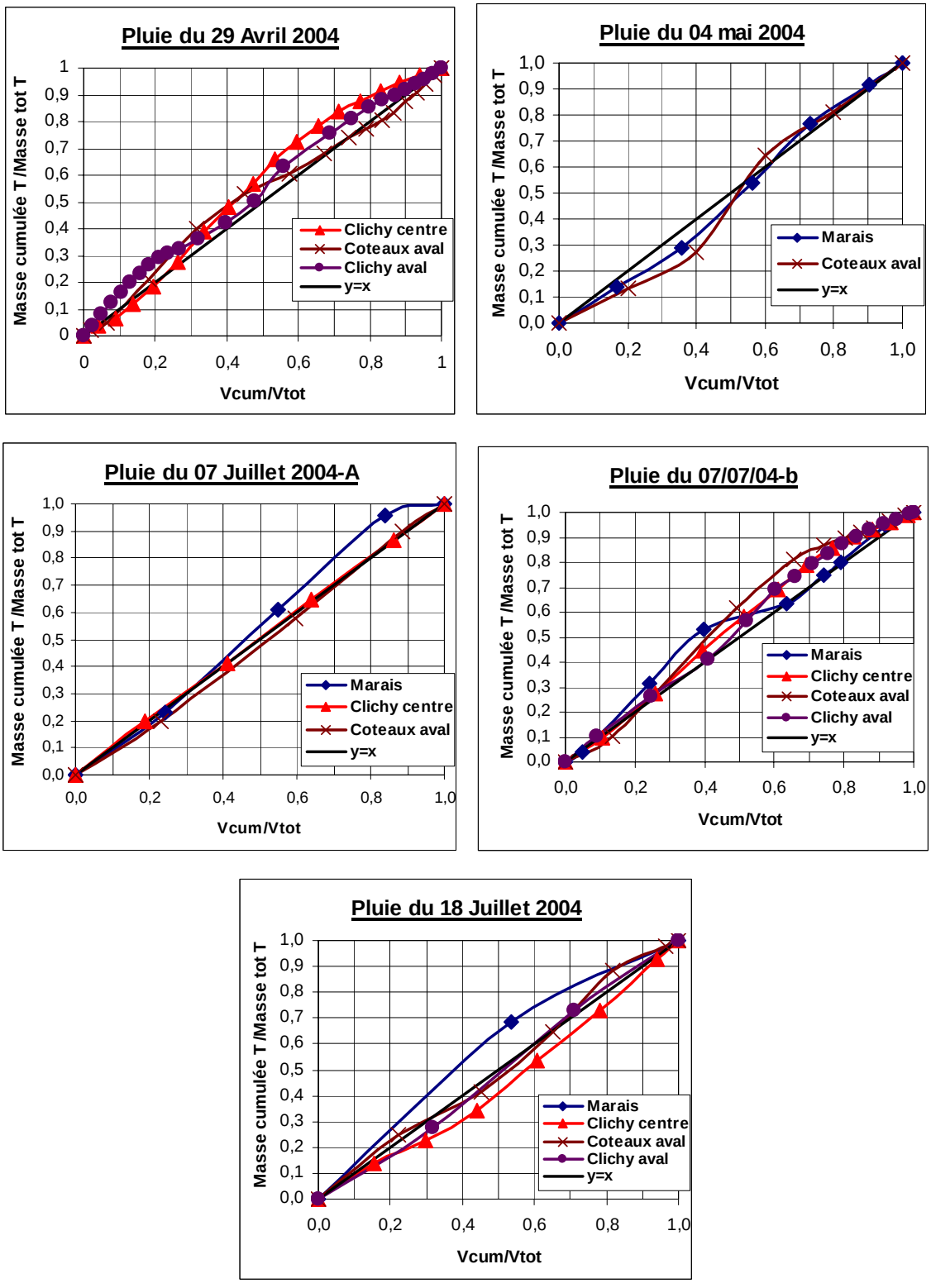


Figure 95: courbe M(V) pour l'ensemble des pluies étudiées sur les sites OPUR

Chapitre 4 : Sources de polluants

Après la compréhension du fonctionnement hydrologique et hydraulique du réseau d'assainissement et de la dynamique par temps sec (pollutogrammes au cours de la journée) et par temps de pluie (pollutogrammes en conductivité et en turbidité) qui nous ont fourni plusieurs éléments pour l'établissement des bilans de masses, on peut à présent évaluer la contribution des trois sources « eaux usées, eaux de ruissellement, et stocks de dépôt dans le réseau » à la pollution des RUTP.

Comme cité précédemment, une couche organique immobile se trouvant dans les creux de dépôts situés à l'amont des collecteurs, et se constituant pas temps sec s'avère la principale source de la pollution par temps de pluie, au bassin versant du Marais (Gromaire, 1998; Ahyerre, 1999 et Oms, 2003). Ainsi, nous avons essayé au cours de cette étude de localiser et de caractériser cette couche à l'échelle d'OPUR.

L'objectif de ce travail est de voir si le stock constitué dans le réseau est toujours la principale source de la pollution particulaire et organique par temps de pluie à des échelles spatiales plus grandes que le Marais, et si ce stock reste de nature identique à la couche organique identifiée sur le Marais.

4.1 Localisation et caractérisation de la couche organique dans la zone OPUR

Les travaux réalisés par Oms (2003) ont permis de définir des critères pour la localisation des zones où il y a risque de présence de la couche organique. Ces critères sont :

- La pente du radier : qui doit être < 0.05%;
- La vitesse d'écoulement : la vitesse moyenne doit être < 0.14m/s;
- La contrainte de cisaillement locale [11]: elle doit être < 0.1N/m^2;
- La présence de creux dans le dépôt grossier.

[11] C'est l'action de l'écoulement sur la paroi du collecteur. Elle exprime la force de frottement agissant tangentiellement sur la paroi par unité de surface

A partir de la base TIGRE, et des deux critères : pente <0.05% et vitesses d'écoulement de temps sec <0.3m/s, estimées au niveau des collecteurs. Notons que la vitesse d'écoulement prise pour cette recherche est supérieure à celle déterminée par Oms (2003), car il est n'était pas possible d'évaluer avec précision la vitesse de temps sec, et par conséquent on ne voulait pas prendre le risque de rater des zones favorables à la présence de la couche organique d'où l'idée de prendre un critère moins restrictif.

Les vitesses d'écoulement ont été estimées en utilisant la formule de Manning-Strickler. Le débit utilisé est celui introduit dans le modèle du réseau parisien (sous MOUSE) utilisé par la SAP, à l'exutoire de chaque sous bassin versant. Ces valeurs de débits ont été calées lors de l'étude du diagnostic du réseau parisien (SAP, 1996) Ce débit a été ensuite réparti sur les différents tronçons composant le collecteur.

Les zones où on risque de trouver la couche organique selon les deux critères de pente et d vitesse sont représentées dans la Figure 96 .

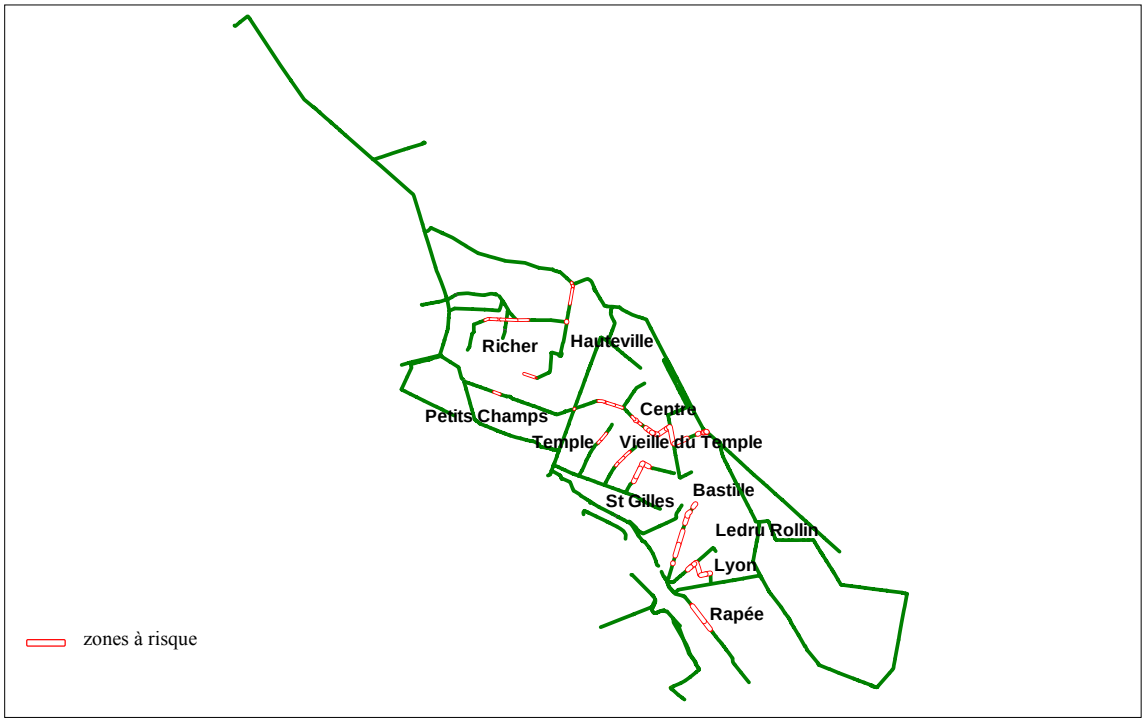


Figure 96: zones où il y a risque de présence de la couche organique

Les longueurs et les pourcentages en longueur des collecteurs qui sont susceptibles de contenir de la couche organique sur chaque bassin versant sont synthétisées dans le Tableau 120.

Bassin versant	Longueur (m)			% de la longueur total		
	Pente<0.05%	Vitesse<0.3m/s	Pente+Vitesse	Pente<0.05%	Vitesse<0.3m/s	Pente+Vitesse
Marais	730	796	347	51	56	24
Sébastopol	1099	397	593	60	51	32
Quais	1475	811	420	39	22	11
Clichy centre	3196	2672	1343	33	28	14
Coteaux aval	622	675	229	20	22	7
Clichy aval	4161	3651	1672	35	30	14

Tableau 120: longueurs et pourcentages en longueur des collecteurs où il y a la couche organique, sur chaque bassin versant

Les collecteurs possédant une pente <0.05% représentent 35% de la longueur totale des collecteurs de la zone OPUR. Ceux avec une vitesse d'écoulement <0.3m/s correspondent à 30% de la longueur totale.

Sachant que le critère pente ne suffit pas tout seul à localiser la couche organique, nous avons rajouté le critère de vitesse d'eau. Les endroits où il y risque de présence de couche organique ne représentent dans ce cas que 14% seulement de la longueur totale des collecteurs (Tableau 120).

La comparaison entre les différents bassins versants montre que c'est au Marais et au Sébastopol qu'il y à le plus de risque de trouver la couche organique. Alors, qu'il est fort possible de ne pas la trouver sur le bassin versant des Coteaux (7% seulement de la longueur totale).

Afin de confirmer la présence de la couche organique, quelques-uns de ces collecteurs concernés ont été visités.

Ces visites consistaient à observer la couche organique avec un endoscope (Oms, 2003). Ce système d'observation facile à transporter dans les égouts, permet d'avoir une surface d'approche aussi petite que possible des sédiments déposés dans le réseau sans les détruire.

L'endoscope utilisé a une longueur de 104 cm avec un diamètre de 8 mm et un axe d'observation latéral à 90°. Il est associé à une source lumineuse. La lumière est concentrée dans un guide de lumière pour éclairer la zone d'observation. L'endoscope est alimenté par une batterie 12 V et un appareil photo numérique peut être adapté à l'oculaire afin de prendre des photos des sédiments. La zone observée a un diamètre de 4 mm. Une gaine en Plexiglas protège l'endoscope. Elle est profilée afin de pénétrer facilement dans le dépôt grossier. Elle

est munie de graduations (tous les 5 mm) sur une face avec des notes de référence tous les 5cm.

Des profils de vitesses d'eau dans les sections de mesure ont également été réalisés avec un micro-moulinet.

La synthèse des visites des collecteurs où il y a risque de présence de la couche organique est présentée dans le Tableau 121. Ainsi, selon les mesures de vitesses d'écoulement et les observations avec l'endoscope, la majorité des collecteurs visités contiennent peu ou pas de dépôt grossier. La couche organique n'a été observée qu'au niveau du collecteur de Lyon (sur le bassin versant des Quais).

Une partie des collecteurs qui d'après notre étude pourrait contenir de la couche mais qui n'en présentaient pas lors de la visite, ont eu des travaux de réhabilitation quelques semaines avant notre passage qui ont nécessité un curage, tel est le cas du collecteur du centre.

Pour les collecteurs Richer et Hauteville, les vitesses mesurées sur place sont supérieures à 0.3 m/s.

Les vitesses mesurées au collecteur de Lyon, où la couche organique a été observée sont inférieures à 0.3 m/s, mais supérieures au critère de 0.14 m/s donné par Oms (2003).

Collecteur	Bassin versant	Vitesse d'eau mesurée (m/s)	Vitesse d'eau estimée (m/s)	Observations
Centre	Sébastopol	0.20-0.41	0.07-0.83,(0.27)	- ou *
Lyon	Quais	0.18-0.26	0.20-0.89,(0.35)	+
Rapée	Quais	Vitesse forte, Non mesurée	0.23-1.31,(0.70)	Accès difficile
Richer	Coteaux	0.95	0.16-0.78,(0.49)	-
Hauteville	Coteaux	0.33	0.22-1.86,(0.58)	- ou *
+ : présence de la couche organique; -pas de couche organique; *présence de dépôt grossier				

Tableau 121: collecteurs visités et susceptibles de contenir de la couche organique

Afin de caractériser la couche organique au niveau du collecteur de Lyon, des prélèvements ont été réalisés en utilisant la boîte de prélèvement conçue par Ahyerre (1999). De nouveaux prélèvements ont été aussi réalisés sur les collecteurs St Gilles et Vielle du Temple (collecteurs du Marais sur lesquels la couche organique a été étudiée par Ahyerre en 1999 et Oms en 2003). La boite de prélèvement a été placée dans la cunette et enfoncée dans le dépôt

grossier suivant la direction de l'écoulement. Elle a été ensuite laissée en place pendant quelques jours avant d'effectuer les prélèvements.

Pour prélever la couche, deux guillotines en PVC sont glissées à l'extrémité de la boite afin d'isoler l'échantillon. L'eau usée piégée dans la boite est ensuite pompée jusqu'à ce que l'interface organique soit atteinte, enfin la couche organique est raclée avec une petite pelle pour collecter les échantillons. Trois jours de prélèvements ont été réalisés et trois échantillons correspondant aux zones amont, milieu et aval de la boite d'échantillonnage ont été constitués à chaque fois. Les échantillons prélevés ont été analysés en terme de MES, MVS, COP, DCO, NTK, et de métaux lourds (Tableau 123).

Les teneurs en MVS et en matières organiques sont généralement comparables entre les trois sites de mesure. Cependant, elles sont assez variables d'un échantillon à un autre. Les teneurs en métaux lourds sont variables d'un site de mesure à un autre et d'un échantillon à un autre. La couche organique prélevée sur le collecteur de Vielle du Temple se distingue de celle des collecteurs Lyon et St Gilles par de plus faibles teneurs en Cd et Zn et par de plus fortes teneurs en Cu et Pb.

Les teneurs en matières volatiles en suspension et en matières organiques sont globalement du même ordre de grandeur que les teneurs trouvées par Ahyerre (1999). Toutefois, la couche prélevée en 2004 parait un peu moins organique que celle prélevée par Oms en 2003.

En revanche, les teneurs en métaux mesurées au cours de cette étude sont très différentes de celles mesurées par Rocher (2003) :

- Plus fortes d'un facteur 1.5 à 3 pour le Cu, Pb et Zn ;
- Plus faibles d'un facteur 4 à 10 pour le Cd.

Ces teneurs vont servir pour l'établissement des bilans en NTK et COP afin de vérifier si la nature du dépôt érodé sur les différents bassins de l'OPUR est identique ou non à la nature de la couche organique érodée à l'exutoire du bassin versant du Marais.

Dans la suite du travail, nous nous baserons sur nos valeurs. En effet, le calcul du rapport Zn/Cd sur le bassin versant du Marais (Figure 82) montre une très grande différence entre notre rapport celui mesuré par Rocher (2003).

	Eaux usées	Eaux de ruissellement	Eaux unitaires	Couche organique	
				Notre étude	Rocher (2003)
Zn/Cd	450	1800	830	400-900	80

Tableau 122 : rapport Zn/Cd mesuré sur le bassin versant du Marais en 2003 et 2004

Selon ces premières recherches, il semblerait que la couche organique n'existe que sur le bassin versant du Marais et sur un collecteur du bassin versant des Quais. Ceci ne signifie pas qu'elle n'existe pas du tout sur la zone OPUR, d'autant qu'une partie des zones à risques déterminées n'ont pas été visitées. Ainsi, les recherches sont toujours en cours.

	Lyon (2004)	ST Gilles (2004)	Vielle du Temple (2004)	St Gilles, (Oms, 2003) *(Rocher, 2003)*	Vielle du Temple (Ahyerre, 1999)
%MVS	66-71, [69]	48-74, [62]	61-71, [67]	63-80, [76]	60-75, [69]
COP (gC/KgMES)	354-386, [374]	373-421, [384]	300-418,[376]	-	-
DCO (gO_2/gMS)	1.01-1.19, [1.09]	0.86-1.29, [1.13]	0.61-1.13, [0.95]	0.8-1.8, [1.5]	0.9-1.43,[1.19]
NTK (gN/KgMS)	21-22,[22]	21-25, [22]	12-25, [19]	-	
Cd (µg/gMS)	4.6-5.33,[4.96]	3.3-7.92,[5.38]	1.38-6.53,[2.15]	*10-60,[20]*	
Cu (µg/gMS)	394-526,[460]	387-553,[477]	504-1457,[846]	*200-260,[220]*	
Pb (µg/gMS)	490-525,[508]	421-859,[563]	432-1002,[678]	*250-470,[330]*	
Zn (µg/gMS)	2473-2880,[2677]	1761-2812,[2239]	1426-2626,[1947]	*1500-1700,[1600]*	

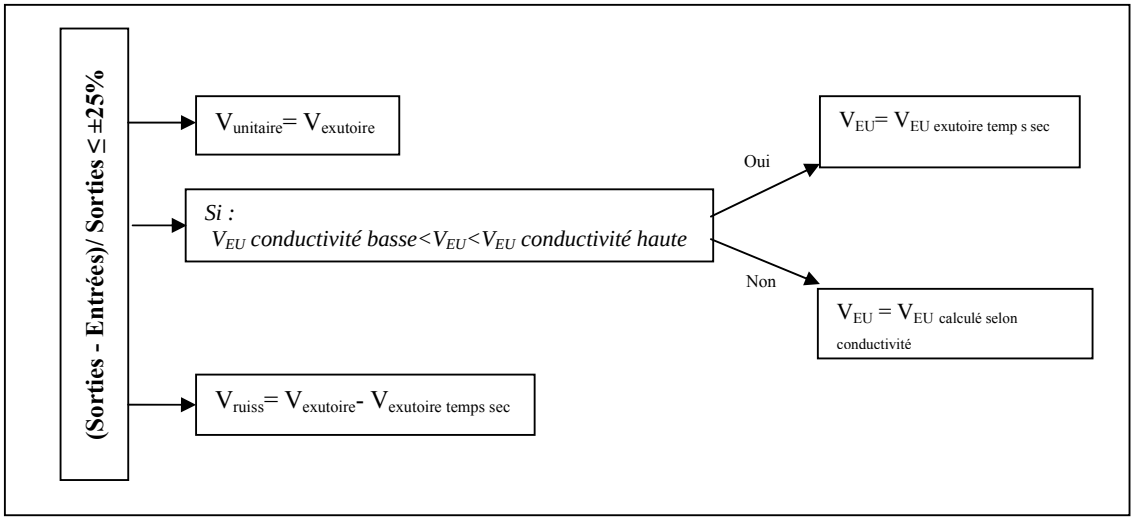
Tableau 123: Teneurs en MVS, en COP, NTK, DCO et en métaux lourds mesurées dans la couche organique du collecteur de Lyon, ST Gilles et Vielle du Temple

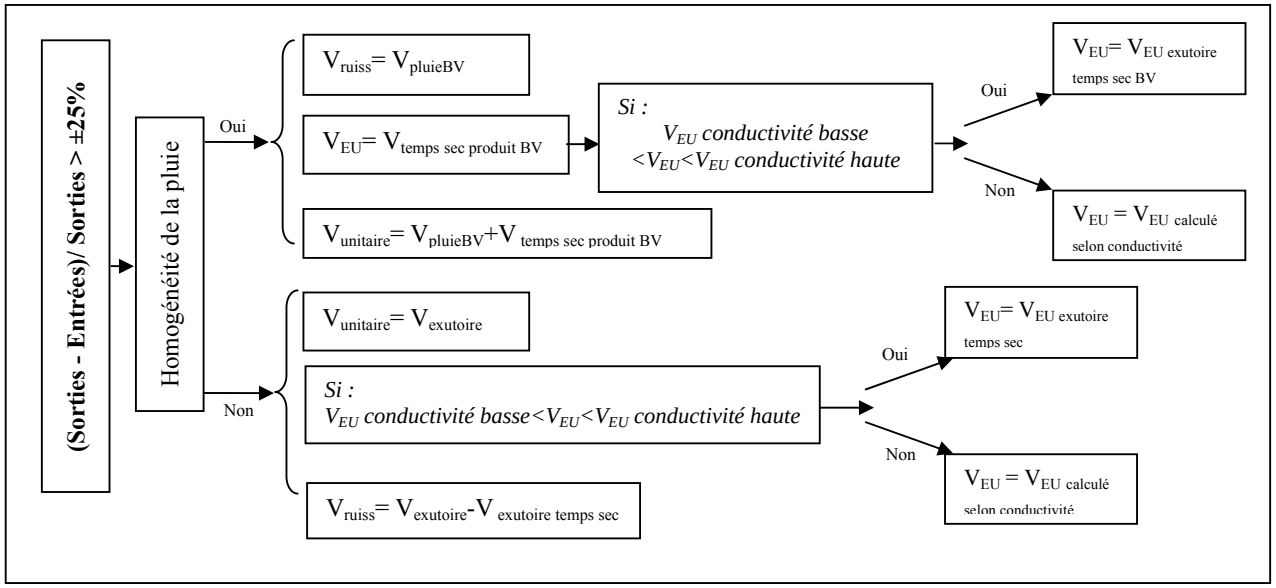
4.2 Méthode d'évaluation des volumes des eaux unitaires, des eaux usées et des eaux de ruissellement

Les bilans hydrologiques calculés sur l'ensemble des évènements pluvieux étudiés ont permis de déterminer pour chaque site de mesure et pour chaque pluie étudiée les volumes d'eau unitaire (V_T), d'eau usée (V_{EU}) ou encore d'eaux de ruissellement (V_R) à utiliser pour le calcul des masses définies précédemment.

Selon que le bilan hydrologique est correct ($\leq \pm 25\%$) ou non ($> \pm 25\%$), ces volumes sont déterminés d'après les deux organigrammes suivants :

- ✓ Lorsque le bilan hydrologique est correct, le volume d'eau unitaire est celui mesuré à l'exutoire, le volume d'eau usée est celui supposé passer à l'exutoire au cours de la pluie (celui de la méthode volumétrique) ou celui estimé selon la méthode de conductivité lorsque celui-ci est incohérent avec le volume d'eau usée estimé par la conductivité. Enfin, le volume de ruissellement s'obtient par différence entre le volume d'eau unitaire et celui d'eau usée.
- ✓ Lorsque le bilan hydrologique n'est pas bon et que la pluie est hétérogène, nous avons supposé que le problème du bilan hydrologique venait d'une mauvaise évaluation de la hauteur d'eau précipitée sur le bassin versant. Dans ce, cas les volumes des eaux unitaires et des eaux usées sont ceux mesurés à l'exutoire. Tout en corrigeant les volumes des eaux usées lorsqu'ils ne sont pas cohérents avec ceux évalués par la méthode de conductivité. Et les volumes des eaux de ruissellement ne sont autres que la différence entre les volumes d'eaux unitaires et d'eaux usées.
- ✓ Lorsque le bilan hydrologique n'est pas bon et que la pluie est homogène, nous avons supposé que le problème du bilan hydrologique vient du fonctionnement du réseau. Dans ce cas, les volumes qui sont pris en compte sont ceux produits par le bassin versant. Le volume de ruissellement correspond à celui estimé à partir de la hauteur moyenne de la pluie. Le volume d'eau usée produit par le bassin versant est le volume d'eau usée mesuré à l'exutoire lequel on a corrigé par rapport aux volumes passés aux niveaux des maillages. Le volume des eaux unitaires est la somme du volume de la pluie et celui des eaux usées produit par le bassin versant.





Avec :

$V_{exutoitre}$: volume d'eau mesuré à l'exutoire,

$V_{EU\ exutoire\ temps\ sec}$: volume d'eau usée supposé passer pendant la pluie,

$V_{EU\ caclulé\ selon\ conductivité}$: volume d'eau usée moyen évalué à partir des pourcentages d'eau usée de la méthode de conductivité "basse et haute",

V_{ruiss}: volume d'eau de ruissellement,

$V_{pluie\ BV}$: volume ruisselé calculé à partir de la hauteur de la pluie moyenne sur le bassin versant et de la surface active,

$V_{exutoire\ temps\ sec\ BV}$: volume d'eau usée produit par le bassin versant, corrigé par rapport aux volumes passés aux niveaux des maillages,

Ainsi, pour les sites :

- Marais et Sébastopol : le volume pris en compte pour les eaux unitaires et celui mesuré à l'exutoire. Le volume pris en compte pour les eaux usées est celui mesuré à l'exutoire pour les pluies où il y avait une cohérence entre les pourcentages des eaux usées estimés par la méthode de conductivité et volumétrique. En revanche, pour les évènements pluvieux où une surestimation ou une sous-estimation existe entre les deux méthodes, un nouveau volume d'eau usée est alors calculé, en utilisant la méthode de conductivité. Enfin, le volume des eaux de ruissellement est obtenu par simple différence entre le volume des eaux unitaires et le volume des eaux usées, sur l'ensemble des évènements pluvieux étudiés;
- Quais, Clichy centre, Coteaux aval, et Clichy aval : les volumes pris en compte pour les eaux unitaires et des eaux usées diffèrent selon les pluies et sont :
    - ✓ soit les volumes des eaux unitaires et des eaux usées sont ceux mesurés à l'exutoire, et celui du ruissellement n'est autre que la différence entre ces deux derniers ;
    - ✓ soit le volume d'eau unitaire est celui mesuré à l'exutoire et le volume d'eau usée est celui calculé par la méthode de conductivité, et par différence on obtient le volume des eaux de ruissellement ;
    - ✓ soit le volume d'eau usée est estimé à partir du rapport V_{EU} /V_{tot} évalué précédemment par la méthode de conductivité (lorsque celui-ci est surestimé ou sous estimé par la méthode volumétrique), le volume d'eau de ruissellement est celui évalué par la hauteur moyenne de la pluie lorsque celle-ci est homogène sur le bassin versant, et le volume d'eau unitaire n'est autre que la somme des volumes estimés plus haut.

On trouvera ANNEXE 47 la méthode appliquée pour l'estimation des volumes des eaux unitaires, des eaux usées et des eaux de ruissellement, sur chaque bassin versant et pour chaque événement pluvieux étudié.

4.3 Méthode de calcul des masses des trois sources de pollution

Pour évaluer la contribution de chacune des trois sources « eaux usées de temps sec, eaux de ruissellement et érosion des stocks de polluants existants dans le réseau » à la pollution de temps de pluie, une approche de bilan de masse entre l'entrée et la sortie de chaque bassin versant est utilisée. Cette dernière consiste à évaluer la masse de la fraction provenant du « dépôt » à partir des masses des eaux unitaires aux exutoires des bassins versants, par simple soustraction des masses d'eau usée de temps sec et de celles des eaux de ruissellement, nous permettant par la suite d'évaluer des pourcentages de contribution de chacune des trois sources.

Les masses des eaux unitaires, eaux usées et eaux de ruissellement utilisées sont estimées de la manière suivante :

- Masses des Eaux unitaires :

  Les masses des eaux unitaires M_T sont estimées à partir du volume des eaux unitaires et de la concentration moyenne mesurée à l'exutoire à cours de ce même événement pluvieux, pour chacun des évènements pluvieux étudié.

$$M_T = C_T * V_T$$

  Avec :

  M_T : Masse des eaux unitaires,

  C_T : Concentration des eaux unitaires ;

  V_T : Volume corrigé des eaux unitaires.

  Selon le cas, le volume d'eau unitaire est égal soit :

  - ✓ au volume d'eau unitaire mesuré à l'exutoire au durant l'événement pluvieux,
  - ✓ à la somme du volume d'eau usée et du volume d'eau durant l'événement pluvieux, de ruissellement (volume pluie).

  Les volumes utilisés sont cependant corrigés :

  - Par rapport au Siphon Cuvier : soustraction des apports provenant de la Rive Gauche aux trois sites Quais, Clichy Centre et Clichy aval, en se basant sur les débits mesurés en entrée du siphon, et ça pour l'ensemble des événements pluvieux sauf les deux pluies survenues au courant du mois d'avril 2004 ;

- Par rapport à Galerie Capucine : soustraction des apports provenant du collecteur d'Asnières durant la période de chômage de ce dernier aux deux sites Clichy Centre et Clichy aval, uniquement pour les deux évènements pluvieux du 30 avril 2003 et 05 mai 2003. L'apport du collecteur d'Asnières via la galerie Capucine a été déterminé par modélisation du fonctionnement du réseau parisien par temps de pluie en utilisant le logiciel MOUSE.

- Masses des Eaux usées de temps sec :

On suppose que la masse des eaux usées passée pendant l'évènement pluvieux est identique à celle mesurée par temps sec durant la même période à l'exutoire du bassin versant. Cette masse est estimée à partir des pollutogrammes à différentes tranches horaires en flux ou en concentrations, mesurés par temps sec à l'exutoire de chaque bassin versant.

L'évaluation de la masse attribuable aux eaux usées est cependant assez délicate car les débits des eaux de temps sec et donc les flux fluctuent de façon assez significative d'un jour à un autre en fonction de la gestion du réseau.

Nous avons procédé comme suit :

- Pour chaque événement pluvieux, une journée de temps sec de référence est choisie parmi les jours qui précèdent ou suivent la date de la pluie. On retient une journée de temps sec pour laquelle les hauteurs d'eau et débits correspondent aux hauteurs d'eau et débits mesurés dans les heures qui précèdent et suivent la période de l'événement pluvieux. Cette journée de temps sec de référence est utilisée pour déterminer : l'heure de début et de fin de l'événement pluvieux à l'exutoire du bassin versant considéré, l'hydrogramme d'eaux usées durant la période de l'événement pluvieux.

- L'hydrogramme de cette journée de temps sec de référence est ensuite comparé aux hydrogrammes des différentes journées de la campagne de temps sec pour les quelles des pollutogrammes sont disponibles. On sélectionne les pollutogrammes mesurés pour la ou les journées les plus proches de la journée de référence en terme d'hydrogramme.

- Une analyse de la variabilité d'une journée de temps sec à une autre des pollutogrammes en concentrations et en flux a été réalisée pour chaque site de mesure. Elle a permis de déterminer, pour chaque site la donnée la plus stable

(concentration ou flux des eaux usées). Pour les sites Marais, Sébastopol et Coteaux il s'agit des mesures de flux. Pour les sites Quais, Clichy centre et Clichy aval, il s'agit des mesures de concentration.

- Deux méthodes différentes de calcul sont ensuite appliquées :

Méthode 1 : Marais, Sébastopol, Coteaux

On se base sur les pollutogrammes en flux calculés pour les journées de campagnes de temps sec précédemment. Un pollutogramme de flux moyen est calculé à partir des différentes journées sélectionnées.

La masse totale imputable aux eaux usées au cours de l'événement pluvieux M_{EU} est ensuite donnée par :

$$M_{EU} = \sum_{ti=td}^{tf} \phi_{EU}(\Delta ti) \times \Delta ti$$

Où :

$\phi_{EU(\Delta ti)}$: flux (kg/h) des eaux usées de temps sec durant la tranche horaire $t_i - t_{i+1}$;

$\Delta ti = t_{i+1} - t_i$ durée de la tranche horaire (h)

td : heure de début de l'événement pluvieux

tf : heure de fin de l'événement pluvieux

Notons que pour les pluies où il n'y avait pas de cohérence entre les volumes d'eau usée estimés par la méthode volumétrique et celle de conductivité, les flux ont été multipliés par un facteur correctif.

Méthode 2 : Quais, Clichy centre, Clichy aval

Un pollutogramme moyen en concentration a été calculé à partir de l'ensemble des journées sélectionnées dans la campagne de temps sec. Un pollutogramme en flux est ensuite calculé en se basant sut l'hydrogramme d'eaux usées de la journée de référence (les volumes utilisés pour le calcul des flux sont corrigés par rapport au siphon Cuvier pour les sites et les pluies concernées) correspondant à l'événement pluvieux. Ce dernier pollutogramme a été ensuite corrigé par un facteur correctif pour les évènements pluvieux où il y a une différence dans l'estimation du volume d'eau usée entre la méthode volumétrique et de conductivité.

La masse totale imputable aux eaux usées au cours de l'événement pluvieux M_{EU} est ensuite donnée par :

$$M_{EU} = \sum_{ti=td}^{tf} C_{EU}(\Delta ti) \times V_{refEU}(\Delta ti)$$

avec :

$C_{EU(}\Delta ti_{)}$: Concentration moyennes des eaux usées de temps sec durant la tranche horaire $t_i - t_{i+1}$;

$V_{refEU(}\Delta ti_{)}$: Volume d'eaux usées durant la tranche horaire $t_i - t_{i+1}$ de la journée de temps sec de référence correspondant à l'événement pluvieux.

On trouvera en ANNEXE 46 la méthode appliquée pour chaque site de mesure et pour chaque événement pluvieux étudié.

- Masses des Eaux de ruissellement :

Pour évaluer les masses apportées par les eaux de ruissellement, on a procédé comme suit :

- *Pour les matières en suspension, les matières organiques (DCO et DBO5) :* pour les paramètres polluants globaux, nous avons utilisé une méthode simplificatrice et dans laquelle nous avons considéré que la concentration des eaux de ruissellement C_R est constante d'une pluie à une autre, et peut être évaluée à partir des concentrations des eaux de ruissellement du Marais mesurées en 1997 – 1998 (Gromaire, 1998). Il s'agit ici d'une extrapolation des concentrations des eaux de ruissellement du Marais sur l'ensemble des bassins versants de l'OPUR :

$$C_{Ruis} = f\,(C_{Ruis\text{- toitures_Marais}};\ C_{Ruis\text{-Voiries_Marais}};\ C_{Rui\text{-cours_Marais}})$$

avec :

C_{Ruis}: concentration des eaux de ruissellement,

$C_{Ruis\text{- toitures_Marais}}$: concentration des eaux de ruissellement sur les toitures du Marais,

$C_{Ruis\text{-Voiries_Marais}}$: concentration des eaux de ruissellement sur les voiries du Marais,

$C_{Rui\text{-cours_Marais}}$: concentration des eaux de ruissellement sur les cours du Marais,

Afin de tenir compte néanmoins de la variabilité de la qualité des eaux de ruissellement d'une pluie à une autre, deux hypothèses sur les concentrations des eaux de ruissellement ont été utilisées : une hypothèse médiane et une hypothèse haute correspondant respectivement à la valeur médiane et au 9^{ième} décile des concentrations du ruissellement total du Marais. Par ailleurs, et afin de tenir compte de la variabilité des eaux de ruissellement entre les différents types de surfaces urbaines (toitures, voiries, autres surfaces : espaces verts, cimetières…), une pondération par la superficie et le coefficient de ruissellement de chaque type de surfaces urbaines se trouvant sur chaque bassin versant de l'OPUR a été réalisée. Ainsi, les masses des eaux de ruissellement sont ensuite calculées par la formule suivante :

$$M_R = C_R * V_R$$

avec

$$C_R = \frac{(C_{Toi} * S_{Toi} * Coef_{Toi}) + (C_V * S_V * Coef_V) + (C_A * S_A * Coef_A)}{\sum(S_{Toi}; S_V; S_A) * Coef_{BV}}$$

et

M_R : masse des eaux de ruissellement,

C_R : concentration des eaux de ruissellement,

V_R : volume des eaux de ruissellement. selon le cas (§4.2), V_R est estimé par soustraction des eaux usées au volume des eaux unitaires mesurés à l'exutoire ou à partir de la hauteur de pluie et du coefficient de ruissellement,

S_{Toi}, S_V, S_A: superficies des surfaces urbaines: Toitures, Voiries et Autres (espaces verts, cimetières, cours…),

C_{Toi}, C_V, C_A : concentrations des eaux de ruissellement des toitures, voiries et autres (espaces verts, cimetières, cours…) (Tableau 124), mesurées par Gromaire (1998),

	Toitures	Voiries	Autres
MES	6-37,(14)	66-219,(105)	39-69,(57)
MVS	4-42,(13)	31-128,(57)	22-38,(33)
DCOt	12-56,(22)	93-329,(146)	56-93,(78)
DCOd	2-22,(9)	24-95,(38)	22-34,(26)
DBO_5t	3-11,(4)	19-66,(29)	14-19,(15)
DBO_5d	1-5,(2)	6-26,(10)	3-10,(5)
1^{ier} décile-9^{ième} décile,(médiane)			

Tableau 124 : concentrations des eaux de ruissellement du Marais (1997-1998)

$Coef_{BV}$: coefficient de ruissellement du bassin versant ;

$Coef_{Toi}$, $Coef_V$, $Coef_A$: coefficients de ruissellement sur les toitures, voiries et autres surfaces.

Rappelons enfin que l'utilisation d'une hypothèse haute des eaux de ruissellement pour l'évaluation des pourcentages de contribution des MES et des MO est justifiée par le fait que ces derniers provenaient essentiellement du réseau (Gromaire, 1998), et que la contribution du ruissellement est faible.

- *Pour le carbone organique total et le NTKt :*

Pour le COT et le NTKt, nous avons utilisé la même méthode appliquée pour les MES, DCO et DBO_5, mais avec une différence au niveau des concentrations des eaux de ruissellement du COT et NTKt. Pour ces deux paramètres polluants, nous avons pris des valeurs trouvées dans la littérature pour le ruissellement total, qu'on a extrapolé sur tout paris.

$$C_{Ruis} = f\ (C_{Ruis.Total\text{-}littérature})$$

Et pour tenir compte de la variabilité de la qualité des eaux de ruissellement d'une pluie à une autre, nous avons utilisé deux hypothèses sur les concentrations des eaux de ruissellement : une hypothèse médiane et une hypothèse haute correspondant respectivement à la valeur médiane et au 9^{ième} décile des concentrations du ruissellement total du COT et du NTKt trouvées dans la bibliographie.

Et par conséquent, les masses des eaux de ruissellement du COT et de NTKt peuvent être calculées par la formule suivante :

$$M_R = C_R * V_R$$

avec

M_R : masse des eaux de ruissellement,

C_R : concentration des eaux de ruissellement total de la littérature (Tableau 125),

mg/l	1^{ier} décile	médiane	9^{ième} décile
COT	12	19	49
NTKt	0.9	1.9	5.0

Tableau 125: concentrations des eaux de ruissellement trouvées dans littérature

V_R : volume des eaux de ruissellement. Selon le cas (§4.2), V_R est estimé par soustraction des eaux usées au volume des eaux unitaires mesurés à l'exutoire, ou à partir de la hauteur de pluie et du coefficient de ruissellement.

- *Pour le carbone organique particulaire et le NTKp*

L'objectif de ces bilans est d'évaluer les masses de NTK et de carbone organique érodées dans le réseau au cours d'un événement pluvial, de façon à déterminer une nouvelle fois (sur la base des rapports NTKp/MS, COP/MS, COP/NTKp) si la nature des dépôts érodés sur les différents bassins versant est identique ou non à celle du dépôt organique identifié sur le bassin versant du Marais.

Cependant, nous ne disposons pas de mesures des concentrations en NTK et en COP pour les eaux de ruissellement du Marais ou de Paris. Des approches indirectes sont donc mises en œuvre.

La méthode proposée pour ce faire est la suivante :

Connaissant la masse de NTK et de COP dans les eaux unitaires de temps de pluie (M_{NTK_T} et M_{COP_T}) et celle des eaux usées (M_{NTK_EU} et M_{COP_EU}), on peut déduire la masse provenant des eaux de ruissellement et du dépôt (M_{NTK_R+D}) :

$$M_{NTK_T} - M_{NTK_EU} = M_{NTK_R+D} \quad \text{Équation 6}$$

$$M_{COP_T} - M_{COP_EU} = M_{COP_R+D} \quad \text{Équation 7}$$

A présent, deux méthodes peuvent être adoptées

- *Méthode 1 :* selon les données bibliographiques, les concentrations de NTKt des eaux de ruissellement sont très faibles (entre 0.9 et 5 mg/l, avec une médiane de 2 mg/l), impliquant que les concentrations de NTKp sont beaucoup plus faibles. Ceci nous amène à supposer que la masse de NTKp des eaux de ruissellement est négligeable ($M_{NTK_R} \approx 0$) devant celle du dépôt, on peut alors calculer directement la masse de NTKp érodée sur chacun de nos sites de mesure, et la formule 4 devient :

$$M_{NTK_T} - M_{NTK_EU} = M_{NTK_D}$$

  En ce qui concerne le COP, les concentrations dans les eaux de ruissellement varient entre 7 et 20mg/l, avec une médiane 13mg/l, et par conséquent les masses de COP des

eaux de ruissellement ne peuvent pas être négligées et sont prises en compte dans l'estimation de la masse de COP du dépôt selon les formules suivantes :

$$M_{COP_T} - M_{COP_EU} = M_{COP_R+D} \quad \text{Équation 8}$$

et

$$M_{COP_R+D} = M_{COP_R} + M_{COP_D} \quad \text{Équation 9}$$

- *Méthode 2* : La teneur en NTK et en carbone organique des dépôts a été mesurée en 2004 sur le bassin versant du Marais dans des échantillons de couche organique et des échantillons de dépôt grossier, permettant ainsi de calculer pour le bassin versant du Marais la masse de NTK et de COP provenant du dépôt (M_{NTK_D} et M_{COP_D}). A présent, la masse de NTK et du COP provenant des eaux de ruissellement sur le Marais (M_{NTK_R} et M_{COP_R}) peut être connue par la formule suivante, qui à son tour conduirait à la valeur de la concentration (C_{NTK_R} et C_{COP_R}) :

$$M_{NTK_R+D} - M_{NTK_D} = M_{NTK_R} \quad \text{Équation 10}$$

$$M_{COP_R+D} - M_{COP_D} = M_{COP_R} \quad \text{Équation 11}$$

En supposant que l'ordre de grandeur des concentrations en NTK et COP des eaux de ruissellement du Marais est extrapolable à tout Paris, on peut estimer la masse de NTK et de COP provenant du dépôt sur chaque site de mesure de la zone OPUR.

- *Pour les métaux lourds* : afin d'affiner encore plus l'estimation des masses des eaux de ruissellement en terme de métaux lourds, et sachant que le zinc est un matériau fréquemment utilisé dans la composition des toitures parisiennes, une distinction entre les toitures en zinc de celles non zinc a été faite. Connaissant la concentration des eaux de ruissellement (Tableau 126) et la superficie des deux types de toitures sur chaque bassin versant, les masses des eaux de ruissellement peuvent être calculées par la formule suivante :

$$M_R = (M_{Toi\,Zinc} + M_{Toi\,Non\,Zinc}) + M_V + M_A$$

Avec :

- $M_{Toi\ Zinc}$ + $M_{Toi\ Non\ Zinc}$: masses de métaux dans les eaux de ruissellement des toitures en zinc et non zinc;
- M_V: masses de métaux dans des eaux de ruissellement des voiries;
- M_A: masses des eaux de ruissellement des autres surfaces (cours, jardins publiques…);

Les masses de métaux provenant du ruissellement des différentes surfaces peuvent être calculées par les formules suivantes :

$$M_{Toi} = C_{R-Toi\,Zinc} * V_{R-Toi\,Zinc} + C_{R-Toi\,Non\,Zinc} * V_{R-Toi\ Non\,Zinc}$$

$$M_V = C_V * V_{R-V}$$

$$M_A = C_A * V_{R-A}$$

Avec :

- $C_{R\text{-}Toi\ Zinc}$ et $C_{R\text{-}Toi\ Non\ Zinc}$: sont respectivement les concentrations des eaux de ruissellement sur les toitures en zinc et non zinc;
- C_V et C_A ; sont respectivement les concentrations des eaux de ruissellement des voiries et des autres surfaces;
- $V_{R\text{-}Toi\ Zinc}$, $V_{R\text{-}Toi\ Non\ Zinc}$: sont respectivement les volumes de ruissellement sur les toitures en zinc et non zinc;
- $V_{R\text{-}V}$, $V_{R\text{-}A}$: sont respectivement les volumes de ruissellement sur les voiries et les autres surfaces;

µg/l	Toitures		Voiries	Autres surfaces
	Zinc	Non Zinc		
Cadmium t	3.08-9.57,(3.55)	0.48-1.36,(0.99)	0.49-0.78,(0.78)	0.35-0.86,(0.49)
Cadmium d	2.1-8.1,(3.1)	0.2-1.23,(0.5)	0.05-0.23,(0.1)	0.06-0.31,(0.22)
Cuivre t	28-181,(66)		42-101,(69)	13-24,(24)
Cuivre d	12-109,(35)		12-49,(29)	5-9,(9)
Plomb t	349-1040,(569)		124-243,(156)	63-158,(108)
Plomb d	145-428,(210)		3-13,(6)	5-30,(17)
Zinc t	4643-20151,(7136)	1493-5229,(2305)	554-1457,(813)	478-904,(693)
Zinc d	4305-16900,(6447)	1220-5160,(2156)	138-1024,(460)	232-482,(435)
1ier décile-9ième décile, (médiane)				

Tableau 126 : concentrations des eaux de ruissellement du Marais (1997-1998)

Rappelons que les concentrations des eaux de ruissellement (Tableau 126) correspondent aux déciles calculés sur une vingtaine d'événement pluvieux, étudiés en 1997-1998 sur le Marais. Pour chaque événement pluvieux, une concentration moyenne spatiale, est calculée pour chaque type de surface à partir des concentrations mesurées sur plusieurs sites d'échantillonnages.

Dans le cas du cuivre, une hypothèse médiane (valeur médiane) des concentrations des eaux de ruissellement est utilisée pour l'évaluation des pourcentages de contribution, compte tenu du fait que ce dernier provenait essentiellement du réseau (Gromaire, 1998). Par ailleurs, nous n'avons pas de grands axes automobiles sur le bassin versant du Marais qui pourraient apporter le cuivre, alors que c'est le cas sur les grands bassins versants. Par conséquent, une hypothèse haute ($9^{ième}$ décile) des concentrations en cuivre des eaux de ruissellement a également été utilisée, afin de tenir compte d'une éventuelle sous-évaluation de l'apport automobile dans le cas du Marais.

En ce qui concerne le plomb et le zinc, deux hypothèses sont utilisées : une basse (1^{er} décile) et une médiane (valeur médiane). En effet, dans le cas du Marais, le ruissellement générait la plus grande part des métaux de temps de pluie, voir dans certains cas plus que ce qui était observé à l'exutoire. Pour vérifier ce phénomène sur d'autres bassins versants, nous préférons sous-estimer l'apport du aux ruissellement plutôt que de le surestimer.

Pour le Cd, trois hypothèses sur les concentrations des eaux de ruissellement sont utilisées : une basse (1^{er} décile) et une médiane (valeur médiane) et une haute ($9^{ième}$ décile) compte tenu du fait que le Cd est très variable d'une toiture à une autre, en fonction du degrés d'impuretés présent dans les éléments en zinc, et qu'il est de ce fait très difficile d'extrapoler spatialement les données du Marais.

- Masse provenant des échanges avec le « dépôt » (M_D) :

Elle correspond aux échanges avec les stocks du réseau, et elle est calculée selon la formule suivante :

$$M_T - M_{EU} - M_R = M_D$$

4.4 Contribution des différentes sources aux flux des matières en suspension et des matières oxydables et azotées

Les ordres de grandeurs des contributions des différentes sources aux flux des MES, MVS, DCOt, $DBOt_5$, COT et NTKt transportés par temps de pluie, aux exutoires des différents bassins versants de l'OPUR sont synthétisés dans Tableau 127, Tableau 128, et Tableau 129 (les graphiques sont présentés en ANNEXE 48).

		MES					**MVS**				
		Eaux	***Ruissellement***		***Réseau***		***Eaux***	***Ruissellement***		***Réseau***	
	N	***usées***	***Hyp.1***	***Hyp.2***	***Hyp.1***	***Hyp.2***	***usées***	***Hyp.1***	***Hyp.2***	***Hyp.1***	***Hyp.2***
Marais	14	9-39, (**21**)	3-18, (**9**)	6-26, (**18**)	54-82, (**70**)	46-72, (**61**)	12-44, (**25**)	3-10, (**7**)	6-24, (**18**)	50-82, (**68**)	35-70, (**58**)
Sébastopol	3	23-47, (**30**)	5-7, (**6**)	12-15, (**13**)	46-72, (**64**)	38-66, (**57**)	28-58, (**38**)	5-6, (**5**)	12-15, (**13**)	36-68, (**57**)	28-61, (**50**)
Quais	4	23-58, (**32**)	4-16, (**12**)	8-30, (**23**)	38-61, (**56**)	31-53, (**45**)	29-70, (**39**)	3-18, (**10**)	7-29, (**22**)	27-58, (**51**)	20-46, (**39**)
Clichy centre	13	29-68, (**42**)	5-13, (**9**)	11-25, (**18**)	22-60, (**49**)	14-49, (**40**)	35-71, (**48**)	4-9, (**7**)	10-21, (**16**)	24-55, (**45**)	17-47, (**36**)
Coteaux aval	8	16-45, (**24**)	6-12, (**11**)	11-24, (**21**)	48-70, (**65**)	41-61, (**55**)	20-50, (**30**)	4-11, (**9**)	10-24, (**20**)	45-72, (**61**)	37-65, (**50**)
Clichy aval	7	24-69, (**37**)	5-16, (**12**)	10-31, (**23**)	24-60 (**51**)	18-45, (**39**)	31-79, (**48**)	4-14, (**11**)	9-32, (**24**)	14-53, (**41**)	4-40, (**28**)

N = nombre de pluies considérées
x-y = 1er décile-9^{ième} décile pour les différentes pluies ; (**z**) = résultat obtenu par la somme des masses sur l'ensemble des pluies
Hyp.1 = hypothèse médiane (médiane des concentrations de ruissellement du Marais)
Hyp.2 = hypothèse haute (9ème décile des concentrations de ruissellement du Marais)

Tableau 127: contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement, et du stock de dépôt dans le réseau en MES, et MVS (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%)

			DCOt					$DBOt_5$				
			Eaux usées	***Ruissellement***		***Réseau***		***Eaux usées***	***Ruissellement***		***Réseau***	
	N			***Hyp.1***	***Hyp.2***	***Hyp.1***	***Hyp.2***		***Hyp.1***	***Hyp.2***	***Hyp.1***	***Hyp.2***
Marais	12	8	10-62, (**32**)	3-12, (**8**)	7-27, (**17**)	31-80, (**60**)	18-73 (**51**)	14-38, (**25**)	1-6, (**4**)	3-14, (**9**)	57-80, (**71**)	50-75, (**65**)
Sébastopol	3		39-54, (**45**)	6-7, (**7**)	13-16, (**14**)	39-55, (**49**)	30-47, (**41**)	41-57, (**48**)	2-4, (**3**)	5-8, (**7**)	40-57, (**49**)	35-54, (**45**)
Quais	4		38-73, (**48**)	4-17, (**12**)	7-34, (**24**)	22-47, (**40**)	14-36, (**28**)	43-70, (**53**)	2-9, (**6**)	3-17, (**12**)	28-49, (**41**)	26-40, (**35**)
Clichy centre	12	8	38-69, (**51**)	6-11, (**8**)	12-24, (**18**)	25-48, (**41**)	13-39, (**31**)	54-75, (**61**)	3-6, (**4**)	6-13, (**9**)	21-42, (**35**)	16-38, (**30**)
Coteaux aval	8		26-64, (**35**)	5-14, (**11**)	10-28, (**22**)	30-68, (**54**)	19-61, (**43**)	30-89, (**47**)	3-8, (**7**)	7-16, (**13**)	8-65, (**46**)	4-61, (**39**)
Clichy aval	7		33-79, (**51**)	4-18, (**11**)	8-38, (**22**)	15-58, (**38**)	7-50, (**27**)	37-81, (**55**)	2-10, (**6**)	4-24, (**12**)	15-58, (**39**)	10-51, (**33**)

N = nombre de pluies considérées
x-y = 1er décile-9ième décile pour les différentes pluies ; (**z**) = résultat obtenu par la somme des masses sur l'ensemble des pluies
Hyp.1 = hypothèse médiane (médiane des concentrations de ruissellement du Marais)
Hyp.2 = hypothèse haute (9ème décile des concentrations de ruissellement du Marais)

Tableau 128: contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement, et du stock de dépôt dans le réseau en DCOt, et $DBOt_5$ (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%)

			COT					NTKt				
			Eaux usées	***Ruissellement***		***Réseau***		***Eaux usées***	***Ruissellement***		***Réseau***	
	N			***Hyp.1***	***Hyp.2***	***Hyp.1***	***Hyp.2***		***Hyp.1***	***Hyp.2***	***Hyp.1***	***Hyp.2***
Marais	11	8	13-53, (**29**)	4-15, (**10**)	9-40, (**25**)	36-78, (**61**)	18-61 (**46**)	31-77, (**52**)	2-10, (**7**)	6-26, (**18**)	20-61, (**41**)	24-52, (**30**)
Sébastopol	3		35-53, (**42**)	6-7, (**6**)	15-18, (**16**)	40-59, (**52**)	29-50, (**42**)	41-57, (**57**)	2-4, (**3**)	5-8, (**8**)	40-57, (**40**)	35-54, (**34**)
Quais	4		39-71, (**49**)	3-14, (**10**)	7-37, (**26**)	27-47, (**41**)	19-31, (**24**)	60-101, (**76**)	1-7, (**5**)	4-19, (**13**)	-3-33, (**19**)	-6-22, (**11**)
Clichy centre	12	8	43-68 (**51**)	5-13, (**8**)	13-34, (**22**)	25-47, (**41**)	11-34, (**27**)	61-96, (**76**)	2-6, (**4**)	6-16, (**10**)	-1-37, (**20**)	-8-33, (**14**)
Coteaux aval	8		24-54, (**34**)	4-12, (**10**)	11-30, (**24**)	42-64, (**56**)	27-54, (**42**)	45-87, (**57**)	2-8, (**5**)	6-21, (**14**)	10-48, (**38**)	4-42, (**29**)
Clichy aval	7		37-77, (**52**)	4-17, (**11**)	10-43, (**29**)	14-51, (**37**)	-3-40, (**19**)	71-91, (**80**)	2-10, (**6**)	5-26, (**15**)	7-21, (**14**)	-6-13, (**5**)

N = nombre de pluies considérées
x-y = 1er décile-9ième décile pour les différentes pluies ; (**z**) = résultat obtenu par la somme des masses sur l'ensemble des pluies
Hyp.1 = hypothèse médiane (médiane des concentrations de ruissellement du Marais)
Hyp.2 = hypothèse haute (9ème décile des concentrations de ruissellement du Marais)

Tableau 129: contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement, et du stock de dépôt dans le réseau en COT, et NTKt (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%)

On remarque que les eaux usées génèrent une fraction non négligeable de la masse de particules en suspension et de matières organiques des effluents unitaires de temps de pluie.

Cette contribution est un peu plus importante pour les matières organiques (32-51% pour la DCOt, 25-60% pour la $DBOt_5$, et 29 à 52% pour le COT suivant le site, en moyenne pour les événements pluvieux étudiés) que pour les matières en suspension (21-42% pour les MES et 25-48% pour les MVS suivant le site, en moyenne pour les événements pluvieux étudiés).

Par ailleurs, les eaux usées s'avèrent la principale source d'apport en NTKt, par temps de pluie. Elle représente 52 à 80% de masses de NTK véhiculées aux exutoires des bassins versants de l'OPUR.

Ces résultats montrent par ailleurs une augmentation de la contribution des eaux usées avec la taille des bassins versants, notamment à Clichy centre et Clichy aval. La faible contribution des eaux usées à Coteaux aval peut être expliquée par le fait que la durée de l'évènement pluvieux est plus longue à Clichy centre et Clichy aval qu'au site de Coteaux aval (entre 1h et 4h de plus).
Les pourcentages d'apport dus aux eaux usées varient dans une large gamme suivant les caractéristiques de l'événement pluvieux. Ainsi, la contribution des eaux usées varie entre 9-39% au Marais et entre 24-69% à Clichy aval suivant l'événement pluvial pour les MES et respectivement entre 10-62% et 33-79% pour la DCO.

La contribution des eaux de ruissellement est généralement faible par rapport aux deux autres sources de pollution (eaux usées et réseau), et ceci sur l'ensemble des sites de mesure. La contribution moyenne imputable aux eaux de ruissellement varie selon le site entre 6-12% pour les MES, entre 7-12% pour la DCOt et entre 3 et 7% pour le NTK, pour l'hypothèse médiane. Au maximum, cette contribution varie entre 13 et 23% pour les MES, entre 14 et 24% pour la DCOt et entre 8 et 18% pour le NTKt.

Le stock de sédiments contenu dans le réseau constitue une source importante en matières en suspension et en matières oxydables sur tous les sites. Cette source génère, suivant le site et en médiane sur l'ensemble des évènements étudiés, de 49 à 70% des matières en suspension, de 38 à 60% de la demande chimique en oxygène et de 41 à 61% de carbone organique total.

L'apport du à l'érosion des stocks de sédiment dans le réseau a tendance à diminuer légèrement vers l'aval, mais reste une source majeure de la pollution de temps de pluie quel que soit le bassin versant considéré.

Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Gromaire (1998) sur le bassin versant du Marais : en moyenne pour 31 événements pluvieux 63% des MES, 49% de la DCO et 54 % de la DBO_5 provenaient du dépôt du réseau. Ils montrent par ailleurs qu'il ne s'agit pas de résultats spécifiques au petit bassin versant du Marais, qui seraient liées à sa situation très en amont du réseau ou à la présence de collecteur sur-dimensionnés et anormalement encrassés. En effet, cette contribution due à l'érosion de dépôts organiques est observée pour tous les bassins versants, y compris des bassins de plusieurs milliers d'hectares.

4.5 Contribution des différentes sources en métaux lourds

4.5.1 Contribution des différentes sources en métaux lourds totaux

Les pourcentages de contribution des trois sources (eaux usées, eaux de ruissellement et réseau) aux flux de Cdt, Cut, Pbt et Znt transférés par temps de pluie, calculés à partir de la somme des masses sur l'ensemble des pluies étudiées, sont présentés dans le Tableau 130 et le Tableau 131.

%		Cdt							Cut				
		Eaux usées	***Ruissellement***			***Réseau***			***Eaux usées***	***Ruissellement***		***Réseau***	
	N		***Hyp 1***	***Hyp 2***	***Hyp 3***	***Hyp 1***	***Hyp 2***	***Hyp 3***		***Hyp1***	***Hyp2***	***Hyp1***	***Hyp2***
Marais	68	10	55	72	161	35	18	-71	14	12	26	74	60
Sébastopol	3	18	41	52	119	41	30	-37	17	6	13	77	71
Quais	34	22	38	53	103	41	26	-25	21	13	25	66	54
Clichy centre	89	23	42	55	122	35	22	-45	33	12	24	55	43
Coteaux aval	8	7	35	53	98	58	41	-5	15	12	24	73	60
Clichy aval	67	14	52	70	147	34	16	-60	22	12	24	66	54

N = nombre de pluies considérées
z= résultat obtenu par la somme des masses sur l'ensemble des pluies
Hyp.1 = hypothèse basse (1ier décile des concentrations de ruissellement du Marais)
Hyp.2 = hypothèse médiane (médiane des concentrations de ruissellement du Marais)
Hyp.3 = hypothèse haute (9ème décile des concentrations de ruissellement du Marais)

Tableau 130 : Contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement et de l'érosion de dépôts du réseau aux flux de Cdt et Cut, de temps de pluie (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%)

%		Pbt					Znt				
		Eaux usées	***Ruissellement***		***Réseau***		***Eaux usées***	***Ruissellement***		***Réseau***	
	N		***Hyp1***	***Hyp2***	***Hyp1***	***Hyp2***		***Hyp1***	***Hyp2***	***Hyp1***	***Hyp2***
Marais	8	4	94	149	2	-53	3	97	148	0	-51
Sébastopol	3	4	63	100	33	-4	4	67	102	29	-6
Quais	4	5	103	161	-8	-66	9	79	120	12	-29
Clichy centre	9 10	11	91	144	-2	-55	11	86	131	3	-42
Coteaux aval	8	3	67	106	30	-9	4	68	104	28	-8
Clichy aval	7	7	66	103	27	-10	8	68	104	24	-12

N = nombre de pluies considérées
z= résultat obtenu par la somme des masses sur l'ensemble des pluies
Hyp.1 = hypothèse basse (1ier décile des concentrations de ruissellement du Marais)
Hyp.2 = hypothèse médiane (médiane des concentrations de ruissellement du Marais)

Tableau 131 : Contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement et de l'érosion de dépôts du réseau aux flux de Pbt et Znt, de temps de pluie (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%)

Les métaux lourds véhiculés par temps de pluie, aux exutoires des bassins versants de l'OPUR, peuvent être classés en trois groupes :

- Le premier groupe concerne le cuivre total qui a tendance à se comporter comme les MES et les matières organiques et où les masses mesurées à l'exutoire sont largement plus fortes que celles mesurées dans les eaux usées et les eaux de ruissellement.

  La contribution des eaux usées en terme de Cut est relativement significative (14 à 33% sur l'ensemble des évènements pluvieux étudiés). Cette contribution semble cependant augmenter en allant vers l'aval, notamment à Clichy centre et Clichy aval.

  La contribution des eaux de ruissellement est faible, et varie en moyenne entre 13 est 26%, sur les différents évènements pluvieux étudiés, pour l'hypothèse médiane. Au minimum (hypothèse basse), elle serait de 6 à 13%, selon les sites de mesure.

  L'échange avec le réseau présente toujours un fort apport en cuivre total, en comparaison avec les eaux usées et les eaux de ruissellement. Cette contribution qui varie suivant le site, en moyenne sur l'ensemble des événements pluvieux entre 43 et 71% semble diminuer légèrement en fonction de l'échelle spatiale.

- Le second groupe concerne le plomb et le zinc total où les masses mesurées à l'exutoire de chaque bassin versant sont largement supérieures à celles mesurées dans les eaux usées et inférieures aux masses ramenées par les eaux de ruissellement, selon l'hypothèse médiane.

  Pour ces deux métaux, la contribution des eaux usées est faible. Elle varie entre 3 et 11%, sur l'ensemble des pluies étudiées. Cette contribution apparaît plus forte sur Clichy centre que sur les autres des bassins versants.

  Les eaux de ruissellement constituent la principale source d'apports en Pbt et Znt à l'échelle de tous les bassins versants. La contribution minimale des eaux de ruissellement (calculée avec l'hypothèse basse de concentrations) aux flux de Pbt et Znt varie selon le site entre 63 et 103% pour le plomb et entre 67 et 97% pour le zinc. Lorsque l'on considère l'hypothèse médiane de concentrations des eaux de ruissellement, cette contribution devient supérieure à 100% pour tous les sites, ce qui correspond à une perte d'une fraction de plomb et de zinc au cours du transfert dans le réseau d'assainissement.

  Une telle perte a déjà été identifiée par Gromaire (1998) et Garnaud (1999) dans le cas du bassin versant du Marais, et a pu être attribuée dans leur cas à la fixation d'une partie des métaux dissous sur les stocks permanents du réseau.

- Le troisième groupe concerne le cadmium total. Les résultats obtenus en ce qui concerne ce métal sont très variables. Ce métal possède un comportement différent, par rapport aux trois autres métaux étudiés précédemment.

  Les bilans de masses estimés montre que le ruissellement constitue une source majeure d'apport en Cdt (52 à 72%, selon le site de mesure sur la base de l'hypothèse médiane), mais il apparaît néanmoins que l'échange avec le réseau contribue aussi avec une part non négligeable (18 à 41%, selon le site de mesure sur la base de l'hypothèse médiane).

  Les eaux usées constituent une source mineure d'apport en Cdt. Leur contribution varie entre 7 et 23%, selon le site de mesure.

4.5.2 Contribution des différentes sources en métaux lourds dissous et particulaires

Afin de mieux cerner les phénomènes en jeu lors du transfert des métaux dans le réseau d'assainissement et notamment d'identifier la forme des métaux « perdus » ou « gagnés » au

cours du transfert en réseau, nous avons évalué la contribution des différentes sources en terme de métaux dissous d'une part, et de métaux particulaire d'autre part.

4.5.2.1 Contribution des métaux dissous

La contribution des eaux usées aux flux polluants en Cdd, Cud, Pbd et Znd des effluents de temps de pluie est représentée dans la Figure 97.

Le pourcentage de contribution des eaux usées aux flux de temps de pluie est plus important dans le cas du dissous que dans le cas du total pour le cuivre (×3), le plomb (×5) et le zinc (×2).

Les eaux usées constituent une source majeure pour le cuivre dissous. En somme sur les différents évènements pluvieux étudiés, elles représentent suivant le site 16 à 44% du flux de cuivre dissous mesuré à l'exutoire. Cette contribution est de plus extrêmement variable d'un évènement pluvieux à un autre et peut atteindre plus de 70% pour certaines pluies sur le Marais, Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval.

La contribution des eaux usées est plus modérée que pour le cuivre dissous dans les cas du cadmium dissous (8 à 30% en somme des évènements pluvieux, selon le site), du plomb dissous (12 à 25% en somme des évènements pluvieux, selon le site), du zinc dissous (8 à 29% en somme des évènements pluvieux, selon le site). Elle reste cependant fortement variable d'un événement pluvieux à l'autre pour le cadmium et le plomb dissous, pour lesquels elle peut représenter une source majeure pour certaines pluies.

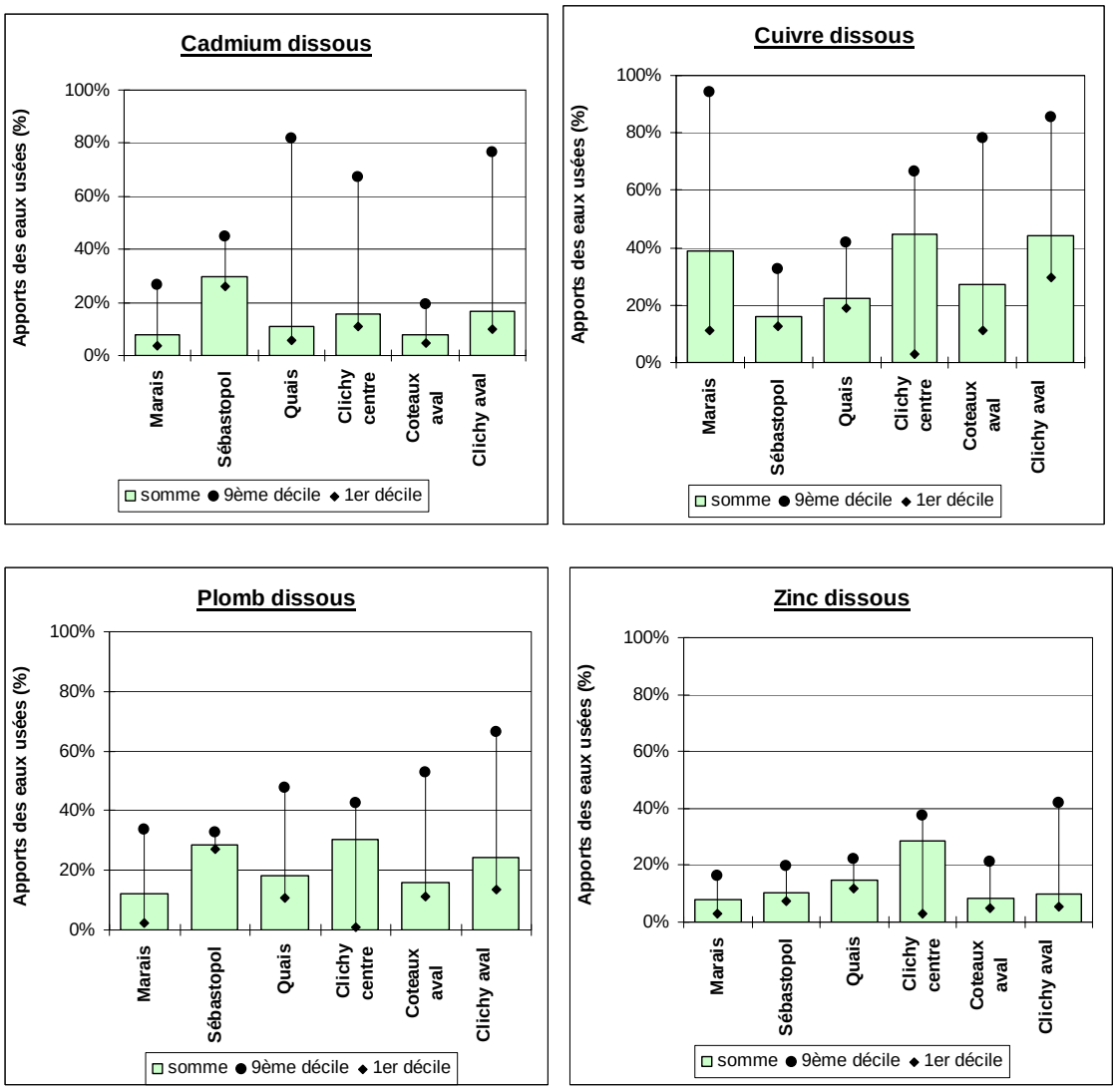


Figure 97: Contribution des eaux usées en Cdd, Cud, Pbd et Znd

Quelle que soit le site de mesure, la contribution des eaux de ruissellement en métaux dissous est supérieure au flux de métaux dissous véhiculé à l'exutoire du bassin versant, traduisant une perte des métaux dissous au cours du transfert dans le réseau d'assainissement. Cette perte est très marquée, en particulier pour le plomb et le zinc dissous. Elle représente suivant l'hypothèse médiane, en somme des évènements pluvieux étudiés, 21 à 56% du cadmium dissous apporté par les eaux de ruissellement, 53 à 76% du cuivre dissous des eaux de ruissellement, 91 à 97% du plomb dissous et 83 à 92% du zinc dissous (Tableau 132 et Tableau 133)

La perte en métaux dissous apportés par les eaux de ruissellement peut s'expliquer soit :

- Par leur stockage à l'intérieur du réseau : fixation sur les différents types de dépôts (grossier, organique ou biofilms),
- Par leur adsorption sur les matières en suspension présentes dans l'effluents (particules provenant des eaux usées et/ou de l'érosion des stocks du réseau).

	Cdd		Cud	
%Réseau / Ruissellement	***Hyp.1***	***Hyp.2***	***Hyp.1***	***Hyp.2***
Marais	-12	-43	-1	-64
Sébastopol	-33	-56	24	-55
Quais	+23	-21	-13	-67
Clichy centre	-12	-44	-12	-67
Coteaux aval	15	-29	-33	-75
Clichy aval	-29	-56	-37	-76
Hyp.1 = hypothèse médiane (médiane des concentrations de ruissellement du Marais) Hyp.2 = hypothèse haute (9ème décile des concentrations de ruissellement du Marais)				

Tableau 132: %Réseau / Ruissellement du Cdd et du Cud, en somme des masses sur l'ensemble des pluies

	Pbd		Znd	
%Réseau / Ruissellement	***Hyp.1***	***Hyp.2***	***Hyp.1***	***Hyp.2***
Marais	-87	-91	-81	-88
Sébastopol	-94	-96	-84	-90
Quais	-93	-95	-79	-87
Clichy centre	-95	-97	-87	-89
Coteaux aval	-95	-97	-87	-92
Clichy aval	-93	-95	-73	-83
Hyp.1 = hypothèse médiane (médiane des concentrations de ruissellement du Marais) Hyp.2 = hypothèse haute (9ème décile des concentrations de ruissellement du Marais)				

Tableau 133: %Réseau / Ruissellement du Pbd et du Znd, en somme des masses sur l'ensemble des pluies

4.5.2.2 Contribution en métaux particulaires

La contribution des trois sources en terme de métaux lourds particulaires est représentée dans le Tableau 134 et le Tableau 135.

La contribution des eaux usées à la pollution métallique des effluents de temps de pluie est significative pour le cadmium et le cuivre particulaire (6 à 31 pour le Cdp et 8 à 32) et plus faible pour le Pbp et le Znp (2 à 10%). Elle est comparable à celle qui avait été calculée pour les métaux totaux.

Dans le cas du Cdp, du Cup et du Znp, le terme "d'échange avec le réseau" est largement positif, traduisant une augmentation importante des masses de Cdp, Cup et Znp véhiculées par les effluents de temps entre l'entrée (ruissellement + eaux usées) et l'exutoire.

La contribution du "réseau", en somme des évènements pluvieux étudiés, et selon l'hypothèse médiane est de 30 à 67% pour le cadmium particulaire, 54 à 76% pour le cuivre particulaire, et 71 à 83% pour le zinc particulaire.

Pour le Cd et le Cu, cette contribution du réseau en métal particulaire est supérieure à celle qui avait été calculée pour le total (dissous + particulaire). De plus, la contribution du "réseau" est positive en Znp, alors qu'elle était négative en Znt.

Cet apport du réseau en métaux particulaire peut avoir deux origines:

- L'érosion d'un stock de dépôt dans le réseau d'assainissement,
- L'adsorption des métaux dissous provenant ruissellement sur les matières en suspension.

Il est difficile d'évaluer l'importance relative de chacune de ces deux origines potentielles. Cependant, dans le cas du zinc, le phénomène d'adsorption du zinc dissous sur les MES parait prépondérant.

Le plomb particulaire présente un comportement différent des trois autres métaux. Les résultats varient d'un événement pluvieux à un autre et d'un site de mesure à un autre. Il est néanmoins clair que le ruissellement constitue la principale source d'apport de plomb particulaire. La contribution du réseau en plomb particulaire est limitée, voir négative pour certains sites selon l'hypothèse médiane.

Rappelons que le plomb des eaux de ruissellement, contrairement aux trois autres métaux, est très majoritairement sous forme particulaire. La masse de Pb dissous susceptible de se fixer sur le dépôt ou les MES est de ce fait assez limitée.

%		Cdp					Cup				
		Eaux usées	***Ruissellement***		***Réseau***		***Eaux usées***	***Ruissellement***		***Réseau***	
	N		***Hyp1***	***Hyp2***	***Hyp1***	***Hyp2***		***Hyp1***	***Hyp2***	***Hyp1***	***Hyp2***
Marais	67	11	32	31	57	59	11	9	15	80	75
Sébastopol	3	14	21	19	65	67	17	4	7	79	76
Quais	34	31	34	39	35	30	21	9	15	70	64
Clichy centre	78	23	23	23	53	53	32	8	14	60	54
Coteaux aval	6	6	24	32	71	62	8	14	13	78	73
Clichy aval	5	12	34	36	54	52	21	8	13	71	66

N = nombre de pluies considérées
z= en somme des masses sur l'ensemble des pluies
Hyp.1 = hypothèse basse (1^{ier} décile des concentrations de ruissellement du Marais)
Hyp.2 = hypothèse médiane (médiane des concentrations de ruissellement du Marais)

Tableau 134: contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement et de l'érosion de dépôts du réseau aux flux de Cdp et Cup, de temps de pluie (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%)

%		Pbp					Znp				
		Eaux usées	***Ruissellement***		***Réseau***		***Eaux usées***	***Ruissellement***		***Réseau***	
	N		***Hyp1***	***Hyp2***	***Hyp1***	***Hyp2***		***Hyp1***	***Hyp2***	***Hyp1***	***Hyp2***
Marais	8	3	63	105	34	-8	2	18	21	80	77
Sébastopol	3	4	41	68	55	28	4	11	14	85	83
Quais	4	6	73	116	22	-22	8	21	21	71	71
Clichy centre	910	10	63	102	27	-12	10	17	19	74	71
Coteaux aval	8	3	45	73	52	24	3	15	15	82	81
Clichy aval	76	7	45	73	48	21	7	15	17	77	76

N = nombre de pluies considérées
z= en somme des masses sur l'ensemble des pluies
Hyp.1 = hypothèse basse (1^{ier} décile des concentrations de ruissellement du Marais)
Hyp.2 = hypothèse médiane (médiane des concentrations de ruissellement du Marais)

Tableau 135: contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement et de l'érosion de dépôts du réseau aux flux de Pbp et Znp, de temps de pluie (la masse totale mesurée à l'exutoire représente 100%)

4.6 Teneurs en matières organiques et en cuivre des particules des eaux usées, des eaux de ruissellement et du stock de dépôt dans le réseau

Les pourcentages de contribution des différentes sources (eaux usées, eaux de ruissellement, et réseau) à la pollution de temps de pluie ont montré que le réseau d'assainissement constitue une source majeure d'apport de matières en suspension, de matières oxydables totales et particulaires, de cuivre total et particulaire et de zinc particulaire. Démontrant ainsi le rôle important du réseau d'assainissement et plus particulièrement celui du stock de dépôt. De ce fait, il semble intéressant de connaître la nature des particules résultantes de l'érosion de ce stock de dépôt.

4.6.1 Teneurs en matières volatiles en suspension, en DCOp, et en DBO_5p

Les teneurs en matières volatiles en suspension et en matières organiques des trois sources de pollution sont récapitulées dans le Tableau 136, Tableau 137 et Tableau 138.

Les teneurs en matières volatiles et en matières oxydables des particules des effluents unitaires sont légèrement inférieures à celles des eaux usées transitant aux exutoires des bassins versants de l'OPUR, mais elles sont toujours supérieures à celles des eaux de ruissellement. Cet enrichissement en matières organiques est lié d'une part au mélange avec les eaux usées, et par l'apport provenant des particules du stock du dépôt, d'autre part.

