

EVALUATION ET INTERPRÉTATION DE LA CONTRIBUTION DES DÉPÔTS DU RÉSEAU PAR TEMPS DE PLUIE

1 INTRODUCTION

Dans le cas des réseaux d'assainissement unitaires, on peut distinguer trois sources MES par de temps de pluies (EUTP) : les eaux de ruissellement sur les surfaces urbaines (*Ruiss*), les eaux de temps sec (*EU*) et les dépôts constitués dans le réseau d'assainissement (*Stock*).

Plusieurs études ont évalué la contribution de ces trois sources au moyen d'un bilan de masses à partir de quelques événements pluvieux (Krejci *et al.*, 1987; Bachoc, 1992; Chebbo, 1992b; Gromaire *et al.*, 2001; Rossi *et al.*, 2005; Kafi-Benyahia *et al.*, 2006a; Soonthornnonda and Christensen, 2008; Gasperi *et al.*, 2010). Les résultats obtenus mettent en évidence le rôle important des dépôts comme une source significative de MES, voire majeure, lors des épisodes pluvieux.

Ces études ont été menées sur un nombre restreint d'événements pluvieux en les comparant à quelques journées de temps sec, sur la base d'échantillons prélevés in situ à des intervalles de temps de plusieurs minutes voire plusieurs dizaines de minutes. Ces évaluations soulèvent certaines questions concernant l'importance de l'effet des incertitudes dans le calcul (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000).

Nous disposons d'une base de données de mesure en continu de la turbidité pour deux sites de caractéristiques différentes (Clichy et Ecully), une base de données des relations MES-Turbidité sur deux sites unitaires Nantais (CB et SM) et une base de données des concentrations moyennes événementielles des eaux de ruissellement (Marais). Ces bases doivent nous permettre d'évaluer avec une bonne représentativité et une précision acceptable les différentes contributions aux masses événementielles observées à l'exutoire de deux bassins versants.

Les objectifs de ce chapitre sont donc :

1. Évaluer la contribution de chacune des trois sources à la masse d'un événement pluvieux et estimer les incertitudes affectant ces évaluations.
2. Analyser la variabilité de la contribution des dépôts en fonction des caractéristiques générales des événements pluvieux,
3. traduire la contribution de dépôts en termes de linéaire et d'épaisseur de couche mobilisable

2 ÉVALUATION DES TROIS SOURCES

2.1 Données utilisées

Nous avons modélisé dans le chapitre 8 les flux de temps sec sur le site de Clichy à Paris. Sur le site des Quais ces flux sont moins prédictibles du fait de perturbations des signaux par temps sec dues à la présence d'une usine de pompage et d'apports externes variables et non connus. Aussi la contribution du réseau pour Paris sera limitée au site de Clichy pour les 88 événements pluvieux identifiés en 2006 sur ce site.

Ces résultats seront confrontés à ceux d'un calcul analogue de la contribution des eaux usées à l'échelle de l'événement mené par (Metadier and Bertrand-Krajewski, 2011a) sur le site d'Ecully à Lyon.

2.2 Bilan et simulation

Pour évaluer la contribution des trois sources présentées en §1 aux flux de MES à l'échelle de l'événement, une approche de bilan de masse entre l'entrée et la sortie du réseau de chaque bassin versant a été réalisée.

L'équation de bilan de masse utilisée pour calculer la masse M_{Stock} de l'échange avec les stocks des dépôts existants dans le réseau :

$$M_{Stock} = M_{exit} - M_{EU} - M_{Ruiss}$$

Avec :

M_{exut} : Masse totale mesurée à l'exutoire du bassin-versant, au cours de l'événement pluvieux ;

M_{EU} : Masse des eaux usées passées pendant l'événement pluvieux, à l'exutoire de l'événement pluvieux ;

M_{Ruiss} : Masse apportée par les eaux de ruissellement.

La Figure 144 illustre la méthode de calcul de bilan massique entrée-sortie utilisée. Le calcul de chacune de trois masses est détaillé ci-dessous.

Certaines concentrations sont évaluées à partir des mesures de turbidité converties en MES: il s'agit des concentrations des eaux usées et des concentrations à l'exutoire (cf. partie III). D'autres sont issues de données bibliographiques et des résultats d'analyses exprimées directement en MES (cf. Chapitre 9).

Dans la suite, toutes les masses seront alors calculées en Kg et les volumes en m^3 .

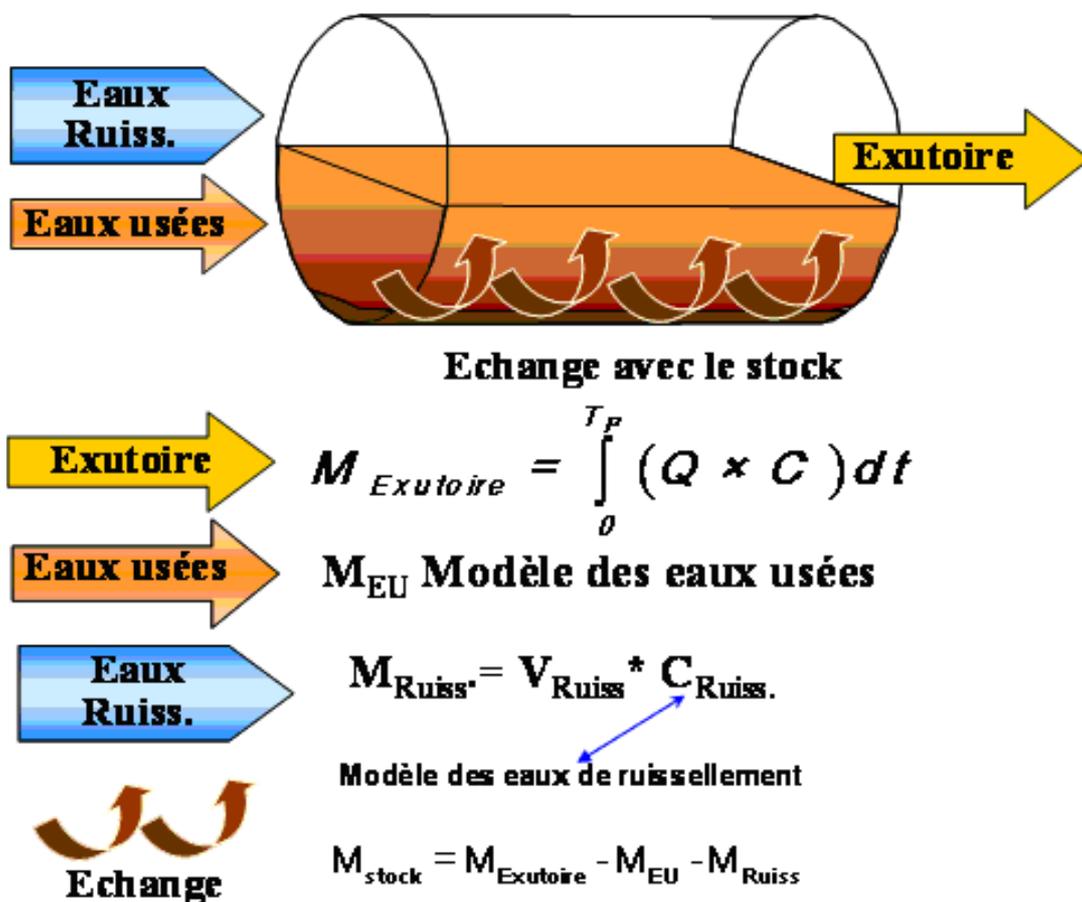


Figure 144 :Méthode de calcul bilan massique entrée – sortie

2.2.1 Bilans hydraulique et massique sur le site de Clichy

2.2.1.1 Volume et masse mesurés à l'exutoire

Les volumes des événements pluvieux à l'exutoire V_{Exut} ont été déjà évalués dans le chapitre 7 par une simple intégrale avec un calcul d'incertitudes associées.

Sur le site de Clichy, nous disposons par temps sec et par temps de pluie des mesures en continu de la turbidité au pas de temps d'une minute. Mais nous ne disposons pas d'une relation de conversion de la turbidité en MES spécifique au site de Clichy : nous utilisons les données MES-Turbidité de sites Nantais, Cordon Bleu (CB) et Saint-Mihiel (SM), qui ont été agrégés car la variabilité des relations MES-turbidité entre ces deux sites est négligeable. L'impact potentiel de cette transposition des données de Nantes au site parisien sera examiné lors de la discussion des résultats.

A partir de ces données, deux approches ont été mises pour évaluer la masse des MES à l'exutoire : (a) la première approche **A1** consiste à utiliser une relation unique de données de CB et SM en introduisant les erreurs de mesure de la turbidité, les erreurs de mesure de la concentration en MES et les erreurs résiduelles de la relation MES-Turbidité, (b) la deuxième approche **A2** consiste à utiliser une relation $MES = a \times T$ avec une pente a distribuée suivant une loi lognormale et en tenant également compte des incertitudes de mesures (la pente est constante lors d'un événement pluvieux, cf. chapitre 6). Pour chaque approche, nous calculons une distribution des valeurs de M_{exut} . La variabilité de M_{exut} dans cette distribution, pour un événement pluvieux donné, est due à la variabilité de la relation MES-Turbidité et aux incertitudes de mesure de turbidité, de la concentration en MES et du débit.

2.2.1.2 Volume et masse des eaux usées

En faisant l'hypothèse que les flux apportés par les eaux usées pendant l'événement pluvieux ne diffèrent en rien des flux observés dans les mêmes conditions (heure, jour saison) en temps sec, le volume V_{EU} et la masse M_{EU} des eaux usées seront évalués en utilisant le modèle stochastique des eaux usées de temps sec développé dans le Chapitre 8. Pour un événement pluvieux donné ce modèle fournit un ensemble de profils de débits et de flux de turbidité des eaux usées. À partir de ces profils on détermine la distribution de V_{EU} et de M_{EU} . La

variabilité de ce volume et cette masse est due à la variabilité des profils des eaux usées qui pourraient avoir contribué à cet événement pluvieux. Si l'événement pluvieux s'étend sur plus d'une journée les modèles de profils journaliers seront enchainés en tenant compte de la corrélation entre l'heure h_{24} et l'heure h_1 de deux jours de temps sec successifs (qui est de l'ordre de 0,6 pour le débit et pour le flux).

2.2.1.3 Volume et masse des eaux de ruissellement

a) Volume moyen événementiel d'eaux de ruissellement

Le volume d'eaux de ruissellement V_{Ruiss} produit par un bassin versant peut être estimé soit à partir de la hauteur d'eau moyenne précipitée H_{moy} sur le bassin versant, de la surface du bassin versant S_{BV} et de son coefficient de ruissellement moyen C_{BV} ou à partir d'un bilan faisant intervenir le volume V_{Exut} de l'événement pluvieux mesuré à l'exutoire du bassin versant, le volume V_{EU} des eaux usées produites par le bassin versant pendant la durée de l'événement pluvieux, les volumes V_{DO} déversés au niveau des différents déversoirs au cours de l'événement et les volumes V_{mail} passés au niveau des maillages entre bassins versants pendant la durée de l'événement pluvieux. Ces deux derniers volumes sont mal connus et ils sont plus importants par temps de pluie. Nous ne disposons d'aucune information sur ces deux contributions durant l'année 2006 sur le site de Clichy. Ces volumes ont été négligés.

Le volume ruisselé peut être calculé par :

$$V_{1\text{ Ruiss}} \approx C_{BV} \times S_{BV} \times H_{moy} \text{ ou}$$

$$V_{2\text{ Ruiss}} = V_{Exut} - (V_{EU} - V_{DO} \pm V_{mail}) \approx V_{exut} - V_{EU}$$

Dans la suite, nous utilisons le bilan à l'exutoire pour estimer le volume d'eaux de ruissellement $V_{1\text{ Ruiss}}$ car nous ne disposons pas d'une mesure précise de la hauteur d'eau tombée sur la surface du bassin versant de Clichy. Cependant nous comparerons ce volume au volume calculé à partir de la hauteur d'eau mesurée sur le pluviomètre Jules-Ferry à coté du point de mesure sur le site de Clichy et au volume estimé par la conductivité.

Donc, le volume des eaux de ruissellement V_{Ruiss} présente pour chaque événement pluvieux une distribution des valeurs qui est due aux incertitudes de mesures à la variabilité de l'hydrogramme d'eaux usées estimé durant cet événement par le modèle eaux usées.

b) Masse moyenne événementielle en MES dans les eaux de ruissellement

Pour chaque événement pluvieux nous avons calculé une distribution de la masse moyenne événementielle en MES des eaux de ruissellement M_{Ruiss} . Cette distribution de M_{Ruiss} est obtenue par le produit de la distribution du volume V_{Ruiss} et de celle de la concentration moyenne événementielle en MES C_{Ruiss} . La concentration C_{Ruiss} est simulée à partir du modèle de concentration des eaux de ruissellement du site de Clichy développé dans le chapitre précédent (*cf. Chapitre 9*). Cette distribution reflète la gamme des valeurs possibles compte tenu de l'absence de mesures de la quantité et de la concentration les eaux de ruissellement à l'entrée du réseau d'assainissement du bassin versant pendant les événements pluvieux. Elle intègre également les erreurs de mesure.

2.2.2 Bilans hydraulique et massique sur le site d'Ecully

La méthode utilisée pour évaluer la contribution du stock des dépôts en réseau d'Ecully est la même que celle utilisée à Clichy par un bilan hydraulique à l'exutoire pour le volume et un bilan massique pour les masses. Les volumes et les masses événementiels mesurés à l'exutoire de ce site ainsi que ceux du temps sec ont été évalués par (Métadier, 2011). Pour les flux de temps sec, la méthode présentée dans (Metadier and Bertrand-Krajewski, 2011a) repose sur la recherche du jour du temps sec le plus vraisemblable possible par rapport aux signaux du débit et de turbidité juste avant et après l'événement pluvieux (*cf. § Chapitre 8.4.5.2*). Elle permet d'évaluer les masses et les volumes et les incertitudes associées. Pour traduire ces incertitudes en distribution et conduire les simulations nous avons supposé que ces masses, les volumes sont distribués normalement (ce qui a été vérifié sur le site de Clichy).

Le modèle de concentration moyenne événementielle en MES des eaux de ruissellement dérivé à partir des résultats obtenus sur le site du Marais et des données bibliographiques (*cf. § Chapitre 9.4*) est utilisé pour évaluer la masse moyenne événementielle en MES des eaux

de ruissellement. Cette masse est évaluée par un calcul analogue à celui de Clichy présenté dans le paragraphe précédent.

