
ANALYSE DES FLUX DE MES EN FONCTION DU DEBIT A L'INTÉRIEUR DE L'ÉVÉNEMENT PLUVIAL

1 INTRODUCTION

A la différence des chapitres précédents consacrés pour l'essentiel aux phénomènes de production à l'échelle événementielle, ce chapitre est consacré à l'analyse de la production et du transfert à l'échelle intra-événementielle à partir des pollutogrammes en MES à l'exutoire des bassins versants des Quais et Clichy.

Dans ce chapitre, la turbidité (en *FAU*) sera directement assimilée à une concentration en MES. En effet, nous avons montré dans la troisième partie que la turbidité est un bon indicateur de la concentration en MES à l'échelle intra-événementielle (faible variabilité du rapport *MES/turbidité*).

Dans un premier temps nous nous intéresserons aux processus de production en jeu. Pour ce faire nous raisonnerons en termes de flux et nous analyserons les courbes flux-débit de quelques événements caractéristiques observés sur le site de Clichy pour mieux analyser la constitution et la mobilisation des stocks.

Dans un deuxième temps nous mettrons l'accent sur les processus de transfert en établissant une typologie des événements basée sur la position relative des pics de débit et de turbidité. Nous comparerons le comportement des sites des Quais et de Clichy, et nous chercherons si les différents types de comportement peuvent être reliés à des caractéristiques des événements pluvieux.

2 CONSTITUTION ET MOBILISATION DES STOCKS

Dans cette section nous analyserons les courbes flux-débit vis-à-vis des processus de production des MES.

Nous avons choisi de travailler sur les flux plutôt que sur les concentrations car c'est un paramètre conservatif dont les séries chronologiques observées à l'exutoire d'un bassin versant sont directement liées aux processus d'accumulation et de mobilisation des dépôts.

Pour évaluer au mieux les flux liés à ces processus il semble naturel de retrancher les flux d'eaux usées qui constituent une contribution importante (*cf chapitre 10*) mais conserver le débit total qui détermine les conditions hydrodynamiques de sédimentation et de mobilisation. Ce calcul des flux pluviaux est rendu possible pour le site de Clichy grâce à l'utilisation du modèle proposé dans le chapitre 8 pour le calcul d'un pollutogramme de flux MES au cours d'une journée de temps sec. Mais les incertitudes attachées à ce modèle nous ont conduits à tester également une analyse en termes de flux global pour vérifier la robustesse des conclusions obtenues.

Dans un premier temps nous présenterons une analyse exhaustive des courbes flux-débit des événements observés à Clichy pour essayer de dégager des dynamiques caractéristiques en termes de flux transportés en phase de crue et de décrue.

Puis nous étudierons quelques événements correspondant à des successions de pics de débit séparées ou non par une période de temps sec, afin de vérifier le rôle des débits dans l'épuisement et la reconstitution des stocks.

2.1 Dynamique des flux pendant les phases de crue et de décrue

Les *Figure 172, (a), (b) et (c)* montrent les différentes formes de courbes $\phi_{total}(Q)$ (*Figure 172, a₁, b₁ et c₁*) et $\phi_{pluvial}(Q)$ (*Figure 172, a₂, b₂ et c₂*) observées sur le site de Clichy

D'une manière générale, la forme de la courbe $\phi(Q)$ est la même pour les flux totaux et les flux pluviaux. On pourra donc baser l'interprétation sur l'analyse des courbes de flux et de débit totaux.

À débit égal, les flux sont différents en crue qu'en décrue. Ceci peut être relié à la disponibilité des stocks ou aux caractéristiques hydrauliques explicatives des processus d'érosion des stocks de particules.

L'analyse des boucles permet de distinguer trois types de comportements :