	MVS/MES ($g.g^{-1}$)					
	Exutoire	***Eaux Usées***	***Ruissellement***		***Echange avec réseau***	
			Hyp.1	***Hyp.2***	***Hyp.1***	***Hyp.2***
Marais	0.62-0.83,(**0.74**)	0.86-0.89,(**0.87**)	0.62	0.72	0.57-0.83,(**0.71**)	0.55-0.83,(**0.69**)
Sébastopol	0.69-0.78,(**0.71**)	0.87-0.89,(**0.88**)	0.62	0.72	0.55-0.74,(**0.64**)	0.49-0.73,(**0.62**)
Quais	0.64-0.74,(**0,70**)	0.83-0.88,(**0.86**)	0.57	0.65	0.46-0.69,(**0.63**)	0.42-0.69,(**0.60**)
Clichy centre	0.68-0.82,(**0.76**)	0.85-0.88,(**0.88**)	0.59	0.68	0.54-0.82,(**0.70**)	0.51-0.80,(**0.68**)
Coteaux aval	0.63-0.84,(**0.71**)	0.85-0.90,(**0.87**)	0.58	0.67	0.56-0.77,(**0.63**)	0.52-0.77,(**0.61**)
Clichy aval	0.55-0.77,(**0.66**)	0.84-0.87,(**0.86**)	0.58	0.67	0.44-0.71,(**0.60**)	0.35-0.70,(**0.55**)
x-y = 1er décile-9^{ième} décile pour les différentes pluies ; (z) = en somme des masses sur l'ensemble des pluies Hyp.1 = hypothèse médiane (médiane des concentrations en MES du ruissellement du Marais) Hyp.2 = hypothèse haute (9ème décile des concentrations en MES du ruissellement du Marais)						

Tableau 136: teneurs en matières volatiles des particules transférées dans le réseau par temps de pluie

Les bilans de masse montrent que les particules érodées pendant l'événement pluvieux sont de nature très organique : leurs teneurs moyennes en MVS varient de 0.60 à 0.71 $g.g^{-1}$, celles en DCOp et DBO_5p varient respectivement entre 0.78 à 1.20 g $d'O_2.g^{-1}$ et entre 0.30 à 0.55 g $d'O_2.g^{-1}$. Ces teneurs sont plus faibles pour les particules des bassins versants avals que pour le Marais.

	DCOp/MES ($g.d'O_2.g^{-1}$)					
	Exutoire	***Eaux Usées***	***Ruissellement***		***Echange avec réseau***	
			Hyp.1	***Hyp.2***	***Hyp.1***	***Hyp.2***
Marais	0.87-1.56,(**1.33**)	1.65-1.85,(**1.77**)	0.99	1.00	0.67-1.63,(**1.20**)	0.60-1.69,(**1.23**)
Sébastopol	0.99-1.35,(**1.09**)	1.41-1.58,(**1.49**)	1.00	1.01	0.82-1.27,(**0.91**)	0.80-1.30,(**0.89**)
Quais	0.93-1.27,(**1.04**)	1.45-1.55,(**1.50**)	0.99	1.00	0.67-1.06,(**0.78**)	0.57-1.07,(**0.73**)
Clichy centre	1.08-1.60,(**1.17**)	1.57-1.68,(**1.44**)	0.97	0.98	0.70-1.26,(**0.95**)	0.62-1.32,(**0.95**)
Coteaux aval	1.09-1.53,(**1.22**)	1.49-1.69,(**1.59**)	0.99	1.01	0.82-1.57,(**1.12**)	0.77-1.64,(**1.14**)
Clichy aval	1.23-1.48,(**1.22**)	1.67-1.73,(**1.70**)	0.99	1.00	0.62-1.42,(**0.92**)	0.54-1.95,(**0.89**)
x-y = 1er décile-9ième décile pour les différentes pluies ; (z) = en somme des masses sur l'ensemble des pluies Hyp.1 = hypothèse médiane (médiane des concentrations en MES du ruissellement du Marais) Hyp.2 = hypothèse haute (9ème décile des concentrations en MES du ruissellement du Marais)						

Tableau 137: teneurs en matières organiques des particules transférées dans le réseau par temps de pluie

	DBO_5p/MES ($g.d'O_2.g^{-1}$)					
	Exutoire	***Eaux Usées***	***Ruissellement***		***Echange avec réseau***	
			Hyp.1	***Hyp.2***	***Hyp.1***	***Hyp.2***
Marais	0.45-0.72,(**0.52**)	0.56-0.70,(**0.61**)	0.17	0.17	0.46-0.81,(**0.55**)	0.56-1.14,(**0.61**)
Sébastopol	0.36-0.68,(**0.44**)	0.62-0.76,(**0.68**)	0.17	0.17	0.26-0.76,(**0.38**)	0.27-0.85,(**0.47**)
Quais	0.37-0.63,(**0.44**)	0.59-0.64,(**0.62**)	0.18	0.17	0.30-1.01,(**0.40**)	0.40-1.32,(**0.46**)
Clichy centre	0.37-0.65,(**0.48**)	0.62-0.72,(**0.67**)	0.18	0.17	0.20-1.12,(**0.38**)	0.20-0.53,(**0.41**)
Coteaux aval	0.30-0.49,(**0.38**)	0.53-0.91,(**0.68**)	0.18	0.17	0. 51-0.45,(**0.30**)	0.14-0.51,(**0.35**)
Clichy aval	0.34-0.87,(**0.47**)	0.58-0.76,(**0.66**)	0.18	0.17	0.16-0.80,(**0.32**)	0.16-0.84,(**0.52**)
x-y = 1er décile-9ième décile pour les différentes pluies ; (z) = en somme des masses sur l'ensemble des pluies Hyp.1 = hypothèse médiane (médiane des concentrations en MES du ruissellement du Marais) Hyp.2 = hypothèse haute (9ème décile des concentrations en MES du ruissellement du Marais)						

Tableau 138: teneurs en matières organiques des particules transférées dans le réseau par temps de pluie

4.6.2 Teneurs en cuivre des particules des eaux usées, des eaux de ruissellement et du stock de dépôt dans le réseau

Les teneurs en cuivre des particules des trois sources de pollution sont synthétisées dans le Tableau 139.

Les teneurs en cuivre des particules issues de l'échange avec le réseau par temps de pluie sont supérieures à celles des eaux usées mais restent largement inférieures aux teneurs des eaux de ruissellement.

A l'exception de Sébastopol qui représente des teneurs en cuivre supérieures à celles des autres sites de mesure, les teneurs en cuivre des particules issues de l'échange avec le réseau sont généralement comparables entre les différents sites de mesure. Elles varient selon l'hypothèse médiane entre 433 et 585 mg/Kg.

mg/Kg MS	**Cup/MES (mg.Kg^{-1})**					
	Exutoire	***Eaux Usées***	***Ruissellement***		***Echange avec réseau****	
			Hyp.1	***Hyp.2***	***Hyp.1***	***Hyp.2***
Marais	386-683, (**316**)	292-358, (**328**)	757	709	273-764, (**458**)	210-607, (**229**)
Sébastopol	500-710, (**627**)	327-357, (**341**)	749	678	704-906, (**755**)	511-793 (**643**)
Quais	286-582, (**445**)	259-312, (**290**)	549	494	302-734, (**468**)	249-701, (**291**)
Clichy centre	331-592, (**448**)	327-347, (**337**)	640	585	244-759, (**433**)	246-772, (**182**)
Coteaux aval	432-650, (**534**)	287-335, (**309**)	629	576	408-711, (**485**)	264-588, (**302**)
Clichy aval	332-661, (**557**)	279-387, (**326**)	606	551	412-847, (**585**)	179-784, (**378**)

x-y = 1er décile-9^{ième} décile pour les différentes pluies ; (z) = en somme des masses sur l'ensemble des pluies
Hyp.1 = hypothèse médiane (médiane des concentrations de ruissellement du Marais)
Hyp.2 = hypothèse haute (9ème décile des concentrations de ruissellement du Marais)
*calculé à partir de la contribution du réseau en Cut. Nous faisons l'hypothèse que celui-ci est à 100% particulaire

Tableau 139: teneurs en cuivre des particules transférées dans le réseau par temps de pluie

4.6.3 Teneurs en COP et NTKp des particules des eaux usées, des eaux de ruissellement et du stock de dépôt dans le réseau

Les ordres de grandeurs des rapports COP/MES et NTKp/MES estimés selon les deux méthodes de calcul, pour l'ensemble des événements pluvieux étudiés et pour chacun de six sites de mesure sont regroupés dans le Tableau 140 et le Tableau 141.

Dans la méthode 1, on néglige la masse de COP et d'azote particulaire des eaux de ruissellement. Alors que dans la méthode 2, nous avons évalué les concentrations du COP et NTKp dans les eaux de ruissellement du Marais, que nous avons extrapolé par la suite sur tous les bassins de l'OPUR.

Les teneurs en COP des particules érodées sur l'ensemble des bassins versants sont généralement comparables quelque soit la méthode de calcul. Elles varient en médiane entre 0.399 Kg de C. Kg^{-1} au Marais à 0.309Kg de C. Kg^{-1} à Clichy aval, selon la méthode 1. Ces teneurs sont plus stables d'une pluie à une autre sur les bassins versants amont que sur ceux se trouvant en aval.

Les particules érodées sur les différents bassins étudiés possèdent des teneurs en COP du même ordre de grandeurs que celles mesurées dans la couche organique prélevée sur le bassin versant du Marais en 2004. Ceci signifie que le dépôt érodé sur les bassins versants de l'OPUR est de nature organique, indiquant ainsi la présence d'un dépôt organique. Cependant, ce dépôt n'est peut être pas présent sous la forme d'une couche organique comme celle trouvée sur le Marais, mais il peut exister sous une autre forme (petits tas,…).

En ce qui concerne les teneurs en NTKp, celles-ci différents selon la méthode de calcul.

Les teneurs en NTKp sont comparables entre les différents sites de mesure selon la méthode 1. Cependant, elles sont assez variables d'un site de mesure à un autre suivant la méthode 2.

Les teneurs en NTKp estimées par la méthode 1 sont toutes nettement supérieures à celles mesurées dans la couche organique, notamment au Marais. Par ailleurs, celles évaluées par la méthode 2 sur les sites Quais et Coteaux aval sont du même ordre de grandeur que les teneurs trouvées sur la couche organique.

Les résultats de la méthode 2 peuvent être expliqués par le fait que la concentration médiane du NTKp des eaux de ruissellement du Marais (3 mg/l) n'est pas cohérente avec la valeur trouvée dans la littérature. En effet, on cite dans la bibliographie une concentrations de 3mg/l

pour les concentrations de NTK total. Ce qui nous conduit à considérer que la concentration en NTKp obtenus sur le Marais n'est pas bonne.

COP / MES (Kg de C. Kg^{-1})	Méthode 1		Méthode 2	
	Hyp.1	*Hyp.2*	*Hyp.1*	*Hyp.2*
Marais	0.297-0.490, (**0.399**)	0.352-0.533, (**0.442**)	-	-
Sébastopol	0.299-0.368, (**0.337**)	0.332-0.430, (**0.410**)	0.294-0.361, (**0.328**)	0.287-0.360, (**0.320**)
Quais	0.281-0.421, (**0.296**)	0.323-0.493, (**0.385**)	0.244-0.364, (**0.346**)	0.143-0.438, (**0.339**)
Clichy centre	0.221-0.478, (**0.345**)	0.241-0.672, (**0.399**)	0.229-0.469, (**0.370**)	0.202-0.492, (**0.379**)
Coteaux aval	0.279-0.500, (**0.357**)	0.330-0.570, (**0.414**)	0.271-0.494, (**0.351**)	0.252-0.513, (**0.352**)
Clichy aval	0.144-0.432, (**0.309**)	0.190-0.519, (**0.362**)	0.131-0.388, (**0.266**)	0.061-0.391, (**0.251**)
Couche organique sur le Marais, (2004)	0.320-0.422, (**0.384**)			

x-y, (z) = 1er décile-9^{ième} décile, médiane pour les différentes pluies ;
Hyp.1 = hypothèse médiane (médiane des concentrations de ruissellement du Marais)
Hyp.2 = hypothèse haute (9ème décile des concentrations de ruissellement du Marais)

Tableau 140: teneurs en COP dans le dépôt érodé sur les bassins versants de l'OPUR

NTKp / MES (Kg de N. Kg^{-1})	Méthode 1		Méthode 2	
	Hyp.1	*Hyp.2*	*Hyp.1*	*Hyp.2*
Marais	0.029-0.041, (**0.032**)	0.034-0.046, (**0.036**)	-	-
Sébastopol	0.028-0.049, (**0.045**)	0.033-0.056, (**0,048**)	0.017-0.041, (**0.039**)	0.015-0.043, (**0.041**)
Quais	0.031-0.067, (**0.042**)	0.035-0.083, (**0.051**)	0.013-0.058, (**0.026**)	0.007-0.074, (**0.027**)
Clichy centre	0.023-0.089, (**0.047**)	0.025-0.119, (**0.056**)	0.014-0.088, (**0.037**)	0.013-0.106, (**0.040**)
Coteaux aval	0.028-0.052, (**0.034**)	0.032-0.058, (**0.043**)	0.016-0.045, (**0.024**)	0.015-0.048, (**0.024**)
Clichy aval	0.013-0.057, (**0.029**)	0.015-0.070, (**0.033**)	0.012-0.051, (**0.018**)	0.011-0.057, (**0.018**)
Couche organique sur le Marais, (2004)	0.013-0.025, (**0.022**)			

x-y, (z) = 1er décile-9^{ième} décile, médiane pour les différentes pluies ;
Hyp.1 = hypothèse médiane (médiane des concentrations de ruissellement du Marais)
Hyp.2 = hypothèse haute (9ème décile des concentrations de ruissellement du Marais)

Tableau 141: teneurs en NTKp dans le dépôt érodé sur les bassins versants de l'OPUR

4.6.4 Comparaison des caractéristiques de particules issues de l'échange avec le réseau des bassins versants OPUR avec différents types de dépôts

La comparaison des teneurs des particules issue de l'échange avec le réseau sur les bassins versants de la zone OPUR avec celles de la couche organique prélevée sur le bassin versant du Marais entre 1998 et en 2003 (Ahyerre 1999, Oms 2003 et cette étude) (Tableau 142) montre que les teneurs en MVS et en matières organiques sont du même ordre de grandeurs que celles de la couche organique. Par ailleurs, ces teneurs restent très nettement supérieures aux teneurs du dépôt grossier, ce qui correspondrait à l'érosion d'un dépôt du type « couche organique » ou d'un mélange de dépôt grossier et de dépôt organique. Toutefois, ces teneurs sont inférieures aux teneurs des particules des eaux usées de temps sec.

Les teneurs en matières volatiles en suspension et en DCOp issues de l'échange avec le réseau sur nos bassins versants sont généralement du même ordre de grandeur que celles mesurées en 2004 dans la couche organique.

Ces résultats montrent quelque soit le site de mesure que la nature du dépôt issue de l'échange avec le réseau est d'origine organique, indiquant ainsi la présence de dépôt organique dans la zone OPUR.

		%MVS/MES	DCO ($g\ O_2$/gMS)	DBO ($g\ O_2$/gMS)
Couche organique	Cette étude	56-72, [67]	0.65-1.26, [1.02]	-
	ST Gilles, (Oms, 2003)	63-80, [76]	0.8-1.8, [1.5]	0.25-0.55,[0.4]
	Vielle du Temple (Ahyerre, 1999)	60-75, [69]	0.9-1.43, [1.19]	0.19-0.36,[0.3]
Dépôt grossier	Marais (Ahyerre, 1999)	3-13	0.06-0.22	0.01-0.06
Echange avec le réseau	Cette étude	(63)-(71)	(0.91)-(1.20)	(0.30)-(0.55)
Eaux usées		(85)-(89)	(1.54)-(1.71)	(0.57)-(0.76)
x-y,[z] = 1er décile-9^{ième} décile, [médiane], (x)-(y) :min-max				

Tableau 142 : teneurs en matières organiques dans la couche organique et le dépôt grossier

La comparaison des teneurs en cuivre issues de l'échange avec le réseau sur les bassins versants de l'OPUR et celles mesurées dans la couche organique (cette étude, 2004) montre qu'elles sont du même ordre de grandeur (Tableau 143), sauf au Sébastopol, qui se distingue des autres sites de mesure par des plus fortes valeurs. Les teneurs mesurés sur ce dernier site

sont du même ordre de grandeur que celles mesurées dans le dépôt grossier (cette étude, 2004). Rappelons par ailleurs que le Sébastopol se distingue de l'ensemble des sites de l'OPUR par les plus fortes concentrations en cuivre totales, dans les eaux usées de temps sec. Les stocks organiques sur le bassin versant sont donc susceptibles d'être plus contaminés en cuivre que ceux des autres bassins versants.

Toutefois, on remarque que les teneurs en cuivre des particules remises en suspension sur nos sites de mesure sont nettement supérieures à celles mesurées dans les matières fécales et le papier toilette. Ceci indique que les métaux lourds contenus dans la couche organique ne semblent donc pas provenir directement ni des matières fécales ni du papier toilette. Il pourrait néanmoins s'agir d'un dépôt constitué de matières fécales et de papiers toilette, comme c'est le cas de la couche organique, qui a fixé des métaux provenant des eaux usées ou des eaux d ruissellement durant son stockage dans le réseau.

La comparaison avec les eaux usées de temps sec montre que les teneurs en cuivre des particules issues de l'échange avec le réseau sont largement supérieures à celles mesurées dans les eaux usées.

mg/Kg MS	Couche organique (cette étude)	Dépôt grossier (cette étude)	Matières fécales (Jönsson et al, 2005)	Papiers toilettes (Jönsson et al, 2005)	Eaux usées OPUR (cette étude)	Echange avec le réseau
Cd	1.5-7.8,[3.6]	1.7-11.1,[3.5]	0.19	0	(1.17)-(1.7)	-
Cu	416-1420,|550]	426-1279,[687]	19	0.19	(284)-(476)	(433)-(755)
Pb	427-883,[596]	579-3696,[1271]	0.73	0.04	(107)-(123)	-
Zn	1441-2836,[2106]	1145-4622,[2864]	206	0	(398)-(1006)	-
x-y,[z] = 1er décile-9^{ième} décile, [médiane], (x)-(y) :min-max						

Tableau 143 : teneurs en métaux lourds dans la couche organique, le dépôt grossier et les matières fécales

CONCLUSIONS

Pour une évaluation de la contribution des trois sources « eaux usées, eaux de ruissellement et stocks de sédiments dans le réseau » à la pollution des RUTP, plusieurs analyses ont été réalisées :

- Bilan hydrologique : l'évaluation des bilans hydrologiques a permis de comprendre le fonctionnement hydraulique et hydrologique de la zone OPUR, pendant les évènements pluvieux étudiés. Elle a permis la détermination des volumes d'eaux unitaires, d'eaux usées et d'eaux de ruissellement nécessaires pour l'établissement des bilans de masses Entrées-Sorties, à l'échelle de chaque bassin versant.

- Variation des caractéristiques des eaux usées à l'échelle de la journée : l'analyse des pollutogrammes de temps sec des débits, des flux, des concentrations, et de la nature des polluants a permis d'étudier la variabilité des caractéristiques des eaux usées d'un jour à un autre et d'un site de mesure à un autre. Elle a permis ensuite d'estimer la masse d'eaux usées supposée passer à l'exutoire de chacun de nos bassins versants, au cours de chaque évènement pluvieux.

- Etude des pollutogrammes en conductivité et de turbidité, au cours de l'évènement pluvieux :
    - l'analyse de l'évolution au cours de la pluie du pourcentage V_{EU}/V_{tot} établi à partir de la mesure de conductivité ou à partir des mesures des volumes sur les différents sites de mesure a montré dans la plupart des cas une bonne correspondance entre les deux méthodes, quelle que soit la taille du bassin versant. Ceci indique que les volumes d'eaux usées écoulés aux exutoires au cours des événements pluvieux ne paraissent pas être significativement affectés par l'hydrodynamique de temps de pluie, quelle que soit la taille du bassin versant. Par ailleurs, aucun phénomène marqué de « chasse » du stock d'eaux usées en début d'événement pluvieux n'a été observé. En revanche, la fin de l'événement pluvieux en terme hydraulique (retour au niveau normal des débits de temps sec) ne correspond pas à la fin de l'événement pluvieux en terme de qualité des eaux.

- la distribution des masses polluantes sur les bassins versants OPUR est relativement uniforme sur l'ensemble du volume de l'évènement pluvieux.

L'analyse de la contribution des différentes sources à la pollution de temps de pluie a montré l'importance de la contribution du réseau d'assainissement aux flux des matières en suspension, des matières organiques, du cuivre total, transportés à l'exutoire par temps de pluie. Elle met de plus en évidence, l'existence de réactions physico-chimiques à l'intérieur du réseau affectant la distribution dissous-particulaire des métaux. :

- Matières en suspension, matières oxydables et azotées :

La contribution des eaux usées a tendance à augmenter en fonction de l'échelle spatiale. Elle varie selon le site, et en moyenne sur l'ensemble des événements étudiés, entre 25-48% pour les MES, 32-51% pour la DCOt et entre 29-51% pour le COT. En revanche, les eaux usées constituent une source majeure d'apport en NTKt (52 à 80%).

La contribution des eaux de ruissellement est généralement faible sur l'ensemble des sites de mesure, en comparaison avec les deux autres sources de pollution (eaux usées et dépôts du réseau). Les pourcentages des eaux de ruissellement varient globalement entre 6 et 12% pour les MES et la DCOt et entre 3 et 7% pour le carbone organique total.

La contribution des sédiments érodés dans le réseau tend à diminuer légèrement vers l'aval du collecteur de Clichy, mais reste une source majeure de la pollution de temps de pluie sur tous les bassins versants de l'OPUR. Cette source contribue en moyenne sur l'ensemble des évènements étudiés pour 49-70% des matières en suspension et 38-71% de matières oxydables.

- Métaux lourds :

Trois groupes peuvent être distingués :

Le premier concerne le cuivre total. Ce métal provient essentiellement des sédiments déposés dans le réseau d'assainissement. En moyenne sur l'ensemble des évènements pluvieux étudiés, 43 à 73% du Cut sont apportés par le réseau.

Le second groupe concerne le plomb et le zinc total qui d'après nos bilans de masses proviennent essentiellement des eaux de ruissellement. La contribution des eaux de

ruissellement varie en moyenne entre 103 et 161% pour le Pb et entre 104 et 148% pour le Zn. Pour ces deux métaux, il semble y avoir une perte au cours du transfert en réseau.

Le troisième groupe concerne le cadmium total qui visiblement possède un comportement différent d'une pluie à une autre et d'un site de mesure à un autre. Une grande fraction du cadmium total provient des eaux de ruissellement (52 à 72%, en moyenne selon le site de mesure). Cependant, la fraction issue de l'échange avec le réseau n'est pas négligeable. Elle varie entre 18 et 41%, en moyenne sur l'ensemble des évènements pluvieux étudiés.

Une perte importante des métaux lourds dissous est observée pendant leurs transferts dans le réseau. Cette dernière est imputable à un phénomène d'adsorption sur les MES et sur les stocks du réseau.

Enfin, mis à part le Pbp, les métaux particulaires proviennent essentiellement du réseau d'assainissement. Cet apport en métaux particulaire est imputable à la fois à l'adsorption des métaux dissous sur les MES et à l'érosion d'un stock du réseau.

- Nature du dépôt issue de l'échange avec le réseau :

Les teneurs en matières volatiles, en matières organiques des particules et en cuivre provenant de l'érosion de dépôts du réseau correspondent à celles d'un dépôt organique, et non pas à celle du corps du dépôt minéral. Ces teneurs varient respectivement entre 0.6 et 0.71 g/g pour les MVS, entre 0.3 et 1.2 g d'O_2/g pour les matières organiques, entre 0.296 et 399 Kg de C/Kg et entre 433 et 585 mg/kg.

Le dépôt érodé sur les bassins versants de l'OPUR est de nature organique, comparable à la nature de la couche organique identifiée sur le Marais par Ahyerre (1999) et Oms (2003).

Cependant, l'analyse des pentes et des vitesses d'écoulement par temps sec des collecteurs de la zone OPUR montre que le linéaire de réseau de caractéristiques comparables aux collecteurs du Marais dans lesquels cette couche a été identifiée est très réduit. De plus, pour une partie de ces collecteurs considérés comme « à risque », les visites ont conclu à l'absence de couche organique. Ces visites n'ont cependant pas été exhaustives et nécessitent d'être complétées.

Il est possible que les dépôts contribuant aux flux de temps de pluie des différents bassins versants aient une composition comparable à celle de la couche organique (matières fécales, papiers, résidus alimentaire) mais se présentent sous une forme différente :

- « Petits tas » éparpillées dans les petites lignes ;
- dépôts localisés au niveau de singularité hydrauliques :
    - zones de creux dans le dépôt grossier,
    - amont d'un obstacle,
    - zones d'influences avales,
    - bassins de dessablement.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

1 SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS

Les objectifs des travaux de cette thèse étaient les suivants :

- ✓ Intégration du bassin versant du Marais dans une série de bassins versants de taille croissante et d'occupation de sol comparable ;
- ✓ Caractérisation des effluents de temps sec et de temps de pluie ; et étude de la variabilité spatiale des flux et de la nature des polluants, en fonction de la taille du bassin versant et du temps de transfert en réseau ;
- ✓ Compréhension des mécanismes de transfert dans le réseau et évaluation de la contribution de chacune des sources suivantes : « eaux usées, eaux de ruissellement, stocks de dépôt contenus dans le réseau » à la pollution de temps de pluie.

Pour répondre à ces objectifs, un dispositif expérimental a été mis en place, baptisé « OPUR ». Ce dispositif est constitué d'une série de 6 bassins versants de taille croissante (41ha à 2500ha), allant du bassin versant du Marais jusqu'en amont de l'Usine de Clichy. Ce dispositif a permis la constitution d'une base de données sur les flux polluants en réseau d'assainissement unitaire à différentes échelles spatiales.

12 journées de temps sec et 15 événements pluvieux ont été échantillonnés au cours de cette étude.

1.1 Caractérisation des eaux usées de temps sec, aux exutoires des bassins versants de l'OPUR

L'analyse des eaux usées aux exutoires des six bassins versants de l'OPUR montre une homogénéité spatiale des caractéristiques des eaux usées de temps sec :

- les débits moyens journaliers par équivalent habitant varient relativement peu d'un site de mesure à un autre (398 et 458 l/EHN[12]).

[12] C'est le nombre d'Equivalent Homme de NTKd: 1EHN=12g/hab/j NTKd

- les flux par EHN et les concentrations des MES, des matières organiques sont généralement comparables entre les différents sites de mesure. Les concentrations moyennes journalières varient entre 170 et 218 mg/l pour les MES, entre 156 et 191 mg/l pour la DBO_5t, et entre 29 et 40 mg/l pour le NTKt, suivant le site de mesure. Les flux par EHN oscillent entre 69 et 86 g/EHN pour les MES et entre 146 et 195 g/EHN pour la DCOt.
- les particules des eaux usées de temps sec véhiculent en médiane 69 à 81% des matières oxydables, 16 à 23% des matières azotés, et 62 à 91% de cadmium, cuivre et plomb. Cette répartition dissous-particulaire est stable entre l'amont et l'aval du réseau d'assainissement.
- les particules des effluents de temps sec sont fortement organiques avec des teneurs en MVS variant entre 83 et 90%. Ces particules sont cependant riches en cuivre (de 284 à 476 mg/Kg) et en zinc (de 398 à 1006 mg/Kg). Leur nature est comparable entre les différents sites de mesure.
- les particules des eaux usées décantent avec des vitesses de chute faibles et relativement comparables entre les différents sites de mesure (V50 des MES varie de 0.009 et 0.065 mm/s, selon la journée de mesure).

Des différences entre bassins versants apparaissent cependant en terme de :

- concentrations et flux par EHN des métaux lourds. Cette variabilité est probablement liée aux apports des activités professionnelles sur les différents sites étudiés.
- distribution dissous-particulaire du zinc. Cette dernière varie en moyenne entre 47 et 75%, selon le site de mesure.

1.2 Caractérisation des eaux unitaires de temps de pluie, aux exutoires des bassins versants de l'OPUR

La qualité des effluents unitaires de temps de pluie des bassins versants de la zone OPUR confirme une nouvelle fois l'importance de la pollution des RUTP.

Un comportement relativement comparable en terme de concentrations et de flux en MES, en matières oxydables et azotées et en métaux lourds a été observé entre les six sites de mesure.

Deux groupes de paramètres peuvent être distingués. Le premier groupe concerne les matières en suspension, la matière oxydable, l'azote et le cuivre où les concentrations dans les eaux unitaires sont supérieures ou égales à celles des eaux usées et nettement supérieures à celles des eaux de ruissellement conduisant à une suspicion de la contribution du dépôt pour tous les sites de mesure. Le second groupe comprend le cadmium, le plomb et le zinc, avec des concentrations dans les eaux unitaires de temps de pluie 2 à 9 fois supérieures à celles des eaux usées de temps sec mais néanmoins très inférieures à celles des eaux de ruissellement.

Les particules s'avèrent dans tous les cas le principal vecteur de la pollution organique et métallique (selon le site 79 à 87% des matières organiques et 48 à 98% des métaux, en médiane, sont transportés sous forme particulaire) des effluents unitaires de temps de pluie, aux exutoires des bassins versants unitaires. Ces particules sont généralement de nature organique (0.72 à 0.8 g/g pour les MVS). Par ailleurs, le NTK des effluents de temps de pluie est transporté majoritairement sous forme dissoute (32 à 45% de particulaire, en médiane, selon le site de mesure).

La distribution dissous-particulaire et les teneurs en particules des effluents de temps pluie sont comparables entre les bassins versants étudiés.

Les vitesses de chute des matières en suspension varient en fonction de l'échelle spatiale. Il apparaît que les particules des sites amont (Marais) décantent avec des vitesses plus élevées que celles des sites avals (Clichy centre, Coteaux aval et Clichy aval). Cette différence peut s'expliquer par l'augmentation de la proportion d'eau usée contenue dans les effluents de temps de pluie en allant vers les bassins aval.

Les résultats obtenus en terme de vitesse de chute des polluants montrent que l'efficacité d'un éventuel traitement par décantation des MVS, des matières organiques et du Cuivre semble généralement comparable à celles des MES. En revanche, il faut s'attendre à une efficacité plus faible pour le Pb et surtout pour le Zn et le NTK particulaires.

1.3 Sources de pollution sur les bassins versants de l'OPUR

L'évaluation des pourcentages de contribution des trois sources "eaux usées, eaux de ruissellement et stocks de dépôt dans le réseau" aux flux polluants de temps de pluie, au

moyen de bilans de masses "Entrée-Sortie" a permis de mettre en évidence l'importance de la contribution du réseau d'assainissement aux flux des matières en suspension, des matières organiques, du cuivre total.

La contribution des eaux usées qui varie en médiane suivant le site entre 25-48% pour les MES, 32-51% pour la DCOt et entre 29-51% pour le COT, à tendance à augmenter en fonction de l'échelle spatiale. Celle des eaux de ruissellement est généralement faible sur l'ensemble des sites de mesure (entre 6 et 12% pour les MES et la DCOt et entre 3 et 7% pour le COT).

La contribution des sédiments érodés dans le réseau tend à diminuer légèrement vers l'aval du collecteur de Clichy, mais reste une source majeure de la pollution de temps de pluie sur tous les bassins versants de l'OPUR. Cette source contribue en médiane sur l'ensemble des évènements étudiés pour 49-70% des matières en suspension et 38-71% des matières oxydables (Figure 98).

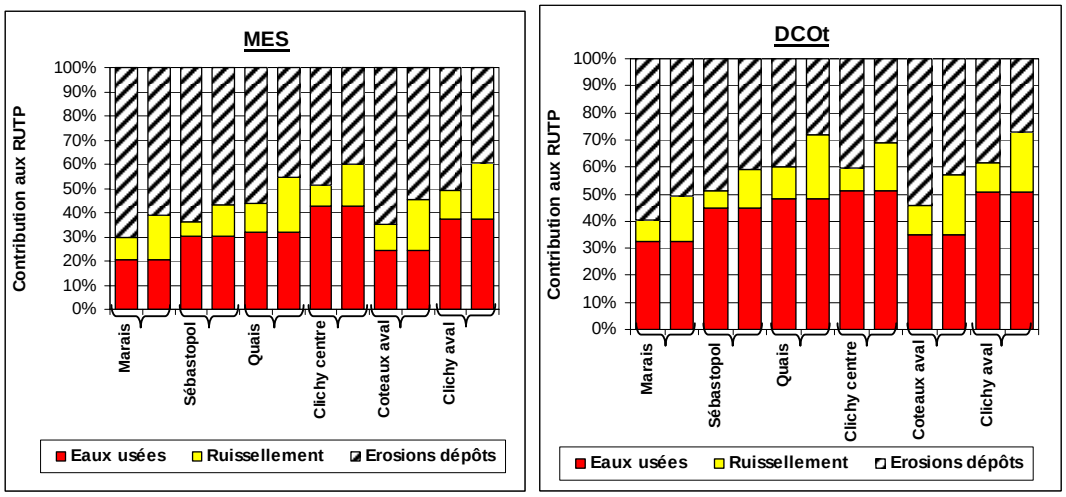


Figure 98: contribution des trois sources en MES et DCOt, en somme des masses sur l'ensemble des évènements pluvieux étudiés.(1ière barre:hypothèse 1, 2ième barre: hypothèse 2)

En ce qui concerne les métaux lourds, trois groupes peuvent être distingués :

Le premier concerne le cuivre total qui possède un comportement similaire à celui des MES et qui provient essentiellement des sédiments déposés dans le réseau d'assainissement (Figure 99).

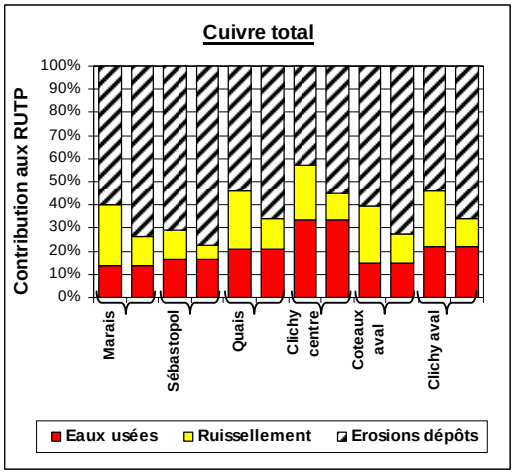


Figure 99: contribution des trois sources en Cuivre total, en somme des masses sur l'ensemble des évènements pluvieux étudiés. (1ière barre : hypothèse 1, 2ième barre hypothèse 2)

Le second groupe concerne le plomb et le zinc total qui d'après nos bilans de masses proviennent en grande partie des eaux de ruissellement. La contribution des eaux de ruissellement varie en moyenne entre 103 et 161% pour le Pb et entre 104 et 148% pour le Zn. Pour ces deux métaux, il semble y avoir une perte au cours du transfert en réseau.

Le troisième groupe concerne le cadmium total qui visiblement possède un comportement différent d'une pluie à une autre et d'un site de mesure à un autre. Une grande fraction du cadmium total provient des eaux de ruissellement (52 à 72%, en moyenne selon le site de mesure). Cependant, la fraction issue de l'échange avec le réseau n'est pas négligeable (entre 18 et 41%).

Une perte massive des métaux lourds dissous est observée pendant leurs transferts dans le réseau. Cette dernière est vraisemblablement imputable à un phénomène d'adsorption des métaux dissous sur les MES et sur les dépôts.

Enfin, mis à part le Pbp, les métaux particulaires semblent provenir de l'érosion du dépôt du réseau d'assainissement et de l'adsorption des métaux dissous sur les matières en suspension.

Le dépôt érodé sur les bassins versants de l'OPUR est de nature organique, comparable à la nature de la couche organique identifiée sur le Marais par Ahyerre (1999) et Oms (2003).

Cependant, les premières investigations (analyse des pentes et des vitesses d'écoulement par temps sec des collecteurs de la zone OPUR) montre que le linéaire de réseau de caractéristiques comparables aux collecteurs du Marais dans lesquels cette couche a été

identifiée est très réduit. De plus, pour une partie de ces collecteurs considérés comme « à risque », les visites ont conclu à l'absence de couche organique. Ces visites n'ont cependant pas été exhaustives et nécessitent d'être complétées.

Il est possible que les dépôts contribuant aux flux de temps de pluie des différents bassins versants aient une composition comparable à celle de la couche organique (matières fécales, papiers, résidus alimentaire) mais se présentent sous une forme différente :

- « Petits tas » éparpillées dans les petites lignes ;
- dépôts localisés au niveau de singularité hydrauliques :
    - zones de creux dans le dépôt grossier,
    - amont d'un obstacle,
    - zones d'influences avales,
    - bassins de dessablement.

2 RETOMBEES OPERATIONNELLES

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse fournissent un certain nombre d'enseignements permettant d'améliorer les pratiques actuelles de diagnostique et de gestion de la pollution des eaux urbaines dans les réseaux d'assainissement unitaires.

Dans cette recherche nous avons proposé et appliqué une méthode d'évaluation du nombre d'équivalent habitants d'un bassin versant, basée sur le flux de NTK dissous. Cette approche est basée sur une production journalière d'azote dissous de 12 g de NTKd par équivalent habitant (EHN), ce qui correspond à la production physiologique journalière d'un être humain moyen d'après Vinneras (2001). Les données mesurées sur les sites de l'OPUR fournissent un ordre de grandeur des masses journalières de MES, DCO, DBO5, COT par EHN. Par ailleurs, la normalisation par l'azote kjeldahl dissous des flux métalliques de temps sec permet de mettre en évidence l'importance relative des apports industriels de métaux lourds.

Nos résultats ont également mis en évidence l'intérêt de la mesure en continu de la conductivité pour analyser la dynamique de transfert des différents types de masses d'eau (eaux usées domestiques et industrielles, eaux pluviales) à l'exutoire d'un réseau d'assainissement unitaire par temps de pluie. Sur les sites OPUR, les mesures de conductivité ont montré l'absence de phénomène de piston en début d'événement pluvieux mais une persistance d'une proportion importante d'eaux pluviales après le retour aux conditions hydrauliques de temps sec.

La mise en œuvre de campagnes d'échantillonnage des effluents unitaires de temps de pluie est une opération lourde, très coûteuse et avec beaucoup d'aléas. Il paraît de ce fait difficilement envisageable de disposer d'une base de données statistiquement satisfaisante sur les flux polluants de tous les points de déversement d'une grande agglomération comme Paris. Cependant, nos résultats ont montré une relative homogénéité des caractéristiques des eaux usées de temps sec et des eaux unitaires de temps de pluie sur les différents sites étudiés. En revanche, ces caractéristiques sont très variables d'un évènement pluvieux à un autre. Selon les travaux de Mourad (2005), le nombre de pluies nécessaires pour une évaluation d'une concentration moyenne avec une incertitude acceptable est de l'ordre de 10 à 15 événements pluvieux. Compte tenu de ces résultats, il paraît plus judicieux de concentrer les campagnes d'échantillonnage sur un point de mesure situé de préférence à l'aval plutôt que de disperser les moyens sur plusieurs points. En parallèle avec cette campagne d'échantillonnage, la mise

en place de capteurs optiques permet un suivi en continu sur de longues durées pour affiner les calculs des flux polluants sur de longues durées.

Les stratégies à adopter pour la réduction des flux polluants de temps de pluie dépendent du type de polluant considéré. Pour cadmium, plomb et zinc, compte tenu de la contribution importante des eaux de ruissellement, il convient de s'orienter vers une réduction de l'usage de ces métaux sur les surfaces urbaines (notamment dans le cas de toitures) ou vers des actions curatives visant à piéger les métaux dissous avant leur entrée dans le réseau d'assainissement. En ce qui concerne les flux des matières en suspension, des matières organiques et du cuivre, la source principale est l'érosion de stocks constitués par temps sec dans le réseau. De ce fait, les actions permettant d'améliorer les conditions de transport solide par temps sec (reprofilage de collecteurs, cunettes glissantes, vannes de chasse…) sont à privilégier. La réfection du collecteur Vieille du Temple (reprofilage de la cunette et mise en place d'une coque glissante) dans le Marais fournit l'opportunité d'évaluer l'efficacité de ce type de techniques vis-à-vis de la formation de la couche organique.

Concernant la décantabilité des effluents, les protocoles VICAS et VICPOL utilisés dans ce travail constituent deux outils fiables d'évaluation de la vitesse de chute des polluants. D'après les vitesses de chute mesurées sur la zone OPUR, l'efficacité de la décantation varie d'une pluie à une autre, d'un polluant à un autre et d'un site à un autre. Les vitesses de chute prises en compte pour dimensionner un ouvrage de décantation devront de ce fait être basées sur des mesures effectuées sur le site étudié pour un nombre relativement élevé d'événements pluvieux et pour les différents polluants traités.

3 PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Cette thèse s'inscrit dans la continuité de plusieurs programmes pluriannuels menés au CEREVE depuis 1994 sur le thème de la génération et du transport des polluants urbains par temps de pluie. Ces recherches ont permis d'améliorer de manière significative l'état des connaissances concernant les flux, la nature et l'origine des polluants véhiculés par temps de pluie dans les réseaux d'assainissement unitaires des centres urbains denses. Cependant, ils soulèvent également certaines interrogations.

- *Eaux de ruissellement*

Concernant les eaux de ruissellement, nous nous sommes basés sur les données mesurées en 1997-1998 sur le bassin versant du Marais. Bien que très riche, cette base de données ne couvre pas tous les types d'occupation du sol, et l'on peut s'interroger sur la transposabilité de ces données à tout Paris. De plus, nos résultats montrent que les eaux de ruissellement constituent la source principale de métaux par temps de pluie. D'après les résultats du Marais (Gromaire et al, 2001) ces métaux proviennent essentiellement de la corrosion des matériaux de couverture des toitures, or les connaissances actuelles concernant les éléments métalliques des toits et leurs processus de corrosion restent très partiels.

Afin d'améliorer les connaissances concernant les flux polluants générés par les eaux de ruissellement, nous proposons d'avancer suivant deux axes de recherche :

- ruissellement de chaussées : la base de données du Marais concerne jusqu'à présent des petites rues en centre ville, elle nécessiterait d'être complétée par des campagnes sur les grands axes de circulation parisiens (avenues, boulevards, voies sur berge, périphérique).
- ruissellement de toitures : il est important de dresser un état des lieux du risque de contamination métallique des eaux de ruissellement de toiture. Ce travail pourrait être réalisé en trois phases : classification des différentes techniques de couverture de façon à identifier et quantifier les éléments métalliques entrant en contact avec les eaux de pluie, évaluation des taux de relargage annuels des métaux dans les eaux de ruissellement en se basant sur des données de la littérature couplées à des mesures en banc d'essai, développement d'un modèle de relargage annuel de métaux par type de toit.

- *Processus de transport en réseau unitaire*

Les résultats en terme de contribution des processus en réseau aux flux de temps de pluie sur les différents bassins versants de la zone OPUR correspondent à ceux obtenus précédemment sur le bassin du Marais. Concernant les MES et la matière organique, le processus d'érosion des stocks du réseau est prépondérant. Les premiers résultats obtenus semblent montrer qu'il s'agit de stocks organiques de composition comparable à la couche organique. Cependant, les connaissances actuelles ne permettent pas d'identifier et de localiser ces stocks. En effet, les caractéristiques des collecteurs de la zone OPUR (pente et vitesse moyenne d'écoulement de temps sec) ne sont généralement pas compatibles avec les critères de formation de la couche organique avancés par Oms (2003). Concernant les métaux, les processus dominants semblent être différents, et font appel à des processus d'adsorption-désorption des métaux sur les MES ou les dépôts pour lesquels les connaissances actuelles sont très limitées.

Dans le cadre de cette thèse, l'identification des zones à risque de couche organique a porté uniquement sur les collecteurs, et seule une partie de ceux-ci a été visitée. Il convient dans un premier temps de finir les visites des collecteurs à risque, puis dans un second temps d'orienter les investigations vers les antennes amont (ouvrages sans banquettes). Parallèlement, la contribution respective des eaux usées, du ruissellement et des échanges avec le réseau pourra être précisée en utilisant une approche basée sur l'utilisation de biomarqueurs (stérols par exemples) permettant la distinction entre la matière organique du ruissellement, des eaux usées et des différents types de dépôts.

- *Flux polluants aux exutoires des bassins versants*

Pour une occupation du sol de type centre ville, la variabilité des flux polluants d'un événement pluvieux à un autre est nettement supérieure à la variabilité inter sites. L'étude de la dynamique intra-événementielle et inter-événementielle au moyen de campagnes classiques d'échantillonnage par préleveurs automatiques paraît irréaliste. Pour atteindre ce type d'objectif nous suggérons de développer l'utilisation des mesures en continu. C'est dans cette optique que deux sites OPUR (Quais et Clichy centre) ont récemment été équipés avec des appareils de mesure de conductivité et de turbidité.

Depuis 1994, les recherches menées dans le cadre d'OPUR (Observatoire des Polluants Urbains en Ile de France) se sont focalisées sur les zones urbaines denses. Les modes d'occupation des sols, mais aussi les modes de gestion des eaux pluviales (réseaux séparatifs,

techniques alternatives, pratiques locales de nettoyage…) dans les zones urbaines moins denses et les zones périurbaines sont susceptibles de différer fortement de Paris centre. L'état des connaissances concernant la production et le transfert des flux polluants sur ce type d'urbanisation est insuffisant et justifierait l'extension de la zone d'investigation d'OPUR à la banlieue parisienne.

D'autre part, la directive cadre européenne DCE 60\2000 met l'accent sur une liste de polluants prioritaires à réduire ou à éliminer d'ici 2015 dans les milieux aquatiques. Parmi ces polluants, les travaux d'OPUR ont couvert certains micropolluants minéraux (Cd, Pb) et organiques (HAP). Il paraît important à l'heure actuelle d'étendre les champs d'étude à d'autres polluants prioritaire et/ou émergents (perturbateurs endocriniens, cosmétiques, médicaments…).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A…

- AHYERRE M. (1999). Bilans et mécanismes de migration de la pollution organique en réseau d'assainissement unitaire. Thèse de doctorat, Spécialité : hydrologie, hydrogéologie, géostatistique et géochimie, Université Paris VI, France. 250p.
- ALMEIDA M.C., BUTLER D. et FRIEDLER E. (1999). At-source domestic wastewater quality. London. Urban Water, Vol 1, 1, p45-55.
- ANONYMOUS (1994). Per capita con consumption of paper. European Tissue Symposium Henkilö 1993. Henkilö.
- ARTIERES O. (1987). Les dépôts en réseau d'assainissement unitaire. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg, ENITRTS, 214p.
- ARTHUR (1996). Near bed solids transport in combined sewers. Ph-D, University of Abertay Dundee, Grande-Bretagne, 204p.
- ASHLEY R.M., CRABTREE R.W. (1992). Sediment origins, deposition and build-up in combined sewer systems. Water Science and Technology, vol 25, n°8, p1-12.
- ASHLEY R.M et VERBANCK M (1996). Mechanis of sewers sediment erosion and transport. Journal of Hydraulic Research, vol 34 (6), p753-769.
- AZIMI S (2004). Sources, flux et bilan des retombées atmosphériques de métaux en Ile de France. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 338p.
- AZIMI S, ROCHER V, GARNAUD S, VARRAULT G, THEVENOT DR (2004). Decrease of atmospheric deposition of heavy metals in an urban area from 1994 to 2002 (Paris, France). Chemosphere, article soumis.

B…

- BACHOC A. (1992). Le transfert des solides dans les réseaux d'assainissement unitaires. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse. 281p. + annexes
- BECKER F (1997). Chemical constituents associated with sewage settling velocity profiles, Thèse de doctorat, Université d'Aston, 200p. + annexes.
- BENOIST A., LIJKLEMA L (1990). Distribution of sedimentation rates of

sedimentation rates of suspended solids and heavy metals in combined sewer overflows. Water Science and Technology, vol 22, n°10/11, p61-68.

- BALL JE., WOJCIK A., and Tilley J. (2000). Stormwater Quality from Road Surfaces - Monitoring of the Hume Highway at South Strathfield, Research Report 204, Water Research Laboratory, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales.
- BERTRAND-KRAJESWSKI JL., LAPLACE D., JOANNIS C. et CHEBBO G. (2000). Mesures en Hydrologie urbaine et assainissement, 793 p.
- BERTRAND-KRAJEWSKI J.L., CHEBBO G., SAGET A. (1998). Distribution of pollutant mass versus volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. Water Research, vol.32, n°8, p2341-2356.
- BERGER EY. (1960). Intestinal adsorption and excretion. In : Comar, Bronner F (eds) Minaral matabolism. Academic press ; New York, p249-286.
- BESSE P., POUESSEL M., SOUBESTRE P., LE PLUART A., BECHAC JP. (1989). L'assainissement collectif en Ille-et-Vilaine, Détermination statistique de l'équivalent habitant en milieu rural. Techniques Science et Méthode, septembre 1989.
- BETHOUART F. (2004). Autosurveillance du réseau d'assainissement parisien : bilan de sept années d'expérience dans le domaine de la gestion des flux sur un réseau de collecte unitaire. Publication SHF, colloque d'hydrotechnique 179^{ième} session du comité Scientifique et Technique. Marne-La-Vallée, 28 et 29 juin 2005. p33-42.
- BHOURI R. (2003). Distribution des polluants contenus dans les eaux pluviales urbaines par classes de vitesse de chute des particules. Rapport de DEA Science et Techniques de l'Environnement. 72p.
- BUTLER D., THEDCHANAMOORTHY S., PAYNE J.A. (1992). Aspects of surface sediment characteristics on an urban catchment in London. Water Science and Technology, vol. 25, n°8, p13-19.
- BUTLER D, FRIEDLER E, GATT A (1995). Characterising the quantity and quality of domestic wastewater inflows. Water Science and Technology, vol. 31, n°7, p13-24.
- BLANIC R., BENNENTON JP. (1989). Caractérisation des effluents de d'assainissement individuel et essai de matériels d'assainissement autonome.

Techniques Science et Méthode, novembre 1989.

- BUREAU VERTITAS ET SIVOM de Metz (1994). Etude de quantification de pollution. Rapport de synthèse.
- BROMBACH H, WEIß, G., STEINRIEDE D. UND ESSLER H (2001). Identifikation und Aktivierung von Leistungsreserven im System Abwasserkanal, Regenwasserbehandlung und Kläranlage, Schlußbericht, Bad Mergentheim, unveröffentlicht.
- BROMBACH H (1981). Probenhame in Abwasserkanal. Rapport techniques UFT.

C…

- CHANCELIER J.Ph., CHEBBO G., LUCAS AIGUIER E. (1998). Estimation of settling velocities. Water Research, vol. 32, n°11, p3461-3471.
- CHEBBO G., MOUCHEL J.M., SAGET A, GOUSAILLES M. (1995). La pollution des rejets urbains par temps de pluie : flux, nature et impacts. Techniques Sciences et Méthodes n°11, novembre, 1995, p796 à 806.
- CHEBBO G. (1992). Solides des rejets pluviaux urbains, caractérisation et traitabilité. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.: 413p. + annexes.
- CHEBBO G., GROMAIRE M.C., LUCAS E. (2003). Protocole VICAS- mesure de la vitesse de chute des MES dans les effluents urbains. Techniques Sciences et Méthodes, n° 12, p.39-49.
- CHEBBO G, GROMAIRE M.C., AHYERRE M. & GARNAUD S (2001). Production and transport of urban wet weather pollution in combined sewer systems : The "Marais" experimental urban catchment in Paris. Urban Water3, 3-15.
- CHOCAT B., EURYDICE 92. (1997). Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Edition Tec&Doc, Lavoisier, Paris. 1124p.
- CRABTREE R.W. (1989). "Sediments in sewers".Journal of Inst. Water Env. Management, n°3, 1989; pp.569-578.
- COMBER SDW. and GUNN AM. (1996). Heavy metals entering sewage treatment works from domestic sources J.CIWEM 10 137-142 section Eight - References

D…

- DAUBER L., NOVAK B. (1983). *Quellen und Mengen der Schmutzstoffe in Regenabflüssen einer städtischen Mischkanalisation*. Rapport de l'EAWAG n°927, Dübendorf-Zürich, Suisse, 77p.
- DENEUVY, J.Ph. (1995). La prise en compte des rejets urbains par temps de pluie dans la réglementation française. Techniques Sciences et Méthodes, 11, pp 840-845.
- DE HEER LJL. (1992). Etude de l'échantillonnage systématique et proportionnel au débit par temps sec des eaux usées dans des égouts non visitables. Thèse de doctorat. EPFL, Lausanne.
- DIAZ-FIERROS F.-T., PUERTA J. ; SUAREZ J. et DIAZ-FIERROS F.-V. (mars 2002). Contaminant loads of CSOs at the wastewater treatment plant of a city in NW Spain. Urban Water, vol. 4, p291-299.
- DAVIS AP. et BURNS M. (1999). Evaluation of lead concentration in runoff from painted structures. Water. Research. Vol. 33, No. 13, p2949-2958
- DIERKES C. und GEIGER W.F.(2000). Schadstoffrückhalt in Straßenrandböden von Autobahnen und Bundesstraßen. Wasserwirtschaft, 90. Jahrgang, Heft 6, S. 276-281, 2000.

E…

- EBAV (1996). "Scarichi da attività artigianali-impatto sugli impianti municipali di trattamento deiliquami".
- ELLIS J.B. (1986). Pollutional aspects of urban runoff. Publié dans : Urban Runoff Pollution, Ed. Torno H.C., Marsalek J. et Desbordes M., NATO ASI Series, vol. G10, Springler Verlag Berlin Heidelberg, p1–38.
- ELLIS J.B, H. D. O. (1984). "Variation in solid loadings to roadside gully pots." The Science of the Total Environment 33, p 203-211.

F…

- FLEMMING H.C. (1995). "Sorption sites in biofilms". Water Science and Technology, vol 32, n°8, 1995, p.27-33.
- FREITAG, G. et al. (1987): "Beschaffenheit und Abfluss von Sickerwässern aus einem

städtischen Siedlungsgebiet, Schlussbericht über das Teilprojekt A6 des SFB 81, Technische Universität München

- FIEVET F. et LESSAVRE J (1998). Synthèse relative à la pollution rejetée par habitant en France et en europe. Rapport agence de l'eau Seine-Normandie et DREAM-TECHNOLOGIE, 33p.
- FLORES-RODRIGUEZ J. (1992). Les métaux toxiques dans les eaux pluviales en milieu urbain : caractéristiques physico-chimiques. Thèse de doctorat, Université Paris XII-Val de Marne, 229p + annexes.
- FÖRSTER, J. (1999). Variability of roof runoff quality. Water Science and Technology. vol. 39, n°5, p. 137-144.
- FÖRSTER J., HERRMANN R. (1996): Eintrag und Transport von organischen Umweltchemikalien über verschiedene Dächer in das Kanalsystem. Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Stoffaustrag aus Kanalisationen, Hydrologie bebauter Gebiete. Seite 24-42, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1996.
- FRAUSTO DA SILVA JJR & WILLIAMS RJP (1997). The biological chemistry of the elements. The inorganic Chemistry of Life, Oxforde.

G…

- GARNAUD S (1999). Transfert et évolution géochimique de la pollution métallique en bassin versant urbain. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 396p + annexes.
- GARNAUD S, MOUCHEL JM, CHEBBO S, THEVENOT DR (2001). Caractérisation des retombées atmosphériques de métaux traces en milieu urbain. Techniques, Sciences et Méthode. p30-40.
- GEIGER W. F. (1984). Characteristics of combined sewer runoff. Proceeding de la 3ème conférence internationale « Urban Storm Drainage », Göteborg, 4 – 8 juin, Suède, vol. 3, p851–860.
- GUTEKUNST B. (1988). Sielhautuntersuchungen zur Einkreisungen schwermetallhaltiger Einleitungen. Presses de l'Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Université de Karlsruhe, volume 49, ISSN 0722-7698, 141 p.

- GIESKA M., TANNEBERG, H. und VAN DER PLOEG, R.R.: (2000). Lokal erhöhte Schwermetallkonzentrationen in urbanen Böden durch Versickerung von Dachabflüssen. Wasser und Boden, 52. Jahrgang, Heft 3, Seite 41-45, 2000.
- GOLOMB D. RYAN D. EBY N. UNDERHILL J. ZEMBA S. (1997a). Atmospheric deposition of toxics onto Massachusetts bay-I.Metals. Atmospheric Environment 31, p1349-1359.
- GOUNOU C (2004). Caractérisation des sources d'éléments traces métalliques dans le réseau d'assainissement de Paris. Rapport DEA Sciences et Techniques de l'Environnement CREVE-ENPC, 95p.
- GÖTTLE A. (1978): "Ursachen und Mechanismen der Regenwasserverschmutzung. Ein Beitrag zur Modellierung der Abflussbeschaffenheit", in: Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Institut für Bauingenieurwesen V, Technische Universität München, Heft 23, Eigenverlag München.
- GRANGE D. PESCHEUX F. (1983). Influence du temps de conservation des échantillons d'eau sur le dosage de l'azote kjeldahl et des nitrates. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, n°126, p29-36.
- GRANGE D., DEUTSCH J.C. (1986). Qualité des eaux de pluie : comparaison des flux polluants avant et après ruissellement. XIXièmes journées de l'hydraulique, SHF, Paris 9-11 septembre, L'impact des activités humaines sur les eaux continentales – Question II : imperméabilisation des bassins versants, rapport n°II.2.
- GROMAIRE MC. SAAD M. CHEBBO G. (2003). Répartition des polluants des eaux urbaines par classes de vitesses de chute. Partie B : analyse des méthodes de mesure. Techniques, Sciences et Méthode. p59-97.
- GROMAIRE-METZ M.-C. (1998). La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire. Caractéristiques et origines. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 506 p. + annexes.
- GROMAIRE M.C., GARNAUD S, AHYERRE M., CHEBBO G. (2000). The quality of street cleaning waters: comparison with dry and wet weather rows in a Parisian combined sewer system. Urban Water. vol 2, issue 1, p39-46.
- GUYTON AC. (1992). Human physiology and mechanisms of disease. W.B. Saunders

Company, Philadelphia.

H…

- HAHN H. H. (1995). "Integrale Ansätze zu einer effizienten Gestaltung der Stoffkreisläufe in Stadtgebieten“, in Schadstoffe im Regenabfluss III, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe, Kommissionsverlag R. Oldenburg, München
- JÖNSSON H., BAKY A., JEPPSSON U., HELLSTRÖM D., ¨KARRAMAN E. (2005). Composition of urine, faeces, greywater and biowaste, for utilisation in the URWARE model. Urban Wtaer. Chalmaers Ubuversity of Technology, Gothenburg, Sweden, 2005, Report 2005:6, 49p.
- HERRMANN R., DAUB J., FORSTER J., STRIEBEL T. (1994). Chemodynamics of trace pollutants during roof and street runoff. Water Science and Technology, vol. 29, n°1-2 p. 73-82.
- HOVMAND MF. et KEMP K. (1998). Heavy metal bulk deposition and aerosol concentrations in rural Denmark 1992-1996. Environmental Research Institute final report, Roskilde, Danemark, 11p.

J…

- JAUMOUILLIE P., LARRARTE F. (2002). Hétérogeneitié des vitesses et des concentrations dans les collecteurs d’assainissement : application à la mesure des flux polluants. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux, 2002, p64-143

K…

- KREJCI V., DAUBER L., NOVAK B., GUJER W. (1987) : "Contribution of different sources to pollutant loads in combined sewers".4th Int. Conf. on « Urban Storm Drainage ». Lausanne, Suisse, 31 Aout- 4 Sept. 1987.
- KAFI-BENYAHIA M., GROMAIRE MC., CHEBBO G. (2004). Représentativité des prélèvements par préleveurs automatiques dans un réseau d’assainissement unitaire : cas d’OPUR. Colloque d’Hydrotechniques 179^{ième} session du Comité Scientifique et Technique, p117-126.

L…

- LEE J.H. and BANG, K.W.(2000). Characterization of Urban Stormwater Runoff. Water Research, vol. 34, no. 6, pp. 1773-1780, USA, 2000.
- LAAK R. (1974). Relative pollution strengths of undiluted waste materials discharged in households and the dilution waters used for each. In: J. H. T. Winneberger, Manual of grey water treatment practice (pp. 68±78). Michigan, USA: Ann Arbor.
- LAPLACE D. (1991). "Dynamique du dépôt en collecteur d'assainissement". Thèse de Doctorat, I.N.P. de Toulouse, spécialité : mécanique. 201p.
- LHRSP et LAURENSOT F (1998). Caractérisation de la charge métallique des eaux de temps de pluie. Phase 2 : contribution des différents réservoirs à la pollution des eaux de temps de pluie-impact du balayage mécanisé sur la qualité des eaux de ruissellement. Rapport final d'étude. Centre International de l'Eau de Nancy, Communauté urbaine du grand Nancy, Agence de l'Eau Rhin Meuse, ville de Nancy, GEMCEA, 56 p. + annexes
- LAWLOR AJ. et TIPPING E. (2003).Metals in bulk deposition and surface waters at two upland locations in northern England. Environmental Pollution, 121, p153-167.
- LEGRET M. et PAGOTTO C. (1999). Evaluation of polluant loadings in the runoff waters from a major rural highway. The Science of the total Environment , 235 (1-3), p143-150.
- LENTNER C. et WINK A. (1981). Units of measurement, body fluids, Composition of the body, Nutrition. Geigy Scientific tables. Ciba-Geigy, Basle.
- LHRSP (1994). Etude des métaux lourds transportés par les eaux de ruissellement. Rapport d'étude. Centre International de l'Eau de Nancy, district de l'Agglomération Nancéienne, Agence de l'Eau Rhin Meuse, GEMCEA, LHRSP. 56p. + annexes.
- LIN H. (1993). "Le transport solide en collecteur unitaire d'assainissement et sa modélisation"
- Thèse de doctorat Sciences et Techniques de l'environnement, ENPC, France. 225p.
- LUCAS-AIGUIER E., CHEBBO G., BERTRAND-KRAJEWSKI J.L., GAGNE B., HEDGES P. (1998). Analysis of the methods for determining the settling characteristics of sewage and stormwater solids. Water Science and Technology, vol.

37, n°1, p. 53-60.

- LROP (1980). Mesures de débit-pollution dans le collecteur des Coteaux et le déversoir Proudhon. Périodes de mesures du 18.07.1979 au 02.11.1979 et du 03.06.1980 au 15.10.1980. Rapport final, Dossier n° 9 025, Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, LROP, 45 p + annexes.
- LROP, SAFEGE, SOGREAH (1989).Etude du fonctionnement des ouvrages interdépartementaux du bassin versant parisien de la Bièvre Mesures de pollution par temps sec au point Concorde. Dossier de synthèse de la campagne de mesure du 25/01/1988 au 24/01/1989. Ministère de l'Equipement, du Logement, de l'Aménagement du territoire et des transports, Grenoble, 8p +annexes.

M…

- MICHELBACH S., WÖRHLE C. (1992). Settleable solids in a combined sewer system-measurement, quantity, characteristics. Water Science and Technology, vol. 25, n°8, p. 181-188.
- MIGON C., JOURNEL B., NICOLAS E. (1997). Measurement of trace metal wet, dry and total atmospheric fluxes over the Ligurian sea. Atmospheric Environment 31, p 889-896.
- Ministère de l'ENVIronnement du Québec (MENVIQ) (1989). Guide techniques sur la réalisation des études préliminaires, novembre 1989.
- MAKSIMOVIC C. et TEJADA-GUIBERT J. A. (2001). Les nouvelles frontières de la gestion urbaine de l'eau-impasse ou espoir ? Programme Hydrologique International, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, p. 128-161.
- MUSCHACK W. (1990). Pollution of street runoff by traffic and local conditions. The Science of the Total Environment, no.93, 419-431.

O…

- OMS C. (2003). Localisation, nature et dynamique de l'interface eau-sédiment en réseau d'assainissement unitaire. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 186p.

P…

- PETIT G, CLEYRERGUE M (1976). Typologie des effluents issus des résidences unifamiliales. La technique de l'eau n°535 mai 1996. Etude CERESOAF.

- PHILIPPE J.P., RANCHET J. (1987). Pollution des eaux de ruissellement pluvial en zone urbaine. Synthèse des mesures sur dix bassins versants en région parisienne. Rapport de recherche LPC N°142. Ministère de l'Equipement du Logement et des Transports, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 70 p.
- PISANO W.C. (1996). Summary : United States « sewer solids » settling characterization methods, results, uses and perspective. Water Science and Technology, vol. 33, n°9, p. 109-115.
- PITT G. et CLEYRERGUE M. (1995). La technique de l'eau n°353 mai 1976, « Typologie des effluents issus des résidences unifamiliales ». Etude CERSOAF.
- PUJOL R., LIENARD A. (1990). Qualitative and quantitative characterisation of waste water for small communities. CEMAGREF.

R…

- RAMBAUD A., ALOZY C., REBOUL B., BONTOUX J. (1997). Etude séquentielle des variations des rejets journaliers d'eaux usées au niveau d'une habitation individuelle. Travaux de la société de pharmacie de Montpellier.
- RANCHET J., PESCHEUX F., MÉNISSIER F. (1980). Influence du mode et du temps de conservation des échantillons d'eaux sur les déterminations de DBO5, DCO et MES, Bull Liaison Labo Ponts et Chaussées, 106, p. 27-36.
- REVITT DM., HAMILTON RS., WARREN RS. (1990). The transport of heavy metals within a small urban catchment. The Science of the Total Environment 93, p359-373.
- RISTENPART E., ASHLEY R.M., UHL M. (1995). Organic near bed fluid and particulate transport in combined sewers. Water Science and Technology, vol 314, n°7, 1995 ; p61-68.
- ROCHER V. (2003). Introduction et stockage des hydrocarbures et des éléments métalliques dans le réseau d'assainissement unitaire parisien. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 223p.
- RUSCASSIER G. (1996). Conception et dimensionnement des ouvrages de traitement au fil de l'eau des rejets urbains de temps de pluie. Noisy-Le-Grand (France). CERGRENE, rapport de DEA STE, 58p.

S…

- SAAD M., MERTZ M.C., CHEBBO G. (1996). Protocoles de mesure de la demande biochimique en oxygène. Bassin versant expérimental du Marais. Rapport d'avancement. CERGRENE-LABAM, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 9p + annexes.
- SAAD M., MERTZ M.C., CHEBBO G. (1996). Protocoles de mesure de la demande chimique en oxygène. Bassin versant expérimental du Marais. Rapport d'avancement. CERGRENE-LABAM, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 12p + annexes.
- SAAD M., MERTZ M.C., CHEBBO G. (1996). Protocoles de mesure des matières en suspension et des matières volatiles en suspension. Bassin versant expérimental du Marais. Rapport d'avancement. CERGRENE-LABAM, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 22p + annexes.
- SAGET.A. (1994). Base de données sur la qualité des rejets urbains de temps de pluie : distribution de la pollution rejetée, dimensions des ouvrages d'interception. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 227 p. + annexes.
- SAGET A., CHEBBO G., BERTRAND-KRAJEWSKI J.L. (1996). The first flush in sewer systems. Water Science and Technology, vol. 33, n°9, p. 101-108.
- SAKAKIBARA T. (1996). Roof runoff storm water quality. Proceeding of ICUSD '96, 7th International Conference on Urban Storm Drainage, sept 9-13, Hannover. p157-162.
- SAKAI A., SUMIYAMA M., and TANAKA K. (1996). Analysis of Non-Point source Pollutant Runoff Processes. Water Environment Federation, Proceedings Urban Wet Weather Pollution, Quebec, Canada, pp. 11/63-11/74.
- SARTOR J.D., BOYD G.B., AGARDY F.J. (1974). Water pollution aspects of street surface contaminants. Journal WPCF, vol. 46, n°3, p. 458-467.
- SCHROEDER HA. and NASON AP. (1971). Trace element analysis in clinical chemistry. Clinical Chemistry 17, p436-474.
- SIEGRIST R., WITT M., and BOYLE W. C. (1976). Characteristics of rural household wastewater. Journal of the Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 102 (EE), 533±548.

- SÖRME L., et LAGERKVIST R. (2002). Sources of heavy metals in urban wastewater in Stockholm. The Science of the Total Environment (298), p131-145.
- SAP (2003). Bilan 2003 de d'autosurveillance du réseau d'assainissement de paris. Mairie de Paris-Environnement, AEAQ, ISO 14001. 26p + annexes.
- SAP (2004). Bilan 2004 de d'autosurveillance du réseau d'assainissement de paris. Mairie de Paris-Environnement, AEAQ.
- SAP (1996). Etude de diagnostic du fonctionnement du réseau d'assainissement parisien. Dossier de mesures – sous systèmes 2et 3, vol. 9
- STOTZ G., KRAUTH Kh. (1984). *Factors affecting first flushes in combined sewers.* Proceeding de la 3ème Conférence Internationale « Urban Storm Drainage », Göteborg, 4 – 8 juin, Suède, vol. 3, p. 869–879.

T…

- TORNO, H. (1984). The EPA Nationwide Urban Runoff Program (NURP). Proceeding de la 3ème International Conference on Urban Storm Drainage, Göteborg, Suède.
- TREMOLIERES J., BONFILIS S., CARRE L., et SAUTIER C. (1961). Une méthode d'étude de la digestibilité chez l'homme, le fécalogramme. Nutritio et Dieta ; European Review of nutrition and dietetics 3, p281-289.
- THORNTON R.C., SAUL A.J. (1987). Temporal variation of pollutants in two combined sewer systems. Proceeding de la 4ème Conférence Internationale « Urban Storm Drainage », Lausanne, Suisse, 31 août – 4 sept, p. 51–52.
- THORNTON I., BULTER D., DOCX P., HESSION M., MAKROPOLOUS C., McMULLEN M., NIEUWENHUIJSEN M., PITMA A., RAUTIU R., SAWYER R., SMITH S., WHITE D., WILDERER P., PARIS S., MARANI D., BRAGUGLIA C. et PALERM J. (2001). Pollutants in urban waste water and sewage sludge, European commission.
- THOBURN B (1984). Kjeldhal, the man, the method and the Carlsberg laboratory. Anal. proc. ; 1984 ; vol 21. ; pp 210-214.

U…

- USEPA-R2-72-081(1972). SARTOR J.D., and. BOYD G.B .Water pollution aspects of street surface contaminants.

V…

- VALIRON F., TABUCHI J.P. (1992). Maîtrise de la pollution par temps de pluie. Etat de l'art. Edition Tec&Doc, Lavoisier, Paris. 564p.
- VAN DAM C.H., SCHOLTER M., VAN DE VEN F.H.M. (1989). Urban water quality in Lelystad ; rainfall and runoff from selected surfaces. Proceeding de la 2ème conférence de Wageningen "Urban Storm Water Quality and Ecological Effects upon Receiving Waters", p. 25-37.
- VIENNERAS B. (2001). Faecal separation and urine diverision of nutrient management of household biodegradation waste and wastewater. Licentiate Thesis. Institutionen, för lantbruksteknik. Swedish University of Agricultural Sciences. Report 244 ISSN 00283-0086, ISRN SLU-LT-R-244-SE.
- VERBANCK M.A. (1992). Field investigations on sediment occurrence and behaviour in Brussels combined sewers. Water Science and Technology, vol. 25, n°8, p. 71-82.
- VERBANCK M.A. (1993). Identification of the depth dependent transportation of particule solids in dry weather sewage flows. Proceeding of ICUSD '93, 6th International Conference on Urban Storm Drainage, sept 12-17, 1993, Niagara Falls. p. 742-748.
- VERBANCK M.A. (1995). Capturing and releasing settleable solids – the significance of dense undercurents in combined sewer flows. Water Science and Technology, vol. 31, n°7, p. 85-93.

W…

- WILDERER P., KOLB F. (1997). Abwasserexfiltration und Niederschlagswasserversickerung, Studie im Auftrag der Landeshauptstadt München, Juli 1997.
- WONG CSC., LI XD., ZHANG G., QI SH., et PENG XZ. (2003). Atmospheric deposition of heavy metals in the Pearl River Detla, China. Atmospheric Environment, 37, p767-776.
- WOLF P., REIFF H. (1996). Wachstum und Abtrag der Sielhaut in Mischwasserkanälen. Publié dans : Stoffaustrag aus Kanalisationen : Hydrologie bebauter Gebiete. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Editeurs : Beichert J., Hahn

H.H., Fuchs S., VCH Verlagsgesellschaft, ISSN 0070-3982, 323 p.

- WRc (1993). Surface water outfalls, quality and environmental impact management. Report no. VM 1400. Swindon.
- WRc (1994). Diffuse sources of heavy metals to sewers, final report to the Department of the Environment DoE 3624, June 1994
- WRc Water Research Centre (1994). The Destruction of Organic Micropollutants in Sludge Digestion Processes. WRc Report No. UM 1441. WRc, Swindon.

X…

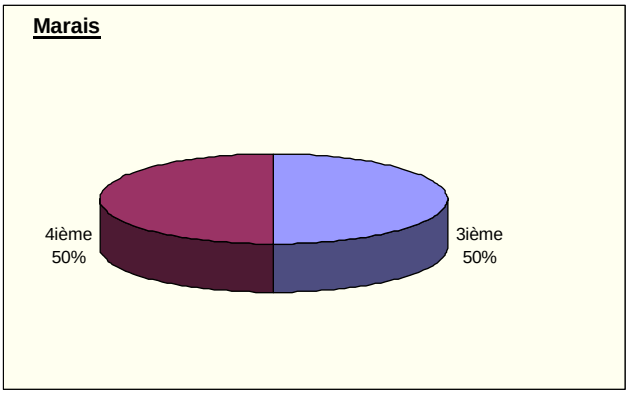
- XANTHOPOULOS C., HAHN H.H. (1993). Anthropogenic pollutants wash-off from street surfaces. Proceeding of ICUSD '93, 6th International Conference on urban storm drainage, sept 12-17, 1993, Niagara Falls. p. 417-422.

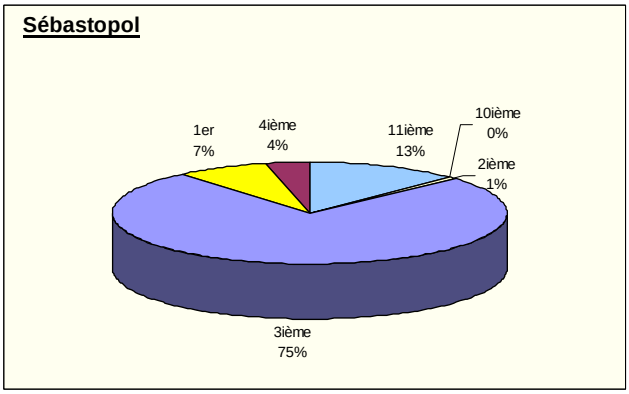
Z…

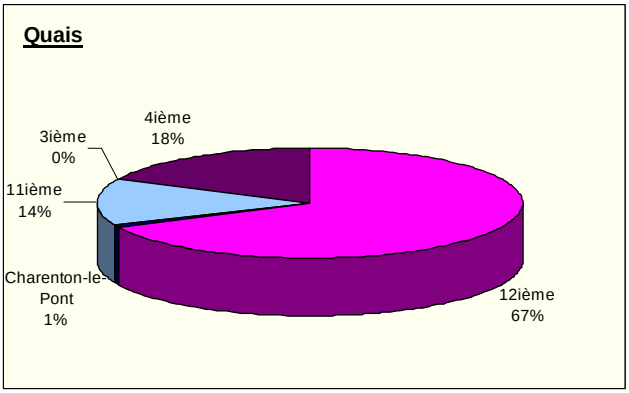
- ZOBRIST J., WERSIN P., JAQUES C., SIGG L, STUMM W (1993). Dry deposition measurements using water as a receptor: a chemical approach. Water, Air and Soil POollution, 71, p111-130.