2.2.3 Originalité et limite de la méthode utilisée

L'originalité de la méthode utilisée dans le cadre de cette thèse réside dans l'évaluation de la variabilité des sources EU et ER et de l'évaluation des incertitudes associées suivant une approche statistique qui tient compte de toutes sources d'incertitudes et de variabilités qui peuvent influencer la contribution du réseau notamment sur le site de Clichy. De plus la taille de la base de données dont nous disposons doit permettre d'obtenir une bonne estimation de la contribution moyenne du *stock*, et de conduire une première analyse des facteurs de variabilité à l'échelle interévénementielle. Il convient cependant de souligner certaines limites de cette méthode, liées à ses hypothèses :

1. Les relations utilisées pour convertir la turbidité en MES pour le site de Clichy ne sont pas spécifiques à ce site : cette hypothèse est liée à l'utilisation de mesures de turbidité sans analyses de calibration propres au site. Elle n'est pas classique, mais certains auteurs attribuent les différences entre les relations publiées dans la littérature à des différences dans le protocole de mesure de la turbidité (Bertrand Krajewski *et al.*, 2010; Ruban *et al.*, 2010). Dans notre cas les mêmes protocoles ont été utilisés à Paris et à Nantes, et la pertinence de cette hypothèse sera discutée.
2. La contribution des eaux usées de temps sec aux flux observés à l'exutoire lors d'un événement pluvieux est la même que si cet événement pluvieux n'avait pas eu lieu : cette hypothèse a été posée pour toutes les études antérieures ;
3. Les données échantillonnées sur un autre site (le Marais) sont représentatives de la distribution des concentrations en MES des eaux de ruissellement sur le site de Clichy. De même pour Ecully on peut transposer les données de la littérature et la distribution des données du Marais.

2.3 Résultats

2.3.1 Comparaison des volumes ruisselés estimés et des hauteurs précipitées

La *Figure 145* illustre les volumes événementiels des eaux de ruissellement V_{2Ruiss} calculés à partir d'un bilan à l'exutoire en fonction de V_{1Ruiss} ceux calculés à partir de la hauteur précipitée H pour les sites de Clichy et d'Ecully.

Nous observons sur la *Figure 145 (a)* que pour les faibles volumes à Clichy les points se trouvent autour de la première bissectrice, tandis que pour les volumes plus élevés, les volumes estimés à partir du bilan à l'exutoire sont plus grands que ceux estimés à partir de la hauteur H . Ceci peut être dû à plusieurs facteurs : soit la hauteur H obtenue par le pluviomètre de Jules-Ferry sous-estime la hauteur moyenne précipitée sur la surface du bassin versant (pluie hétérogène), soit encore C_{BV} est plus élevé pour les fortes pluies (ce qui est généralement le cas), soit les volumes V_{mail} passés au niveau des maillages entre bassins versants pendant la durée de l'événement pluvieux n'est pas négligeable.

On retrouve sur le site d'Ecully (*Figure 145 (b)*) des volumes ruisselés en moyenne supérieurs à ce qui est estimé à partir du coefficient d'imperméabilisation, mais le nombre d'événements est plus réduit, et un seul événement présentant un volume ruisselé important pèse fortement dans le ratio. Si on enlève cet événement, la pente de la droite forcée à l'origine entre $V_{1\text{ Ruiss}}$ et $V_{2\text{ Ruiss}}$ sera $1,05$ et le R^2 vaut $0,93$.

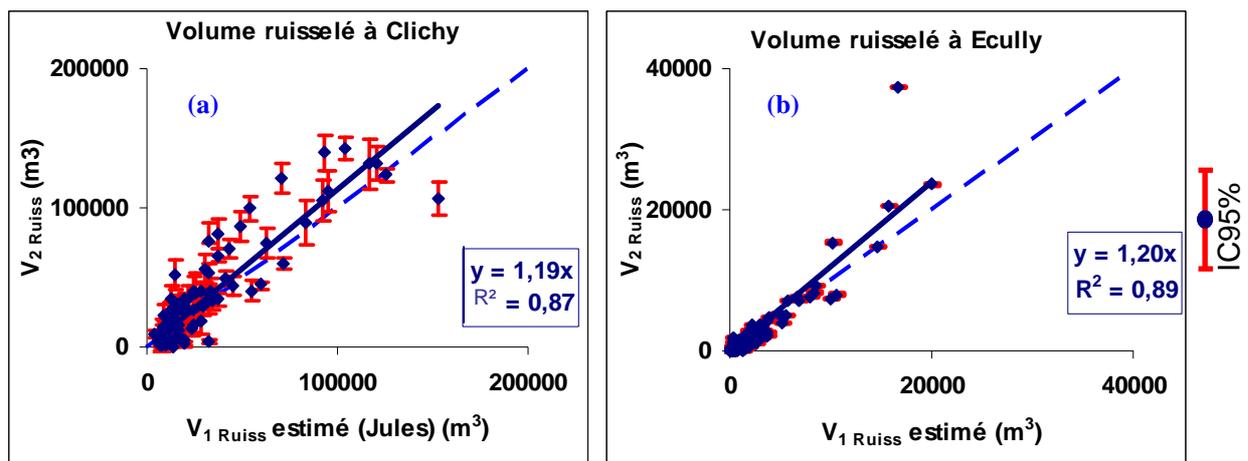


Figure 145 : Relation entre $V_{1\text{ Ruiss}}$ le volume estimé à partir de la hauteur précipité H et $V_{2\text{ Ruiss}}$ le volume estimé à partir d'un bilan à l'exutoire sur le site de Clichy et sur le site d'Ecully

2.3.2 Vérification de $V_{2\text{ Ruiss}}$ par la méthode de conductivité

Afin de vérifier l'origine de la différence entre les volumes évalués par un bilan hydraulique et les volumes évalués à partir de la hauteur précipitée H sur le site de Clichy, nous utilisons la méthode de conductivité proposée par (Kafi-Benyahia *et al.*, 2006b) pour évaluer la proportion d'eaux usées contenue dans l'effluent au cours de l'événement pluvieux

$\left(\% \frac{V_{EU}}{V_{exut}} \right)$, à partir de la conductivité moyenne de l'effluent de temps de pluie (dont la

mesure en continu est disponible à Clichy), K_{exut} , celle mesurée pour les eaux usées K_{EU} (moyenne journalière ~ 950 à $1250 \mu S/cm$) et celle estimée pour les eaux de ruissellement du Marais K_{Ruiss} (moyenne événementielle de 56 à $141 \mu S/cm \ll K_{EU}$). Supposons que K_{EU} et K_{Ruiss} sont constantes au cours de la pluie et que la conductivité des eaux de ruissellement du Marais est représentative de celle des eaux de ruissellement du Clichy. La formule de dilution du mélange eaux usées + eaux pluviales donne :

$$K_{exut} = \frac{K_{EU} \times V_{EU} + K_{Ruiss} \times V_{Ruiss}}{V_{tot}} \Rightarrow \boxed{\frac{V_{EU}}{V_{tot}} = \frac{K_{exut} - K_{Ruiss}}{K_{EU} - K_{Ruiss}}}$$

La proportion $\% \frac{V_{EU}}{V_{exut}}$ est estimée pour tous les événements pluvieux afin de savoir l'origine de la différence observée sur la *Figure 145, (a)*. En outre, nous supposons que :

- ✓ K_{Ruiss} suit une distribution normale de moyenne $\overline{K_{Ruiss}} = 100 \mu S/cm$ et de coefficient de variation $Cv_{Ruiss} = 20\%$ (IC95% : 60-140 $\mu S/cm$);
- ✓ K_{EU} suit une distribution normale de moyenne $\overline{K_{EU}} = 1100 \mu S/cm$ et de coefficient de variation $Cv_{EU} = 10\%$ (IC95% : 900-1300 $\mu S/cm$);
- ✓ K_{exut} suit une distribution normale de moyenne $\overline{K_{exut}}$ et de coefficient de variation Cv_{exut} . $\overline{K_{exut}}$ est la conductivité estimée pour l'événement correspondant à partir de mesure en continu de la conductivité et du débit au point de mesure à Clichy. La valeur $\overline{K_{exut}}$ est estimée à partir d'un seul signal de conductivité qui pourrait être entâché d'incertitudes, pour cela nous avons choisi $Cv_{exut} = 10\%$;

Ces trois distributions permettent de simuler la distribution de la proportion $\% \frac{V_{EU}}{V_{exut}}$ en utilisant la méthode de Monte-Carlo. L'intervalle de confiance à 95% de cette proportion sera ensuite comparé avec celui obtenu par le bilan hydraulique.

La *Figure 146* illustre les résultats obtenus de proportions $\% \frac{V_{EU}}{V_{exut}}$ ainsi leurs intervalles de confiances à 95% (IC95). Les valeurs moyennes à l'échelle de l'événement pluvieux attestent

que les proportions d'eaux usées calculées par la méthode de bilan à l'exutoire sont généralement cohérentes avec celles estimées à partir de la conductivité. En effet, les $IC_{95\%}$ se recouvrent pour tous les événements pluvieux. Donc, nous ne pouvons pas conclure sur la principale raison de la différence entre le volume $V_{2\text{ Ruiss}}$ estimé par un bilan à l'exutoire et V_{IRuiss} estimé par la seule mesure précipitation dont on dispose.

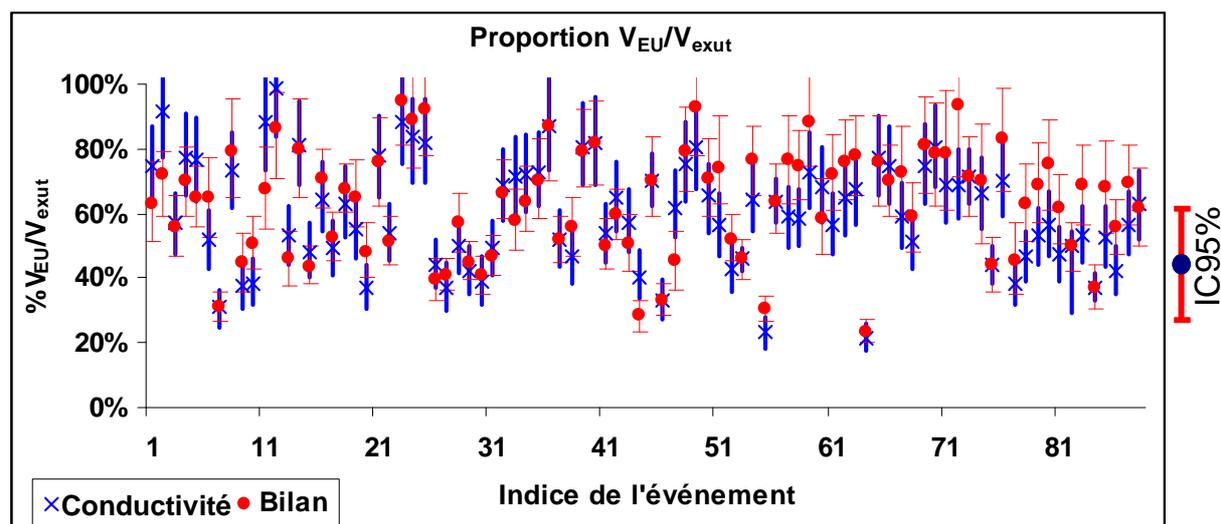


Figure 146 : Proportions V_{EU}/V_{exut} des événements pluvieux estimées par deux méthodes : bilan hydraulique à l'exutoire et méthode de conductivité (les barres représentent les $IC_{95\%}$ calculés par la méthode de Monte Carlo)

Dans la suite du chapitre, nous utilisons le volume $V_{2\text{ Ruiss}}$ estimé par le bilan hydraulique comme une estimation du volume d'eaux ruisselées sur la surface du bassin versant de Clichy. Ce volume sera noté V_{Ruiss} .

2.3.3 Contribution de différentes sources aux volumes d'eaux

2.3.3.1 Un événement

Les Figure 147 (a) et (b) illustrent les distributions des volumes V_{exut} , V_{EU} et V_{Ruiss} pour l'événement 01/01/2006 à Clichy et l'événement 2/4/2008 à Ecully. Les distributions des volumes V_{EU} et V_{Ruiss} sur le site de Clichy présentent une variabilité plus importante que celle des volumes à Ecully à cause de la variabilité des profils des eaux usées estimés par le modèle « Eaux usées ». L'incertitude de mesure de débit ne pèse pas beaucoup sur cette variabilité car les erreurs successives sont supposées non corrélées. Ces distributions nous permettent de

donner une valeur moyenne de la contribution de chaque source et un intervalle de confiance à 95% pour chaque événement pluvieux

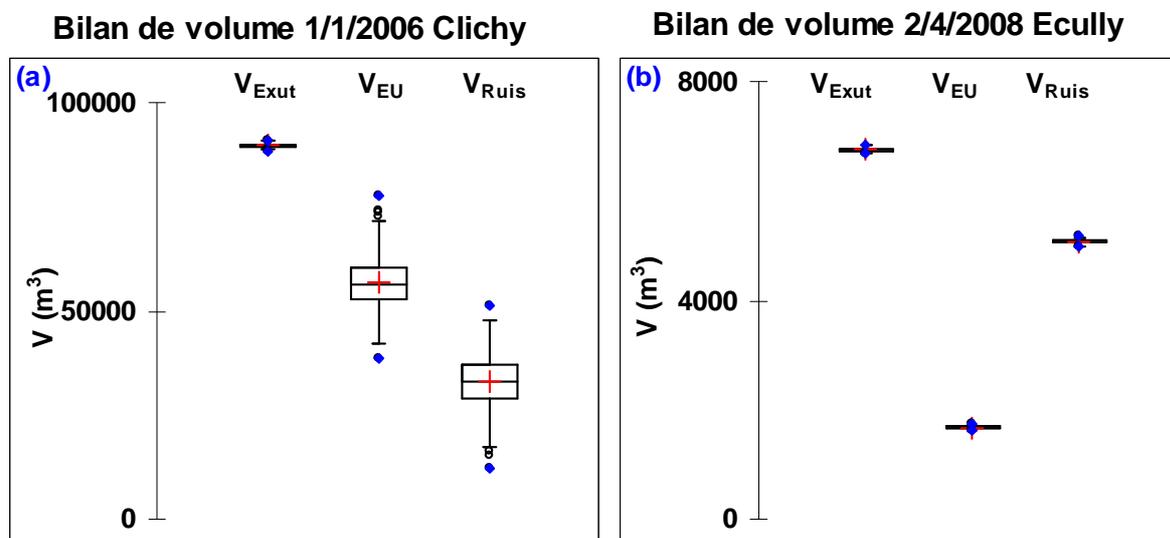


Figure 147 : Bilans de volume pour l'événement 01/01/2006 au site de Clichy (a) et l'événement 2/4/2008 au site d'Ecully

