



Agence de l'eau
Rhin-Meuse



Définition d'un protocole de *suivi* des flux polluants *au Rhin à Lauterbourg*

Etude réalisée pour le compte de l'agence de l'eau Rhin-Meuse

Auteurs : Michel Meybeck et Zahid Idlatkih

Laboratoire de géologie appliquée

Université de Paris VI

4. place Jussieu

75252 PARIS 05

Editeur : Agence de l'eau Rhin-Meuse

Mai 1997

40 exemplaires

180francs

© 1997 - Agence de l'eau Rhin-Meuse

Tous droits réservés

DÉFINITION D'UN PROTOCOLE DE SUIVI DES FLUX POLLUANTS AU RHIN À LAUTERBOURG.

Michel MEYBECK et Zahid. IDLAFKIH

Résumé

Les régimes de débit, des MES et des polluants, ainsi que les relations concentrations-débits, et les tests de calcul de flux, sont établis sur la base des données de quatre stations:

Maxau (Allemagne): régimes à long terme des débits (30 ans) des MES (20 ans) du Rhin, ainsi que la relation MES-débits, établis sur la base des suivis journaliers à Maxau.

Seltz (France): régime à long terme et relations avec le débit des ions majeurs et nutriments (20 ans) sur la base de suivis mensuels à bimensuels.

Lauterbourg (France): vérification de la validité du suivi effectué en 1993 (stratégie d'échantillonnage et analyses) et relations avec le débit et les MES des concentrations et des teneurs.

Village-Neuf (Suisse): Comparaison des données acquises sur 10 ans avec les données à Lauterbourg (1993), relations avec le débit et tendances.

Le régime des très fortes crues est nettement dissociable de celui des hautes eaux estivales (mai-juillet). Malgré des débits élevés, les MES du Rhin restent faibles généralement $\ll 100$ mg/l, avec un maximum à 200 mg/l. La relation MES-débit est médiocre, en raison de cycles d'hystérésis crue-décru, de la position des crues dans l'année hydrologique et de leur génèses.

Les régimes des ions majeurs et nutriments sont bien établis. On note nette influence anthropique (cycle hebdomadaire) pour les Cl⁻ à Seltz et Lauterbourg. Pour les polluants en traces les régimes restent généralement mal établis en raison des fréquences d'échantillonnages adoptées mais surtout des limites de détection qui sont encore trop hautes.

Les suivis journaliers des MES (**Maxau**, 20 ans) et de Chlorures (Lauterbourg, 1 an) ont permis de tester des stratégies d'échantillonnages et des modes de calcul des flux.

Sur la base des régimes établis et de l'ensemble des données traitées, des recommandations sont formulées concernant les stratégies d'échantillonnages à adopter dans l'avenir, avec une estimation des précisions sur les bilans annuel et/ou interannuels, des études complémentaires sont aussi recommandées (MES, traces), pour affiner la surveillance des flux à Lauterbourg.

Table des matières

CHAPITRE I

Présentation de l'étude

1.- Présentation de l'étude.....	.1
1.1.- Objectifs.....	.1
1.2.- Site de l'étude.....	.1
1.3.- Données recueillies .....	.3
1.3.1.- Rhin à Maxau (Allemagne).....	.3
1.3.2.- Rhin à Seltz et Rhin à Lauterbourg (France).....	.3
1.3.3.- Rhin à Village-Neuf (Suisse).....	.4
1.4.- Méthodologie suivie.....	.4
1.4.1.- Analyses des données de la station Maxau.....	.
1.4.2.- Analyse des données des stations Seltz .....	.
1.4.3.- Analyse des données de la station Lauterbourg .....	.5
1.4.4.- Analyse des données de la station Village-Neuf.....	.5

CHAPITRE II

Variabilité des débits, des concentrations et des flux des matières en suspension, à Maxau