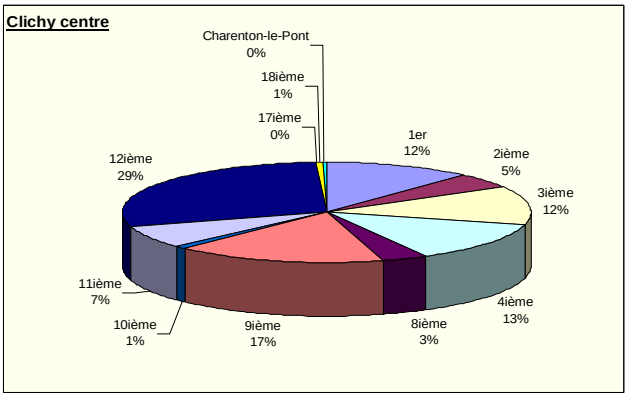
ANNEXES

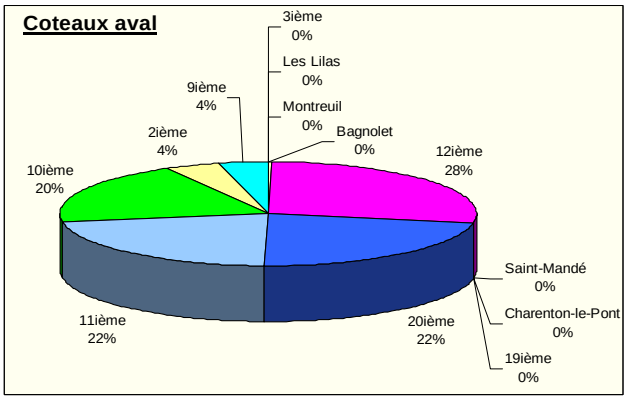
ANNEXE 1: distribution des arrondissement dans les bassins versants de l'OPUR

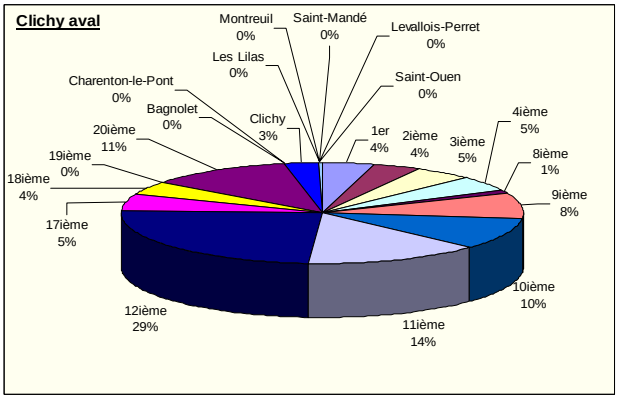












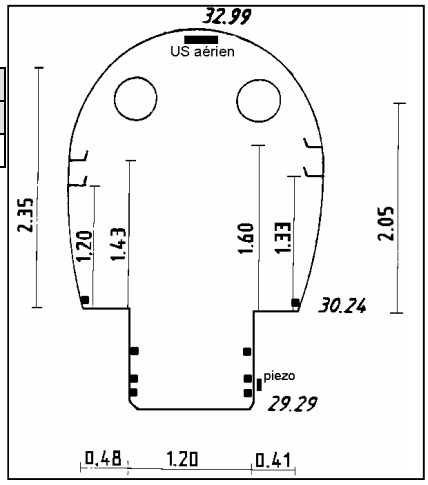
ANNEXE 2: fiches techniques des points de mesure de l'OPUR

Site

N°	Nom	Collecteur	Bassin versant
-	Marais	Collecteur Rivoli Est	Marais (42 ha)

Conditions hydrauliques

Temps sec			Pluie			
H (cm)	V (m/s)	Q (m3/s)	Hmax (m)	Vmax (m/s)	Q (m3/s)	Dépôt
27 – 35	0.6 - 0.7	0.15-0.25	1.7	0.9	2.3	? m



Mesure du débit

Type	Mesure vitesse	Mesure hauteur	Centrale
Hauteur + vitesse cordes ultrasons	4 cordes Ultraflux 0.21m 0.31m 0.61m 1.10m	1 US aérien EH FMU100 1 piezo EH FMC570 0.28m	UF2100 Dans local Bourg Tibourg

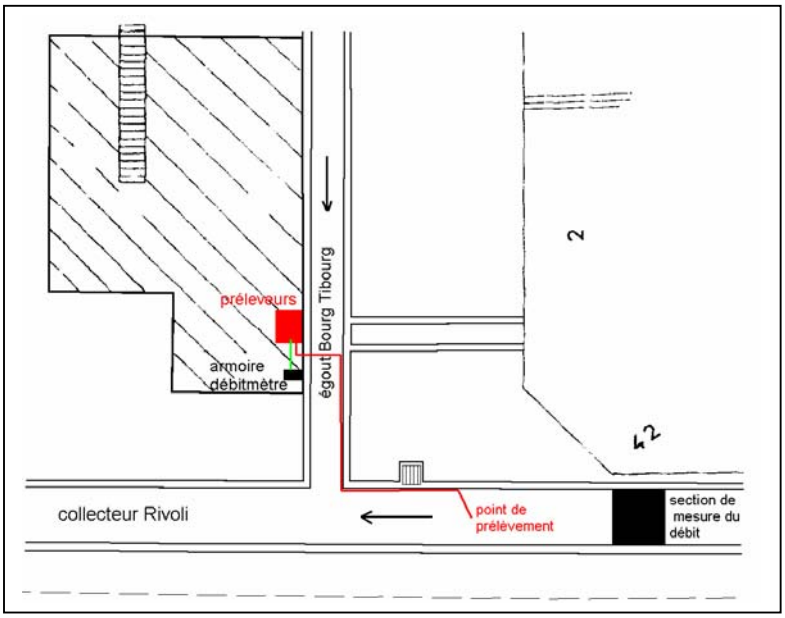
Prélèvements

Type préleveur	Localisation point prélèvement	Localisation préleveur	Hauteur de prélèvement	Distance prélèvement	Distance asservissement
PP92 (24×2.9l) + Vegamon 94 (1×50l) Fixes – 220V	Entre section de mesure du débit et avaloir	Local technique	≈ 3 m	≈ 20 m	≈ 2 m
Mode d'asservissement	Déclenchement et arrêt sur seuil de hauteur d'eau, fréquence de prélèvement proportionnelle au volume écoulé grâce aux impulsions émises par le débitmètre.				

Accès

Collecteur	Regard d'accès rue de Rivoli Echelle, profondeur 3 m
Centrale débitmètre	Dans local d'appel désaffecté Bourg Tibourg Escalier d'accès sous trappes
Préleveurs	Dans local d'appel désaffecté Bourg Tibourg

Plan d'implantation des équipements



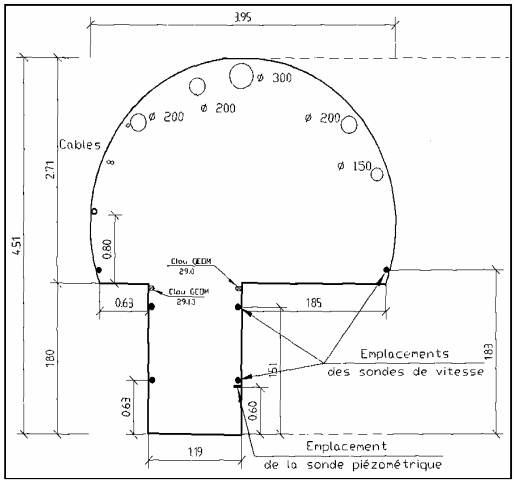
Annexes : Partie 1 : Contexte expérimental

Site

N°	Nom	Collecteur	Bassin versant
213	Quais	Collecteur des Quais	Mazas (360 ha) + *rive gauche (445 ha)*+ Quais (80 ha)

Conditions hydrauliques

Temps sec			Pluie		
H (m)	V (m/s)	Q (m3/s)	Hmax (m)	Vmax (m/s)	Q (m3/s)
0.8 – 1.5	0.3 – 0.6	0.5 – 0.8	2.5	0.8	2.8



Mesure du débit

Type	Mesure vitesse	Mesure hauteur	Centrale
Hauteur + vitesse cordes ultrasons	3 cordes CR2M 0.63m 1.51m 1.83m	1 DRUCK PTX630 0.6m	SAB 600 ASN Dans local technique

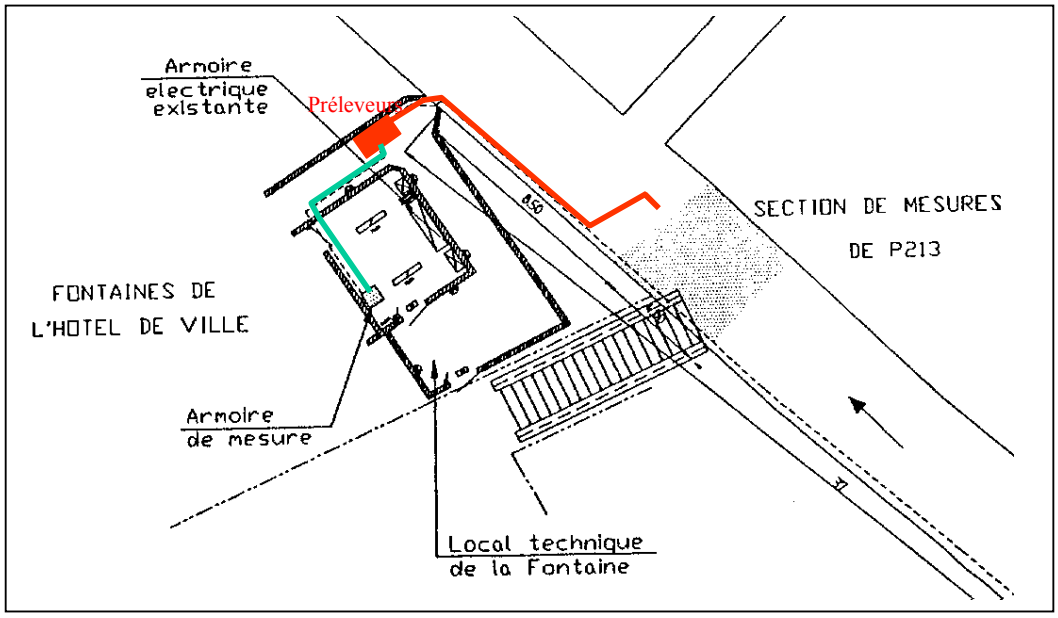
Prélèvements

Type préleveur	Localisation du point prélèvement	Localisation préleveur	Hauteur de prélèvement	Distance prélèvement	Distance asservissement
Xantos 4000 Fixe – 220V Réfrigéré	Entre section mesure débit et branchement place de l'hôtel de Ville	Local technique de la Fontaine	≈ 3.5m	≈ 15m	≈ 10m
Mode d'asservissement	Déclenchement et arrêt sur seuil de hauteur d'eau, prélèvement à pas de temps de 3mn , 6 échantillons /flacons. Asservissement à partir du signal 4-20 mA du capteur de hauteur, mise en place d'un convertisseur permettant de régler un seuil de déclenchement, utilisation du diviseur d'impulsions du préleveur pour la fréquence de prélèvement				

Accès

Collecteur	Regard d'accès Quais de l'Hôtel de Ville Echelle, profondeur 6 m
Centrale débitmètre	Dans local technique sous Place de l'Hôtel de ville Escalier d'accès
Préleveurs	Dans local technique sous Place de l'Hôtel de ville

Plan d'implantation des équipements

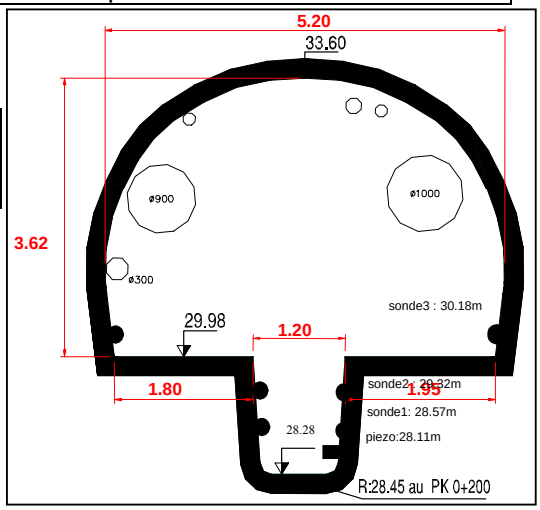


Site

N°	Nom	Collecteur	Bassin versant
-	Sébastopol	Collecteur Sébastopol	112 ha + siphon Richard Lenoir

Conditions hydrauliques

Temps sec			Pluie		
H (m)	V (m/s)	Q (m3/s)	Hmax (m)	Vmax (m/s)	Q (m3/s)
0.5-0.52	0.6-0.73	0.18-0.22	1.4	0.9-1.5	



Mesure du débit

Type	Mesure vitesse	Mesure hauteur	Centrale
Hauteur + vitesse cordes ultrasons	3 cordes CR2M	1 DRUCK	SAB 600

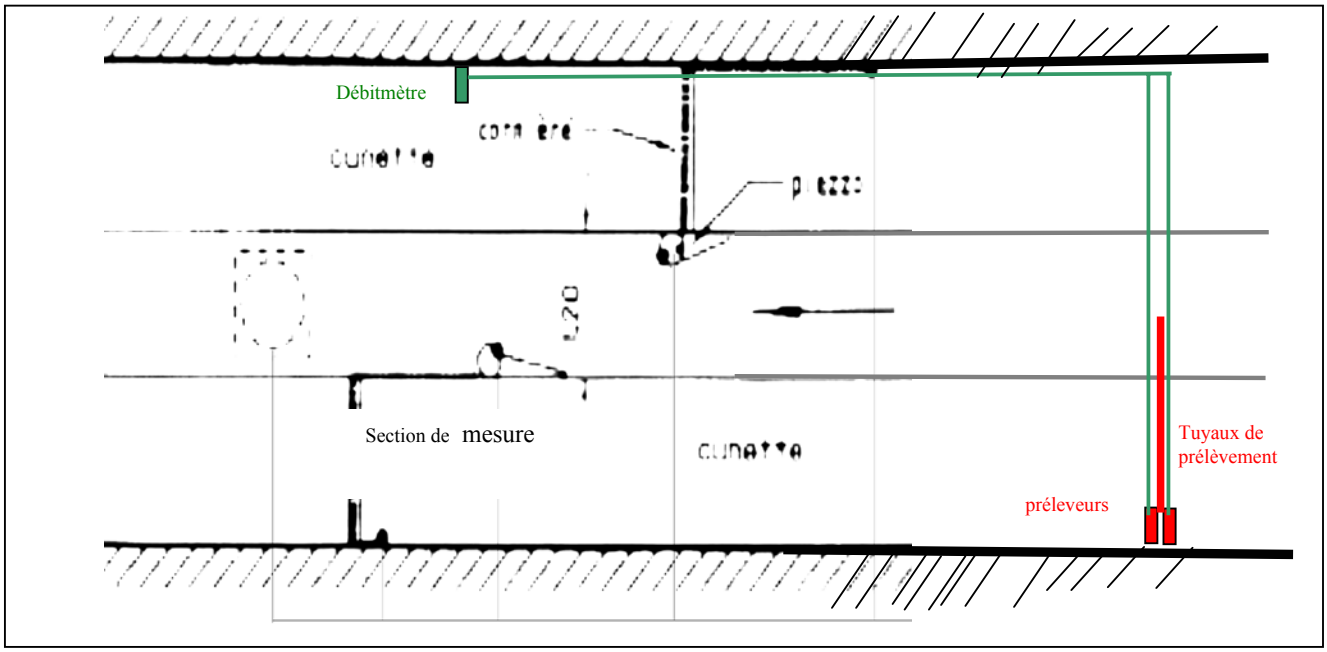
Prélèvements

Type préleveur	Localisation du point prélèvement	Localisation préleveur	Hauteur de prélèvement	Distance prélèvement	Distance asservissement
2 PBMOS portable, 24 V	Entre regard d'accès et section mesure débit	Banquette du collecteur	≈ 3.5m	≈ 7m	≈ 20m
Mode d'asservissement	Déclenchement et arrêt sur seuil de hauteur d'eau, prélèvement à pas de temps fixe de 5mn.				

Accès

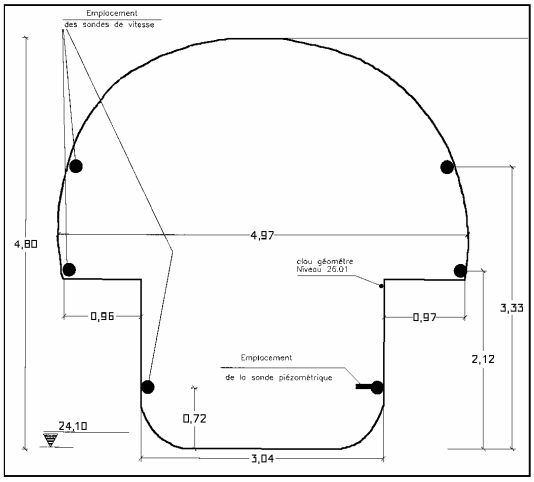
Collecteur	Regard d'accès 42 bd Sébastopol Echelle
Centrale débitmètre	Dans le collecteur, fixée à la paroi
Préleveurs	Dans le collecteur, sur la banquette

Plan d'implantation des équipements



Site

N°	Nom	Collecteur	Bassin versant
219	Clichy centre	Collecteur de Clichy	940 ha + *445 ha*



Conditions hydrauliques

Temps sec			Pluie		
H (m)	V (m/s)	Q (m3/s)	Hmax (m)	Vmax (m/s)	Q (m3/s)
1 – 2.1	0.3 – 0.7	1.8 – 2.4	4	1	12

Mesure du débit

Type	Mesure vitesse	Mesure hauteur	Centrale
Hauteur + vitesse cordes ultrasons	3 cordes CR2M 0.72m 2.12m 3.33m	1 DRUCK PTX630 0.72m	SAB 600 ASN Dans local technique

Prélèvements

Type préleveur	Localisation du point prélèvement	Localisation du préleveur	Hauteur de prélèvement	Distance prélèvement	Distance asservissement
2 PBMOS portable, 24 V	Au droit de l'escalier d'accès	Chambre située au dessus du collecteur	≈ 5.7 m	≈ 9 m	≈ 60m

Mode d'asservissement	Déclenchement et arrêt sur seuil de hauteur d'eau, prélèvement à pas d temps fixe de 5mn et 6 échantillons /flacon. Asservissement à partir du signal 4-20 mA du capteur de hauteur, mise en place d'un convertisseur permettant de régler un seuil de déclenchement

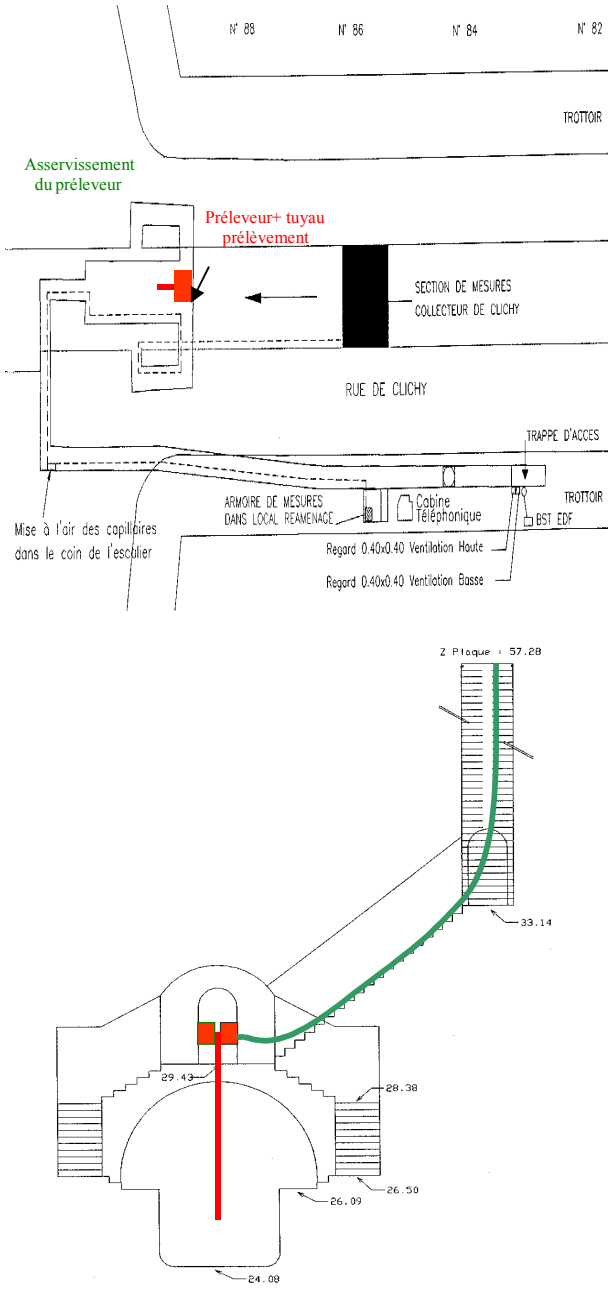
Accès

Collecteur	Escalier sous trappes d'accès (164 marches, profondeur 33m) – Rue de Clichy
Centrale débitmètre	Dans local technique situé dans la partie supérieure de l'escalier
Préleveurs	Dans la chambre située au bas de l'escalier, au dessus du collecteur

Site

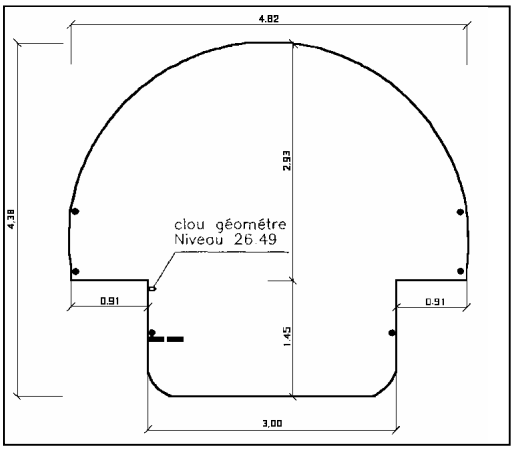
N°	Nom	Collecteur	Bassin versant
219	Clichy centre	Collecteur de Clichy	940 ha + *445 ha*

Plan d'implantation des équipements



Site

N°	Nom	Collecteur	Bassin versant
218	Coteaux aval	Collecteur des Coteaux	Tout le BV de Coteaux (≈ 1250 ha)



Conditions hydrauliques

Temps sec			Pluie		
H (m)	V (m/s)	Q (m3/s)	Hmax (m)	Vmax (m/s)	Q (m3/s)
0.6 – 1	0.3 – 1.2	2 – 2.7	3.1	1.5	16

Mesure du débit

Type	Mesure vitesse	Mesure hauteur	Centrale
Hauteur + vitesse cordes ultrasons	3 cordes CR2M 0.49m 1.55m 2.24m	2 DRUCK PTX630 0.32m 0.32m	SAB 600 ASN Dans armoire extérieure

Prélèvements

Type préleveur	Localisation point prélèvement	Localisation préleveur	Hauteur de prélèvement	Distance prélèvement	Distance asservissement
2 PBMOS	Au droit de l'échelle. Entre les baies de déversement et la vanne de l'intercepteur	Chambre au dessus du collecteur	≈ 5.3 m	10 m	≈ 70 m

Mode d'asservissement	Déclenchement et arrêt sur seuil de hauteur d'eau, prélèvement à pas de temps fixe de 5mn et 6 échantillons/ flacon. Asservissement à partir du signal 4-20 mA du capteur de hauteur, mise en place d'un convertisseur permettant de régler un seuil de déclenchement.

Accès

Collecteur	Regard d'accès Square Hector Berlioz Echelle 4 m + escalier colimaçon 22m + échelle 6m + échelle 3m
Centrale débitmètre	Dans armoire extérieure, placée sur le muret du square Berlioz
Préleveurs	Dans la chambre au dessus du collecteur

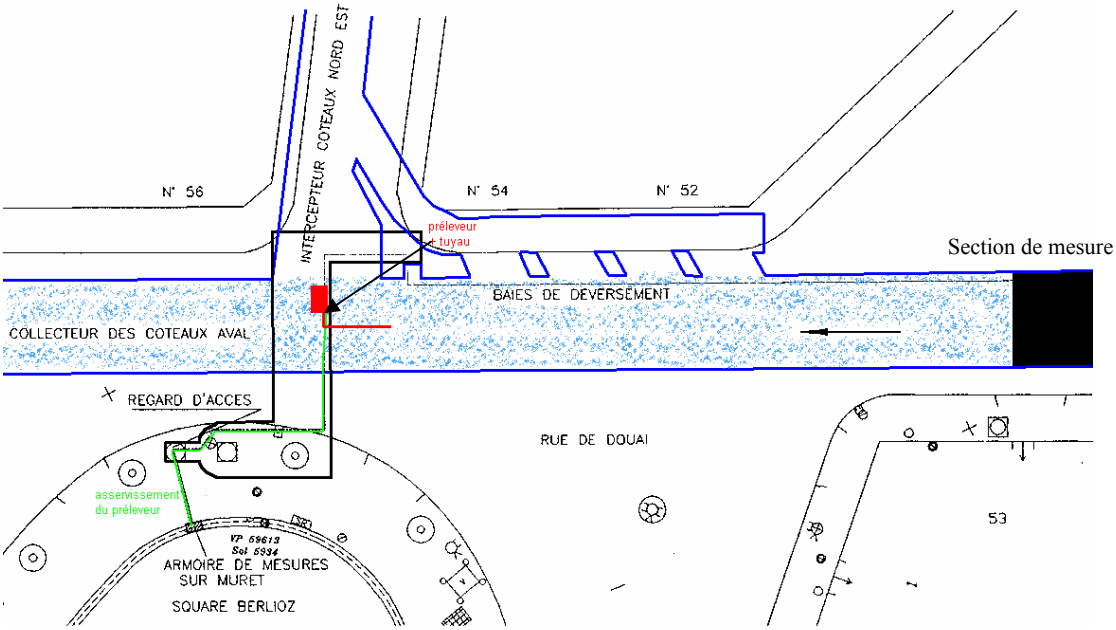
Remarques

Les baies de déversement permettent le délestage par l'intercepteur nord est, cependant, du fait de la côte élevée de la crête déversante, ces baies n'entrent en fonction qu'exceptionnellement.
La vanne à l'entrée de l'intercepteur est actuellement fermée. On observe beaucoup de dépôt fin devant la vanne, susceptible d'être remobilisé par temps de pluie. De ce fait le point de prélèvement à été placé à l'amont de la vanne.

Site

N°	Nom	Collecteur	Bassin versant
218	Coteaux	Collecteur des Coteaux	Tout le BV de Coteaux (≈ 1250 ha)

Plan d'implantation des équipements

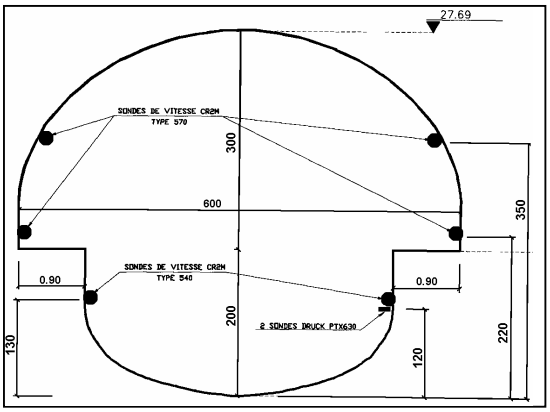


Site

N°	Nom	Collecteur	Bassin versant
120	Clichy aval	Collecteur de Clichy	Tout le BV du collecteur Clichy+Coteaux (≈2470 ha)

Conditions hydrauliques

Temps sec			Pluie		
H (m)	V (m/s)	Q (m3/s)	Hmax (m)	Vmax (m/s)	Q (m3/s)
1.5 – 2.8	0.4 – 0.8	3.3 – 4.4	4.1	1.7	24



Mesure du débit

Type	Mesure vitesse	Mesure hauteur	Centrale
Hauteur + vitesse cordes ultrasons	3 cordes CR2M 1.2m 2.2m 3.5m	2 DRUCK PTX630 1.2m 1.2m	SAB 6000 ASN

Prélèvements

Type préleveur	Localisation point prélèvement	Localisation préleveur	Hauteur de prélèvement	Distance prélèvement	Distance asservissement
2 PBMOS	Au droit du regard d'accès	Dans regard	≈ 3 m	≈ 11 m	≈ 6 m

Mode d'asservissement	Déclenchement et arrêt sur seuil de hauteur d'eau, prélèvement à pas d temps fixe de 5mn et 6 échantillons / flacon. Asservissement à partir du signal 4-20 mA du capteur de hauteur, mise en place d'un convertisseur permettant de régler un seuil de déclenchement.

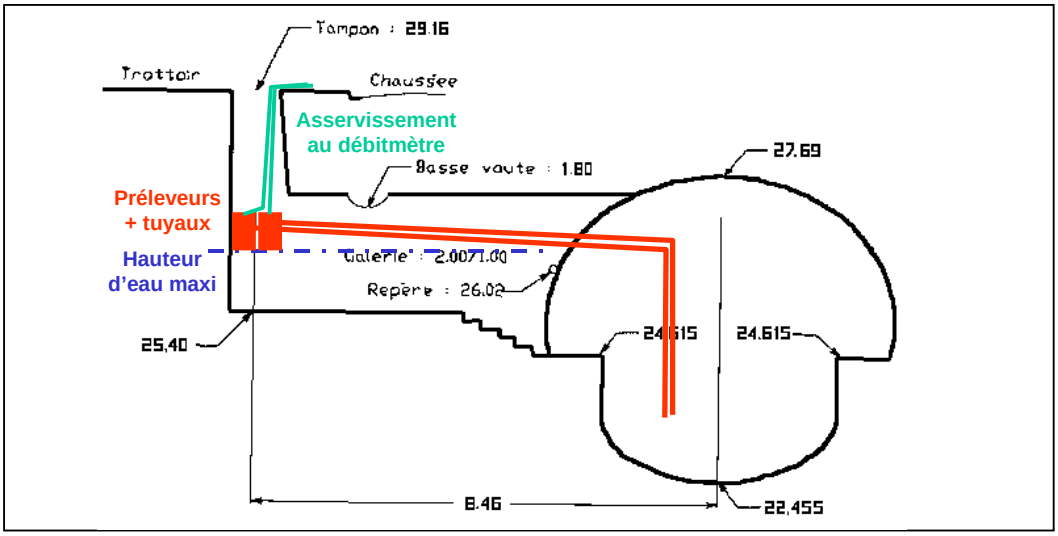
Accès

Collecteur	Regard d'accès 114 avenue Jean Jaurès Echelle, profondeur 4 m
Centrale débitmètre	Dans armoire extérieure sur le trottoir
Préleveurs	Regard d'accès 114 avenue Jean Jaurès

Remarques

La tête des préleveurs doit être placée au dessus de la ligne des plus hautes eaux. Ils sont placés sur des étagères fixées au mur sur le côté de la cheminé d'accès à une hauteur de 1 m du pied la cheminée, et attachés à la paroi par des chaînes.
Par temps sec le niveau d'eau dépasse fréquemment la banquette, ce qui rend difficile les interventions d'entretien sur la prise d'eau et les capteurs.

Plan d'implantation des équipements



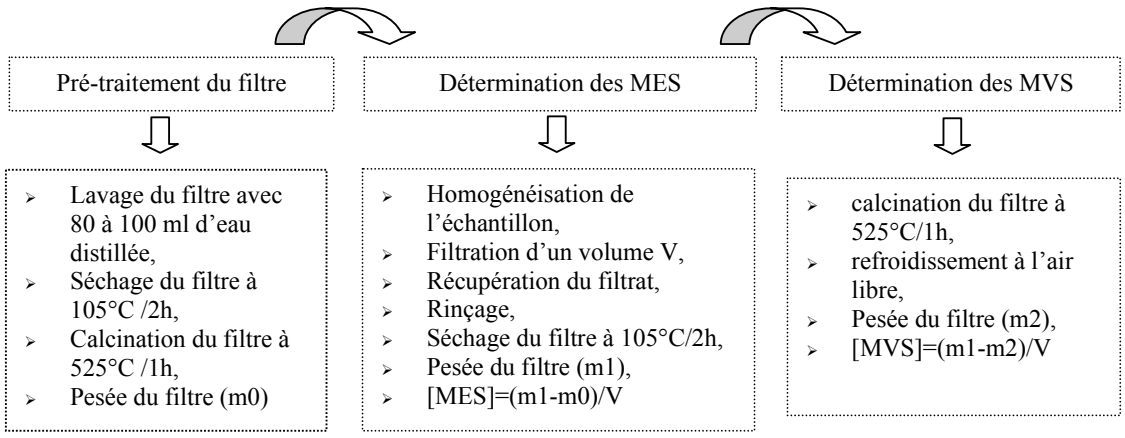
ANNEXE 3: détails des protocoles d'analyses

Protocole d'analyse des MES et MVS

Les protocoles de détermination des MES et des MVS, appliqués sur les échantillons, suivent les normes AFNOR NF T90-105 et NF T90-029, avec de légères modifications, afin de les adaptés aux besoins de l'étude [rapidité et de sa simplicité de l'exécution, possibilité de récupération du filtrat pour d'éventuelles analyses (analyses d'autres paramètres polluants comme : DCOd, DBOd, COP, COD, NH4+ et NTKd)].

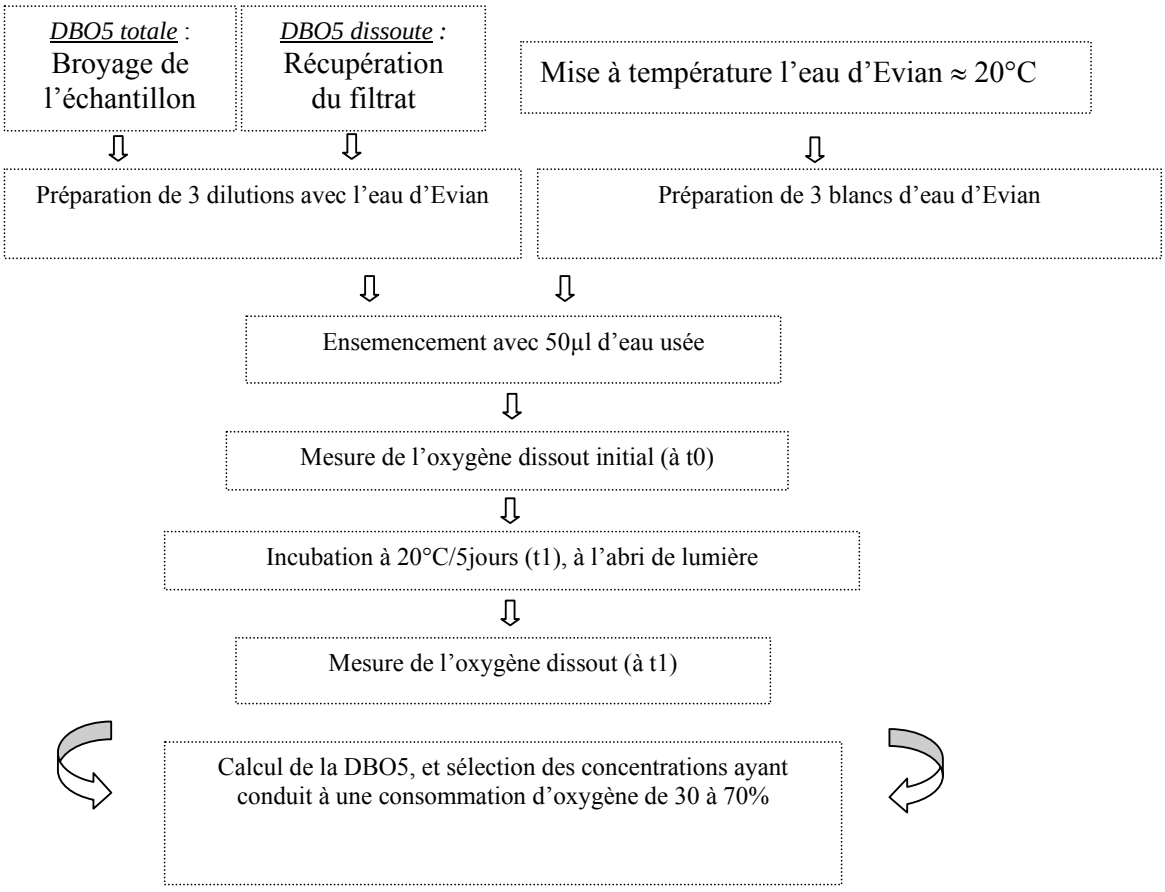
Les MES sont déterminées par filtration sous vide sur une membrane filtrante (en fibre de verre Whatman GF/F), puis séchage à 105°C. Les MVS sont déterminées par calcination à 525°C de la membrane ayant servi pour le détermination des MES.

Le schéma suivant illustre les différentes étapes du protocole :



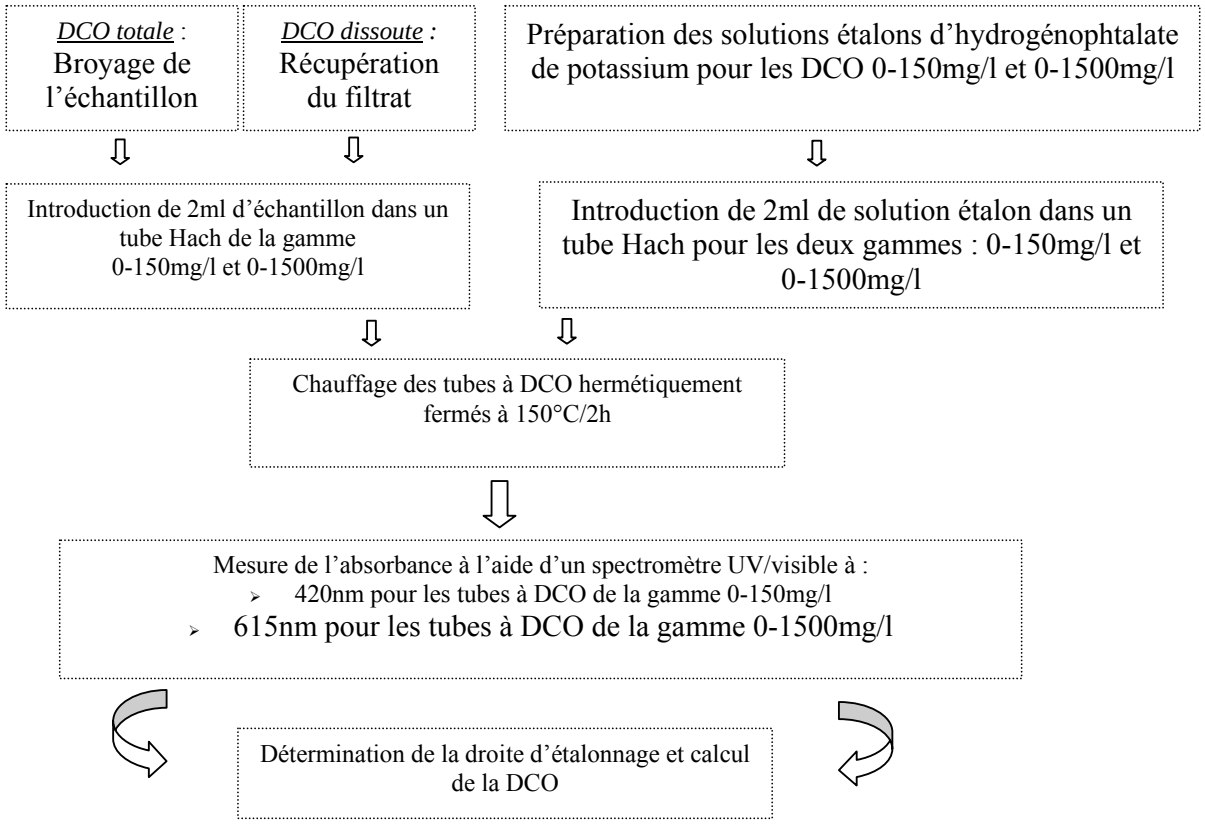
Protocole d'analyse de la DBO5

La mesure de la demande biochimique en oxygène consiste à évaluer la quantité d'oxygène consommée entre l'instant $t_1 = 0$ (au moment de l'incubation) et $t_2 = 5$ jours (après cinq jours d'incubation) dans des conditions d'essai, à 20°C dans des solutions diluées de l'échantillon.
Le protocole utilisé pour la mesure de la DBO_5 est extrait de la norme AFONOR (NF, T90-103), mais avec quelques différences. La première se résume dans la substitution de la solution préparée, pour la dilution, par de l'eau minérale Evian ; alors que la seconde consiste à broyer les échantillons pour une bonne homogénéisation [Saad et al, 1996]. Le protocole retenue est :



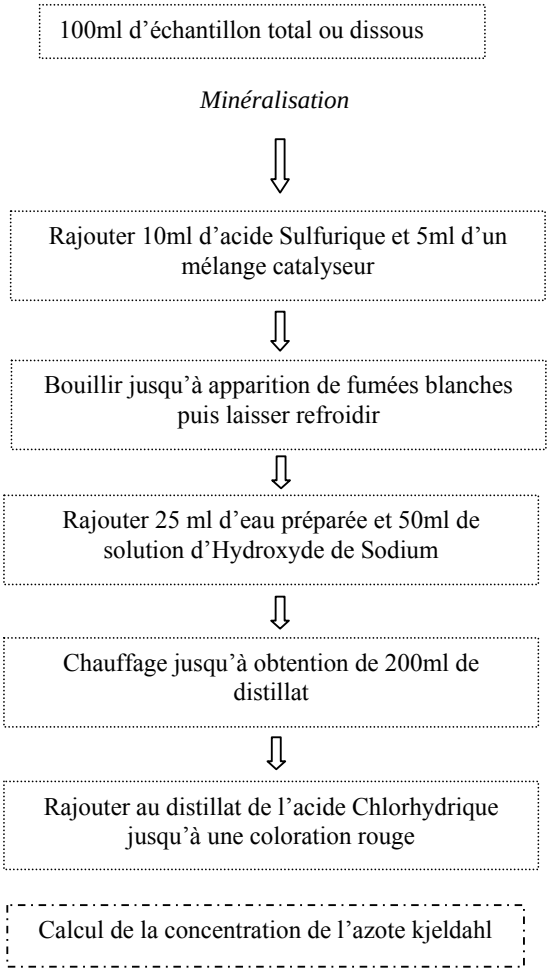
Protocole d'analyse DCO

La méthode utilisée pour la mesure de la DCO est la micro méthode ou méthode Hach. Le principe de cette dernière est basé sur le dosage par colorimétrie de l'excès de bichromate.
La mesure colorimétrique est convertie en DCO à l'aide d'une courbe d'étalonnage, obtenue avec un réducteur de DCO connue (Hydrogénophtalate de potassium) et les réactions d'oxydations se font dans des petits tubes prêts à l'emploi, contenants tous les réactifs.
Le protocole utilisé pour la mesure de la DCO est le suivant :



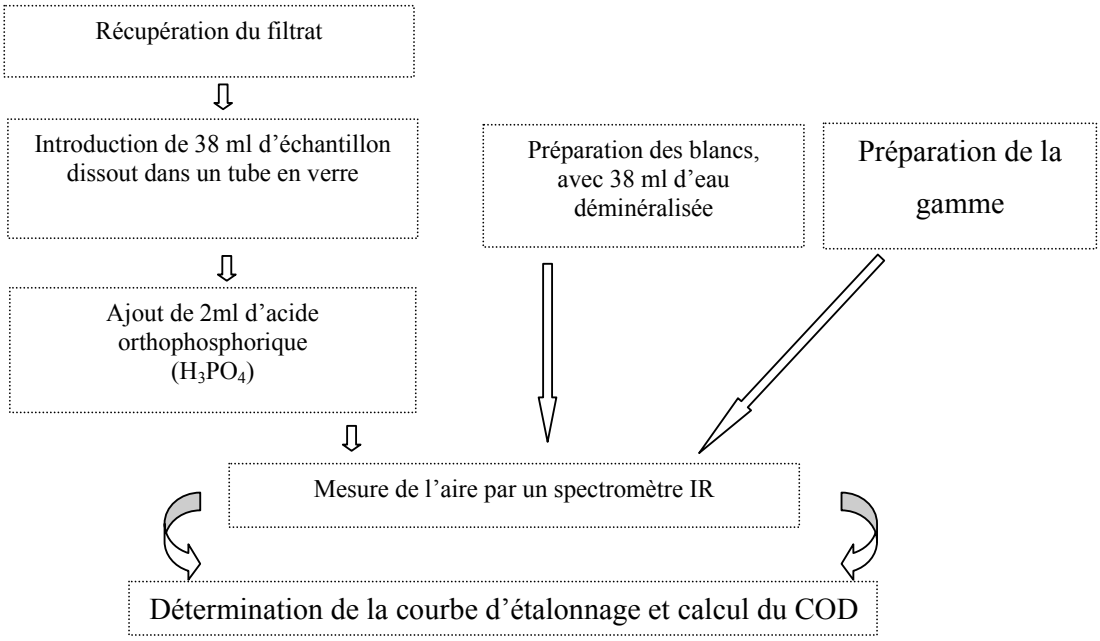
Protocole d'analyse de l'azote kjeldhal

L'analyse de l'azote total kjeldahl est réalisée selon la norme française AFNORD (NF EN 25663 ISO 5663). Les échantillons totaux et dissous (après filtration sur filtres GF/F) sont acidifiés avec 200µl d'acide sulfurique à pH < 2. L'analyse de l'azote kjeldahl se fait comme suit :



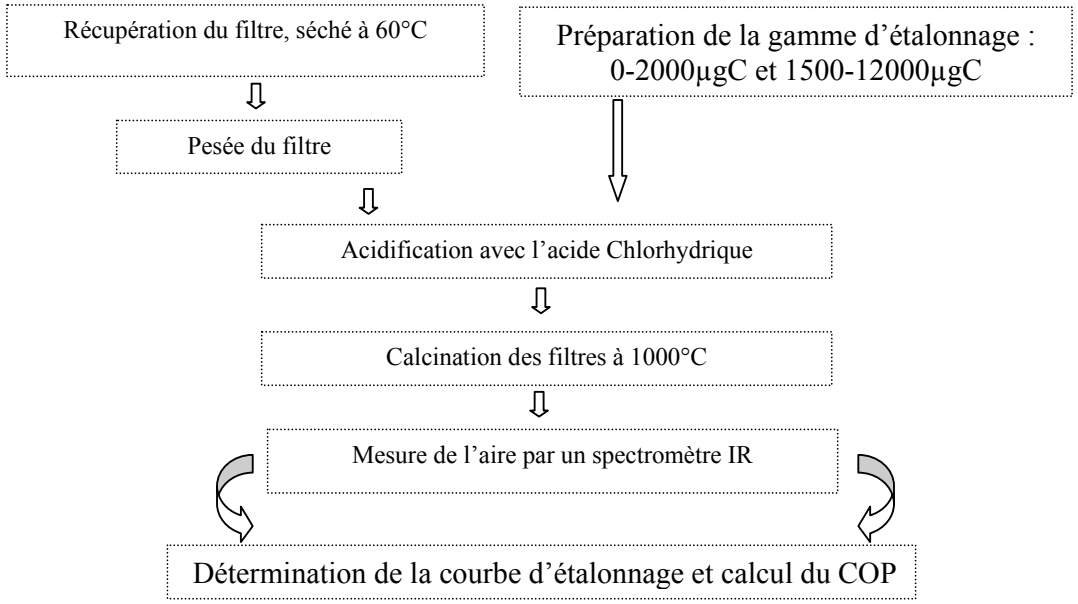
Protocole d'analyse du COD

Le carbone organique dissout est déterminé par la mesure du dioxyde de carbone libéré après une oxydation chimique du carbone organique présent dans un échantillon d'eau usée, à l'aide d'un spectromètre IR. Le protocole de mesure est résumé par le schéma suivant :



Protocole d'analyse du COP

Le principe d'analyse du carbone organique particulaire consiste à calciner à 1000°C le filtre, préalablement débarrassé de son Carbone Inorganique par acidification. Ainsi, il y a formation de dioxyde de carbone à partir du carbone organique et le CO2 peut alors être mesuré par spectrométrie InfraRouge. Notons que les filtres utilisés pour l'analyse du COP sont ceux utilisés précédemment pour l'analyse des MES.

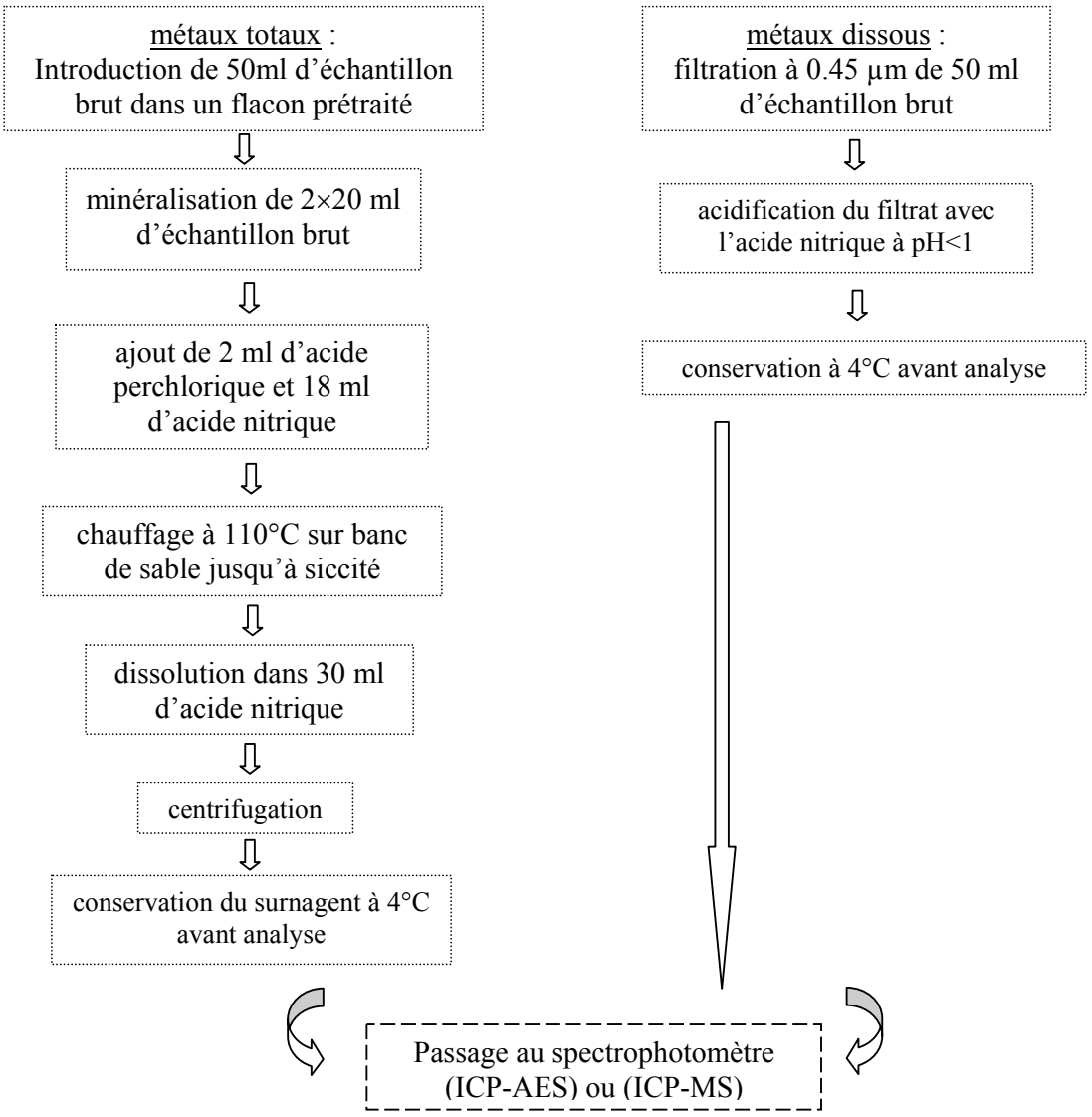


Protocole d'analyse des métaux lourds (laboratoire Wolf Environnement)

Le protocole d'analyse des métaux totaux et dissous appliqué aux échantillons découle de celui développé par [Garnaud, 1999]. Les analyses sont faites sur les deux fractions totales et dissoutes par le laboratoire Wolff Environnement, soit par spectrométrie AES-MS ou ICP-MS, selon les concentrations des échantillons.

Les échantillons bruts subissent un pré-traitement au laboratoire du CEREVE, à savoir, une filtration et une acidification du filtrat avec 2ml d'acide nitrique à pH < 1.

Le protocole d'analyse des métaux totaux et dissous est le suivant :



Protocole d'analyse des métaux lourds (IEEB)

Le protocole d'analyse des métaux lourds utilisé par IEEB est celui de la norme NF EN ISO 11885. Les analyses sont faites sur les deux fractions totales et dissoutes soit par spectrométrie ICP-AES ou ICP-MS, selon les concentrations des échantillons.

Les échantillons bruts subissent un pré-traitement au laboratoire du CEREVE, à savoir, une filtration et une acidification du filtrat avec 2ml d'acide nitrique à pH < 1.

La différence par rapport au protocole Wolf réside essentiellement dans l'utilisation d'une eau régale : mélange d'acide nitrique et chlorhydrique et chauffage en bombe à micro-onde fermé.

ANNEXE 4 : caractéristiques des bassin versants de la littérature

Nom Du Bassin versant	Département	Campagne de mesure	Surface du bassin versant (ha)	Coefficient d'imperméabilisation (%)	Densité de population (hab/ha)	Type de réseau	Dépôt	Pente moyenne (%)
Marais [1]	75	1996-1997	42	91	295 (habitat dense)	unitaire	oui	0.84
Mazas [2]	75	1996	330	68	201	unitaire	oui	-
P208 [2]	75	1996				unitaire		-
Coteaux amont [3]	75	1979-1980	175.4	90	282	unitaire	oui	0.37
Clichy aval [2-a]	92	1996	2500	-	-	unitaire		
Surverse de l'usine de Clichy [2-b]	92	1996	12000	50		Surverse unitaire	non	0
Bièvre [4]	75	1988				unitaire		
Amont STEP de Colombes [5]	92	2002				unitaire		
Amont STEP Ashères [6]	78	2003-2004				unitaire		
Boubonville (Nancy) [7]	Nancy	1998	660	40	61	unitaire		3.4
Collecteur 13 (Marseille) [8]	Marseille	1992				unitaire		
Cordon bleu (Nantes) [9]	Nantes	2002			500 000EH	unitaire		
Emissaire de Bruxelles [10]	Bruxelles	1995				unitaire		
Londres [11]	Londres	1997				unitaire		
Coré du Sud [12]	BBW	1996-1997	74.4	75	103	unitaire		1.7
	YMW		230	68	85			1
	GYW,		557.9	52	75			3.6
BV d'Ile de France [13]	Mantes La Ville	1978	72	39	69	unitaire		
	Rambouillet	1986	230	34	109	Unitaire		
	La Molette	1983-989	8000			Unitaire		
	La Briche D11	1983				Unitaire		
	La Briche DD11	1983				Unitaire		
	La Briche PLB	1983				Unitaire		
	La Briche PHI1400	1983				Unitaire		
	La Briche Enghien	1983				unitaire		
Santiago de Compostela [14]	Espagne	1996-1999		80/20	Densément/ faiblement urbanisé	Surverse unitaire		

[1] : Gromaire, 1998- [2-a] : données SIAAP, 1996 - [2-b] : Saget et al, 1994, base Qastor-[3] : Philippe et Ranchet, 1987, LROP, 1980- [4]: LROP et al. ; 1989-
[5] : données SIAAP, 2002 ; données SIAAP, 2003-2004- [7] : LHRSP et Laurensot ; 1998-
[8] : Chebbo, 1992- [9] : Jaumouillié, 2002- [10] :Verbank, 1995-[11] : Ainger et al, 1997, cité dans Maksimovic, 2001-
[12] : Lee and Bang, 2000- [13] : Saget et al, 1994, base Qastor- [14]: Flores-Rodriguez ; 1992.

ANNEXE 5 : caractéristiques des bassins versants et des évènements pluvieux étudiés pour les vitesses de chute

	Site de mesure et caractéristiques	Réseau	Surface du BV(ha)
Chebbo et al. ,2003	Sarge	Unitaire	250
Etude de synthèse DSEA,98	Vincennes	Unitaire	1089
Etude de synthèse DSEA,98	Quai Jules Guesde	Unitaire	913
Etude de synthèse DSEA,98	Champigny Eglise	Unitaire	1700
[Ruscassier;96]	La Molette	Unitaire	-

Site	événements étudiés	Hauteur de pluies (mm)	Durée de pluie	Intensité moy. (mm/h)	Intensité max. (mm/h)
Le Marais		1.3 – 5.9		0.7 - 42	sur 5 minutes 1.2 – 89.6
La Molette	3	10 – 19	-		
Vincennes	1	21.2	4h06min	5.2	Sur 5min 14.4
Quai Jules Guesde	1	13	2h02min	6.4	Sur 5min 55.2
Champigny Eglise	1	1.2 – 3.8	1h29min	2.1 – 7.1	Sur 5 min 4.8 – 19.2
Cordon Bleu	1	-	-	-	-
Sarge-Les-Mans	6	3.2 – 78.5		2.4 – 6.6	7.8 – 19.8

ANNEXE 6: RECAPITULATIF DE LA CAMPAGNE DE TEMPS SEC

Journées de temps sec échantillonnées sur chaque site de mesure+ type d'échantillon

Journée de temps sec	Marais	Sébastopol	Quais (P213)	Clichy centre (P219)	Coteaux (P218)	Clichy aval (P120)
29 Octobre 2002	-	×,1	-	×,1	-	×,2
17 Novembre 2002	×,2	×,2	-	×,2	×,2	-
20 Novembre 2002	-	×,1	×,1+2	×,1	×,1	-
24 Février 2003	×,2	×,2	×,2	×,2	×,2	×,2
26 Février 2003	×,2	×,2	×,2	×,2	×,2	×,2
9 Mars 2003	×,2	×,2	×,2	×,2	×,2	×,2
11 Mars 2003	×,1+2	×,1+2	×,1+2	×,1+2	×,1+2	×,1+2
31 Mars 2004	×,1+2	-	×,1+2	×,1+2	-	×,1+2
14 Avril 2004	×,2	-	×,2	×,2	×,2	×,2
26 Mai 2004	×,1+2	-	×,1+2	×,1+2	-	×,1+2
17 Mars 2005	-	-	-	×,1	-	×,1+2
20 Mars 2005	×,1	-	-	×,1	×,1	×,1
11 Avril 2005	*×,1+2*	-	-	*×,1+2*	-	*×,1+2*
11 Juillet 2005[13]	-	-	-	-	*×,1+2*	-
20 Juillet 2005	-	-	*×,1+2*	-	*×,1+2*	-
04 Août 2005	-	*×,1+2*	*×,2*	-	-	-
08 Août 2005	-	*×,1+2*	*×,2*	-	-	-

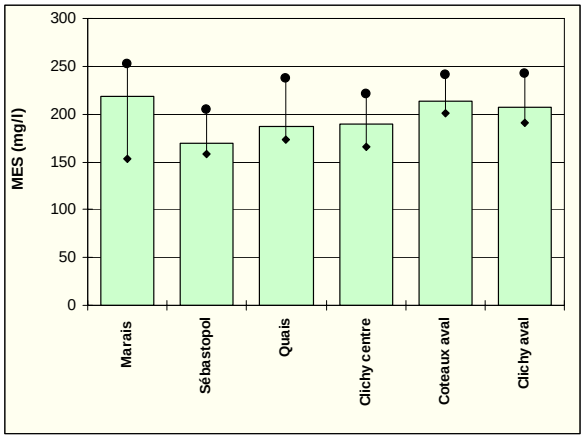
× : journée échantillonné, - : pas de prélèvement, 1&2 type d'échantillon : 1=pollutogramme ; 2=échantillon moyen

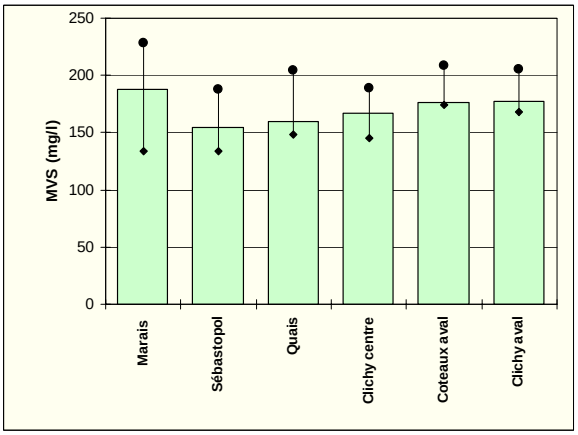
[13] les valeurs en italiques sont des données complémentaires, il s'agit de pollutogrammes en métaux lourds et en NTK, qui n'ont pas été exploités dans cette partie de caractérisation des eaux usées de temps sec, mais ils ont été utilisés dans la partie bilan de masse, du fait de la collecte tardive

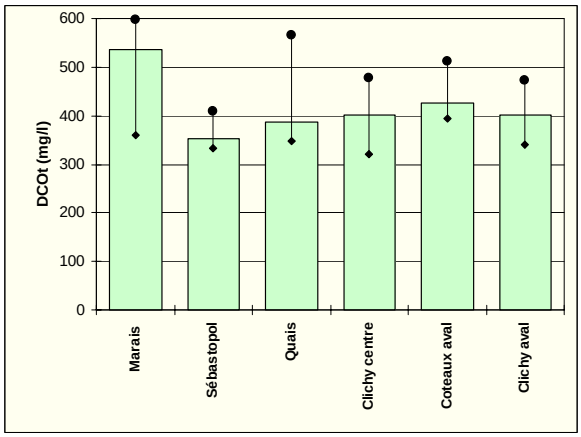
Distribution des polluants par classe de vitesse de chute par temps sec

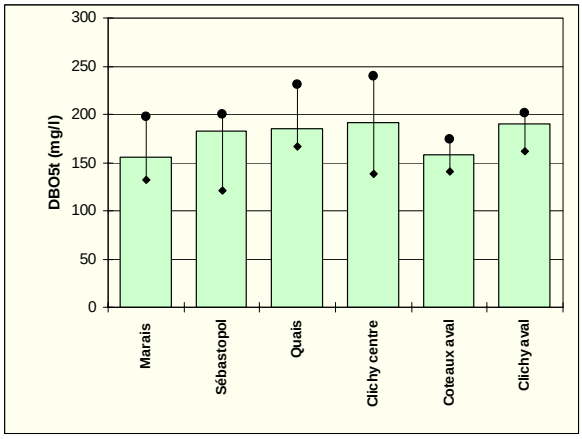
Journée de temps sec	Marais		Sébastopol		Quais (P213)		Clichy centre (P219)		Coteaux (P218)		Clichy aval (P120)	
	VICAS	VICPOL	VICAS	VICPOL	VICAS	VICPOL	VICAS	VICPOL	VICAS	VICPOL	VICAS	VICPOL
29 Octobre 2002	-		-		-		-		-		-	
17 Novembre 2002	MES	-	MES	-	-		MES	-	MES	-	-	
20 Novembre 2002	-		-		-		-		-		-	
24 Février 2003	-		-		-		-		-		-	
26 Février 2003	-		-		-		-		-		-	
9 Mars 2003	MES, COP	-	MES, COP	-	MES, COP	-	-		-		MES, COP	-
11 Mars 2003	-		-		-		-		-		-	
31 Mars 2004	-		-		-		-		-		-	
14 Avril 2004	MES, COP	MES, DCO, COP, NTK, Métaux	-		MES, COP,	MES, DCO, COP, NTK, Métaux	MES, COP	MES, DCO, COP, NTK, Métaux	-		MES, COP	-
26 Mai 2004	-		-		-		-		-		-	
17 Mars 2005	-		-		-		-		-		-	
20 Mars 2005	-		-		-		-		-		-	
11 Avril 2005	-		-		-		-		-		-	
11 Juillet 2005	-		-		-		-		-		-	
20 Juillet 2005	-		-		-		-		-		-	
04 Août 2005	-		-		-		-		-		-	
08 Août 2005	-		-		-		-		-		-	

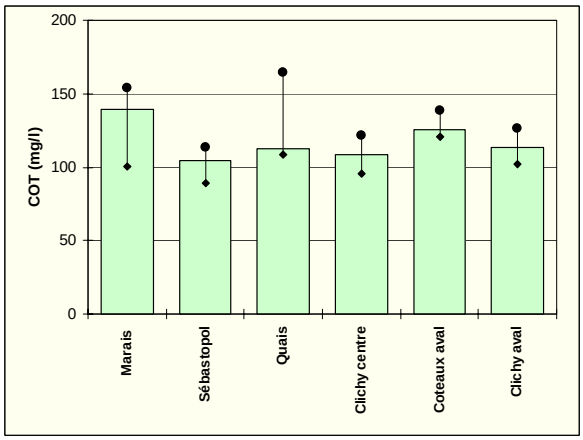
ANNEXE 7: Evolution des concentrations MES, MO, et NTK des eaux usées de temps sec

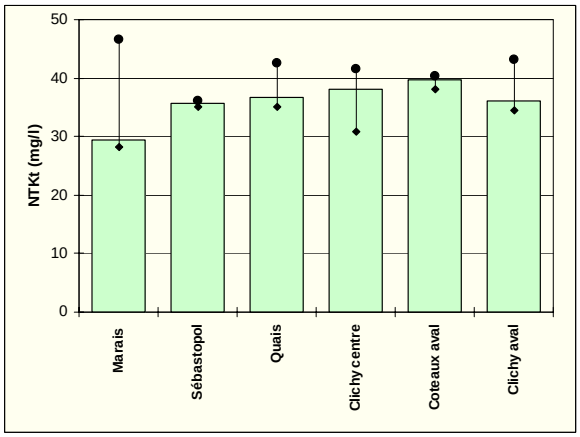








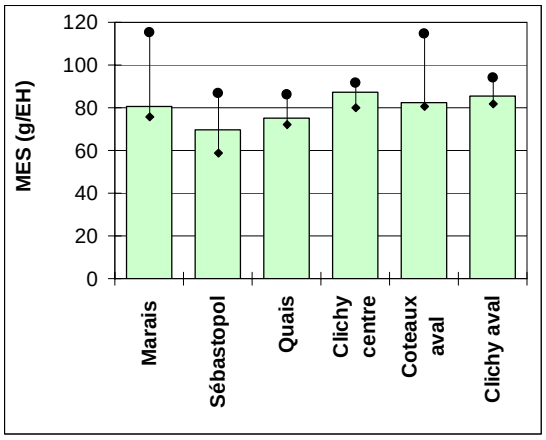


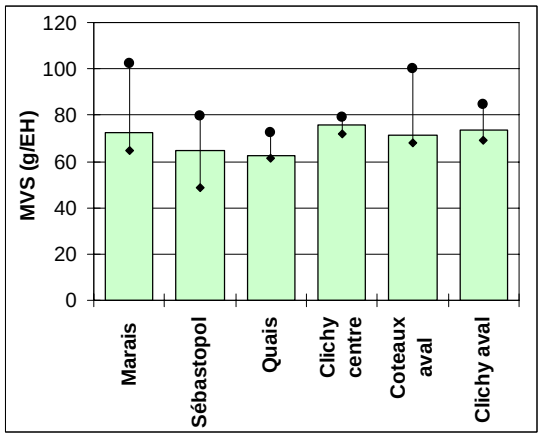


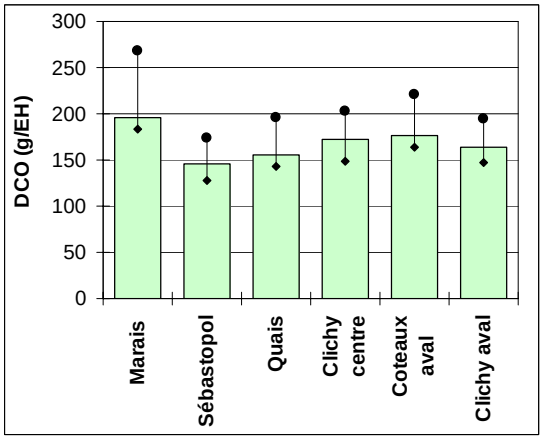
ANNEXE 8: concentrations en métaux lourds des eaux usées de temps sec

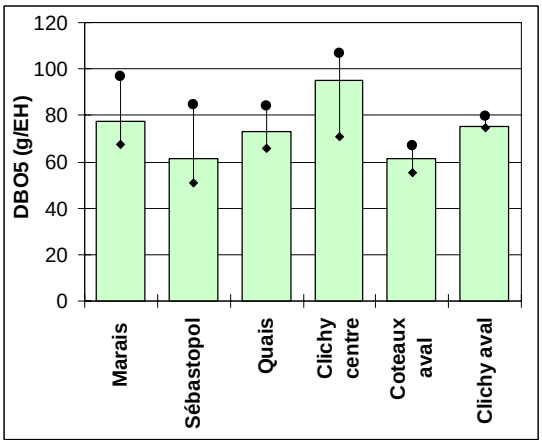
Concentrations (µg/l)	Cdt	Cut	Pbt	Znt
Marais	0.19-0.48, [0.40]	54-104, [94]	21-31, [22]	140-202, [174]
Sébastopol	0.39-0.56, [0.54]	96-128, [110]	19-26, [21]	159-207, [176]
Quais	0.28-0.69, [0.47]	64-98, [79]	15-42, [23]	140-394, [292]
Clichy centre	0.30-0.54, [0.46]	63-99, [70]	18-29, [20]	142-316, [158]
Coteaux aval	0.36-0.42, [0.38]	80-94, [84]	21-31, [25]	137-159, [144]
Clichy aval	0.27-0.55, [0.36]	68-94, [75]	20-49, [28]	141-466, [210]
1er décile-9ème décile, [médianes] sur l'ensemble de la campagne de mesure de temps sec.				

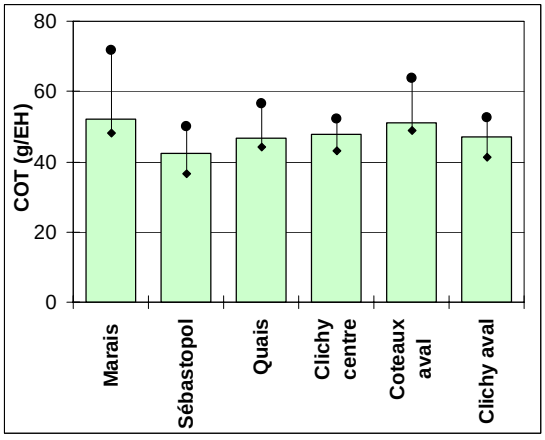
ANNEXE 9: Flux en EHN des MES, MVS, DCO, DBO, COT et NTK mesurés par temps sec

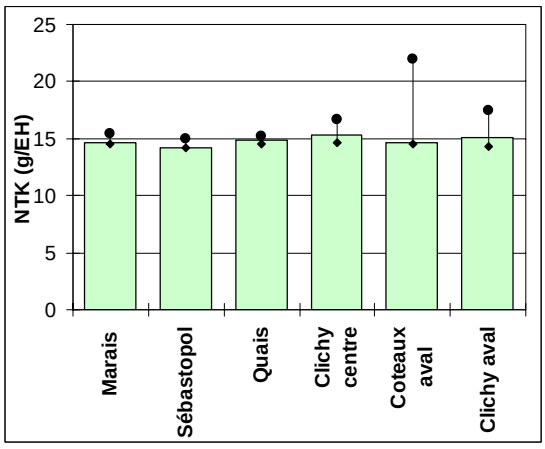








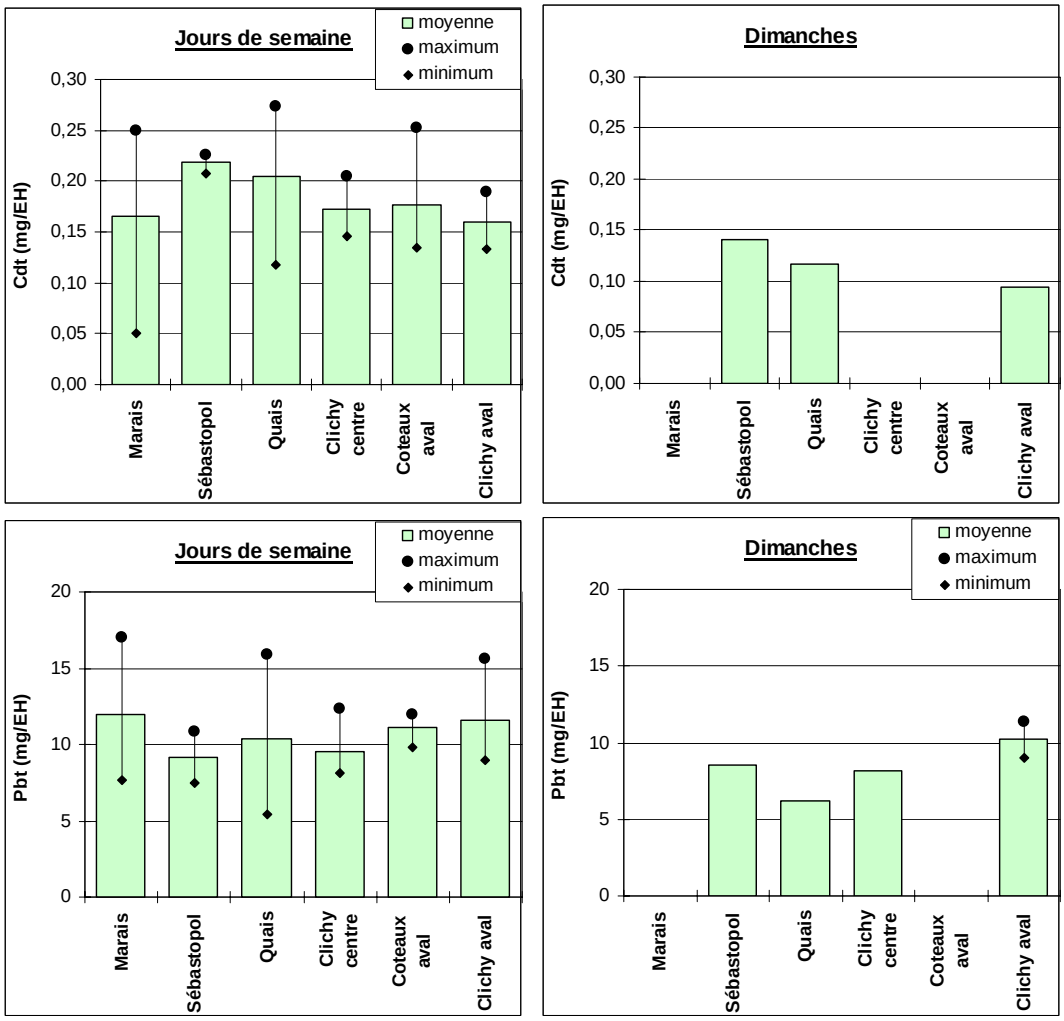




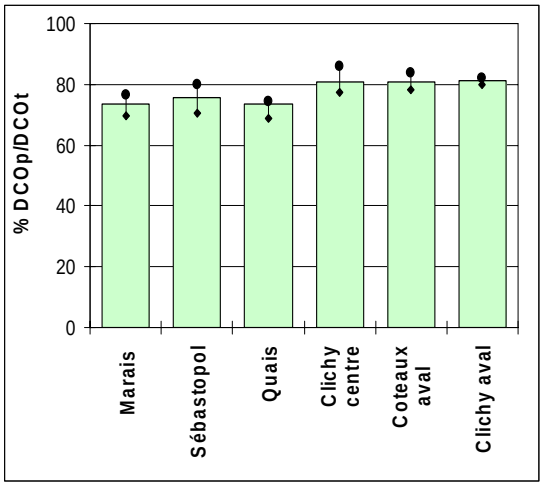
ANNEXE 10: Flux par EHN des métaux lourds des eaux usées de temps sec

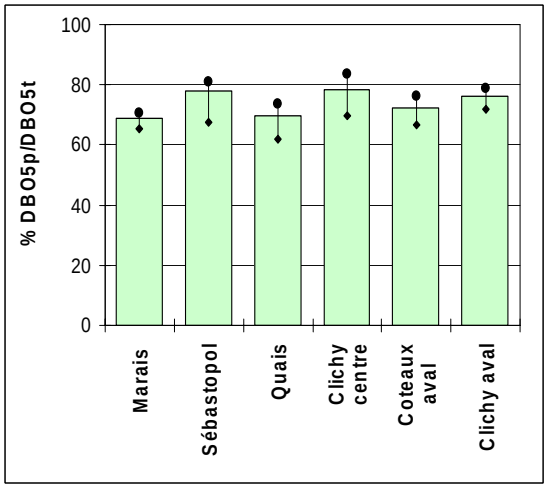
Flux (g/EHN)	Cdt	Cut	Pbt	Znt
Marais	0.08-0.20; [0.24]	28-47,[30]	9-15;[12]	58-97;[97]
Sébastopol	0,16-0,22;[0,22]	40-51;[44]	8-10,[9]	63-87;[70]
Quais	0,12-0,26;[0,20]	24-38;[32]	6-15;[9]	58-149;[102]
Clichy centre	0,15-0,20;[0,17]	2737;[32]	8-9;[11]	68-118 ;[70]
Coteaux aval	0,14-0,23;[0,14]	30-51;[31]	10-12;[12]	52-87;[53]
Clichy aval	0.11-0.18;[0.15]	29-36;[34]	9-13;[11]	66-171;[84]
1er décile-9ème décile, [médianes], sur l'ensemble de la campagne de mesure de temps sec.				