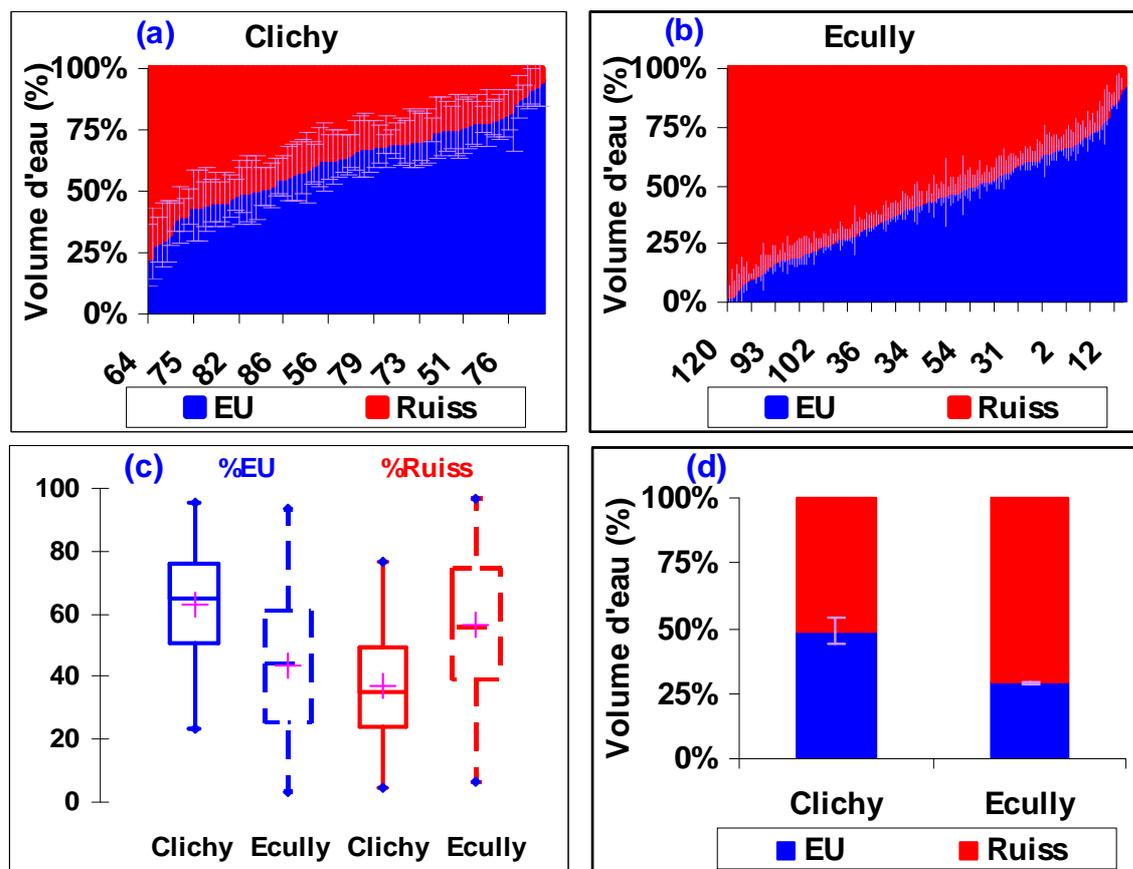


Figure 148 : Contribution en somme, des eaux usées et des eaux de ruissellement au volume total : (a) et (b) à l'échelle de l'événement à Clichy et Ecully respectivement (triés par ordre croissant), (c) Boîtes à moustaches de contributions moyennes événementielles ; (d) à l'échelle de tous les événements ; Les barres représentent les IC95%

2.3.3.2 Tous les événements

Les eaux usées génèrent une fraction non négligeable au volume total de l'événement pluvieux ((boîte : Q_{25} - Q_{75}) 50-80% à Clichy et 20-60% à Ecully) (*Figure 148, (a) et (b), (c)*). À l'échelle de tous les événements, les eaux usées représentent $49 \pm 3\%$ du volume total à l'exutoire en somme des volumes des événements pluvieux à Clichy et $29 \pm 0.5\%$ du volume total à l'exutoire d'Ecully (*Figure 148, (d)*).

2.3.4 Contribution de différentes sources aux flux de MES

2.3.4.1 Un événement

Événement 1 le 01/01/2006 Clichy

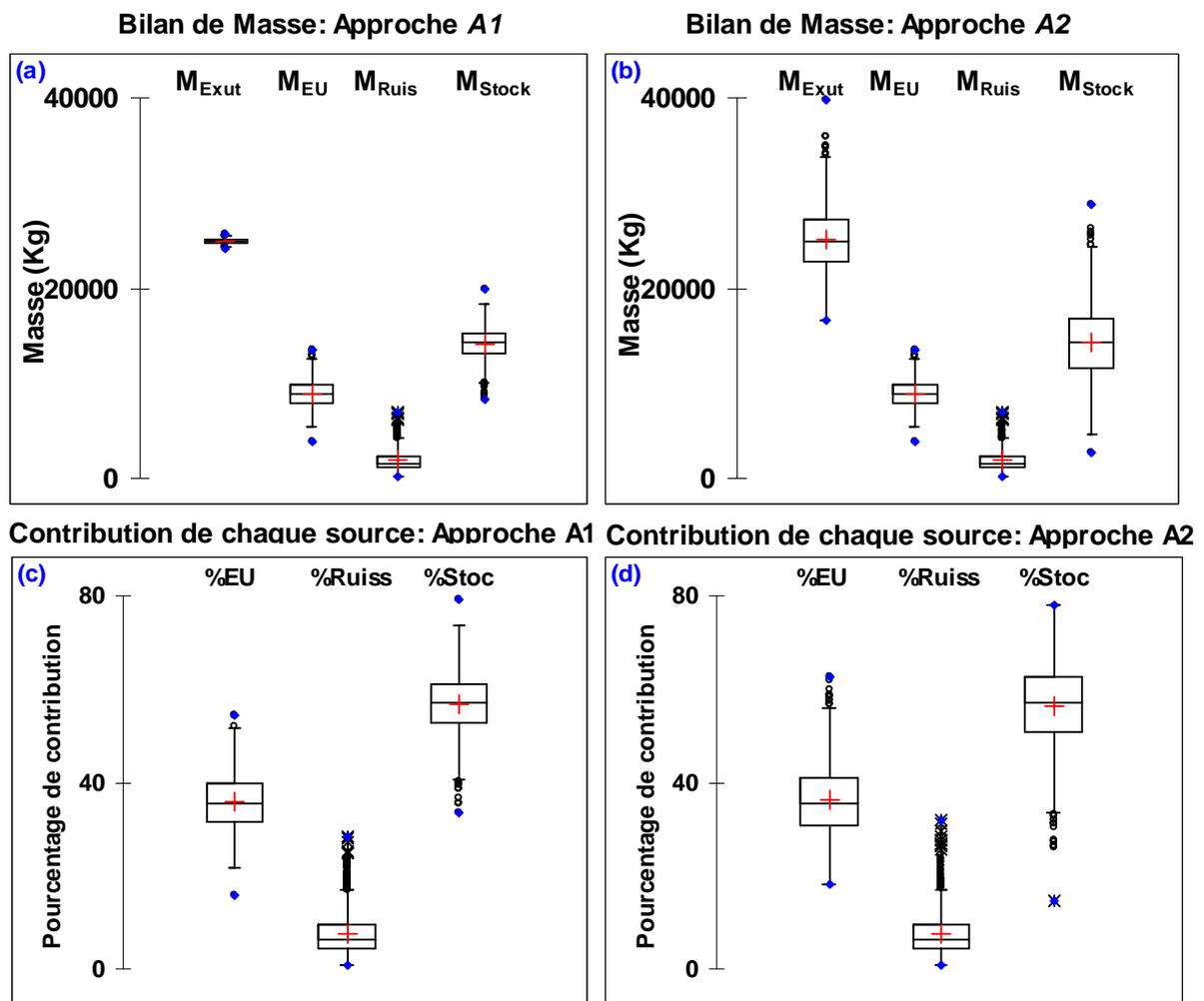


Figure 149 : (a) (b) : Bilan massique pour les deux approches A1 et A2 de calcul de la masse totale pour l'événement 01/01/2006 au site de Clichy ; (c) et (d) : pourcentage de contribution de chaque source à la masse totale de cet événement calculée par deux approches

Les *Figure 149* et *Figure 150* illustrent les distributions de la contribution chaque source au flux événementiel de MES pour deux événements pluvieux (événement du 01/01/2006 à Clichy et événement du 02/04/2008 à Ecully).

Les *Figure 149*, (a) et (b) illustrent le bilan de masse de l'événement 01/01/2006 à Clichy en fonction des approches utilisées pour évaluer la masse des MES à l'exutoire : l'approche A1 (relation MES-Turbidité unique) sous-estime les incertitudes de la masse M_{exut} dues à la variabilité des relations MES-Turbidité, tandis que l'approche A2 (Relation MES-Turbidité variable) prend en compte cette variabilité. Celle-ci se répercute intégralement sur la contribution M_{Stoc} du fait de son évaluation par différence, mais les valeurs moyennes données par les deux approches sont presque les mêmes.

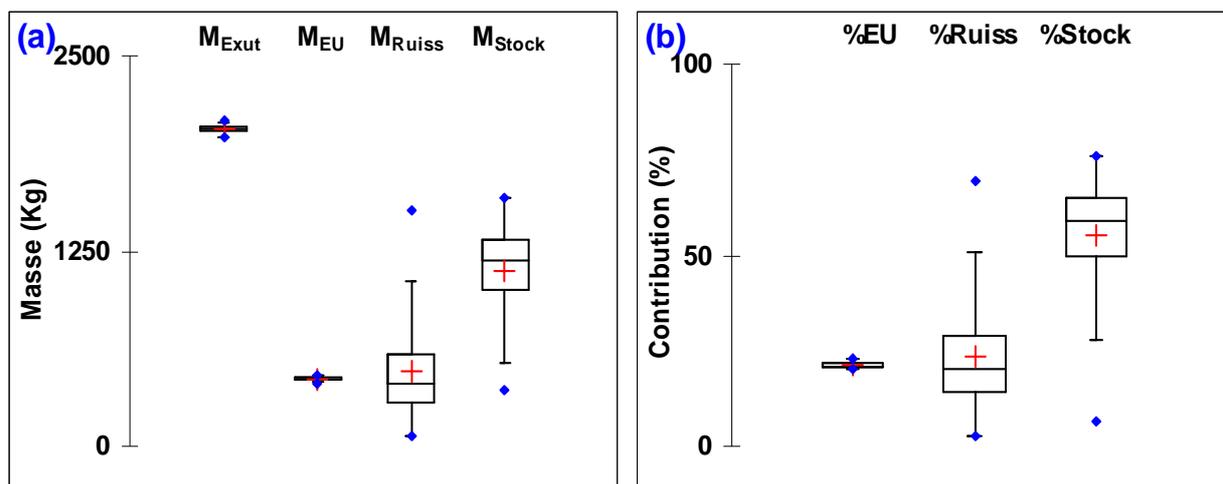


Figure 150 : (a) : Bilan massique pour l'événement 02/04/2008 au site d'Ecully ; (b) et pourcentage de contribution de chaque source à la masse totale de cet événement

À Ecully (*Figure 150*, (a)), les masses M_{exut} et M_{EU} ont une variabilité négligeable devant la variabilité de M_{Ruiss} et M_{Stoc} car les incertitudes de ces masses évaluées par (Metadier and Bertrand-Krajewski, 2011a, b) étaient très faibles par rapport aux incertitudes trouvées à Clichy. La variabilité de M_{Ruiss} et M_{Stoc} est due à celle de la concentration C_{Ruiss} estimée par le modèle de la concentration de ruissellement. Les *Figure 149* (c), (d) et *Figure 150*, (b) illustrent les pourcentages de contributions de chacune de trois sources aux flux événementielle de MES de l'événement pluvieux. Pour chaque événement pluvieux, ces contributions seront représentées dans la suite par leurs valeurs moyennes et les barres des intervalles de confiance empiriques à 95%.

2.3.4.2 Tous les événements

a) Contributions moyennes

La *Figure 151* illustre les boîtes à moustaches des contributions moyennes de chaque source sur les deux sites Clichy et Ecully.

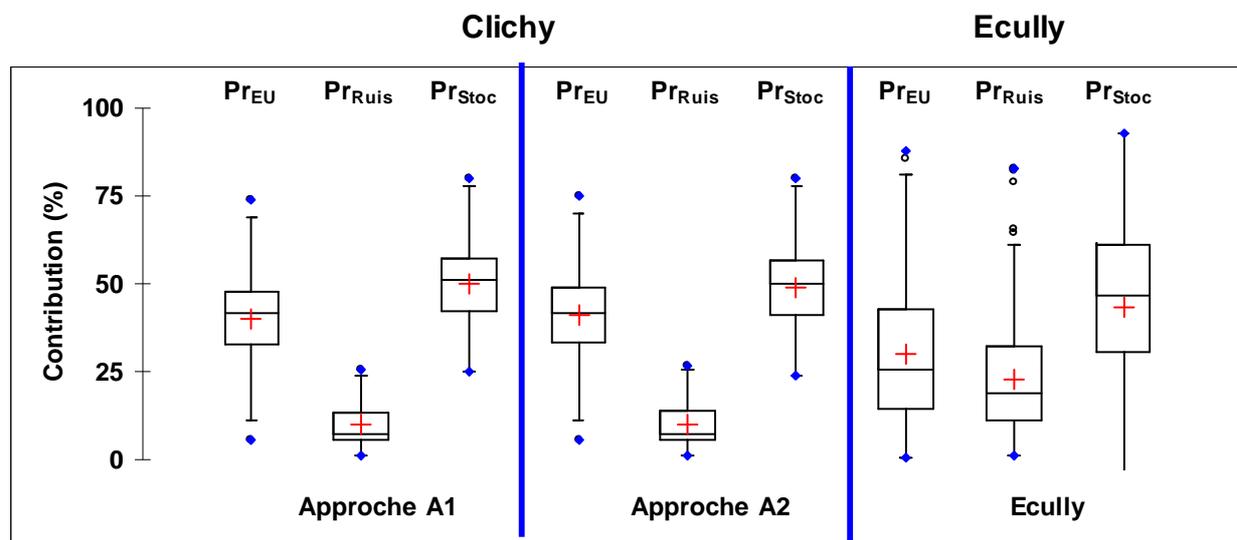


Figure 151 : Boîtes à moustaches de contribution moyenne de chaque source à la masse totale des événements pluvieux à Clichy calculée par deux approches et des événements pluvieux du site d'Ecully

À Clichy, les eaux usées s'avèrent une source principale. Elles génèrent à l'échelle de l'événement pluvieux entre 32 à 48 % (boîte : Q_{25} - Q_{75}) (*Figure 151, (a) et (b)*) de la masse de MES à Clichy que ce soit par l'approche A1 ou A2. Les eaux de ruissellement se distinguent par une contribution en masses de MES faible par rapport aux deux autres sources de MES : entre 7 et 13% (boîte : Q_{25} - Q_{75} , *Figure 151, (a) et (b)*). La mobilisation du stock constitue une source importante en MES. Elle génère entre 42 et 57%. De la masse événementielle Les valeurs hors boîtes ou les extrêmes varient entre 5 et 75% pour les eaux usées, 1 et 25% pour les eaux de ruissellement et entre 25 et 80% pour le stock des dépôts.

Ces résultats corroborent les résultats obtenus dans le cadre d'OPUR (phase 2) sur le même site (Kafi-Benyahia *et al.*, 2006a; Gasperi *et al.*, 2010) : En moyenne sur 15 événements : 50% de MES provenaient du réseau, et aussi ceux obtenus sur d'autres sites (Marais, Sébastopol, Quais, Coteaux, Clichy aval) et ceux obtenus par (Gromaire *et al.*, 2001) sur le bassin versant du Marais.

