

Chapitre 4

Critique des données recueillies et complément des données manquantes

4.1.Introduction

Le contenu de la base de données qui vient d'être présenté dans le chapitre 3 est tout-à-fait conséquent: 17 campagnes de mesures, entre 70 et 230 mesures de pluie, entre 16 et 130 mesures de concentrations, entre 5 et 24 pollutogrammes par site. Mais ces données ne peuvent pas être utilisées immédiatement. Il faut les critiquer pour identifier les événements aberrants, puis compléter les données manquantes.

Un de nos objectifs est d'étudier les relations qui existent entre une pluie et la qualité du rejet qu'elle engendre, en particulier les masses rejetées. Nous devons donc connaître pour chaque événement le volume écoulé et la concentration. Par conséquent, l'incertitude sur la mesure de la masse provient à la fois des erreurs de mesure de la concentration et du volume.

Pour la validité des mesures de concentration, nous nous sommes fiés aux indications des rapports d'étude de chaque campagne de mesure, les responsables des mesures étant les plus aptes à juger de la fiabilité de leurs données.

Par contre pour les mesures hydrologiques, nous avons regardé attentivement les mesures de volumes. L'objet du paragraphe 4.2 est de présenter les relations entre la pluie et le volume. Tout d'abord, des coefficients de corrélation permettent de juger s'il existe une relation linéaire entre les 2 et de choisir le pluviographe le plus représentatif de chaque site. Puis le calcul de coefficient volumétrique pour chaque événement souligne ceux qui présentent des anomalies. Enfin, ce paragraphe présente des éléments, comme le coefficient volumétrique moyen et la surface active, qui nous permettent de reconstituer les volumes lorsque cela s'avère nécessaire.

La deuxième étape préliminaire importante concerne le complément des données de qualité. En effet, malgré

la somme d'informations recueillies, il est impossible d'effectuer certains des calculs prévus, uniquement avec les données disponibles: calcul des masses annuelles ou des masses interceptées à long terme par des ouvrages de traitement. L'objet du paragraphe 4.3 est de décrire la méthode de reconstitution des concentrations et des masses produites par événement, puis la méthode d'estimation des masses annuelles. Les polluants considérés sont ceux communs à l'ensemble des sites, c'est-à-dire MES, DCO et DBO5.

4.2. Les données hydrologiques

4.2.1. Coefficient de corrélation entre pluie précipitée et volume écoulé

Le volume précipité lors d'une pluie ne se retrouve pas dans sa totalité à l'exutoire, c'est pourquoi on parle de pertes pour qualifier les relations entre pluie et volume. L'approche la plus simple pour étudier le comportement hydrologique d'un bassin et pour estimer le rôle des pertes consiste à comparer directement le volume ruisselé à la hauteur d'eau précipitée. Il est clair que cette méthode est très sommaire, car la seule hauteur de pluie ne suffit pas à expliquer tout le processus en jeu. Néanmoins, certains événements particuliers seront d'ores et déjà mis en évidence par des comportements s'écartant de la tendance générale. Ainsi, une première vérification de la relation entre hauteur d'eau et volume permettra d'estimer la fiabilité des données.

La mise en relation de la hauteur de pluie et du volume écoulé n'a de sens a priori que si le volume considéré est uniquement issu du ruissellement de surface. En effet, lorsque des apports supplémentaires, du type de ceux des eaux usées ou des infiltrations dans les réseaux, se greffent aux apports pluviaux, il n'y a aucune raison pour qu'ils dépendent de la pluie. Donc, pour des réseaux unitaires ou séparatifs (qui ne le sont jamais strictement), il faut tout d'abord estimer la part des eaux usées ou drainées par temps sec. D'après les indications des différents rapports d'étude, plusieurs types d'estimation de ces volumes ont été utilisés (Cf. tableau 4.1). Les coefficients de corrélation ont été calculés avec les volumes totaux et avec les volumes pluviaux. Les différences obtenues sont très faibles. Le volume correspondant au temps sec est faible devant le volume pluvial. Dans le tableau 4.2, les coefficients proviennent du calcul sur les volumes pluviaux lorsque leur estimation est possible, sinon il s'agit des volumes totaux.

Site	Type de réseau	Estimation
Vélizy	séparatif	débit de base constant = 11 l/s
Centre Urbain	séparatif	débit de base constant = 8 l/s
Ulis Sud	séparatif	mesure du débit de temps sec avant chaque événement, entre 0l/s et 115 l/s
Malnoue	séparatif	débit de base constant = 4 l/s
Grammont	séparatif pollué	entre 11h et 20h, débit de base de 20 l/s entre 20h et 11h, débit de base de 12 l/s
Chesnay	séparatif pollué	débit de base constant = 46 l/s
Baudile	mixte	débit de base constant = 130 l/s (hydrogramme moyen non disponible)
Mantes	unitaire	hydrogramme moyen de temps sec par tranche de 2h
La Briche DD11, D11, PHI1400, Enghien, PLB	unitaire	pas de donnée de temps sec

Tableau 4.1: Méthode d'estimation des volumes de temps sec

Le calcul des coefficients de corrélation entre la pluie précipitée et le volume écoulé a permis:

de juger de la linéarité de la relation et dans le cas où plusieurs postes pluviométriques sont disponibles de déterminer quel poste est le plus représentatif des pluies sur le site considéré:

- * Sur Chesnay (560 ha) et Baudile (1145 ha) la prise en compte de deux pluviographes n'augmente pas le coefficient de corrélation. Par conséquent sur ces deux sites, nous utiliserons par la suite uniquement les données provenant du poste de Clichy pour lequel les coefficients de corrélation sont les meilleurs.
- * Pour les sites de la Briche, les coefficients de corrélation sont faibles, inférieurs à 0.7. Cela provient sans doute de la complexité du réseau d'assainissement, fortement maillé, équipé de divers ouvrages de régulation (seuils mobiles ou siphons) dont les périodes de fonctionnement ne sont pas connues pour l'époque des mesures. Pour les cinq sites de la Briche, nous utilisons les données provenant du poste pluviométrique la Briche III.

de mettre en évidence le comportement particulier d'un bassin versant pour les fortes pluies:

- * Sur Ulis Sud le coefficient de corrélation est relativement faible, 0.71. Cela souligne l'influence de la zone agricole à proximité du bassin et qui contribue pour certaines pluies au ruissellement sur le bassin urbain. Les points correspondants à des volumes pluviaux de plus de 5000 m³ s'écartent de

la droite de régression de manière significative. On peut estimer l'apport de la zone rurale entre 2000 m³ et 6500 m³, cette fraction est donc loin d'être négligeable.