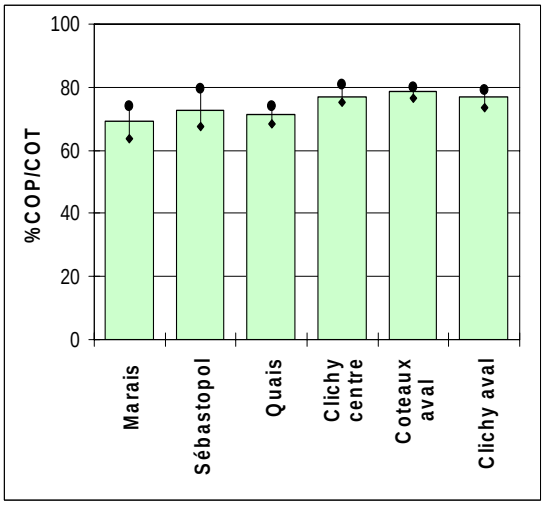
ANNEXE 11 : variabilité des flux journaliers en EH d'azote du Cut et Znt, entre la semaine et le dimanche

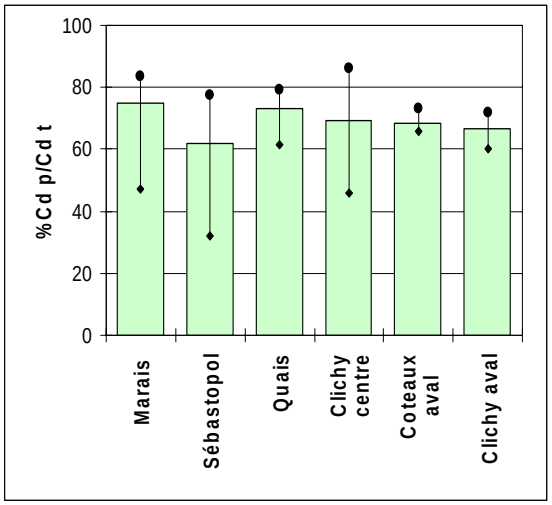


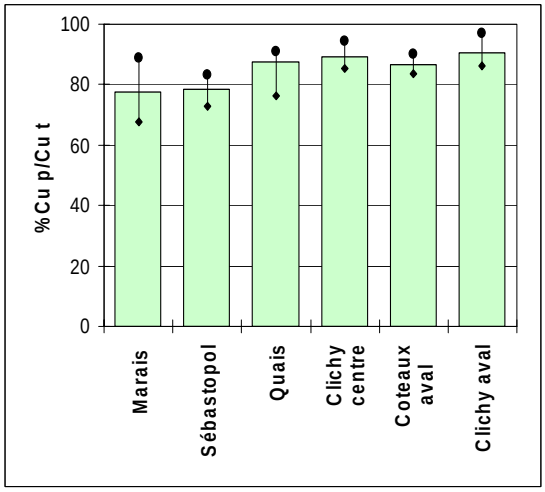
ANNEXE 12: pourcentages de la pollution liée aux particules dans les eaux usées de temps sec

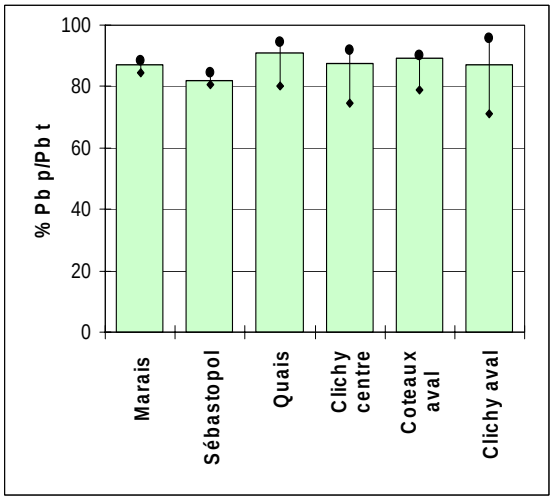


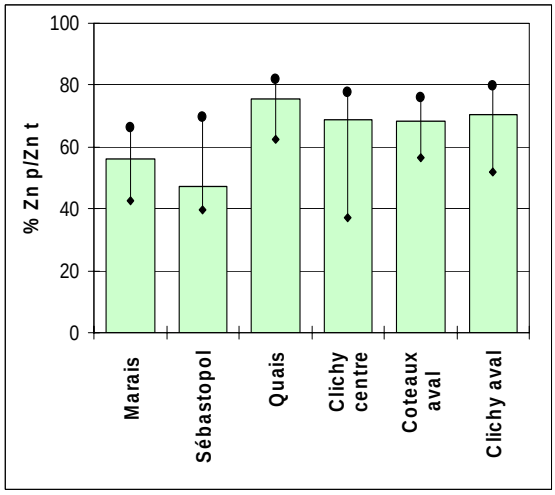




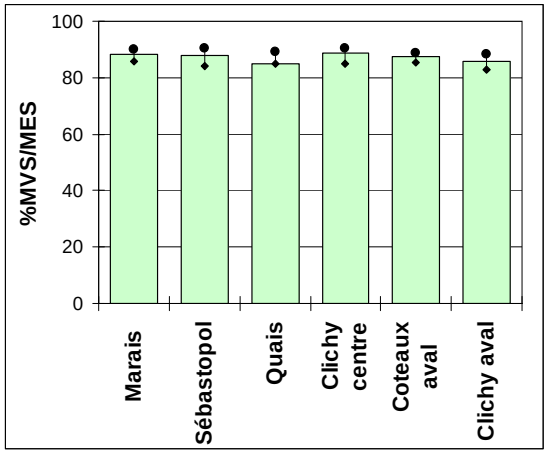

%Cd p/Cd t
100
80
60
40
20
0
Marais
Sébastopol
Quais
Clichy centre
Coteaux aval
Clichy aval

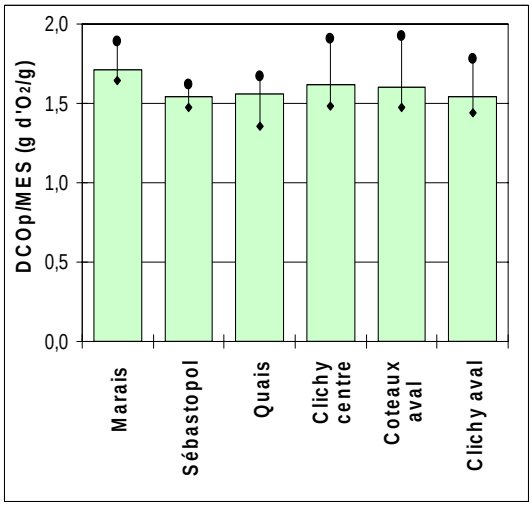

%Cu p/Cu t
100
80
60
40
20
0
Marais
Sébastopol
Quais
Clichy centre
Coteaux aval
Clichy aval

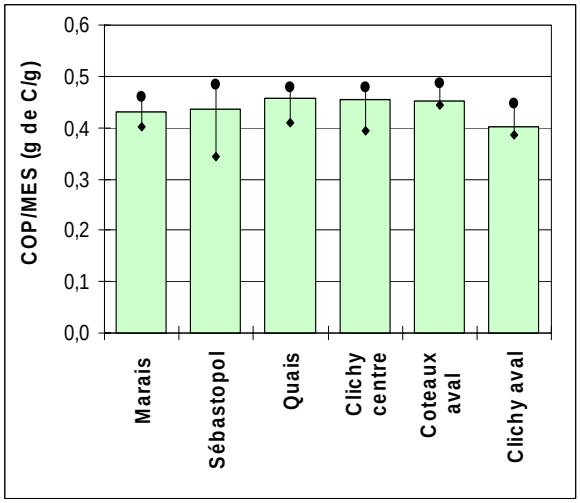

% Pb p/Pb t
100
80
60
40
20
0
Marais
Sébastopol
Quais
Clichy centre
Coteaux aval
Clichy aval


% Zn p/Zn t
100
80
60
40
20
0
Marais
Sébastopol
Quais
Clichy centre
Coteaux aval
Clichy aval

ANNEXE 13: teneurs en matières organiques des particules, dans les eaux usées de temps sec





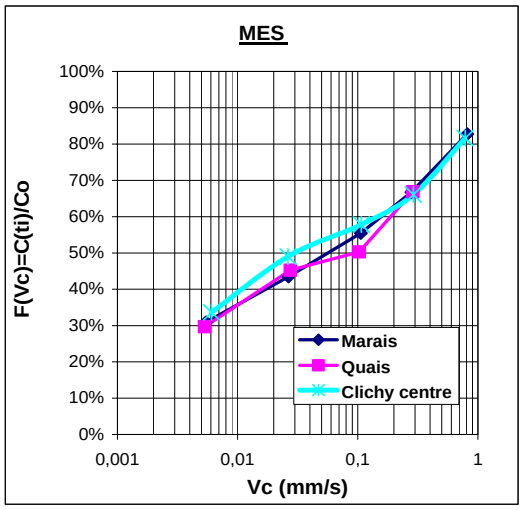


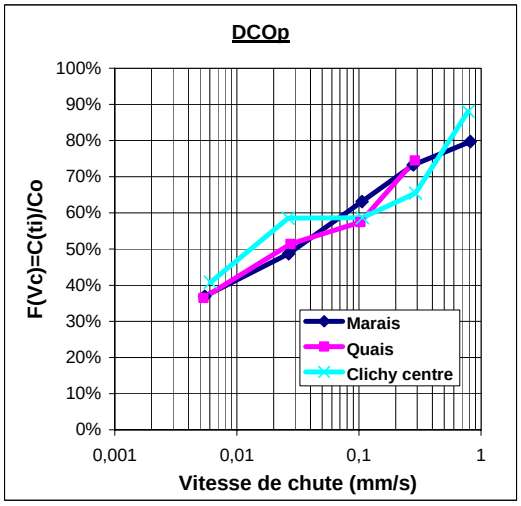
ANNEXE 14: teneurs en métaux lourds des particules dans les eaux usées de temps sec

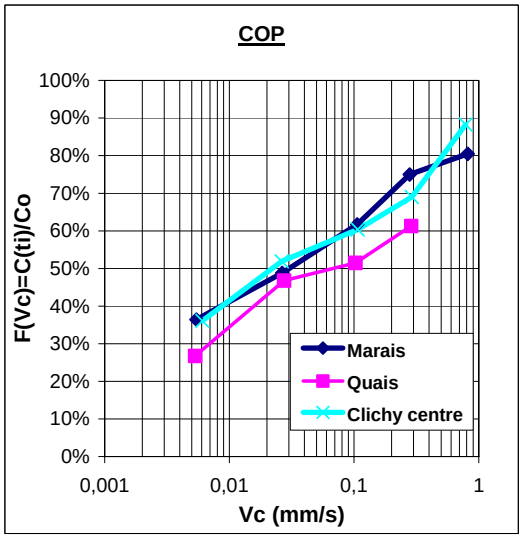
(mg/kg)	Cd p / MES	Cu p / MES	Pb p / MES	Zn p / MES
Marais	0.71-1.27, [1.22]	243-405,[284]	99-126, [123]	371-609, [398]
Sébastopol	0.25-2.06, [1.17]	470-568,[476]	93-120, [107]	346-895, [516]
Quais	0.94-2.2,[1.7]	268-457, [317]	68-167, [117]	475-1545, [1006]
Clichy centre	1.02-1.91, [1.33]	269-459, [328]	77-132, [93]	291-1066, [579]
Coteaux aval	1.05-1.28, [1.22]	280-386, [318]	76-112, [106]	337-513, [494]
Clichy aval	0.82-1.52, [1.22]	272-390,[358]	76-158, [115]	337-1415, [668]

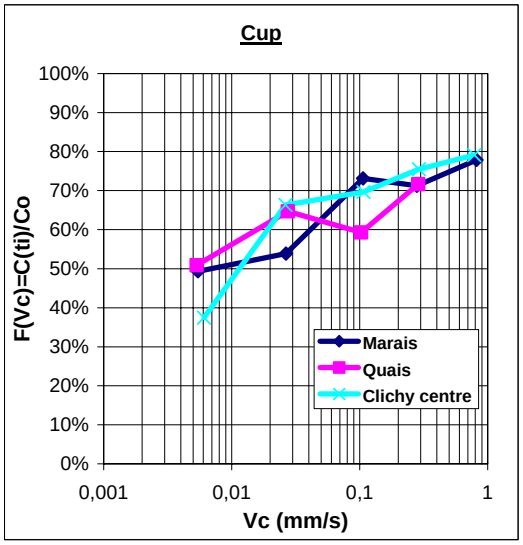
1er décile-9ème décile, [médianes] sur l'ensemble de la campagne de mesure de temps sec.

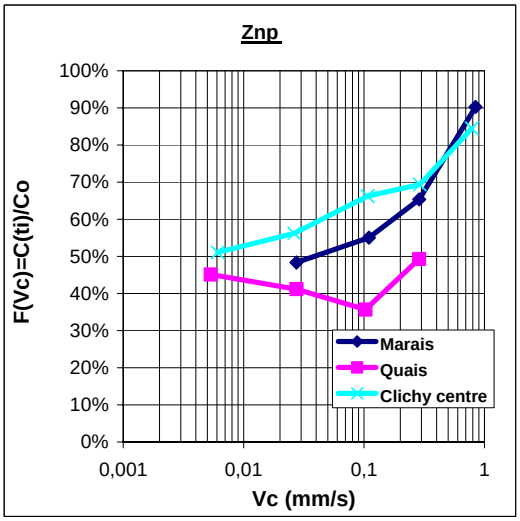
ANNEXE 15 : variabilité spatiale des vitesses de chute des MES, DCOp, COP, Cup et Znp, dans les eaux usées de temps sec











ANNEXE 16 : Récapitulatif de la campagne de temps de pluie

	MES	MVS	DCO	DBO	COT	NTK	Cd	Cu	Pb	Zn	pH	Conductivité
Marais	15	15	13	9	13	10	9	10	10	10	11	14
Sébastopol	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Quais	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Clichy centre	14	14	13	10	13	11	10	11	11	11	12	14
Coteaux aval	9	9	9	9	9	9	8	8	8	8	8	9
Clichy aval	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

Pluies échantillonnées sur chaque site de mesure

Evènements pluvieux	**Marais**	**Sébastopol**	**Quais**	**Clichy centre**	**Coteaux aval**	**Clichy aval**
30 Avril 2003	×	×	×	×	×	-
05 Mai 2003	×	×	×	×		×
02 Juillet 2003			×		×	×
16 Juillet 2003		×	×	×	×	×
30 Novembre 2003	×	-	×	×	×	
18 Avril 2004	×	-	-	×		×
29 Avril 2004	×	-	-	×		×
30 Avril 2004		-	-		×	×
04 Mai 2004	×	-	-	×	×	-
07 Juillet 2004-a	×	-	-	×	×	-
07 Juillet 2004-b	×	-	-	×	×	×
18/07/04	×	-	-	×	×	×
16 Décembre 2004	×	-	-	×	-	-
17 Décembre 2004	×	-	-	-	-	-
22 Mars 2005	×	-	-	-	-	-
4 Avril 2005	×	-	-	×	-	-
6 Avril 2005	×	-	-	×	-	-
14 Avril 2005	×	-	-	×	-	-

Distribution des polluants par classe de vitesse de chute-

Evènements pluvieux	Marais		Sébastopol		Quais		Clichy centre		Coteaux aval		Clichy aval	
	VICAS	VICPOL	VICAS	VICPOL	VICAS	VICPOL	VICAS	VICPOL	VICAS	VICPOL	VICAS	VICPOL
30 Avril 2003	-		-		-		-		-		-	
05 Mai 2003	-		-		-		-		-		-	
02 Juillet 2003	-		-		MES, COP	-	-		MES, COP	-	MES, COP	
16 Juillet 2003	-		-		-		-		-		-	
30 Novembre 2003	MES, , COP	MES, métaux	-		MES, COP	-	MES, COP	-	-		-	
18 Avril 2004	MES, COP	MES, COP, DCO, NTK, métaux,			-		MES,COP	-			MES, COP	-
29 Avril 2004	MES, COP	MES, COP, DCO, NTK, métaux,	-		-		-		-		-	
30 Avril 2004												
04 Mai 2004	MES, COP	-	-		-		-		-		-	
07 Juillet 2004-a	-	MES, COP, DCO, NTK, métaux	-		-		-		-		-	
07 Juillet 2004-b												
18/07/04	MES, COP		-		-		-		-		-	
16 Décembre 2004	-	MES, MVS	-		-		-	MES, MVS	-		-	
17 Décembre 2004	-		-		-		-		-		-	
22 Mars 2005	-	MES, MVS	-		-		-		-		-	
4 Avril 2005	-	MES, MVS	-		-			MES, MVS	-		-	
6 Avril 2005	-	MES,	-		-			MES,	-		-	

		MVS				MVS		
14 Avril 2005	-	MES, MVS, COP, DCO, NTK, métaux	-	-	-	MES, MVS, COP, DCO, NTK, métaux	-	-
19 Août 2005	-	MES, COP, NTK, métaux			MES	-	-	-
25 Août 2005	-	MES, COP, NTK, métaux			-	MES, COP, NTK, métaux	-	-

ANNEXE 17: caractéristiques moyennes de pluies étudiées sur les bassins versants de l'OPUR

Hauteur (mm)	30-avr-03	05-mai-03	02&03-juliet-03	16-juil-03	30nov&01déc-03	18-avr-04	29&30/04/2004	04-mai-04	07/07/2004-A	07/07/2004-B	18-juil-04	16-déc-04	17-déc-04	22-mars-05	04-avr-05	06-avr-05	14-avr-05
Marais	8.80	2.80	18.80	5.60	15.60	6.20	21.6	4.60	2.80	6.40	7.20	2.60	5.80	3.40	7.20	8.80	2.40
Sébastopol	8.80	2.80	35.80	2.00	15.60	6.20	18.00	4.60	2.20	6.60	2.60	2.60	5.80	3.40	7.20	8.80	2.40
Quais	6.70	2.81	17.18	6.15	17.12	7.05	20.32	4.07	2.67	6.78	6.65	2.35	6.30	2.81	10.42	7.95	3.01
Clichy centre	6.17	3.16	30.56	3.79	17.46	6.34	18.90	4.31	2.27	7.13	4.78	3.12	5.32	3.04	9.68	7.96	3.13
Coteaux aval	6.63	2.80	26.36	4.74	16.27	6.48	18.86	3.52	2.58	6.50	4.78	2.98	5.30	2.85	11.47	8.40	3.32
Clichy aval	5.90	3.13	30.06	4.08	17.30	6.20	18.63	4.01	2.33	7.19	4.53	1.82	5.17	2.97	10.62	7.95	3.30

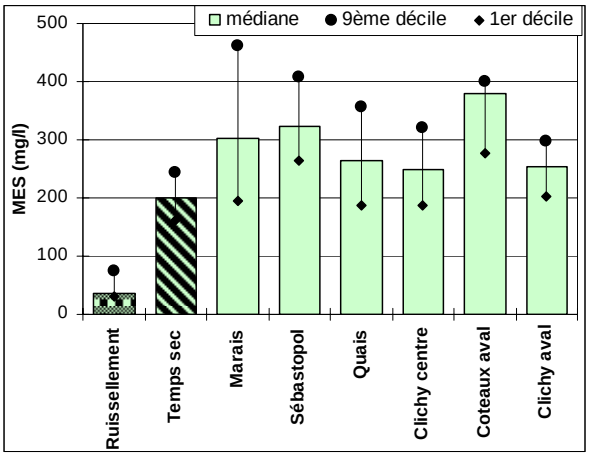
Imoyenne (mm/h)	30-avr-03	05-mai-03	02&03-juliet-03	16-juil-03	30nov&01déc-03	18-avr-04	29&30/04/2004	04-mai-04	07/07/2004-A	07/07/2004-B	18-juil-04	16-déc-04	17-déc-04	22-mars-05	04-avr-05	06-avr-05	14-avr-05
Marais	6.38	1.32	2.11	42.00	1.95	1.03	2.0	1.26	3.11	12	15.43	1.28	1.1	1.51	2.70	12.88	1.81
Sébastopol	6.38	1.32	4.72	24.00	1.95	1.03	5.41	1.26	2.44	12	1.30	1.28	1.1	1.51	2.70	12.88	1.81
Quais	2.81	0.80	1.89	46.16	1.94	1.11	5.95	0.87	1.89	6	12.08	1.12	1.1	1.25	2.31	9.35	1.10
Clichy centre	2.59	0.68	3.36	16.23	1.97	1.00	5.28	0.92	1.50	6	2.11	0.66	0.9	1.24	2.05	3.26	1.08
Coteaux aval	2.78	0.59	2.90	21.87	1.84	1.04	5.24	0.75	2.38	10	2.39	0.62	0.5	1.27	2.43	3.44	1.13
Clichy aval	2.47	0.64	3.31	17.50	1.94	0.97	5.07	0.85	1.46	6	2.00	0.87	0.5	1.21	2.25	3.26	1.11

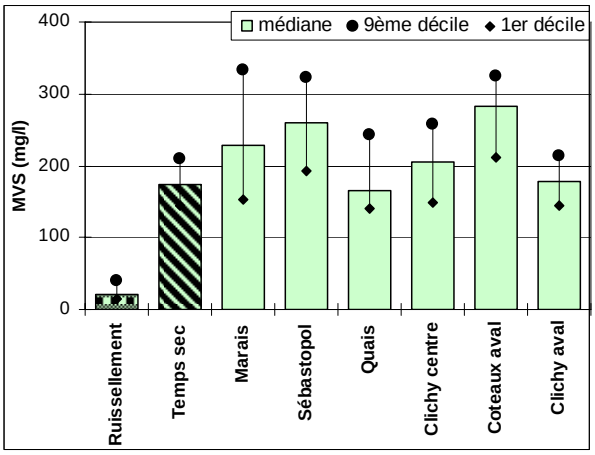
DP (h :mn)	30-avr-03	05-mai-03	02&03-juliet-03	16-juil-03	30nov&01déc-03	18-avr-04	29&30/04/2004	04-mai-04	07/07/2004-A	07/07/2004-B	18-juil-04	16-déc-04	17-déc-04	22-mars-05	04-avr-05	06-avr-05	14-avr-05
Marais	01:22:49	02:07:23	08:55:00	00:08:00	07:59:45	06:02:49	10:38:21	03:38:47	00:54:00	00:32:00	0:28:00	2:02:19	05:12:43	2:14:47	2:39:44	0:41:00	1:19:43
Sébastopol	01:22:49	02:07:23	07:35:00	00:05:00	07:59:45	06:02:49	6:32:34	03:38:47	00:54:00	00:34:00	2:00:00	2:02:19	05:12:43	2:14:47	2:39:44	0:41:00	1:19:43
Quais	02:23:00	03:32:04	09:05:00	00:08:00	08:49:00	06:20:00	6:54:07	04:42:14	01:25:00	01:03:00	0:33:00	2:06:17	05:53:40	2:14:47	4:30:54	0:51:00	2:43:30
Clichy centre	02:23:00	04:40:22	09:05:00	00:14:00	08:51:00	06:20:00	7:16:58	04:42:14	01:31:00	01:09:00	2:16:00	4:41:17	05:53:40	2:27:13	4:43:34	2:26:20	2:53:48
Coteaux aval	02:23:00	04:45:52	09:05:00	00:13:00	08:51:00	06:15:00	7:21:09	04:42:14	01:05:00	00:38:00	2:00:00	4:47:17	10:02:40	2:14:47	4:43:34	2:26:20	2:57:00
Clichy aval	02:23:00	04:53:52	09:05:00	00:14:00	08:56:00	06:22:00	7:26:09	04:42:14	01:36:00	01:09:00	2:16:00	2:06:17	10:08:40	2:27:13	4:43:34	2:26:20	2:58:00

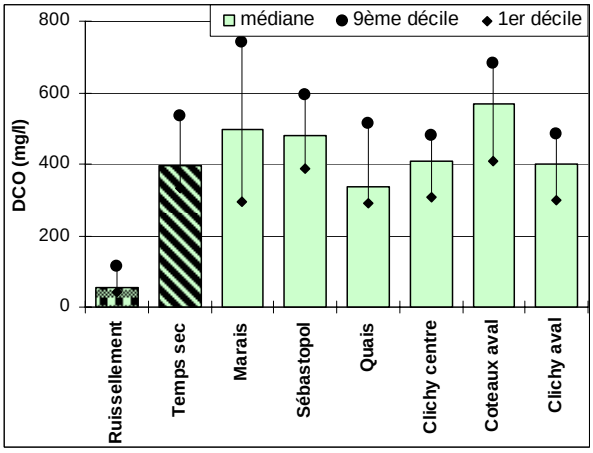
Imax (mm/h)	30-avr-03	05-mai-03	02&03-juliet-03	16-juil-03	30nov&01déc-03	18-avr-04	29&30/04/2004	04-mai-04	07/07/2004-A	07/07/2004-B	18-juil-04	16-déc-04	17-déc-04	22-mars-05	04-avr-05	06-avr-05	14-avr-05
Marais	80.0	15.0	12.0	00:08:00	9.2	2.5	18.90	15.0	12.0	72.0	60.00	9.90	5.1	8.70	24.00	48.00	4.80
Sébastopol	80.0	15.0	168.0	00:05:00	9.2	2.5	29.30	15.0	12.0	60.0	4.00	9.90	5.1	8.70	24.00	48.00	4.80
Quais	38.9	11.5	22.2	00:08:00	10.0	3.2	46.74	19.1	10.7	69.4	57.44	7.03	4.7	6.72	27.70	45.44	3.35
Clichy centre	45.6	11.8	234.8	00:14:00	9.7	2.6	35.30	18.7	10.0	70.9	32.68	6.67	4.6	7.45	22.75	68.47	3.86
Coteaux aval	38.2	9.4	134.7	00:13:00	9.4	2.9	32.14	16.7	12.0	67.5	34.69	5.78	6.3	8.22	26.87	60.39	3.70
Clichy aval	38.5	9.7	197.6	00:14:00	9.8	2.6	32.40	18.2	10.5	77.1	30.32	5.69	5.4	7.64	23.44	66.38	3.84

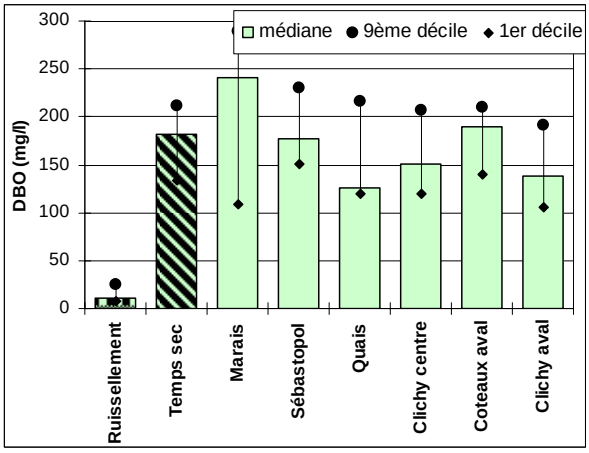
DST (jours)	30-avr-03	05-mai-03	02&03-juliet-03	16-juil-03	30nov&01déc-03	18-avr-04	29&30/04/2004	04-mai-04	07/07/2004-A	07/07/2004-B	18-juil-04	16-déc-04	17-déc-04	22-mars-05	04-avr-05	06-avr-05	14-avr-05
Marais	2.65	3.62	0.88	13.42	4.13	0.05	0.7	3.52	2.89	0.10	1.06	17.38	0.58	10.05	5.11	1.86	0.57
Sébastopol	2.65	3.62	1.12	13.48	4.13	0.05	0.72	3.52	2.87	0.11	1.04	17.38	0.58	10.05	5.11	1.86	0.57
Quais	1.42	2.60	0.88	13.42	0.38	0.03	0.72	3.52	2.89	0.10	1.06	13.81	0.58	10.05	5.07	1.86	0.15
Clichy centre	1.42	2.60	0.88	0.72	0.38	0.03	0.72	3.52	2.86	0.10	1.03	13.81	0.58	10.05	5.07	0.25	0.15
Coteaux aval	1.42	2.60	0.88	13.42	0.38	0.03	0.72	3.52	2.85	0.10	1.04	13.81	0.57	10.05	5.07	0.25	0.15
Clichy aval	1.42	2.60	0.88	0.72	0.38	0.03	0.72	3.52	2.85	0.10	1.03	13.81	0.57	10.05	5.07	0.25	0.15

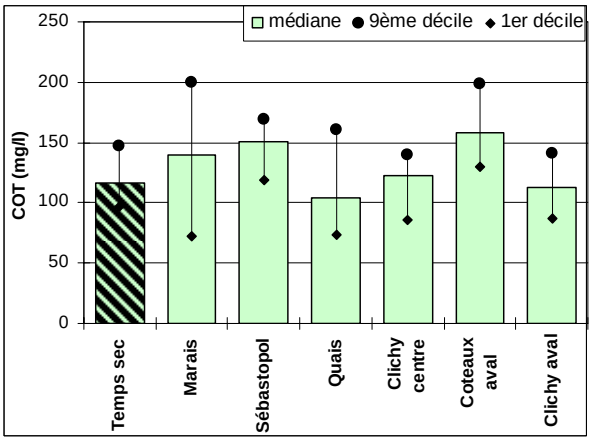
ANNEXE 18 : concentrations des MES, MO et NTK mesurées par temps de pluie, aux exutoires des bassins versants

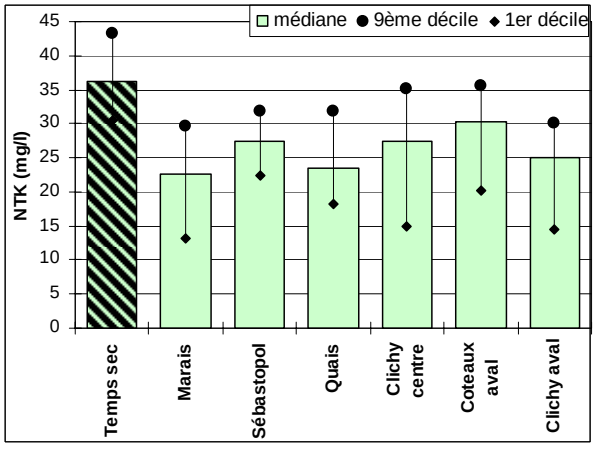










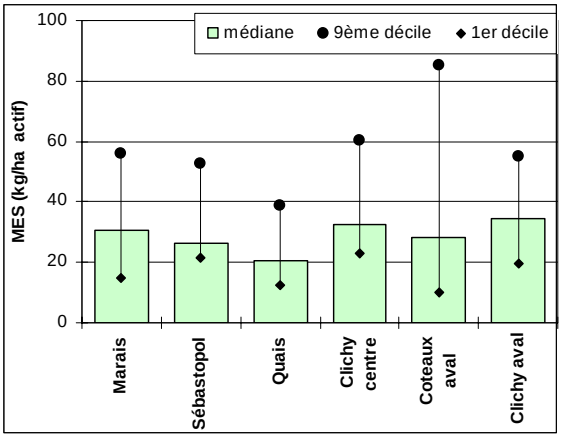


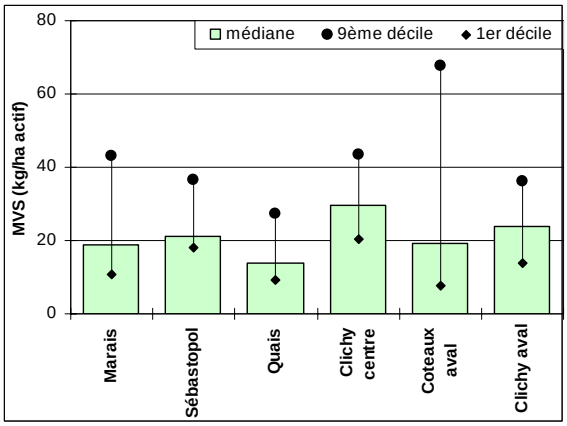
ANNEXE 19 : concentrations des métaux lourds mesurées par temps d pluie, aux exutoires des bassins versants

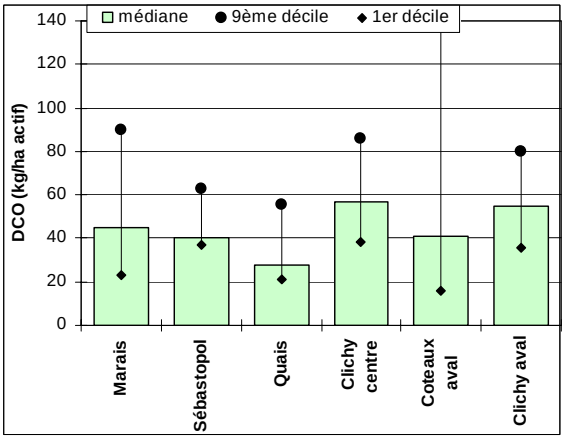
Concentrations (µg/l)	Cdt	Cut	Pbt	Znt
Marais	1.08-1.8,[1.55]	69-273,[145]	80-247,[150]	942-2008,[1287]
Sébastopol	1.3-1.86,[1.31]	168-273,[210]	101-229,[140]	901-1761,[1345]
Quais	0.86-1.32,[1.05]	90-216,[100]	61-204,[65]	811-1516,[1020]
Clichy centre	0.7-1.46,[0.90]	80-156,[120]	74-230, [93]	867-1350,[1040]
Coteaux aval	1.02-3.01,[2.02]	123-225,[175]	90-337,[133]	1246-2040,[1540]
Clichy aval	0.75-1.65,[1.05]	75-186,[130]	60-289,[131]	766-1874,[1140]
Eaux usées de temps sec	0.3-0.6,[0.4]	61-110,[79]	18-32,[23]	136-369,[172]
Eaux de ruissellement (Garnaud ,1999)	1.4-4.05,[1.8]	37-131,[56]	257-724,[425]	2257-8877,[3199]

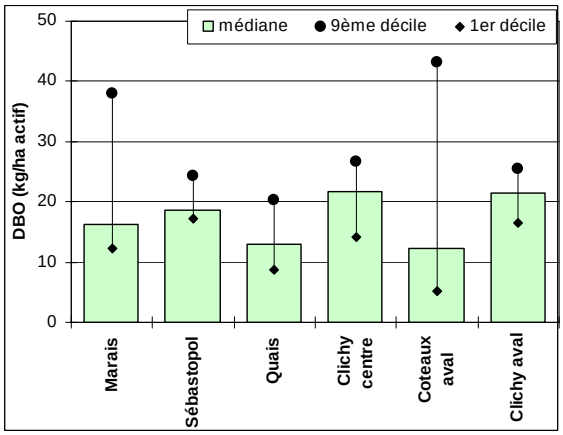
1er décile-9ème décile, [médianes] sur l'ensemble de la campagne de mesure

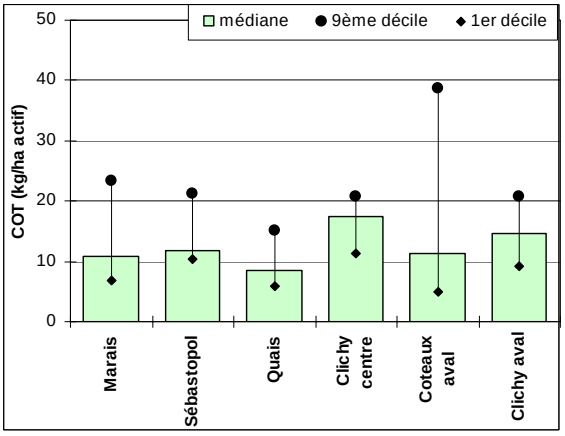
ANNEXE 20 : Flux par hectare actif des MES et des Matières oxydables et azotées

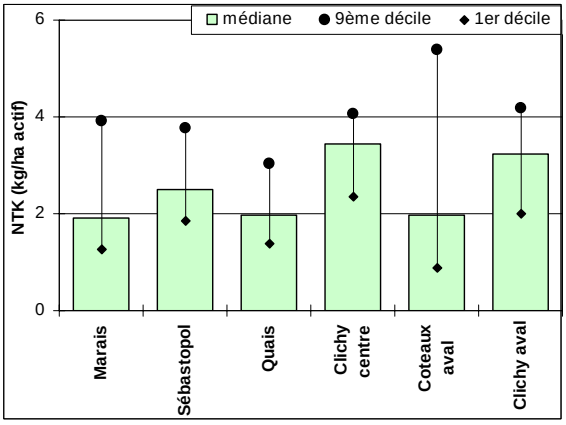












ANNEXE 21 : Flux par hectare actif des métaux lourds

Flux (g/ha_actif)	Cd	Cu	Pb	Zn
Marais	0.03-0.32, [0.10]	8-33, [14]	8-46, [13]	72-360, [98]
Sébastopol	0.11-0.26, [0.15]	14-36, [17]	7-32, [14]	60-242, [136]
Quais	0.06-0.09, [0.07]	6-18, [13]	4-18, [11]	57-146, [95]
Clichy centre	0.04-0.21, [0.11]	12-27, [14]	9-32, [13]	96-263, [116]
Coteaux aval	0.04-0.32, [0.13]	5-33, [10]	3-41, [9]	44-281, [97]
Clichy aval	0.05-0.28, [0.21]	12-35, [17]	8-61, [17]	82-404, [202]
1er décile-9ème décile, [médianes] sur la période de la campagne de mesure				

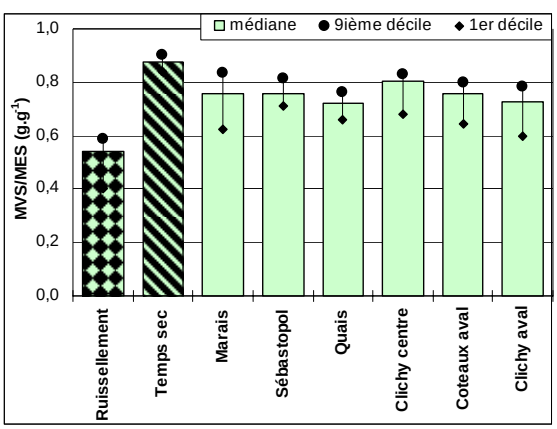
ANNEXE 22 : Proportion de la pollution organique et azotée liée aux particules

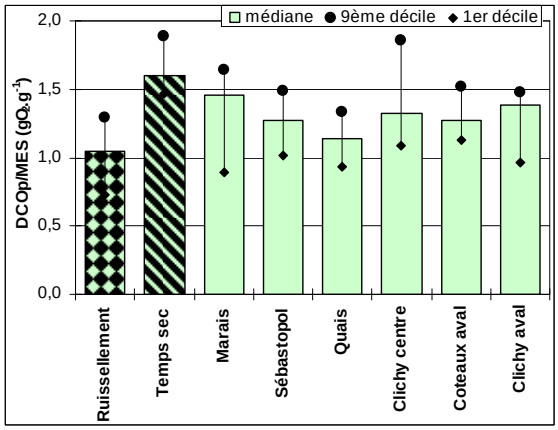
Pourcentages de pollution liée aux particules	% DCOp/DCOt	% DBO_5p/DBO_5t	% COP/COT	% NTKp/NTKt
Marais	67-90, [83]	73-88, [86]	77-90, [82]	31-53,[40]
Sébastopol	83-86, [84]	80-84, [83]	83-87, [84]	31-53, [34]
Quais	69-82, [79]	77-83, [80]	76-83, [82]	28-54, [37]
Clichy centre	78-87, [84]	77-86, [81]	80-87, [83]	29-47,[32]
Coteaux aval	82-90, [84]	76-88, [82]	79-90, [87]	37-56,[45]
Clichy aval	79-86, [82]	74-86, [81]	80-84, [81]	28-50,[37]
Eaux usées de temps sec	72-83,[79]	65-81,[72]	68-80,[75]	16-27,[20]
Eaux de ruissellement (Gromaire, 1998)	62-79,[69]	58-72,[64]	-	-
1^{er} décile-$9^{ème}$ décile, [médianes] sur l'ensemble de la campagne de mesure				

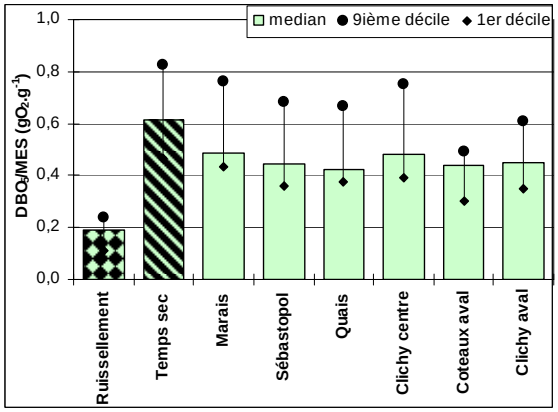
ANNEXE 23 : Proportion de la pollution métallique liée aux particules

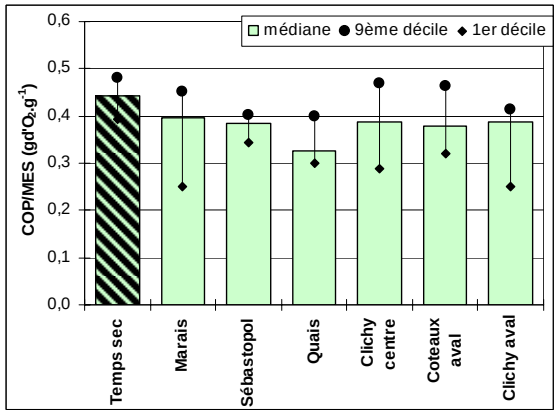
Pourcentages de pollution liée aux particules	% DCOp/DCOt	% DBO_5p/DBO_5t	% COP/COT	% NTKp/NTKt
Marais	67-90, [83]	73-88, [86]	77-90, [82]	31-53,[40]
Sébastopol	83-86, [84]	80-84, [83]	83-87, [84]	31-53, [34]
Quais	69-82, [79]	77-83, [80]	76-83, [82]	28-54, [37]
Clichy centre	78-87, [84]	77-86, [81]	80-87, [83]	29-47,[32]
Coteaux aval	82-90, [84]	76-88, [82]	79-90, [87]	37-56,[45]
Clichy aval	79-86, [82]	74-86, [81]	80-84, [81]	28-50,[37]
Eaux usées de temps sec	72-83,[79]	65-81,[72]	68-80,[75]	16-27,[20]
Eaux de ruissellement (Gromaire, 1998)	62-79,[69]	58-72,[64]	-	-
1^{er} décile-$9^{ème}$ décile, [médianes] sur l'ensemble de la campagne de mesure				

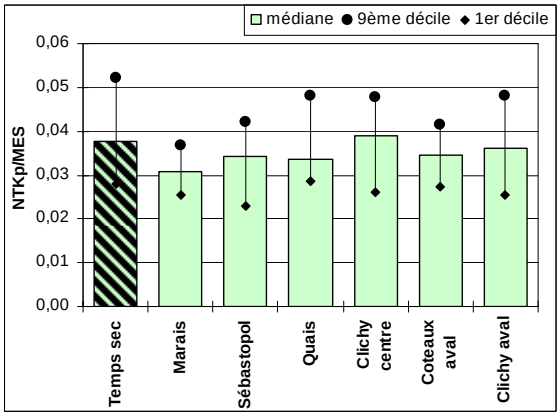
ANNEXE 24 : Teneurs en matières organiques et azotées des particules









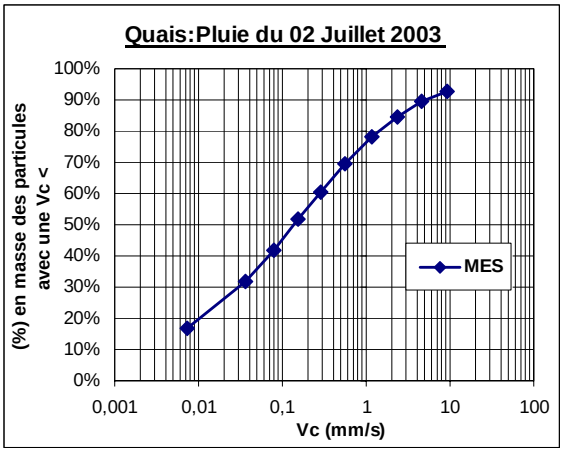


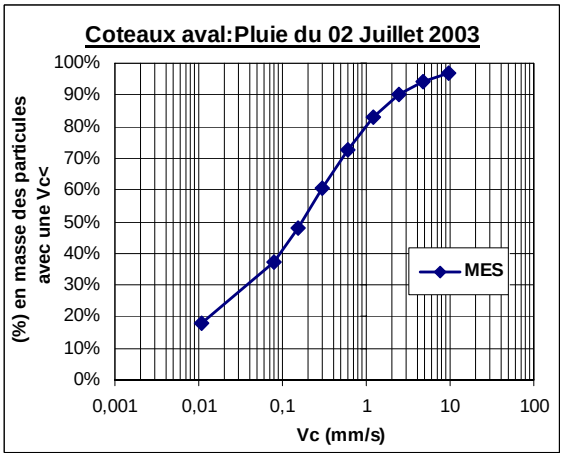
ANNEXE 25 : Teneurs en métaux lourds des particules

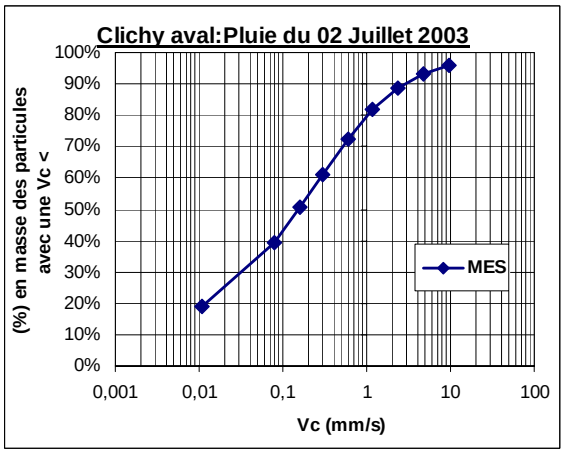
Teneurs sur les particules	Cd p / MES (mg/Kg)	Cu p / MES (mg/Kg)	Pb p / MES (mg/Kg)	Zn p / MES (mg/Kg)
Marais	2.1-4.7,[3.1]	329-633,[479]	364-898,[480]	3007-4674,[3945]
Sébastopol	3.5-3.8, [3.7]	490-706, [626]	417-640, [584]	2588-4936, [3750]
Quais	1.0-4.4, [2.1]	300-575, [463]	249-627, [344]	2895-4386, [3400]
Clichy centre	1.9-5.1, [3.0]	368-603,[429]	293-742,[426]	3129-5268,[3626]
Coteaux aval	2.6-7.1,[4.1]	330-646,[461]	264-1014,[344]	3179-5343,[4280]
Clichy aval	2.4-5.0,[3.6]	332-661,[551]	253-1137,[528]	3150-6590,[3845]
Eaux usées de temps sec	0.8-2.1, [1.3]	260-476, [329]	60-133, [110]	308-1303, [560]
Eaux de ruissellement (Garnaud, 1999 ; Gromaire,1998)	5.4-16.0, [10]	434-977, [653]	4129-6278, [4953]	5385-19252, [14435]
Marais (Gromaire, 1998)	4-11, [8]	390-700, [500]	600-1600, [900]	4700-9000, [6900]
Clichy (Saget, 1994)	6-17, [12]	420-681, [612]	433-1755,[704]	3421-8765,[6018]
Bad Mergendheim (Michelbach et al ; 1992)	1.55-6.52	73-187	33-294	1136-1880
1er décile-9ème décile, [médianes] sur l'ensemble de la campagne de mesure.				

ANNEXE 26: Vitesses de chute des particules mesurées par temps de pluie, aux exutoires des bassins versants (VICAS)

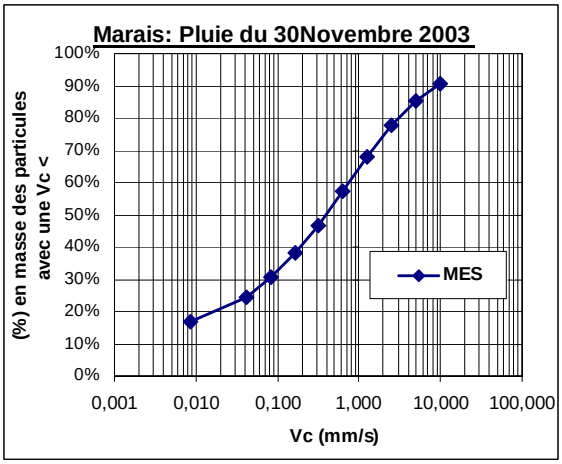
Pluie du 02 Juillet 2003

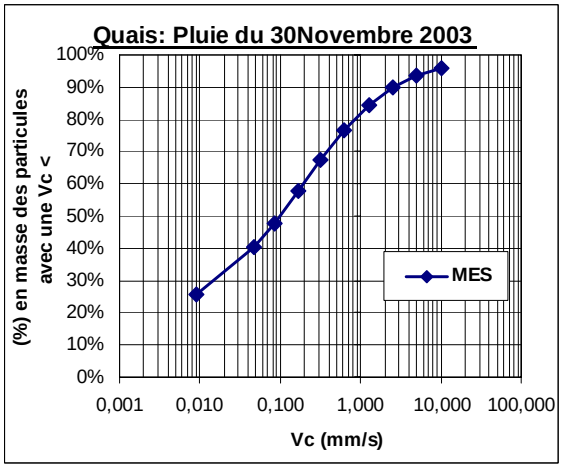


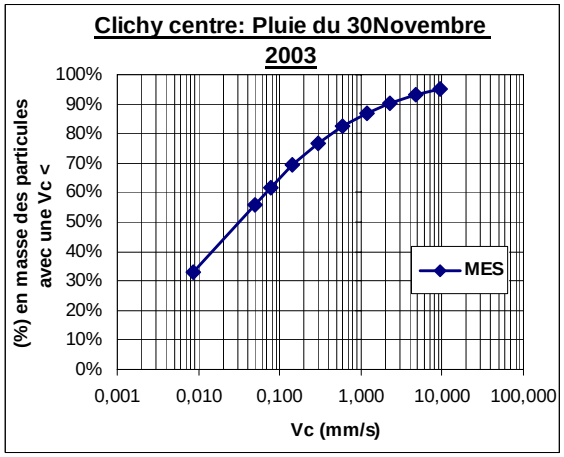




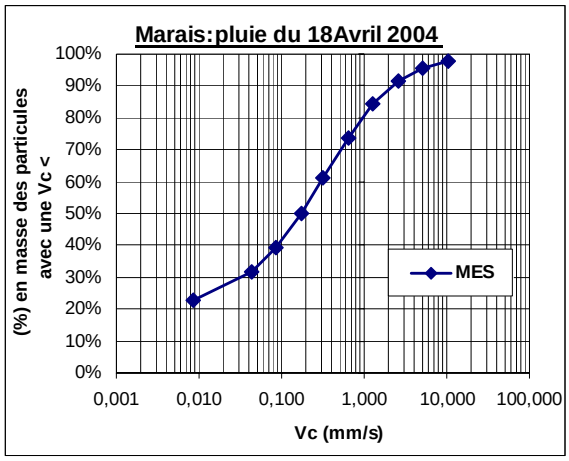
Pluie du 30 Novembre 2003

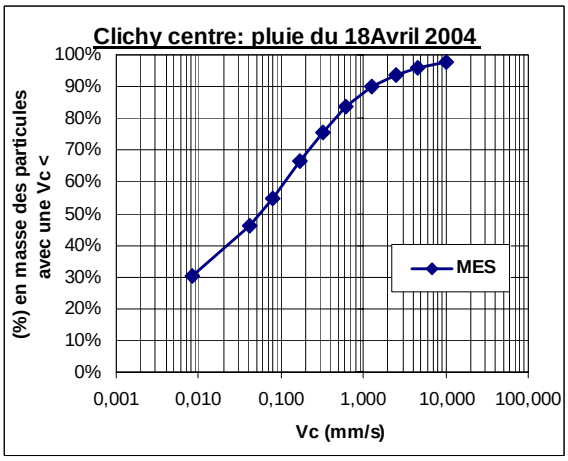


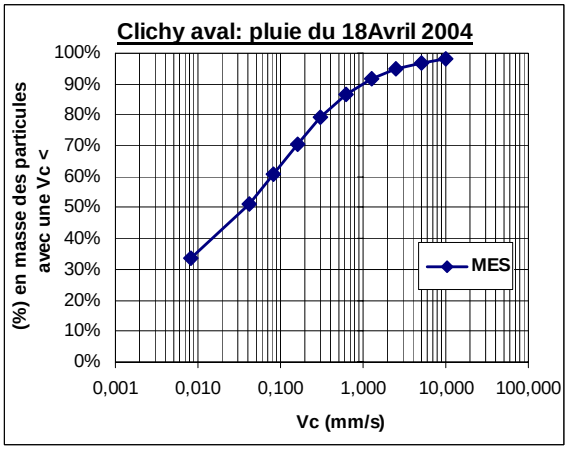




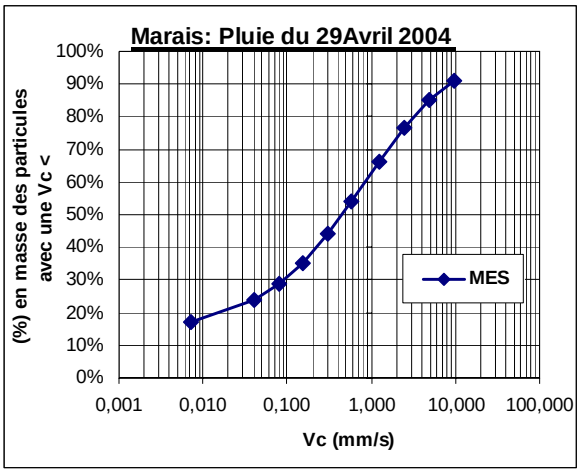
Pluie du 18 Avril 2004



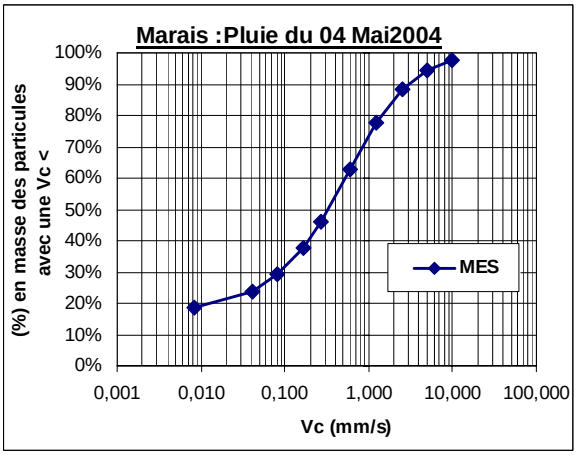




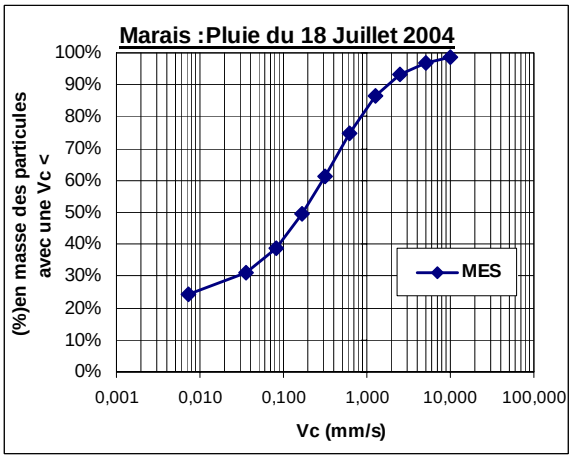
Pluie du 29 Avril 2004



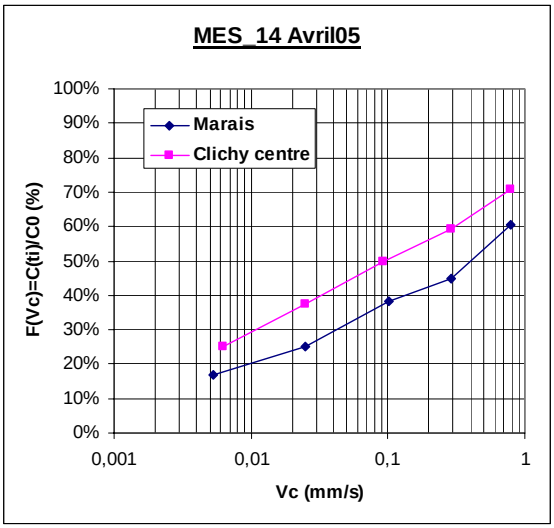
Pluie du 04 Mai 2004

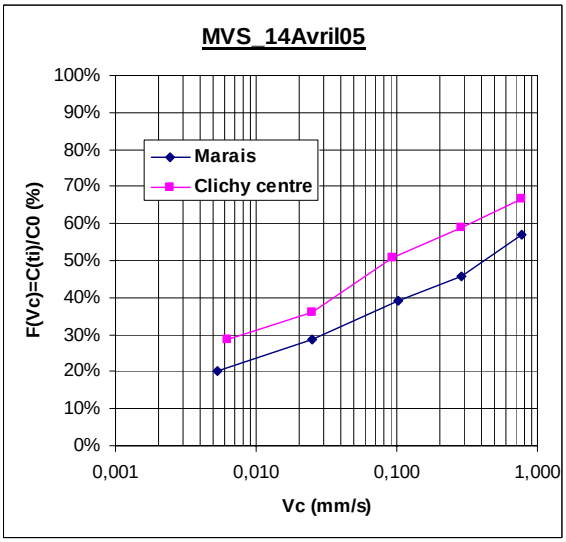


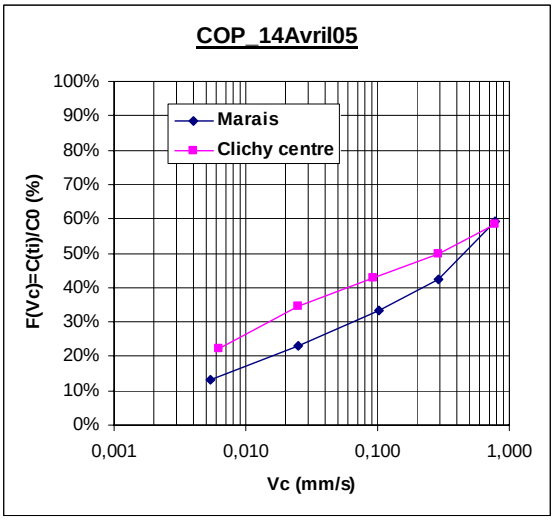
Pluie du 18 Juillet 2004

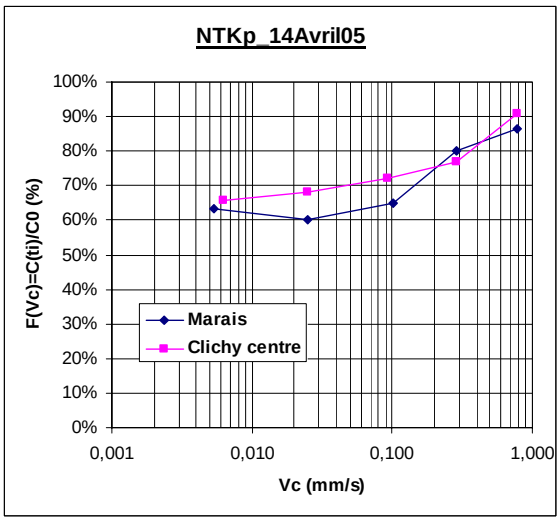


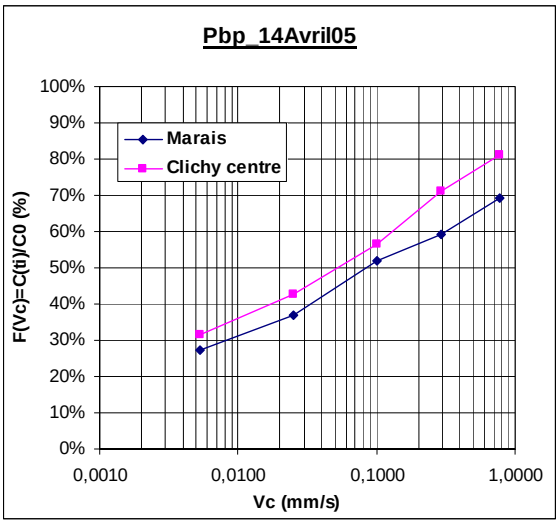
ANNEXE 27: Comparaison entre les vitesses de chute des polluants du Marais et de Clichy centre, par temps de pluie (VICPOL)

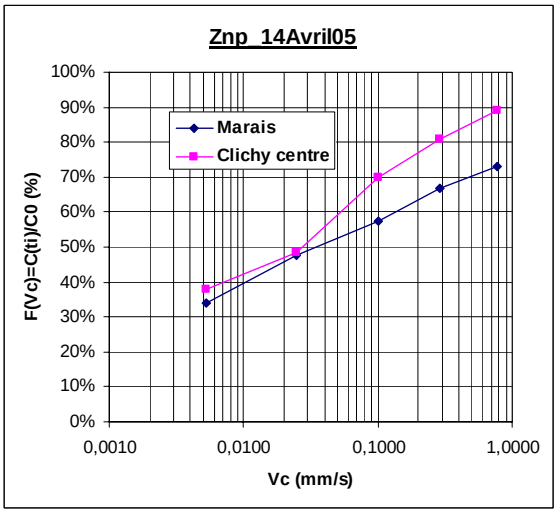


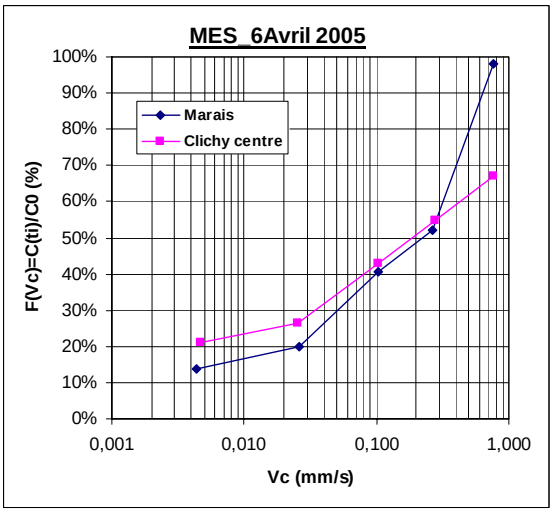


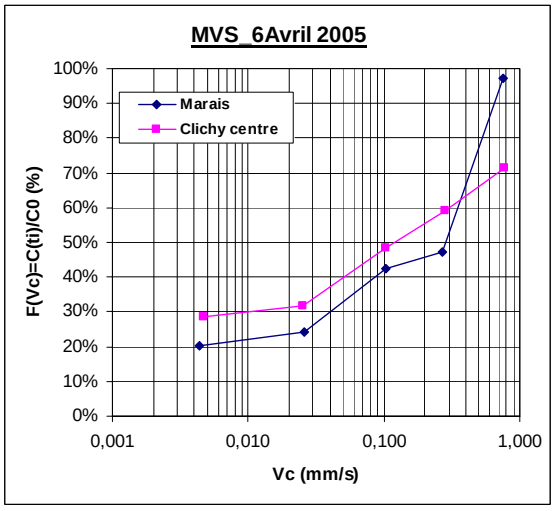


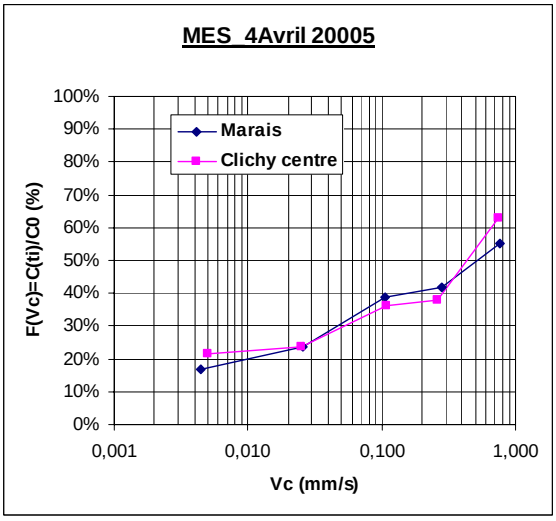


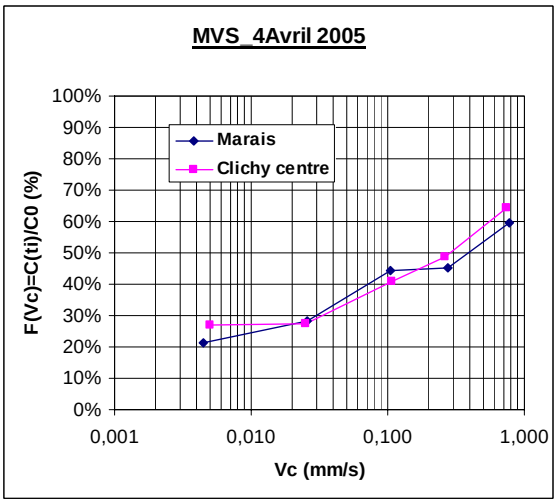

Pbp_14Avril05
Marais
Clichy centre
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
Vc (mm/s)
0,0010
0,0100
0,1000
1,0000

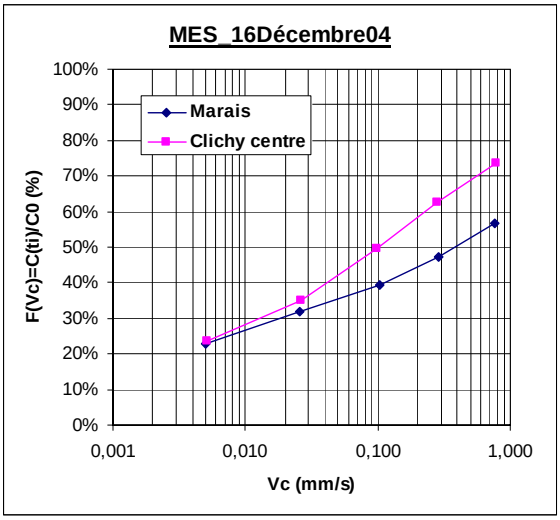

Znp_14Avril05
Marais
Clichy centre
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
Vc (mm/s)
0,0010
0,0100
0,1000
1,0000

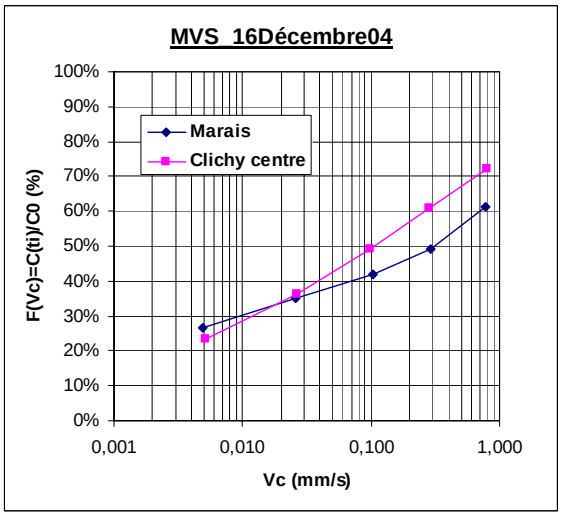

MES_6Avril 2005
Marais
Clichy centre
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
Vc (mm/s)
0,001
0,010
0,100
1,000

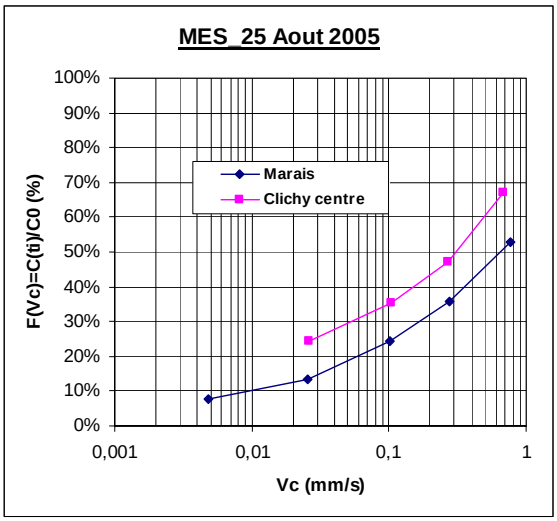

MVS_6Avril 2005
Marais
Clichy centre
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
Vc (mm/s)
0,001
0,010
0,100
1,000

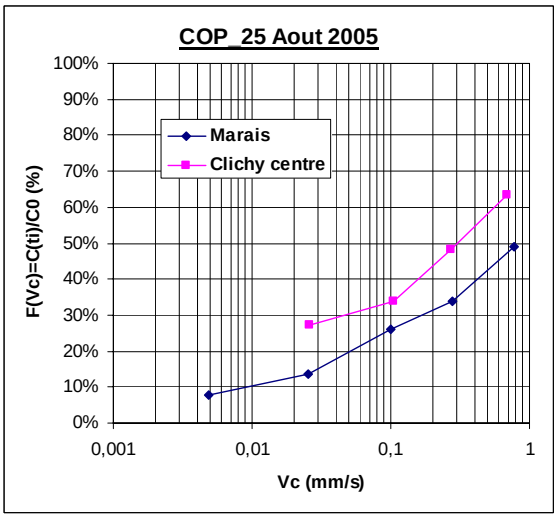

MES_4Avril 20005
Marais
Clichy centre
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
Vc (mm/s)
0,001
0,010
0,100
1,000

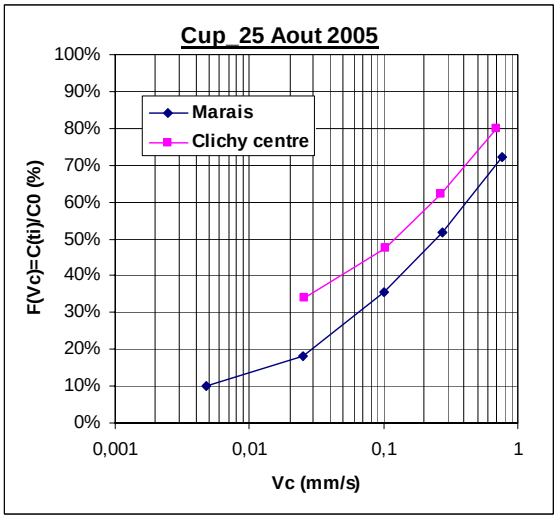

MVS_4Avril 2005
Marais
Clichy centre
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
Vc (mm/s)
0,001
0,010
0,100
1,000

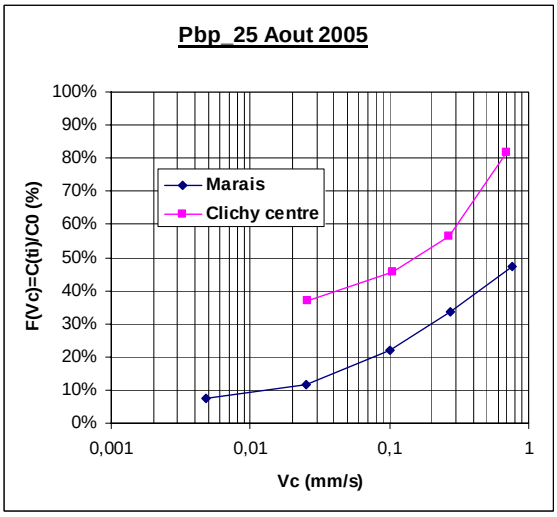

MES_16Décembre04
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
Marais
Clichy centre
0,001
0,010
0,100
1,000
Vc (mm/s)

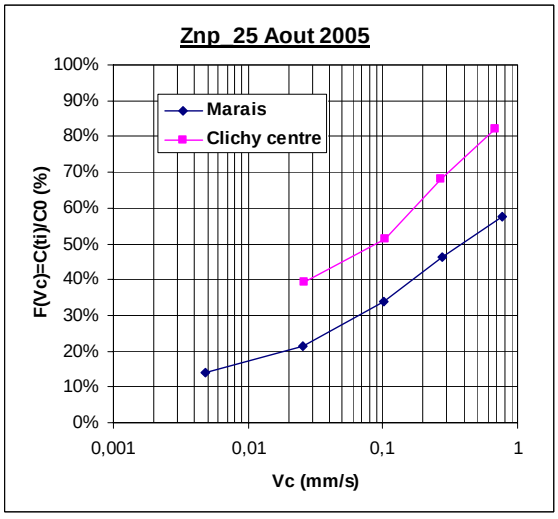

MVS_16Décembre04
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
Marais
Clichy centre
0,001
0,010
0,100
1,000
Vc (mm/s)


MES_25 Aout 2005
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
0,001
0,01
0,1
1
Vc (mm/s)
Marais
Clichy centre


COP_25 Aout 2005
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
0,001
0,01
0,1
1
Vc (mm/s)
Marais
Clichy centre


Cup_25 Aout 2005
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
0,001
0,01
0,1
1
Vc (mm/s)
Marais
Clichy centre


Pbp_25 Aout 2005
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
0,001
0,01
0,1
1
Vc (mm/s)
Marais
Clichy centre


Znp_25 Aout 2005
F(Vc)=C(ti)/C0 (%)
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
0,001
0,01
0,1
1
Vc (mm/s)
Marais
Clichy centre

ANNEXE 28 : configurations du réseau d'assainissement par temps de pluie

Par temps de pluie	30-avr-03	05-mai-03	02&03-juillet-03	16-juil-03	30nov&01déc-03	18-avr-04	29&30-avr-04	04-mai-04	07-juillet-04-A	07-juillet-04-B	18-juil-04	16-déc-04	17-déc-04	22-mars-05	04&05-avril-05	06&07-avril-05	14&15-avril-05
Coteaux Proudhon	A	A	A	A	OC	OC	OC	OC	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Coteaux Wattignies	OC	OC	OC	OC	OC	A	OC	OC	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Chapelle Coteaux amont	FC	FC	OC	OC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
Chemin vert	OC	OC	OC	OC	FC	FC	FC	FC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC
Coteaux Diderot	A	A	A	A	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
Cuvier :Siphon amont	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC
Cuvier: Siphon aval	OC	OC	OC	OC	A	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC
Cuvier :vanne VG	IC:30,80	IC:30,80	IC:30,80	IC:30,80	IC:30,80	OC	OC	OC	IC:30,4	IC:30,4	IC:30,4	IC:30,4	IC:30,4	IC:30,4	IC:30,4	IC:30,4	IC:30,4
Faidherbe	OC	OC	FC	FC	OC	OC	OC	OC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
Mazas:usine	1pompe	1pompe	1pompe	1pompe	niveau bas à faire	niveau bas	1pompe	1pompe	niveau bas	niveau bas	niveau bas	niveau bas	niveau bas	niveau bas	niveau bas	niveau bas	niveau bas
Netter Branche Sud	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC
Netter Rendez-Vous	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
Netter Saint-Mandé	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
Nord-Jemmapes	OC	OC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC
Richard Lenoir	FC	FC	A	A	OC	OC	OC	OC	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Saint Bernard	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC	OC
Intercepteur Coteaux Nord-Est	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC

ANNEXE 29: écarts (Sorties – Entrées / Sorties) sur les bassins versants de l'OPUR

(%)	30-avr-03	05-mai-03	02&03-juillet-03	16-juil-03	30nov&01déc-03	18-avr-04	29&30-avr-04	04-mai-04	07-juillet-04-A	07-juillet-04-B	18-juil-04	16-déc-04	17-déc-04	22-mars-05	04&05-avril-05	06&07-avril-05	14&15-avril-05
Marais	-2%	2%	-3%	-25%	14%	7%	-6%	-36%	-40%	9%	-31%	-26%	-25%	-1%	36%	19%	36%
Sébastopol	-6%	-3%	24%	21%	-	-	-	-	-50%	-36%	-32%	*	*	*	*	*	*
Quais	-39%	-16%	-89%	-50%	-4%	*	-3%	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Clichy centre	-15%	10%	-27%	-7%	18%	-31%	-6%	-30%	-26%	18%	-2%	7%	6%	0%	12%	-3%	0%
Coteaux aval	11%	-12%	23%	-77%	-24%	*	-51%	-19%	-90%	13%	-80%						
Clichy aval	1%	-27%	12%	-25%	6%	-27%	-19%	1%	-29%	18%	-11%						

-: pas de données,
*: Evènement pluvieux non déterminé

ANNEXE 30 : différents termes du bilan hydrologique

Volumes (m^3)		Ruissellement	Remarques sur la pluie	Eau usée de temps sec	∑ Banlieue		∑ Maillages		∑ DO	Exutoire
					sec	pluie	sec	pluie		
30 avril 2003	Marais	2562	-	1533	-		-		-	4027
	Sébastopol	7235	-	3077	-		0		-	9702
	Quais	17419	Pluie hétérogène	11585	-		2283	5320	0	19291
	Clichy centre	40494	Pluie hétérogène	32964	-		2058	3868	0	66050
	Coteaux aval	58270	Pluie hétérogène	25643	-	19586	54244	13194	14303	69660
	Clichy aval	103517	Pluie hétérogène	97824	-	25271	26023	71046	14759	182497
05 mai 2003	Marais	815	-	2130	-		-		-	2994
	Sébastopol	2302	-	4145	-		0		-	6260
	Quais	7362	Pluie relativement homogène	11726	-		2064	3004	0	17683
	Clichy centre	20260	Pluie hétérogène	48251	-		4334	2926	0	77046
	Coteaux aval	24777	Pluie hétérogène	42914	-	16660	1952	21593	2085	58456
	Clichy aval	53497	Pluie hétérogène	103068	-	17739	24546	27800	2405	136785
02 juillet 2003	Marais	5473	-	7558	-		-		-	12694
	Sébastopol	15456	-	4158	-		-		-	25886
	Quais	44813	Pluie homogène	8932	-		2882	4154	29	31096
	Clichy centre	165670	Pluie hétérogène	60777	-		4585	1 302	29	182199
	Coteaux aval	229535	Pluie hétérogène	28450	-	38927	12736	180511	21808	183449
	Clichy aval	482162	Pluie hétérogène	104646	-	47077	24177	207405	8982	531465
16 juillet 2003	Marais	1630	-	4647	-		-		-	5021
	Sébastopol	4604	-	4859	-		-		-	11909
	Quais	14488	Pluie homogène	5661	-		1159	1394	0	14080
	Clichy centre	31813	Pluie hétérogène	65971	-		1 692	2295	0	92225
	Coteaux aval	45550	Pluie hétérogène	21289	5738	12698	-	12298	9304	25026
	Clichy aval	83985	Pluie hétérogène	114969	4838	15357	1340	18988	9847	145814

Annexes : Partie 4 : Sources et processus de transfert dans le réseau d'assainissement unitaire parisien

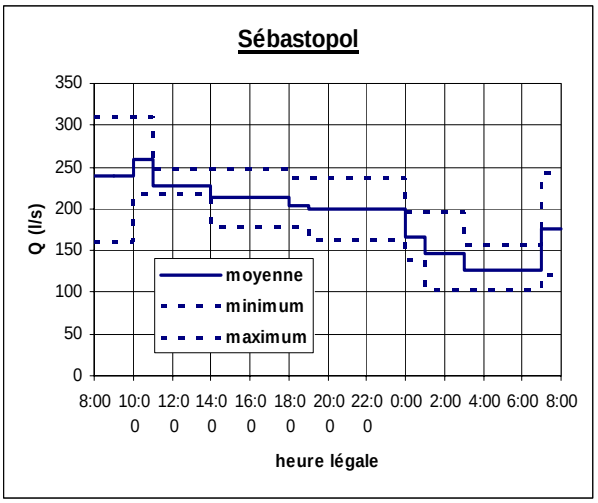
Volumes (m^3)		Ruissellement	Remarques sur la pluie	Eau usée de temps sec	∑ Banlieue	∑ Maillages	∑ DO	Exutoire
30 Novembre 2003	Marais	4541	-	3431	-	-	-	9289
	Sébastopol	-	-	-	-	-	-	-
	Quais	44417	Pluie relativement homogène	15220	-	2857 9190	0	63858
	Clichy centre	111982	Pluie relativement homogène	90377	-	2 483 10264	0	253173
	Coteaux aval	63825	Pluie relativement homogène	37873	- 47740	40862 300703	11907	81746
	Clichy aval	241284	Pluie relativement homogène	126857	- 13679	30315 310932	11907	398288
18 avril 2004	Marais	1805	-	2615	-	-	-	4742
	Sébastopol	-	-	-	-	-	-	-
	Quais	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy centre	36029	Pluie relativement homogène	46878	-	-	-	63054
	Coteaux aval	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy aval	84461	Pluie relativement homogène	94559	-	-	-	140976
29 avril 2004	Marais	6288	-	2778	-	-	-	8523
	Sébastopol	-	-	-	-	-	-	-
	Quais	46052	Pluie homogène	3006	-	9153 21501	3472	14482
	Clichy centre	133903	Pluie relativement homogène	135949	-	-	-	269852
	Coteaux aval	87487	Pluie relativement homogène	17298	-	-	-	65792
	Clichy aval	319624	Pluie relativement homogène	165408	-	-	-	407386
04 mai 2004	Marais	1339	-	749	-	-	-	1539
	Sébastopol	-	-	-	-	-	-	-
	Quais	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy centre	27763	Pluie relativement homogène	58456	-	973 10783	2923	73526
	Coteaux aval	13588	Pluie hétérogène	9701	2381 10019	11415 14234	1519	16617
	Clichy aval	56332	Pluie hétérogène	86834	-	8465 13429	1519	147898