À Ecully (*Figure 151, (c)*), les contributions moyennes imputables aux eaux usées varient entre 11 et 43% (Q_{25} - Q_{75}), celles imputables aux eaux de ruissellement varient entre 11 et 32% et aux stocks de dépôts varient entre 30 et 62%. Ces résultats montrent que la contribution du stock n'est pas limitée à des réseaux spécifiques comme ceux de Paris (réseaux anciens, faible pente, collecteurs surdimensionnés et fortement encrassés), mais est également mise en évidence pour un réseau pentu et ne présentant pas de zones connues d'accumulation de stock (Métadier, 2011).

b) Variabilité et incertitude sur les différentes contributions

Les *Figure 152*, *Figure 153* et *Figure 154* illustrent les pourcentages de contributions des eaux usées, des eaux de ruissellement et des stocks de dépôts du réseau aux flux de MES à Clichy (Approche A1 *Figure 152*, Approche A2 *Figure 153*) et à Ecully (*Figure 154*) ainsi que leurs intervalles de confiance à 95%. L'objectif d'illustrer les IC95% est de voir si les contributions de réseau pourraient être nulles à cause de la variabilité des profils d'eaux usées, de la variabilité de la qualité et quantité des eaux de ruissellement et des incertitudes de mesures.

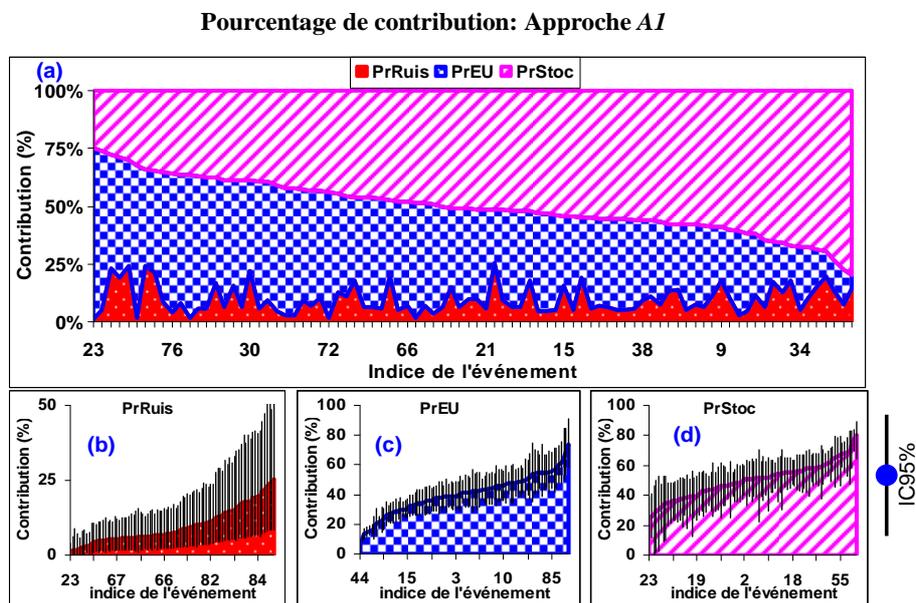


Figure 152 : (a) : Pourcentage de contribution de chaque source à la masse totale des événements pluvieux à Clichy pour l'approche A1 (Relation unique MES-Turbidité à partir des données aux sites de CB et SM) ; (b), (c) et (d) : pourcentage de contribution de chaque source classé par ordre croissant de contribution (moyenne \pm IC95%)

Selon l'approche A1 (une relation unique MES-Turbidité est utilisée pour évaluer la masse M_{exut} à Clichy), les IC95% pour tous les événements pluvieux ne contiennent pas le zéro et

par conséquent, nous pouvons conclure que le stock de dépôts contribue à la masse totale de tous les événements (*Figure 152*). Par contre, selon l'approche A2 (une relation MES-Turbidité variable est utilisée pour évaluer la masse M_{exut}), nous pouvons observer quelques événements pluvieux dont la contribution du stock pourrait être négligeable (6 événements ~7% des événements à Clichy) (*Figure 153*). Ces événements pluvieux sont des événements de faible volume dont la forme de l'hydrogramme est proche de celui de temps sec. En revanche pour 80% des événements la contribution du stock est supérieure à 20% avec un degré de confiance de 95%.

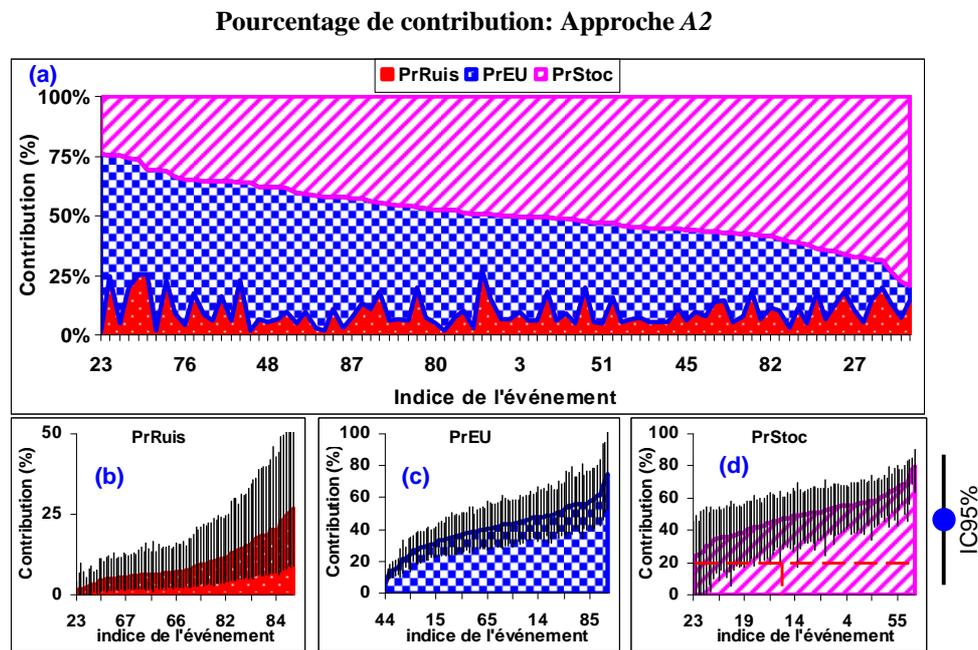


Figure 153 : (a) : Pourcentage de contribution de chaque source à la masse totale des événements pluvieux à Clichy pour l'approche A2 (Relation MES-Turbidité variable à partir des données aux sites de CB et SM) ; (b), (c) et (d) : pourcentage de contribution de chaque source classé par ordre croissant de contribution (moyenne \pm IC95%)

À Ecully (*Figure 154*), il y a aussi quelques événements pluvieux dont la contribution du réseau peut être négligeable (17% des événements). Cependant cette contribution dépend fortement du choix de paramètres de la distribution des C_{Ruiss} . (cf. §Chapitre 9.4).

En faisant une démarche inverse, c.à.d. en attribuant les masses non explicables par les eaux usées aux masses des eaux de ruissellement, nous pouvons calculer la concentration de ces

$$\text{eaux } C_{\text{NEU}} \text{ afin d'estimer sa distribution: } C_{\text{NEU}} = \frac{M_{\text{Exut}} - M_{\text{EU}}}{V_{\text{Ruiss}}}.$$

Pourcentage de contribution: Ecully

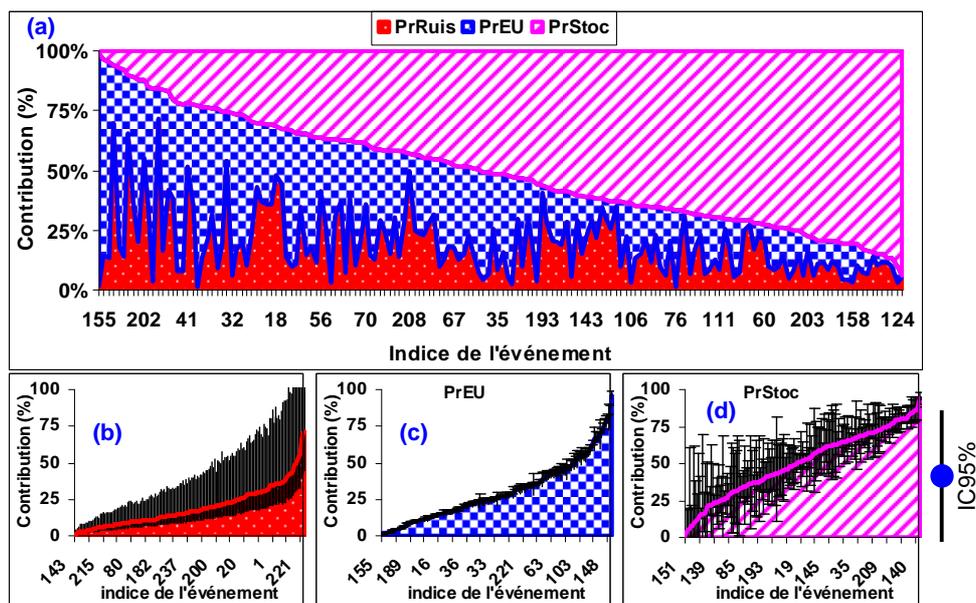


Figure 154 : (a) : Pourcentage de contribution de chaque source à la masse totale des événements pluvieux à Ecully (b), (c) et (d) : pourcentage de contribution de chaque source classé par ordre croissant de contribution (moyenne \pm IC 95%)

La Figure 155 illustre la fonction de répartition de C_{NEU} pour les sites de Clichy et d'Ecully. Ces distributions montrent qu'il faut avoir des concentrations énormes des eaux de ruissellement pour expliquer les masses M_{exut} par les eaux usées et les eaux de ruissellement. Par exemple, une concentration des eaux de ruissellement inférieure à 500 mg/l n'explique qu'environ 60% des événements à Clichy et à Ecully. Tandis que les concentrations moyennes événementielles observées atteignent rarement ces concentrations pour des sites dont les surfaces ressemblent aux surfaces de ces deux bassins versants.

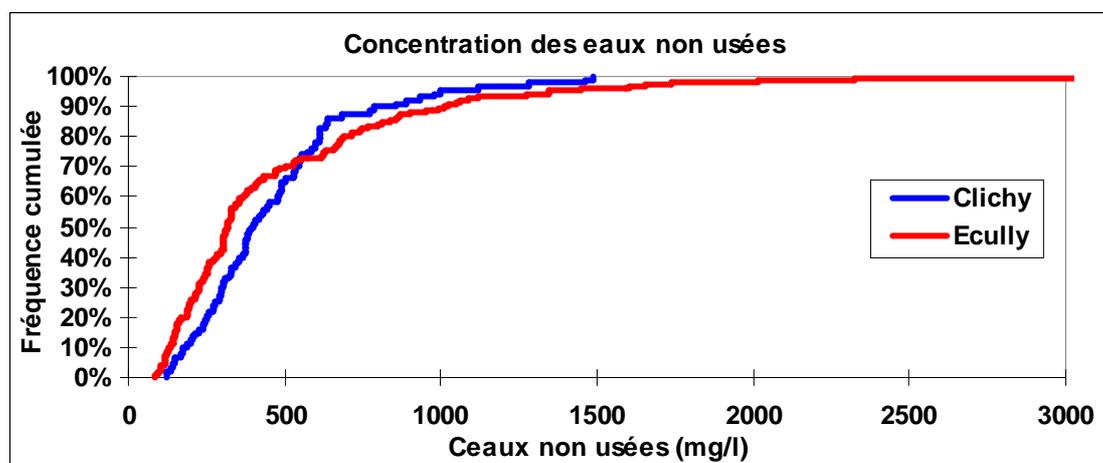


Figure 155 : Fonctions de répartitions des concentrations des eaux non usées attribuables aux eaux de ruissellement sur les sites de Clichy et Ecully

2.3.5 Conclusion

En conclusion, les calculs précédents corroborent les résultats similaires obtenus par d'autres études : la masse en MES transitée à l'exutoire pendant un événement pluvieux ne correspond pas à la somme des masses en provenance des eaux usées et des eaux de ruissellement, ces deux composantes étant chacune minoritaire. En effet, en moyenne plus de 45% des MES mesurées à l'exutoire de deux bassins versants proviennent de la mobilisation de stocks présents dans le réseau. Ils montrent aussi que cette contribution n'est pas spécifique au réseau parisien de faible pente et surdimensionné mais aussi elle est importante dans un réseau d'assainissement comme celui d'Ecully qui a une pente de 2.7% contre 0,14% pour le réseau de Clichy et il ne présente pas aussi de zones connues d'accumulation de sédiments.

Les résultats de contribution ont été illustrés pour les deux sites : Clichy et Ecully. L'étude de la sensibilité de contribution du stock et l'interprétation des résultats en fonction des caractéristiques des événements pluvieux seront étudiés ensuite uniquement pour le réseau de Clichy. Nous ne sommes pas allés plus loin dans l'interprétation des résultats du site d'Ecully à Lyon. Cette tâche sera une perspective pour les suites de notre travail.

2.3.6 Sensibilité de la contribution du réseau à Clichy

La contribution du stock en réseau sur le site de Clichy a été évaluée en fonction de plusieurs hypothèses :

1. Les relations MES-Turbidité du site de Clichy sont semblables aux celles du site Nantais (Cordon Bleu et Saint-Mihiel) que ce soit par temps sec ou par temps de pluie ;
2. Les eaux usées de temps de pluie ne diffèrent pas des eaux de temps sec ;
3. Les eaux de ruissellement par type de surface du site de Clichy ne diffèrent pas de celles de même type de surface du site du Marais.

Quant à l'incertitude sur cette contribution, elle a été évaluée en supposant qu'il n'y a pas de composante systématique dans les erreurs affectant du débit et de la turbidité au cours d'un événement pluvieux. c.à.d. nous avons supposé que les valeurs successives de ces erreurs sont non corrélées.

Il est évident que la contribution du stock des dépôts du réseau d'assainissement de Clichy est sensible à ces hypothèses. Mais quelle est la sensibilité de cette contribution à ces hypothèses ? Et comment nous pouvons évaluer cette sensibilité ?

La troisième hypothèse peut être admise car la surface du site de Clichy ne diffère pas de celle du Marais en termes d'occupation du sol (*cf. §Chapitre 9*). De plus les caractéristiques générales des événements pluvieux de l'année 2006 du site de Clichy ont même variabilité de celles des événements pluvieux mesurés par (Gromaire-Mertz, 1998) sur le site du Marais.

La sensibilité de trois autres hypothèses sera détaillée ci-dessous.

2.3.6.1 Effet des relations MES-Turbidité

Si nous appliquons les relations MES-Turbidité construites sur les sites Nantais pour évaluer les concentrations moyennes événementielles en MES (par temps de pluie) ou journalière (par temps sec) pour les chroniques des événements et des jours de temps sec acquises sur le site de Clichy à Paris, nous sous-estimons cette concentration que ce se soit par temps sec ou par temps de pluie comme on peut le constater en comparant ces résultats avec les résultats établis lors de campagnes de mesures ponctuelles dans le cadre du programme de recherche OPUR2 sur le même site (13 jour de temps sec et 16 événements pluvieux) (Gasperi *et al.*, 2006; Gasperi *et al.*, 2008b; Kafi-Benyahia *et al.*, 2008). Le *Tableau 41* illustre cette comparaison : les concentrations moyennes journalières de temps sec pour Clichy dans le cadre d'OPUR2 sont supérieures d'environ 30% à celles estimées à partir de la relation MES-Turbidité de temps sec de sites Nantais, tandis que celles de temps de pluie sont supérieure de ~11% à celles estimées à partir des relations MES-Turbidité de temps de pluie de sites Nantais.