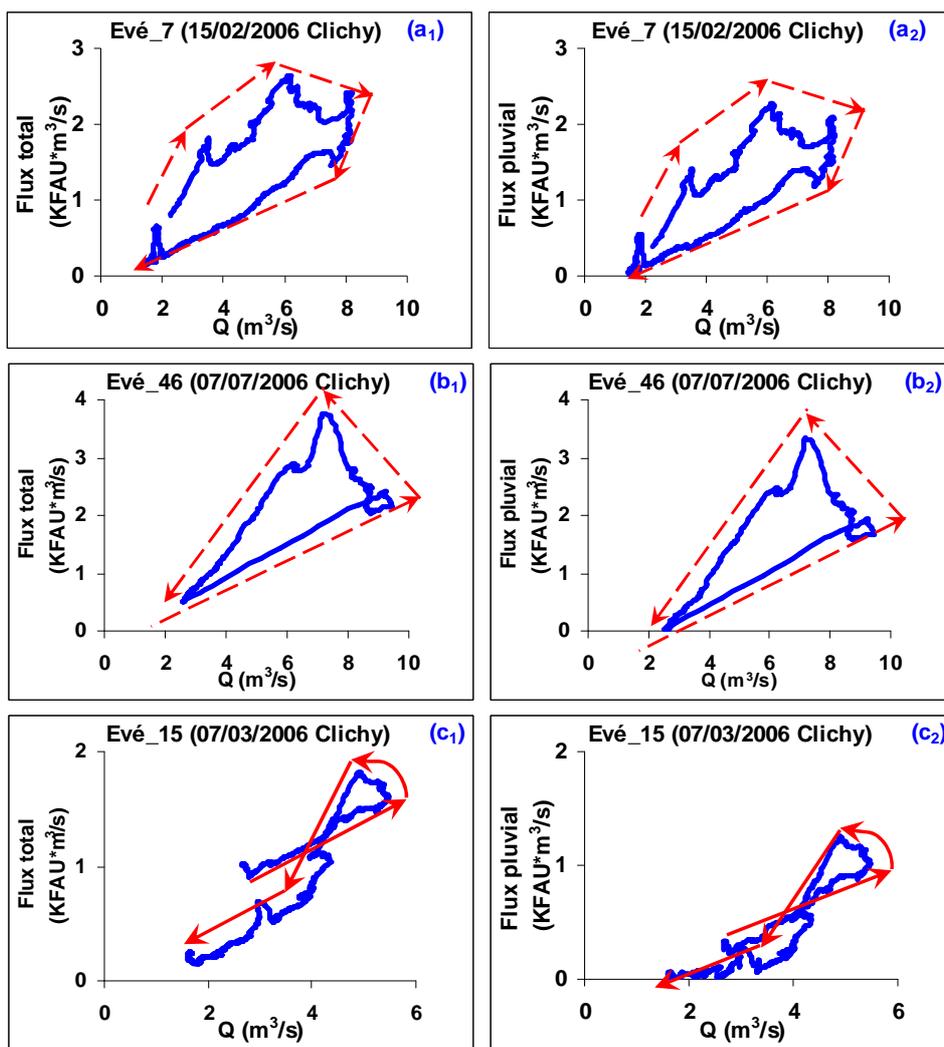


Figure 172 : Exemple de trois réponses de flux par rapport au débit

- ❖ Présence d'une boucle dans le sens horaire. (Figure 172, a) 34 % des événements étudiés présentent ce type de comportement. Pour un débit donné, les flux sont systématiquement plus élevés en crue qu'en décrue. Ceci traduit soit un épuisement du stock lors de la phase de crue, soit une plus grande énergie de l'écoulement, et donc une plus grande capacité de transport, en crue qu'en décrue.
- ❖ Présence d'une boucle dans le sens anti-horaire (Figure 172, b) : Ce groupe représente seulement 9 % du nombre total d'événements pluvieux. Pour un débit donné les flux sont systématiquement plus élevés en décrue qu'en crue. Ce phénomène de « last flush » est difficile à interpréter en termes de production et pourrait être due à des phénomènes de transfert. Ces phénomènes, qui interviennent également pour les autres configurations, seront étudiés dans le chapitre 12.

- ❖ Présence d'une boucle de forme complexe (*Figure 172, c*) : Ce type de comportement est prédominant (57 % d'événements). Il est à relier à la forme complexe de le hétérogramme et de l'hydrogramme des événements pluvieux concernés.

La diversité des réponses en termes de courbe flux-débit et la prédominance des formes complexes suggèrent de chercher à identifier des configurations d'événements assez simples pour pouvoir avancer des hypothèses relatives à l'épuisement et à la reconstitution des stocks.

2.2 Analyse de configurations particulières d'événements

Nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux pollutogrammes établis pour des événements pluvieux avec plusieurs pics de débit successifs ou des événements pluvieux séparés par des durées de temps sec de plusieurs heures. Ces données sont constituées de

- 2 événements pluvieux présentant 2 à 3 pics de débits successifs (*Figure 173, (a) et (b)*) le 20/05/2006 et le 13/08/2006.
- 2 séries de pluies successives (*Figure 175, Figure 176 et Tableau 42*) : 3 pluies entre 15 et 18 février 2006 séparées par des durées de temps sec de 1 à 4 h et 2 pluies successives le 23 et 24 avril 2006 séparées par des durées de temps sec de 1 à 21 heures.
- 2 événements pluvieux comparables précédés par des durées de temps sec très différentes : pluies des 03/03/2006 et 03/04/2006 précédées respectivement par des durées de temps sec de 10 heures et 210 heures.

La première configuration doit permettre d'aborder les phénomènes d'épuisement des stocks au cours d'un événement pluvieux. La deuxième ajoute la possibilité d'observer la reconstitution rapide de stocks lors d'une période de retour au temps sec. La troisième permet d'aborder la loi d'accumulation du stock en fonction du temps.

2.2.1 Événements pluvieux avec des pics de débit successifs :

Pour le premier événement (*Figure 173, (a) et (b)*), à débit équivalent, les flux sont systématiquement plus faibles pour le deuxième et troisième pic, ce qui peut traduire un épuisement par les pics successifs des particules les plus facilement mobilisables. Un même

débit peut alors mobiliser de moins en moins de flux selon sa position par rapport au début de l'événement, mais une augmentation du débit s'accompagne toujours d'une augmentation du flux.