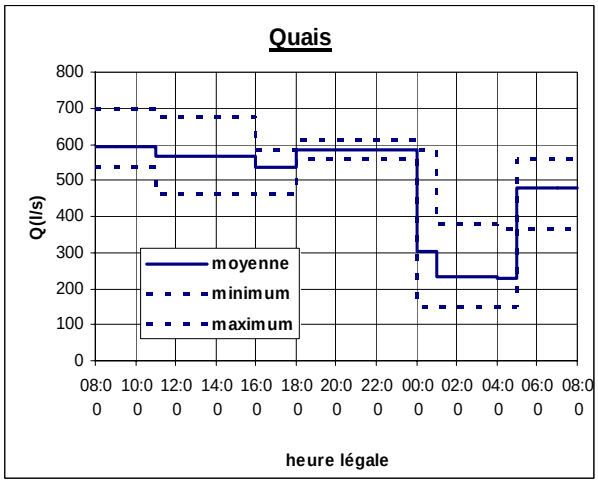
Volumes (m^3)		Ruissellement	Remarques sur la pluie	Eau usée de temps sec	∑ Banlieue		∑ Maillages		∑ DO	Exutoire
07 juillet 2004-A	Marais	815	-	771	-		-		-	1133
	Sébastopol	2302	-	2478	-		0		-	3196
	Quais	-	-	-	-		-		-	-
	Clichy centre	16638	Pluie homogène	32988	-		-		0	39493
	Coteaux aval	21364	Pluie homogène	11341	2030	4879	6269	7776	1695	14900
	Clichy aval	41279	Pluie homogène	43463	2686	5264	14134	9399	1841	55318
07 juillet 2004-B	Marais	1863	-	474	-		-		-	2563
	Sébastopol	5262	-	4679	-		0		-	7297
	Quais	-	-	-	-		-		-	-
	Clichy centre	41497	Pluie homogène	64266	-		-		1799	105763
	Coteaux aval	58115	Pluie homogène	29601	4945	11078	17776	57319	6212	63515
	Clichy aval	117655	Pluie homogène	127510	6896	12491	19200	64591	8982	254629
18 juillet 2004	Marais	757	-	503	-		-		-	966
	Sébastopol	2138	-	2026	-		0		-	3144
	Quais	-	-	-	-		-		-	-
	Clichy centre	37084	Pluie hétérogène	47981	-		-		229	83508
	Coteaux aval	46938	Pluie hétérogène	15993	3230	10788	9151	15714	3214	26521
	Clichy aval	89888	Pluie hétérogène	65778	4396	12088	15770	24887	3513	122948
16 décembre 2004	Marais	757	-	399	-		-		-	916
	Sébastopol	-	-	-	-		-		-	-
	Quais	-	-	-	-		-		-	-
	Clichy centre	19042	Pluie hétérogène	68718	-		0		0	94848
	Coteaux aval	-	-	-	-		-		-	-
	Clichy aval	-	-	-	-		-		-	-

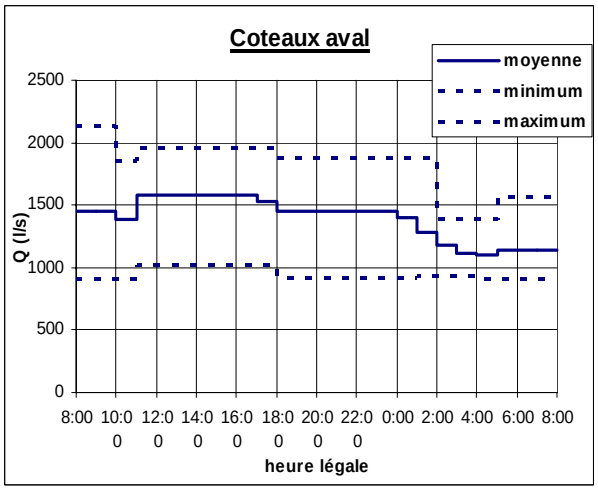
Volumes (m^3)		Ruissellement	Remarques sur la pluie	Eau usée de temps sec	∑ Banlieue	∑ Maillages	∑ DO	Exutoire
17 décembre 2004	Marais	1281	-	488	-	-	-	1416
	Sébastopol	-	-	-	-	-	-	-
	Quais	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy centre	34594	Pluie hétérogène	97800	-	-	0	140936
	Coteaux aval	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy aval	-	-	-	-	-	-	-
22 mars 2005	Marais	990	-	882	-	-	-	1862
	Sébastopol	-	-	-	-	-	-	-
	Quais	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy centre	19842	Pluie homogène	74135	-	2 802 | 3 260	0	97508
	Coteaux aval	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy aval							
04 avril 2004	Marais	2096	-	604	-	-	-	4216
	Sébastopol	-	-	-	-	-	-	-
	Quais	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy centre	61976	Pluie hétérogène	77555	-	6 630 | 10267	0	167983
	Coteaux aval	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy aval	-	-	-	-	-	-	-
06 avril 2004	Marais	2562	-	441	-	-	-	3726
	Sébastopol	-	-	-	-	-	-	-
	Quais	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy centre	51578	Pluie hétérogène	66352	-	6 074 | 7 008	0	121618
	Coteaux aval	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy aval	-	-	-	-	-	-	-

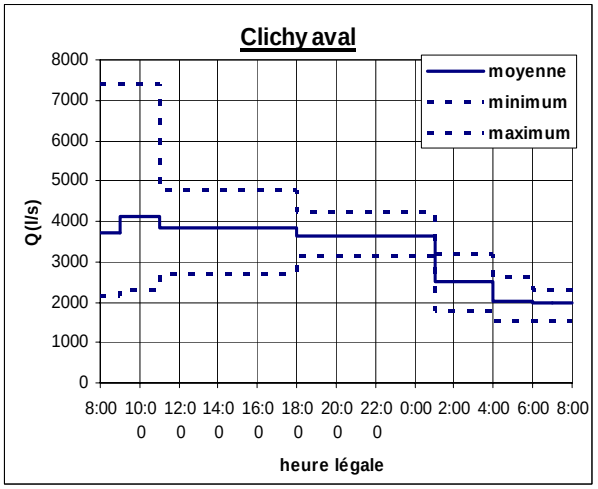
Volumes (m^3)		Ruissellement	Remarques sur la pluie	Eau usée de temps sec	∑ Banlieue	∑ Maillages	∑ DO	Exutoire
14 avril 2004	Marais	699	-	524	-	-	-	1914
	Sébastopol	-	-	-	-	-	-	-
	Quais	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy centre	19969	Pluie hétérogène	61135	-	5 867 7 535	0	88767
	Coteaux aval	-	-	-	-	-	-	-
	Clichy aval	-	-	-	-	-	-	-

ANNEXE 31 : variabilité des débits d'un jour de temps sec à un autre



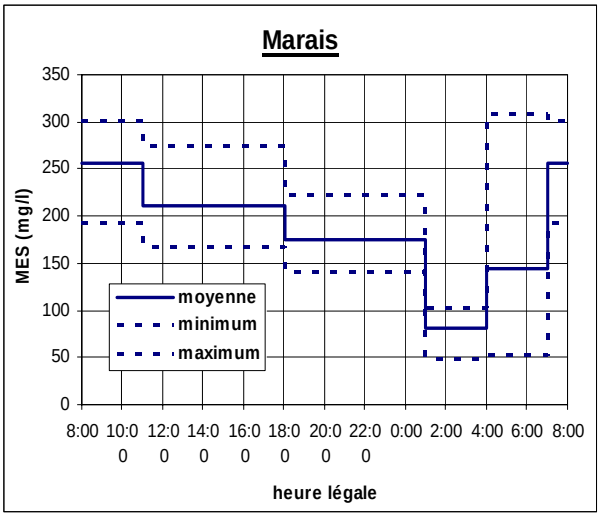


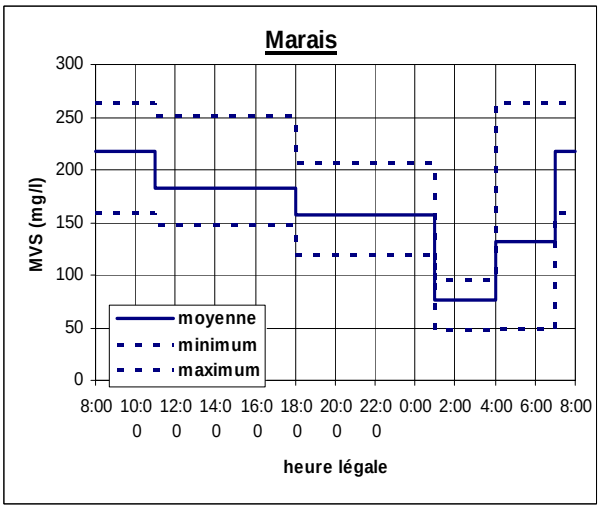


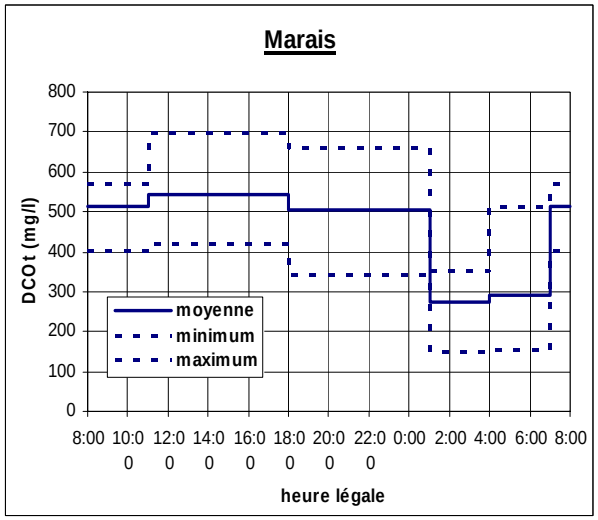


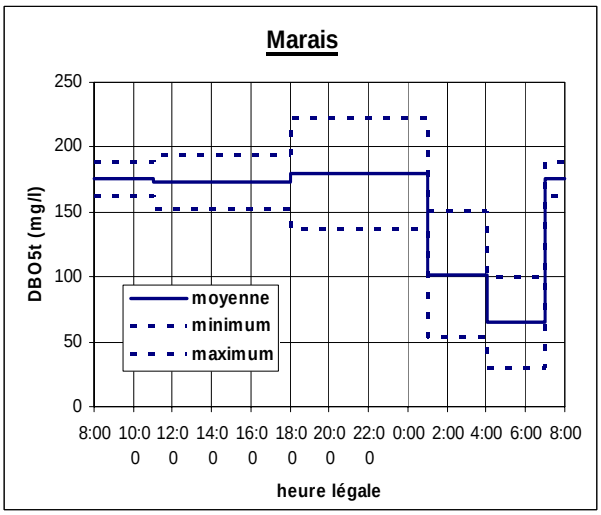
ANNEXE 32 : variabilité des concentrations d'un jour de temps sec à un autre

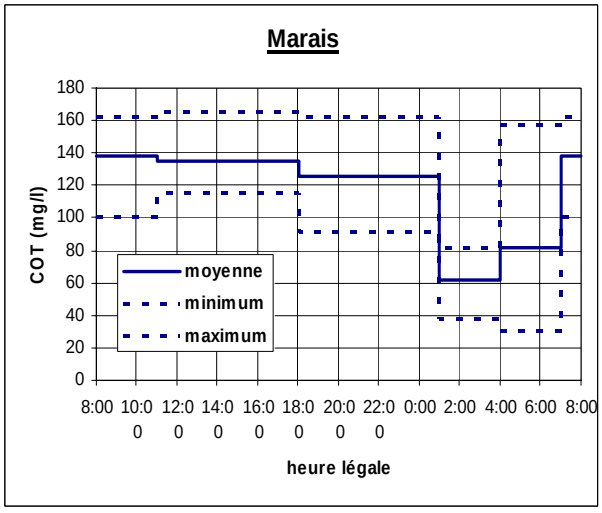
Marais

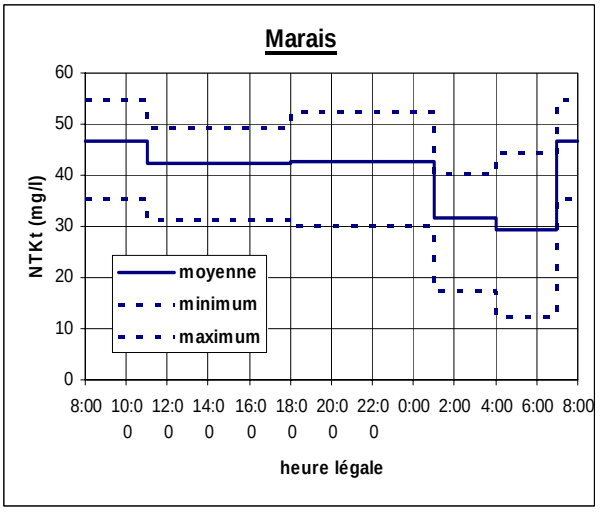


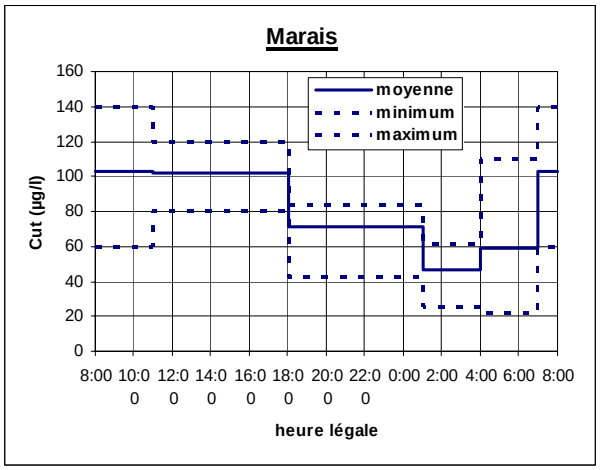


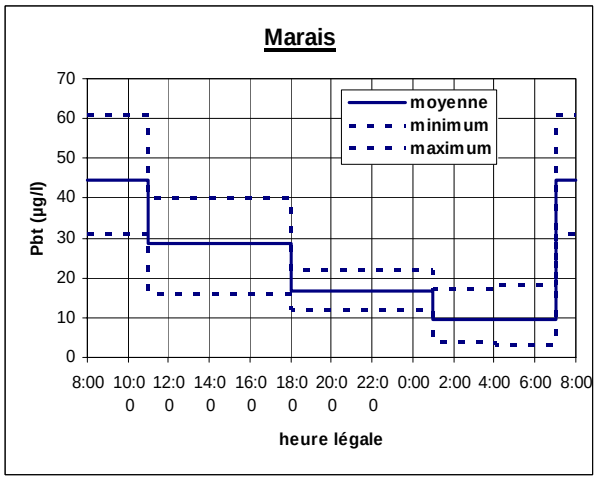


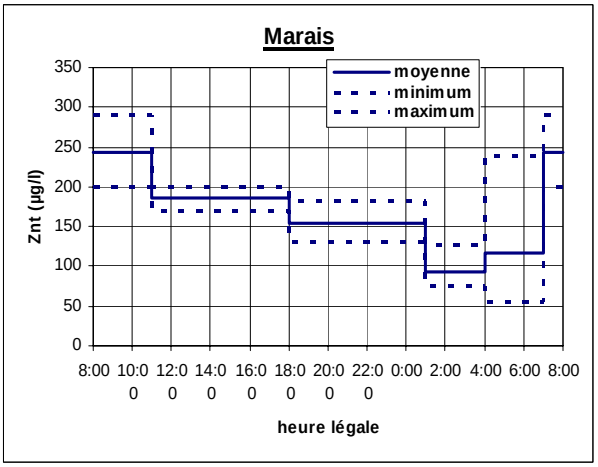




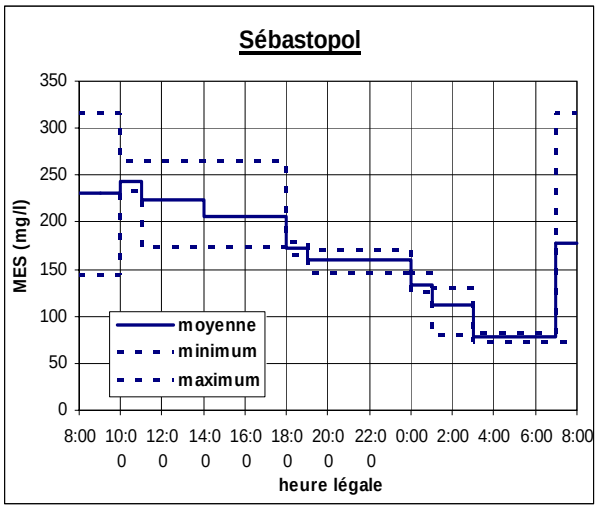


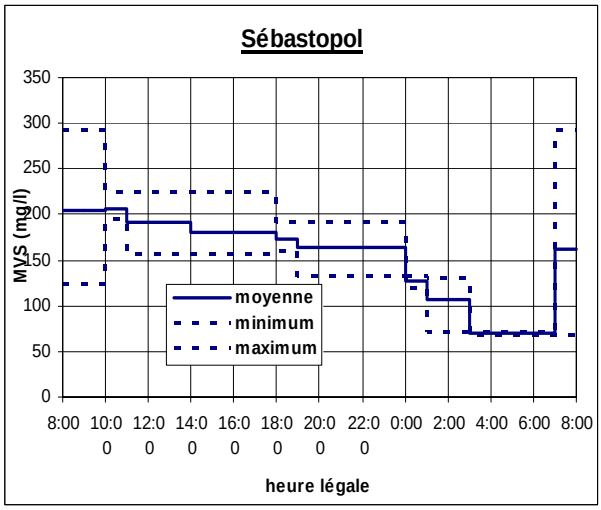

Marais
moyenne
minimum
maximum
Cut (µg/l)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

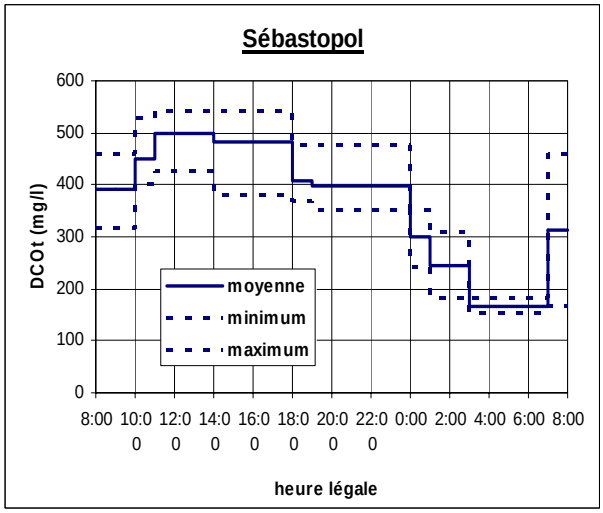

Marais
moyenne
minimum
maximum
Pbt (µg/l)
0
10
20
30
40
50
60
70
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

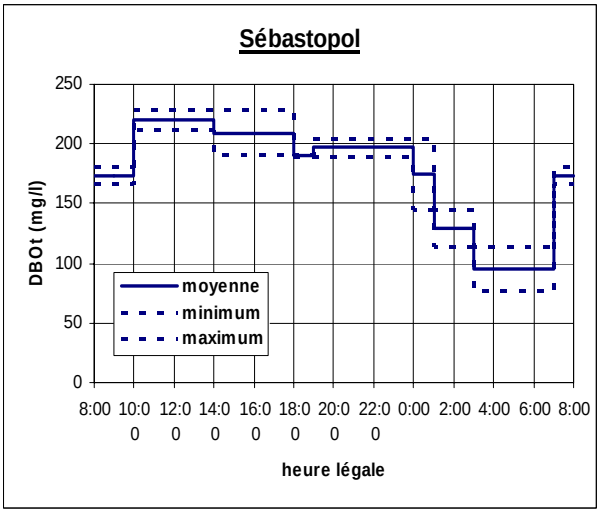

Marais
moyenne
minimum
maximum
Znt (µg/l)
0
50
100
150
200
250
300
350
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

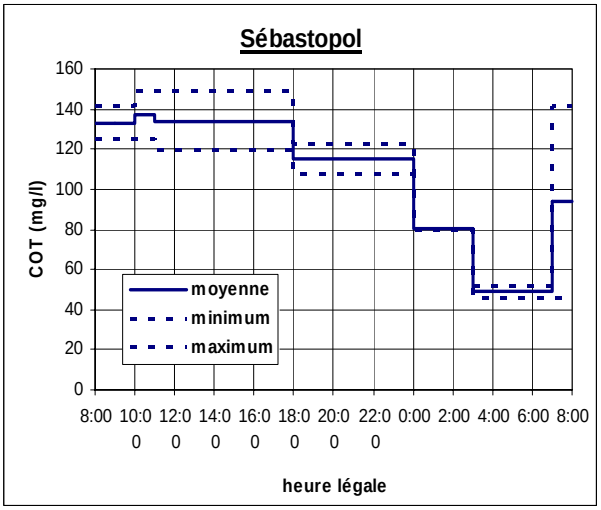
Sébastopol

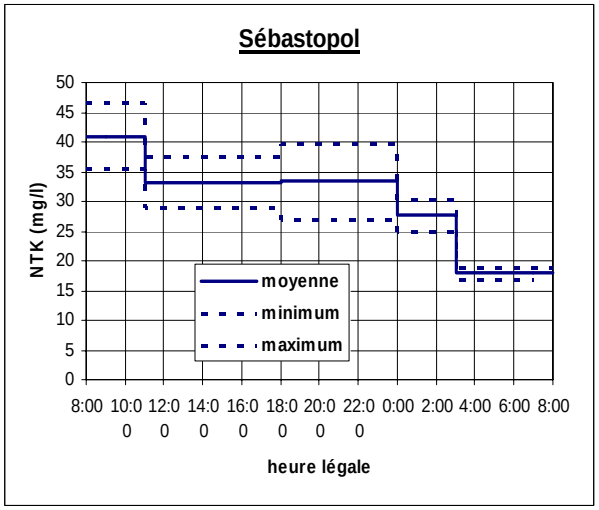

Sébastopol
MES (mg/l)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

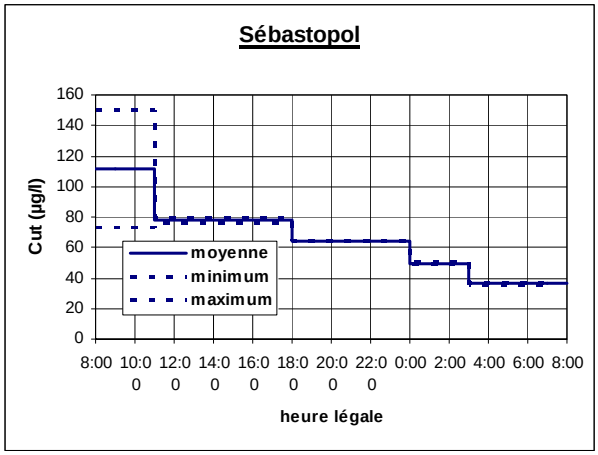

Sébastopol
MVS (mg/l)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

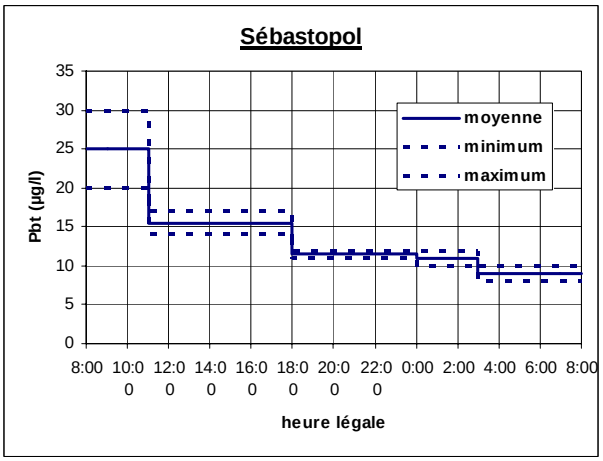

Sébastopol
DCOt (mg/l)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

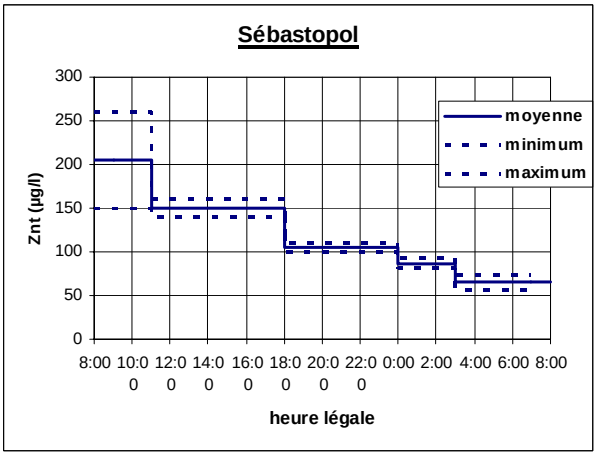

Sébastopol
DBOt (mg/l)
moyenne
minimum
maximum
heure légale


Sébastopol
COT (mg/l)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

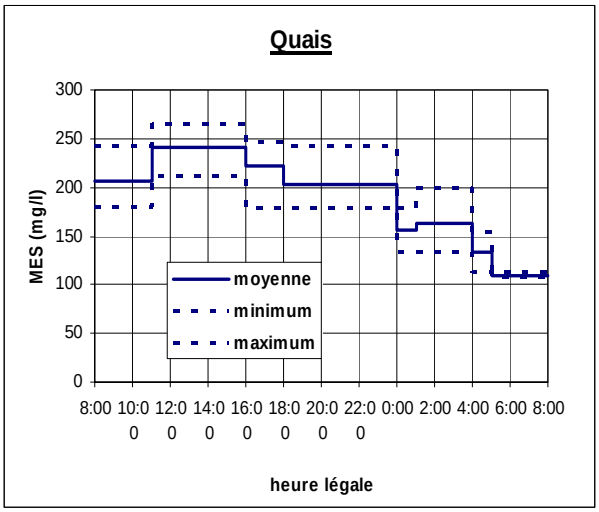

Sébastopol
NTK (mg/l)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

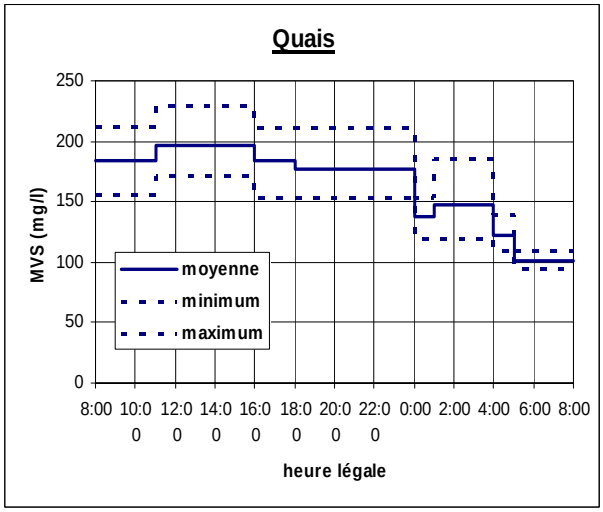

Sébastopol
Cut (µg/l)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

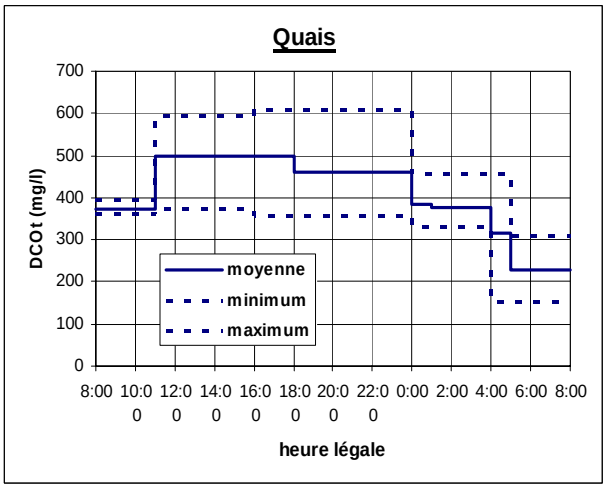

Sébastopol
Pbt (µg/l)
35
30
25
20
15
10
5
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

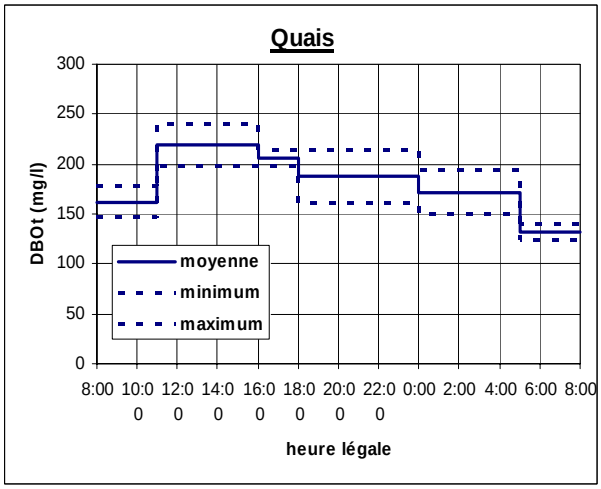

Sébastopol
Znt (µg/l)
300
250
200
150
100
50
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

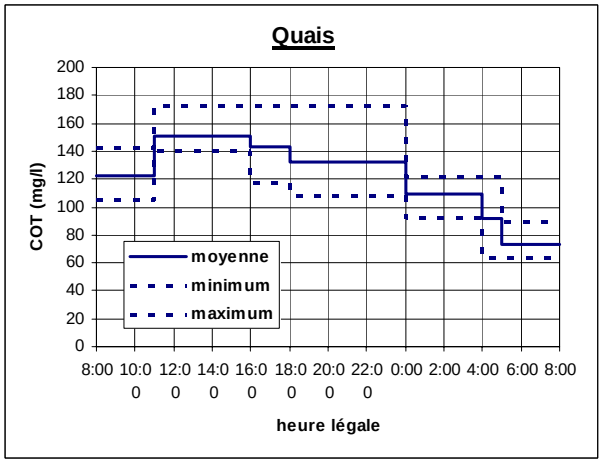
Quais

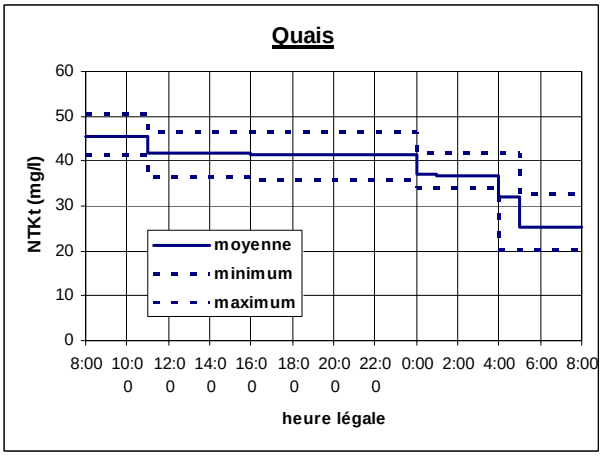

Quais
MES (mg/l)
300
250
200
150
100
50
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

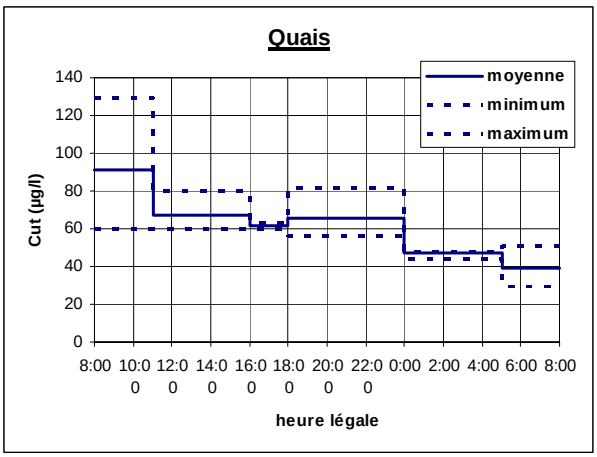

Quais
MVS (mg/l)
250
200
150
100
50
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

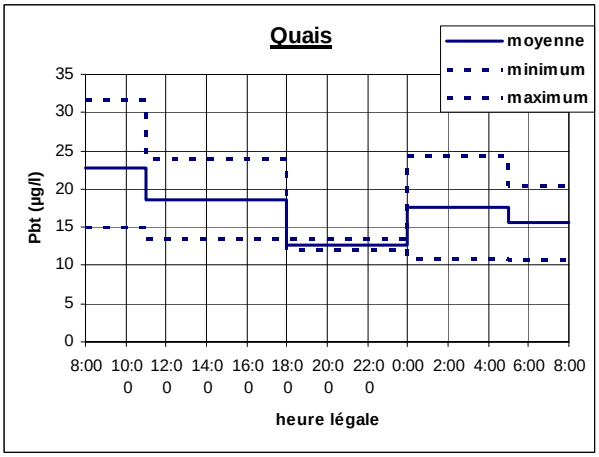

Quais
DCOt (mg/l)
700
600
500
400
300
200
100
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

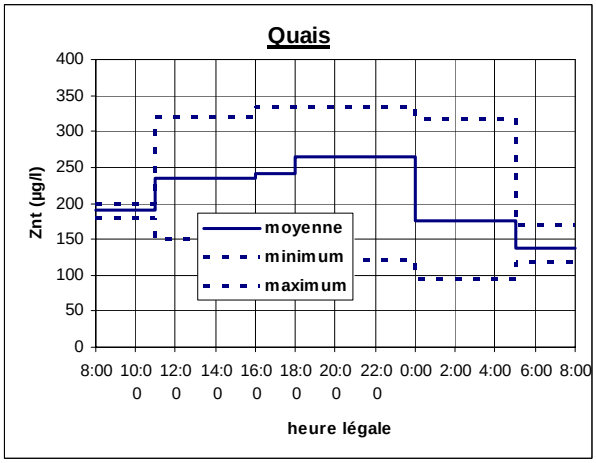

Quais
DBOt (mg/l)
300
250
200
150
100
50
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale


Quais
COT (mg/l)
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

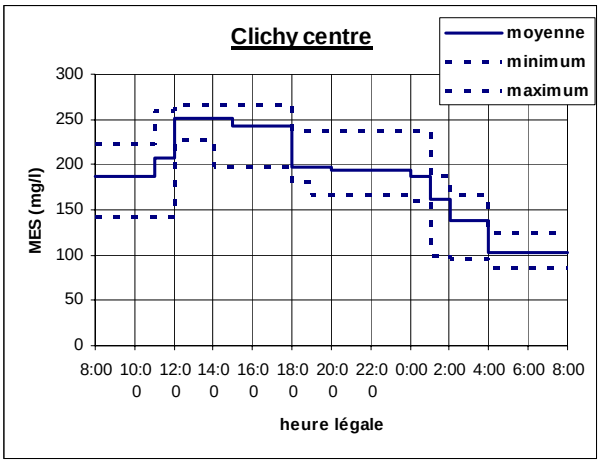

Quais
NTKt (mg/l)
60
50
40
30
20
10
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

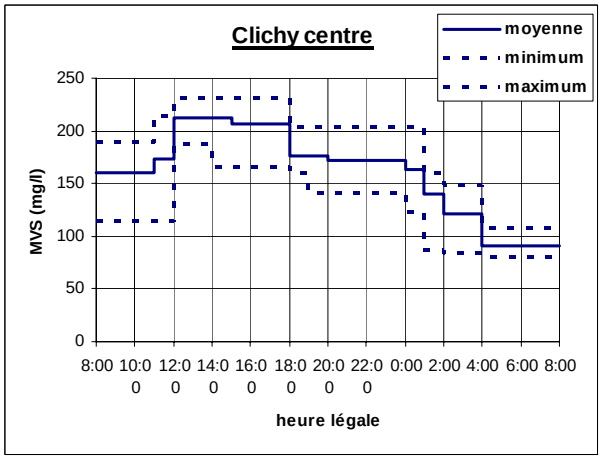

Quais
moyenne
minimum
maximum
Cut (µg/l)
0
20
40
60
80
100
120
140
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

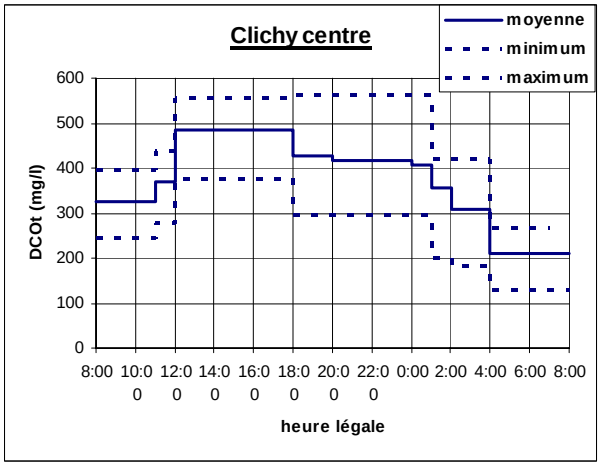

Quais
moyenne
minimum
maximum
Pbt (µg/l)
0
5
10
15
20
25
30
35
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

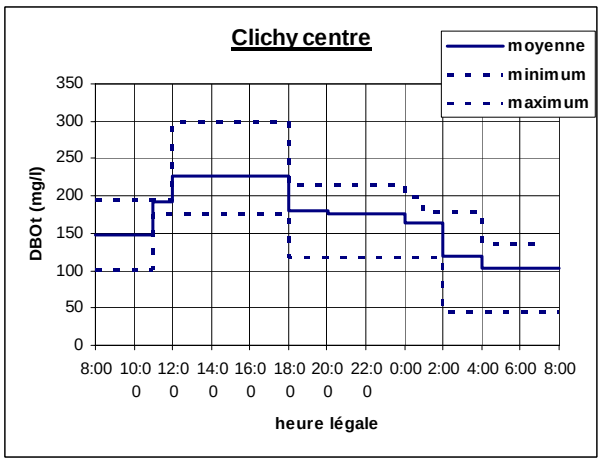

Quais
moyenne
minimum
maximum
Znt (µg/l)
0
50
100
150
200
250
300
350
400
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

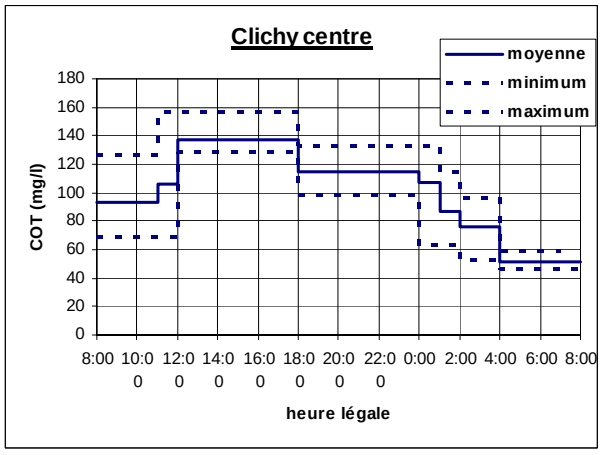
Clichy centre

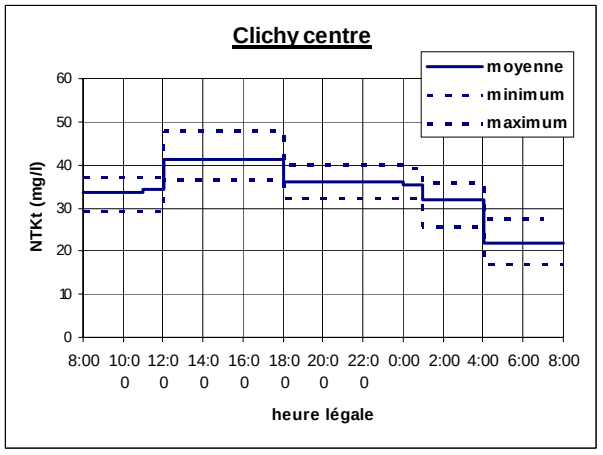


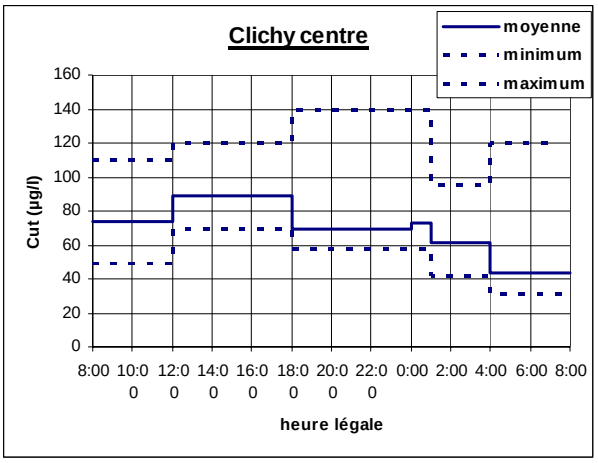




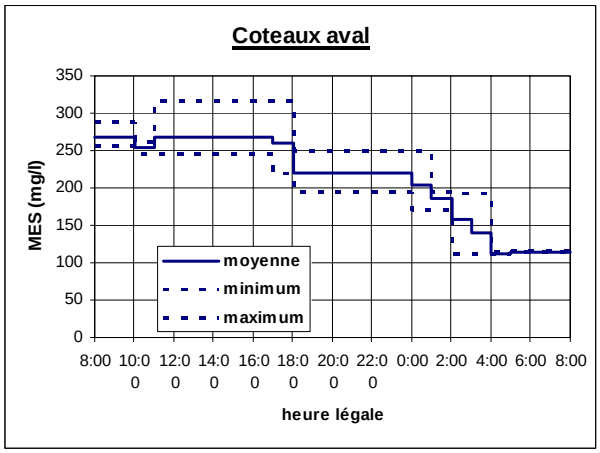


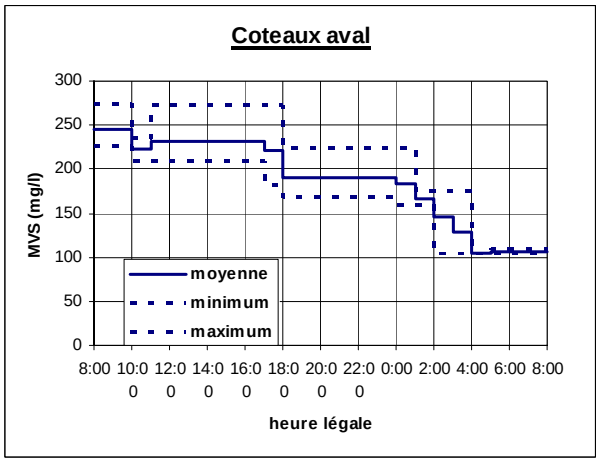


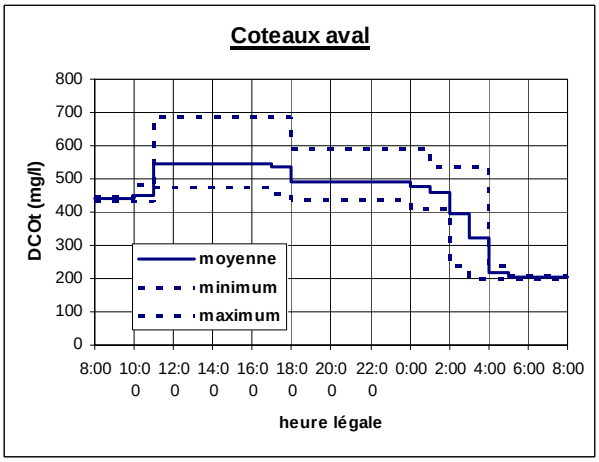


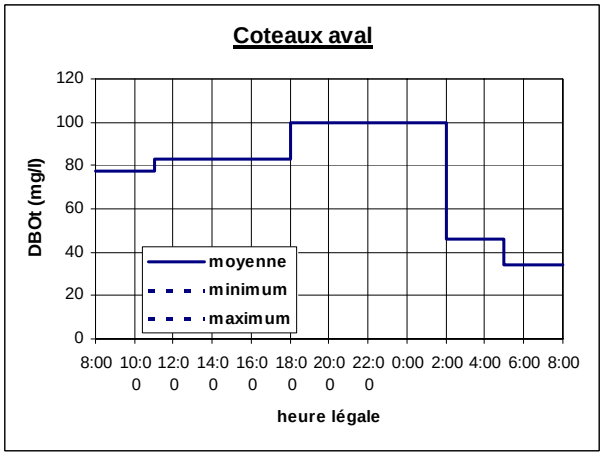

Clichy centre
moyenne
minimum
maximum
Cut (µg/l)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

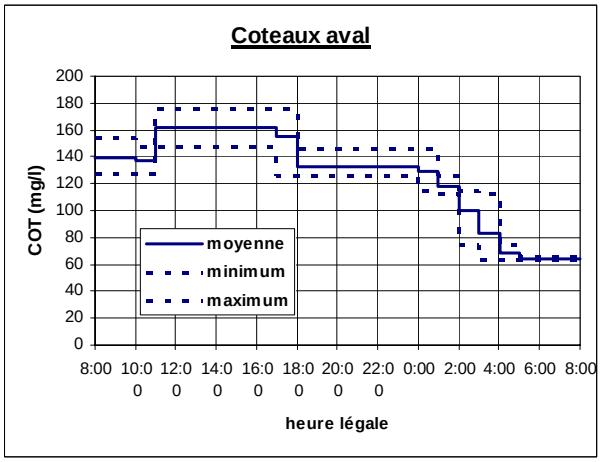
Coteaux aval

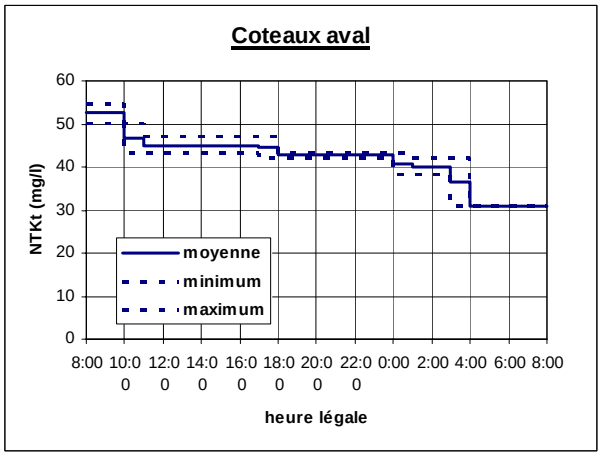


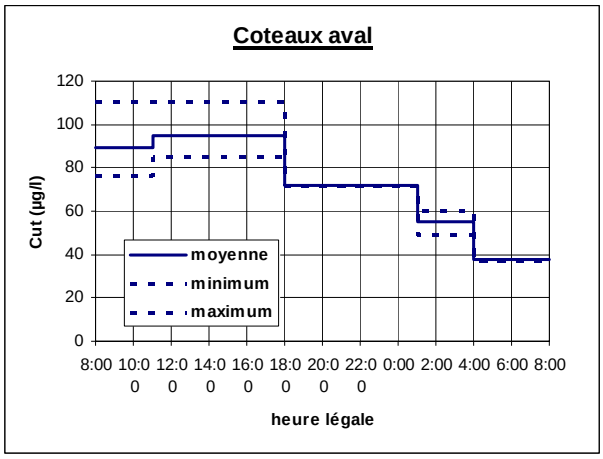


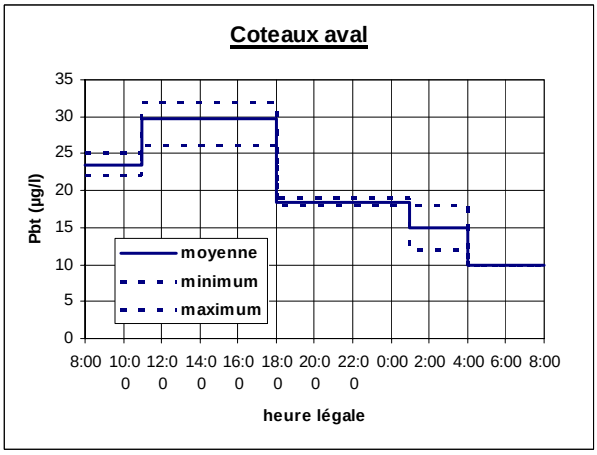


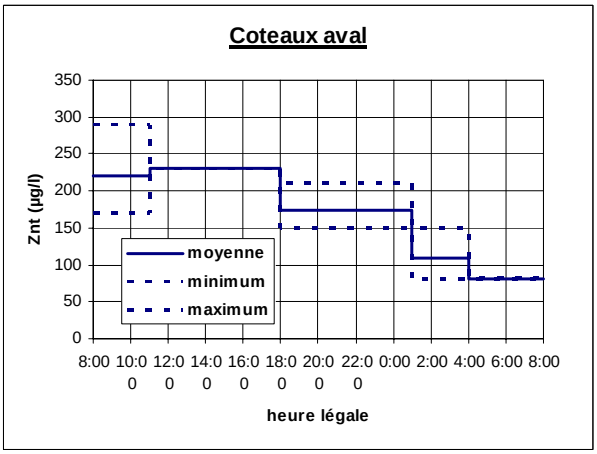




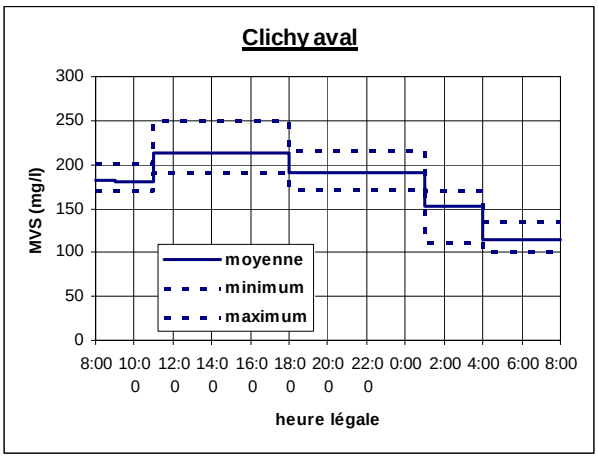


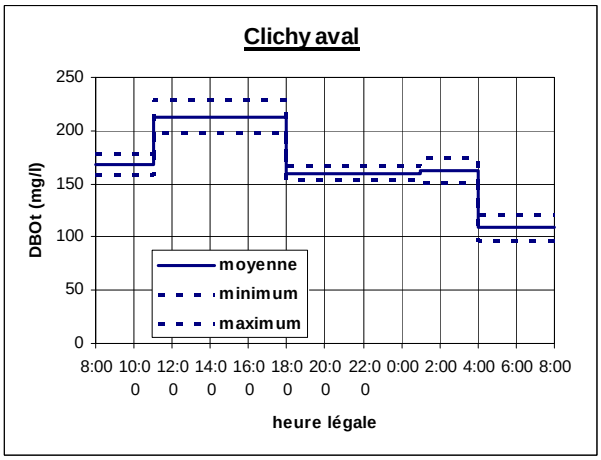

Coteaux aval
Cut (µg/l)
120
100
80
60
40
20
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

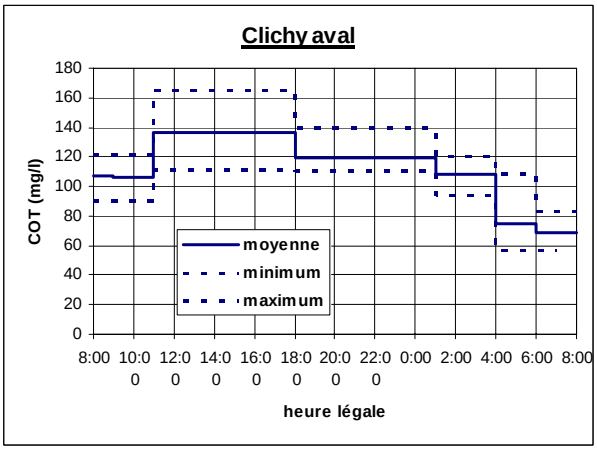

Coteaux aval
Pbt (µg/l)
35
30
25
20
15
10
5
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

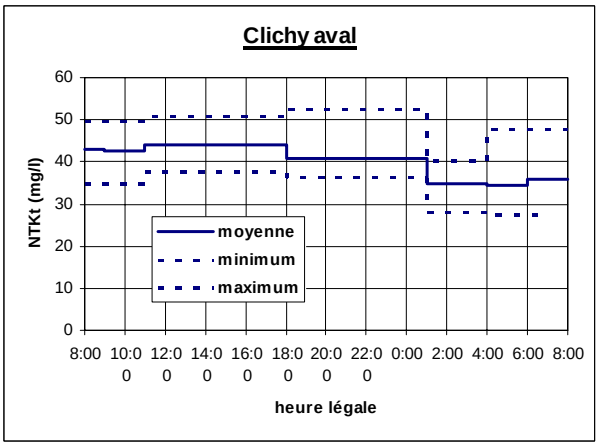

Coteaux aval
Znt (µg/l)
350
300
250
200
150
100
50
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

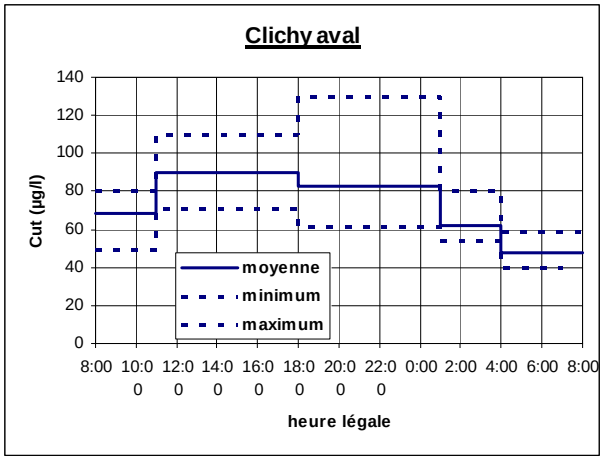
Clichy aval

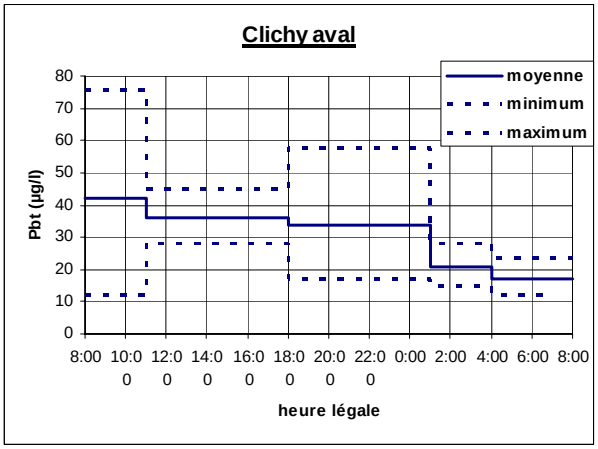

Clichy aval
MVS (mg/l)
300
250
200
150
100
50
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

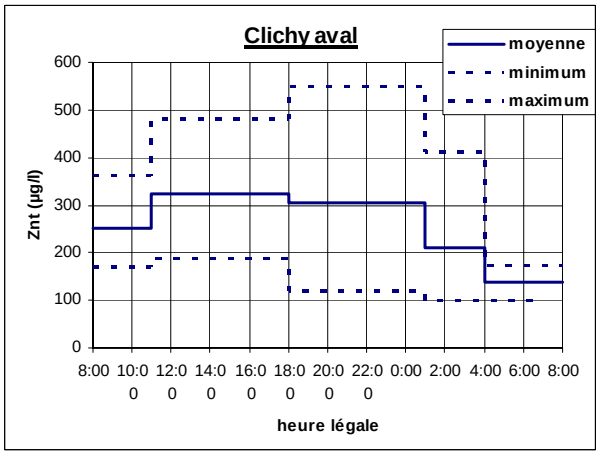

Clichy aval
DBOt (mg/l)
250
200
150
100
50
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale


Clichy aval
COT (mg/l)
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale


Clichy aval
NTKt (mg/l)
60
50
40
30
20
10
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

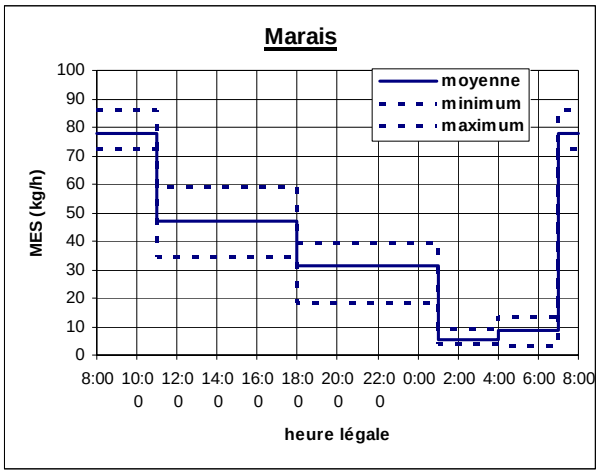

Clichy aval
Cut (µg/l)
heure légale
moyenne
minimum
maximum

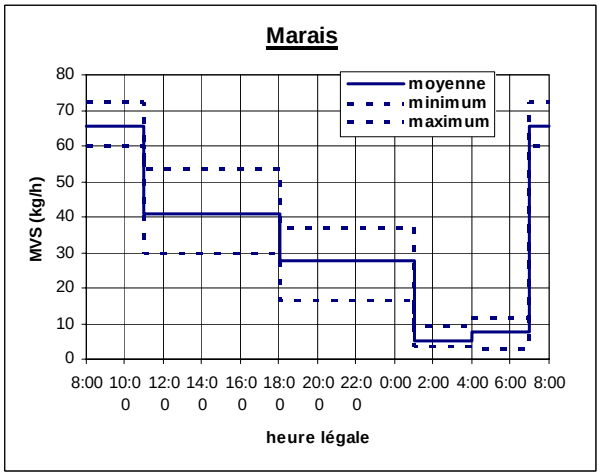

Clichy aval
Pbt (µg/l)
heure légale
moyenne
minimum
maximum

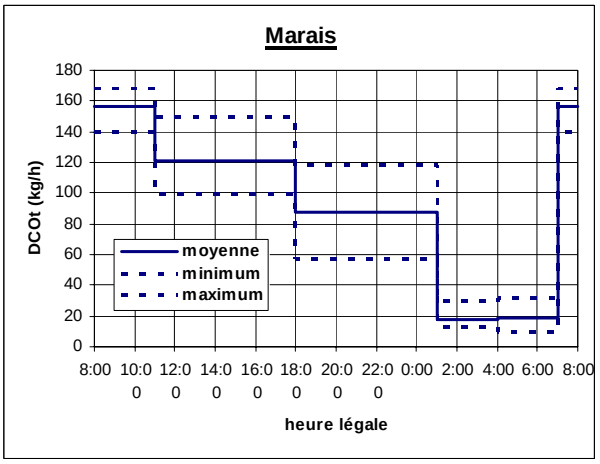

Clichy aval
Znt (µg/l)
heure légale
moyenne
minimum
maximum

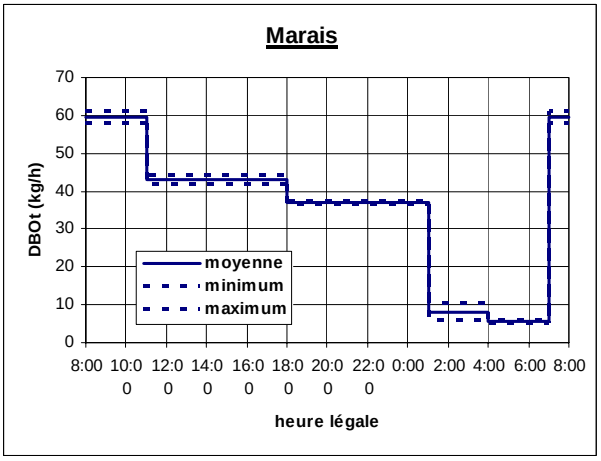
ANNEXE 33 : variabilité des flux horaires d'un jour de temps sec à un autre

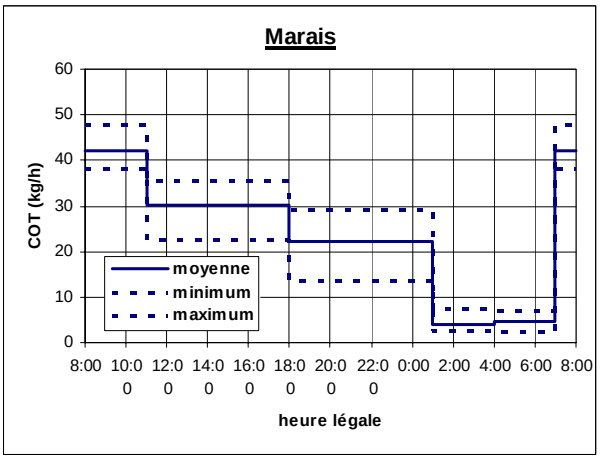
Marais

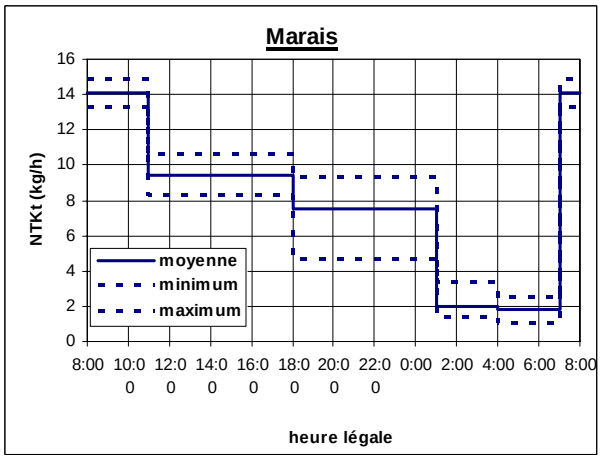


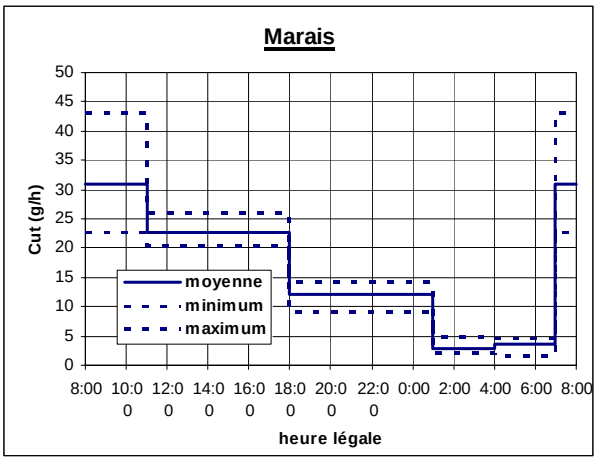


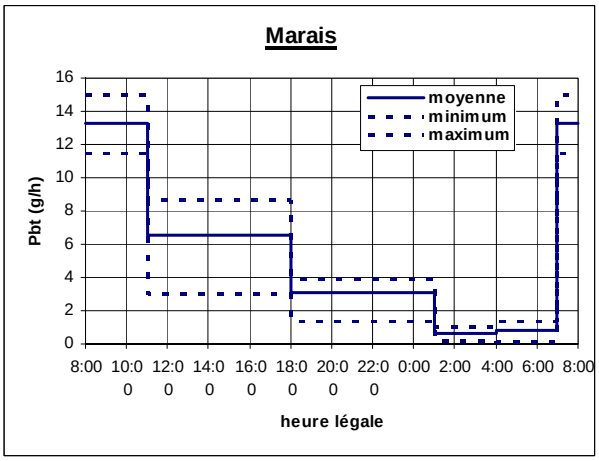


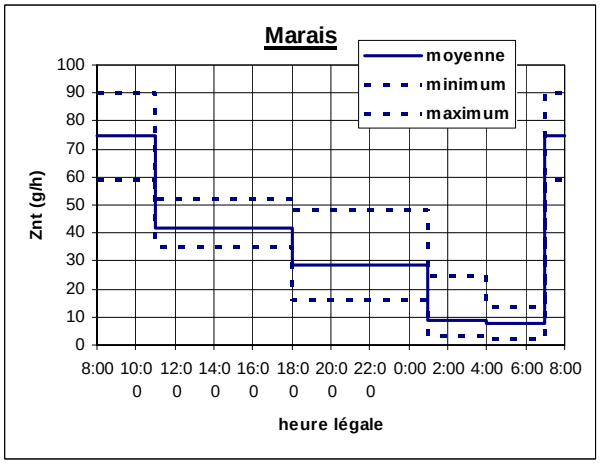




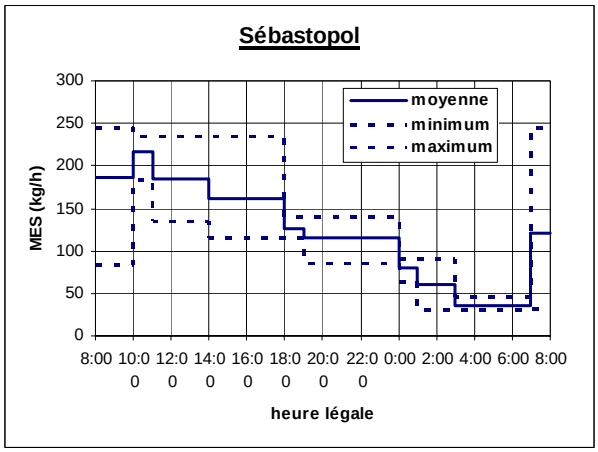


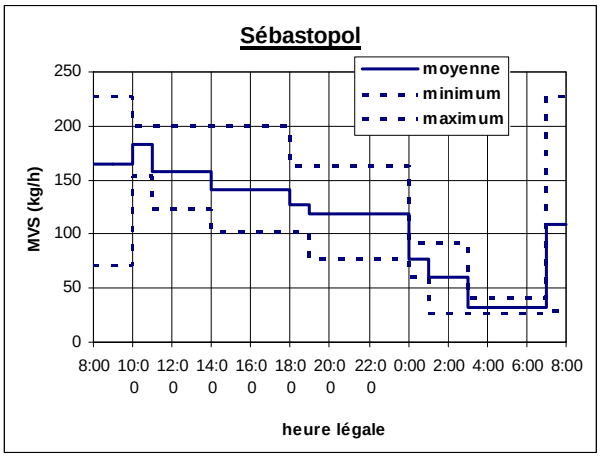

Marais
Cut (g/h)
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
moyenne
minimum
maximum
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

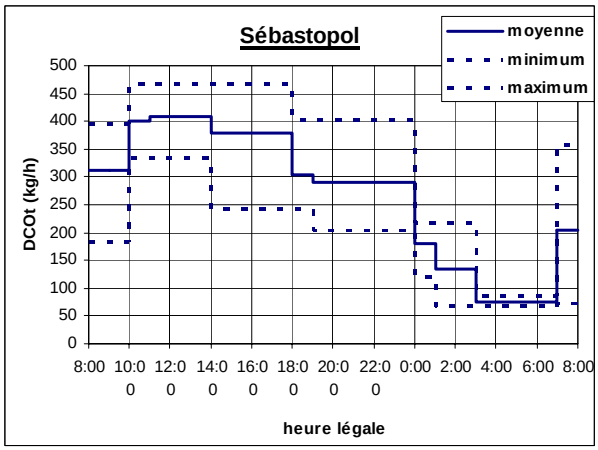

Marais
Pbt (g/h)
16
14
12
10
8
6
4
2
0
moyenne
minimum
maximum
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

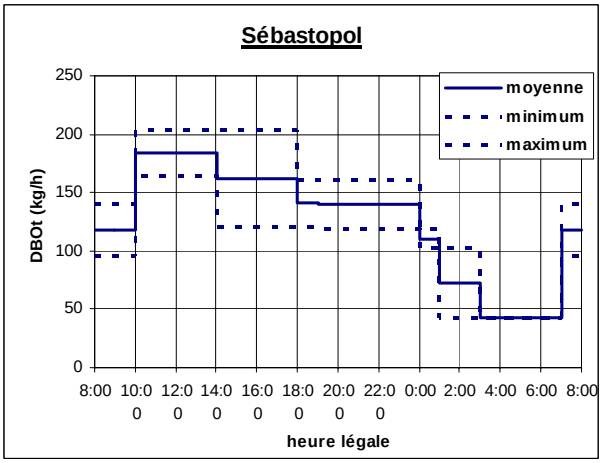

Marais
Znt (g/h)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
moyenne
minimum
maximum
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

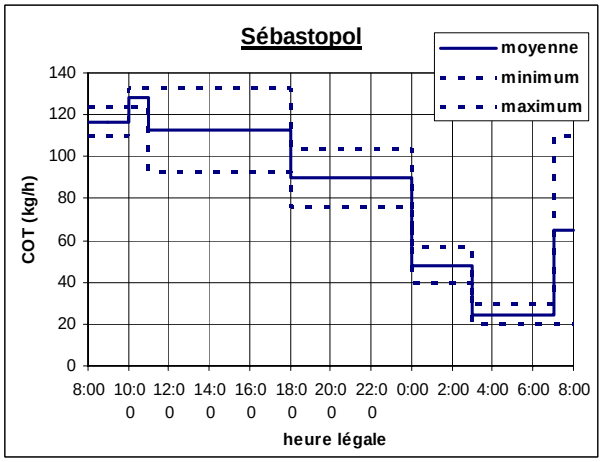
Sébastopol

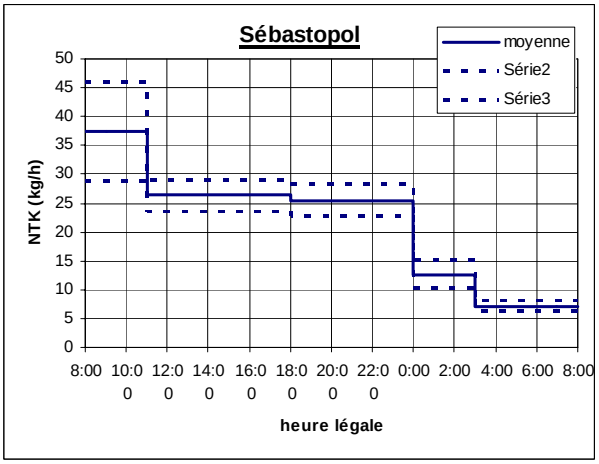

Sébastopol
MES (kg/h)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

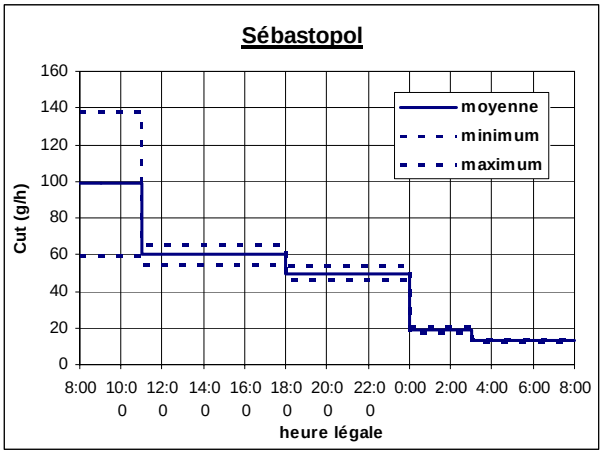

Sébastopol
MVS (kg/h)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

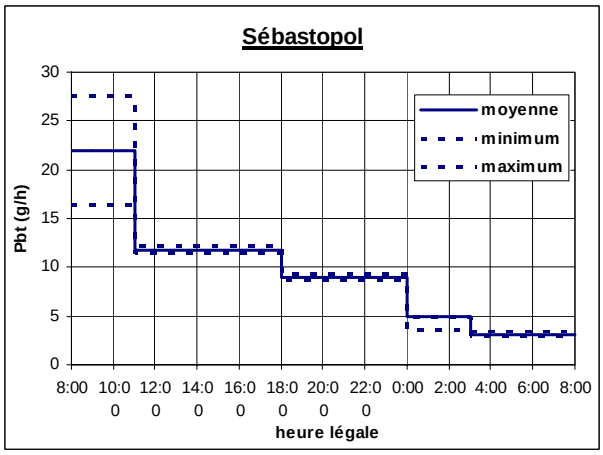

Sébastopol
DCOt (kg/h)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

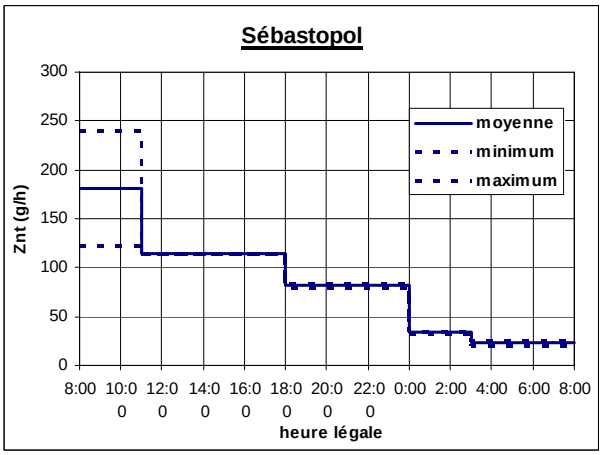

Sébastopol
DBOt (kg/h)
moyenne
minimum
maximum
heure légale


Sébastopol
COT (kg/h)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

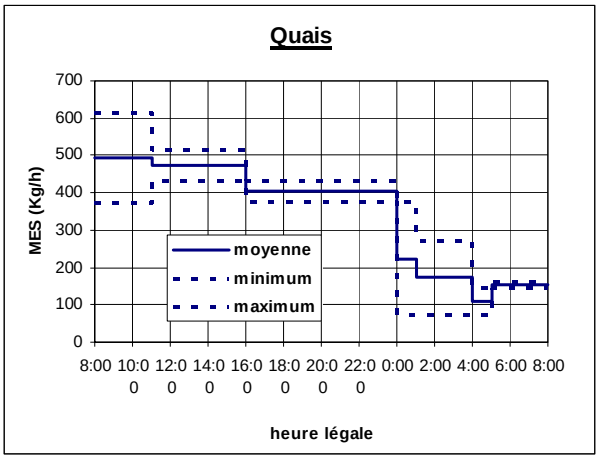

Sébastopol
NTK (kg/h)
moyenne
Série2
Série3
heure légale

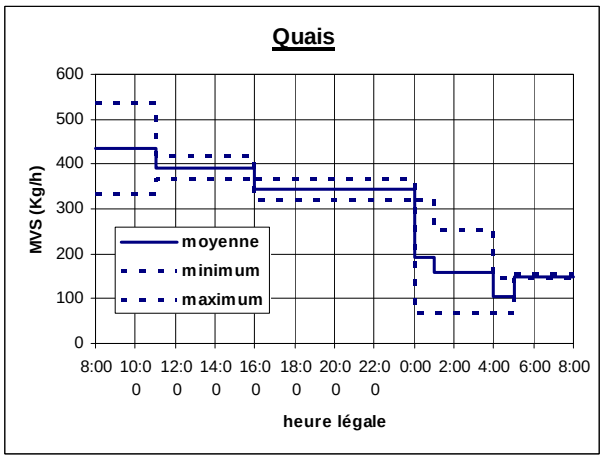

Sébastopol
Cut (g/h)
heure légale
moyenne
minimum
maximum

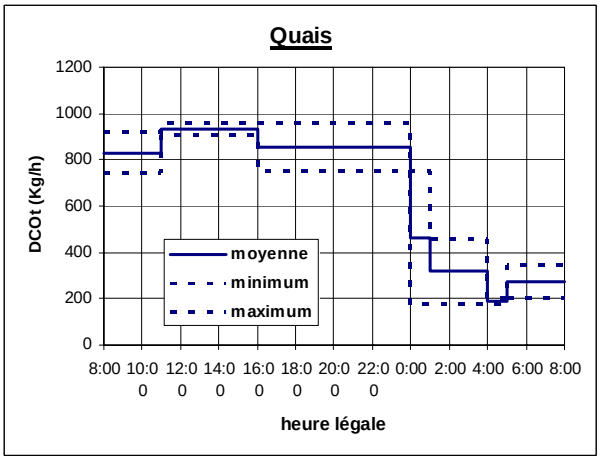

Sébastopol
Pbt (g/h)
heure légale
moyenne
minimum
maximum

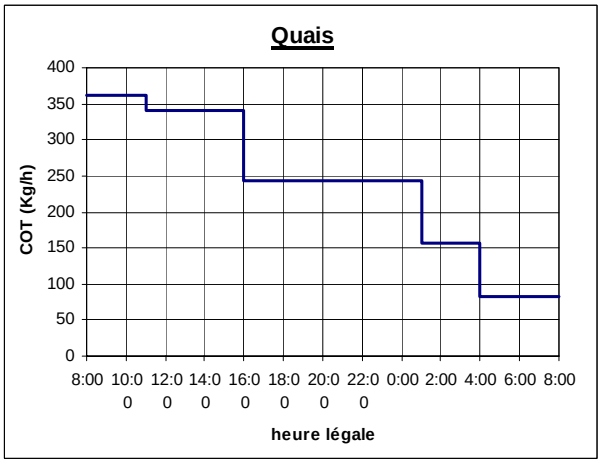

Sébastopol
Znt (g/h)
heure légale
moyenne
minimum
maximum

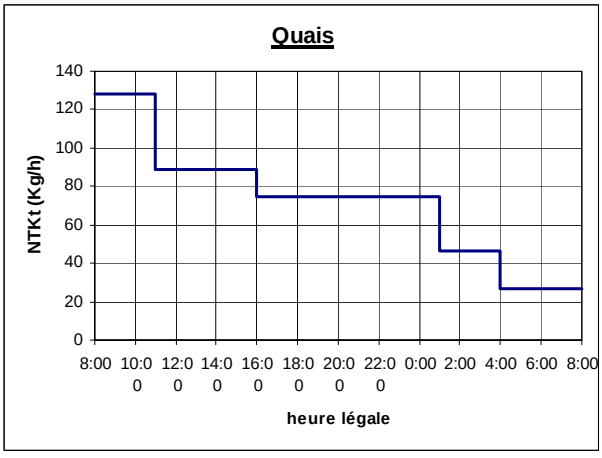
Quais

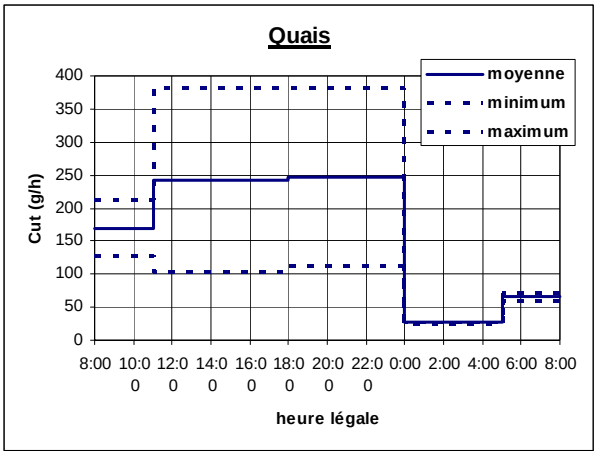

Quais
MES (Kg/h)
700
600
500
400
300
200
100
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

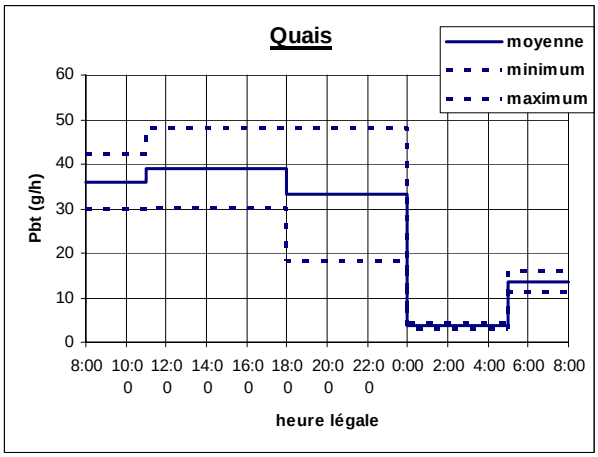

Quais
MVS (Kg/h)
600
500
400
300
200
100
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