Pour tenir compte de cette sous-estimation variable de la concentration en MES, nous proposons de modifier les relations MES-Turbidité pour le temps sec ainsi pour le temps de pluie. A cet effet nous majorons la pente des droites forcées à l'origine par le pourcentage de différence entre les valeurs obtenues et les valeurs mesurées dans le cadre d'OPUR2. Bien que cette correction soit estimée à partir de la concentration moyenne journalière ou événementielle, elle reste acceptable à l'échelle du jour ou de l'événement car la variabilité intrajournalière ou intraévénementielle de la pente a de la relation MES-Turbidité était faible.

Pour le temps sec, les variabilités intra et inter journées étaient très faibles. Donc, nous avons majoré la pente de la droite forcée à l'origine de 30 % afin de tenir compte de cette différence

par temps sec en supposant que l'écart-type résiduel des nuages des points autour de cette droite est majoré également de 30% (coefficient de variation constant).

Pour le temps de pluie, nous utilisons l'approche A2 qui consiste à utiliser la distribution de la pente a de la relation $MES = a \times T$. En effet la pente a est distribuée suivant une loi lognormale de moyenne \bar{a} et de coefficient de variation Cv_a . La nouvelle distribution de la pente a est supposée aussi distribuée suivant une loi lognormale de moyenne $1,11 \times \bar{a}$ et de même coefficient de variation Cv_a .

Tableau 41 : Comparaison des déciles journaliers et événementiels de temps sec et de temps de pluie de la concentration moyenne calculée à partir de la relation MES-Turbidité, avec des résultats de déciles journaliers et événementiels de temps sec et de temps de pluie de la concentration en MES issus du programme de recherche OPUR 2 (Gasperi *et al.*, 2006; Gasperi *et al.*, 2008b; Kafi-Benyahia *et al.*, 2008)

Décile	Temps sec			Temps de pluie			Boîtes à moustache (MES-T)
	Relation MES-T	OPUR	Rapport	Relation MES-T	OPUR	Rapport	
d_{10}	124	166	1,34	155	174	1,12	
d_{50}	146	189	1,29	227	250	1,10	
d_{90}	172	221	1,28	286	317	1,11	

Enfin, nous avons calculé les nouvelles contributions du réseau. Ces contributions sont comparées avec les contributions évaluées à partir des relations de sites Nantais (*Figure 156*). Le pourcentage de contribution du réseau diminue entre 0 (pour les plus fortes valeurs) et 10% (pour les plus faibles) par rapport à celui calculé en utilisant la relation MES-Turbidité de CB et SM. Ceci est dû à l'augmentation de la masse des eaux usées de l'ordre de 30% tandis que celle des eaux urbaines mesurées à l'exutoire ont augmenté de l'ordre de 11%. Mais la diminution de ce pourcentage n'affecte pas la distribution de pourcentage de contribution du stock. Les pourcentages de contribution des eaux usées ont augmenté environ du même pourcentage et ceux des eaux de ruissellement ont diminué (maximum 2%). Les largeurs des IC95% des pourcentages de contributions pour les deux approches sont très proches. Ainsi, le pourcentage des événements qui ont une faible contribution du stock ou négligeable (IC95% contient le zéro) devient 10% au lieu de 7% dans le cas l'approche A2 en utilisant des relations MES-Turbidité de CB et SM.

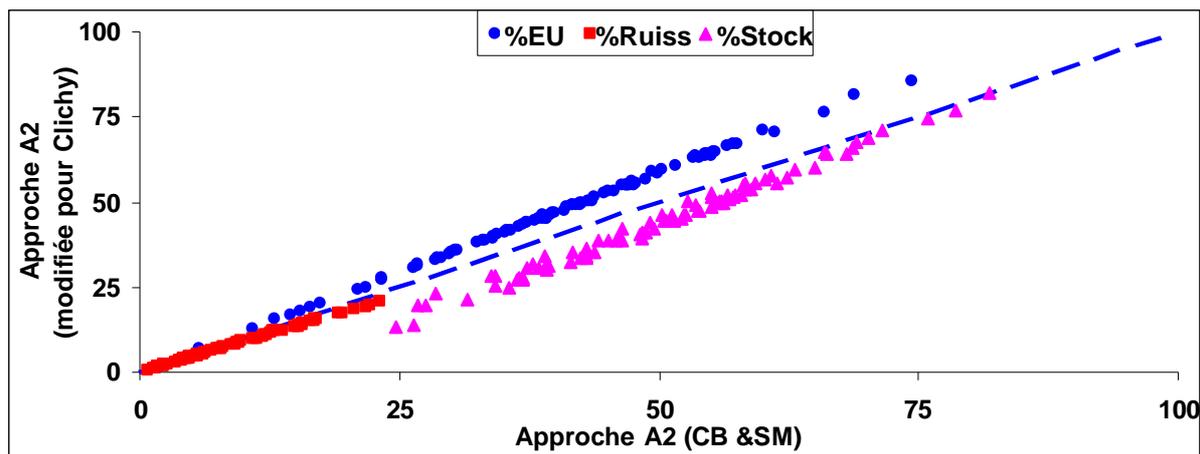


Figure 156 : Pourcentage de contribution des différentes sources à la masse événementielle en MES après correction de la relation MES-Turbidité (site de Clichy, un point par événement)

Distribution de la masse M_{Stoc} pour l'approche A2 :

La Figure 157 illustre les distributions de la masse moyenne imputable au stock en réseau pour le site de Clichy (Relation MES-T CB et SM ; relation MES-T modifiée pour Clichy) et sur le site d'Ecully. Les deux distributions sur le site de Clichy ne sont pas différentes au seuil de 5% (test de Mann-Whitney, valeur $p=77\%$) et aussi pour le même événement (test de Wilcoxon, valeur $p=13\%$). Mais elles sont différentes de celle du site d'Ecully. Le test d'ajustement de Kolmogorov montre que nous pouvons ajuster une distribution lognormale pour chacune de ces trois distributions.

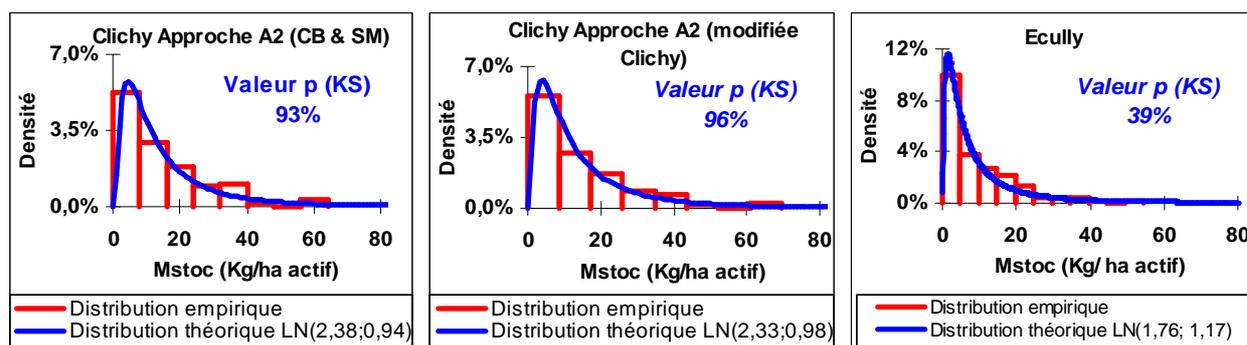


Figure 157 : Distribution théorique et empirique de la masse moyenne imputable au stock de dépôts sur le site de Clichy (Relation MES-T CB et SM ; relation MES-T modifiée pour Clichy) et sur Ecully. Les valeurs p correspondent aux valeurs p du test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov (KS)

2.3.6.2 Variations du flux d'eaux usées

L'hypothèse que les flux apportés par les eaux usées pendant les événements pluvieux ne diffèrent en rien des flux observés dans les mêmes conditions (heure, jour saison) en temps

sec pourrait être mise en défaut par les mêmes phénomènes que ceux qui provoquent la mobilisation de stocks lors des événements pluvieux. Les phénomènes d'accumulation / reprise affectant les MES sont liés aux variations de capacité de transport des effluents transités dans le réseau d'assainissement, et de telles variations se produisent au cours d'une journée de temps sec comme d'un événement pluvieux. Autrement dit les variations de débit entre la nuit et le jour en temps sec sont du même ordre que celles qui sont observées lors d'un événement pluvieux d'amplitude modérée (coefficient de variation $\approx 20\%$). Tout dépendra ensuite de la position de ces variations par rapport à des valeurs-seuil discriminant les conditions d'accumulation de celles de reprise.

Par ailleurs le stock mobilisé en temps de pluie doit être constitué à un moment donné, a priori plutôt en temps sec. Si on admet qu'il s'agit d'une accumulation directe de MES, l'accumulation de MES dans le réseau doit provoquer un déficit sur les flux observés en temps sec par rapport à la contribution réelle des eaux usées lors des événements pluvieux, où cette accumulation ne doit plus avoir lieu. Dans ce cas, le modèle stochastique d'eaux usées de temps sec utilisé sous-estimerait la masse apportée par les eaux usées de temps de pluie, et par voie de conséquence surestimerait la masse supposée due au stock de dépôts.

Pour estimer la sensibilité des résultats à ce phénomène, nous ajoutons aux eaux usées de temps de pluie la masse qui pourrait être due à cette sous-estimation.

Plusieurs hypothèses sont posées :

- ✚ À l'échelle annuelle : la masse accumulée par temps sec est égale à la masse reprise par temps de pluie : c.à.d. la somme des masses mobilisées en supposant qu'il n'y a pas de différence entre les eaux usées de temps sec et les eaux usées de temps de pluie est supposée égale à la masse sédimentée par temps sec pendant le temps de pluie :

$$\text{Masse sédimentée} = \sum_{\text{toutes les pluies}} M_{\text{reprise } i}$$

- ✚ Le phénomène d'accumulation ne peut se produire que par temps sec.

- ✚ L'accumulation par temps sec peut suivre plusieurs cinétiques:

1. La masse déposée MD est linéaire avec la durée de temps sec, c.à.d. la masse déposée à un instant t sera $MD(t) = K \times t + M_{ini}$ avec, M_{ini} la masse restant

dans le réseau d'assainissement après la pluie précédente et K le taux d'accumulation supposé constant. Le taux K sera calculé à partir de la première hypothèse en rapportant la masse totale mobilisée à la durée totale de temps sec. En effet, (Ahyerre and Chebbo, 2002) ont précisé le mode d'accumulation de la couche organique sur le Marais grâce à une série de prélèvements effectués à différents pas de temps (de 2 jours à 6 jours), durant des périodes de temps sec. Sur 6 jours, la couche s'accumule de façon linéaire avec un taux d'accumulation $K = 215 \text{ g} / \text{j} / \text{m}^2$ de dépôts. Les observations de (Oms *et al.*, 2005) réalisées sur le même site montrent des taux d'accumulation plus élevés et variables et elles ne permettent pas donc de conclure définitivement sur le taux d'accumulation de la couche organique ;

2. L'accumulation pourrait aussi se faire en fonction d'un débit seuil Q_0 : si le débit $Q > Q_0$ il y a de la mobilisation, tandis que si $Q < Q_0$ il y a de l'accumulation de particules. Les valeurs de Q_0 choisies sont $k \times Q_{\min}$ avec $k = 1.5$ et 2 et Q_{\min} débit minimum de l'hydrogramme des eaux usées simulé (donc il est variable avec les saisons). L'accumulation par temps sec en fonction des classes de vitesse de chute des particules issues des trois sources de polluants pourrait aussi être testée mais nous ne disposons pas d'une répartition de cette vitesse de chute (Gromaire *et al.*, 2001);
3. La masse déposée tend vers une limite que l'on appelle CS (Krejci *et al.*, 1987; Bertrand-Krajewski, 1992), capacité de stockage du réseau de Clichy en temps sec, par une relation exponentielle de type $MD(t) = CS \times (1 - e^{-SD \times t})$, avec SD le coefficient de sédimentation. Les coefficients CS , SD sont supposées constants. Ces coefficients et la masse initiale M_0 peuvent être calés à partir de la première hypothèse afin que la masse sédimentée par temps sec soit égale à la masse érodée par temps de pluie à l'échelle annuelle. Les paramètres CS et SD dépendent du réseau et de l'écoulement en réseau et leur capacité à stocker les masses déposées ;

Les calculs montrent que la première hypothèse d'accumulation proportionnelle au temps linéaire est celle qui a le plus d'impact sur le pourcentage de contribution du réseau, surtout

pour les événements ou cette contribution est faible. Dans la suite nous présentons seulement la première hypothèse de sédimentation.

La masse de stock sera calculée par : $M_{stock} = M_{Exut} - (M_{EU} + M_{ns} + M_{Ruiss})$

Avec M_{ns} la masse des eaux usées non sédimentée pendant l'événement. Elle est calculée en se basant sur les hypothèses de sédimentation linéaire par temps sec (Figure 158).

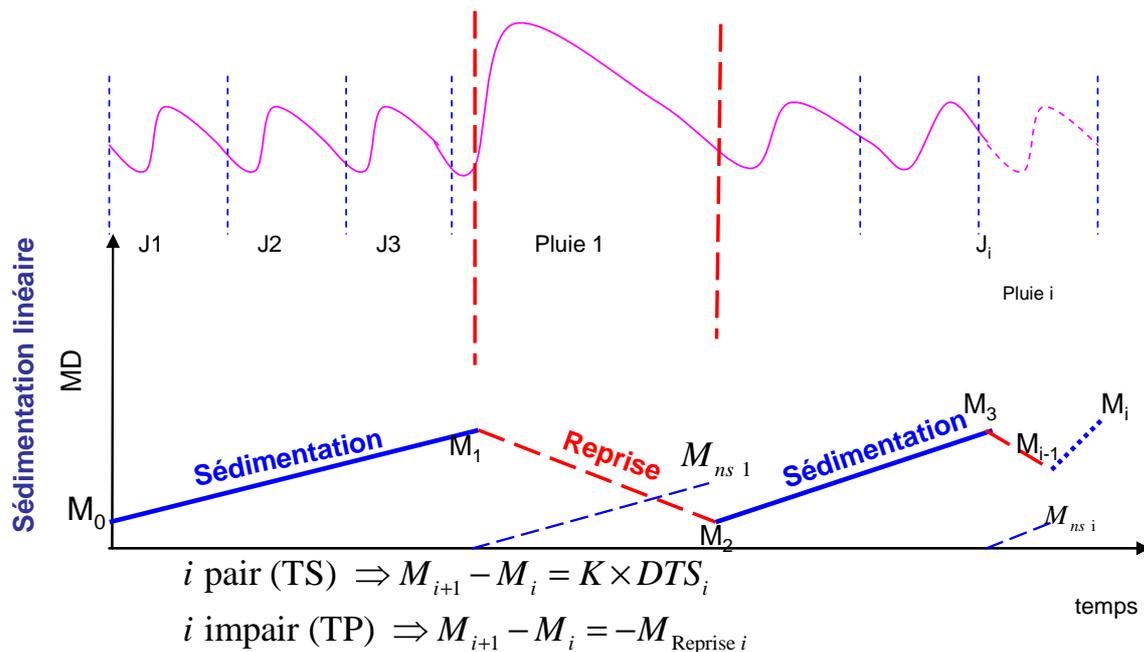


Figure 158 : Hypothèse de l'évolution de la masse déposée dans le réseau par temps sec

Selon la première hypothèse, le taux d'accumulation moyen annuel K est estimé à $K = 222 \pm 17 \text{ g} / \text{j} / \text{m}^2$ de dépôts dans le collecteur principal de Clichy. Il est très proche de celui observé par (Ahyerre and Chebbo, 2002) pour la couche organique du Marais ($215 \text{ g} / \text{j} / \text{m}^2$ de dépôts).