Site	Poste pluviométrique	Coefficient de corrélation	Taille de l'échantillon
Vélizy	un seul poste sur le site	0.97	23
Centre Urbain	Noisy 14	0.91	63
Ulis Sud	un seul poste sur le site	0.71	74
Malnoue	Noisy 17	0.98	43
Grammont	Noisy 17	0.98	58
Chesnay	Neuilly	0.84	46
	Clichy	0.86	44
	moyenne de Neuilly et Clichy	0.86	54
Baudile	Neuilly	0.92	73
	Clichy	0.93	66
	Rosny	0.83	49
	moyenne de Neuilly et Clichy	0.94	88
	moyenne de Neuilly et Rosny	0.86	87
	moyenne de Clichy et Rosny	0.84	80
Mantes	moyenne de Neuilly, Clichy et Rosny	0.91	49
	un seul poste sur le site	0.95	25
	La Briche DD11	La Briche III	0.57
La Briche D11	La Briche III	0.53	13
La Briche PHI 1400	La Briche III	0.48	17
La Briche Enghien	La Briche III	0.55	10
La Briche PLB	La Briche III	0.70	14
	Drancy VI	0.61	16
	Pantin XII	0.54	11
	Livry Gargan II	0	17
	Livry Gargan XIII	0.15	16

Tableau 4.2: Coefficient de corrélation simple entre hauteur de pluie précipitée et volume pluvial estimé

4.2.2. Coefficient de ruissellement volumétrique par événement

Les coefficients de corrélation entre la pluie et le volume donnent une idée de la relation linéaire qui existe entre les deux quantités. En revanche, ils ne donnent pas d'indication sur les pertes qui interviennent sur un bassin versant entre la pluie brute qui arrive à la surface et le volume écoulé à l'exutoire. Une manière simple de modéliser ces pertes consiste à calculer un coefficient de ruissellement volumétrique qui est le rapport entre le volume total ruisselé à l'exutoire VR, et le volume total précipité VP:

$$C_v = \frac{VR}{VP} \quad \text{Eq. 1}$$

Le calcul de VP fait intervenir la surface du bassin versant. Par conséquent dans ce paragraphe on n'utilise pas les sites de la Briche, car la nature maillée du réseau ne permet pas d'estimer la surface

Les coefficients varient considérablement d'une pluie à une autre, tout en étant dans l'ensemble assez faibles. Desbordes (1985b) a étudié la variabilité des coefficients de ruissellement sur les données des quatre bassins expérimentaux. Il a montré, grâce à l'étude des relations entre les coefficients et les variables pluviométriques, que de manière générale le coefficient augmente avec le volume de la pluie précipitée, et les antécédents pluviométriques. D'autres paramètres entrent en jeu comme la durée de temps sec depuis le dernier événement ayant engendré un écoulement ou la hauteur de pluie précipitée pendant cette période sans engendrer de ruissellement (trop faible pour engendrer un ruissellement, mais suffisante pour humidifier le sol). Il est aisé de concevoir que le coefficient reste faible pour des petites pluies, peu intenses, tombant sur des sols secs (durée de temps sec importante et hauteur de pluie pendant cette durée faible) et qu'il augmente avec la hauteur de pluie, l'intensité moyenne et lorsque la durée de temps sec est faible. Mais, il arrive aussi que des coefficients soient élevés pour des pluies fortes sur des sols mouillés.

Pour les sites dont nous disposons, nous avons étudié les influences de la hauteur de pluie, de la durée de temps sec antécédent, des intensités de la pluie moyenne sur le temps de concentration et sur la durée de l'événement. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de règle générale quant à la variation des coefficients de ruissellement. Suivant les sites, on observe une stabilisation des coefficients lorsque la hauteur de pluie, ou la durée de temps sec, ou l'intensité de la pluie atteint un seuil, et en dessous de ce seuil les valeurs des coefficients de ruissellement sont très dispersées. Pour d'autres sites, aucune relation de ce type ne se dégage.

L'étude du coefficient de ruissellement volumétrique confirme le comportement particulier des Ulis Sud, à cause de la zone rurale qui apporte suivant les pluies des volumes d'eau non négligeables. Les coefficients volumétriques de ruissellement sont calculés avec les seuls volumes pluviaux. Pour certaines pluies, on observe des coefficients supérieurs à 1, c'est-à-dire que le volume mesuré écoulé à l'exutoire est supérieur au volume théorique calculé à partir de la lame d'eau précipitée sur la surface du bassin urbain de 69 hectares.

Ce résultat est en accord avec les observations faites en février et mars 1978, rapportant que des écoulements dans les fossés ont été observés en provenance de la surface rurale.

Site	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type	Nombre de valeurs
Vélizy Ouest	0,07	0,35	0,61	0,11	23
Centre Urbain	0,02	0,09	0,53	0,06	80
Ulis Sud	0,14	0,50	1,79	0,37	74
Malnoue	0,02	0,12	0,43	0,07	57
Grammont	0,03	0,13	0,35	0,07	69
Chesnay	0,01	0,08	0,26	0,04	50
Baudile	0,01	0,16	0,58	0,11	78
Mantes	0,06	0,10	0,17	0,03	25

Tableau 4.3: Domaine de variation des coefficients de ruissellement volumétrique par événement

4.2.3. Coefficient volumétrique moyen sur l'ensemble des événements

Le coefficient volumétrique de l'équation 1 constitue une représentation globale des pertes qui ne tient pas compte des variations en cours de pluie. Une manière simple de les intégrer consiste à utiliser la notion de pertes initiales, c'est-à-dire la hauteur minimale pouvant engendrer un écoulement après satisfaction des pertes par mouillage des surfaces, par stockage dans des dépressions ou par interception par la végétation. Les pertes initiales P_i sont généralement supposées constantes d'une pluie à une autre. Sur des bassins fortement urbanisés, P_i est faible, elle peut varier d'une pluie à une autre essentiellement sous l'action des antécédents pluviométriques, mais elle est généralement supposée constante.

Pour une mise en oeuvre pratique, P_i est prise égale à une valeur moyenne, déterminée par des bilans volumétriques. Une méthode simple pour estimer P_i consiste à étudier la relation entre le volume ruisselé à l'exutoire et le volume précipité.

Les coefficients de ruissellement volumétriques définis par l'équation 1 ne peuvent pas être modélisés par une constante, car les variations d'une pluie à une autre sont importantes. En revanche, la prise en compte des pertes initiales permet de modéliser par une constante le rapport entre le volume ruisselé et le volume précipité privé des pertes initiales. Le coefficient de ruissellement volumétrique moyen est alors défini par:

$$VR = \bar{C}_v \times (Hb - P_i) \times A \quad \text{Eq. 2}$$

Hb est la hauteur de pluie brute, A est la surface du bassin versant,

\bar{C}_v et Pi sont déterminés par l'ajustement d'une droite de régression linéaire entre le volume écoulé rapporté à la surface du bassin versant et la hauteur précipitée, en prenant l'ensemble des événements.

Le tableau 4.4 présente les résultats de cette modélisation. La comparaison du coefficient moyen avec le coefficient d'imperméabilisation montre que:

- * le coefficient moyen de ruissellement se rapproche du coefficient d'imperméabilisation sur Vélizy, Ulis Sud, et Grammont;
- * l'écart dépasse 40% sur les autres sites. L'écart le plus grand est observé sur Mantes où le coefficient de ruissellement moyen représente 30% du coefficient d'imperméabilisation.