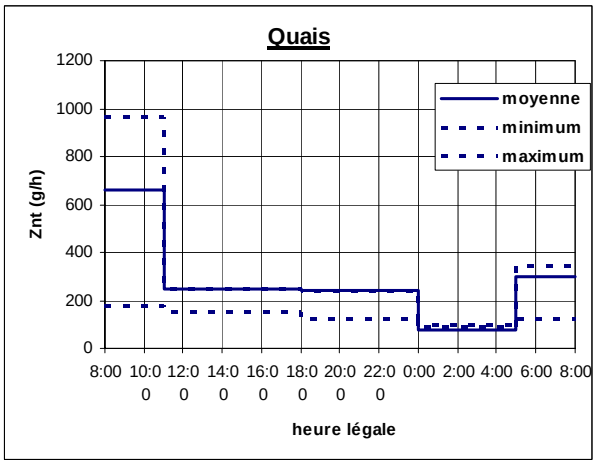

Quais
DCOt (Kg/h)
1200
1000
800
600
400
200
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale


Quais
COT (Kg/h)
400
350
300
250
200
150
100
50
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

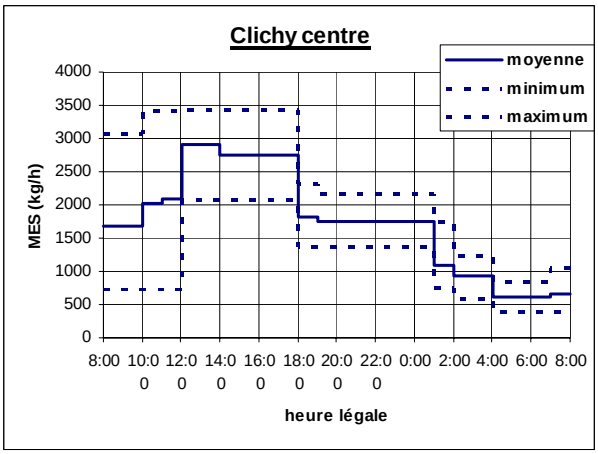

Quais
NTKt (Kg/h)
140
120
100
80
60
40
20
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

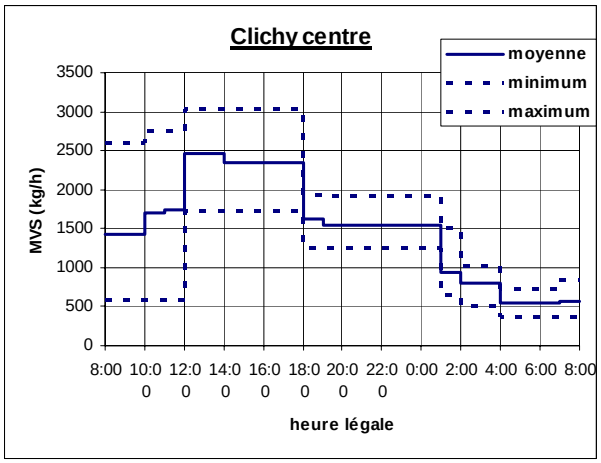

Quais
Cut (g/h)
400
350
300
250
200
150
100
50
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale
moyenne
minimum
maximum

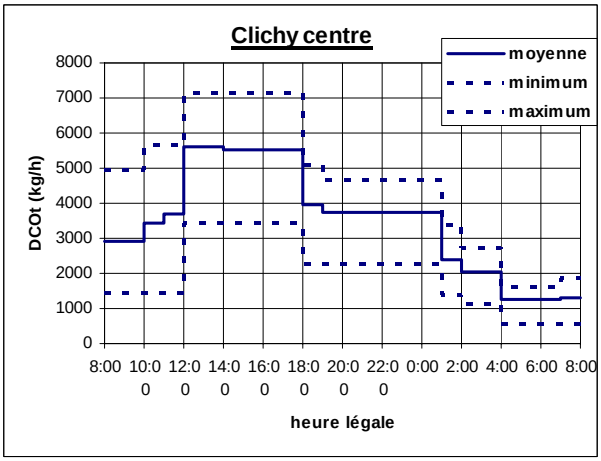

Quais
Pbt (g/h)
60
50
40
30
20
10
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale
moyenne
minimum
maximum

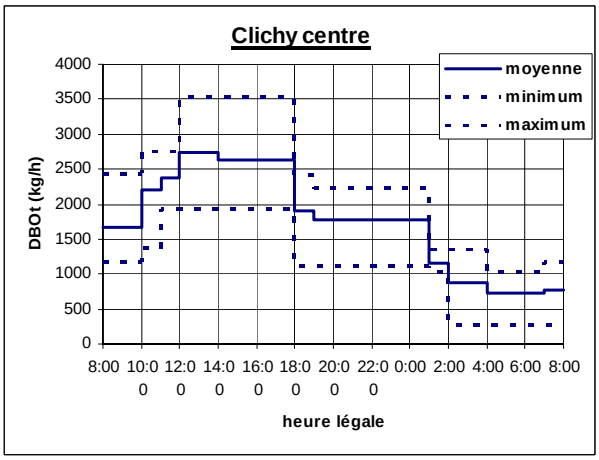

Quais
Znt (g/h)
1200
1000
800
600
400
200
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale
moyenne
minimum
maximum

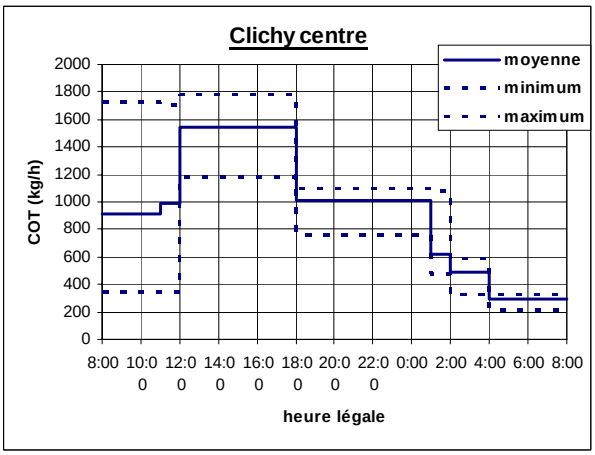
Clichy centre

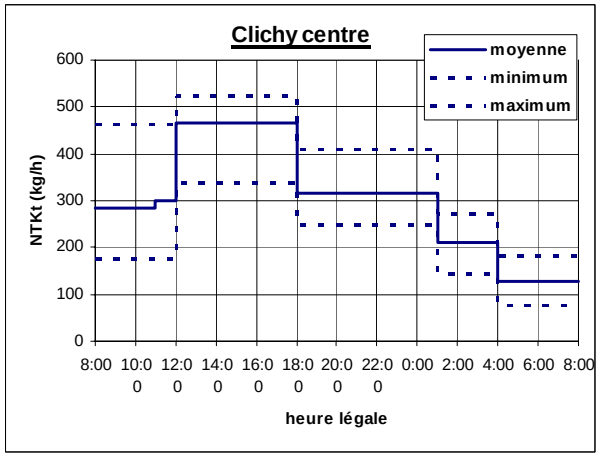


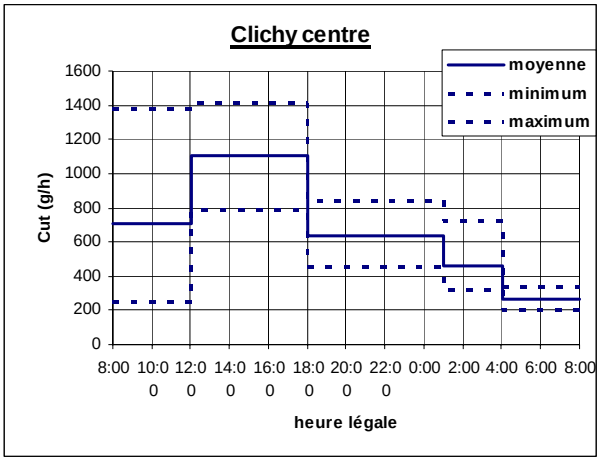




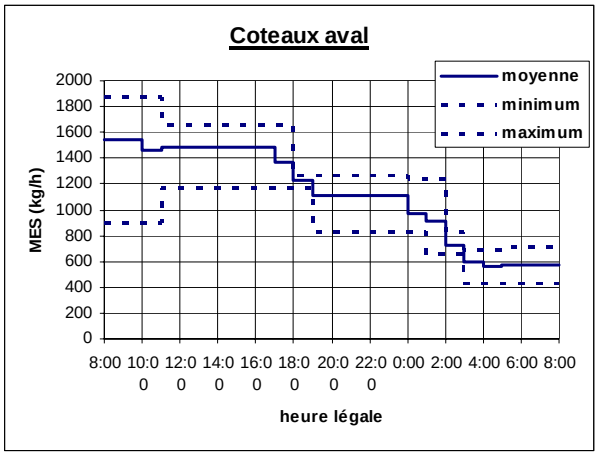


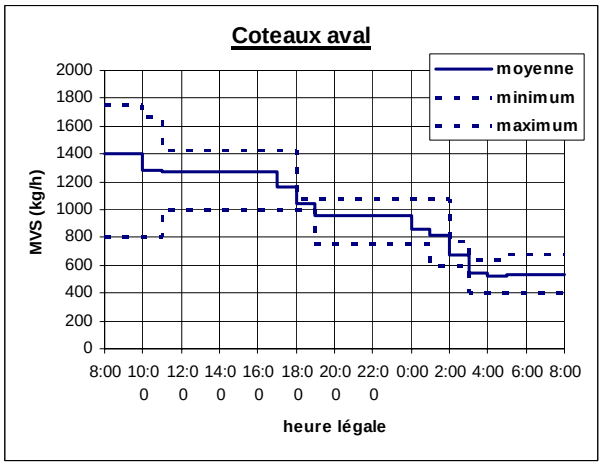


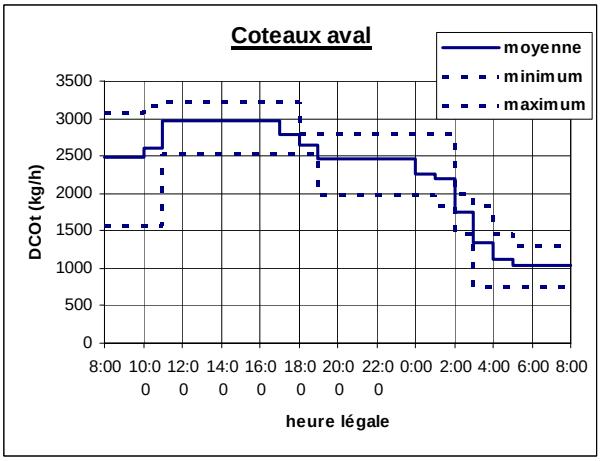


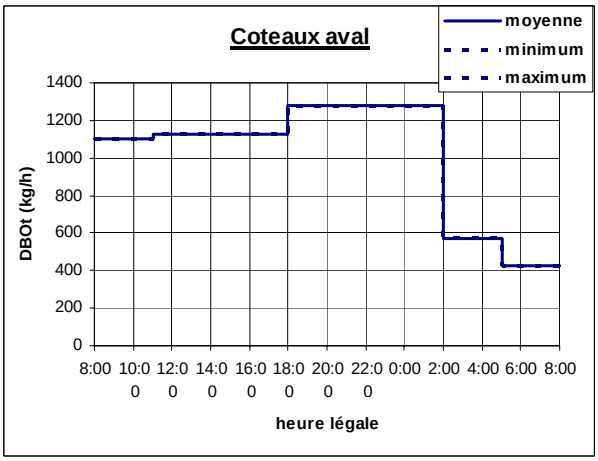

Clichy centre
moyenne
minimum
maximum
Cut (g/h)
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

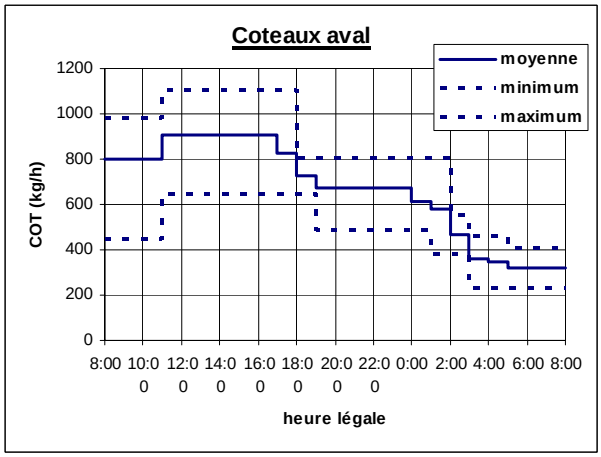
Coteaux aval

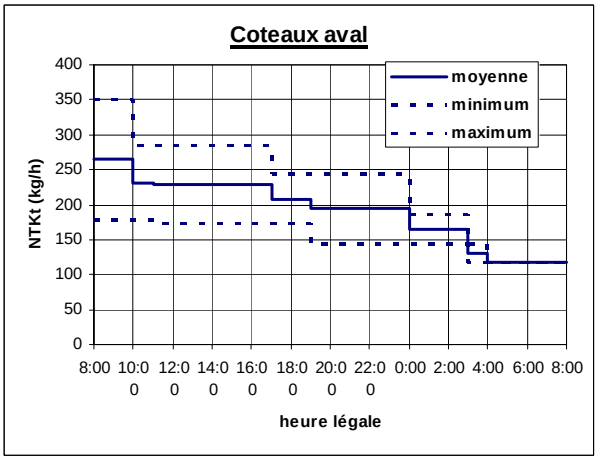


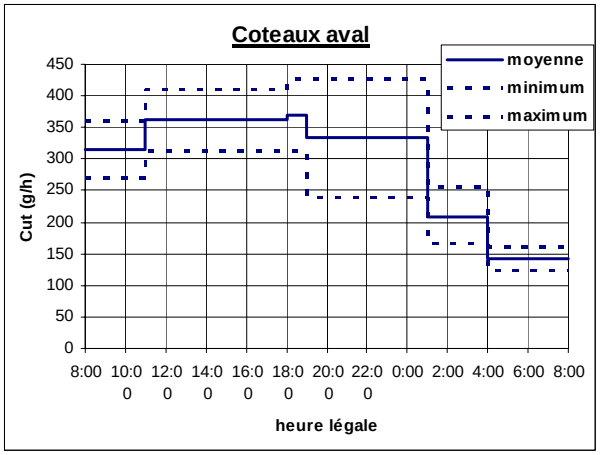


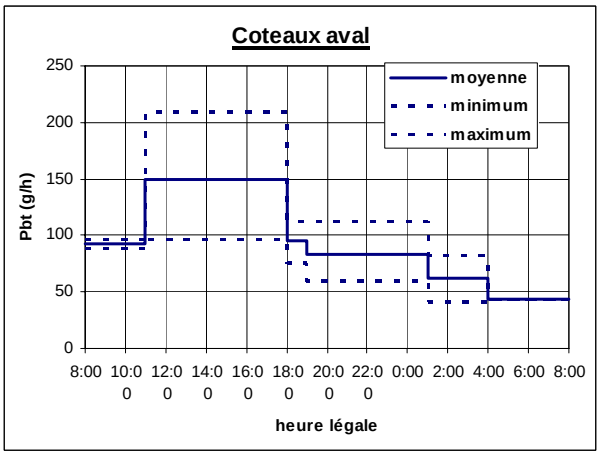


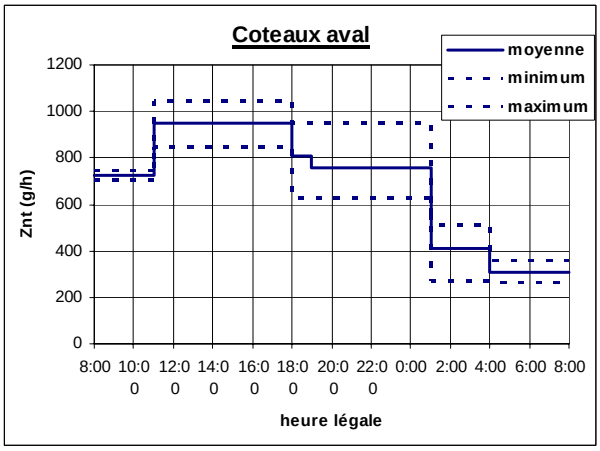




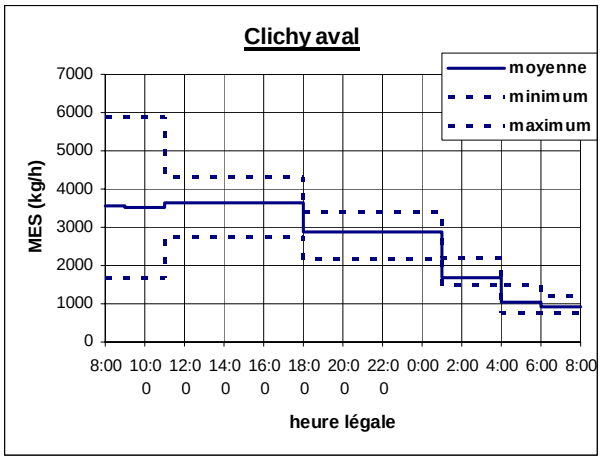


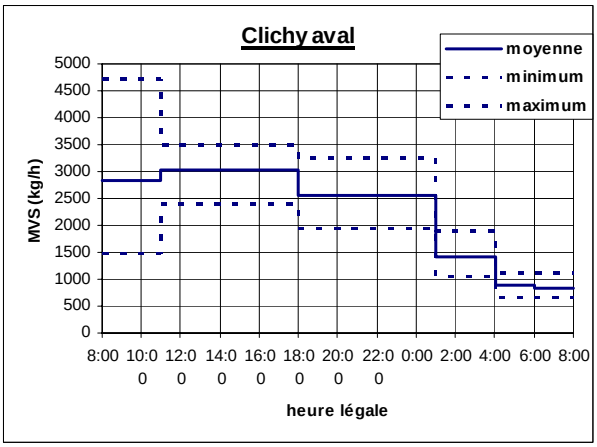

Coteaux aval
moyenne
minimum
maximum
Cut (g/h)
heure légale

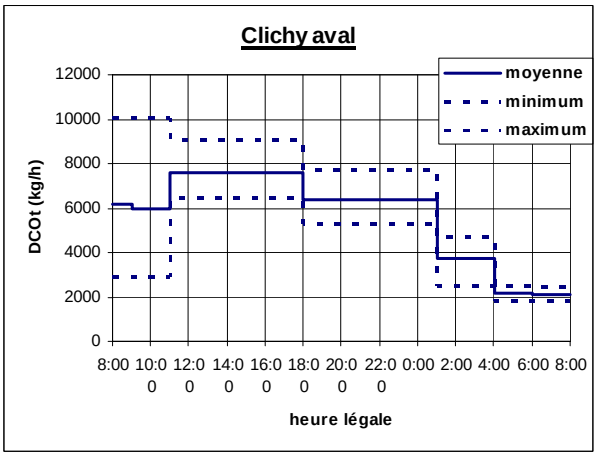

Coteaux aval
moyenne
minimum
maximum
Pbt (g/h)
heure légale

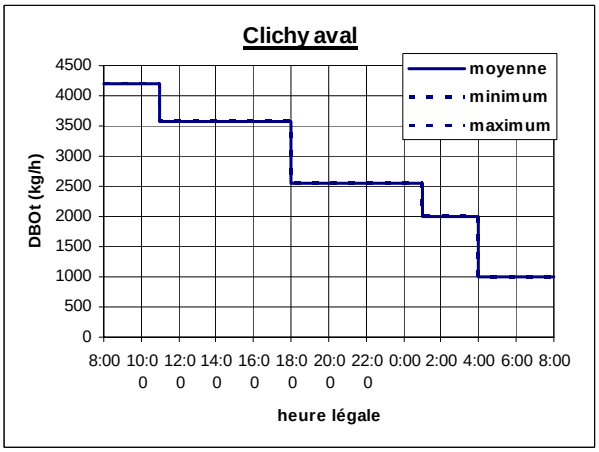

Coteaux aval
moyenne
minimum
maximum
Znt (g/h)
heure légale

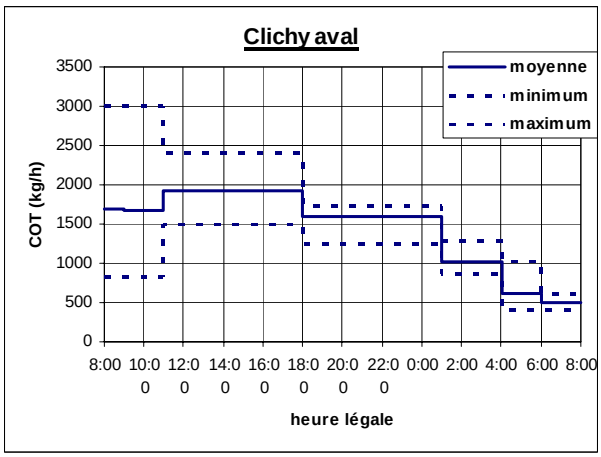
Clichy aval

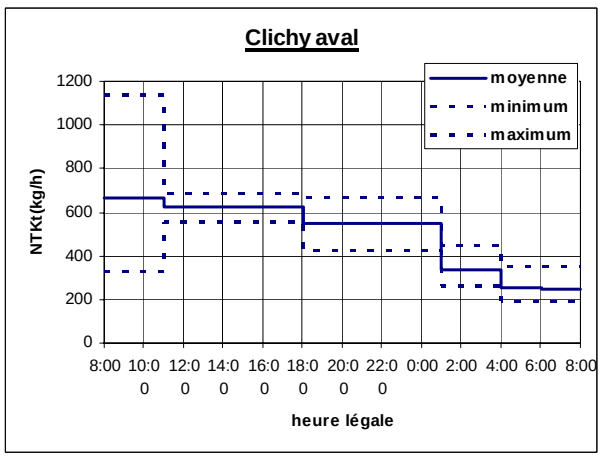

Clichy aval
moyenne
minimum
maximum
MES (kg/h)
heure légale

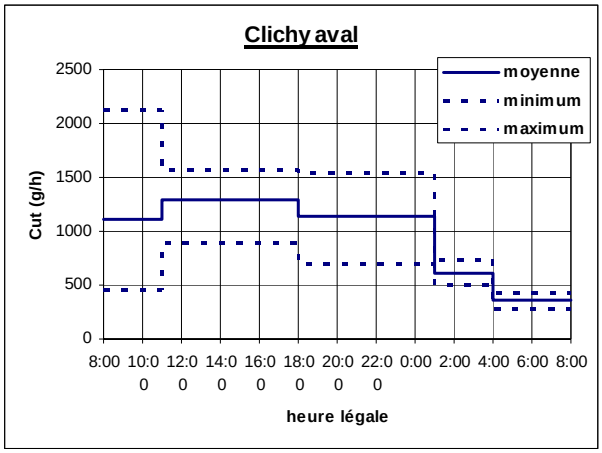

Clichy aval
moyenne
minimum
maximum
MVS (kg/h)
heure légale

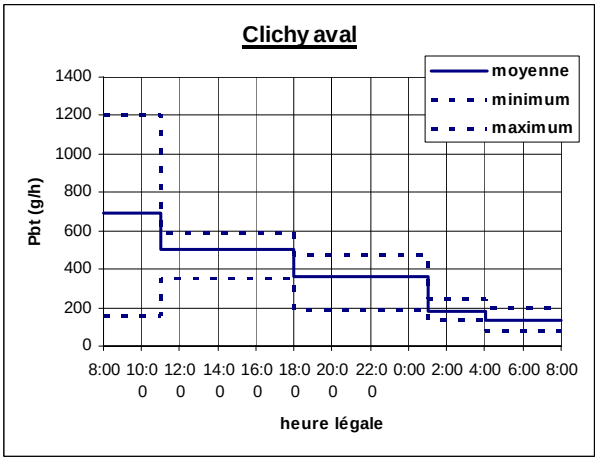

Clichy aval
moyenne
minimum
maximum
DCOt (kg/h)
heure légale

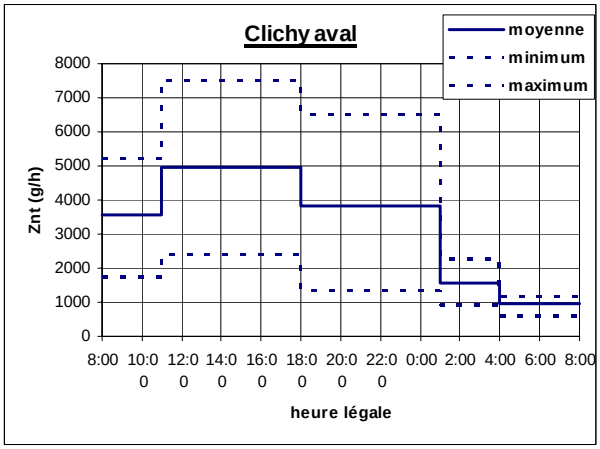

Clichy aval
moyenne
minimum
maximum
DBOt (kg/h)
heure légale


Clichy aval
moyenne
minimum
maximum
COT (kg/h)
heure légale


Clichy aval
moyenne
minimum
maximum
NTKt(kg/h)
heure légale

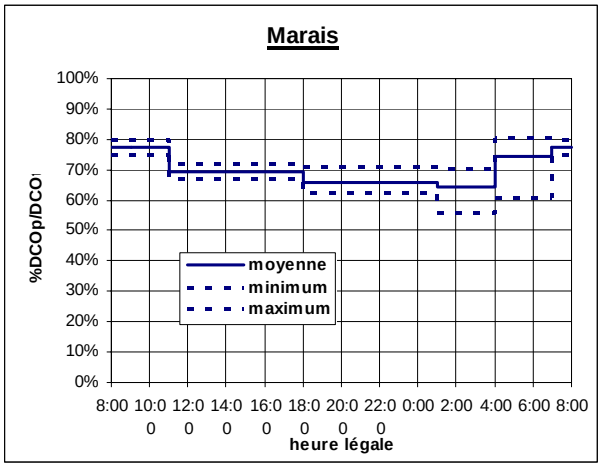

Clichy aval
moyenne
minimum
maximum
Cut (g/h)
2500
2000
1500
1000
500
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

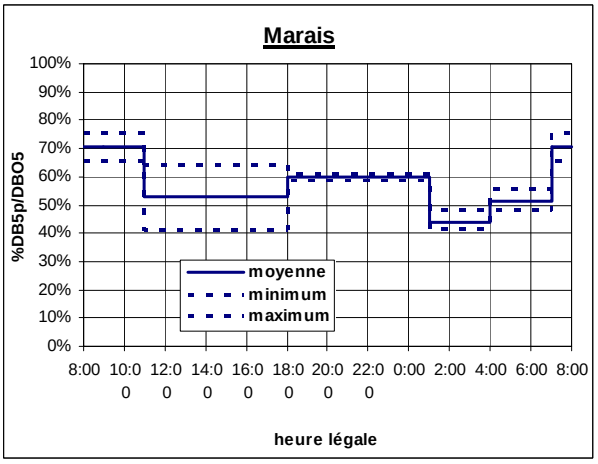

Clichy aval
moyenne
minimum
maximum
Pbt (g/h)
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

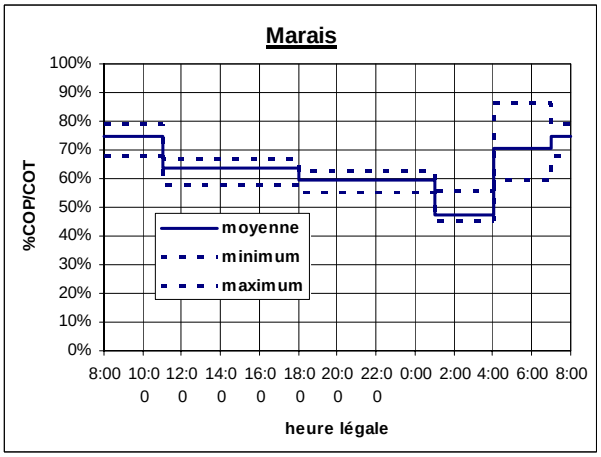

Clichy aval
moyenne
minimum
maximum
Znt (g/h)
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

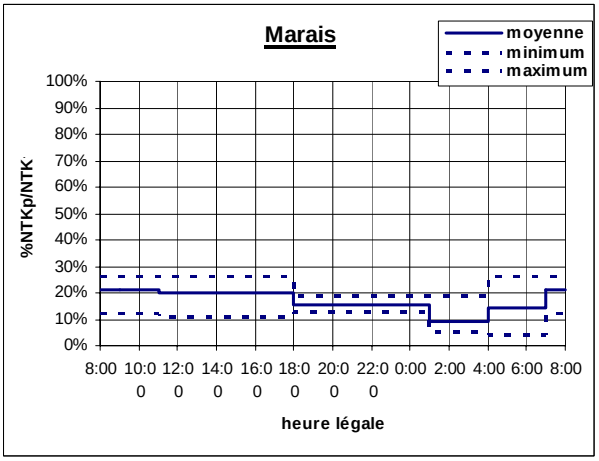
ANNEXE 34 : variabilité des pourcentages dissous-particulaire d'un jour de temps sec à un autre

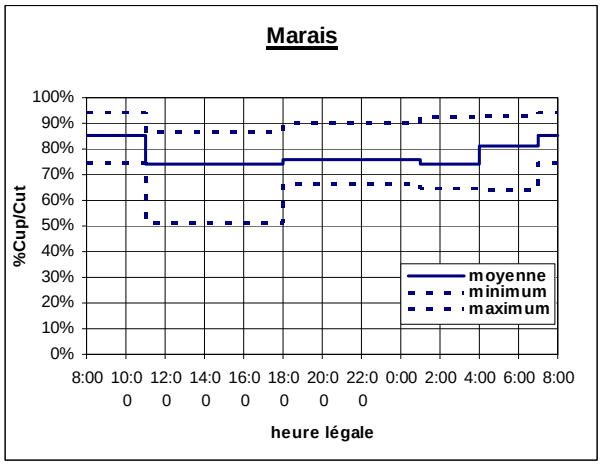
Marais

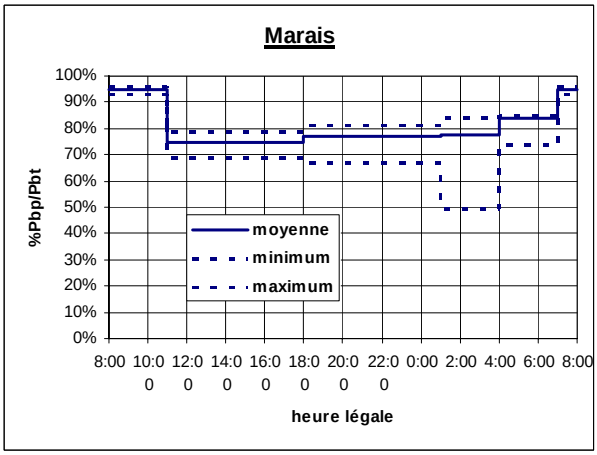




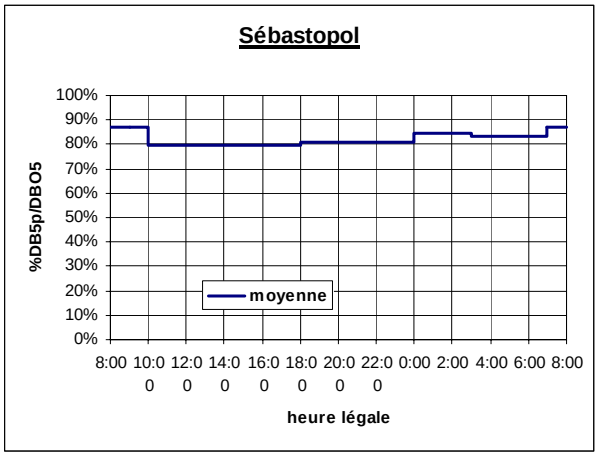


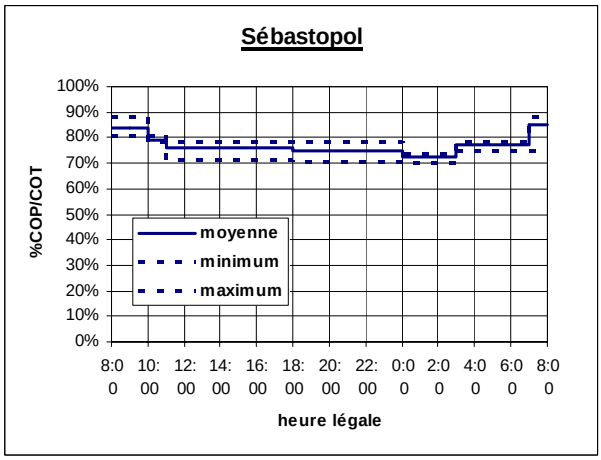


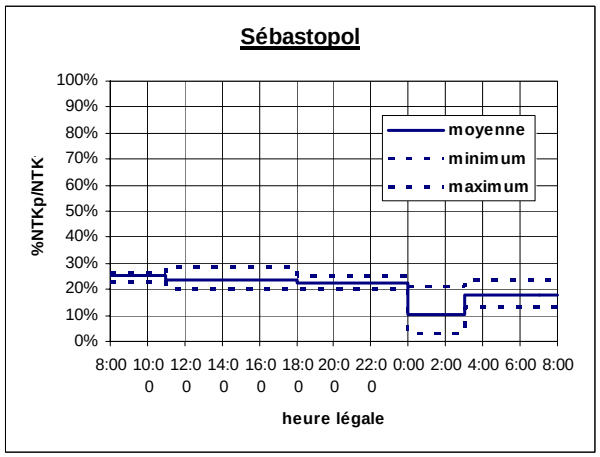

Marais
%Cup/Cut
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale
moyenne
minimum
maximum

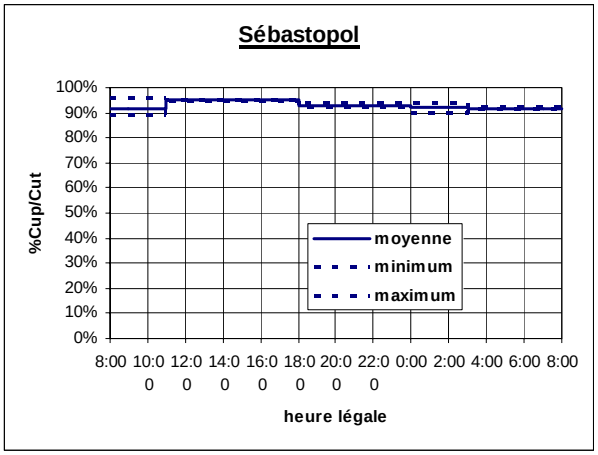

Marais
%Pbp/Pbt
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale
moyenne
minimum
maximum

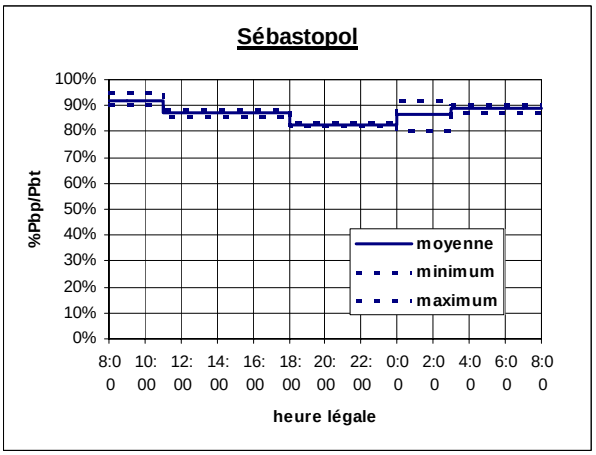
Sébastopol

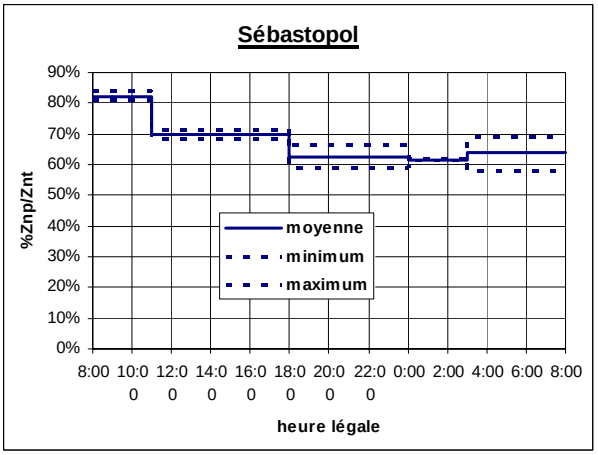

Sébastopol
%DB5p/DBO5
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale


Sébastopol
%COP/COT
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

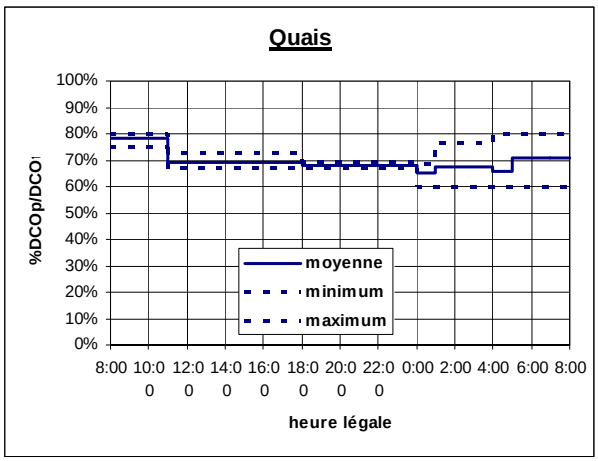

Sébastopol
%NTKp/NTK
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

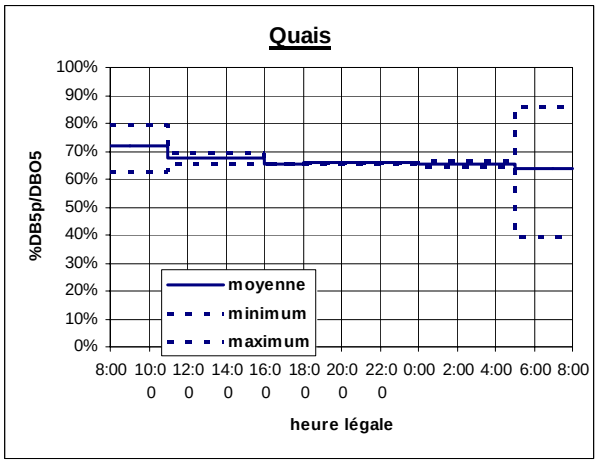

Sébastopol
%Cup/Cut
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
moyenne
minimum
maximum
heure légale

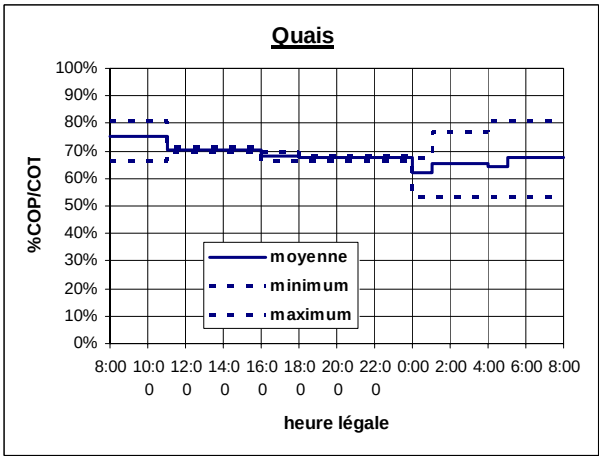

Sébastopol
%Pbp/Pbt
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
moyenne
minimum
maximum
heure légale

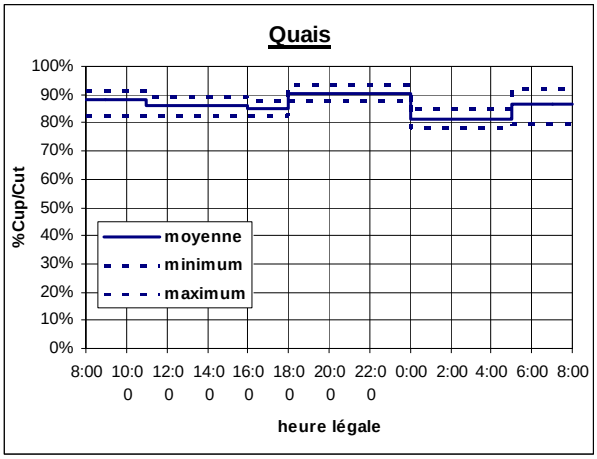

Sébastopol
%Znp/Znt
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
moyenne
minimum
maximum
heure légale

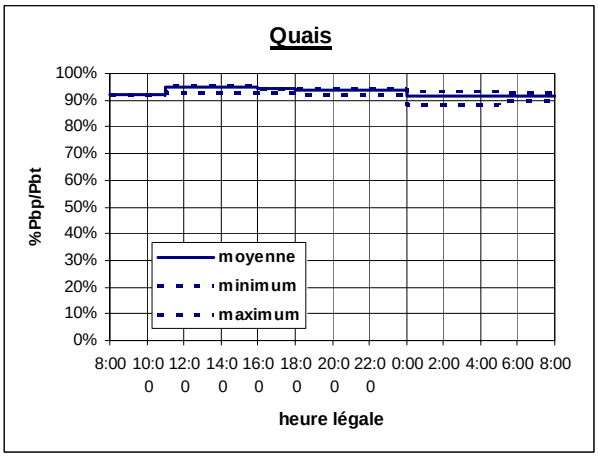
Quais

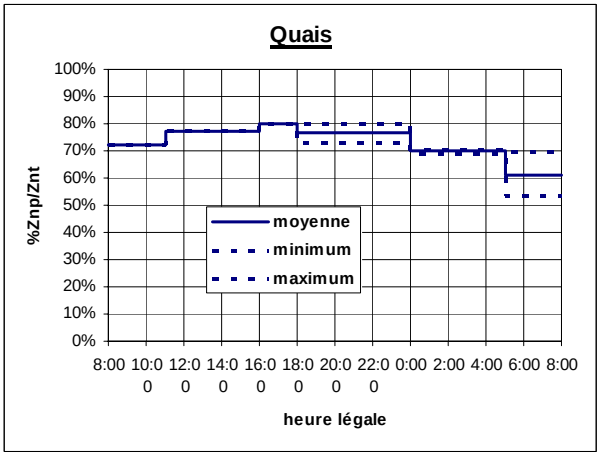

Quais
%DCOp/DCO
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale


Quais
%DB5p/DBO5
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

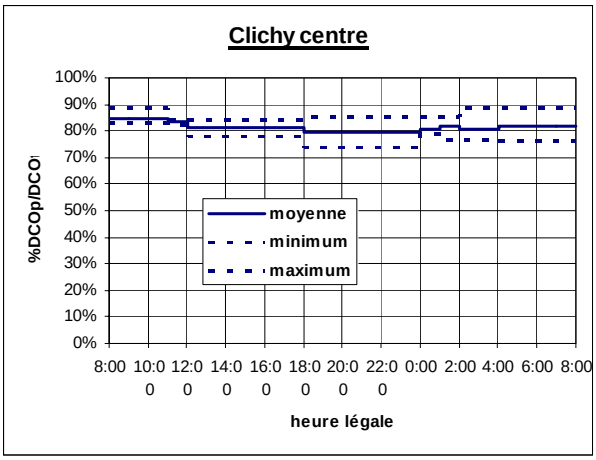

Quais
%COP/COT
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

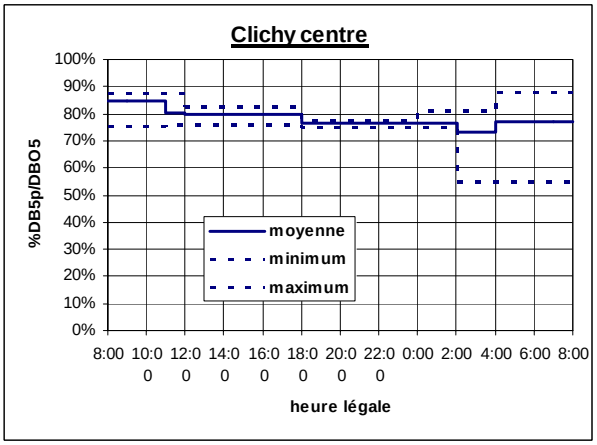

Quais
%Cup/Cut
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

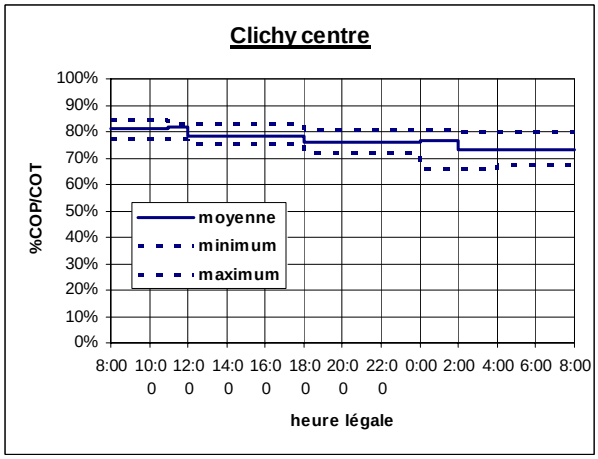

Quais
%Pbp/Pbt
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

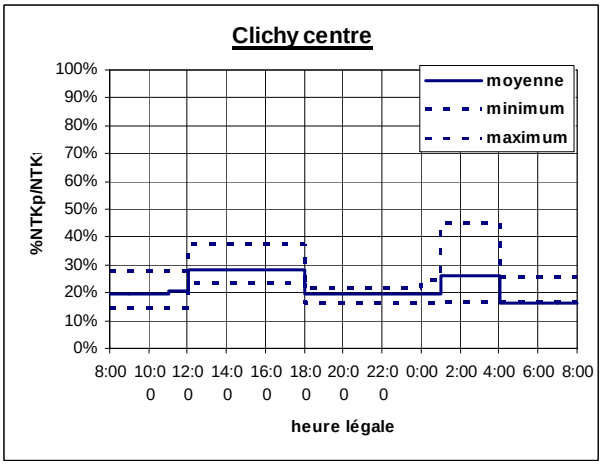

Quais
%Znp/Znt
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

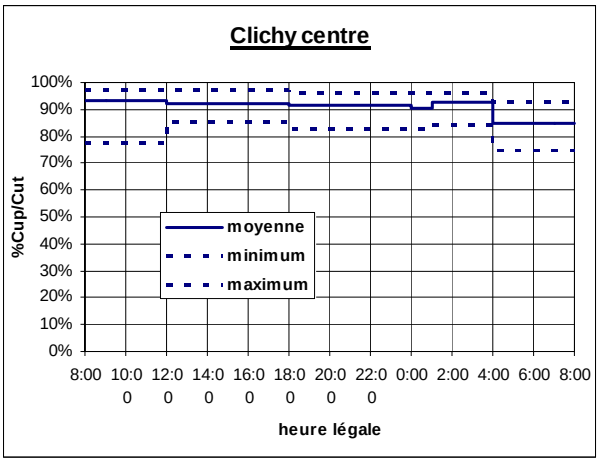
Clichy centre

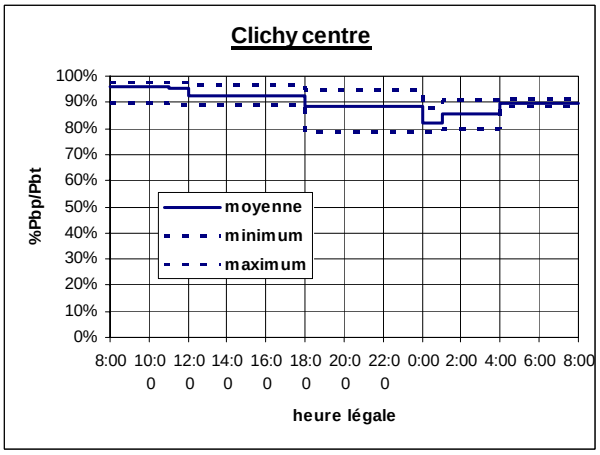


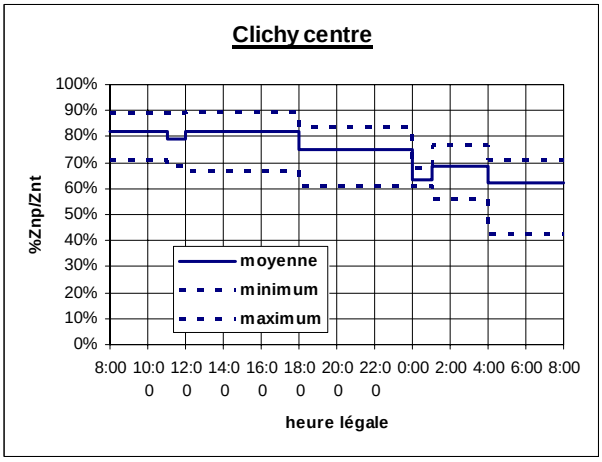




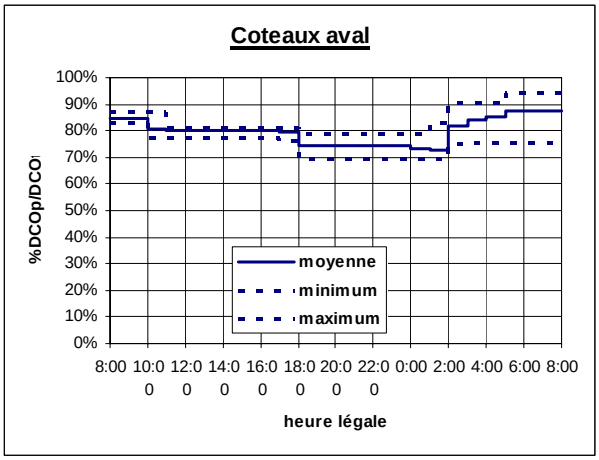


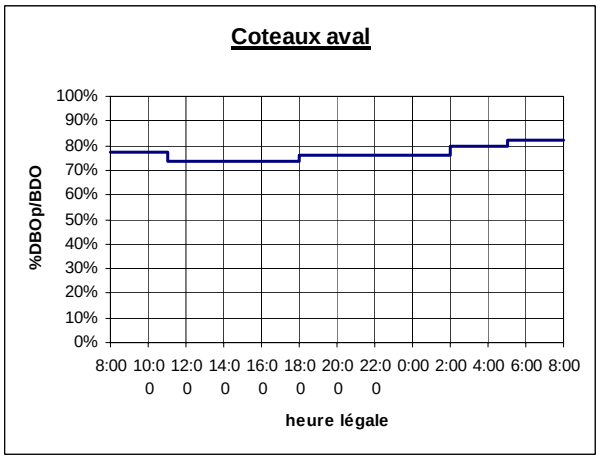

Clichy centre
%Cup/Cut
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

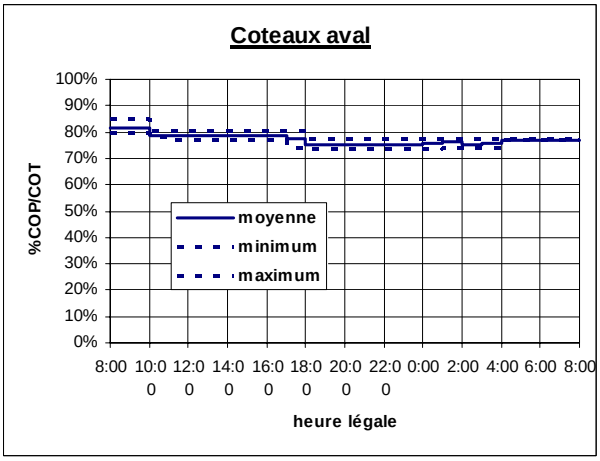

Clichy centre
%Pbp/Pbt
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

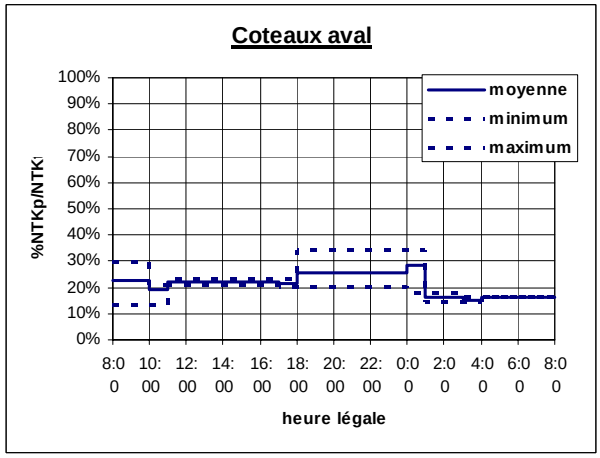

Clichy centre
%Znp/Znt
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

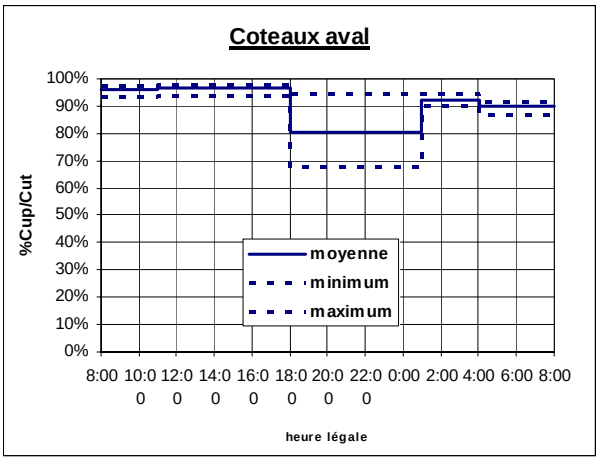
Coteaux aval

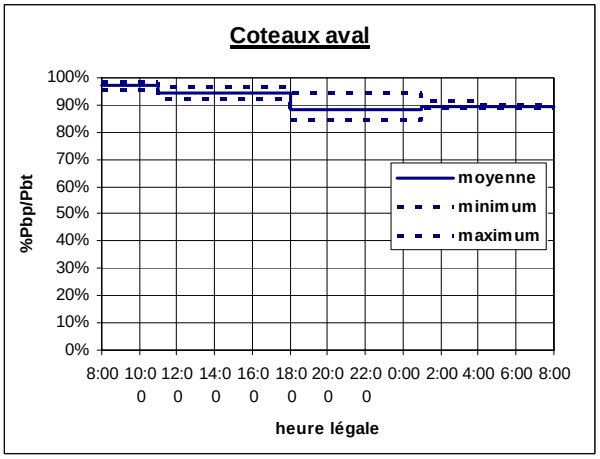


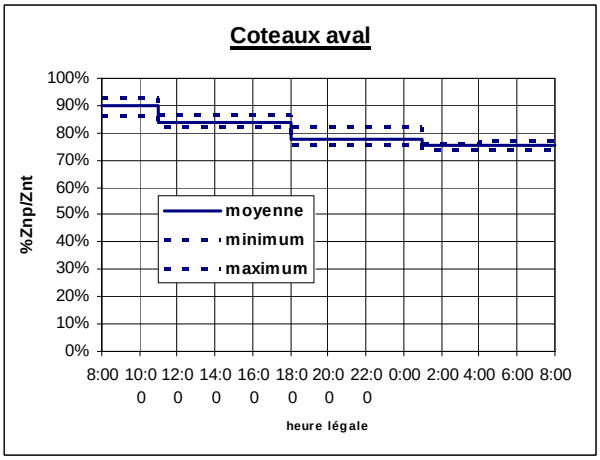




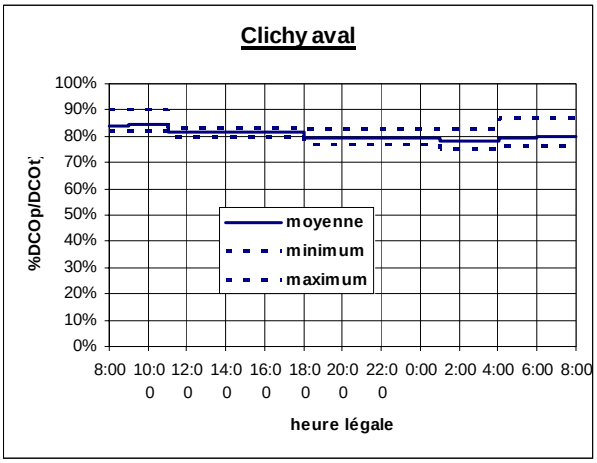


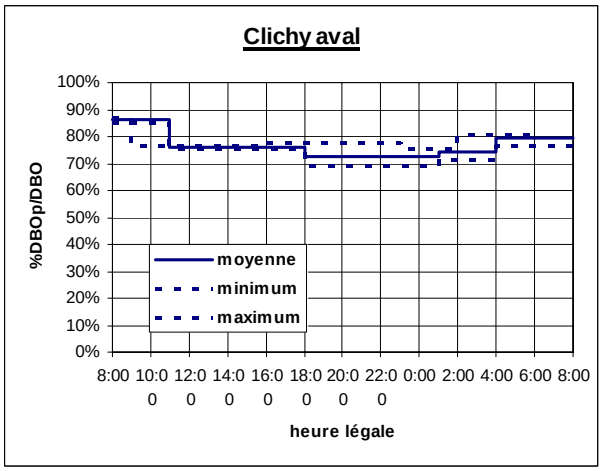

Coteaux aval
%Cup/Cut
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
moyenne
minimum
maximum
heure légale

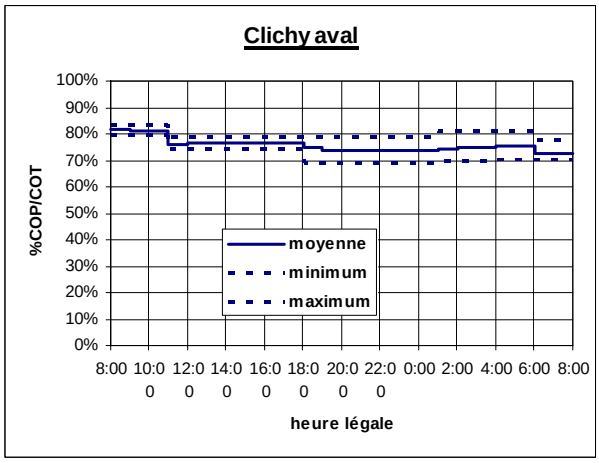

Coteaux aval
%Pbp/Pbt
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
moyenne
minimum
maximum
heure légale

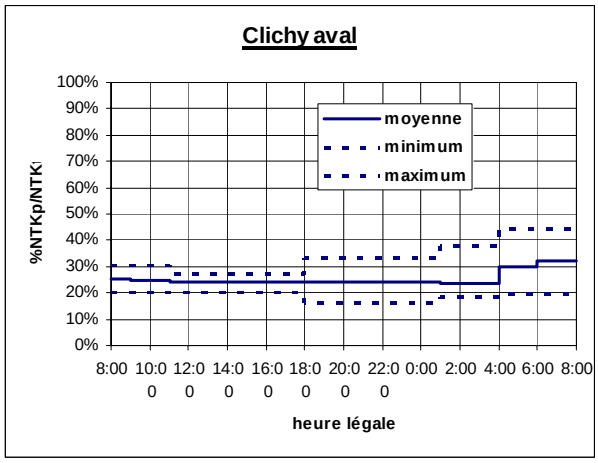

Coteaux aval
%Znp/Znt
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
moyenne
minimum
maximum
heure légale

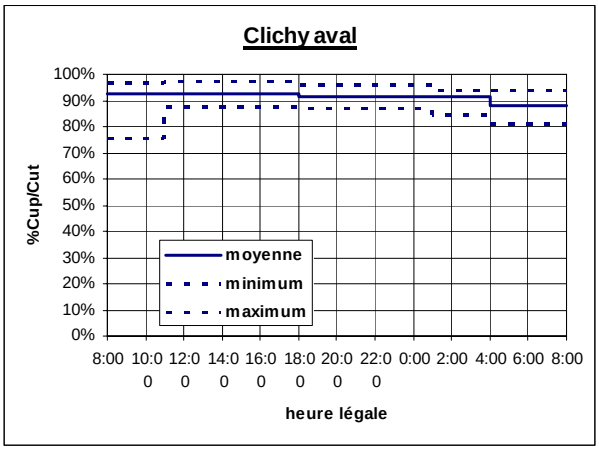
Clichy aval

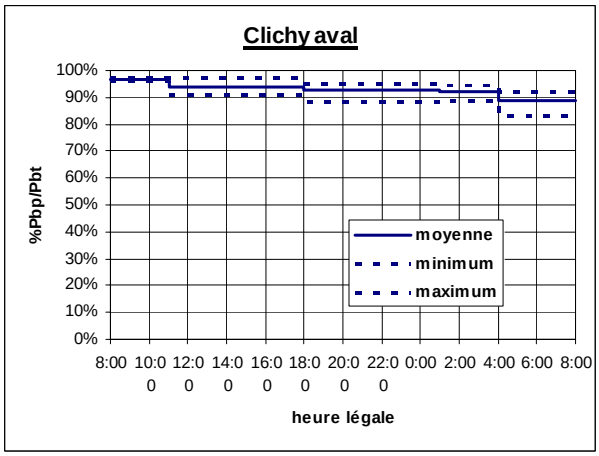

Clichy aval
%DCOp/DCOt
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale


Clichy aval
%DBOp/DBO
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale


Clichy aval
%COP/COT
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

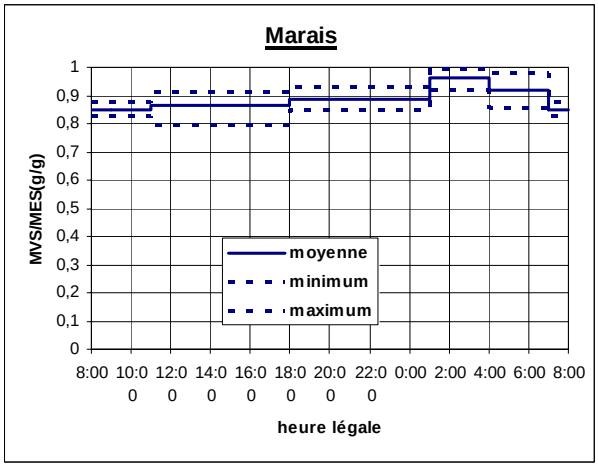

Clichy aval
%NTKp/NTK
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

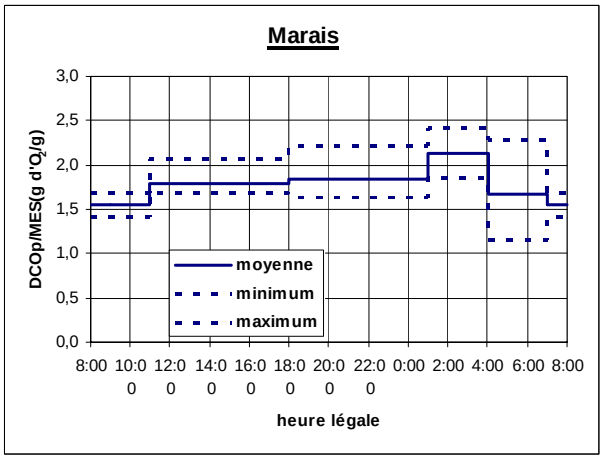

Clichy aval
%Cup/Cut
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

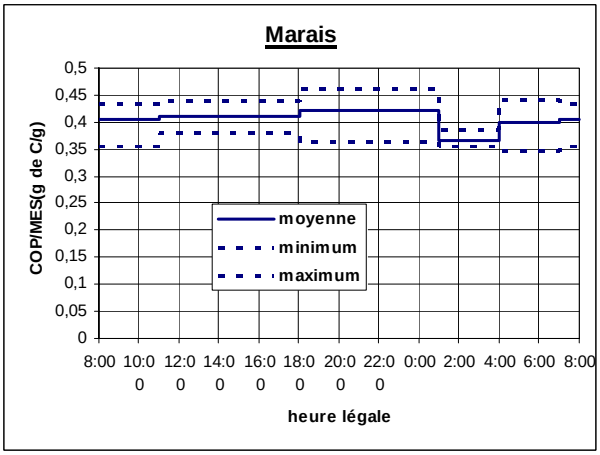

Clichy aval
%Pbp/Pbt
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
moyenne
minimum
maximum
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

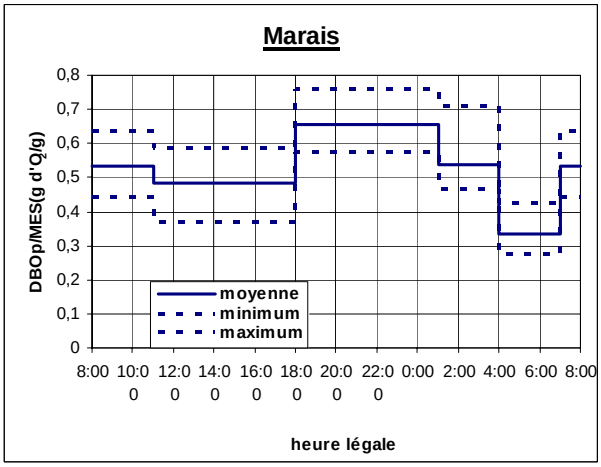
ANNEXE 35 : variabilité des teneurs en MO et en métaux lourds d'un jour de temps sec à un autre

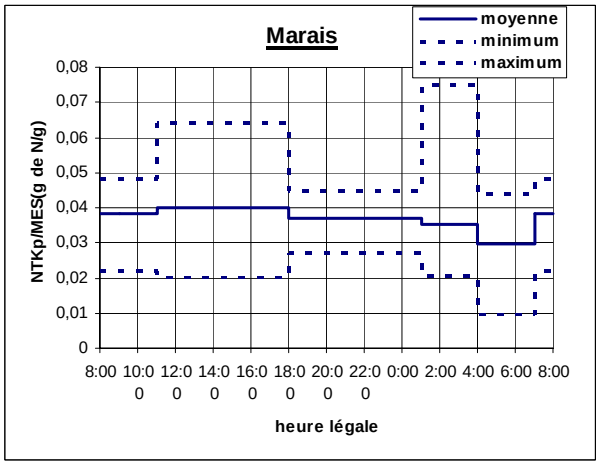
Marais

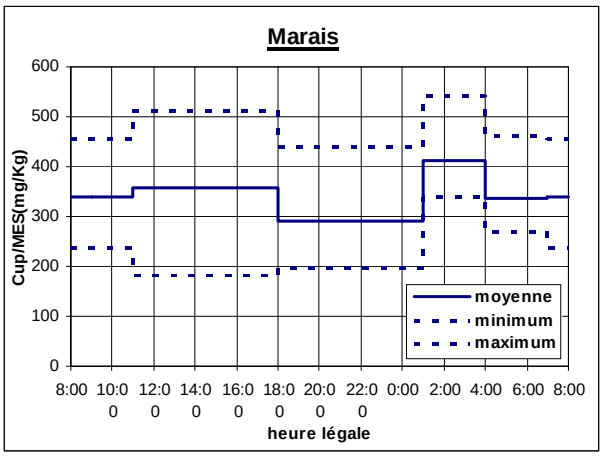


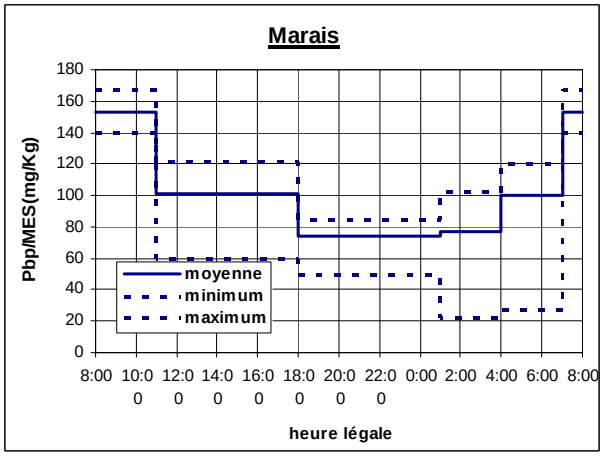


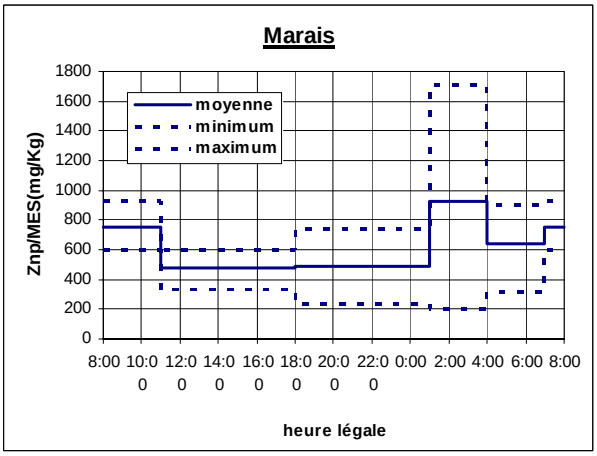




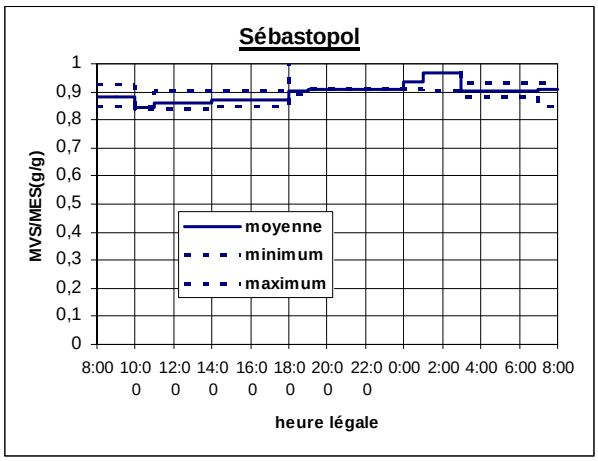


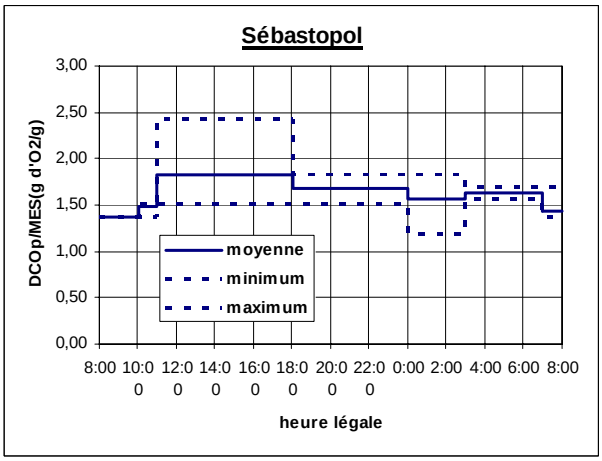

Marais
Cup/MES(mg/Kg)
600
500
400
300
200
100
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

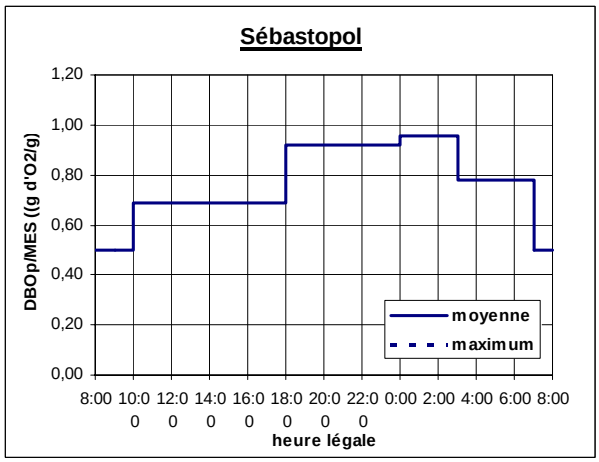

Marais
Pbp/MES(mg/Kg)
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

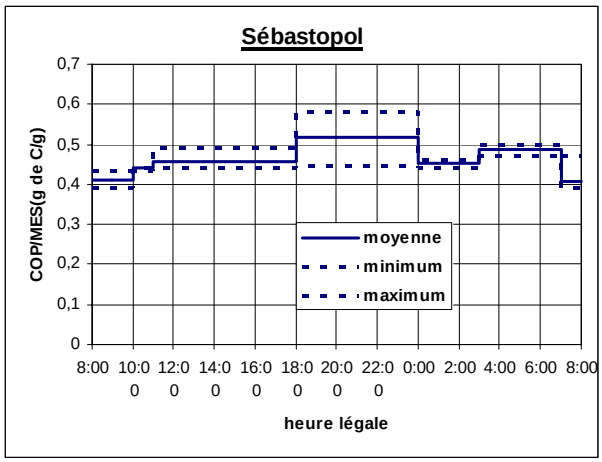

Marais
Znp/MES(mg/Kg)
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
moyenne
minimum
maximum
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

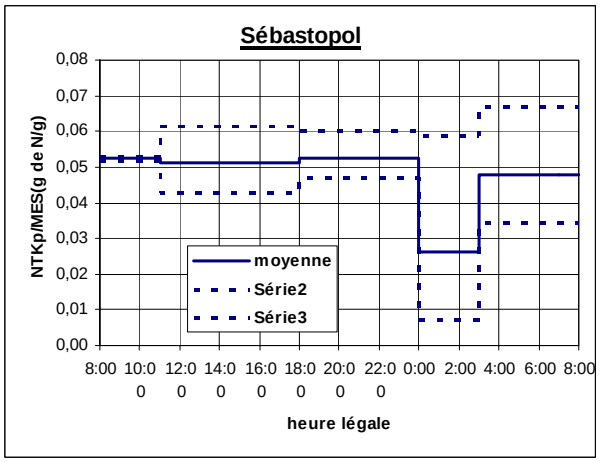
Sébastopol

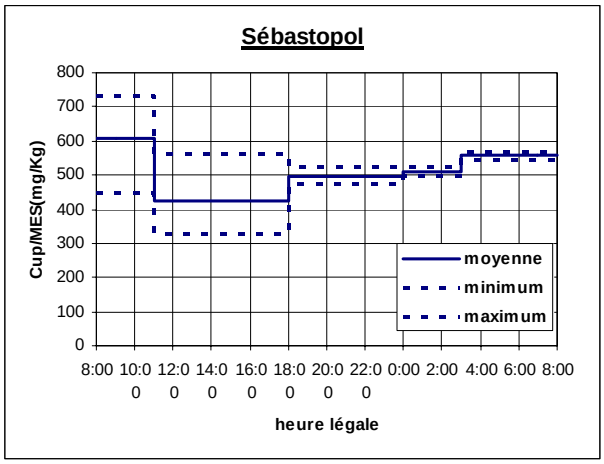

Sébastopol
MVS/MES(g/g)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

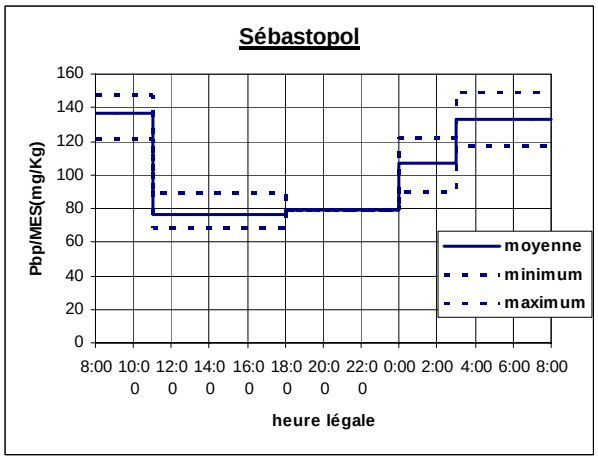

Sébastopol
DCOp/MES(g d'O2/g)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

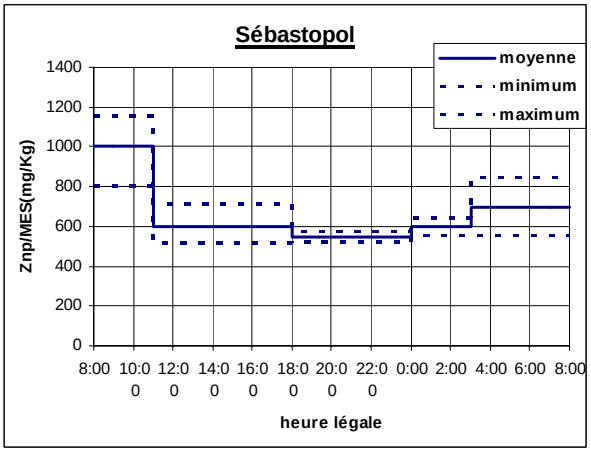

Sébastopol
DBOp/MES ((g d'O2/g)
moyenne
maximum
heure légale


Sébastopol
COP/MES(g de C/g)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

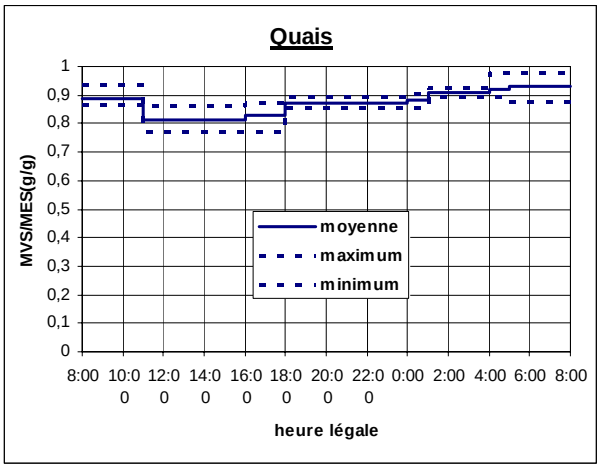

Sébastopol
NTKp/MES(g de N/g)
moyenne
Série2
Série3
heure légale

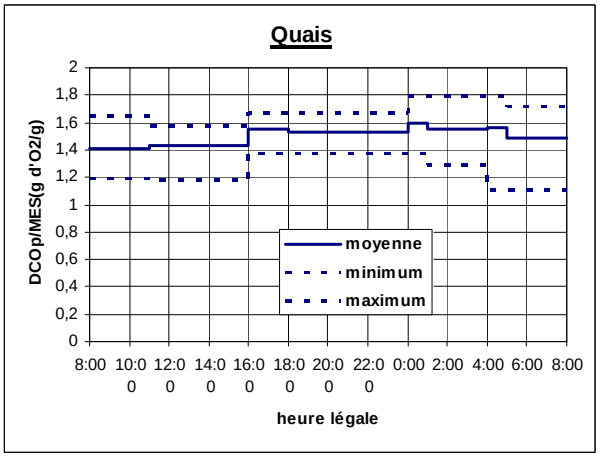

Sébastopol
Cup/MES(mg/Kg)
800
700
600
500
400
300
200
100
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale
moyenne
minimum
maximum