La déduction de la masse non sédimentée fait varier le pourcentage de contribution du réseau. La Figure 159 illustre les nouvelles contributions de chaque source avant et après soustraction de la masse sédimentée. Les pourcentages de contribution de stock ont été diminués de 5 à 10% tandis que celui des eaux usées ont été augmentés de même pourcentage. Les largeurs des IC95% sont très proches pour les deux calculs (sans et avec sédimentation). La moyenne de la distribution de pourcentage de contributions du stock pour tous les événements a

diminué de 5% : elle est égale à celle des eaux usées (45%) contre 50% pour *Stock* (40% pour *EU*) dans le calcul sans sédimentation.

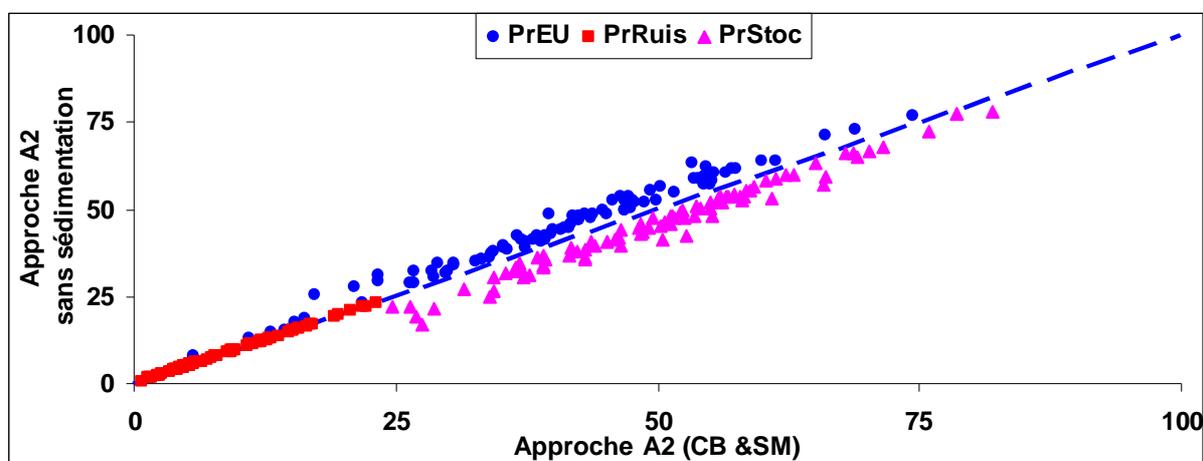


Figure 159 : Comparaison des contributions de chaque source après soustraction de la masse non sédimentée par les eaux usées

2.3.6.3 Effet des erreurs systématiques

Les valeurs successives du débit ou de la turbidité peuvent être entachées aussi par des incertitudes corrélées mais nous ne disposons pas d'une estimation de cette corrélation. La meilleure façon de résoudre ce problème est de majorer cette incertitude en prenant une corrélation $\rho=1$ entre les erreurs successives : c'est que l'on appelle l'erreur systématique. Différentes combinaisons peuvent être faites. En effet la masse de stock érodée est calculée par :

$$M_{\text{stock}} = M_{\text{Exut}} - M_{\text{EU}} - C_{\text{Ruis}} (V_{\text{Exut}} - V_{\text{EU}})$$

Ces masses peuvent être entachées d'une erreur systématique de $\pm X$ ou nulle. Par exemple, si le débit d'eaux usées est attaché d'une erreur de +10% et celui des eaux à l'exutoire n'est pas entaché d'erreur systématique (0%) alors la masse du stock érodée sera :

$$M_{\text{stock}} = A^0_{M_{\text{Exut}}} - B^+_{M_{\text{EU}}} - C_{\text{Ruis}} (A^0_{V_{\text{Exut}}} - B^+_{V_{\text{EU}}})$$

Avec $A^0_{V_{\text{Exut}}}$ (resp. $A^0_{M_{\text{Exut}}}$) le volume (resp. la masse) estimé à l'exutoire si le débit n'est pas entaché d'erreur systématique ; $B^+_{V_{\text{EU}}}$ (resp. $B^+_{M_{\text{EU}}}$) le volume d'eaux usées (resp. masse d'eaux usées) calculé en majorant le débit d'eaux usées de +10%. Il peut y avoir donc, 8 combinaisons possibles (Figure 160). Pour ces 8 combinaisons, nous comparons les

pourcentages de contribution du stock de dépôts obtenus avec ceux obtenus dans le cas des erreurs non corrélées (sans erreurs systématiques). Les résultats montrent que le pourcentage moyen de contribution du réseau n'est pas affecté par ces erreurs systématiques sauf pour quelques configurations (A^-B^+ , A^+B^+) et quelques événements. Les largeurs des IC95% sont plus grandes que ceux obtenus sans erreurs systématiques car les incertitudes des variables M_{exut} , M_{EU} et M_{Ruiss} sont plus grandes dans ce cas.

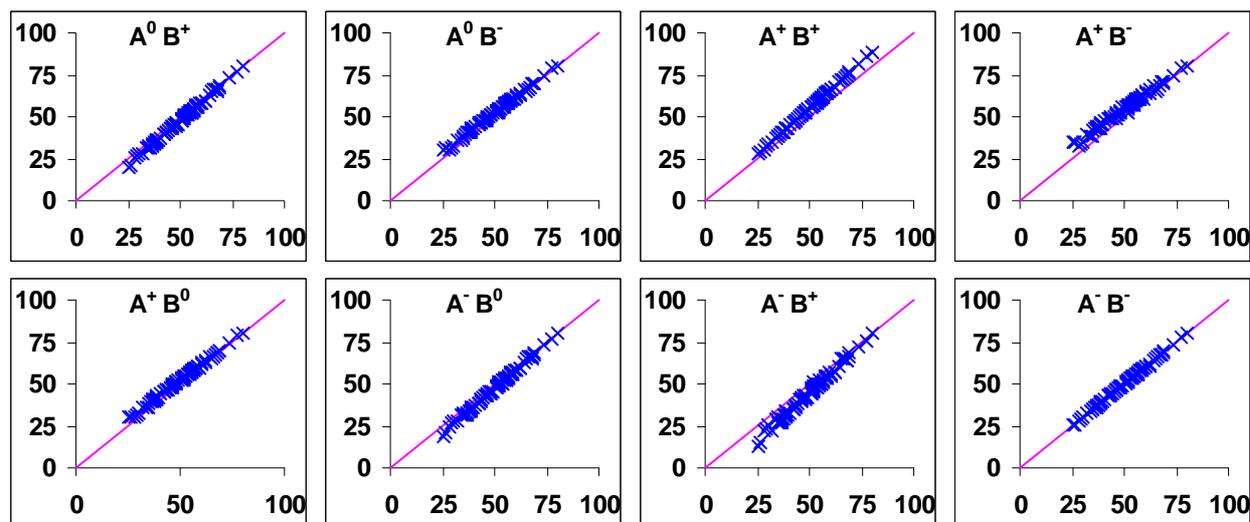


Figure 160 : Différentes combinaison du pourcentage de la contribution du réseau en fonction de celui calculé sans erreur systématiques

2.3.6.4 Conclusion

Toutes les études de sensibilité précédentes montrent que le pourcentage de la contribution du réseau n'est pas très affecté par les hypothèses qui ont été supposées pour faire le calcul de cette contribution. Elles montrent aussi que cette contribution reste la contribution majeure en MES que ce soit à l'échelle de l'événement pluvieux ou à l'échelle de tous les événements.

2.3.7 Interprétation en termes de localisation du stock sur le site de Clichy

Le bilan du site de Clichy montre que la contribution attribuable aux stocks du réseau est une source principale de pollution particulaire. Les masses importantes de MES issues des échanges avec le réseau d'assainissement unitaire sont principalement imputables à l'érosion des stocks présents dans le réseau en début de l'événement pluvieux. Selon (Ahyerre *et al.*, 2001), cette masse est due à une couche organique immobile située à l'interface eau-sédiment et qui a une épaisseur varie entre 1,5 cm à 7 cm selon les périodes d'observation. Les suivis à

l'endoscope d'un tronçon de collecteur sur le site du Marais par (Oms *et al.*, 2005; GROMMAIRE *et al.*, 2006) a permis d'observer une couche organique d'épaisseur variable de 2 cm à 15 cm. Ainsi, (Oms, 2003) a défini des critères nécessaires pour trouver des linéaires présentant des risques de présence de 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. Selon ces critères, (GROMMAIRE *et al.*, 2006) ont identifié les linéaires de collecteurs de Clichy qui présente un risque de présence de couche organique. La longueur identifiée représente 1343 m de la longueur totale des collecteurs de Clichy (14%). Quelques collecteurs identifiés ont été visités par (Gromaire *et al.*, 2006). Ces visites ont conclu à l'absence de couche organique selon les critères définis par (Oms, 2003). La question qui pourrait être posée : si cette couche existe, quelle est son épaisseur ? est-elle répartie le long du collecteur ?

Dans la suite, nous évaluons l'épaisseur de la couche susceptible d'engendrer la masse événementielle M_{Stoc} imputable au stock de dépôts. Ainsi, l'épaisseur e érodée de la couche pour un événement pluvieux sera calculée par l'équation suivante (Figure 161) :

$$e = \frac{M_{Stoc}}{\rho_{Stoc} \times S} = \frac{M_{Stoc}}{\rho_{Stoc} \times L \times B}$$

Avec : ρ_{Stoc} la masse volumique des particules solides qui constituent cette couche. B et L la largeur et la longueur de la couche.

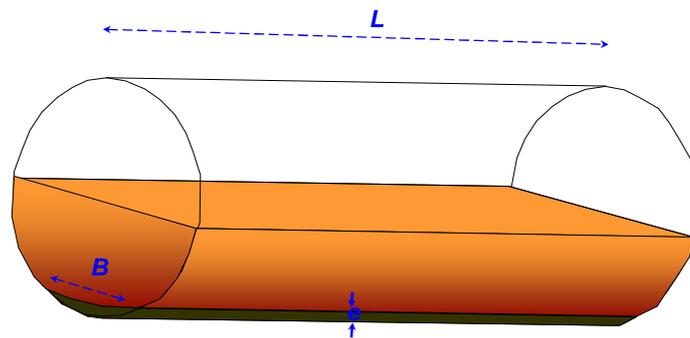


Figure 161 : Epaisseur de la couche érodée

Nous avons choisi deux valeurs de la masse volumique ρ_{Stoc} : $\rho_1 = 1434 \text{ Kg/m}^3$ pour la couche organique (Ahyerre, 1999) ; $\rho_2 = 1170 \text{ Kg/m}^3$ pour le type de dépôts C (Crabtree, 1989). Pour

la largeur B , nous avons pris celle de la cunette de conduite au point de mesure de Clichy (3,04 m). Nous avons pris deux valeurs de L : la longueur du collecteur principale de Clichy : $L_1=5000$ m et la valeur identifiée par (Gromaire *et al.*, 2006), $L_2=1343$ m.

La Figure 162 illustre l'épaisseur de la couche érodée pour les événements pluvieux en fonction de ρ et L . Le long du collecteur de Clichy (L_1), la couche érodée atteint une épaisseur maximale de 4 mm, tandis que sur la longueur L_2 , identifiée par (GROMMAIRE *et al.*, 2006), peut atteindre une épaisseur de 1,6 cm mais en moyenne elle est 3 mm contre 1 mm le long du collecteur. Pour obtenir une couche de d'épaisseur 5 cm, il faut répartir la masse érodée sur une longueur maximale de 500 m qui représente 10% de la longueur de collecteur principale de Clichy. La longueur moyenne est de l'ordre de 100 m.

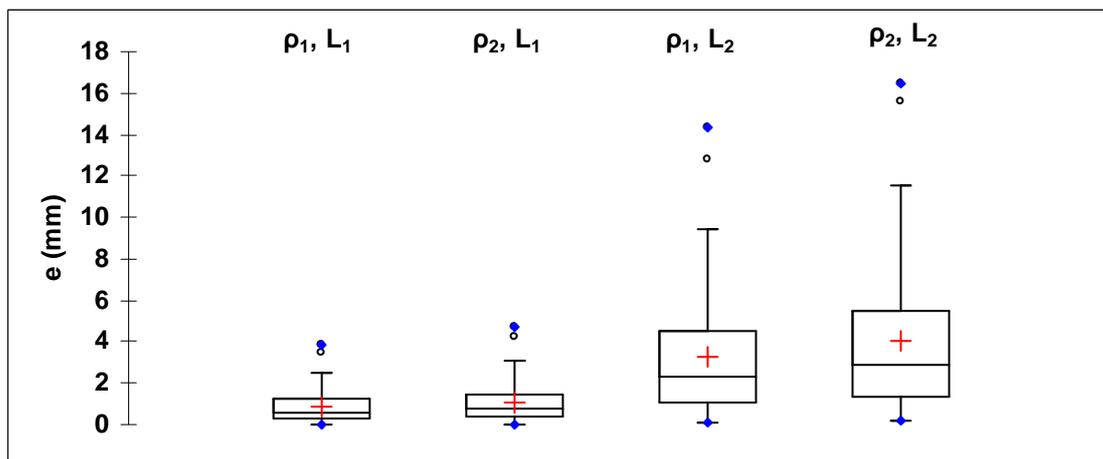


Figure 162 : Epaisseur de la couche érodée pour les événements pluvieux en fonction de ρ et L (M_{Stoc} estimée par approche A2 modifiée pour Clichy)

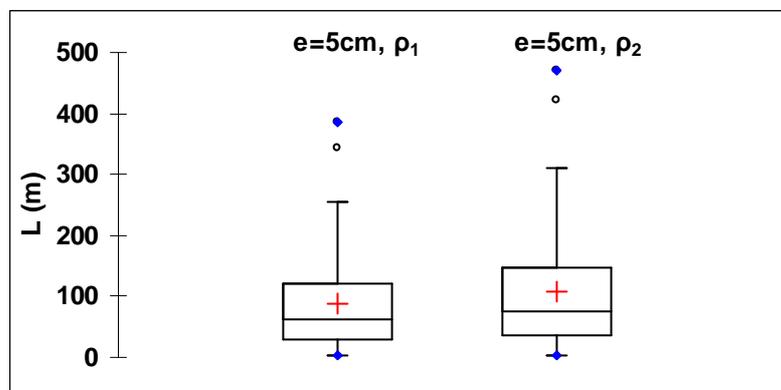


Figure 163 : Longueur de la couche érodée pour les événements pluvieux en fonction de ρ et $e=5\text{cm}$

Ce calcul simple montre que la couche érodée ne représente que quelques mm en épaisseur le long du collecteur ou quelques centaines de mètres en longueur pour une épaisseur équivalente aux couches organiques identifiées par d'autres études.