Il n'est pas toujours évident de relier les pertes initiales calculées à partir de la régression linéaire avec la hauteur minimale indiquée dans les rapports d'étude.

La détermination de Cv et Pi pour chacun des sites fournit une méthode de reconstitution des données manquantes qui sera appliquée dans le paragraphe suivant pour le calcul des masses annuelles. Pour les sites de la Briche, pour lequel on ne dispose pas des surfaces, Cv est pris égal à la pente de la droite de régression qui relie directement le volume et la hauteur de pluie. Dans ce cas, ce n'est plus un coefficient sans dimension, il a la dimension d'une surface.

Site (poste pluviométrique)	Coefficient d'imperméabilisation	Coefficient de ruissellement moyen	Pertes initiales mm	Coefficient de corrélation
Vélizy	0.54	0.41	0.5	0.97
Centre Urbain	0.24	0.14	1.1	0.83
Ulis Sud	0.48	0.47	0.6	0.88
Malnoue	0.35	0.19	0.8	0.96
Grammont	0.25	0.24	0.8	0.94
Chesnay	0.19	0.09	1.0	0.76
Baudle	0.30	0.18	0.3	0.85
Mantes	0.39	0.12	0.3	0.95

Tableau 4.4: Coefficients de ruissellement moyens et pertes initiales

4.2.4. Estimation des surfaces actives

Les pertes enregistrées sur un bassin versant urbain sont essentiellement dues aux surfaces perméables à usage public (parcs, terrains de sport) ou privatif (jardins). Ces surfaces sont soit isolées du réseau public, soit le siège d'infiltration ou de stockage important, et leur participation au ruissellement n'est donc qu'occasionnelle. Sur les surfaces imperméables, les pertes sont faibles, elles résultent du stockage dans les dépressions du sol, du "mouillage" des revêtements ou des infiltrations par des fissures. Les toitures en terrasse peuvent quant à elles, être le lieu de pertes beaucoup plus importantes. Même si les pertes sur les surfaces imperméables sont faibles, sur un bassin versant les surfaces ne contribuent pas de la même manière au ruissellement. C'est pourquoi on introduit le concept de surface active, qui représente la surface qui contribue réellement à la formation du ruissellement. Sur un bassin, certaines surfaces peuvent ne pas être raccordées directement au réseau (des toitures se déversant sur des pelouses, dans des bassins...), seulement partiellement ou court-circuitant les points de mesure (avaloirs de capacité réduite ou mal placés).

Si la surface active correspond à la surface imperméable, cela signifie que pour un événement le volume écoulé correspond au volume de la lame d'eau sur la surface imperméable. Sur les sites étudiés, la comparaison entre ces deux volumes calculés pour chaque événement montre que dans l'ensemble les surfaces actives sont inférieures aux surfaces imperméables. C'est-à-dire que le volume calculé à partir de la surface imperméable est supérieure au volume mesuré. Sur Mantes, il y a d'ailleurs probablement une erreur dans la détermination du coefficient d'imperméabilisation, à moins d'une sous-estimation systématique des volumes. Sur certains sites (Grammont, Ulis Sud et Vélizy Ouest), la surface active tend à égaler la surface imperméable pour les pluies d'une certaine importance alors que pour les petites pluies, soit la surface active est plus faible, soit les pertes initiales ne sont pas négligeables.

Pour un événement, la surface active peut être obtenue en calculant le rapport entre le volume et la hauteur de pluie. Pour obtenir un ordre de grandeur de la surface active sur chaque site de manière globale, nous avons considéré l'ensemble des événements. La surface active moyenne est alors définie par:

$$S_{act} = \frac{(\text{Volume mesuré par événement})}{(\text{Hauteur de pluie précipitée})} \quad \text{Eq. 3}$$

Le tableau 4.5 présente les surfaces actives obtenues sur les sites étudiés. Les sites de la Briche sont intégrés dans ce tableau, car le calcul ne demande aucune connaissance de la surface. On remarque que leurs surfaces actives sont les plus grandes. On constate également comme l'étude événement par événement le suggérait, que pour certains sites la surface active est vraiment différente de la surface imperméable, et toujours plus faible.

Site	Surface totale ha	Surface imperméable ha	Surface active ha
Aix Zup	25.6	20	12
Aix Nord	92	32	12
Maurepas	26.7	16	15
Ulis Nord	43.1	18	16
Vélizy	53.2	29	20
Centre Urbain	226	54	24
Ulis Sud	69.1	28	27
Malnoue	185	65	29
Grammont	144	36	25
Chesnay	560	106	46
Baudile	1145	344	197
Mantes	72	28	7.6
la Briche DD11			467
la Briche D11			657
la Briche PHI			694
la Briche Enghien			1380
la Briche PLB			4600

Tableau 4.5: Surfaces actives moyennes calculées

4.2.5. Conclusion

Lorsqu'on met en relation les hauteurs d'eau précipitée et les volumes écoulés par événement, cela met en évidence certains comportements:

- * sur Chesnay et Baudile, il apparaît que le poste pluviométrique de Clichy procure les mesures de pluie les plus significatives;
- * sur Ulis Sud, certains événements doivent être éliminés à cause d'écoulements engendrés par une zone agricole;
- * le coefficient volumétrique est très variable d'un événement à un autre, il n'y a pas de règle générale quant aux facteurs expliquant ces variations;
- * les coefficients de ruissellement moyens sont systématiquement inférieurs aux coefficients d'imperméabilisation, les écarts sont variables, la plus forte différence s'observant sur Mantes;
- * les surfaces actives moyennes sont systématiquement inférieures aux surfaces imperméables (lorsque

celles-ci sont disponibles), les plus fortes différences s'observent sur Mantes et Aix Nord; sur ce dernier site, Hémain (1985 a,b,c) a déjà souligné un problème sur la mesure des volumes.

Pour la reconstitution des volumes, le tableau 4.6 présente le nombre d'événements sur lesquels peuvent porter une reconstitution des volumes grâce à l'équation 2. Le nombre de volumes manquants ramené au nombre de volumes mesurés montre l'importance des reconstitutions pour certains sites: les volumes qui doivent être reconstitués représentent jusqu'à 5 fois le nombre des volumes mesurés. Cela met en évidence le soin qu'il faut apporter à la mise au point des méthodes de reconstitution.