2.- Régime des débits.	6
2.1.- Variation du débit à Maxau 1962 à 1993	6
2.1.1.- Régime hydrologique du Rhin basé sur les débits mensuels.....	6
2.1.2.- Variations des débits moyens annuels.....	7
2.1.3.- Chroniques des débits journaliers (hydrogrammes annuels)	8
2.1.4.- Variation temporelle des débits journaliers	9
2.1.5.- Fréquence des crues.....	9
2.1.6.- Conclusions.....	.12
2.2.- Variation du débit à Lauterbourg, Seltz et Village-Neuf.....	.13
2.2.1.- Corrélations des débits à Seltz et Maxau.....	.13
2.2.2.- Corrélations des débits à Lauterbourg et Maxau.....	.13
2.2.2.- Corrélations des débits à Village-Neuf et Maxau.....	.13
3.- Régime des matières en suspensions dans le Rhin.....	.15
3.1.- Comportement des matières en suspensions dans le Rhin à Maxau 1973/74 à 1992/93.....	.15
3.1.1.- Régime des concentrations de MES basé sur les moyennes mensuelles.....	.15
3.1.2.- Chronique des concentrations annuelles de MES sur 20 ans.....	.16
3.1.3.- Chronique des concentrations journalières de MES.....	.16
3.1.4.- Variabilité interannuelle des concentrations journalières de MES .....	.18
3.1.5.- Statistiques sur les concentrations extrêmes des MES.....	.19
3.2.- Relation MES-Débit .....	.20
3.2.1.- Limites de la relation générale MES-Débit journaliers.....	.20
3.2.2.- Relation MES-Débit pour les débit de crues et les MES extrêmes.....	.20
3.2.3.- Relations MES-Débit par type de crues .....	.21
4.- Variabilité des flux de MES	23
4.1.- Régime des flux base sur les flux mensuels	23
4.2.- Chronique des flux annuels sur 20 ans .....	.24

4.2.1.- Variation temporelle des flux annuels.....	24
4.3.- Chroniques des flux journaliers.....	25
4.4.- Variabilité interannuelle des chroniques de flux journaliers.....	25
4.5.- Statistiques sur les flux extrêmes.....	25
5.- Simulations de fréquences d'échantillonnage pour le calcul des flux des MES	27
5.1.- Stratégies d'échantillonnages testées	27
5.2.- Méthodes de calcul de flux testées	27
5.3.- Calcul d'erreur	28
5.4.- Résultats et discussion.....	28
5.6.- Conclusions	30

CHAPITRE III

Régimes des descripteurs de la qualité chimique du Rhin (à Seltz, Lauterbourg et Village-Neuf)

6.- Régime des descripteurs de qualité des eaux du Rhin.	32
6.1.- Régime des éléments chimique au Rhin à Seltz (1971-1993).	32
6.1.1.- Représentativité des débits échantillonnés par rapport à la variabilité des débits journaliers	32
6.1.2.- Régime des concentrations des éléments au Rhin à Seltz (1971/93).	32
6.1.3.- Établissement des relations "Concentration-Débit".	37
6.1.4.- Variabilité des flux instantanés des différents éléments.....	41
6.2.- Variabilités des différents polluants au Rhin à Lauterbourg (28 Déc 92 à 30 Déc 93).....	44
6.2.1.- Variation des débits journaliers à Lauterbourg (1993) ..	44
6.2.2.- Représentativité des débit échantillonné par rapport à la variabilité des débits journaliers	44
6.2.3.- Variabilités des différents éléments.....	45
6.2.4.- Simulations de calculs de flux des chlorures	49
6.2.5.- Autre possibilité pour l'estimation des flux des chlorures	53
6.2.6.- Calcul de flux des micropolluants particulaires à Lauterbourg	53
6.3.- Variabilité des descripteurs de la qualité de l'eau au Rhin à Village-Neuf (aval de Bâle) 1985 à 1994	56
6.3.1.- Variation des débits journaliers à Village-Neuf.....	57
6.3.2.- Variabilités des différents éléments	57

CHAPITRE VI

Conclusions:

Stratégies d'échantillonnages à Lauterbourg en vue de l'établissement des flux polluants

7.- Acquits de l'analyse des données à Lauterbourg, Seltz, Maxau et Village-Neuf	66
7.1.- Variabilité générale des descripteurs de la qualité des eaux	66
7.1.1.- Eléments dissous	66
7.1.2.- Eléments particulaires	66
7.2.- Surveillance des polluants en solution (Ions majeurs, nutriments, carbone organique)	69
7.2.1.- Caractéristiques des stations de Village-Neuf, Seltz, Lauterbourg et Maxau.....	69
7.2.2.- Chlorures, sodium et potassium.....	69
7.2.3.- Polluants autres que Cl ⁻ , Na ⁺ et K ⁺	69
7.3.- Surveillance des MES	70
7.4.- Surveillance des micropolluants dissous	70
7.5.- Surveillance des micropolluants particulaires.....	70