3 LIEN ENTRE LES CONTRIBUTIONS DU RÉSEAU ET DES PARAMETRES DESCRIPTIFS DES EVENEMENTS PLUVIEUX

3.1 Paramètres descriptifs utilisés

Dans un premier temps, les paramètres descriptifs des événements pluvieux utilisés pour expliquer la contribution du réseau sont ceux utilisés pour expliquer la concentration et la masse moyennes événementielles dans le *chapitre 7*. Nous rappelons ces variables ici :

Les variables de la pluie

- I_{moy} et I_{max5} : les intensités moyenne et maximale sur 5 min de la pluie en mm/h ;
- D_p : durée de la pluie en heures (h);
- H_p : hauteur de la pluie en mm ;
- DTS : durée antérieure de temps sec en jours (j) ;
- La variable $DTS \times H_p$ ($mm*j$) (Dembélé *et al.*, 2011) (*cf. chapitre 7*) ;

Les variables de l'écoulement :

- Q_{max} et Q_{moy} : débit maximum (pas de temps de 5 min) et moyen de l'événement pluvieux en m^3/s ;
- V_{exut} : volume de l'événement pluvieux en m^3 ;
- De plus, nous définissons des nouvelles variables liées aux eaux usées qui n'ont pas été étudiées dans le *chapitre 7* :
- V_{EU} : volume d'eaux usées en m^3 passé durant l'événement

- V_r : volume d'eaux de ruissellement en m^3 ;
- $Q_{m_{EU}} = \frac{V_{EU}}{D_p}$: débit moyen d'eaux usées durant l'événement en m^3/s ;
- Proportion d'eaux usées $\frac{V_{EU}}{V_{exut}}$.

Toutes ces variables et/ou leur combinaison (produit de deux variables, division, transformation logarithmique ou inverse) sont appelées « *variables classiques* ».

Tout d'abord, il faut noter que les caractéristiques générales des événements pluvieux ont été déterminées à partir du pluviomètre de Jules qui est à coté de point de mesure de Clichy. Il pourrait que les valeurs de ces caractéristiques sont attachées de grandes incertitudes. Donc cette analyse sera une première analyse à affiner si nous aurons des données détaillées des événements pluvieux. Il n'empêche que les volumes ou les durées antérieures de temps sec observés à l'exutoire sont des bonnes indications de quelques caractéristiques des événements pluvieux, comme par exemple, le débit maximal Q_{max} pourrait remplacer l'intensité maximale car nous nous intéressons à des phénomènes se produisant à l'intérieur du réseau et non pas sur la surface du bassin versant. En effet, la variable d'intensité de la pluie dépend de la répartition spatiale de la pluie et il représente moins bien les phénomènes de dépôt et de remise en suspension pouvant se produire dans les collecteurs par rapport au paramètre de débit maximal.

3.2 Analyse monovariée

3.2.1 Corrélations avec les variables classiques

La *Figure 164* illustre la masse M_{Stock} (approche A2 modifiée pour Clichy) en fonction des différentes variables classiques. Les meilleurs coefficients de corrélation observés sont $R^2=0.54$ avec le volume ruisselé V_r ou $R^2=0.52$ avec le volume total V_{exut} . Pour toutes les autres variables, les corrélations sont globalement faibles : entre 0.2 et 0.41 pour les variables H_p , $\frac{V_{EU}}{V_{exut}}$, Q_{moy} , Q_{max} et des coefficients inférieurs à 0.2 pour les autres variables. D'autres corrélations entre M_{Stock} et des nouvelles variables construites par une transformation inverse

ou une transformation logarithmique des variables classiques ($\frac{1}{X}$ ou $\ln(X)$) ont donné des corrélations inférieures aux corrélations obtenues avec les variables linéaires.

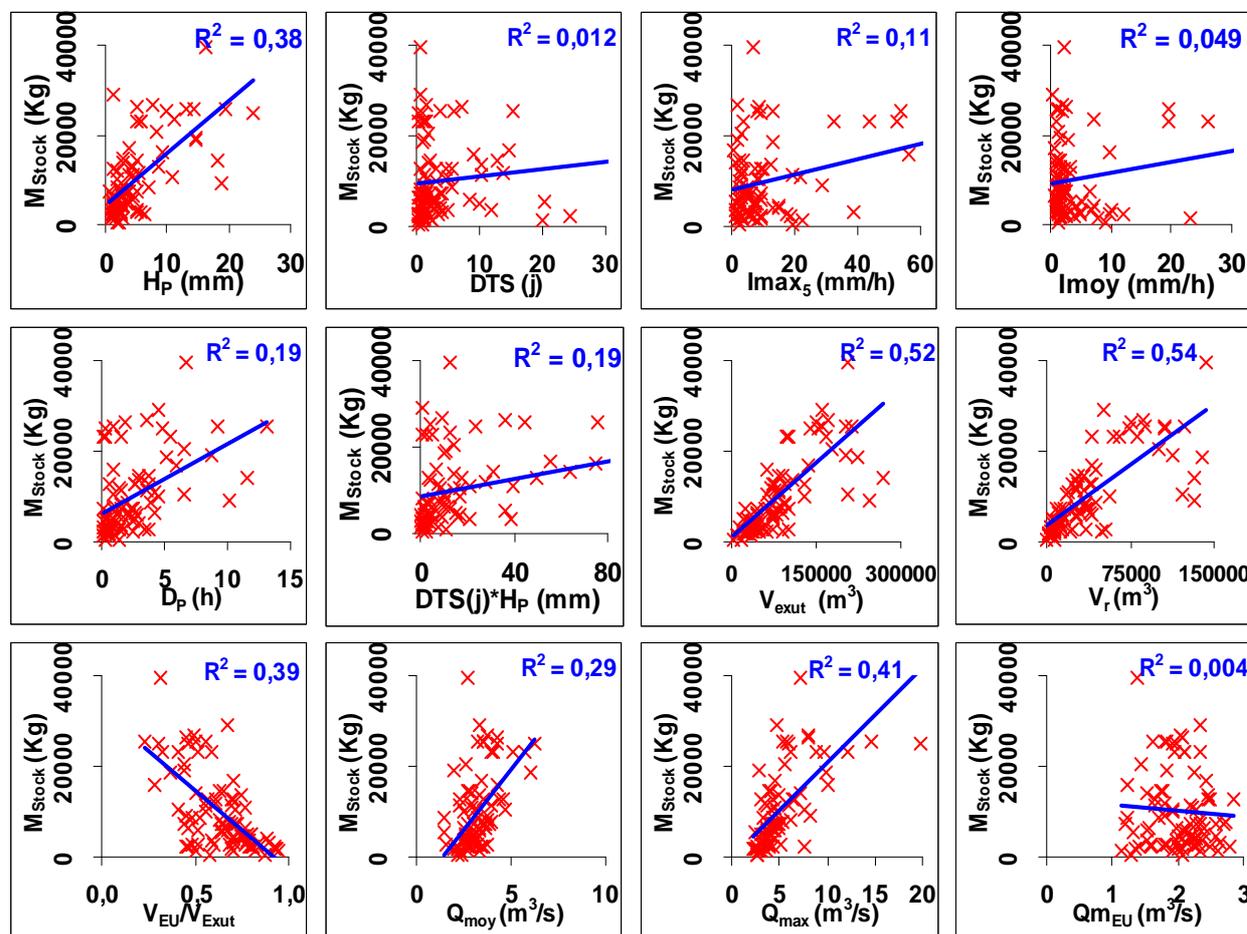


Figure 164 : Corrélation entre la masse de stock érodée et les variables classiques

3.2.2 Effet de la définition de la durée antérieure de temps

Le coefficient R^2 entre M_{Stock} et la durée antérieure de temps sec DTS est presque nul, ce qui montre que cette variable ne semble pas une variable déterminante dans la mobilisation du stock. Cela pourrait signifier que le stock disponible n'est pas un facteur limitant, mais amène également à s'interroger sur la définition de la durée de temps sec. Aussi nous avons imaginé et testé plusieurs autres définitions de cette durée.

DTS_{HX} : Durée antérieure à l'événement pluvieux depuis le dernier événement dont la hauteur précipitée est supérieure à X mm. Les valeurs de X choisies sont : 2mm ; 5mm ; 10mm et 15mm ;

DTS_{VX} : Durée antérieure à l'événement pluvieux depuis les derniers événements dont les volumes totaux transportés sont supérieurs à $X\%$ du volume de cet événement. Les valeurs de X choisies sont : 10%, 50%, 100% ,150% et 200% ;

DTS_{MX} : Durée antérieure à l'événement pluvieux depuis les derniers événements dont les masses érodées sont supérieurs à $X\%$ de la masse érodée de cet événement. Les valeurs de X choisies sont : 10%, 50%, 100% ,150% et 200% ;

De plus, nous avons aussi testé une autre démarche (Gromaire et al. 2001) en fixant une durée précédant chaque événement pluvieux (une semaine) et en caractérisant le contexte pluviométrique observé sur cette durée :

H_7 : hauteur de pluie précipitée durant les 7 jours précédents en mm ;

I_{max7} : Intensité maximale des pluies durant les 7 jours précédents en mm/h ;

ΔI_{maxpr} : l'écart entre I_{max} de la pluie et celle de la pluie précédente I_{maxpr} en mm/h ;

ΔI_{max7} : l'écart entre I_{max} de la pluie et celle de la pluie précédente I_{max7} en mm/h ;

Ces nouvelles variables n'ont pas amélioré la corrélation avec la masse M_{Stock} et notamment avec les variables DTS redéfinies sauf pour les DTS_{M50} et DTS_{M100} où nous avons obtenues des corrélations significatives (Figure 165) mais elles restent plus que devant les corrélations obtenues avec le volume total et le volume ruisselé.

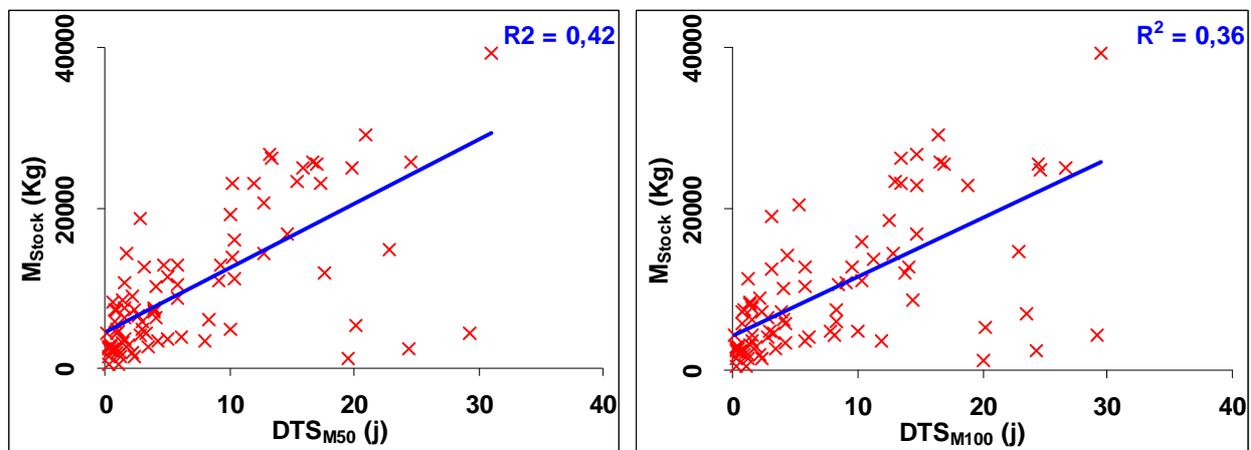


Figure 165 : Corrélations entre la masse de stock mobilisé et les nouvelles durées de temps sec DTS_{M50} et DTS_{M100}

3.2.3 Application à la reconstitution d'un bilan à l'échelle d'une année

Dans ce paragraphe, nous évaluons la contribution de trois sources de MES par temps de pluie à l'échelle annuelle en utilisant la base de données de l'année 2006. Pour 9 événements pluvieux (en juin et septembre) et quelques jours de temps sec, nous ne disposons pas de mesure de la turbidité à cause de panne des turbidimètres durant cette période mais nous disposons de mesure de débit. Les caractéristiques pluviométriques des ces événements sont dans la gamme des caractéristiques des 88 événements étudiés à Clichy. Pour reconstituer les masses mobilisées pendant ces événements, nous établissons une équation de régression entre la masse M_{Stock} et le volume ruisselé V_r (Figure 166). Avec cette régression (en tenant compte de l'erreur résiduelle impliquée par la régression) et le modèle des eaux usées, nous simulons la masse de chacune des trois sources en utilisant « l'approche A2 modifiée pour Clichy » pour évaluer la concentration en MES. Le calcul est répété 1000 fois à l'échelle de l'année pour les jours et les événements où nous ne disposons pas de mesure de la turbidité. Nous obtenons ainsi une distribution annuelle de la contribution de chaque source en volume et en masse de MES.

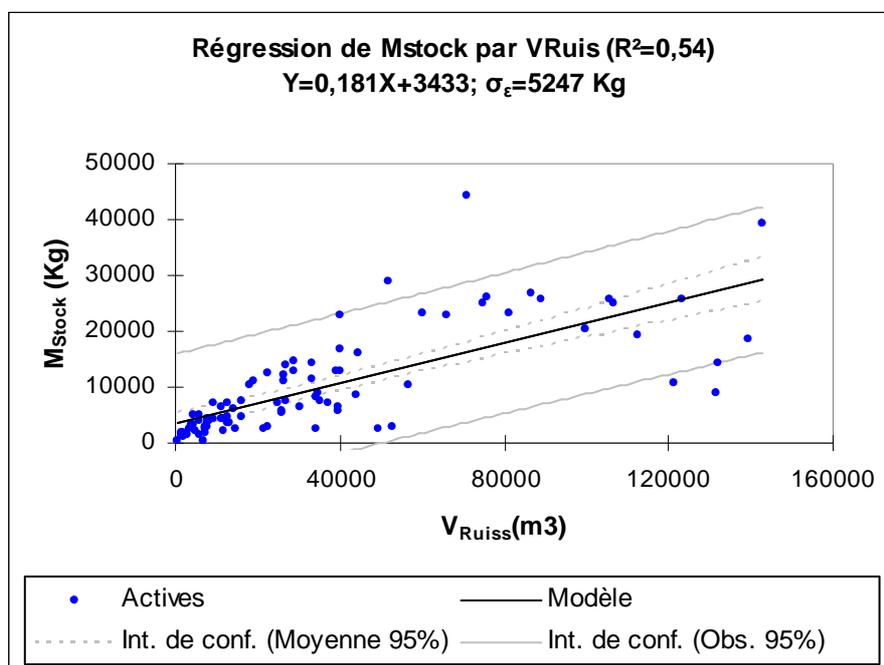


Figure 166 : Régression entre V_{Ruis} et M_{Stock}

La Figure 167 illustre les pourcentages de contribution de chaque source à l'échelle de l'année 2006 à Clichy en volume et masse de MES par temps de pluie et par temps sec+temps

de pluie (toute l'année). Les eaux de ruissellement ne représentent que 7% du volume annuelle des eaux urbaines transportées à l'exutoire de Clichy (Figure 167, (a)), ce qui est équivalent à 51 % du volume des eaux de ruissellement de temps de pluie (Figure 167, (b)). Pour le flux de MES, les eaux de ruissellement ne génèrent qu'une part mineur (2%) des masses de MES à l'exutoire de Clichy par temps sec et temps de pluie (Figure 167, (c)) et elle représente 10 % des masses de MES de temps de pluie (Figure 167, (d)). Les eaux usées de temps de pluie contribuent à 8% à la masse annuelle de MES transportées à l'exutoire de Clichy, tandis que celle de temps sec constituent la source majeure à l'échelle annuelle (77%) (Figure 167, (c)). Par ailleurs, l'érosion du stock des dépôts est la source majeure de temps de pluie (48%) et représente 11% de la masse annuelle de MES de temps sec et de temps de pluie.