Site	Mesure de pluies	Volumes mesurés	Volumes manquants	
			Nombre	% des mesures
Groupe 1				
Aix Zup	73	73	0	0
Aix Nord	72	66	6	9
Maurepas	156	172	0	0
Ulis Nord	92	93	0	0
Groupe 2				
Centre Urbain	130	72	58	80
Malnoue	110	100	10	10
Grammont	120	96	24	25
Chesnay	155	50	105	210
Baudile	151	78	73	94
Groupe 3				
la Briche DD11	89	16	73	460
la Briche D11	89	17	72	420
la Briche PHI1400	89	18	71	390
la Briche Enghien	89	17	72	420
la Briche PLB	105	18	87	480
Groupe 4				
Ulis Sud	130	74	56	42
Vélizy	141	23	118	510
Mantes	234	25	209	840

Tableau 4.6: Nombre d'événements pour lesquels le volume n'a pas été mesuré, mais peut être reconstitué

4.3. Les données de qualité

4.3.1. Complément des concentrations moyennes et des masses produites par événement

4.3.1.1. Point de départ

Les critères que nous avons définis pour sélectionner les campagnes de mesure constituant la base de données sont respectés pour chacune d'elle. Néanmoins, sauf pour les quatre bassins versants expérimentaux, les mesures de concentrations n'existent pas pour tous les événements d'une année. Or, certaines exploitations que nous nous proposons de mener concernent la pollution produite pendant une longue période: l'estimation des masses annuelles, ou l'efficacité d'ouvrage pour intercepter les masses à long terme. Dans ces cas, nous avons besoin de la concentration ou de la masse de chaque événement. Voilà pourquoi il faut reconstituer les données manquantes avant ce type d'exploitation.

Le tableau 4.7 donne le nombre de mesures de concentrations de MES manquantes sur chaque site par rapport au nombre d'événements recensés pendant la campagne. A quelques événements près les valeurs sont les mêmes pour la DCO et la DBO₅. Ce tableau montre encore une fois l'ampleur des reconstitutions à faire. Au regard de notre objectif (calculer une masse annuelle), de la qualité et du nombre de données disponibles, il n'était pas pertinent d'utiliser des méthodes très précises pour la reconstitution des concentrations, comme par exemple des modèles utilisant la structure des réseaux. Nous avons utilisé la régression multiple qui paraissait plus adaptée dans notre cas. Néanmoins, l'étape de reconstitution étant indispensable, il nous a fallu être rigoureux dans l'établissement des équations de régression et conscient de leurs limites d'application.

Au cours de la mise en oeuvre des équations de régression, nous nous sommes heurtés à une difficulté: lorsqu'on compare les données disponibles sur chaque site et les données nécessaires dans ces équations, on s'aperçoit que sur certains sites aucune valeur ne pourra être reconstituée car les variables qui entrent dans l'équation ne sont disponibles que pour les événements qui disposent déjà de la concentration. C'est le cas pour certains sites lorsque les équations utilisent le volume, la durée de l'écoulement ou le débit de pointe. C'est pourquoi avec la même méthode ont été recherchées les équations de régression sur les valeurs hydrauliques (volume, durée et débit de pointe), à partir uniquement des variables pluviométriques. Les résultats sont présentés en annexe. Ainsi lorsqu'une équation sur la concentration utilise le volume, nous pouvons reconstituer d'abord le volume là où il manque, puis appliquer l'équation sur la concentration en utilisant les volumes calculés.

Site	Evénements recensés	Mesures de qualité (polluant MES)	Concentrations manquantes	
			Nombre	% des mesures
Groupe 1				
Aix Zup	75	54	21	39
Aix Nord	74	52	22	42
Maurepas	174	130	44	24
Ulis Nord	97	81	16	20
Groupe 2				
Centre Urbain	144	25	119	480
Malnoue	178	26	152	580
Grammont	162	27	135	500
Chesnay	186	22	164	745
Baudile	209	27	182	670
Groupe 3				
la Briche DD11	118	16	102	640
la Briche D11	118	17	101	590
la Briche PHI1400	118	18	100	550
la Briche Enghien	118	17	101	590
la Briche PLB	118	18	100	550
Groupe 4				
Ulis Sud	130	31	99	320
Vélizy	141	27	114	420
Mantes	234	25	211	840

Tableau 4.7: Nombre d'événements pour lesquels la concentration moyenne de MES n'a pas été mesurée

4.3.1.2.Méthode pour établir les équations de régression

Les données françaises contenues dans la base de données et décrites dans le chapitre 3, ont été exploitées avec des outils statistiques (Ranchet et al., 1976) (Laveuf et al., 1979) (Ranchet et al., 1979) (Desbordes et al., 1983) (Hémain, 1983 a,b,c) (Servat, 1984, 1985) (Paitry et al., 1984) (Philippe et al., 1987). Pour certaines d'entre elles, des équations de régression multiple ont été établies. (Hémain, 1983 a,b,c) (Paitry et al., 1984). Pour d'autres, seuls des coefficients de corrélation simple ont été calculés (Laveuf et al., 1979)(Ranchet et al., 1976).

Les résultats des différentes études statistiques montrent que chaque site est un cas particulier sur lequel seules des relations qui lui sont propres sont observées. Mais les méthodes utilisées étant différentes, les résultats ne sont peut-être pas comparables. Pour permettre la comparaison entre sites, nous avons appliqué la même méthode sur tous les sites.:

- * nous recherchons les variables qui doivent apparaître dans les équations de régression parmi une liste définie à l'avance et toujours la même;
- * pour déterminer ces variables, nous avons appliqué la même méthode de sélection, celle du "stepwise" (Saporta, 1990): c'est-à-dire qu'en partant de la variable qui explique le mieux les variations observées, on ajoute pas à pas les variables qui augmentent significativement le pourcentage de la variance expliquée.

4.3.1.3. Description des échantillons utilisés

En comparant les variables utilisées dans les différentes études, puis les variables disponibles sur chacun des sites, celles que nous avons retenues pour établir les équations sont les suivantes:

- * Volume écoulé pendant l'événement, VR en m³;
- * Durée de l'écoulement, DR en h;
- * Débit maximal, QMAX en l/s;
- * Débit de temps sec précédent, QTS en l/s;
- * Hauteur précipitée totale, HP en mm;
- * Durée de la pluie, DP en h;
- * Intensité moyenne maximale sur le temps de concentration, IMTC en mm/h;
- * Intensité moyenne maximale sur 5 minutes, IMAX5 en mm/h;
- * Durée de temps sec antécédent, DTS en h;
- * Hauteur précipitée pendant l'événement précédent, HPRECED en mm;
- * Hauteur précipitée 7, 14 et 28 jours avant. H7, H14, H28.

Sur les quatre bassins expérimentaux, nous disposons déjà des résultats de cette méthode (Desbordes et al. 1983). En revanche, pour les données sur les rejets de la Marne (Baudile, Chesnay, Grammont, Malnoue et Centre Urbain), bien que plusieurs auteurs les aient utilisées, il est nécessaire de reprendre les études car les données pluviométriques ont été complétées dans la base et des informations beaucoup plus nombreuses sont aujourd'hui disponibles.

La mise en pratique de la méthode s'est heurtée à quelques difficultés:

Sur certains sites il a fallu restreindre le nombre de variables explicatives à cause du faible nombre de valeurs disponibles. En effet, pour qu'un événement puisse être intégré au jeu de données, il faut que toutes les

variables explicatives qui entrent dans la régression soient disponibles pour cet événement. Il arrive alors que pour satisfaire cette condition, les échantillons soient trop restreints, par exemple le nombre d'observations devient inférieur au nombre de variables! C'est ainsi que H7, H14, H28 et HPRECED ont été retirées pour certains sites. Pour d'autres sites, certaines variables n'ont pas été mesurées pendant la campagne, comme IMAX5, IMTC ou QTS. Et faute de hyétogramme, elles n'ont pas pu être complétées.