8.- Suggestions pour une amélioration du suivi en vue de l'estimation des flux polluants.. .....	.71
8.1.- Analyse des micropolluants organiques .....	.71
8.2.- Analyses des micropolluants inorganiques .....	.71
8.3.- Recueil des MES .....	.71
8.4.- Surveillance continue .....	.72
8.5.- Episodes de crues	72
73	
9.- Stratégies d'échantillonnage à Lauterbourg pour l'établissement des flux polluants .....	.72
9.1.- Débits .....	.72
9.2.- MES .....	.73
9.3. Cl-, Na+ et K⁺	74
9.4.- Nutriments et carbone organique.....	.74
9.5.- Micropolluants organiques dissous .....	.74
9.6.- Métaux totaux sur eau brute.....	75
9.7.- Micropolluants particulaires.....	.75
10. • Formules de calcul.....	.75
10.1.- Flux des substances dissoutes et "totales" .....	.75
10.2. Flux des polluants particulaires.....	.75
11.- Etudes complémentaires souhaitables.....	.76
11.1.- MES.....	.76
11.2.- Analyses des MES .....	.76
11.3.- Echantillonnage.....	.76
Annexes .....	.78

CHAPITRE I

Présentation de l'étude

1.- Présentation de l'étude

1.1.- Objectifs

Ce travail est focalisé sur une analyse des données existantes sur la qualité de l'eau et les débits mesurés à Seltz et à Lauterbourg depuis le début du suivi régulier. Ces informations sont ensuite croisées avec les connaissances acquises sur la variabilité des débits et des concentrations dans les fleuves pour définir les stratégies d'échantillonnages et de calcul des flux polluants. Des données de la station allemande "Maxau" et de la station Suisse "Village-Neuf" sont aussi examinées pour compléter nos informations sur la variabilité des débits, des MES, et des concentrations des différents descripteurs de la qualité chimique de l'eau.

Les principaux objectifs sont:

(i) établissement des causes de la variabilité des polluants tant dissous que particuliers analysés à Lauterbourg avec les débits, les MES, la saison et définir les principales catégories de polluants par leurs comportement.

(ii) établissement avec précisions des relations MES-Débit par type de crue, le régime saisonnier du transport de MES, ainsi que les courbes de durée des flux de MES par rapport à celles des volumes écoulés.

(iii) proposer ensuite une stratégie d'échantillonnage qui prend en compte la distribution des volumes écoulés et/ou des flux de MES transportés pour chaque catégorie de polluants.

(iv) proposer les modes de calculs de flux les mieux adaptés à chaque type de polluants. Les méthodes déjà testées par RIZA (1993), seront considérées mais aussi les autres méthodes déjà proposées dans le cadre de l'étude inter-Agences (Meybeck et al., 1992).

(v) proposer si nécessaire le protocole d'une phase d'étude préliminaire sur le terrain, par exemple sur des prélèvements plus fréquents, de la variabilité fine des micropolluants, afin de pouvoir optimiser la surveillance sur des bases quantitatives, comme cela a été pratiqué sur la Seine (Cossa et al., 1994), la Meuse et le Rhin (Riza, 1993), et en cours sur le Rhône.

1.2.- Site de l'étude

Le Rhin est un fleuve de l'Europe du nord-ouest, il coule depuis les Alpes suisses et se jette dans la Mer du Nord par l'intermédiaire d'un immense delta. Coulant vers le nord (sur environ 1300 km) il traverse le lac de Constance, le Jura et reçoit plusieurs affluents importants. Le Rhin constitue un des premiers axes et une puissante artère économique de circulation de l'Europe Occidentale. Il a bénéficié de nombreux aménagements (dérivations, usines hydroélectriques, ports, ...) pour le rendre accessibles à des chalands d'environ 2000 t jusqu'à Bâle (transport de minerais, combustibles, charbon, engrais,...). Le Rhin constitue donc un véritable couloir industriel, et est depuis longtemps pollué par le déversement d'eaux résiduelles provenant des industries chimiques.