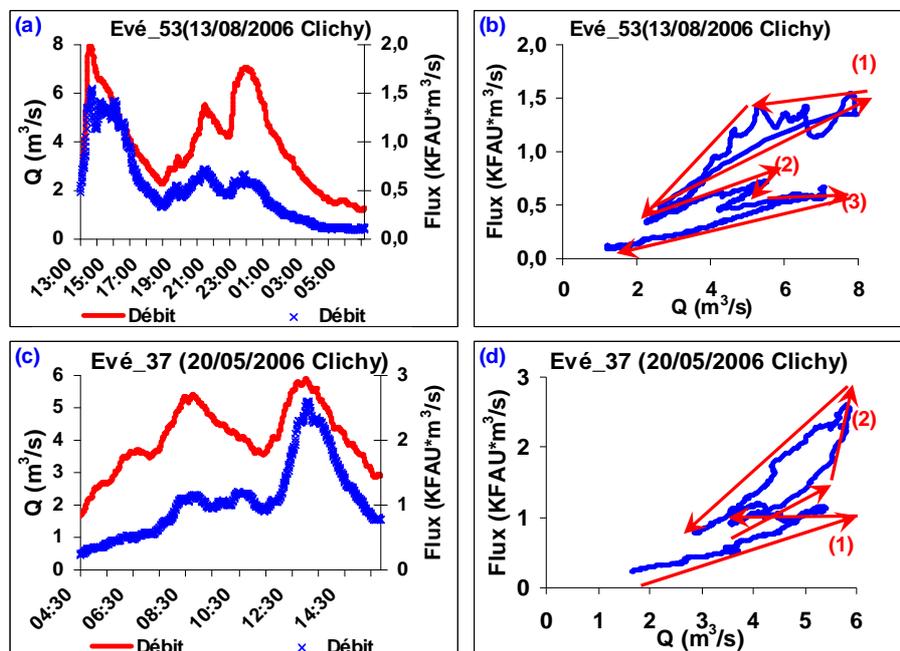


Figure 173 : Exemple de deux événements à pic successifs

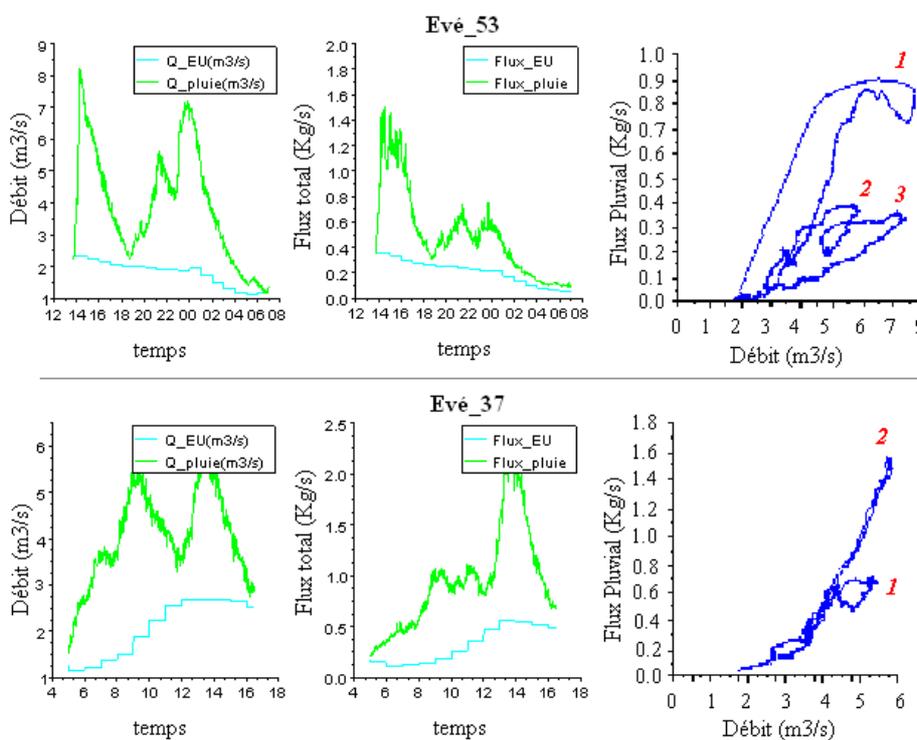


Figure 174 : Histogramme et pollutogramme en flux de MES mesurés à l'exutoire pour les événements 37 et 53 ainsi que le profil d'eaux usées de temps sec (modèle d'eaux usées, cf. chapitre 8) et les courbes flux pluvial (sans les eaux usées)-Débit total

Pour le deuxième événement, nous observons un comportement opposé à ce qui vient d'être décrit : le deuxième pic mobilise davantage de flux que le premier.

Ces observations restent valables si on déduit les flux d'eaux usées (*Figure 174*).

2.2.2 Événements successifs, séparés par des durées de temps sec de plusieurs heures

Les résultats de la première série d'événements (*Figure 175*) montrent une diminution nette des flux à débit égal, entre les phases de crue du premier événement et des suivants. De plus on observe une hystérésis horaire pour le premier événement. Ces observations pourraient correspondre aux phénomènes d'épuisement du stock de particules facilement mobilisables évoqués dans le paragraphe § 2.1. Par ailleurs on voit que ce stock n'est pas reconstitué dans la période de temps sec séparant les deux événements.

Les résultats sont très différents pour la deuxième série d'événements où on n'observe pas de diminution des flux pour le deuxième événement. (*Figure 176*). Dans ce cas, il n'y aurait pas d'épuisement du stock, ce qui signifierait que ce stock est grand, ou qu'il se reconstitue rapidement. On observe néanmoins des boucles horaires, qui seraient donc dues à une différence d'énergie à débit égal entre phases de crue et de décrue.

Ces résultats, très différents d'une série d'événements à une autre, soulignent que le débit seul ne suffit pas à expliquer les phénomènes de production et de transport des particules par temps de pluie. La modélisation détaillée d'une série temporelle de données semble être indispensable pour reproduire les conditions initiales, identifier les variables explicatives des phénomènes étudiés et reproduire les formes complexes des pollutogrammes mesurés.

Tableau 42 : Caractéristiques de deux groupes de pluies successives séparées par quelques heures

Événement	H (mm)	D (h)	I _{moy} (mm/h)	I _{max5} (mm/h)	DTS (j)	Q _{max} (m ³ /s)	T _{max} (FAU)	V _{EP} /V _{EU}	M _{EP} /M _{EU}
7	16,2	6,8	2,39	6,8	3,77	7,15	553	2,21	2,16
8	5,2	2,3	2,26	6,0	1,06	4,5	338	1,25	1,32
9	18,2	11,6	1,58	5,5	1,07	7,12	306	0,99	0,45
26	6,8	0,77	8,84	23,24	21,38	9,22	793	1,53	3,33
27	11,2	1,58	7,07	43,62	1,13	12,15	511	1,45	1,94