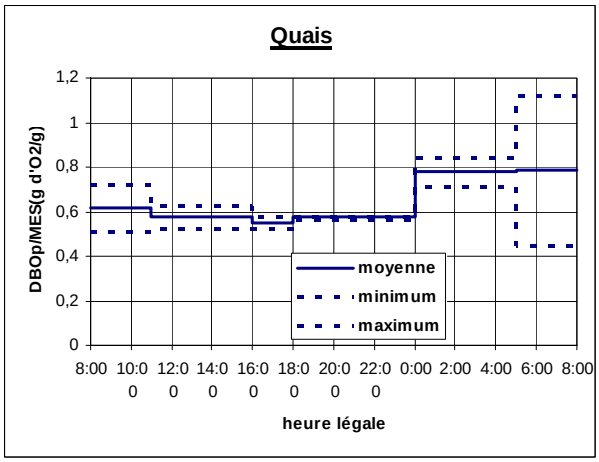

Sébastopol
Pbp/MES(mg/Kg)
160
140
120
100
80
60
40
20
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale
moyenne
minimum
maximum

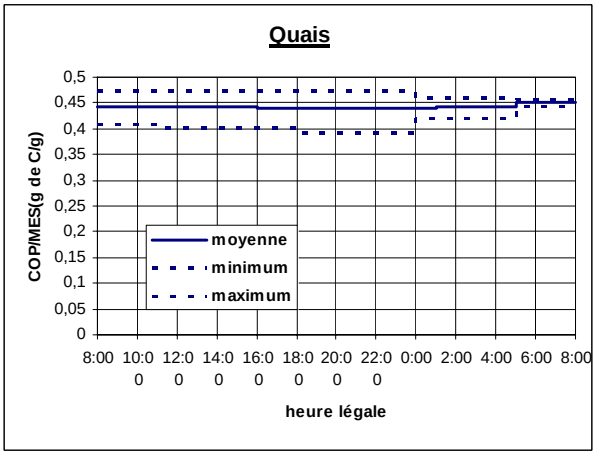

Sébastopol
Znp/MES(mg/Kg)
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale
moyenne
minimum
maximum

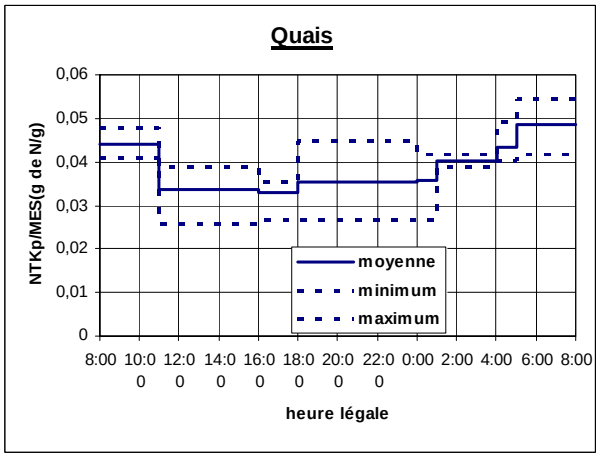
Quais

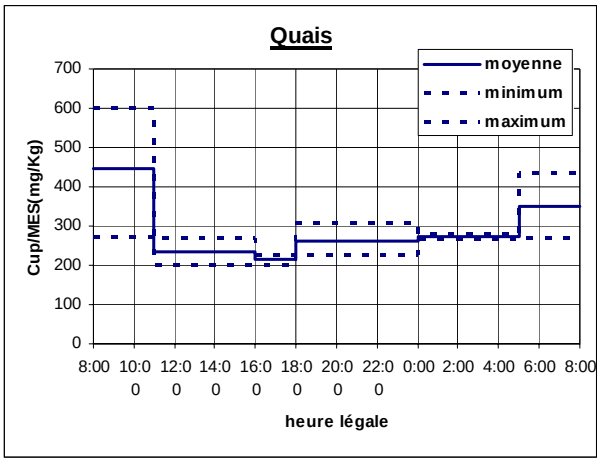

Quais
MVS/MES(g/g)
moyenne
maximum
minimum
heure légale

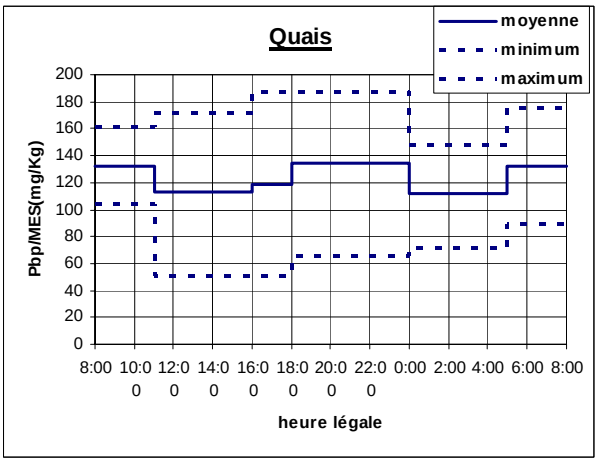

Quais
DCOp/MES(g d'O2/g)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

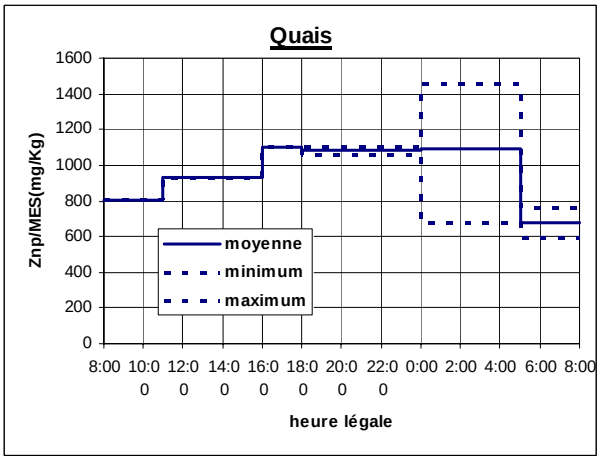

Quais
DBOp/MES(g d'O2/g)
moyenne
minimum
maximum
heure légale


Quais
COP/MES(g de C/g)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

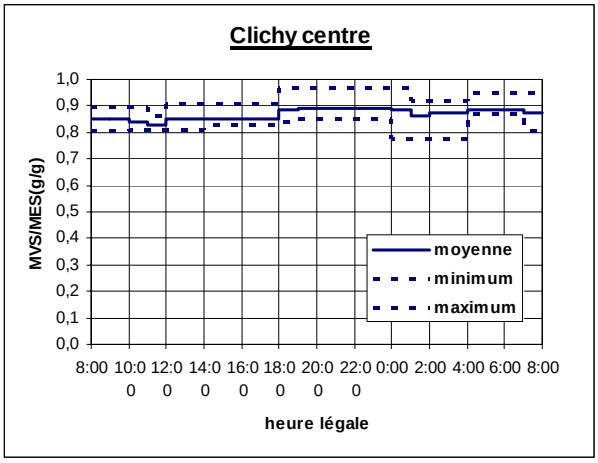

Quais
NTKp/MES(g de N/g)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

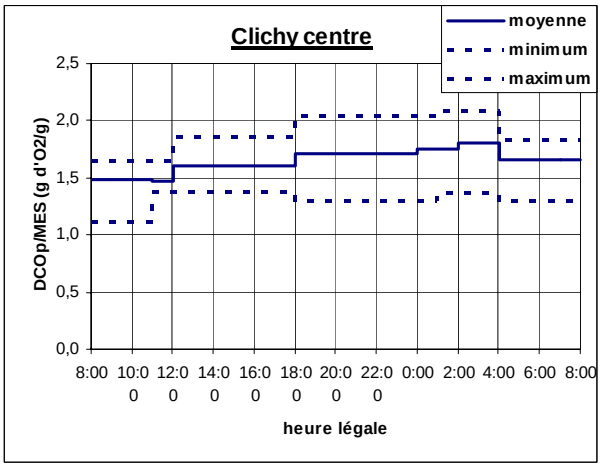

Quais
moyenne
minimum
maximum
Cup/MES(mg/Kg)
0
100
200
300
400
500
600
700
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

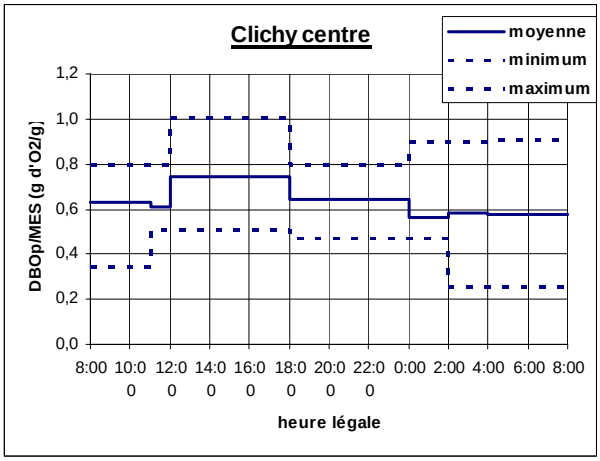

Quais
moyenne
minimum
maximum
Pbp/MES(mg/Kg)
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

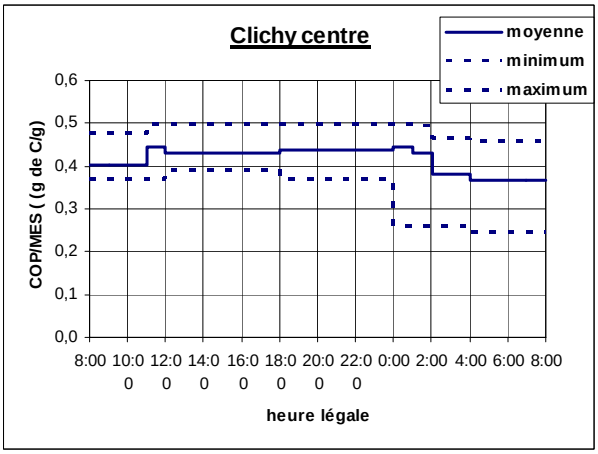

Quais
moyenne
minimum
maximum
Znp/MES(mg/Kg)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
8:00
10:00
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
4:00
6:00
8:00
heure légale

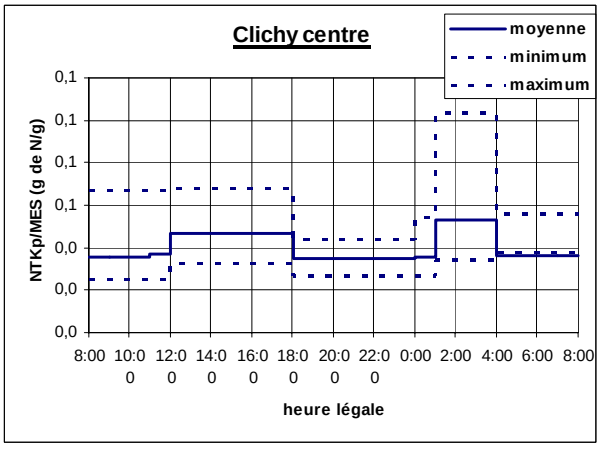
Clichy centre

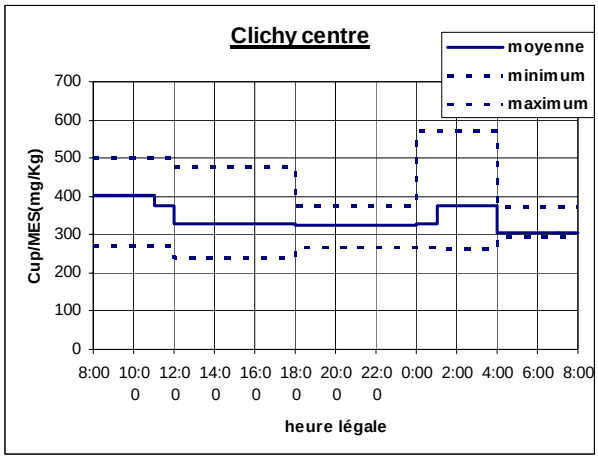


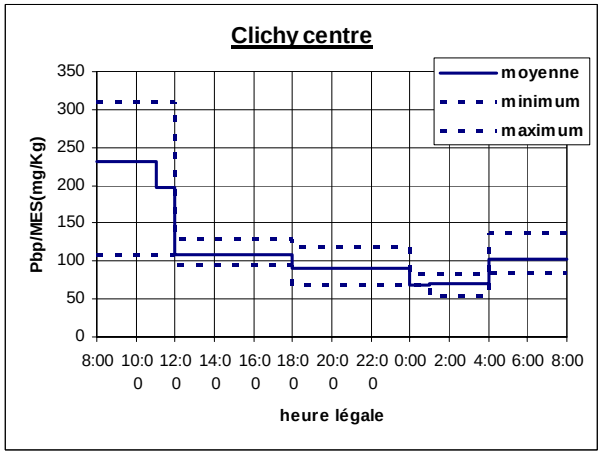


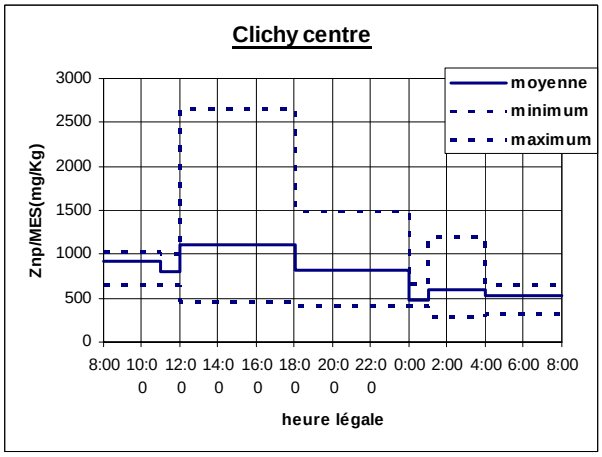




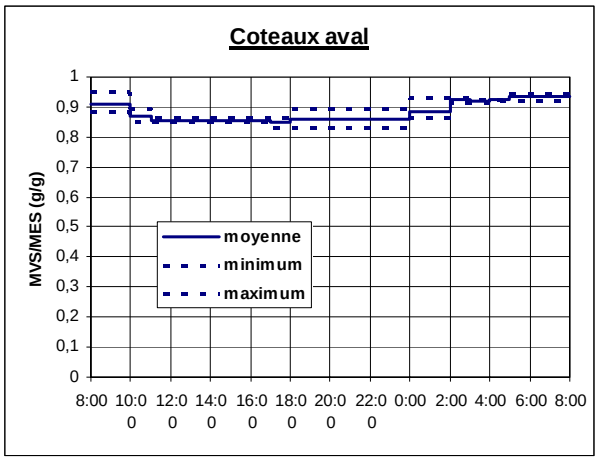


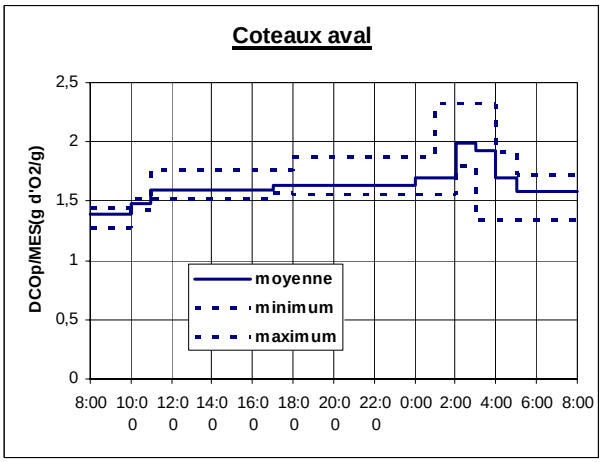

Clichy centre
moyenne
minimum
maximum
Cup/MES(mg/Kg)
700
600
500
400
300
200
100
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

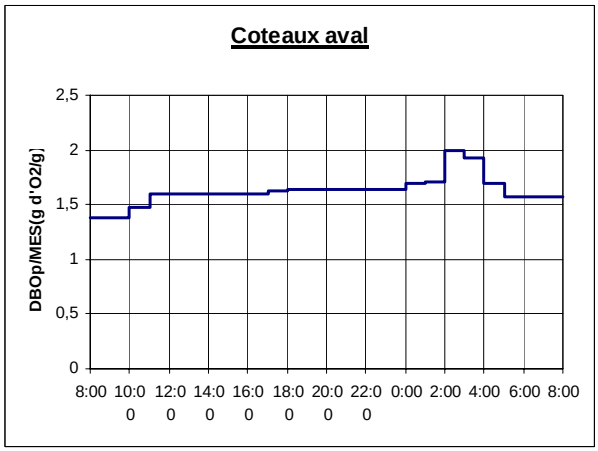

Clichy centre
moyenne
minimum
maximum
Pbp/MES(mg/Kg)
350
300
250
200
150
100
50
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

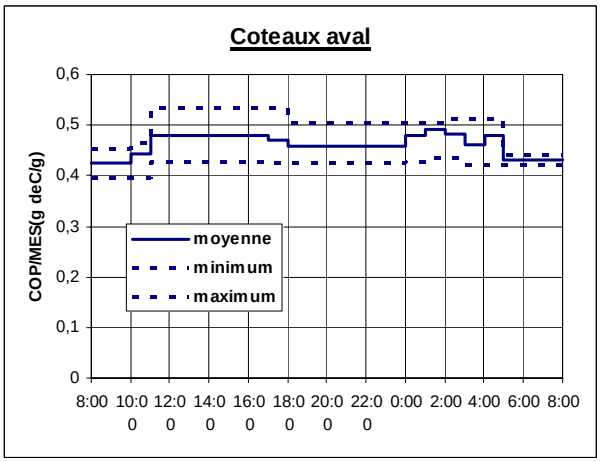

Clichy centre
moyenne
minimum
maximum
Znp/MES(mg/Kg)
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale

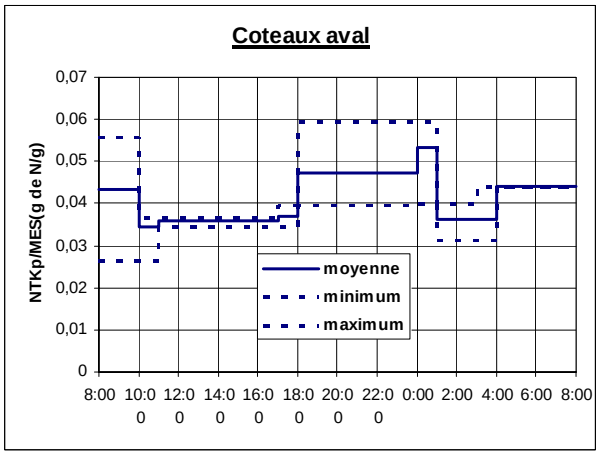
Coteaux aval

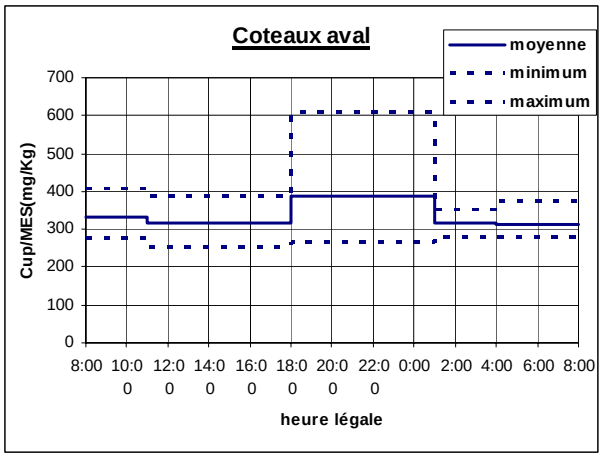


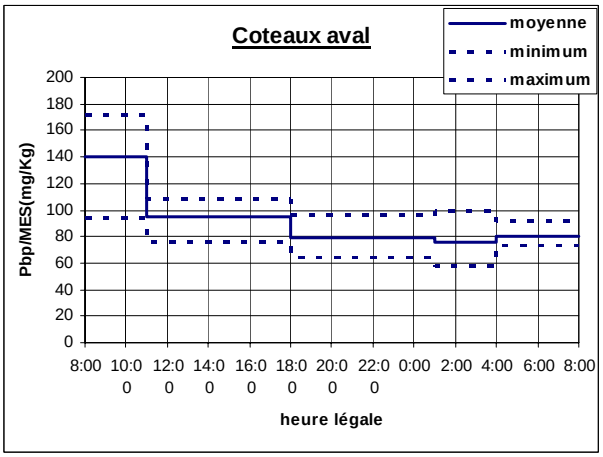


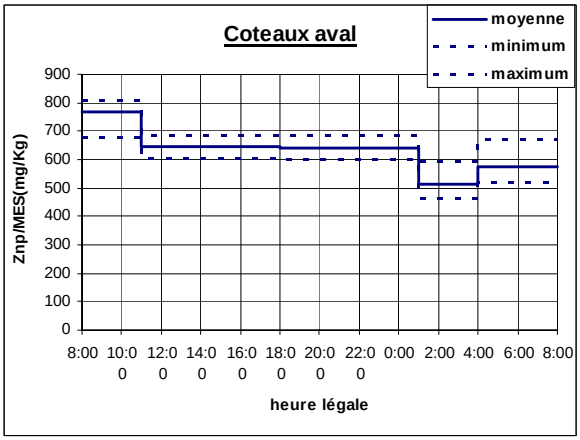




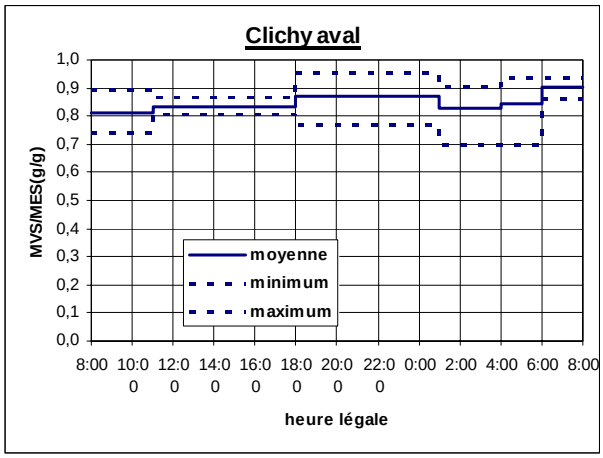


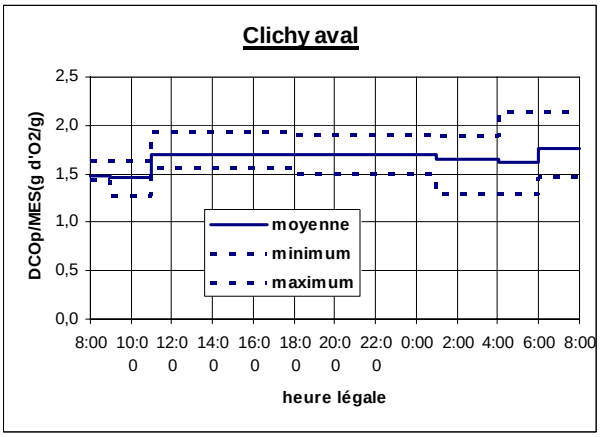

Coteaux aval
moyenne
minimum
maximum
Cup/MES(mg/Kg)
heure légale

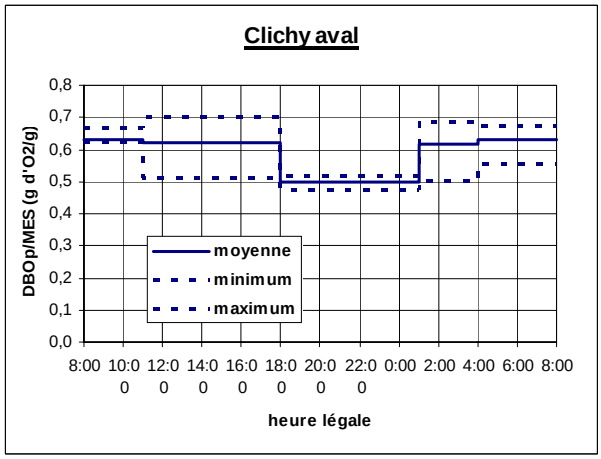

Coteaux aval
moyenne
minimum
maximum
Pbp/MES(mg/Kg)
heure légale

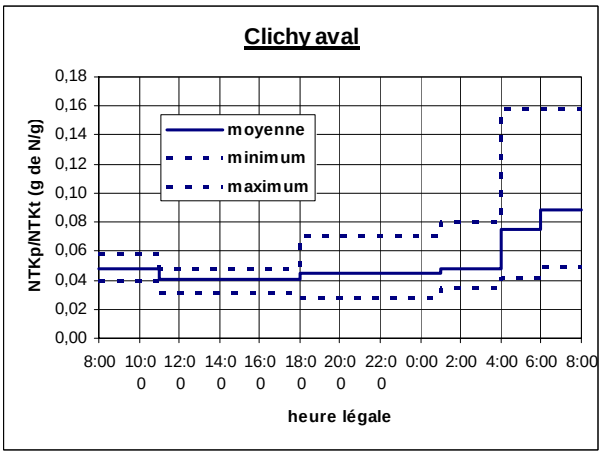

Coteaux aval
moyenne
minimum
maximum
Znp/MES(mg/Kg)
heure légale

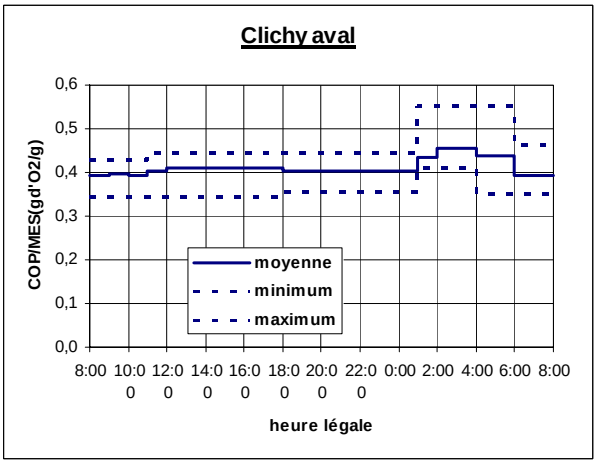
Clichy aval

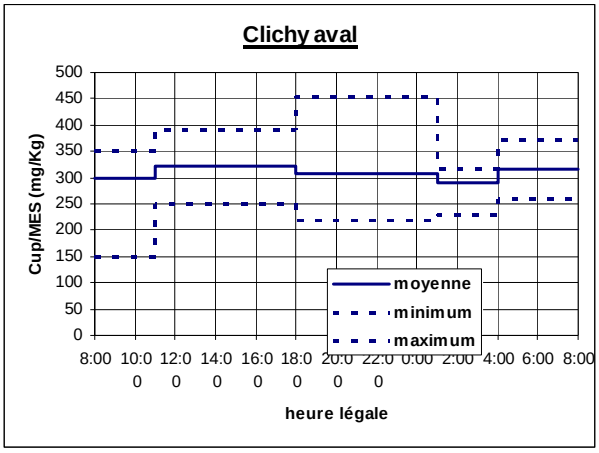

Clichy aval
MVS/MES(g/g)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

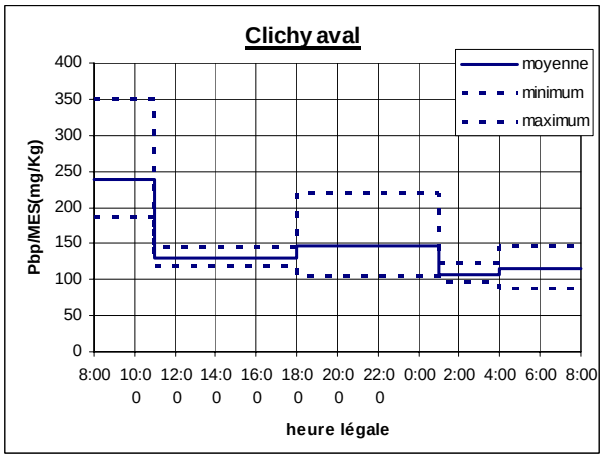

Clichy aval
DCOp/MES(g d'O2/g)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

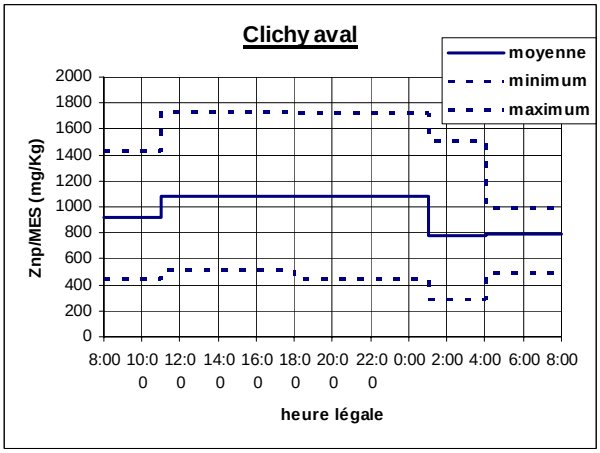

Clichy aval
DBOp/MES (g d'O2/g)
moyenne
minimum
maximum
heure légale


Clichy aval
NTKp/NTKt (g de N/g)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

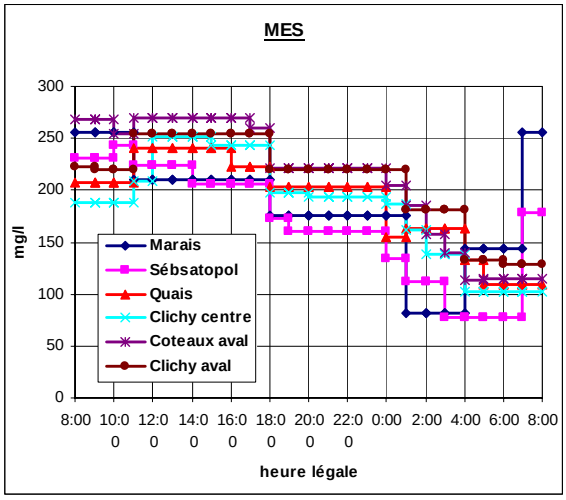

Clichy aval
COP/MES(gd'O2/g)
moyenne
minimum
maximum
heure légale

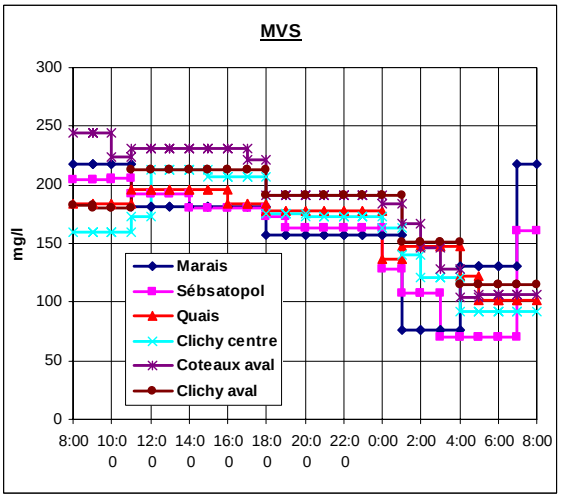

Clichy aval
Cup/MES (mg/Kg)
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale
moyenne
minimum
maximum

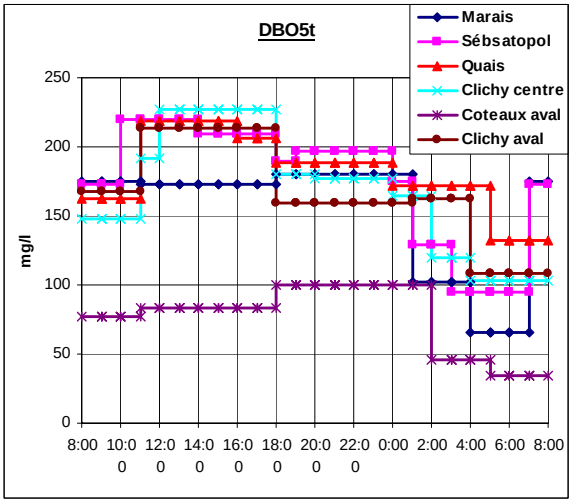

Clichy aval
Pbp/MES(mg/Kg)
400
350
300
250
200
150
100
50
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale
moyenne
minimum
maximum

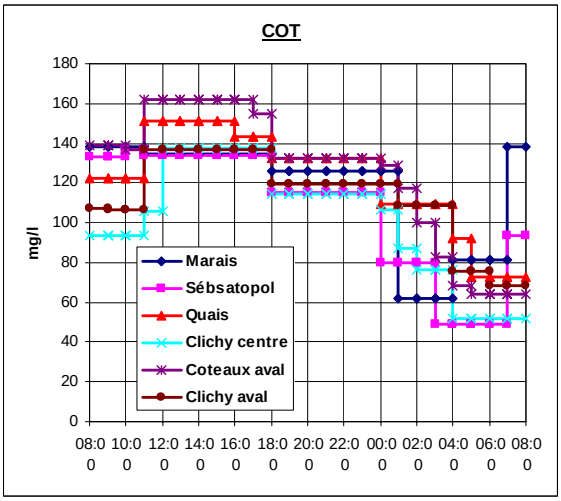

Clichy aval
Znp/MES (mg/Kg)
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00 0:00 2:00 4:00 6:00 8:00
heure légale
moyenne
minimum
maximum

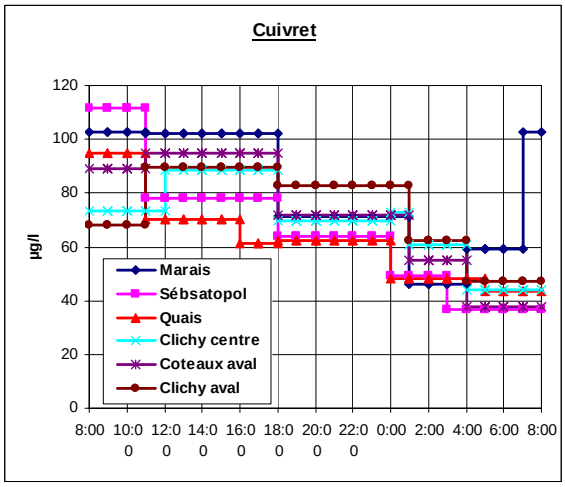
ANNEXE 36 : comparaison des pollutogrammes moyens des concentrations, entre les sites de l'OPUR

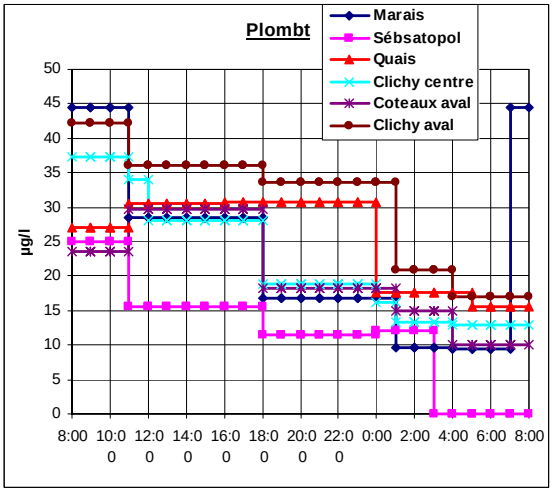




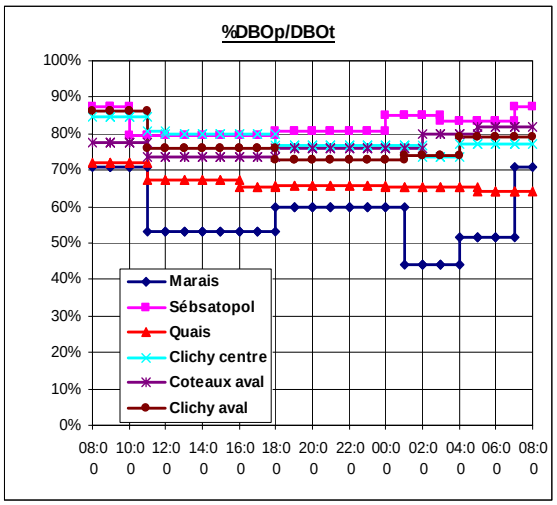


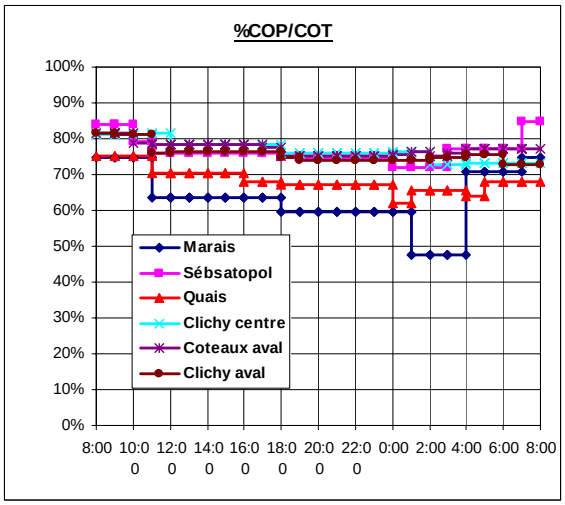


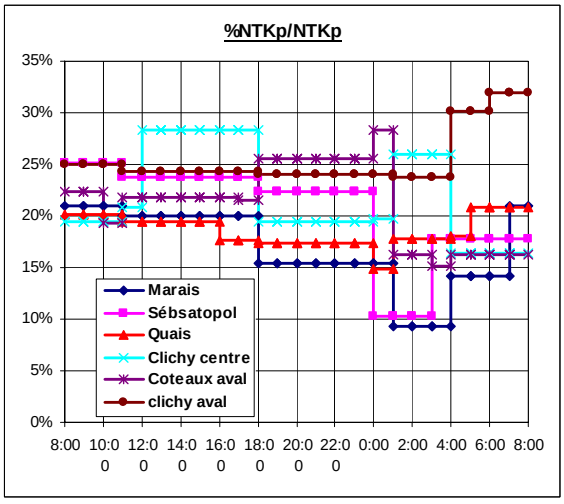


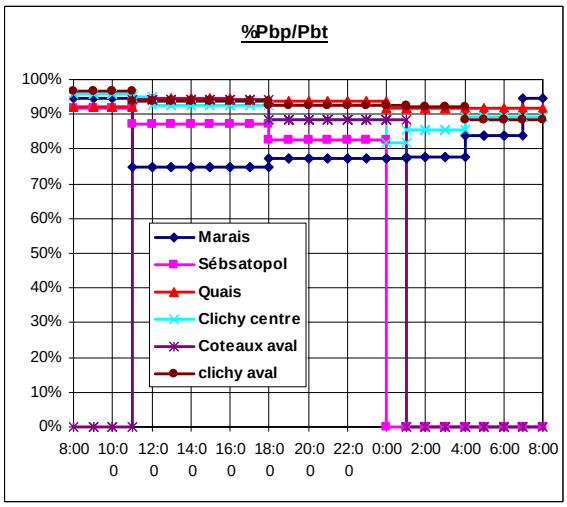


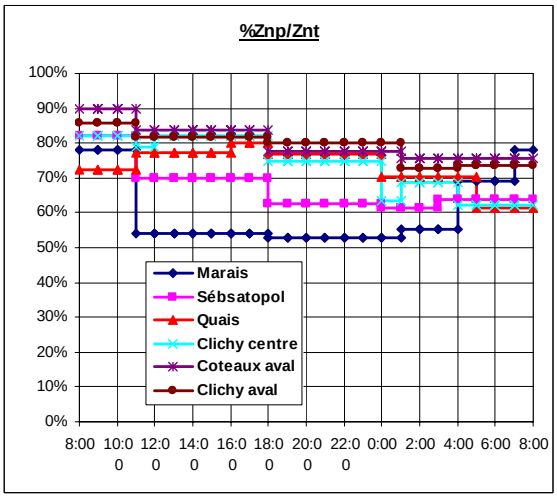
ANNEXE 37 : comparaison des pollutogrammes moyens des pourcentages de la pollution liée aux particules, entre les sites de l'OPUR



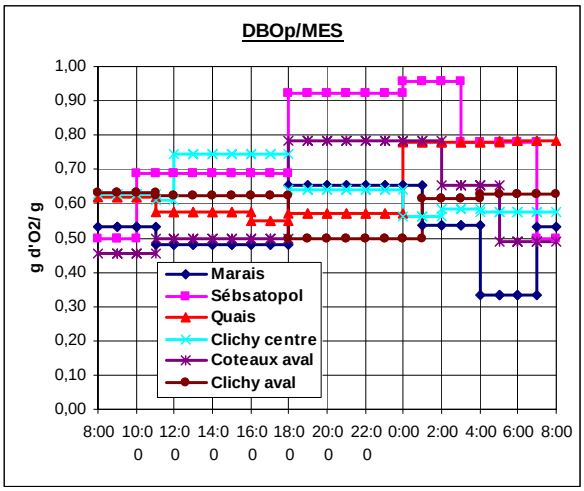


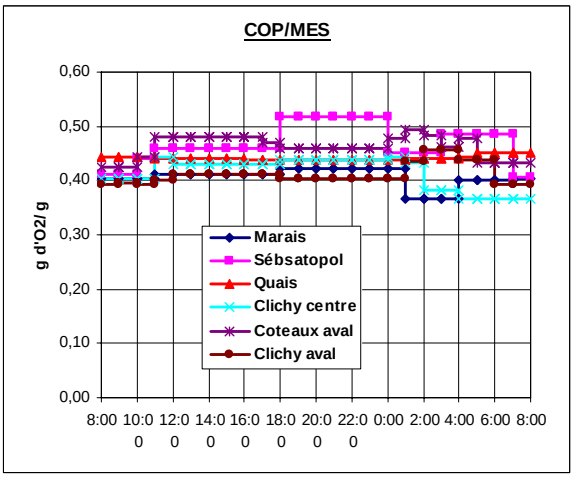


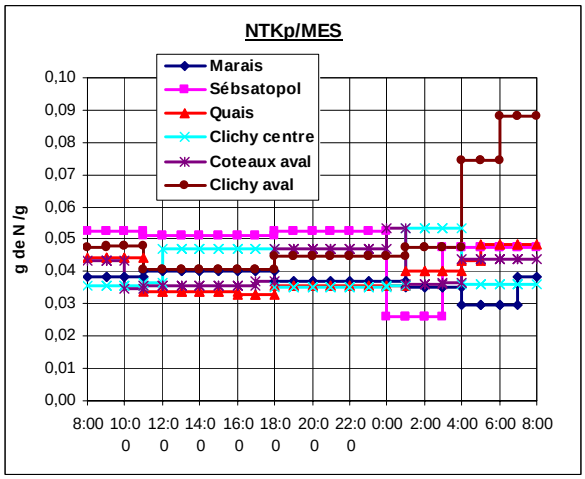


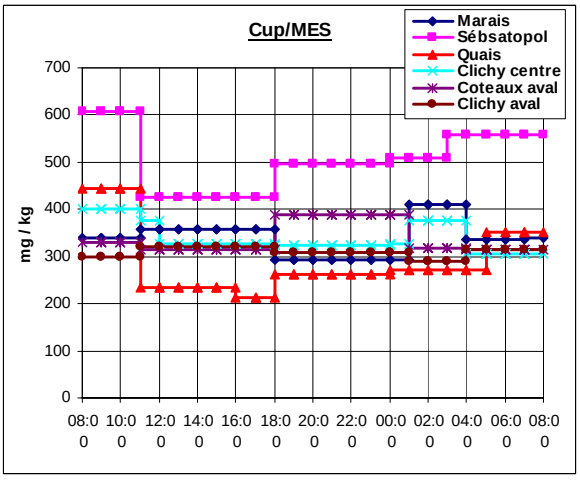


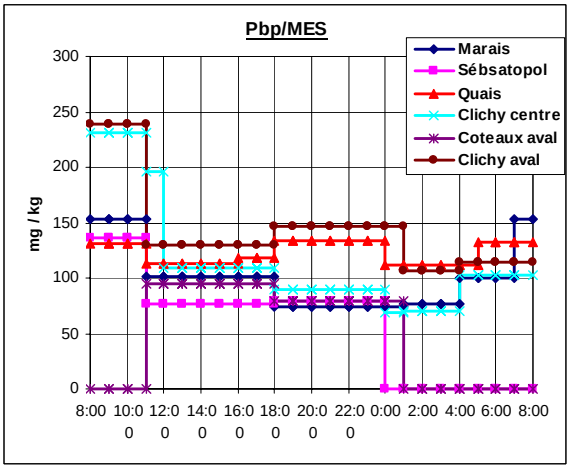
ANNEXE 38 : comparaison des pollutogrammes moyens des teneurs des particules, entre les sites de l'OPUR











ANNEXE 39: $\%V_{EU}/V_{tot}$ estimé par la méthode de conductivité et la méthode volumétrique pour chaque événement pluvieux étudiés

% V_{EU}/V_{tot}		Méthode de conductivité		Méthode volumétrique	
Site	**Evènement pluvieux**	**Hypothèse1**	**Hypothèse2**		
Marais	**30-avr-03**	40	34	38	
	05-mai-03	64	61	71	
	03-juliet-03	-	-	-	
	16-juil-03	-	-	-	
	30nov&01déc-03	38	32	37	
	18-avr-04	55	50	55	
	29&30/04/2004				
	04-mai-04	41	35	49	
	07/07/2004-A(10:39)	64	60	68	
	07/07/2004-B (13:44)	33	26	44	
	18-juil-04	65	61	52	
	16-déc-04	76	74	44	*Le problème vient de la détermination de la fin de l'évènement*
	17-déc-04	41	35	34	*Le problème vient de la mesure du débit*
	22-mars-05	70	66	47	
	04&05-avril-05	41	35	14	
	06&07-avril-05	24	17	12	
	14&15-avril-05	52	47	27	
Sébastopol	**30-avr-03**	59	56	32	
	05-mai-03	60	57	66	
	03-juliet-03				
	16-juil-03	50	46	41	
	30nov&01déc-03	-	-	-	
	18-avr-04	-	-	-	
	29&30/04/2004	-	-	-	
	04-mai-04	-	-	-	
	07/07/2004-A(10:39)	-	-	-	
	07/07/2004-B (13:44)	-	-	-	
	18-juil-04	-	-	-	
	16-déc-04	-	-	-	
	17-déc-04	-	-	-	
	22-mars-05	-	-	-	
	04&05-avril-05	-	-	-	
	06&07-avril-05	-	-	-	
	14&15-avril-05	-	-	-	
Quais	**30-avr-03**	44	39	37	
	05-mai-03	81	79	66	
	03-juliet-03	31	24	23	
	16-juil-03	68	66	35	
	30nov&01déc-03	37	31	25	
	18-avr-04	-	-	-	
	29&30/04/2004	-	-	-	
	04-mai-04	-	-	-	
	07/07/2004-A(10:39)	-	-	-	
	07/07/2004-B (13:44)	-	-	-	
	18-juil-04	-	-	-	
	16-déc-04	-	-	-	
	17-déc-04	-	-	-	
	22-mars-05	-	-	-	

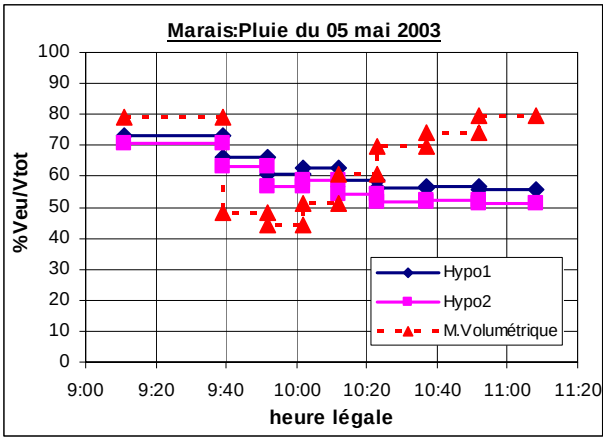
	04&05-avril-05	-	-	-
	06&07-avril-05	-	-	-
	14&15-avril-05	-	-	-
Coteaux aval	**30-avr-03**	43	38	37
	05-mai-03	-	-	-
	03-juliet-03	20	13	16
	16-juil-03	65	62	85
	30nov&01déc-03	34	28	46
	18-avr-04	-	-	-
	29&30/04/2004	31	25	26
	04-mai-04	55	51	58
	07/07/2004-A(10:39)	71	69	76
	07/07/2004-B (13:44)	45	40	47
	18-juil-04	53	49	60
	16-déc-04	-	-	-
	17-déc-04	-	-	-
	22-mars-05	-	-	-
	04&05-avril-05	-	-	-
	06&07-avril-05	-	-	-
	14&15-avril-05	-	-	-
Clichy centre	**30-avr-03**	56	53	50
	05-mai-03	72	70	62
	03-juliet-03	-	-	-
	16-juil-03	64	61	71
	30nov&01déc-03	34	28	36
	18-avr-04	56	52	74
	29&30/04/2004	64	60	62
	04-mai-04	70	67	92 *Le problème vient du fait que la journée de temps sec choisie n'est pas bonne*
	07/07/2004-A(10:39)	90	89	84
	07/07/2004-B (13:44)	45	40	51
	18-juil-04	53	49	57
	16-déc-04	84	83	72
	17-déc-04	-	-	-
	22-mars-05	-	-	-
	04&05-avril-05	42	37	45
	06&07-avril-05	65	62	53
	14&15-avril-05	60	57	68
Clichy aval	**30-avr-03**	-	-	-
	05-mai-03	74	72	76
	03-juliet-03	27	21	19
	16-juil-03	70	67	79
	30nov&01déc-03	-	-	-
	18-avr-04	60	57	69
	29-avr-04	59	56	72
	30-avr-04	29	23	31
	04-mai-04	-	-	-
	07/07/2004-A(10:39)	-	-	-
	07/07/2004-B (13:44)	48	43	50
	18-juil-04	61	57	54
	16-déc-04	-	-	-
	17-déc-04	-	-	-
	22-mars-05	-	-	-
	04&05-avril-05	-	-	-

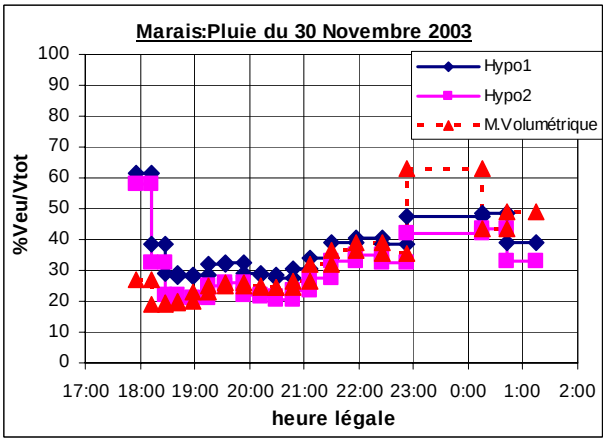
	06&07-avril-05	-	-	-
	14&15-avril-05	-	-	-

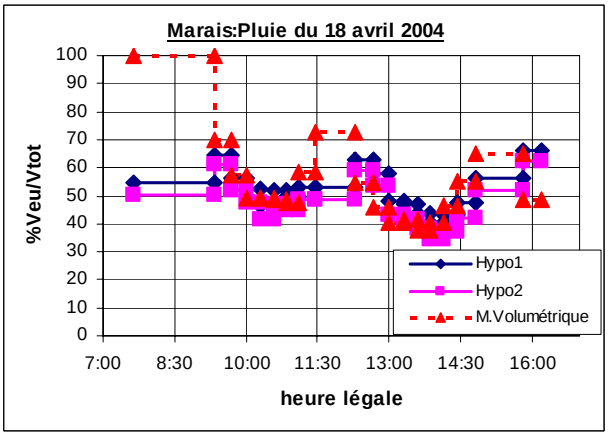
-: pluie non échantillonnée

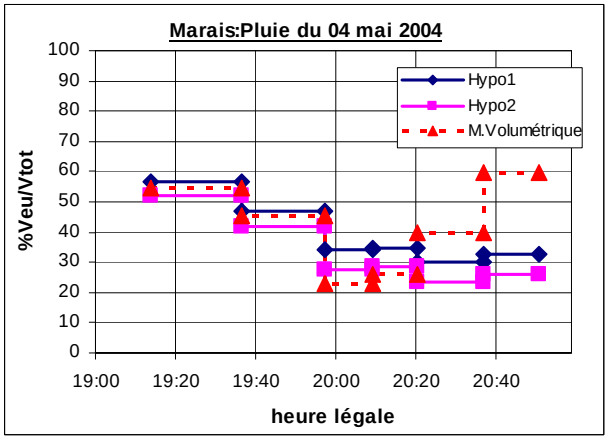
ANNEXE 40: pollutogrammes du $\%V_{EU}/V_{tot}$

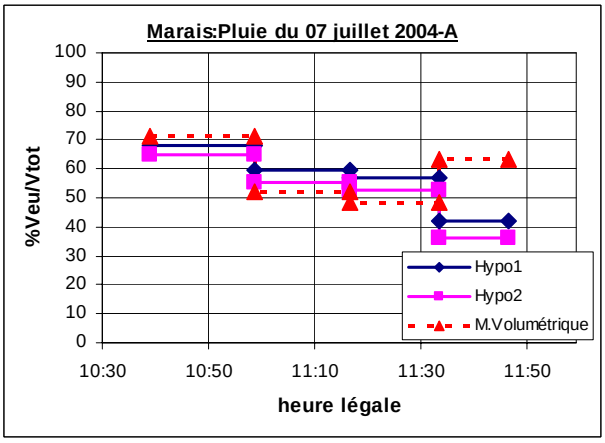
Marais

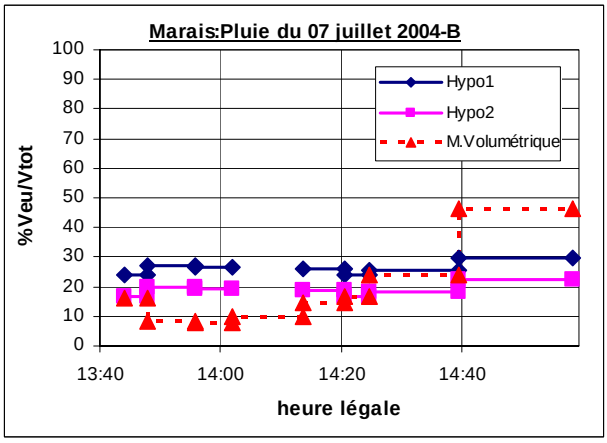


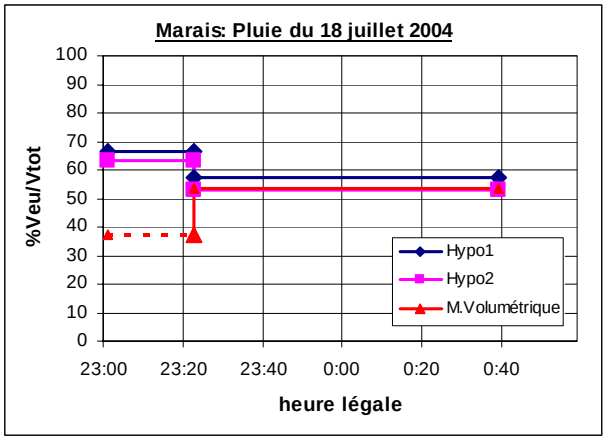




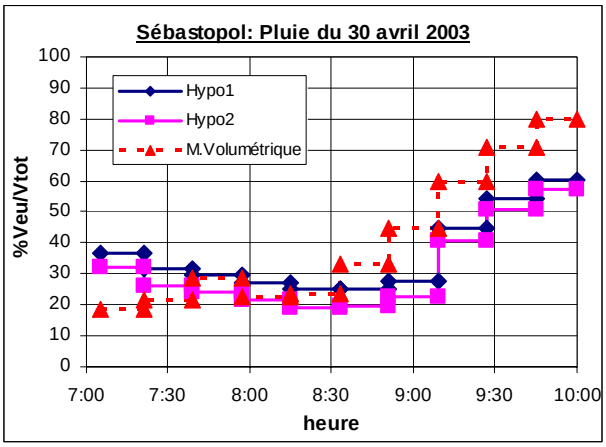


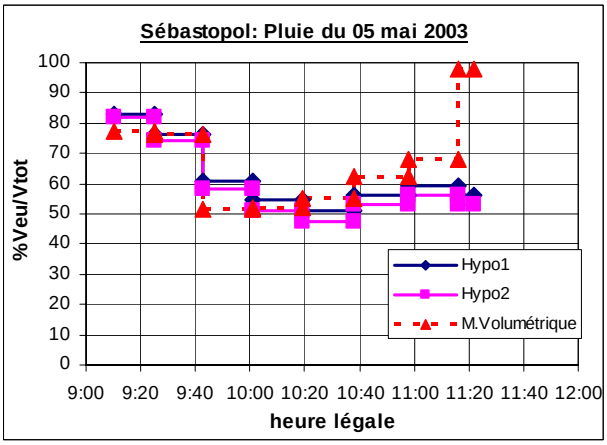


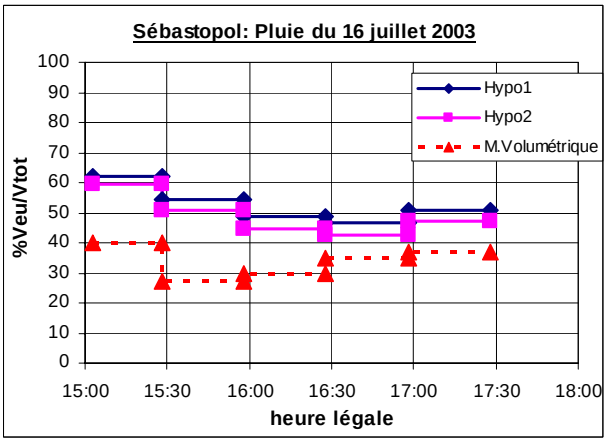



Marais: Pluie du 18 juillet 2004
%Veu/Vtot
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
23:00
23:20
23:40
0:00
0:20
0:40
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

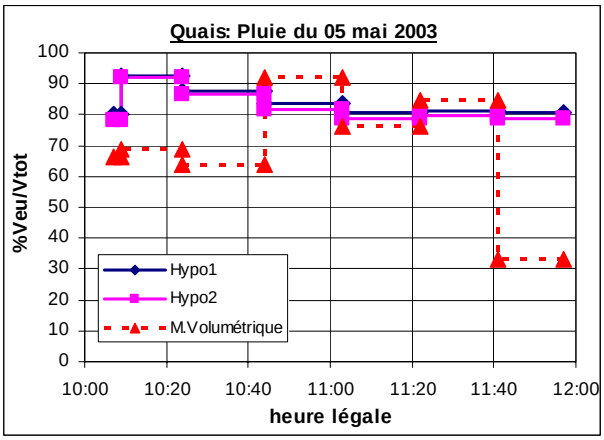
Sébastopol

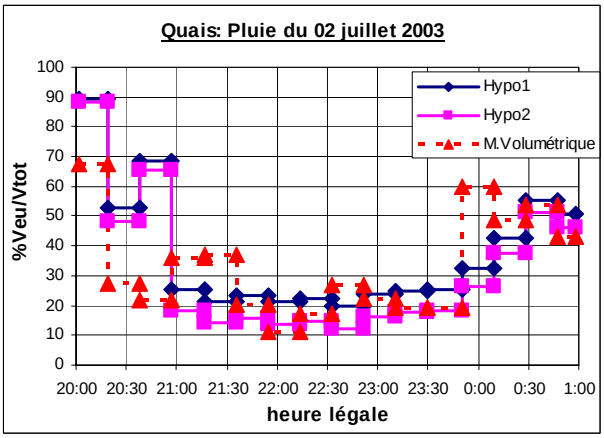

Sébastopol: Pluie du 30 avril 2003
%Veu/Vtot
heure
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
7:00
7:30
8:00
8:30
9:00
9:30
10:00

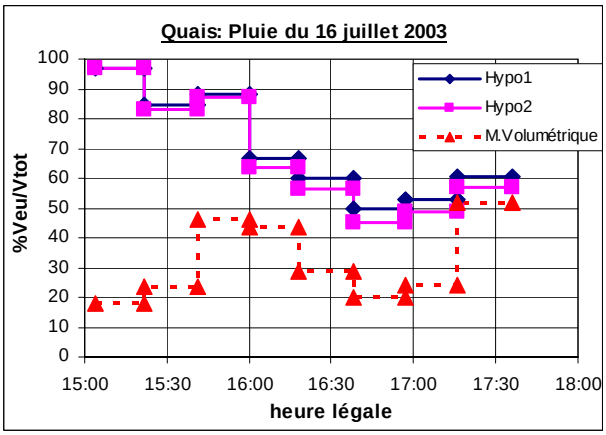

Sébastopol: Pluie du 05 mai 2003
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
9:00
9:20
9:40
10:00
10:20
10:40
11:00
11:20
11:40
12:00

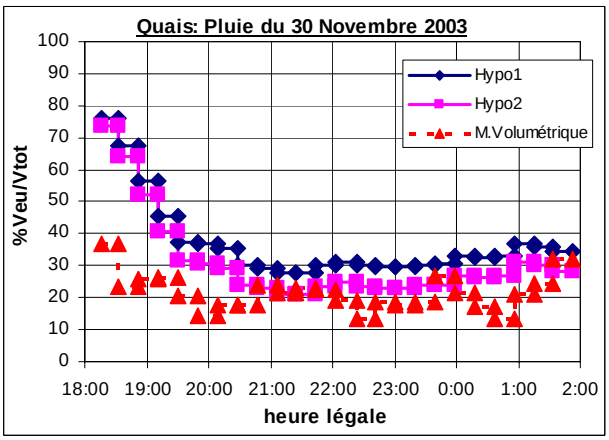

Sébastopol: Pluie du 16 juillet 2003
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
15:00
15:30
16:00
16:30
17:00
17:30
18:00

Quais

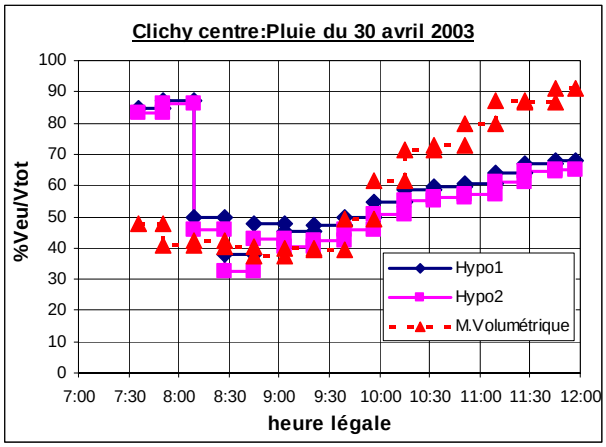

Quais: Pluie du 05 mai 2003
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

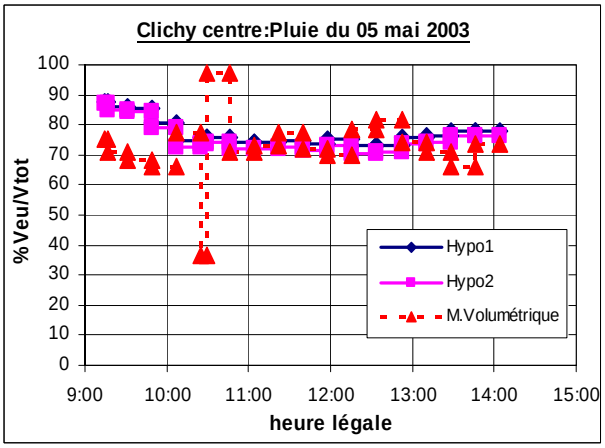

Quais: Pluie du 02 juillet 2003
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

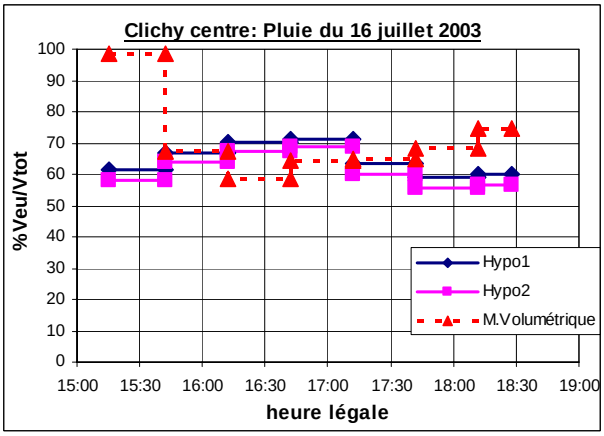

Quais: Pluie du 16 juillet 2003
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

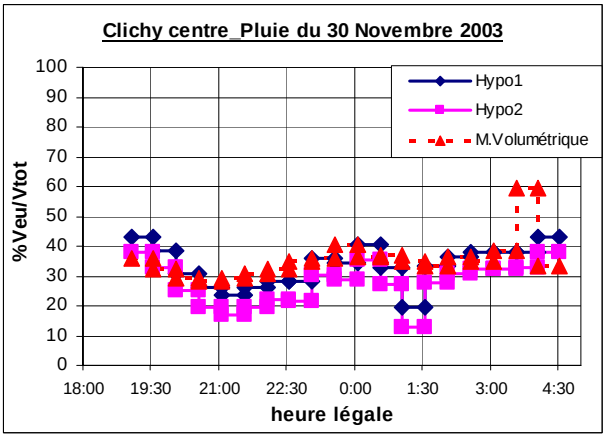

Quais: Pluie du 30 Novembre 2003
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

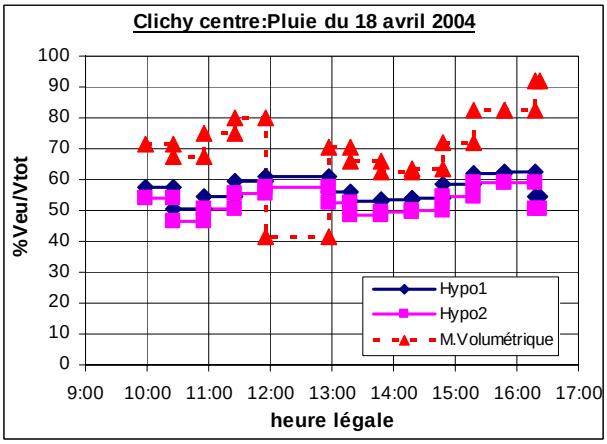
Clichy centre

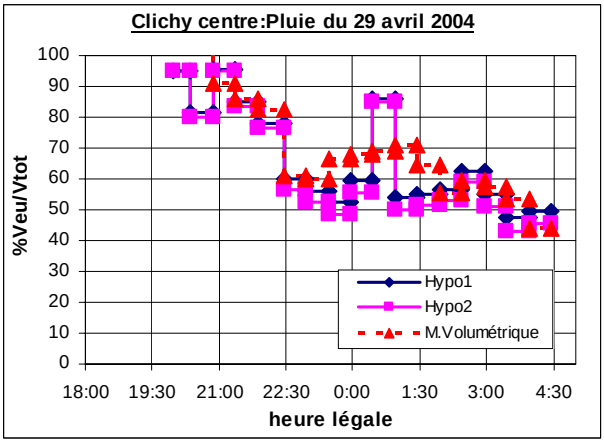


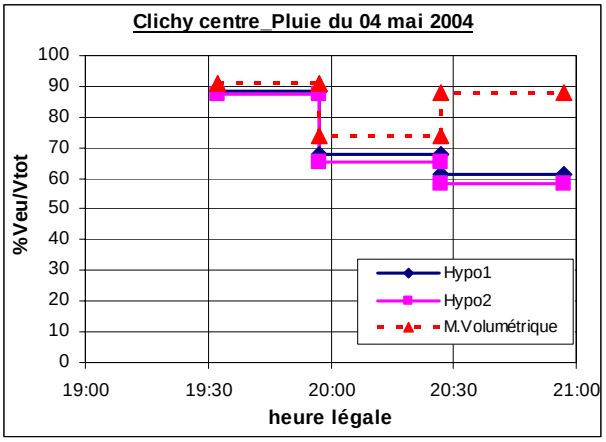


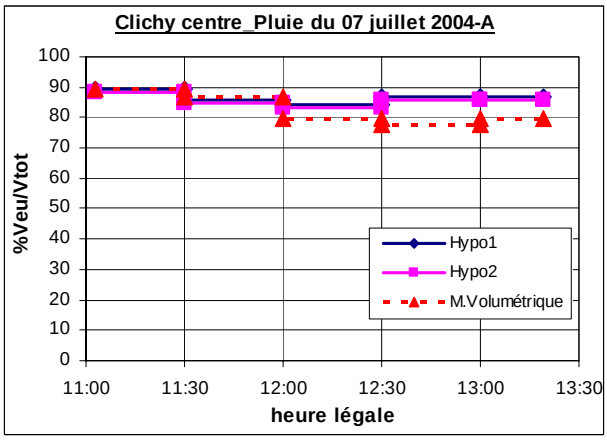


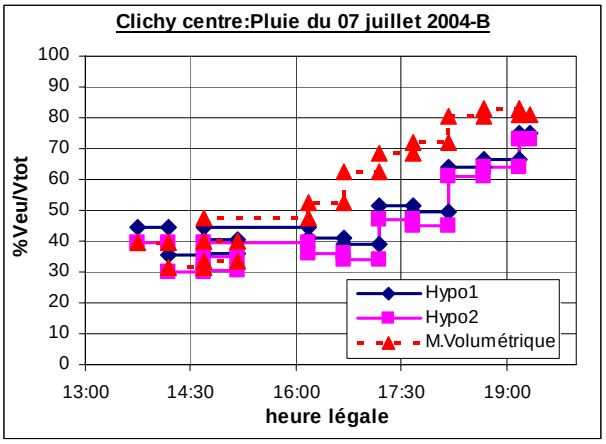


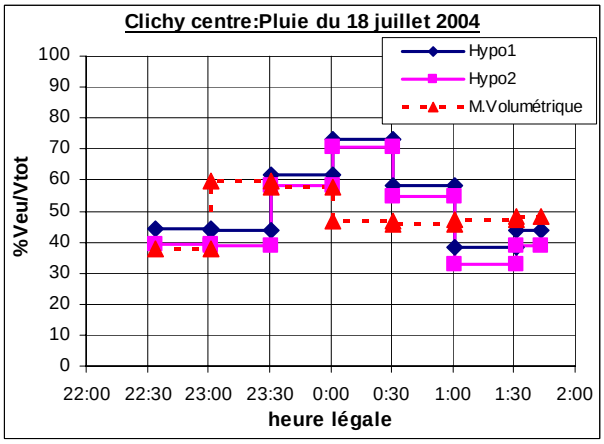


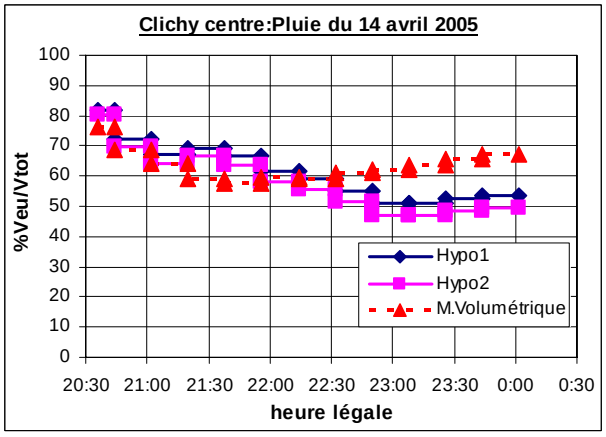



Clichy centre_Pluie du 04 mai 2004
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

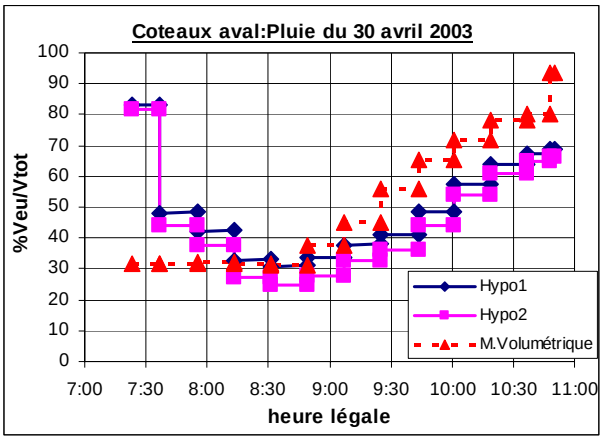

Clichy centre_Pluie du 07 juillet 2004-A
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

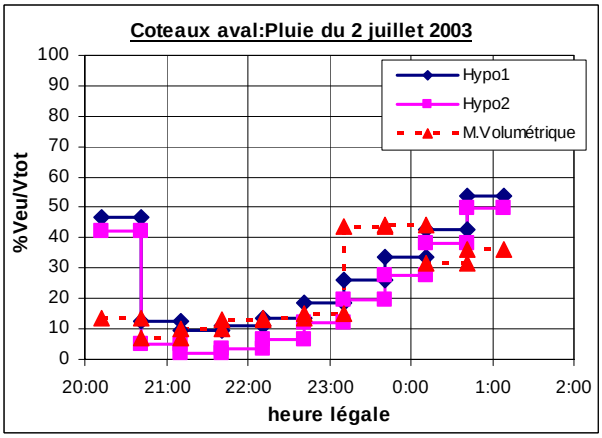

Clichy centre:Pluie du 07 juillet 2004-B
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

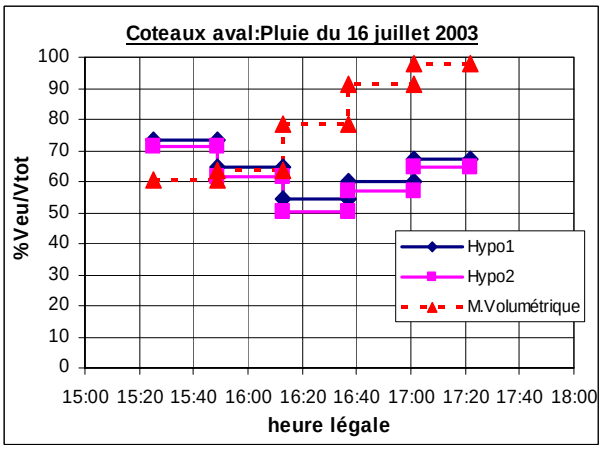

Clichy centre:Pluie du 18 juillet 2004
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

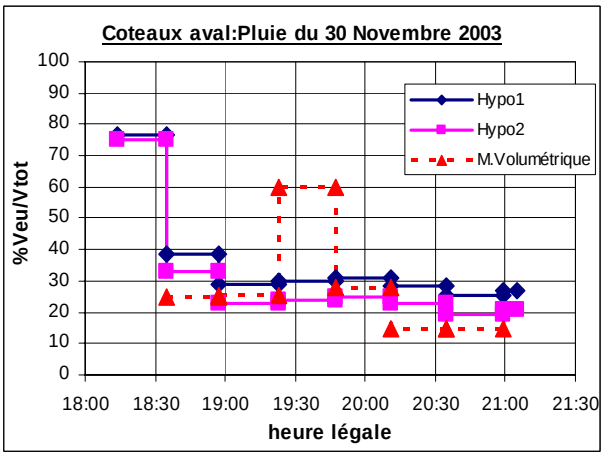

Clichy centre:Pluie du 14 avril 2005
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

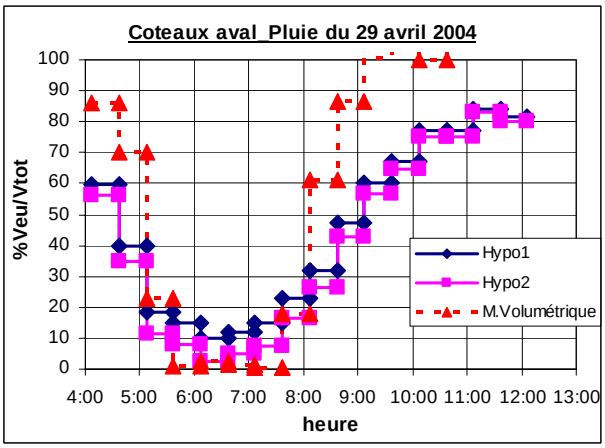
Coteaux aval

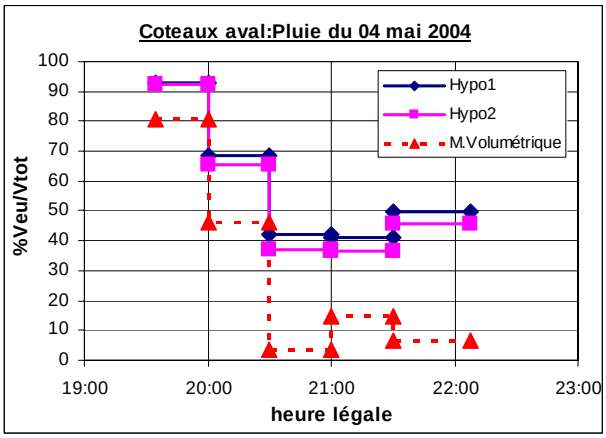


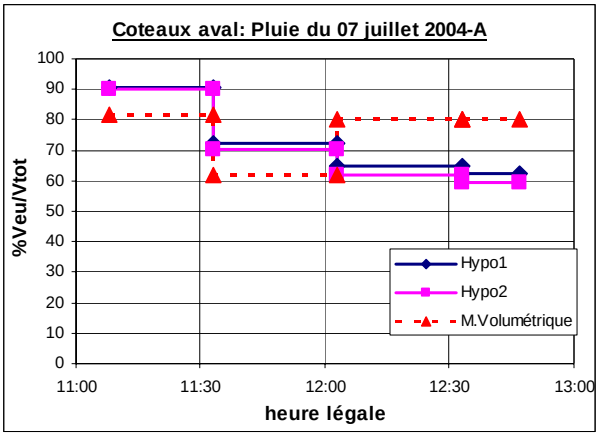


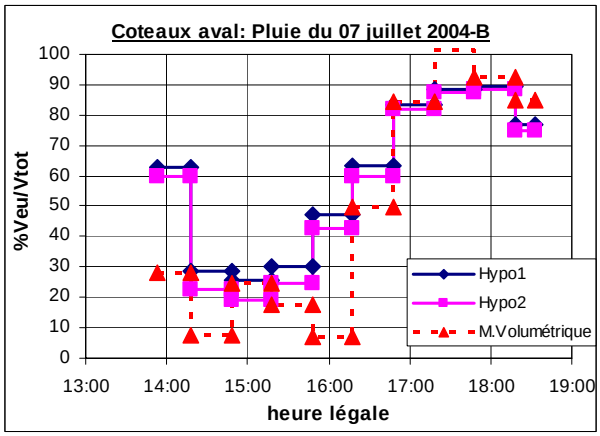


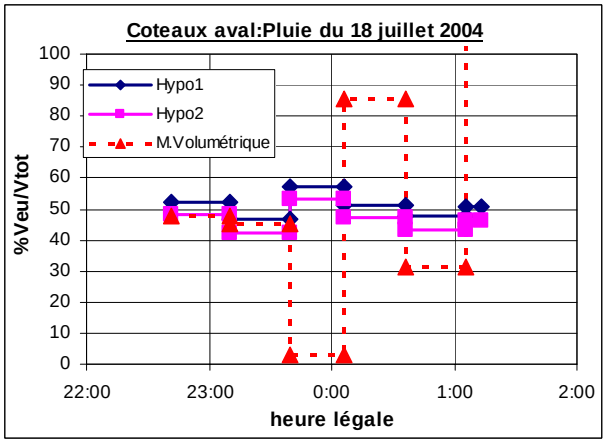




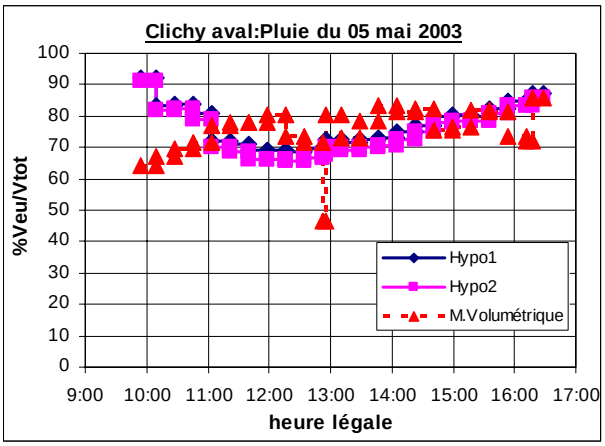


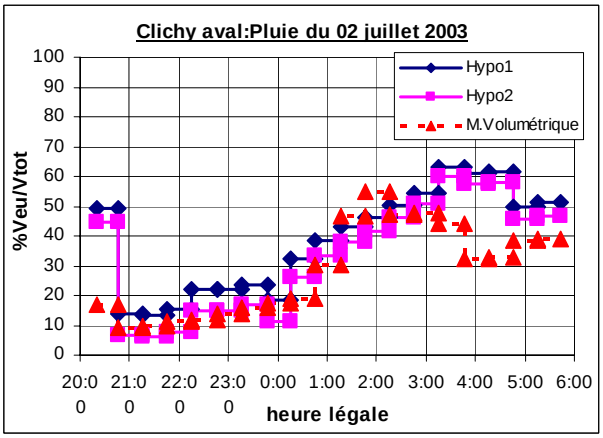

Coteaux aval: Pluie du 07 juillet 2004-A
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique
11:00
11:30
12:00
12:30
13:00