La station de Lauterbourg, située sur le Rhin en aval de Strasbourg, contrôle la qualité des eaux de ce fleuve, à la sortie du territoire français. C'est une station clé de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse au titre du Réseau National de Bassin et de la Commission Internationale pour la Protection du Rhin contre la Pollution (CIPR).

La station de Lauterbourg mise en service en 1993 est caractérisée par un régime hydrologique complexe: les hautes eaux peuvent se produire toute l'année, le bassin étant à cheval sur des régimes de fontes (nivo-pluvial, nival de montagne et glaciaire) et sur des régimes pluviaux (pluvial océanique et pluvio-nival). L'occupation des sols est variée et les sources de pollutions sont à la fois diffuses et ponctuelles avec en particulier les rejets des grandes agglomérations industrielles (Bâle, Strasbourg, ...) et des activités minières.

Antérieurement, la surveillance de la qualité était faite à Seltz, une dizaine de km à l'amont de Lauterbourg.

Enfin, le relief du haut bassin est responsable d'une forte érosion mécanique dont les effets sont largement tamponnés par l'importance des lacs péri-alpins suisses, mais les niveaux de MES mesurés à Lauterbourg peuvent parfois être élevés, ce qui est en fait un vecteur majeur des micropolluants peu solubles.

La figure 1 présente une vue d'ensemble du bassin versant du Rhin ainsi que la position des stations choisies pour la réalisation de ce travail.