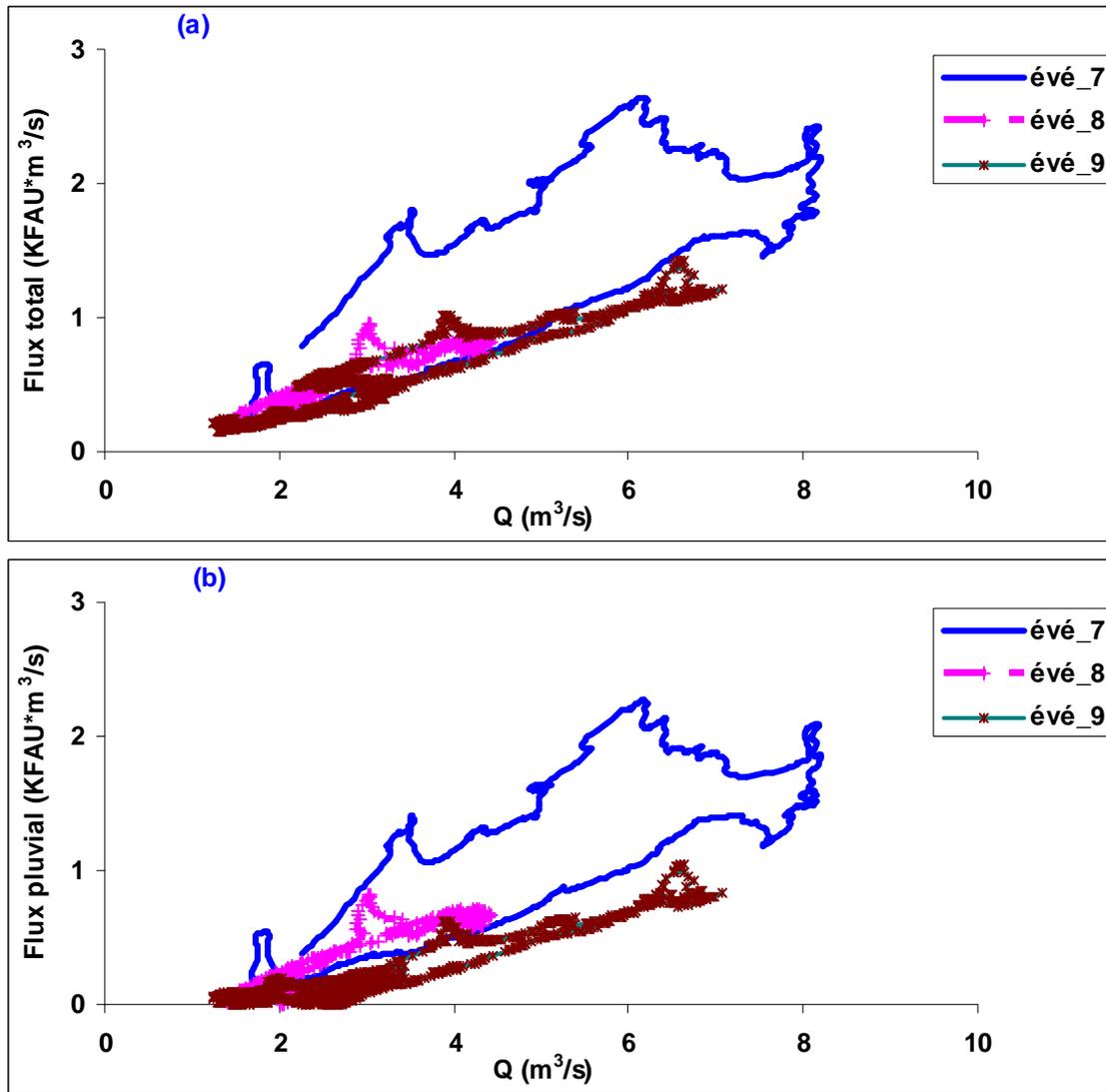


Figure 175 : Exemple de trois pluies successives (boucles horaires)

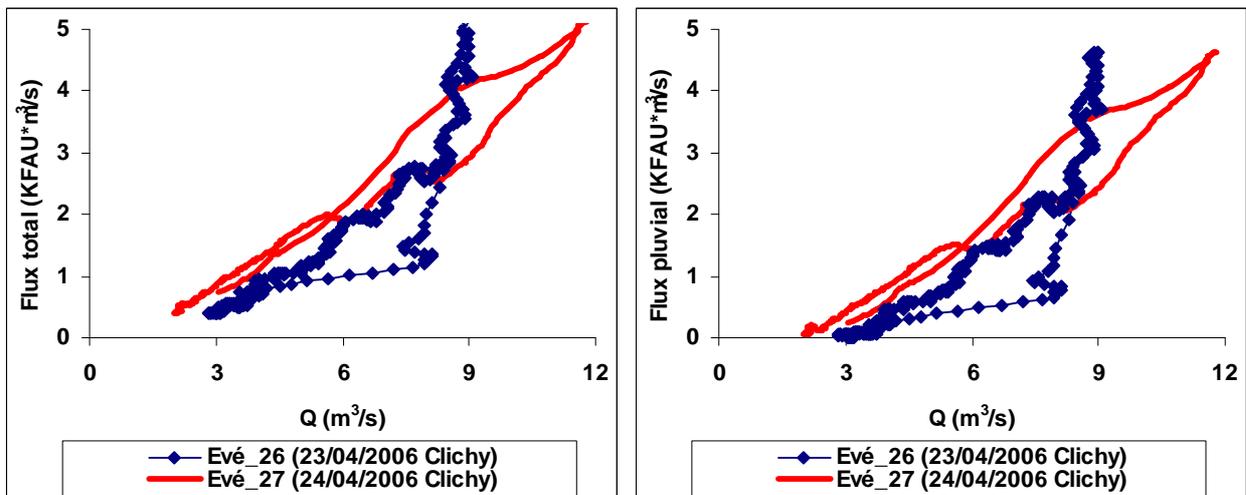


Figure 176 : Exemple de deux pluies successives

2.2.3 Événements semblables séparés par des durées de temps sec très différentes

La Figure 177 illustre le cas des événements pluvieux 13 et 28 qui ont de durées de temps sec antérieures différentes, leurs autres caractéristiques étant proches (Tableau 43) (les événements 26 et 27 du paragraphe précédent constituent un autre exemple d'une telle configuration). Les formes de deux courbes flux-débit sont proches. Ceci ne peut pas être dû aux eaux usées. En effet, en enlevant l'effet des eaux usées, les formes des courbes flux-débit restent proches.