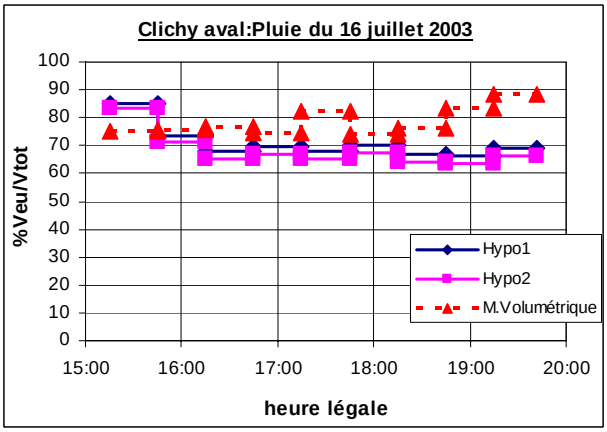

Coteaux aval: Pluie du 07 juillet 2004-B
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique
13:00
14:00
15:00
16:00
17:00
18:00
19:00

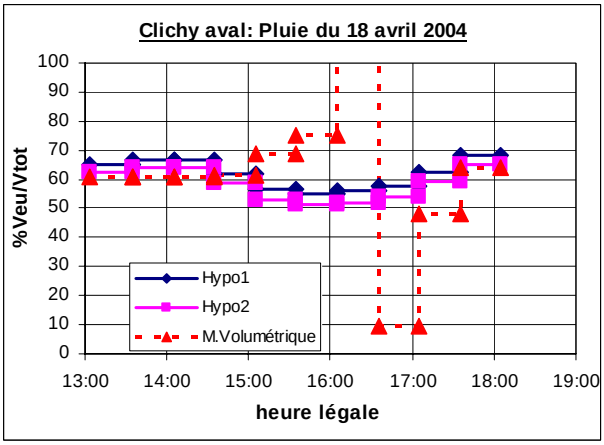

Coteaux aval:Pluie du 18 juillet 2004
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique
22:00
23:00
0:00
1:00
2:00

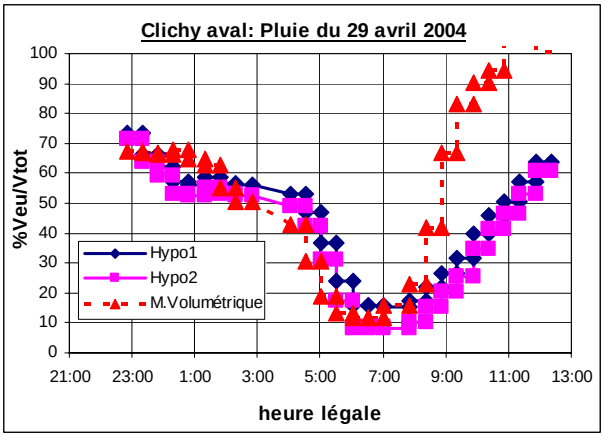
Clichy aval

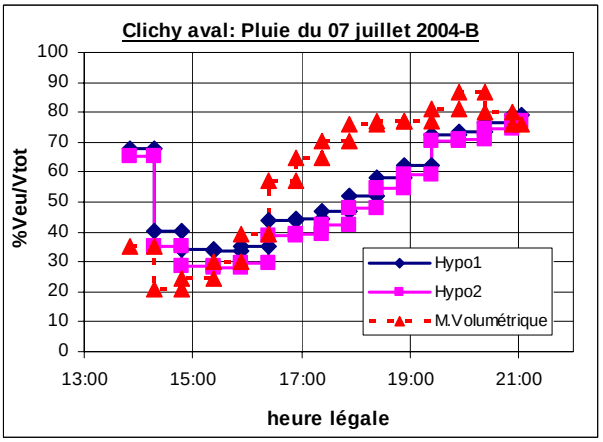

Clichy aval:Pluie du 05 mai 2003
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

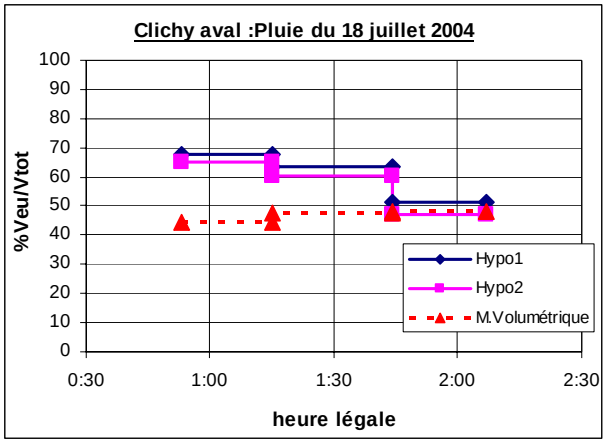

Clichy aval:Pluie du 02 juillet 2003
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique


Clichy aval:Pluie du 16 juillet 2003
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique


Clichy aval: Pluie du 18 avril 2004
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

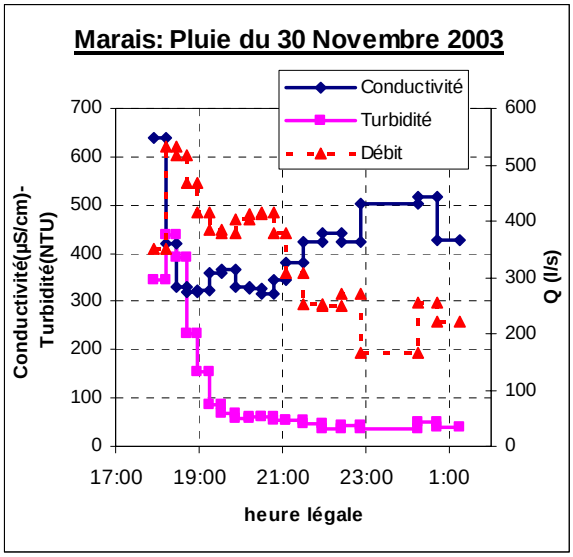

Clichy aval: Pluie du 29 avril 2004
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

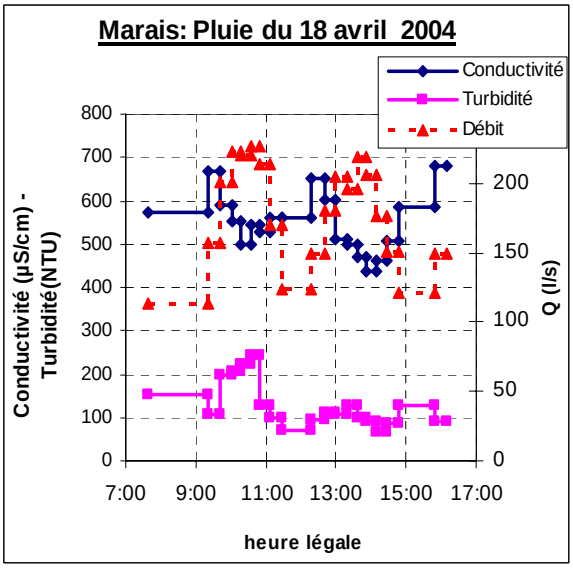

Clichy aval: Pluie du 07 juillet 2004-B
%Veu/Vtot
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

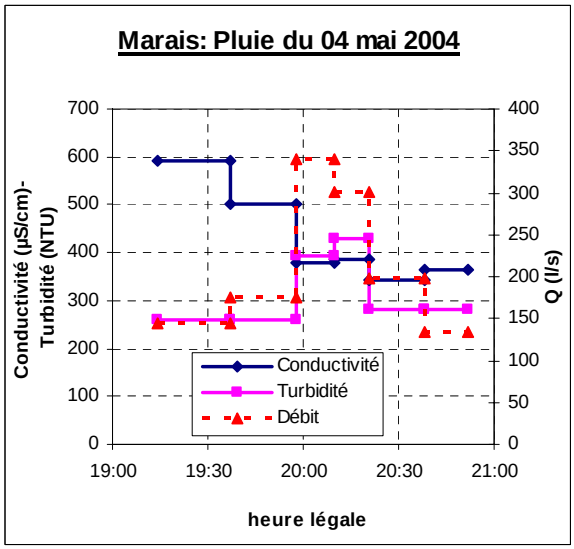

Clichy aval :Pluie du 18 juillet 2004
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
%Veu/Vtot
0:30
1:00
1:30
2:00
2:30
heure légale
Hypo1
Hypo2
M.Volumétrique

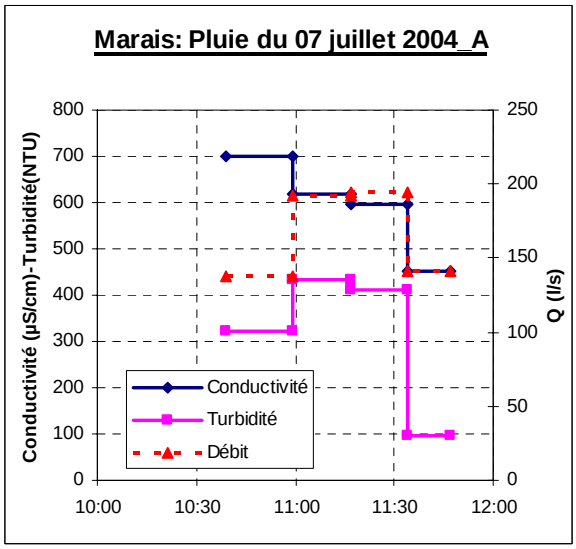
ANNEXE 41: comparaison des hydrogrammes avec les pollutogrammes en turbidité et en conductivité des effluents de temps de pluie

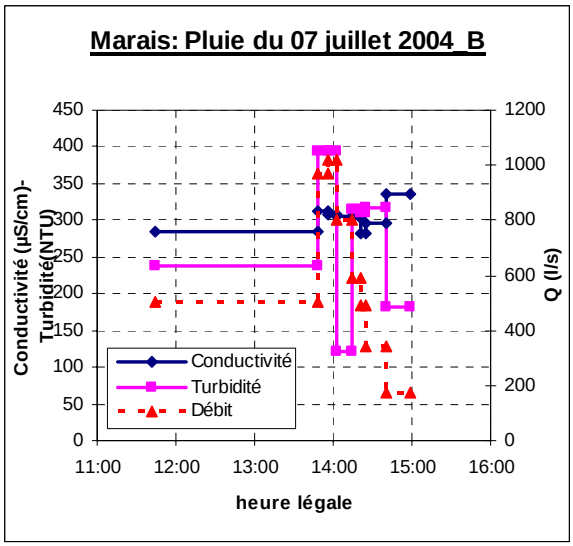
Marais

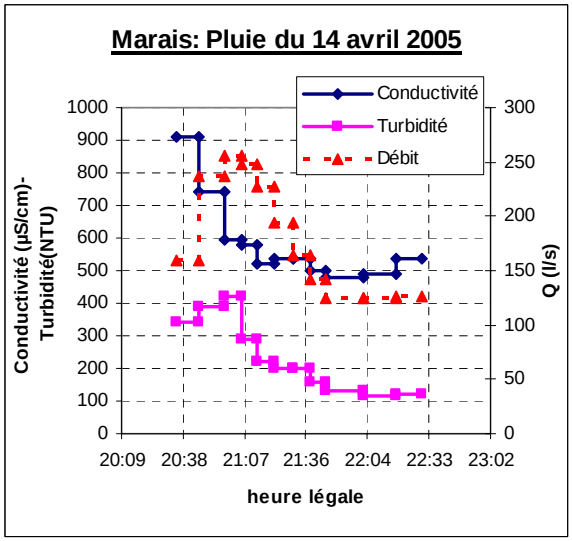




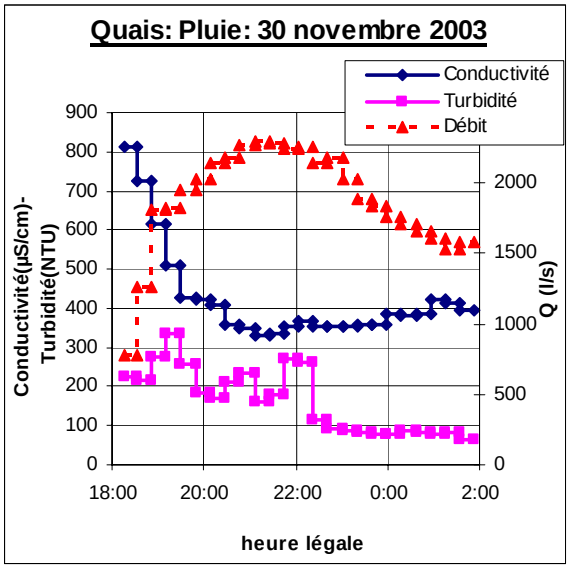




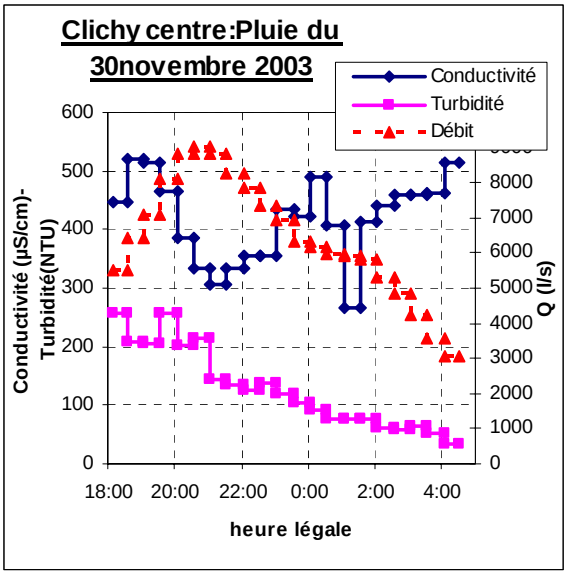

Marais: Pluie du 07 juillet 2004_B
Conductivité (µS/cm)-
Turbidité(NTU)
Q (l/s)
heure légale
Conductivité
Turbidité
Débit
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
1200
1000
800
600
400
200
0
11:00
12:00
13:00
14:00
15:00
16:00

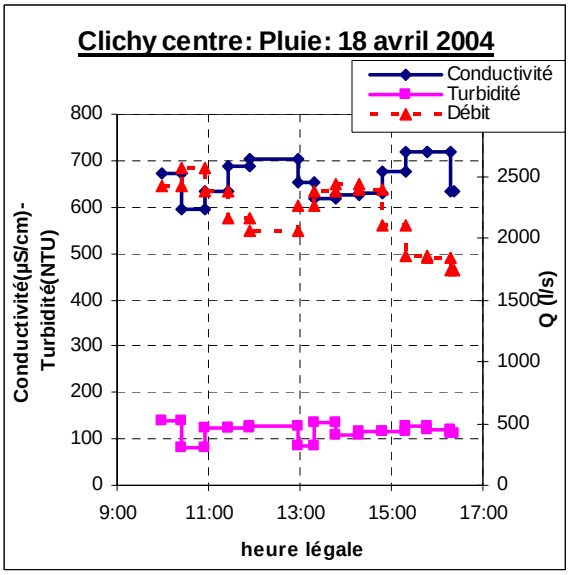

Marais: Pluie du 14 avril 2005
Conductivité (µS/cm)-
Turbidité(NTU)
Q (l/s)
heure légale
Conductivité
Turbidité
Débit
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
300
250
200
150
100
50
0
20:09
20:38
21:07
21:36
22:04
22:33
23:02

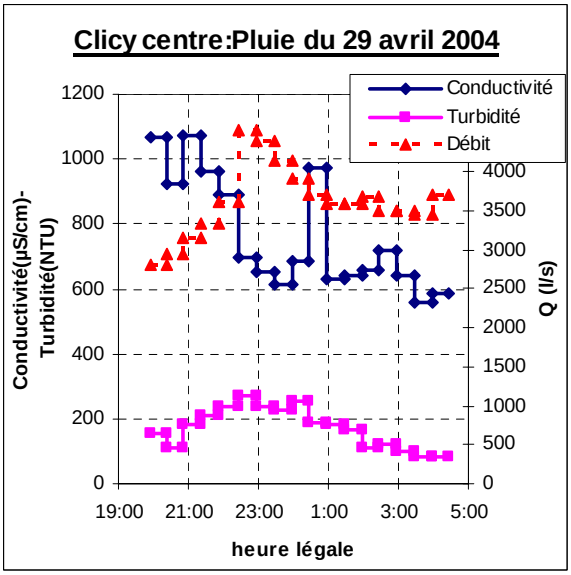
Quais

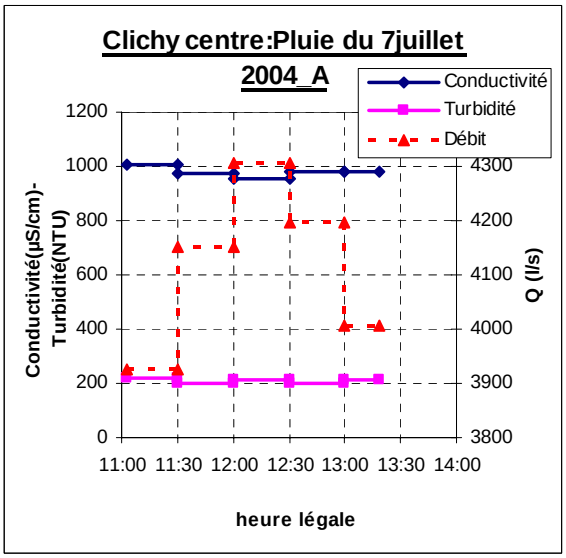

Quais: Pluie: 30 novembre 2003
Conductivité
Turbidité
Débit
Conductivité(µS/cm)-
Turbidité(NTU)
Q (l/s)
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
2000
1500
1000
500
0
18:00
20:00
22:00
0:00
2:00
heure légale

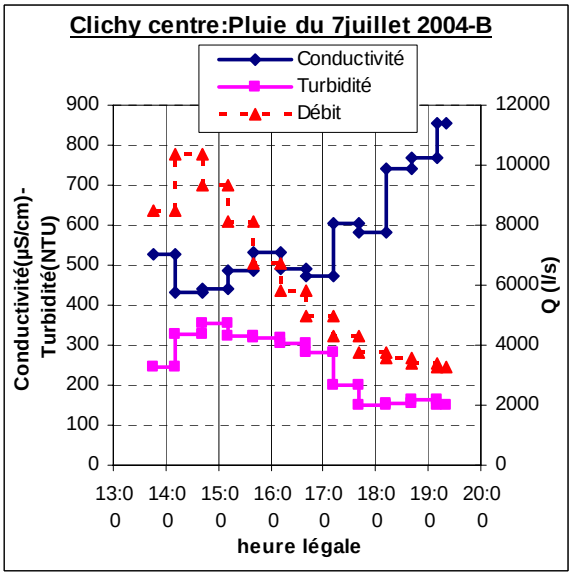
Clichy centre

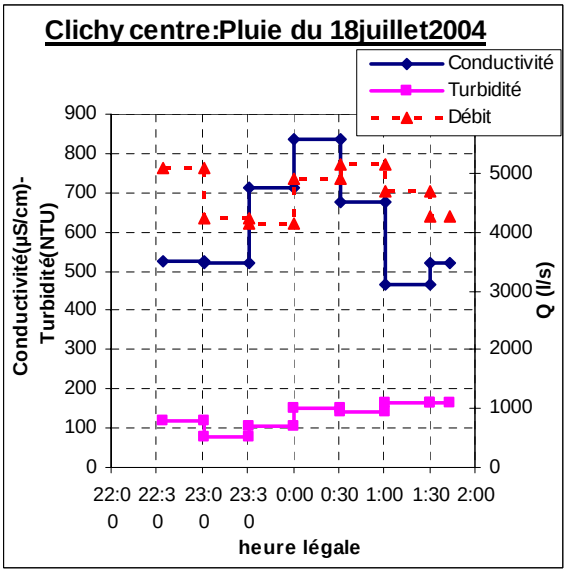


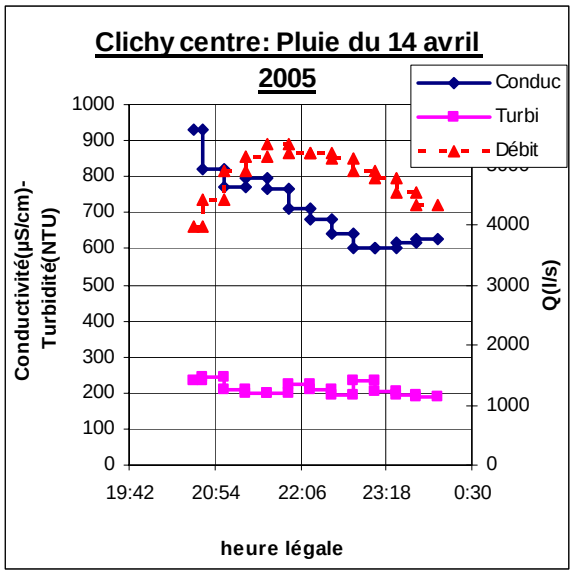




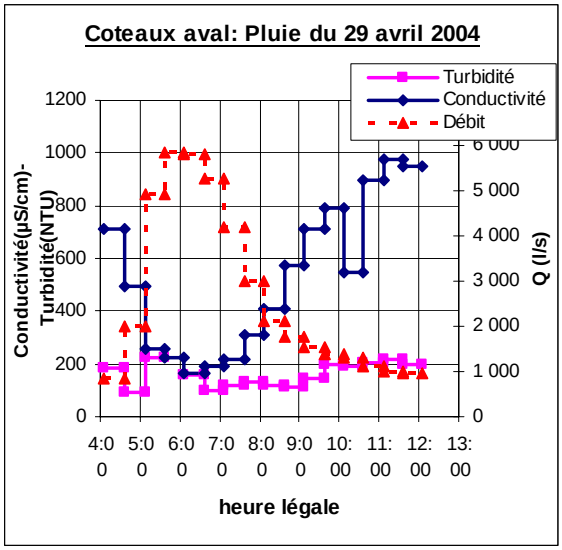


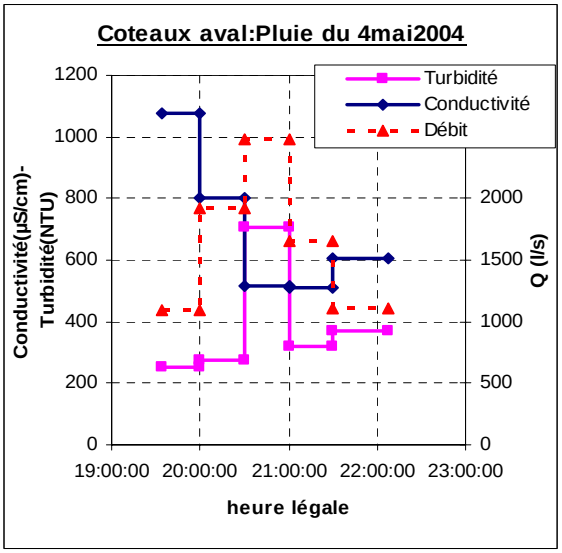


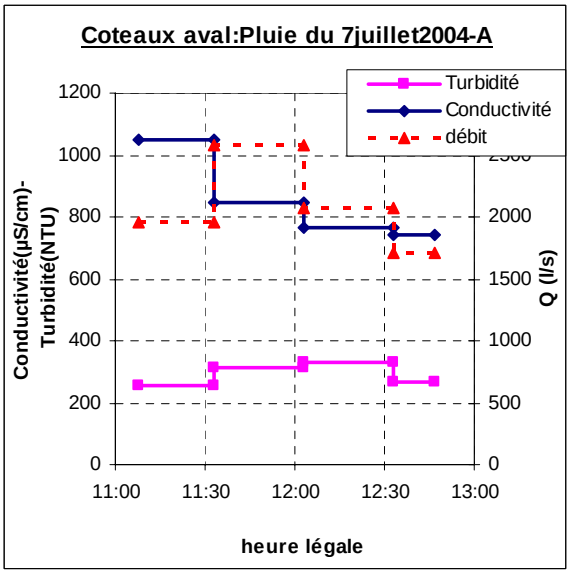


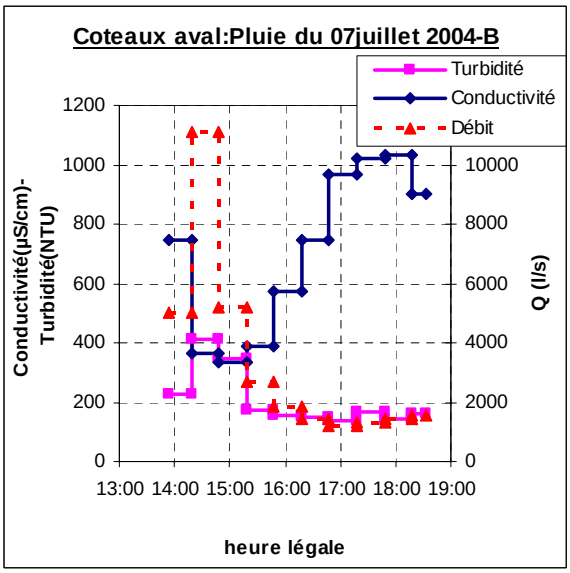

Clichy centre: Pluie du 14 avril 2005
Conduc
Turbi
Débit
Conductivité(µS/cm)-Turbidité(NTU)
Q(l/s)
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
4000
3000
2000
1000
0
19:42
20:54
22:06
23:18
0:30
heure légale

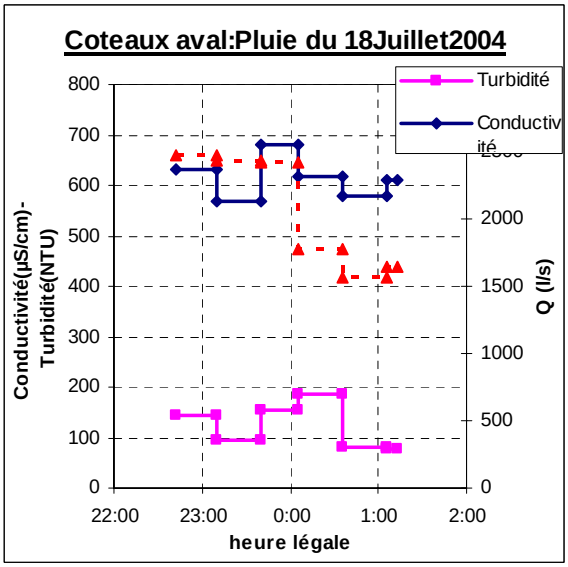
Coteaux aval



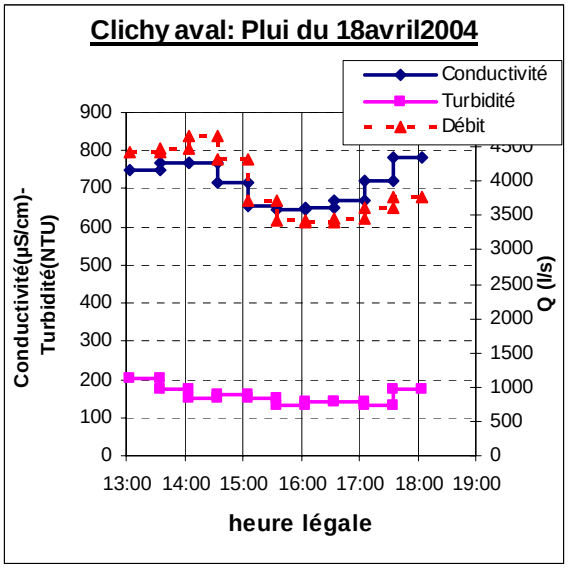


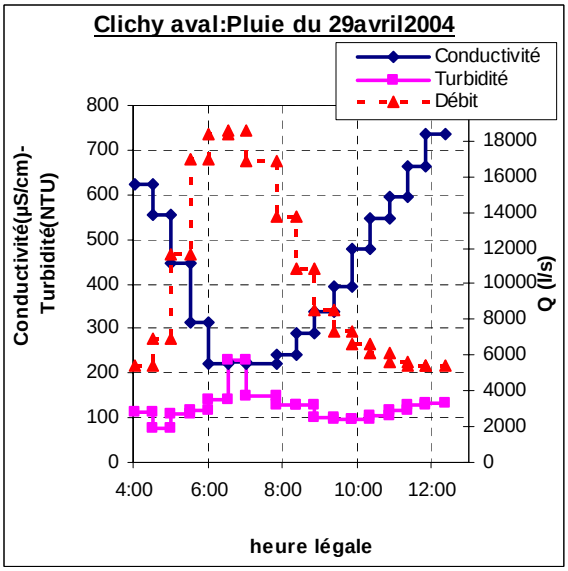


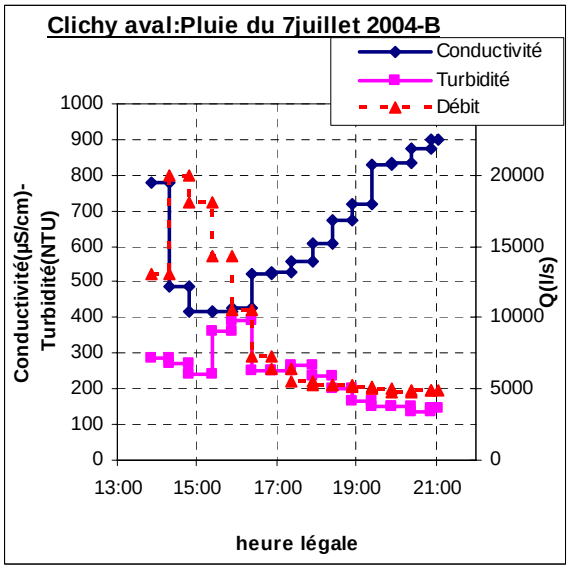




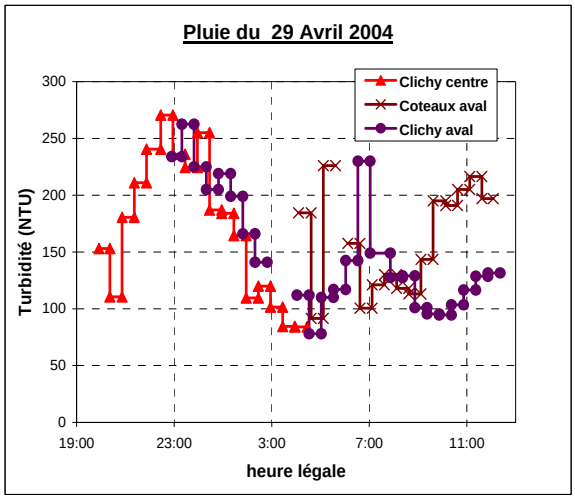
Clichy aval

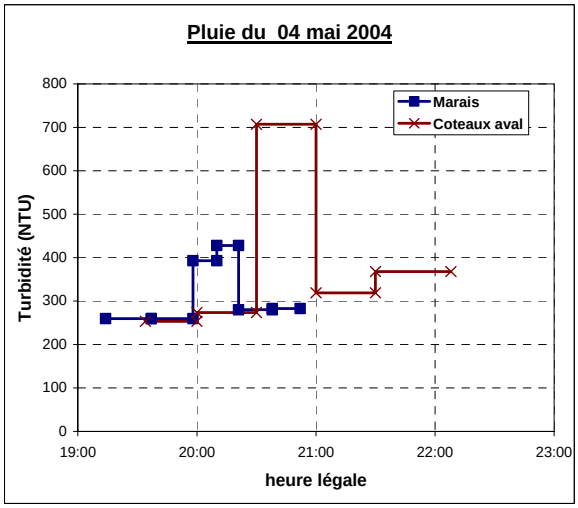

Clichy aval: Plui du 18avril2004
Conductivité
Turbidité
Débit
Conductivité(µS/cm)-
Turbidité(NTU)
Q (l/s)
heure légale

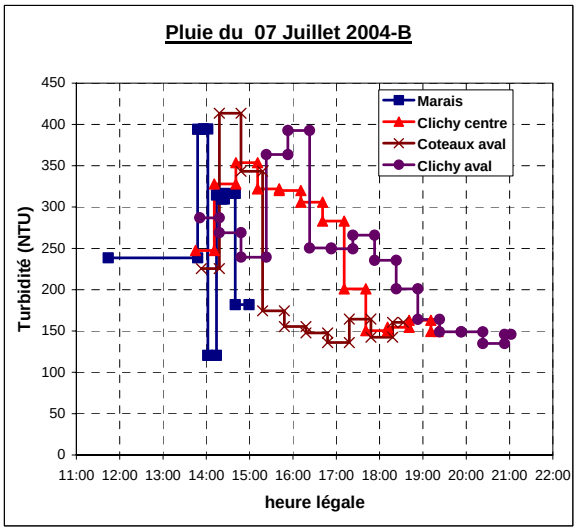

Clichy aval:Pluie du 29avril2004
Conductivité
Turbidité
Débit
Conductivité(µS/cm)-
Turbidité(NTU)
Q (l/s)
heure légale

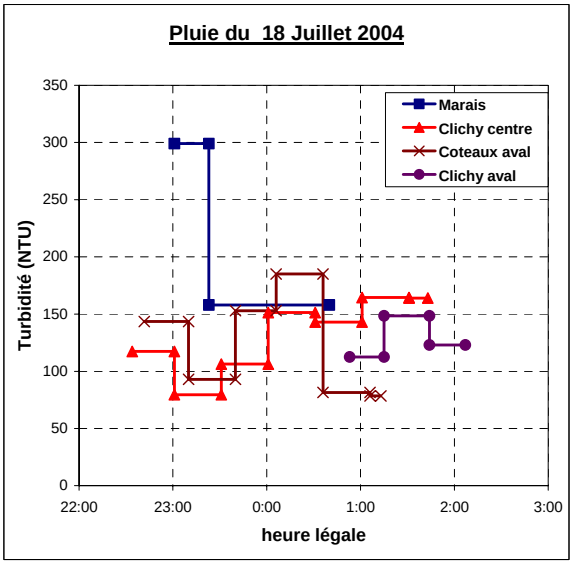

Clichy aval:Pluie du 7juillet 2004-B
Conductivité
Turbidité
Débit
Conductivité(µS/cm)-
Turbidité(NTU)
Q(l/s)
heure légale

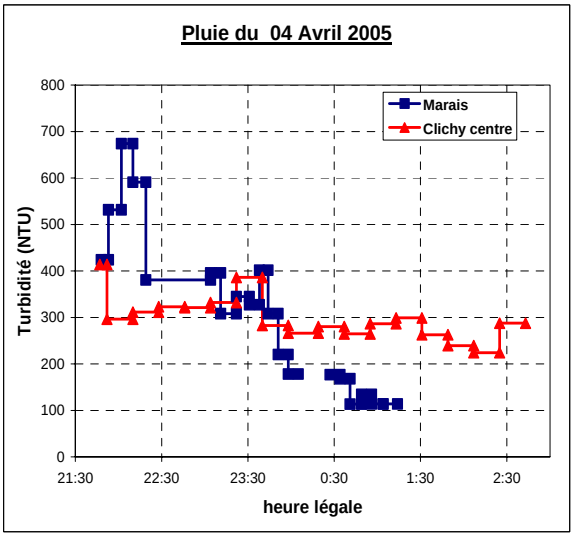
ANNEXE 42: pollutogrammes en turbidité des effluents de temps de pluie

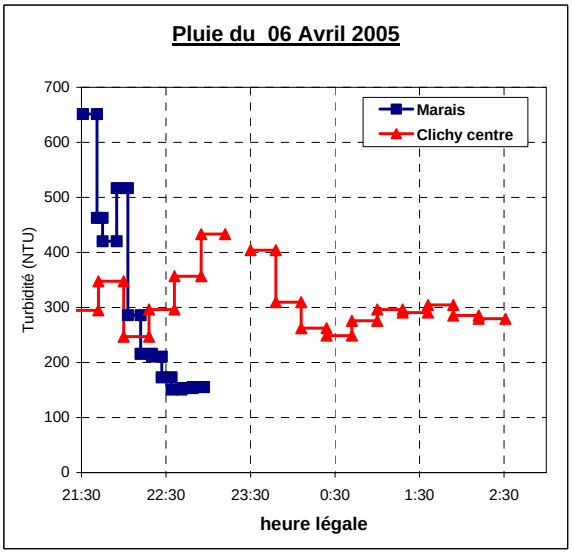


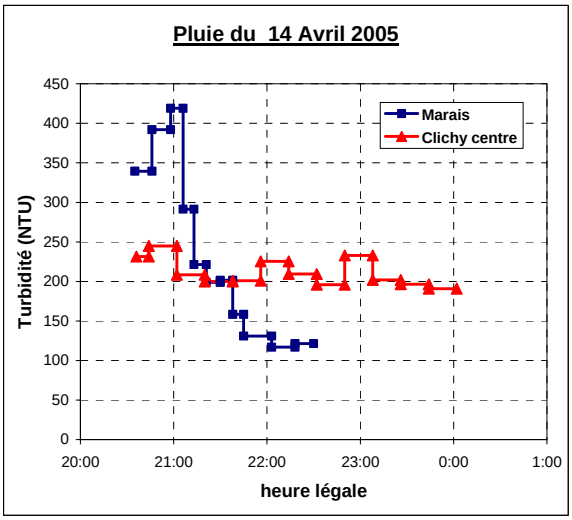




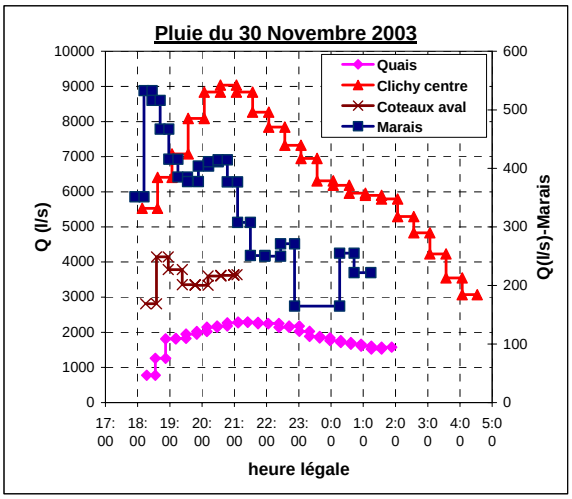


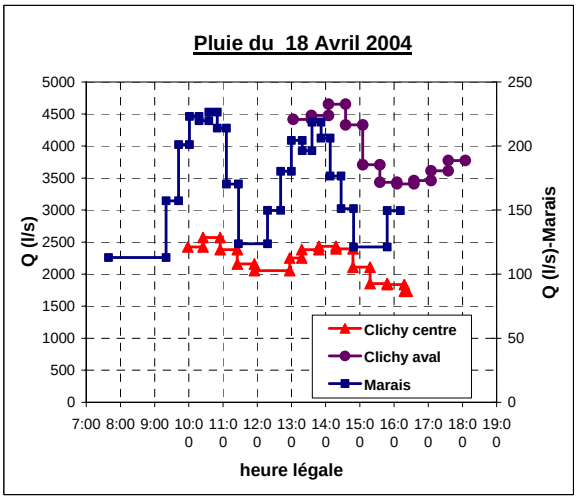


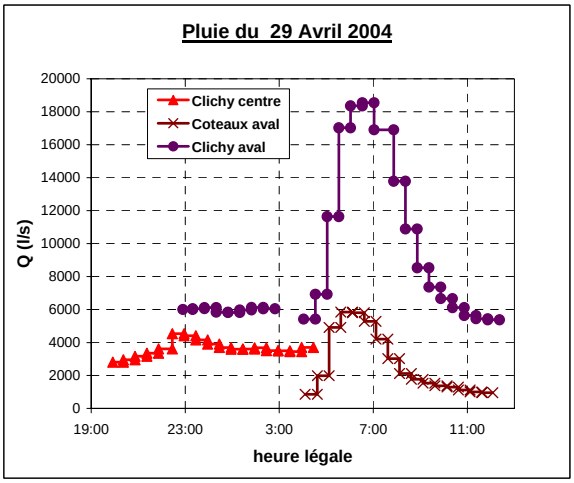


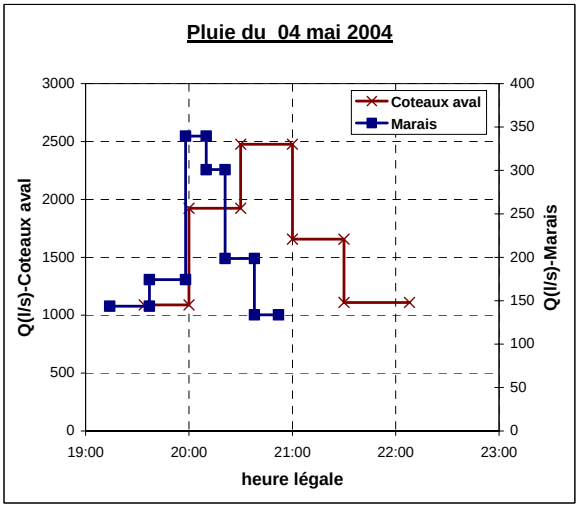

Pluie du 14 Avril 2005
Turbidité (NTU)
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
20:00
21:00
22:00
23:00
0:00
1:00
heure légale
Marais
Clichy centre

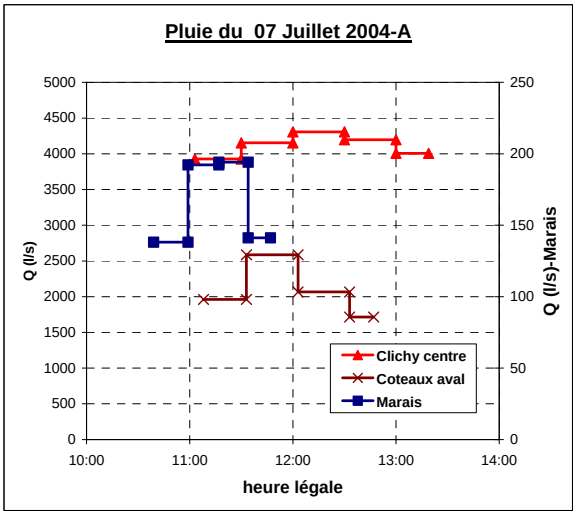
ANNEXE 43 : hydrogrammes mesurés aux exutoires des bassins versants de l'OPUR par temps de pluie

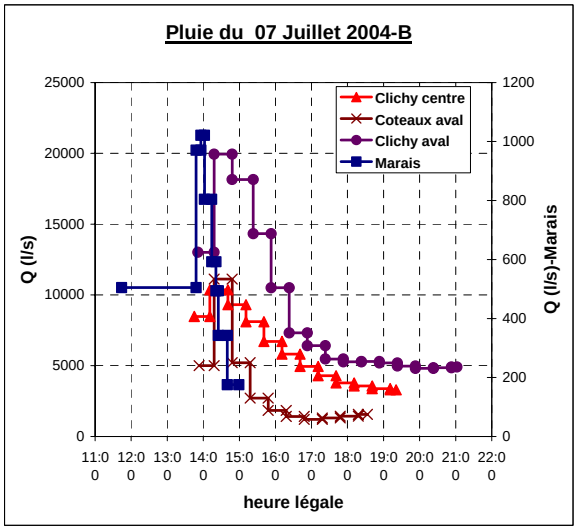


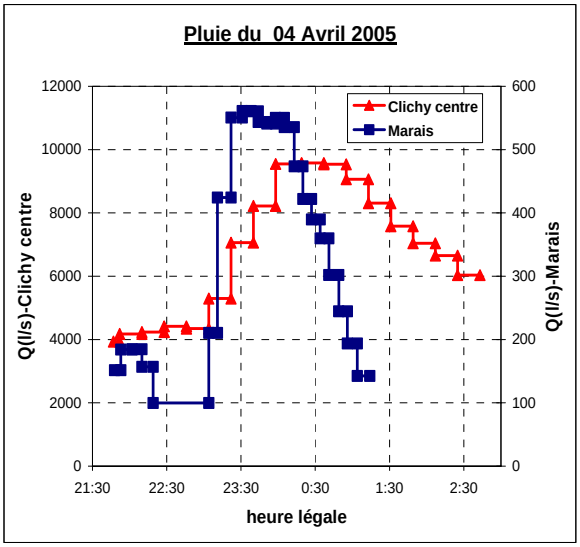


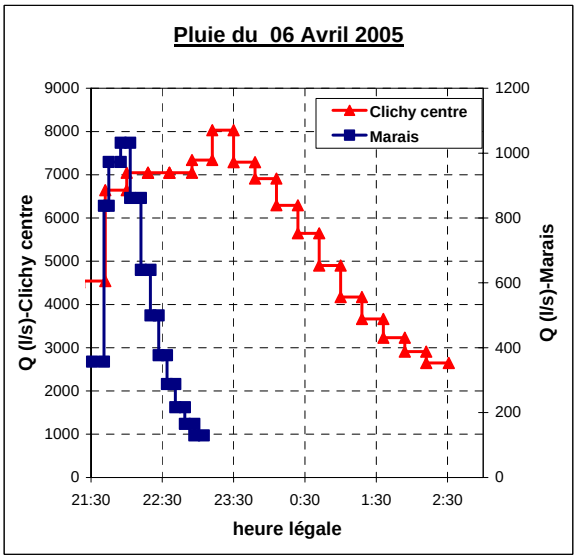


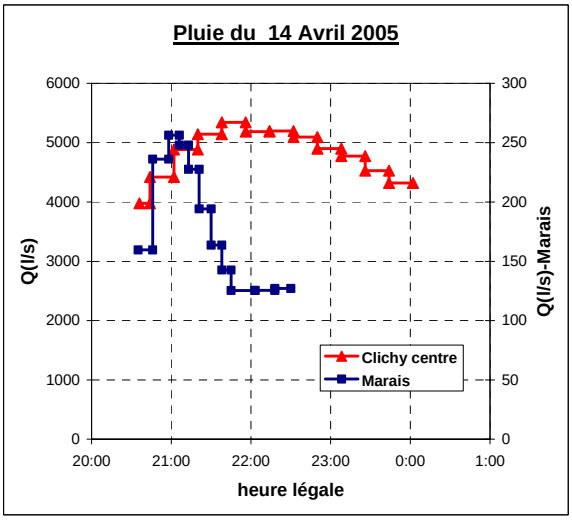






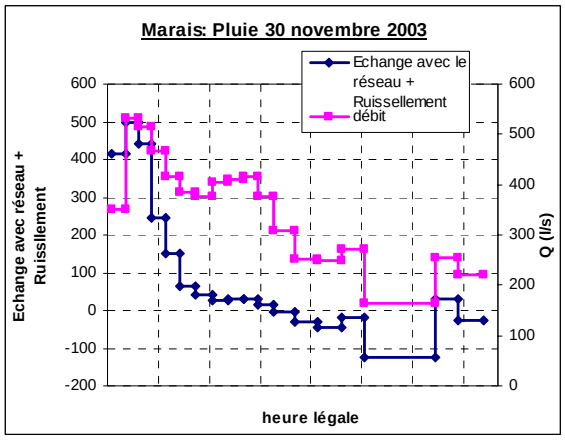

Pluie du 04 Avril 2005
Clichy centre
Marais
Q(l/s)-Clichy centre
Q(l/s)-Marais
heure légale
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
600
500
400
300
200
100
0
21:30
22:30
23:30
0:30
1:30
2:30

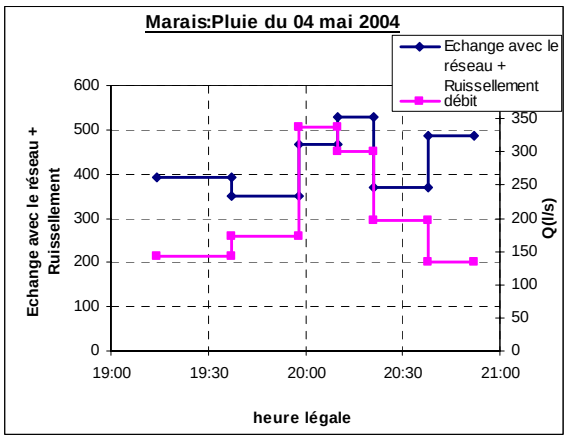

Pluie du 06 Avril 2005
Clichy centre
Marais
Q (l/s)-Clichy centre
Q (l/s)-Marais
heure légale
9000
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
1200
1000
800
600
400
200
0
21:30
22:30
23:30
0:30
1:30
2:30

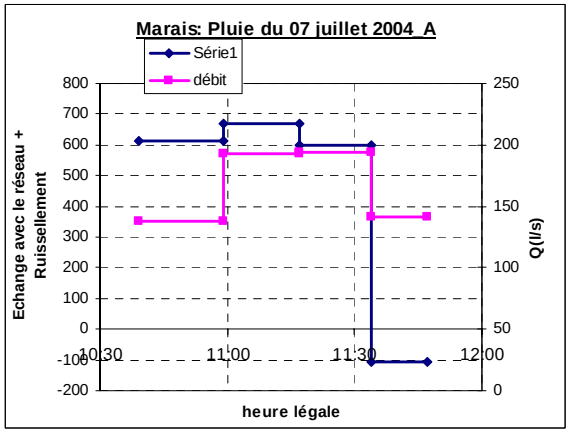

Pluie du 14 Avril 2005
Clichy centre
Marais
Q(l/s)
Q(l/s)-Marais
heure légale
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
300
250
200
150
100
50
0
20:00
21:00
22:00
23:00
0:00
1:00

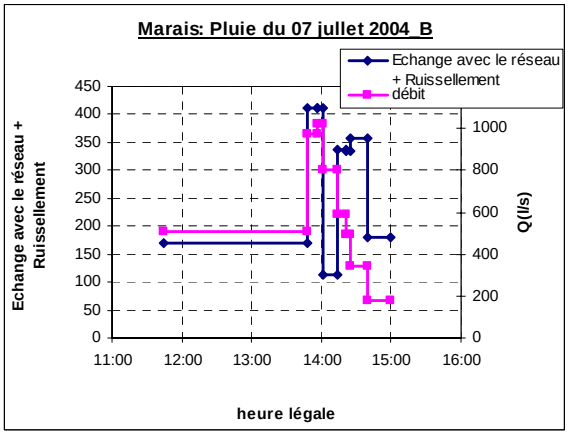
ANNEXE 44 : phénomène Erosion – Sédimentation

Marais

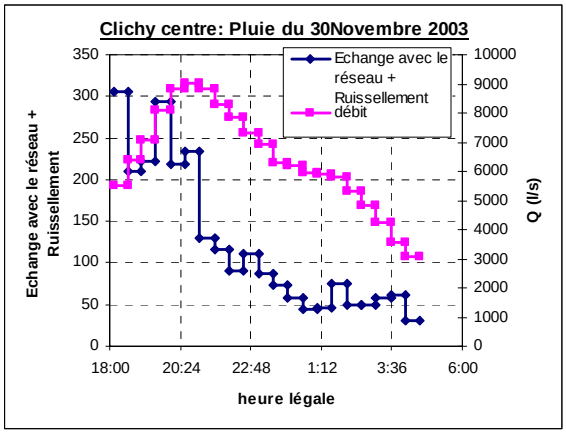


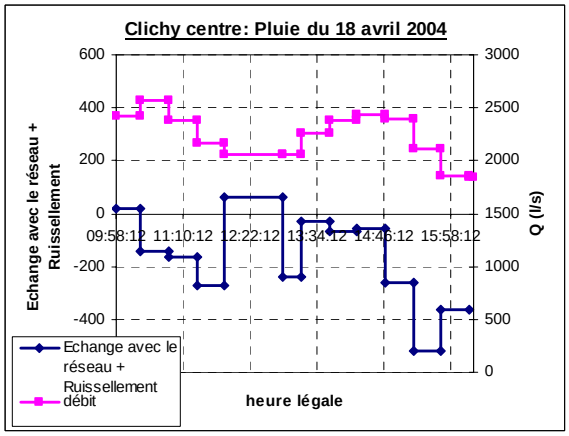


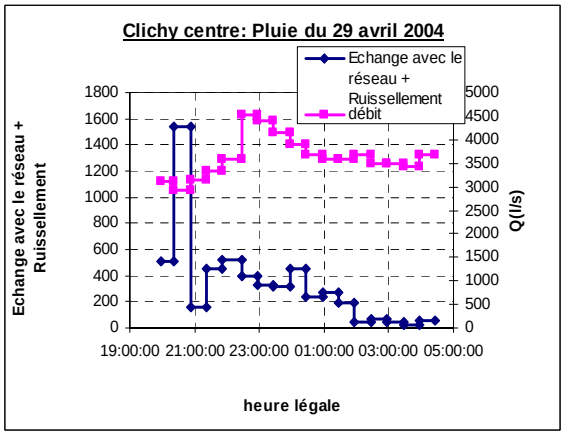


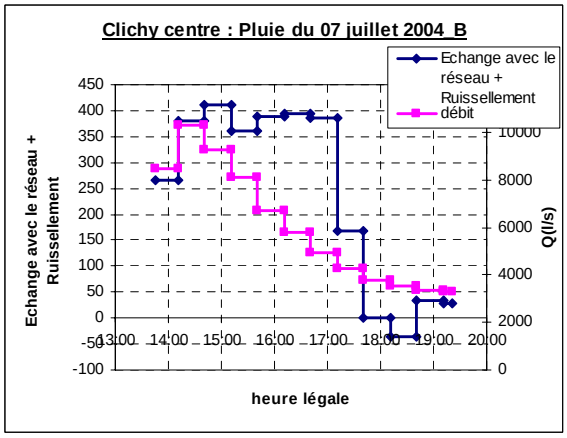


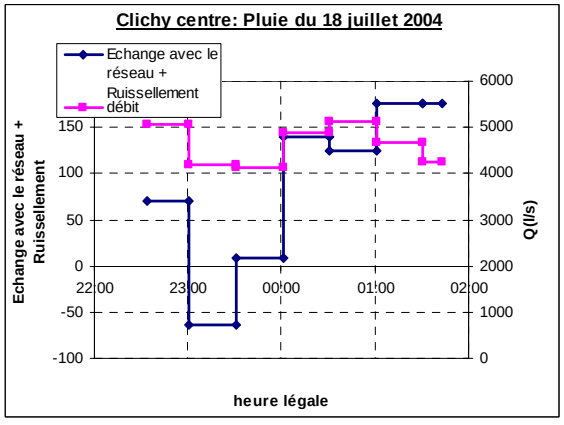
Clichy centre



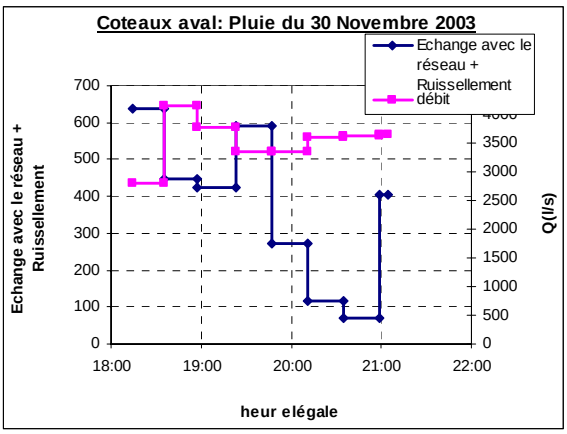


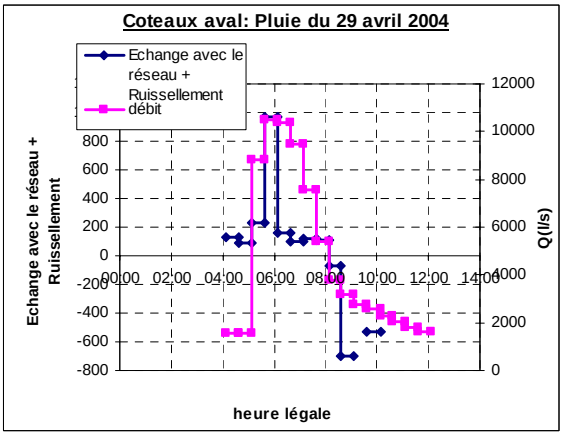


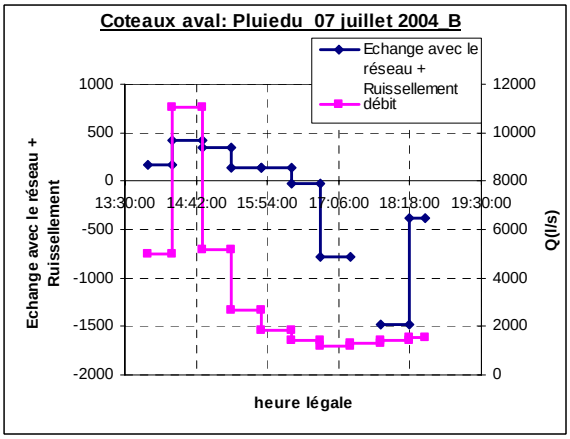




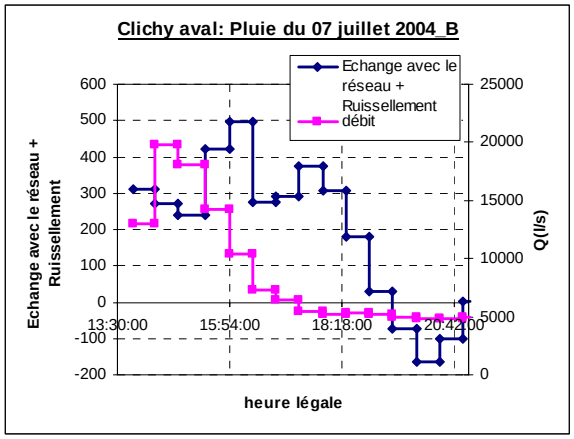
Coteaux aval



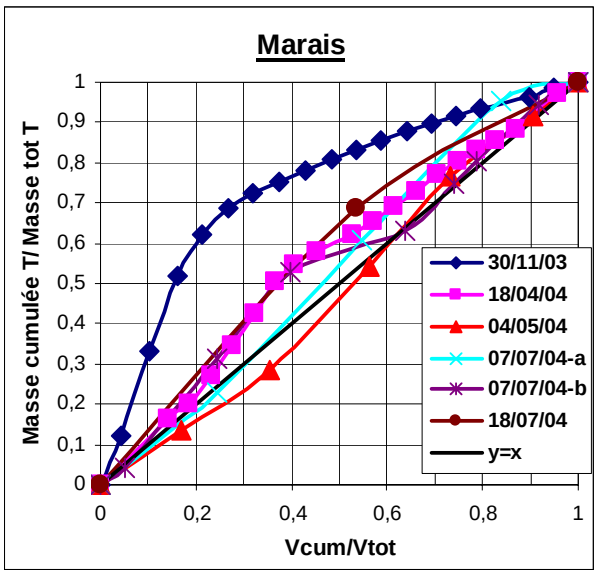


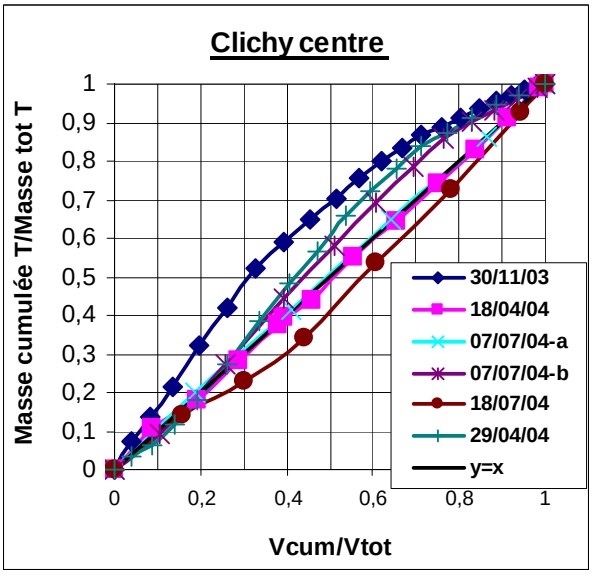


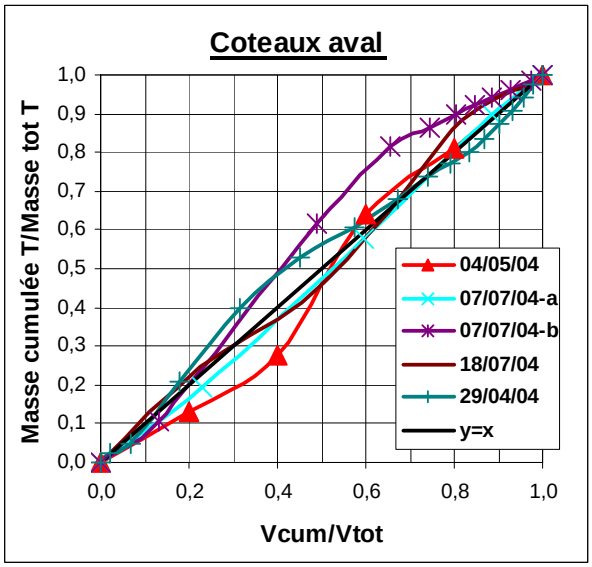
Clichy aval

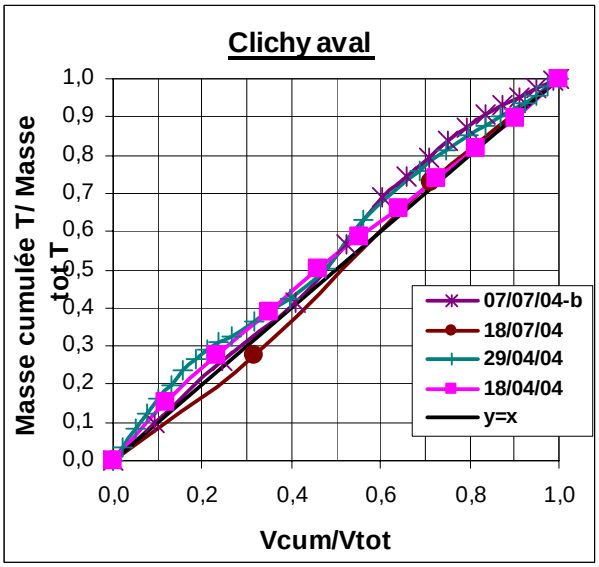

Clichy aval: Pluie du 07 juillet 2004_B
Echange avec le réseau + Ruissellement débit
Echange avec le réseau + Ruissellement
Q(l/s)
heure légale
600
500
400
300
200
100
0
-100
-200
25000
20000
15000
10000
5000
0
13:30:00
15:54:00
18:18:00
20:42:00

ANNEXE 45 : courbes M(Vt) tracées sur chaque site de mesure









ANNEXE 46 : récapitulatif de la méthode appliquée pour l'estimation des masses des eaux usées de temps sec, sur chaque site de mesure et pour chaque événement pluvieux

	Marais	Sébastopol	Quais	Clichy centre	Coteaux aval	Clichy aval
30 Avril 2003	Moyenne entre les pollutogrammes en flux de temps sec : 01Avril04, 27Mai04; 21Mars05, 12Avril05.	Moyenne entre les pollutogrammes en flux de temps sec : 30Octobre02, 21/11/02 et 12Mars03, 04Aout05, 09Aout05.	Moyenne entre les pollutogrammes en concentrations : 12Mars03, 01Avril04, 27Mai04, 21Juillet05, 04Aout05 et affectation des volumes de la journée de temps sec choisie pour limiter le début et la fin de la pluie	Moyenne entre les pollutogrammes en concentrations : 30Octobre02 ;21/11/02 12Mars03, 27Mai04, 18Mars05, 21Mars05 et 12Avril05 et affectation des volumes de la journée de temps sec choisie pour limiter le début et la fin de la pluie	Moyenne entre les pollutogrammes en flux de temps sec :21/11/03 et 12Mars03, 21Mars05, 12Juillet05, et 21Juillet05	Moyenne entre les pollutogrammes en concentrations : 12Mars03, et 27Mai04, 18Mars05, 21Mars05 et affectation des volumes de la journée de temps sec choisie pour limiter le début et la fin de la pluie
05 Mai 2003						Moyenne entre les pollutogrammes en flux : 12Mars03, et 27Mai04, 18Mars05, 21Mars05
02&03 Juillet 2003						Moyenne entre les pollutogrammes en concentrations : 12Mars03, et 27Mai04, 18Mars05, 21Mars05 et affectation des volumes de la journée de temps sec choisie pour limiter le début et la fin de la pluie
16 Juillet 2003						
30Nov&01Déc 2003						
18 Avril 2004				Pollutogramme en concentration du 01Avril04 et affectation des volumes de la de temps sec choisie pour limiter le début et la fin de la pluie		Pollutogramme en concentrations du 01Avril04 et affectation des volumes de la de temps sec choisie pour limiter le début et la fin de la pluie
29&30 Avril 2004				Moyenne entre les pollutogrammes en concentrations : 30Octobre02 ;21/11/02 12Mars03, 27Mai04, 18Mars05, 21Mars05 et 12Avril05 et affectation		Même méthode que pour les premières pluies
04 Mai 2004						
7-Juillet-2004_A						
7-Juillet-2004_B						

18-Juillet-2004				des volumes de la journée de temps sec choisie pour limiter le début et la fin de la pluie		
16-Déc-2004						
7-Dés-2004						
22-mars-05						
04&05-avril-05						
06&07-avril-05						
14&15-avril-05						

ANNEXE 47: récapitulatif de la méthode appliquée pour l'estimation des volumes des eaux unitaires, des eaux usées et des eaux de ruissellement

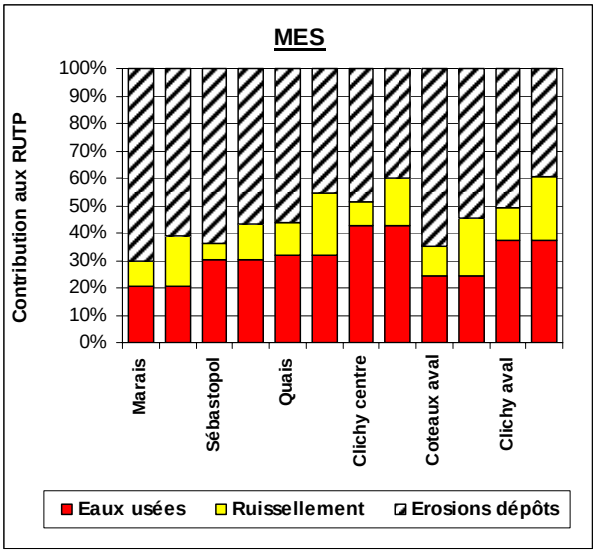
<table>
<tr><th></th><th colspan="3">Marais</th><th colspan="3">Sébastopol</th><th colspan="3">Quais</th></tr>
<tr><th></th><th>V1</th><th>V2</th><th>V3</th><th>V1</th><th>V2</th><th>V3</th><th>V1</th><th>V2</th><th>V3</th></tr>
<tr><td>30 Avril 2003</td><td rowspan="15">Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td>Volume des eaux usées mesuré à l'exutoire</td><td rowspan="15">V1-V2</td><td>Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td>Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td rowspan="3">V1-V2</td><td>Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td>Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td rowspan="15">V1-V2</td></tr>
<tr><td>05 Mai 2003</td><td>Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td></tr>
<tr><td>02&03 Juillet 2003</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>16 Juillet 2003</td><td>-</td><td>Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td>Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td>V1-V2</td></tr>
<tr><td>30Nov&01Déc 2003</td><td rowspan="2">Volume des eaux usées mesuré à l'exutoire</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>18 Avril 2004</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>29&30 Avril 2004</td><td rowspan="6">Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>04 Mai 2004</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>7-Juillet-2004_A</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>7-Juillet-2004_B</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>18-Juillet-2004</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>16-Déc-2004</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>17-Dés-2004</td><td>Volume des eaux usées mesuré à l'exutoire</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>22-mars-05</td><td rowspan="4">Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>04&05-avril-05</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>06&07-avril-05</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>14&15-avril-05</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

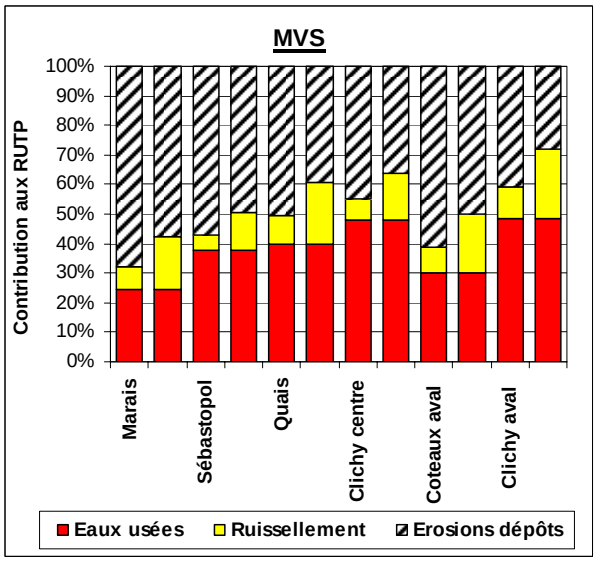
V1: volumes des eaux unitaires,
V2: volumes des eaux usées,
V3: volumes des eaux de ruissellement
-: pluie non échantillonnée

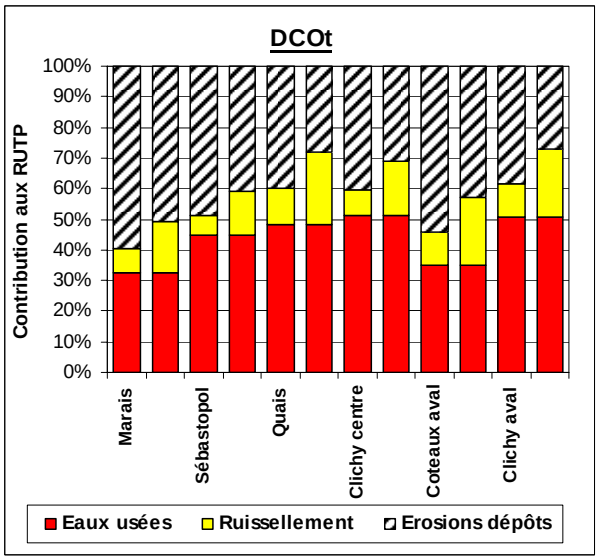
<table>
<tr><th></th><th colspan="3">Clichy centre</th><th colspan="3">Coteaux aval</th><th colspan="3">Clichy aval</th></tr>
<tr><th></th><th>V1</th><th>V2</th><th>V3</th><th>V1</th><th>V2</th><th>V3</th><th>V1</th><th>V2</th><th>V3</th></tr>
<tr><td>30 Avril 2003</td><td>Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td>Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td>V1-V2</td><td>Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td>Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td>V1–V2</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>05 Mai 2003</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td rowspan="2">Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td rowspan="2">Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td rowspan="2">V1-V2</td></tr>
<tr><td>02&03 Juillet 2003</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td>Volume des eaux usées mesuré à l'exutoire</td><td rowspan="3">V1–V2</td></tr>
<tr><td>16 Juillet 2003</td><td rowspan="5">Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td rowspan="6">Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td rowspan="5">V1-V2</td><td rowspan="4"></td><td>Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td rowspan="3">Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td rowspan="3">Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td rowspan="3">V1-V2</td></tr>
<tr><td>30Nov&01Déc 2003</td><td rowspan="4">Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td rowspan="3">V1–V2</td></tr>
<tr><td>18 Avril 2004</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>29&30 Avril 2004</td><td>Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td>Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td rowspan="2">Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td rowspan="2">Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td rowspan="2">V1-V2</td></tr>
<tr><td>04 Mai 2004</td><td rowspan="3">Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>7-Juillet-2004_A</td><td>V2 + V3</td><td>Volume de la pluie</td><td>V2 + V3</td><td>Volume de la pluie</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>7-Juillet-2004_B</td><td rowspan="2">Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td rowspan="2">V1-V2</td><td rowspan="2">Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td rowspan="2">V1–V2</td><td>V2 + V3</td><td rowspan="2">Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td>Volume de la pluie</td></tr>
<tr><td>18-Juillet-2004</td><td>Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td>Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td>V1-V2</td></tr>
<tr><td>16-Déc-2004</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>17-Dés-2004</td><td rowspan="5">Volume des eaux unitaires mesuré à l'exutoire</td><td rowspan="5">Volume des eaux usées estimé par le %Veu/Vt selon la conductivité</td><td rowspan="5">V1-V2</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>22-mars-05</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>04&05-avril-05</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>06&07-avril-05</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>14&15-avril-05</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
</table>

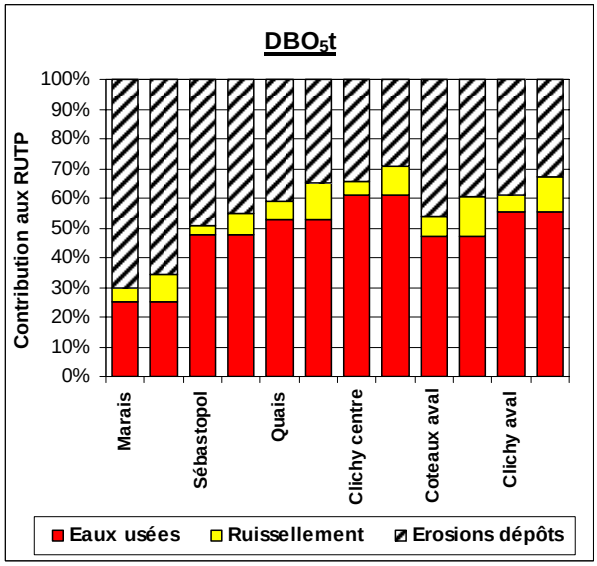
V1: volumes des eaux unitaires,
V2: volumes des eaux usées,
V3: volumes des eaux de ruissellement

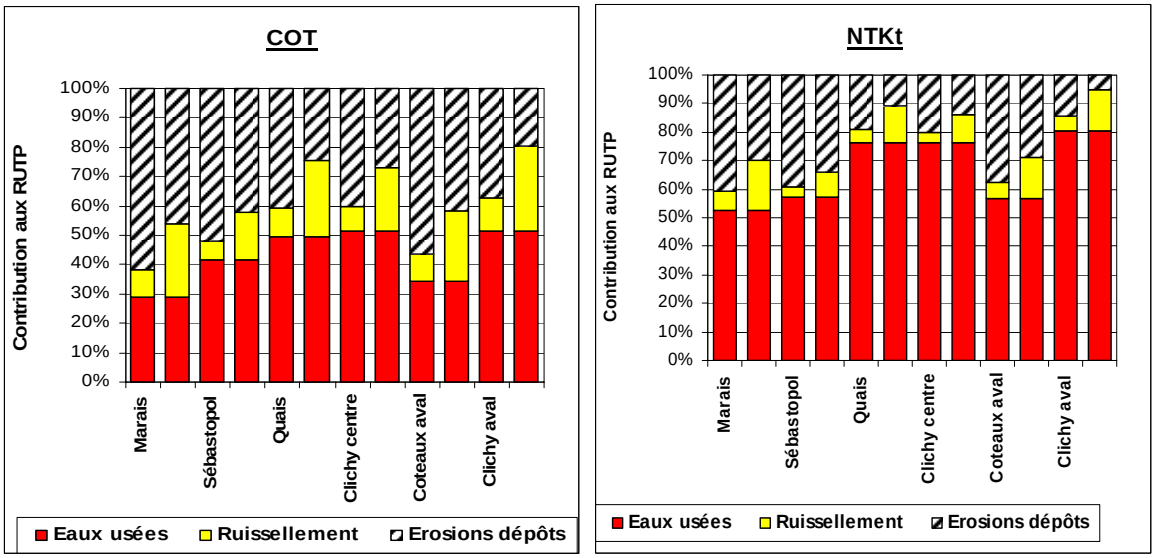
ANNEXE 48 : contribution des eaux usées, des eaux de ruissellement et du réseau en MES, MVS, DCOt et $DBOt_5$, en somme des masses sur l'ensemble des évènements pluvieux étudiés










COT
Contribution aux RUTP
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
Marais
Sébastopol
Quais
Clichy centre
Coteaux aval
Clichy aval
Eaux usées
Ruissellement
Erosions dépôts
NTKt
Contribution aux RUTP
Marais
Sébastopol
Quais
Clichy centre
Coteaux aval
Clichy aval
Eaux usées
Ruissellement
Erosions dépôts