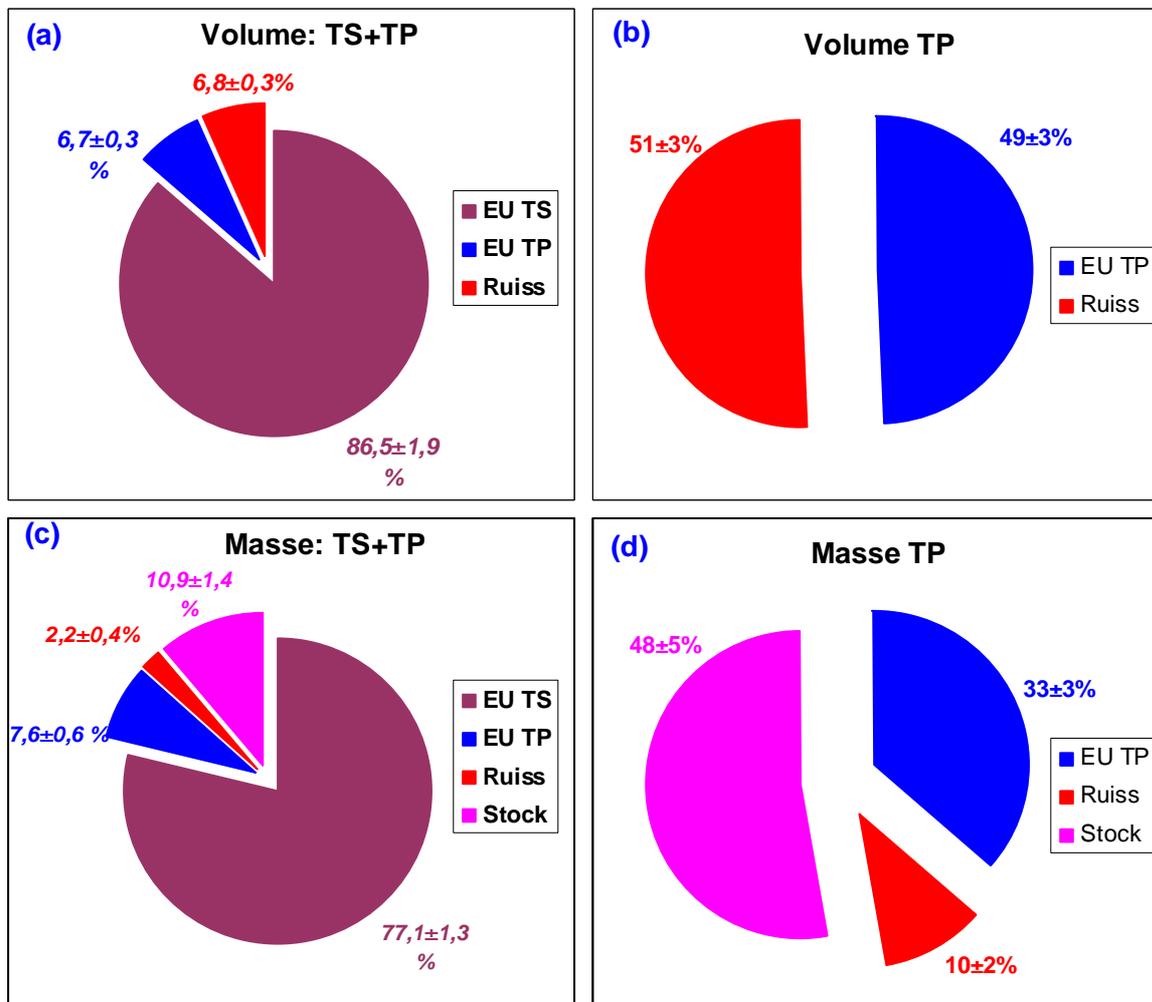


Figure 167 : Pourcentages $\pm \frac{1}{2}IC95$ de contribution de chaque source à l'échelle de l'année 2006 à Clichy en volume et masse de MES par temps de pluie et par temps sec (TS) +temps de pluie (TP)

3.3 Analyse en composantes principales (ACP)

Comme le nombre des variables choisies est élevé, nous illustrons les résultats des corrélations en utilisant une analyse en composantes principales (ACP) (détaillée en Annexe J). De plus, nous groupons les événements pluvieux en 4 groupes suivant l'importance de la masse érodée de l'événement pluvieux : les groupes ont été choisis en fonction des quartiles de la masse érodée M_{Stock} (Figure 168).

L'objectif de cette analyse ACP est de tenter de lier l'appartenance à l'un de 4 groupes de M_{Stock} en fonction des variables définies ci-dessus et d'élaborer un modèle pour évaluer la masse des stocks des événements pluvieux où nous n'avons pas de mesures afin d'évaluer la contribution de chaque source de MES en réseau d'assainissement à l'échelle annuelle.

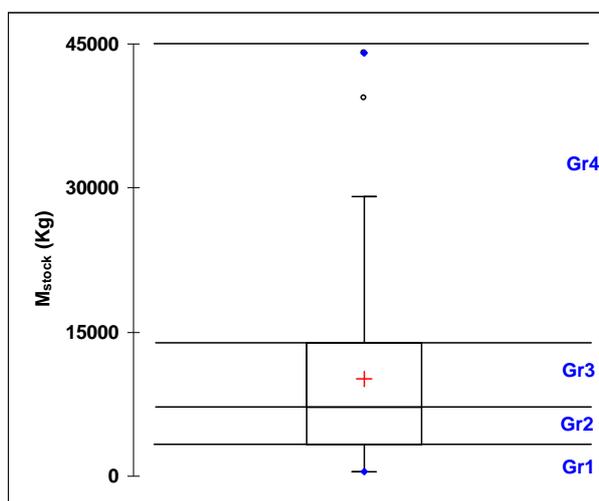


Figure 168 : Choix de 4 groupes

La masse M_{Stock} n'a pas été utilisée dans l'ACP car elle a été utilisée pour créer les quatre groupes. Les résultats obtenus pour l'ACP sont illustrés Figure 171.

La Figure 171 montre que les deux premières composantes principales expliquent 60% de la variance totale de l'échantillon (39 % et 21 % respectivement pour les 1^{er} et 2^{ème} axes).

Sur le cercle des corrélations (Figure 171), les durées antérieures de temps sec définies sont associées à l'axe $F1$ et elles sont très corrélées entre elles. Les variables qui contrôlent le volume de la pluie (H_p , $Imoy$, $Qmoy$, $Qmax$,...), sont associées à l'axe $F2$ et elles sont aussi corrélées entre elles. Elles sont décorrélées avec les DTS .

La projection des données dans le plan 1-2 et 1-3 montre une assez faible structuration des données pour les variables explicatives choisies (Figure 171). Les points du groupe 4 correspondent plutôt aux valeurs positives sur les axes 1 et axe 2 correspondant aux fortes valeurs des variables de volume (H_p , $Imoy$, $Qmoy$, $Qmax$,...) et de durée de temps sec.

Les groupes 1 et 2 correspondent à des valeurs moyennes, ou faibles associées à des durées de temps sec élevées. Le groupe 3 est quant à lui proche de l'origine, correspondant à des valeurs moyennes de volume et de durée de temps sec.

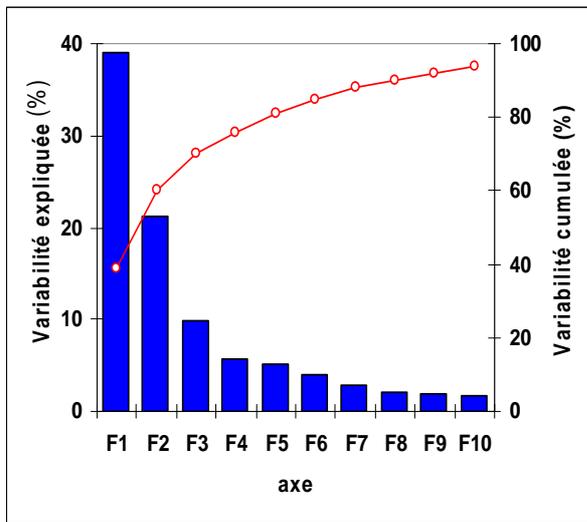


Figure 169 : Pourcentages de la variabilité expliquée et de la variabilité cumulée pour les 10 premières composantes principales

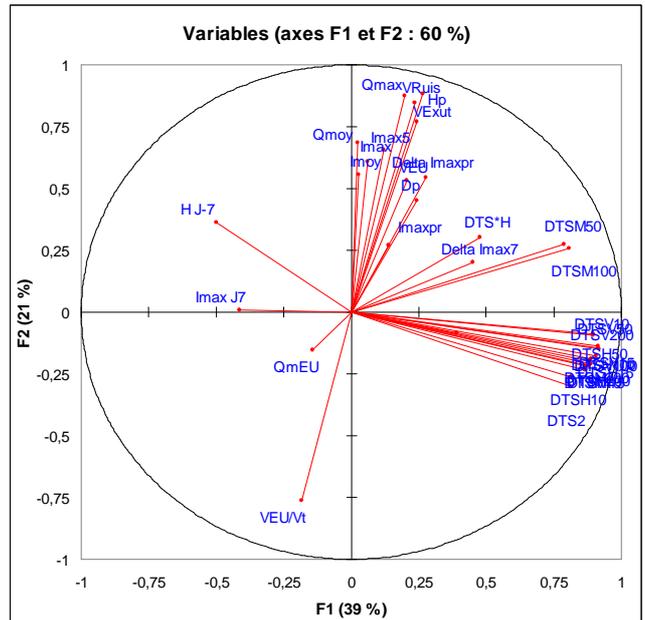


Figure 170 : Cercle des corrélations pour l'ACP relative à la distribution des données

L'analyse du cercle des corrélations confirme les résultats de l'analyse des coefficients de corrélation linéaire entre la masse M_{Stock} et les variables définies (Figure 171, flèche M_{Stock}). Elle montre que la meilleure corrélation est celle avec la variable volume. Mais cette corrélation reste faible, elle est 0,75 ($R^2=0,54$).

4 CONCLUSION

Ce chapitre a permis d'évaluer la contribution de chaque source à la masse de MES transportée par temps de pluie à l'exutoire de deux bassins versants de caractéristiques

différentes : Clichy à Paris et Ecully à Lyon en utilisant un bilan de masses entrant et sortant du réseau d'assainissement au cours de chaque pluie.

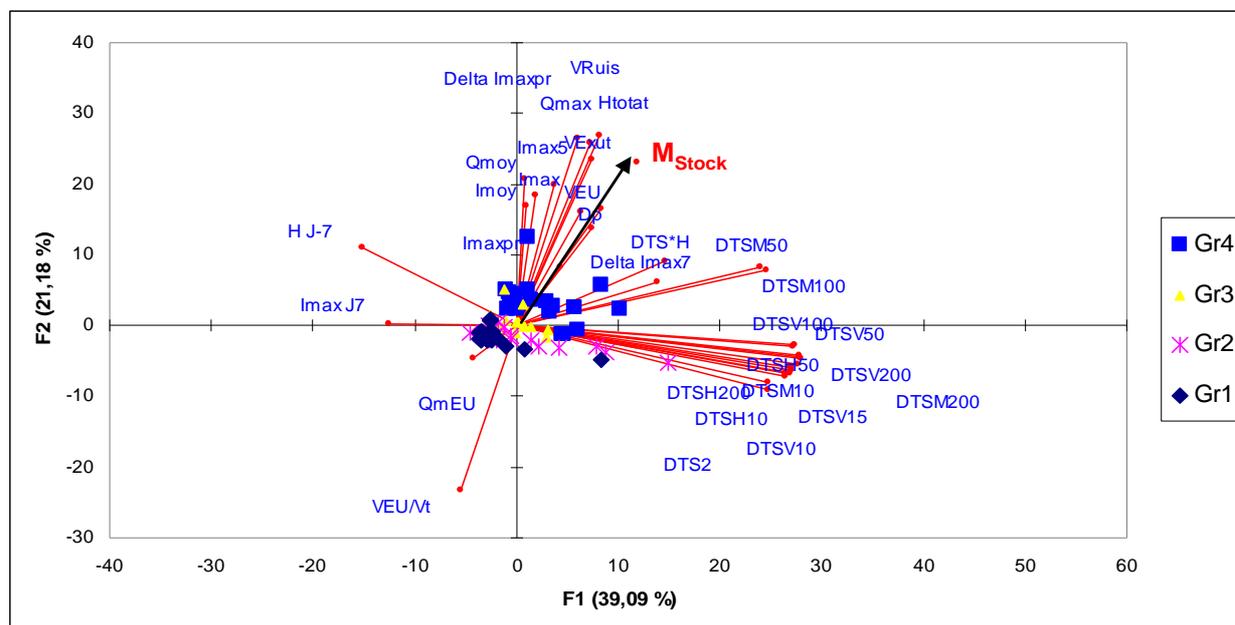


Figure 171 : Projection des données dans les plans principaux 1-2 pour l'ACP relative à la distribution des masses dans les 4 groupes

Ce bilan démontre que :

- la contribution des dépôts dans le réseau se situe entre 20 et 80% de la masse de MES observés à l'exutoire en temps de pluie. La robustesse de cette estimation a été établie par une étude de sensibilité aux hypothèses affectant le bilan. Ces résultats confirment et affinent les évaluations obtenues précédemment sur le réseau d'assainissement parisien ;
- l'importance de cette contribution du réseau n'est pas spécifique au réseau parisien de faible pente et surdimensionné pour les écoulements de temps sec, mais elle reste importante dans un réseau d'assainissement comme celui d'Ecully qui a une pente forte et ne présente pas de zones connues d'accumulation de dépôts ; Ceci confirme que les problèmes d'ensablement localisé et de pollution de temps de pluie ne sont pas nécessairement liés.
- A l'échelle d'un événement pluvieux le dépôt mobilisé ne représente qu'une faible épaisseur si on rapporte le volume concerné à une surface de collecteur immergée par

temps sec : de l'ordre de quelques *mm* le long de l'ensemble du collecteur du Clichy. Par ailleurs à l'échelle de l'année la masse déposée par temps sec et reprise par temps de pluie représente environ 12% la masse totale d'eaux usées de temps sec

- le dépôt reste la source majeure de MES à l'échelle annuelle par temps de pluie (48%) et les eaux usées de temps sec la source majeure par temps sec et temps de pluie (77%).
- les caractéristiques générales de la pluie ne suffisent pas à expliquer toute la variabilité de la masse érodée durant un événement pluvieux. Les variables qui contrôlent le volume de l'événement pluvieux comme la hauteur ou l'intensité maximale, la durée de la pluie donnent les meilleurs coefficients de corrélation avec cette masse mais ils restent faibles (ρ^2 compris entre 0.2 et 0.5). Les variables caractéristiques des antécédents de chaque événement pluvieux n'expliquent pas la masse mobilisée.