Tableau 43 : Caractéristiques de deux événements 13 et 28 (DTS différentes)

Événement	H (mm)	D (h)	I_{moy} (mm/h)	I_{max5} (mm/h)	DTS (j)	Q_{max} (m ³ /s)	T_{max} (FAU)	V_{EP}/V_{EU}	M_{EP}/M_{EU}
13	9,8	4,89	2,00	9,3	0,42	5,89	490	1,17	1,1
28	8,6	3,72	2,31	8,2	8,75	6,47	489	0,96	0,99

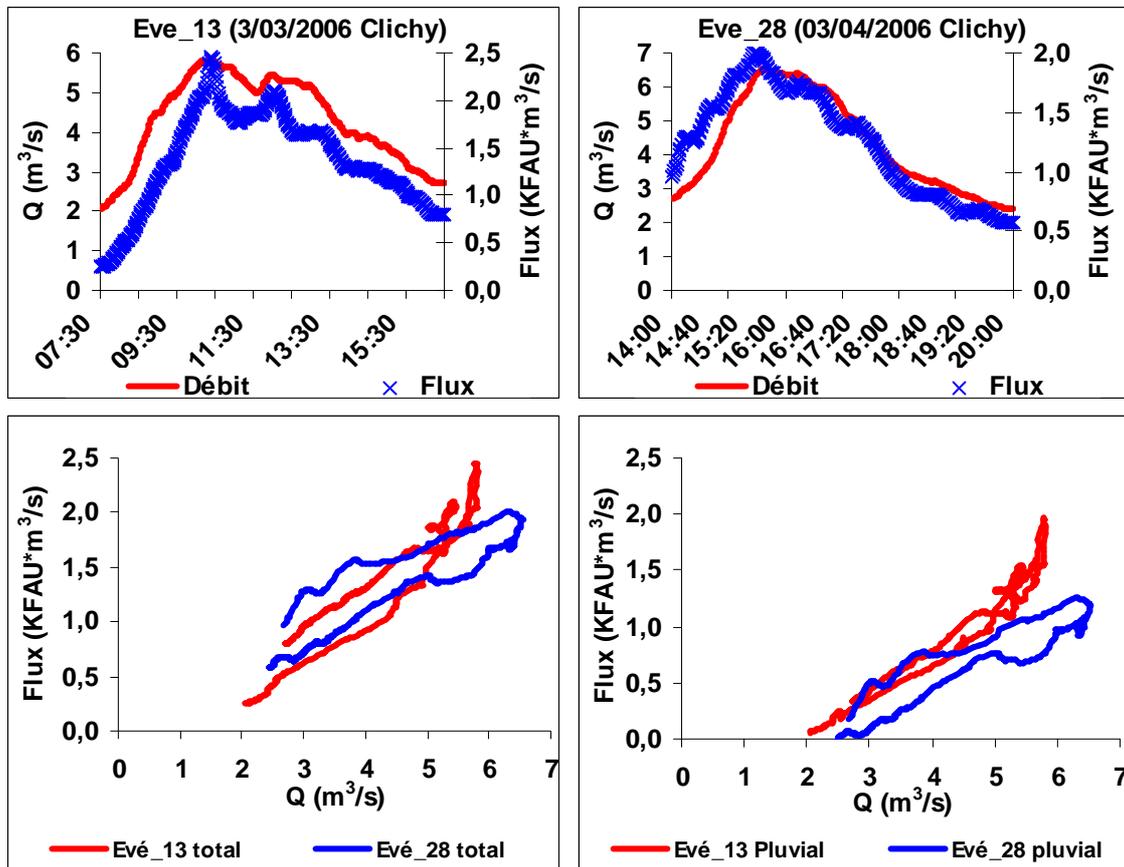


Figure 177 : Exemple de deux événements pluvieux qui ont des DTS différentes

Ceci pourrait indiquer que le phénomène d'accumulation n'est pas linéaire en fonction de la durée de temps sec (telle que définie dans le chapitre 10), ou plus précisément que le stock

mobilisable se reconstitue et se stabilise rapidement. Cette hypothèse est en contradiction avec les observations faites dans le paragraphe précédent, ainsi qu'avec les résultats obtenus par (Ahyerre and Chebbo, 2002) qui montrent une accumulation linéaire des stocks associés à la couche organique mobilisable. Il se pourrait alors que le stock soit toujours présent, ce qui est en contradiction avec les hypothèses d'épuisement de stock faites pour d'autres événements.

Un autre mode de définition de durées de temps sec a été proposé dans le chapitre précédent (*cf. § Chapitre 8*). Il se base sur la masse érodée au cours des événements pluvieux antérieurs pour identifier un événement significatif vis-à-vis de la mobilisation des stocks, à partir duquel est définie la durée de temps sec. Son application aux événements 13 et 28 aboutit à des durées de temps sec antérieures aux événements pluvieux assez proches. Ce n'est pas le cas pour les événements 26 et 27, pour lesquels les durées de temps sec basées sur cette approche restent très différentes.

Il serait néanmoins intéressant de mener une réflexion sur la notion de durée de temps sec pour expliquer l'accumulation du stock en réseau d'assainissement, et la généraliser en termes d'antécédents pluviométriques.

3 TRANSFERTS COMPARES DES DEBITS ET DES TURBIDITES

Dans un écoulement, l'onde de débit se propage à une vitesse supérieure à la vitesse de la masse d'eau advectée (Henderson, 1966). La situation où une source de turbidité serait synchronisée avec un hydrogramme en un point du bassin versant conduirait systématiquement à un retard du pollutogramme sur l'hydrogramme à l'exutoire de ce bassin.