La recherche des régressions a été opérée tout d'abord sur les valeurs brutes de concentration, de masse et de volume, pour les sites unitaires et séparatifs pollués. Puis dans un deuxième temps, les fractions représentatives du temps sec leur ont été retranchées. Les résultats obtenus étant tout-à-fait identiques, nous avons conservé uniquement les résultats de la première approche. Sur Ulis Sud, l'échantillon qui a été utilisé ne contient pas les événements pour lesquels l'étude hydraulique du paragraphe précédent a mis en évidence une participation d'une zone rurale attenante. D'autre part, les résultats obtenus sur les sites de la Briche devront être interprétés avec précaution à cause de la taille réduite des échantillons disponibles.

L'étude du paragraphe précédent a montré que le poste pluviométrique de Clichy est le plus représentatif des pluies qui tombent sur les bassins de Baudile et de Chesnay. Pour ces deux sites, uniquement les données provenant de ce poste ont été étudiées. De plus, pour les 5 rejets en Marne (Baudile, Chesnay, Grammont, Malnoue et Centre Urbain) les auteurs du rapport d'étude ont constaté des erreurs dans la mesure de la DCO, c'est pourquoi sur ces sites les échantillons qui portent sur la DCO sont moins importants que ceux des MES et de la DBO5.

VARIABLES ÉLIMINÉES DE LA LISTE	LISTE DES SITES
QTS	Chesnay poste de Clichy , Grammont, Malnoue, Centre Urbain
IMAX5	Ulis Sud, Mantes la Ville
IMAX5, QTS	Vélizy Ouest
H14, H28	Baudile poste de Clichy
IMTC, H14, H28, QTS	La Briche D11, La Briche PLB, La Briche Phi 1400
IMTC, H7, H14, H28, HPRECED, QTS	La Briche DD11, La Briche Enghien

Tableau 4.8: Description des échantillons utilisés pour l'établissement des équations de régression sur la concentration et la masse par événement

Le tri des meilleures variables s'effectue avec le coefficient de corrélation. En effet, le calcul d'un coefficient de corrélation a pour objectif d'évaluer la qualité de l'ajustement linéaire obtenu entre les valeurs de deux variables. Mais le coefficient qu'on calcule provient d'un échantillon extrait de l'ensemble des échantillons possibles. Par conséquent, si la taille de l'échantillon est petite, la valeur du coefficient de corrélation est faiblement représentative, car sujette aux erreurs d'échantillonnage. Dans la suite du chapitre, les coefficients de corrélation seront jugés significatifs s'ils dépassent la valeur seuil au-dessus de laquelle on rejette

l'hypothèse selon laquelle il n'y a pas de relation entre les variables (coefficient de corrélation nul) avec une probabilité de se tromper de 10%. Le tableau B.1 présente pour chaque échantillon les valeurs de ce seuil (calculé à partir d'une table usuelle tirée de Saporta, 1990, p 458)

4.3.1.4. Pourcentages d'explication des équations de régression

Les équations de régression établies sont notées en annexe B.

La qualité des résultats est très différente suivant le site et le polluant. Pour certains échantillons, au seuil de signification choisi (10%), il n'a pas été possible d'établir une équation de régression. C'est-à-dire qu'aucune variable ne présente de corrélation simple significative au seuil de signification de 10%. Pour les autres échantillons les coefficients de signification des équations varient de 0.13 à 0.97. Autrement dit, dans certains cas les pourcentages de variation expliqués par les équations sont très faibles, et l'utilisation de ces équations pour la reconstitution ne sera pas fiable. Pour certains sites, les équations présentent au contraire des pourcentages d'explication très importants (supérieurs à 0.9), elles permettent apparemment de bien représenter les variations des variables étudiées.

D'autre part, sur certains échantillons la recherche d'une équation de régression multiple s'arrête à une seule variable, c'est-à-dire qu'aucune variable ne permet d'améliorer les résultats d'une régression simple. Cela se produit sur un nombre relativement grand d'échantillons, 29/70 soit 40% du nombre total des équations établies. Les coefficients de signification pour ces équations ne sont pas obligatoirement les plus faibles. En effet, ils varient de 0.13 (très faible) à 0.91 (significatif).

Lorsqu'on compare les équations obtenues sur la concentration et sur la masse pour un même polluant, on constate que dans la plupart des cas, le coefficient de signification sur la masse est le plus élevé (22/32 soit près de 70% des équations).

4.3.2. Estimation des masses produites annuellement

4.3.2.1. Méthodes de calcul

La méthode la plus simple pour faire le calcul d'une masse annuelle consiste à additionner les masses des événements d'une période de 1 an. Malheureusement, les données disponibles ne sont pas assez nombreuses pour appliquer cette méthode.

Pour mettre au point une méthode de calcul, il faut se rappeler que pour un événement, la masse produite est le produit de la concentration moyenne par le volume écoulé. Or pour les données qui nous concernent,

l'absence de mesure de masse provient soit d'une absence simultanée de la concentration et du volume, soit du manque de la concentration alors que le volume a été mesuré. Le cas où la concentration aurait été mesurée alors que le volume ne l'aurait pas été, n'existe pas.

Pour reconstituer une concentration, nous utilisons deux méthodes:

- * la remplacer par la concentration moyenne obtenue sur l'ensemble des valeurs mesurées

$$C_{\text{moy}} = \frac{(\text{Concentration par événement} \times \text{Volume écoulé})}{(\text{Volume écoulé par événement})} \quad \text{Eq. 4}$$

- * la calculer par une équation de régression multiple (Cf. § 4.3.1)

Pour reconstituer un volume, nous utilisons également deux méthodes:

- * le calculer avec le coefficient volumétrique moyen (Eq. 2)
- * le calculer par une équation de régression multiple (Cf. § 4.3.1).

Enfin, pour calculer une masse pour un événement, nous avons envisagé trois possibilités en combinant les méthodes précédentes:

- * remplacer la concentration par la concentration moyenne (Eq. 4) et si le volume manque également le calculer avec le coefficient volumétrique moyen (Eq. 2);
- * calculer la concentration par une équation de régression, et si le volume manque également le calculer par une équation de régression;
- * calculer directement la masse par une équation de régression.

En ce qui concerne la masse sur un ensemble d'événements, elle est obtenue en appliquant l'une de ces trois méthodes précédentes sur les événements où la masse n'est pas mesurée. Finalement, cela nous amène à retenir cinq méthodes:

- A. utiliser la concentration moyenne et le coefficient volumétrique moyen;
- B: utiliser l'équation de régression pour la concentration et uniquement les volumes mesurés sans reconstituer ceux qui manquent;
- B': comme B mais en reconstituant les variables hydrauliques (volume, durée de l'écoulement et débit de pointe) lorsqu'elles apparaissent dans l'équation sur la concentration et qu'elles sont manquantes;
- C: utiliser l'équation de régression pour la masse et n'utiliser que les valeurs mesurées pour les variables qui entrent dans l'équation;
- C': comme C mais en reconstituant les variables hydrauliques (volume, durée de l'écoulement et débit de pointe) lorsqu'elles apparaissent dans l'équation sur la masse et qu'elles sont manquantes.