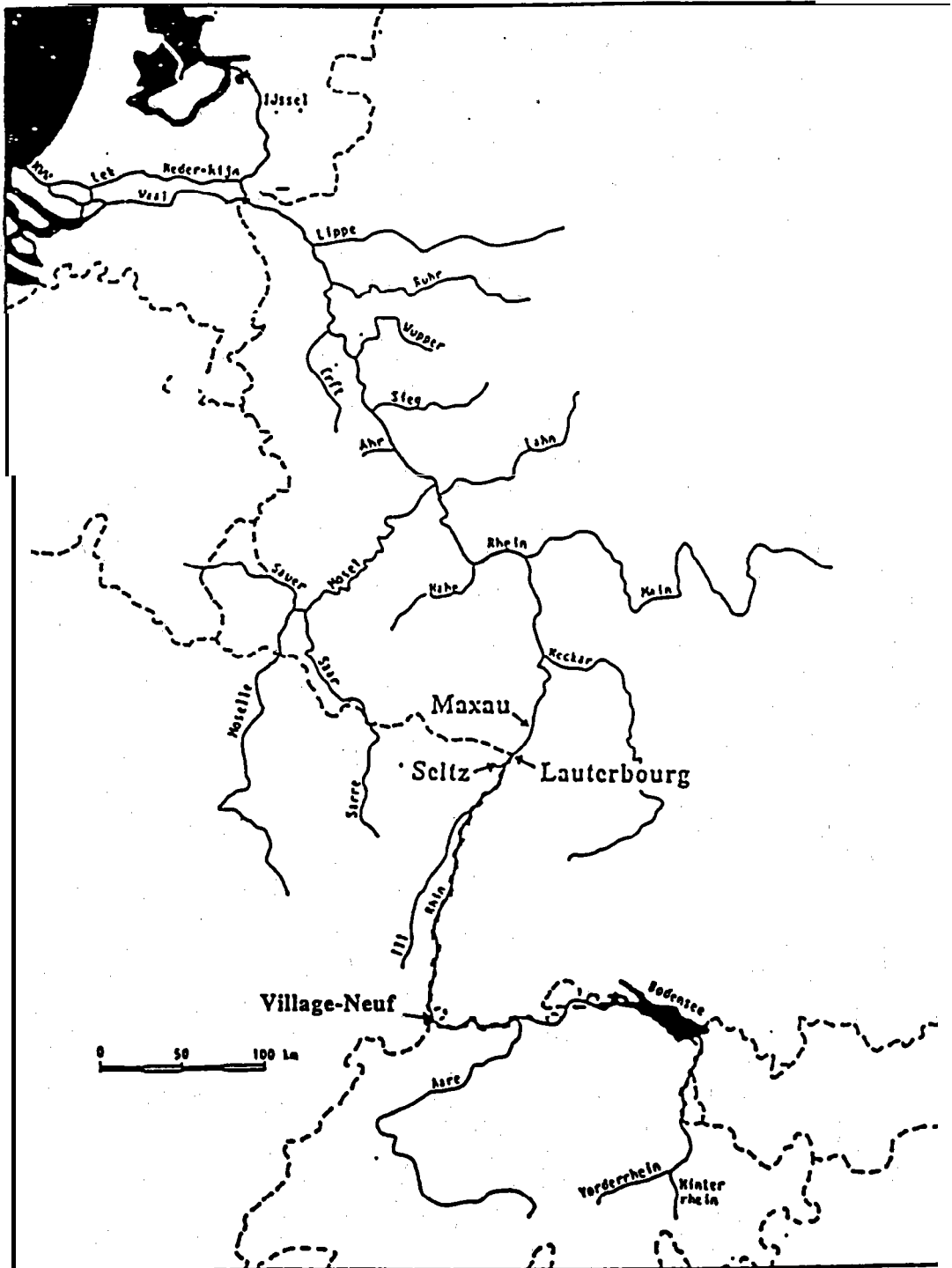


Figure 1:

Carte du bassin du Rhin avec les stations clé de cette étude.

1.3.- Données recueillies:

Nous avons pu collecter les données de quatre stations:

1.3.1.- Rhin à Maxau (Allemagne):

Des données de débits de MES nous ont été aimablement fournies par B. Dröge du "Bundesanstalt für Gewässerkunde de Koblenz".

La nature et la fréquence d'échantillonnage de chaque paramètre sont groupés dans le tableau 1. Cette station constitue l'exutoire d'un bassin versant d'une superficie de 50196 km².

Éléments	Fréquence des données	Période
Débit (m ³ /s) *	données journalières	1962 à 1994
MES (mg/l)	données journalières	1973 à 1993

Tableau 1

Données de la station Rhin à Maxau utilisés dans ce travail.

1.3.2.- Rhin à Seltz et Rhin à Lauterbourg (France):

Ces données nous ont été fournies par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse. Elles concernent les débits, les concentrations des MES et des données de qualité chimique (concentrations des éléments dissous et particulaires).

**** Seltz:** La nature et la fréquence des données sont groupés dans le tableau 2:

Éléments	Fréquence des données	Période
Débit (m ³ /s)	Variable selon les éléments et d'une année à l'autre. En moyenne: c 20 avant 1978 > 30 après 1978	1971 à 1972 &
Ions majeurs (mg/l): Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² , HCO ₃ ⁻ .		
Nutriments (mg/l): NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , NK, PO ₄ ⁻³ , P _{tot} , SiO ₃ ⁻ , COT, COD.		1974 à 1994
As, Mn, Zn, et gamma HCH		1974 à 1994

Tableau 2

Données de la station Rhin à Seltz (France) utilisées dans ce travail.

**** Lauterbourg:** cette station est l'exutoire d'un bassin versant de l'ordre de 49947 km², la nature et la fréquence des données sont groupées dans le tableau 3:

Éléments	Fréquence des données	Période
Débit (m ³ /s) et Cl ⁻	journalière	28/12/92 au 31/12/93
MES (mg/l)	bimensuelle	
Ions majeurs, Nutriments et micropolluants (organiques et inorganiques) dissous.	bimensuelle	28/12/92 au 31/12/93
Micropolluants (organiques et inorganiques) particulaires.	mensuelle	28/12/92 au 31/12/93

Tableau 3

Données de la station Rhin à Lauterbourg (France) utilisés dans ce travail.

1.3.3.- Rhin à Village-Neuf (Suisse):

Ces données nous ont été aimablement fournies par M. Spreafico du Service hydrologique et géologique de Berne (Suisse). Elles concernent les débits, et des données de qualité chimique, (concentrations des éléments dissous et totaux).