Dans un réseau d'assainissement le contexte de production et de transfert des MES et des flux d'eau est très complexe : différence entre les sources d'eau et les sources de particules, variabilité des processus de mobilisation et de transfert dans le temps et dans l'espace, etc. Ceci peut entraîner une grande variabilité du décalage temporel entre le pollutogramme et l'hydrogramme. L'analyse de ce décalage devrait permettre d'améliorer les connaissances sur la localisation des stocks de MES dans le réseau et sur les processus de mobilisation de ces stocks. En effet, la répartition dans le temps de la réponse de la concentration par rapport au débit nous donne une idée de la répartition dans l'espace des sources.

3.1 Typologie des événements pluvieux

Nous nous sommes inspirés des approches utilisées pour analyser le transport solide en rivières et qui sont basées sur une analyse des courbes concentration-débit au cours de crues, et leur interprétation en termes d'avance ou de retard de la concentration en MES par rapport au débit. Pour analyser ce décalage nous avons pris comme référence les valeurs maximum de turbidité et de débit et nous avons établi une typologie des tous les événements observés sur les sites des Quais et Clichy. Nous avons classé les événements selon 4 types de comportement (*Figure 178*) :

- ❖ Gr 1 : C en retard sur Q : Le pic du pollutogramme de turbidité se produit après le pic de l'hydrogramme avec un retard supérieur à 10 minutes ;
- ❖ Gr 2 : C en phase avec Q : La valeur absolue de l'écart temporel entre le pic de concentration et le pic de débit est inférieur à 10 minutes ;
- ❖ Gr 3 : C en avance sur Q : Le pic du pollutogramme de turbidité se produit avant le pic de l'hydrogramme avec une avance supérieur à 10 minutes ;
- ❖ Gr 4 : comportement complexe : présence de plusieurs pics de concentration et de débit.

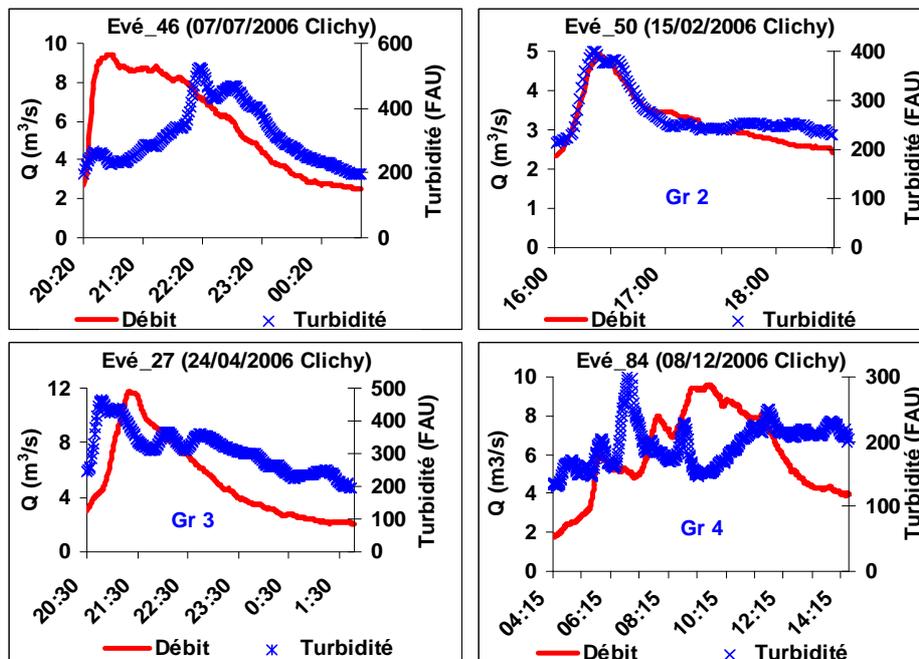


Figure 178 : Exemples de pollutogrammes correspondant à chacun des 4 groupes de la classification

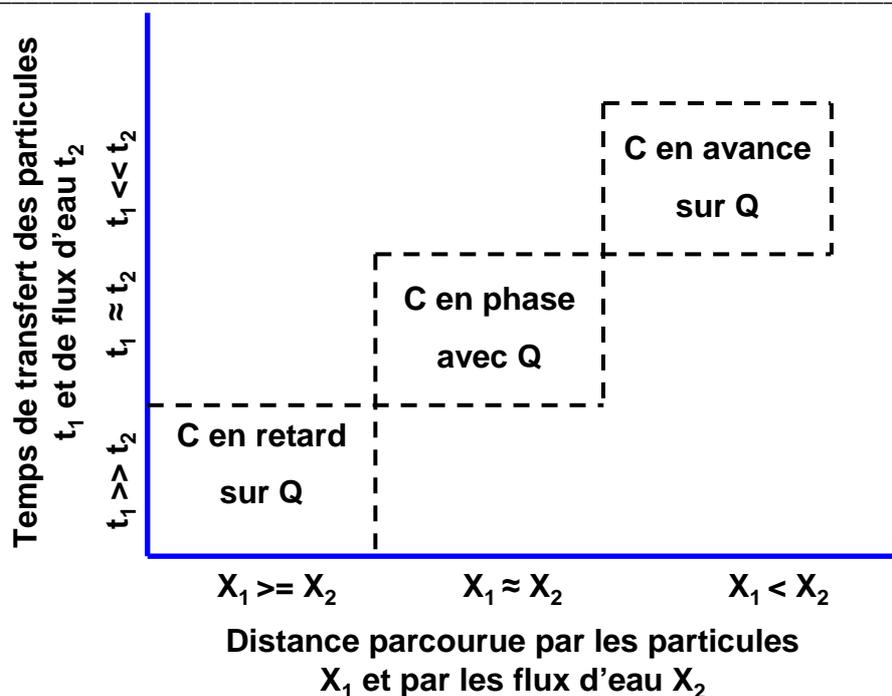


Figure 179 : Interprétation des groupes en fonction du temps de transfert et de la localisation de la source X_1 distance entre le centre de la source de sédiment et l'exutoire. X_2 distances entre le centre de l'aire drainée et l'exutoire. t_1 est le temps de transfert entre le centre de la source de sédiment et l'exutoire. t_2 est le temps de transfert entre le centre de l'aire drainée et l'exutoire, inspiré de (Klein, 1984).