La méthode A est une méthode très simple. qui va servir de référence pour les autres méthodes. Les méthodes

B et C sont les applications directes des équations de régression. Or certains événements ne peuvent pas être pris en compte (par exemple l'équation utilise le volume qui n'est pas mesuré sur tous les événements) Et finalement les calculs sont menés sur des séries d'événements très courtes. Les méthodes B' et C' ont été envisagées pour pouvoir utiliser ces événements et augmenter la longueur des séries d'événements. On reconstitue au préalable les volumes, les durées d'écoulement et les débits de pointe, puis on applique les équations sur la concentration ou la masse.

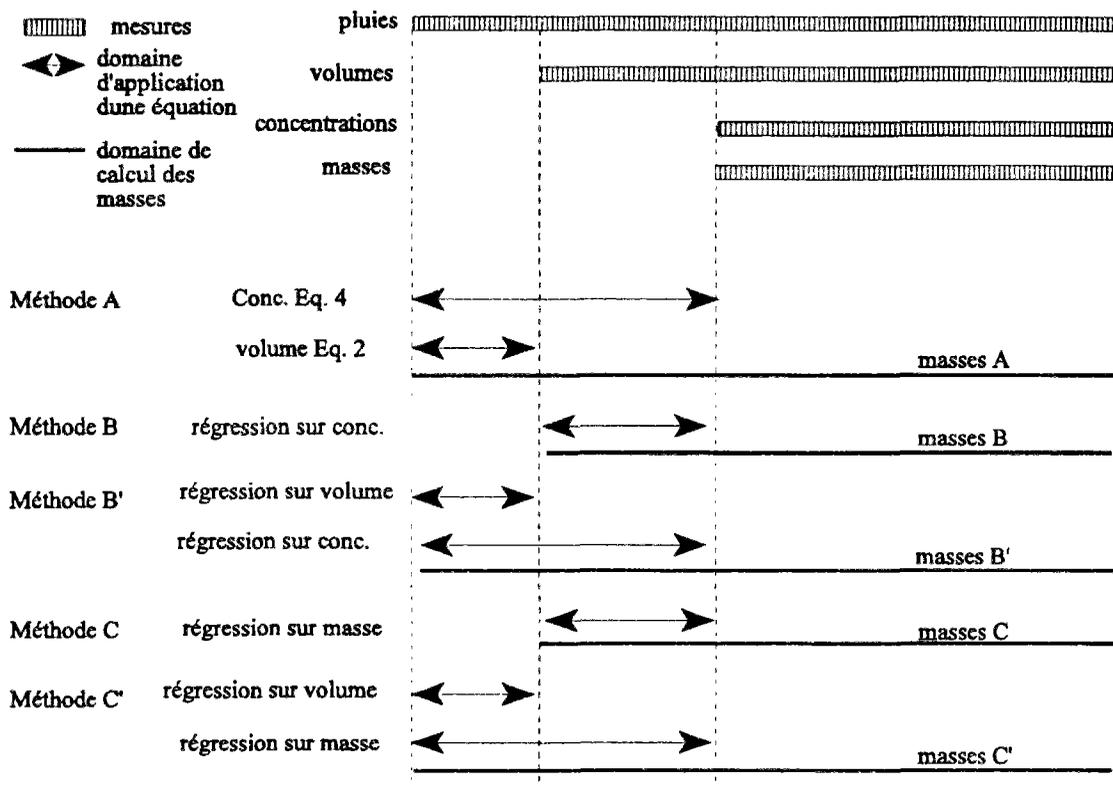


Figure 4.1 Schéma expliquant comment appliquer les méthodes de calcul de la masse annuelle, en prenant l'exemple d'équation de régression sur la concentration et la masse n'utilisant que le volume

Chaque méthode est appliquée sur un nombre d'événements le plus grand possible. L'exemple de la figure 4.1 est un cas théorique où tous les volumes manquants peuvent être calculés, et par conséquent où les méthodes B' et C' utilisent tous les événements. En réalité, les domaines d'application des équations sont beaucoup plus réduits, et la longueur des séries définies par les événements où le calcul est possible ne vaut pas toujours 12 mois. Pour obtenir la masse annuelle, on pondère sur la durée de la série d'événements utilisée.

Enfin, nous donnons pour chaque valeur l'intervalle de confiance à 10% sur la valeur de la masse annuelle, c'est-à-dire que la masse annuelle que nous avons obtenue a une probabilité de 10% de ne pas être effectivement comprise dans l'intervalle.

4.3.2.2. Concentration moyenne sur des séries d'événements différentes

La méthode A peut s'appliquer sur des séries d'événements qui définissent des durées variant entre 10 et 15 mois suivant le site et le polluant. Afin de connaître la stabilité des valeurs annuelles calculées par la méthode A, puis de comparer aux autres méthodes avec les mêmes conditions d'application, deux autres types de calculs ont été effectués:

- * dans le cas où les séries d'événements sur lesquels A peut s'appliquer dépasse 12 mois, calculer les masses sur une durée de 12 mois mais pour des périodes différentes (par exemple du 01.01.81 au 01.01.82, puis du 01.02.81 au 01.02.82...);
- * calculer la masse annuelle avec la méthode A sur les mêmes séries d'événements que celles utilisées par les méthodes B, B', C et C'.

Le premier type de comparaisons permettrait sur des séries très longues de plusieurs années, de déterminer la stabilité des valeurs annuelles, et de mettre en évidence les années pluvieuses ou sèches. Sur les données dont nous disposons, jamais plus de 15 mois, ces calculs permettent de vérifier la stabilité à l'échelle du mois uniquement.

Les résultats consignés en annexe dans les tableaux D.7, D.8 et D.9 indiquent que:

D'une manière générale, le calcul par la méthode A sur des séries de longueurs différentes aboutit à une diminution des valeurs calculées lorsque la longueur des séries augmente. Autrement dit, extrapoler la masse annuelle à partir de série de moins de 1 an a tendance à la surestimer.

Le calcul sur des séries de 12 mois décalées de mois en mois, aboutit à des résultats stables:

- * sur ces calculs, le rapport de la valeur minimale à la valeur maximale de chaque site varie entre 0.86 et 0.93;
- * le même rapport calculé à partir de séries de longueurs différentes varie dans des proportions beaucoup plus grandes.

Cela traduit un caractère saisonnier des masses rejetées, les mois qui sont ajoutés ou retranchés n'apportent pas la même masse. Or la méthode A remplace les concentrations manquantes par une concentration moyenne identique pour tous les événements. Par conséquent les variations saisonnières se font sentir par l'intermédiaire des volumes et de leur fréquence.