La Figure 179, inspirée de (Klein, 1984), propose une interprétation simplifiée des différents groupes en se basant sur la localisation des sources de particules par rapport aux sources des flux d'eau. Le groupe 1 peut être interprété comme l'arrivée de particules éloignées de l'exutoire. Le groupe 3 indique la présence de stocks de particules proches de l'exutoire et mobilisée avant l'arrivée de la pointe de l'hydrogramme. Le groupe 2 correspond à une situation intermédiaire.

3.2 Application de la typologie aux sites des Quais et Clichy

Dans ce paragraphe nous nous focalisons aux événements moyens et forts pour lesquels les eaux de ruissellement sont déterminantes dans la forme des hydrogrammes et des pollutogrammes. Pour cela les événements qui représentent un débit maximal inférieur à deux fois le débit moyen de temps sec durant l'événement pluvieux n'ont pas été pris en compte. Un exemple d'événement jugé faible est donné dans la Figure 180. Au total, nous avons éliminé 13 événements parmi 75 aux Quais et 19 événements parmi 88 événements à Clichy. Il reste donc 62 événements pluvieux aux Quais et 69 événements à Clichy dont 58 événements sont communs aux deux sites.

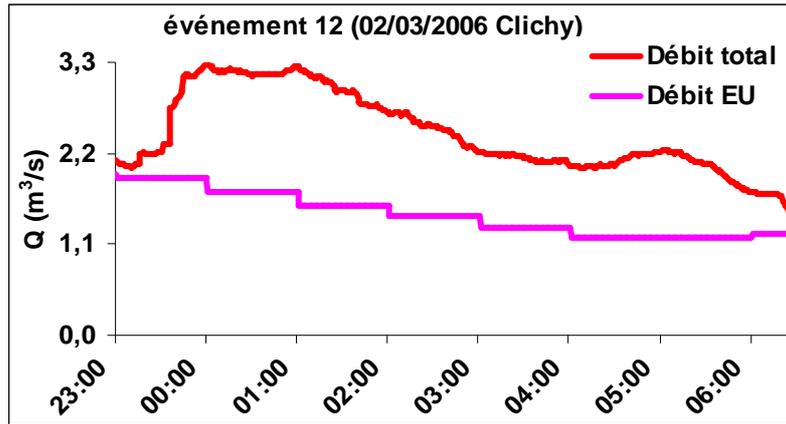


Figure 180 : Exemple d'une pluie éliminée de l'analyse (EU : Eaux usées de temps sec)

La Figure 181 synthétise les résultats de classification pour les deux sites étudiés.

Les distributions des événements pluvieux entre les 4 groupes sont relativement homogènes entre les deux sites étudiés (test de Khi2, valeur $p = 44\%$). 71% des événements communs appartiennent aux mêmes groupes. Ceci traduit une homogénéité de comportement entre les deux échelles spatiales étudiées vis-à-vis de la position des sources actives pour un événement donné.

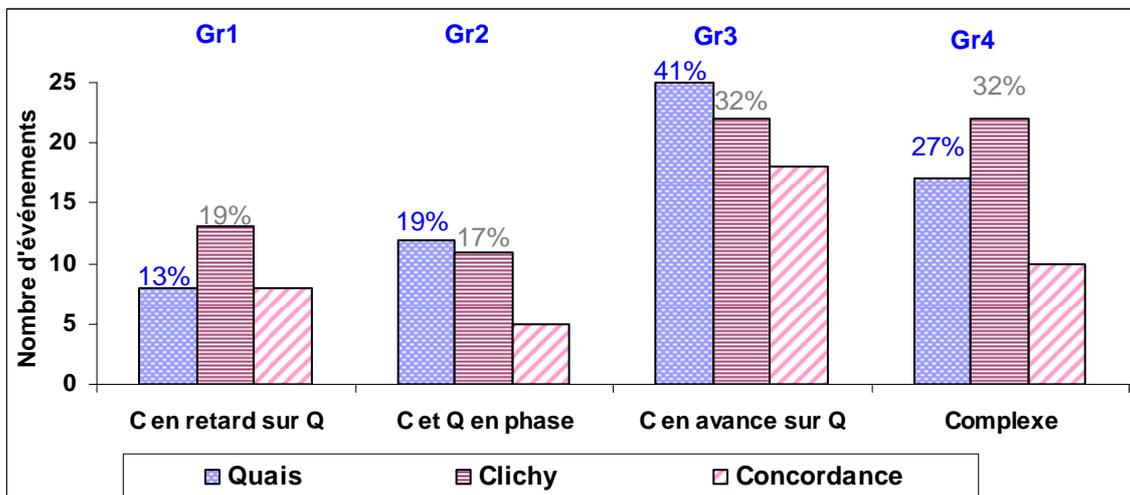


Figure 181 : nombre des événements dans chaque groupe et nombre des événements communs dans le même groupe

Les événements pluvieux sont répartis entre les 4 groupes ce qui reflète la complexité des phénomènes étudiés et la grande variabilité des comportements observés au cours des événements pluvieux. La prédominance du groupe 3, pour lequel le pic de concentration est

en avance sur le pic de débit (32 à 41 % des événements pluvieux), met en évidence des temps de transfert des particules inférieurs à ceux des flux d'eau. Sachant que la vitesse de propagation des flux d'eau est supérieure à celle des particules solides, ce résultat signifie que les particules solides proviennent plutôt du réseau que des surfaces urbaines. Ceci est tout à fait cohérent avec les résultats du bilan de masse des particules qui a montré que le réseau est la source principale des particules transportées par temps de pluie dans le réseau d'assainissement unitaire. Cela signifie également qu'elles sont mobilisées en début d'hydrogramme.

3.3 Variables explicatives des différents groupes

Pour aller plus loin dans l'interprétation des résultats obtenus, nous avons réalisé une analyse en composante principale pour relier les différents groupes d'événements aux variables explicatives suivantes : hauteur précipitée H , intensité maximale sur 5 minutes I_{max5} , durée de pluie D , volume d'eau V , débit maximum Q_{max} , rapport entre le volume d'eau pluviale et le volume d'eau usée V_{EP}/V_{EU} , période de temps sec antérieur à l'événement DTS , turbidité maximale de l'événement T_{max} , et rapport entre la masse en MES dans les eaux pluviales et la masse en MES dans les eaux usées.

Dans la suite du paragraphe nous présentons seulement les résultats obtenus sur le site de Clichy pour lequel nous disposons de beaucoup d'informations sur les variables explicatives utilisées. (cf. *chapitres 8 et 10*).

Le cercle des corrélations (*Figure 182, (a)*) montre que les deux premières composantes principales expliquent 83 % de la variance totale de l'échantillon (58 % pour l'axe F1 et 25% pour l'axe F2). Les facteurs explicatifs de l'axe F1 sont le débit max et l'intensité max sur 5 minutes. L'axe F2 quant à lui est expliqué par la durée de l'événement pluvieux.

L'analyse des projections des événements dans le plan principal F1-F2 met en évidence une absence de structuration des données pour les variables choisies (*Figure 182, (b)*). Les barycentres des 4 groupes sont tous voisins de l'origine (*Figure 182, (b)*).

En conclusion, l'appartenance d'un événement à un groupe ne peut donc pas être reliée de façon simple avec les paramètres couramment utilisés dans la modélisation des flux polluants par temps de pluie. Ceci reflète la complexité des phénomènes étudiés et l'incapacité d'une approche globale et simplifiée d'identifier des variables clés permettant d'avancer dans la

compréhension des processus de production et de transfert des flux polluants par temps de pluie.

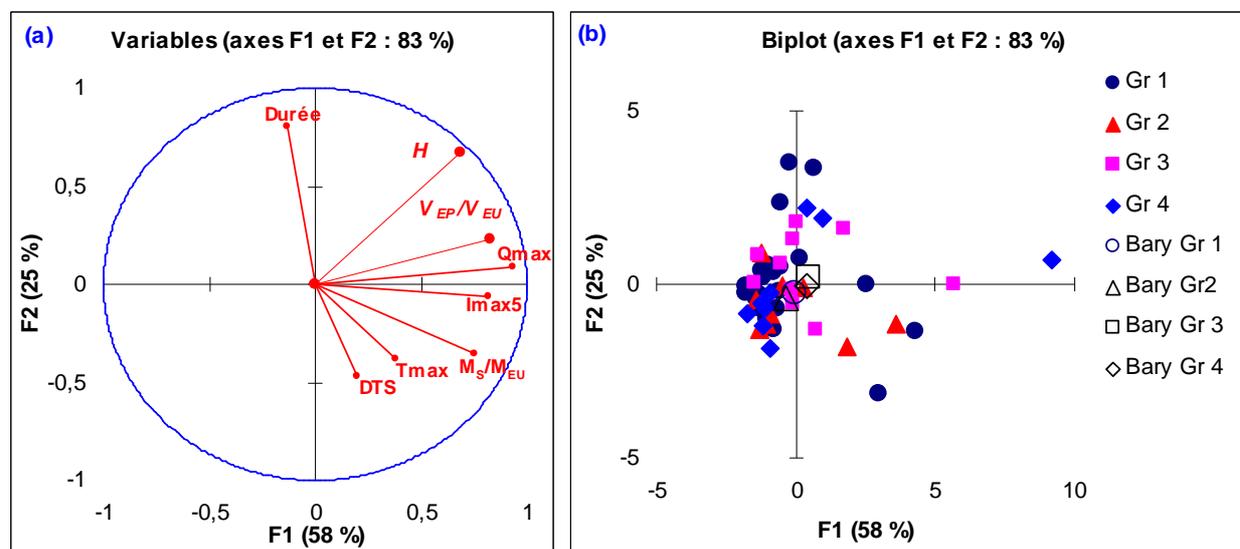


Figure 182 : (a) Cercle des corrélations et (b) Projection des données dans le plan principal 1-2 pour l'ACP relative à la distribution des données dans les 4 groupes de dynamique de réponse de flux ;

4 CONCLUSION

Ce chapitre a permis d'analyser la dynamique des turbidités et des flux de turbidité en comparaison avec celle des flux d'eau. L'approche utilisée consistait à tracer la courbe turbidité ou flux de turbidité en fonction du débit.

Les résultats obtenus sur les deux sites étudiés sont très proches, ce qui suggère une homogénéité spatiale des processus de transfert des particules solides dans le réseau d'assainissement unitaire. Cependant, la dynamique des particules est très variable d'un événement à un autre, et il est très difficile d'expliquer cette variabilité à partir des caractéristiques globales de l'événement pluvial. Ce résultat n'est pas surprenant si on prend en compte la multiplicité et la complexité des processus liés à la production et au transfert des particules solides par temps de pluie. Les représentations graphiques et les analyses statistiques classiques ne sont pas suffisantes pour caractériser l'état initial, identifier les variables explicatives et décrire les processus. Pour aller plus loin, il devient indispensable de coupler l'expérimentation et la modélisation et d'utiliser les modèles pour reproduire et tester des scénarios dynamiques et réalistes du fonctionnement du système étudié.

Cette démarche de modélisation n'est pas possible sur les bassins de Quais et de Clichy du fait de la taille des bassins concernées et de la complexité de leur fonctionnement hydraulique. Nous avons néanmoins voulu évaluer les potentialités d'une telle approche dans le chapitre suivant en l'appliquant à l'étude du transfert sur une configuration théorique très simple.