4.3.2.3. Comparaison des méthodes A, B, B', C et C'

La comparaison entre la méthode A et les autres méthodes est effectuée de la manière suivante:

- * Tout d'abord, on compare les résultats de la méthode A, obtenus sur les séries de même longueur que les autres méthodes, aux résultats de ces méthodes. En fait, compte tenu des intervalles de confiance calculés pour chaque méthode, on vérifie si la méthode A appartient à ces intervalles. Sur 70 équations, on compte:
 - 29 valeurs de A qui entrent dans les intervalles
 - 41 valeurs de A qui n'y entrent pas
- * Ensuite, on considère les résultats de la méthode A obtenus sur les séries d'événements les plus longues possibles. Sur 70 équations, on compte:
 - 20 valeurs de A qui entrent dans les intervalles des autres méthodes
 - 50 valeurs de A qui n'y entrent pas

Dans les deux cas, les valeurs de A qui n'entrent pas dans les intervalles de confiance des autres méthodes sont les plus nombreuses. Mais, on constate que les valeurs significativement différentes, c'est-à-dire lorsque la valeur donnée par A n'entre pas dans l'intervalle de confiance d'une autre méthode, sont moins nombreuses quand on compare les valeurs sur des séries de même longueur.

Les tableaux en annexe D qui présentent les résultats des différentes méthodes pour chaque site et chaque polluant montrent clairement l'étendue des intervalles de confiance des méthodes utilisant des équations de régression (B, B', C et C'), et par conséquent soulignent l'imprécision des méthodes de calcul. La figure 4.3 représente la répartition des amplitudes des intervalles de confiance pour chacune des méthodes, pour l'ensemble des sites et des polluants.

L'amplitude est définie comme la distance entre la borne inférieure et la borne supérieure de l'intervalle de confiance, ramenée à la valeur de la masse estimée. De plus, pour un site et un polluant, on a défini 2 intervalles pour représenter comment les résultats des 4 méthodes se superposent ou non:

- * l'intervalle maximal couvert par l'ensemble des méthodes: sa borne supérieure est le maximum des bornes supérieures calculées pour chaque méthode, et sa borne inférieure est le minimum des bornes inférieures;
- * l'intervalle commun aux 5 méthodes: sa borne supérieure est le minimum des bornes supérieures et la borne inférieure est le maximum des bornes inférieures; lorsqu'il n'y a pas d'intervalle commun, la borne inférieure est plus élevée que la borne supérieure, alors cela est représenté sur la figure 4.2 par des amplitudes négatives.

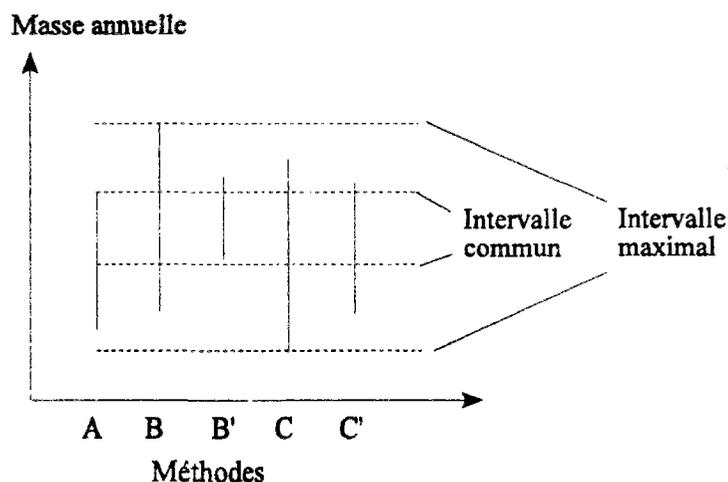


Figure 4.2 Définition de l'intervalle maximal et de l'intervalle commun sur les masses annuelles obtenues par différentes méthodes

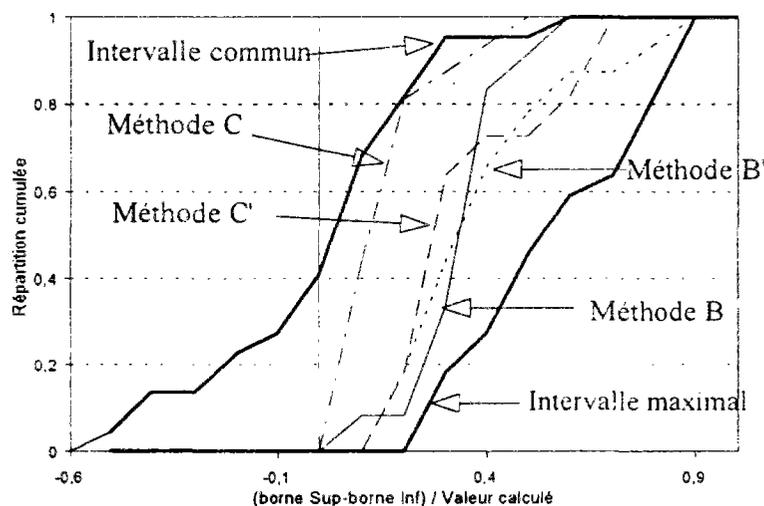


Figure 4.3 Comparaison des intervalles de confiance des masses annuelles obtenues par différentes méthodes

La figure 4.3 ainsi que les tableaux en annexe D1 à D6 donnent les indications suivantes:

La méthode C (une équation de régression sur la masse appliquée exclusivement sur des mesures) présente les intervalles de confiance les moins étendus:

- * 80% des intervalles ont des amplitudes inférieures à 20% de la valeur estimée;
- * les amplitudes les plus fortes sont obtenues sur les séries de moins de 6 mois;
- * les amplitudes de moins de 10% correspondent à des séries de simulation de plus de 9 mois.

Pour les autres méthodes:

- * 80 à 90% des intervalles présentent des amplitudes supérieures à 20%.

Les intervalles maximaux:

- * sont évidemment très larges, jusqu'à deux fois la valeur estimée;
- * ils sont toujours supérieurs à 20% de la valeur estimée;

Les intervalles communs aux 4 méthodes:

- * n'existent pas sur 40% des échantillons (amplitudes négatives), dans ces cas on peut estimer que les résultats des méthodes sont significativement différents;
- * valent jusqu'à 60% des valeurs estimées sur certains échantillons.

4.3.2.4. Estimation finale des masses annuelles

Les résultats des comparaisons précédentes permettent d'émettre quelques règles, afin de déterminer quelle valeur prendre pour la masse annuelle lorsque les différentes méthodes fournissent des résultats très variables:

- * Il faut tenir compte des longueurs des séries simulées. En effet, les calculs avec une concentration moyenne (méthode A) sur des durées différentes tendent à montrer que les variations sont grandes, et que l'extrapolation de la masse annuelle à partir de durées plus faibles n'est pas fiable. On ne retiendra que les durées supérieures à 10 mois, en préférant les calculs faits sur 12 mois.
- * Il faut également tenir compte des coefficients de signification des équations de régression multiple. Car les résultats obtenus avec une équation peu significative n'ont aucune raison d'être proche de la réalité. La limite que nous retenons est 0.5. Au-dessous de 0.5, les résultats ne sont pas jugés fiables et on préférera la méthode A.

Les résultats du tableau 4.9 montre que sur 39 jeux de données:

- * Pour 12 d'entre eux, il est impossible de calculer une masse annuelle avec une équation de régression, car l'équation n'a pu être établie, ou son application ne peut se faire sur un nombre suffisant d'événements, ou son coefficient de signification est trop faible. Dans ces cas, la méthode A (remplacement des concentrations manquantes par une concentration moyenne), est la seule méthode qu'on peut appliquer de manière fiable.
- * Pour les 27 autres, les équations de régression peuvent être appliquées dans des conditions satisfaisantes (durée supérieure à 10 mois, coefficient de signification supérieur à 0.5).

Site	MES	DCO	DBO5
Sites séparatifs			
Vélizy Ouest	26±6 : B' sur 12 mois R ² =0.54	16±2 : B' sur 14 mois R ² =0.57	4.8±0.1 : C sur 12 mois R ² =0.92
Centre Urbain	34.5±2.3 : A sur 12 mois B et C : R ² <0.5	26.8±0.7 : C sur 13 mois R ² =0.5	3.9±0.4 : C' sur 11 mois R ² =0.79
Ulis Sud	178±20 : C' sur 9 mois R ² =0.91	43±4 : C' sur 10 mois	5±0.3 : C' sur 11 mois R ² =0.90
Malnoue	51.4±2 : A sur 12 mois	130±20 : B' sur 6 mois R ² =0.91	13±2 : B' sur 8 mois R ² =0.73
Sites séparatifs pollués et mixtes			
Grammont	44.7±2.3 : A sur 12 mois B : R ² <0.5	32±3 : C' sur 12 mois R ² =0.86	11±2 : C' sur 13 mois R ² =0.85
Chesnay	220±90 : B' sur 11 mois R ² =0.68	240±100 : B' sur 11 mois R ² =0.91	46 ±20 : B' sur 8 mois R ² =0.83
Baudile	660±20 : C sur 12 mois R ² =0.52	360±50 : B' sur 12 mois R ² =0.97	120 : A sur 11 mois
Sites unitaires			
Mantes	32±7 : B' sur 3 mois R ² =0.88	14 : A sur 11 mois	6.2±0.3 : C sur 11 mois R ² =0.54
La Briche DD11	2010±60 : C sur 9 mois R ² =0.67	1980 : A sur 10 mois	695±20 : C sur 9 mois R ² =0.80
La Briche D11	3840±1200 : C' sur 4 mois R ² =0.72	2150 : A sur 10 mois	930 : A sur 10 mois
La Briche PHI1400	1310 : A sur 10 mois	1820 : A sur 10 mois	860 : A sur 10 mois
La Briche Enghien	2360±700 : B' sur 9 mois R ² =0.76	2150±700 : B' sur 9 mois R ² =0.64	1130 : A sur 10 mois
La Briche PLB	10800±3300 : C' sur 7 mois R ² =0.91	13200±2000 : C' sur 7 mois R ² =0.55	5080±1400 : C' sur 7 mois R ² =0.88

Tableau 4.9: Estimation finale des masses annuelles de MES, DCO et DBO5 (valeurs des masses annuelles en tonne, indication des méthodes, des durées des séries simulées et des coefficients de régression multiple)

4.3.3. Conclusion

A partir de l'ensemble des données recueillies, nous avons établi des équations de régression qui ont permis de reconstituer les concentrations et les masses manquantes, qui ont ensuite permis d'estimer les masses annuelles ainsi que leurs intervalles de confiance.

En ce qui concerne la reconstitution des concentrations et des masses par événement, la recherche d'équations

de régression multiple n'a pas toujours abouti:

- * 8 équations sur 78 échantillons n'ont pas pu être établies, car aucune variable n'est significativement corrélée à la concentration ou à la masse;
- * 19 équations sur 70 présentent des coefficients de signification inférieurs à 0.5;
- * 29 équations sur 70 utilisent une seule variable.

En ce qui concerne le calcul de la masse annuelle, nous avons utilisé plusieurs méthodes: concentration moyenne ou équation de régression. Les différentes comparaisons montrent que:

- * le calcul sur des séries d'événement inférieures à 1 an a tendance à surestimer la masse annuelle;
- * lorsque les méthodes sont appliquées sur les mêmes séries d'événement, les résultats paraissent comparables;
- * néanmoins, dans 40% des cas les résultats des méthodes utilisant une équation de régression ne se recouvrent pas;
- * au total, pour 12 cas sur 39, les équations de régression n'ont pas été suffisamment fiables pour servir à calculer la masse annuelle.

On peut comparer nos résultats aux masses annuelles calculées dans les rapports d'étude relatifs à chaque campagne. Ces valeurs ont été établies à partir d'équations de régression qui n'utilisent qu'une variable (hauteur de pluie ou volume ou débit de pointe). Nos résultats sur les masses annuelles sont dans l'ensemble plus élevés que ceux du tableau 4.10. Dans 30% des cas, nos intervalles de confiance contiennent les valeurs du tableau 4.10. Sinon, pour les autres, les rapports entre les valeurs du tableau et nos valeurs varient entre 39% et 120%. L'écart le plus important est obtenu sur Mantes pour la DBO5. En effet, nos valeurs portent sur les masses totales, eaux usées et eaux de ruissellement, (masses qui sont réellement déversées dans le milieu naturel), tandis que les autres portent uniquement sur les eaux de ruissellement. Mais, il faut noter que les pourcentages sur les MES et la DCO valent respectivement 66 et 89%, et compte tenu des intervalles de confiance, les écarts entre les valeurs sont encore moins élevés. La différence sur les résultats ne se retrouve pas pour ces deux paramètres probablement parce que la part des eaux usées est négligeable.

Les masses annuelles que nous avons établies utilisent au mieux les données disponibles. Mais dans le tableau 4.9 on met en évidence quelques anomalies. En particulier, certaines masses de DCO sont supérieures à la masse de MES. Or cela est étonnant à moins d'envisager que la majeure partie de la DCO se trouve sous forme dissoute. Mais plus probablement la qualité parfois douteuse des résultats reflète la qualité des données: elles sont en quantité insuffisante, de qualité médiocre et n'ont pas permis d'établir des équations de régression très explicatives, ou alors ces équations n'ont pas pu être appliquées sur un nombre suffisant d'événements.

Site	MES	DCO	DBO5
Vélizy (Ranchet et al., 1976)	20.9-21.7	9.95-10.1	1.89-1.93
Centre Urbain (Paitry et al., 1984)	41.2	12.5	2.05
Ulis Sud (Ranchet et al., 1979)	163-208	42.3-53.1	5.58-6.39
Malnoue (Paitry et al., 1984)	32.6	59	8.34
Grammont (Paitry et al., 1984)	44.9	32.4	7.69
Chesnay (Paitry et al., 1984)	184	115	27
Baudile (Paitry et al., 1984)	395	294	86
Mantes (Laveuf et al., 1979)	20.1-21	11.6-12.5	2.40

Tableau 4.10: Masses annuelles (tonne) calculées dans les rapports d'étude de chaque campagne