La nature et la fréquence des données sont groupés dans le tableau 4:

Éléments	Fréquence des données	Période
Débit (m ³ /s) Conductivité électrique (µS/cm)	journalières	1985 à 1994
Ions majeurs (mg/l): Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² .	bimensuelle	1985 à 1994
Nutriments (mg/l): ** PO ₄ ⁻³ , P _{tot} , NO ₃ ⁻ , N total, SiO ₂ , COT et COD. ** NO ₂ ⁻ NH ₄ ⁺ , NK.	bimensuelle	** 1985 à 1994 ** 1985 à 1986
Métaux en traces totaux: ** Pb, Cu, Zn. ** Cd, Ni, Hg, Cr.	bimensuelle	** 1985 à 1994 ** 1993 à 1994

Tableau 4

Données de la station Rhin à Village-Neuf (Suisse) utilisées dans ce travail.

1.4.- Méthodologie suivie

Des données de suivi de qualités des eaux et de débit sont recueillies pour les stations Maxau, Seltz, Lauterbourg et Village-Neuf. La méthodologie adoptée pour ce travail dépend de la période de suivi et de la fréquence d'échantillonnage.

1.4.1.- Analyses des données de la station Maxau:

Les données sont organisées en années hydrologiques débutant en novembre d'une année et se terminant en octobre de l'année suivante.

Le régime des débits (sur 32 ans), des concentrations et des flux des MES (sur 20 ans) est établi en se basant sur: (i) des statistiques des moyennes mensuelles et annuelles ainsi que les données journalières, un traitement particulier est réalisé pour les valeurs extrêmes des trois paramètres; (ii) variabilité annuelle et interannuelle des trois paramètres basé sur une analyse plus fines des données journalières au cours d'une année et d'une année à l'autre.

La relation générale des MES avec le débit est approchée de plusieurs façons: (i) relation générale MES-Débit par groupe de cinq années hydrologiques réalisée sur l'ensemble des données journalières; (ii) analyse plus fine de la relation pour les débit extrêmes ($> 3500 \text{ m}^3/\text{s}$) et pour les concentrations extrêmes de MES (> 50 et $> 100 \text{ mg/l}$); (iii) analyse fine de comportement des MES lors de quelques crues (cycles d'hystérésis).

Des exercices de simulations de fréquences d'échantillonnages sont effectués sur les 7300 données de MES journalières et les flux sont établis en utilisant deux méthodes de calcul de flux. Les flux ainsi simulés sont comparés aux flux réels. Le but est de définir à une fréquence d'échantillonnage qui permette d'une part de suivre la distribution des concentrations, dans le cadre de la vérification des "objectifs de référence", d'autre part de déterminer des flux, à un coût acceptable et avec une précision satisfaisante.

1.4.2.- Analyse des données des stations Seltz:

Les traitements effectués pour ces éléments sont les suivants: des régressions sont testées entre les débits de Seltz et ceux de Maxau, le but est de voir dans quels limites les débits journaliers de Maxau pourraient être utilisés pour le calcul des flux des polluants mesurés à Lauterbourg et Seltz dont la chronique des débits journaliers n'est pas complète.

De la même façon que pour les débits et les MES les régimes sont établis, sur les 20 ans du suivi pour chacun des polluants, ainsi que les relations avec le débit.

1.4.3.- Analyse des données de la station Lauterbourg:

Ces données sont collectées sur une période plus courte (une année) à la station clé de ce travail. Elles ont fait l'objet d'un examen de la variabilité temporelle, de la variation avec le débit, et de la variation avec les MES. Un examen particuliers sur la fiabilité et la représentativité des données a concerné les éléments en traces organiques et inorganiques.

Les données journalières de chlorures, ont permis de tester des stratégies et des méthodes d'établissement des flux pour cet éléments.

1.4.4.- Analyse des données de la station Village-Neuf:

Les données de cette station sont acquises sur une dizaine d'année (1985 à 1994). Nous avons reçu ces données le 22 novembre 1995, nous en présentons donc seulement un dépouillement sommaire des variations temporelles et des relations avec le débit des éléments, ainsi que des tendances à long terme.

Ces données sont ensuite comparées à celles recueillis à Seltz et Lauterbourg (domaines de variations, limites de détection, ...).

L'objectif est d'aboutir à des recommandations de stratégies d'échantillonnages "provisoires à tester sur le terrain" pour chacun des polluants ou pour des groupes d'éléments.

CHAPITRE II

*Variabilité des débits,
des concentrations et des flux
des matières en suspension,
à Maxau*

2.- Régime des débits

Les flux polluants sont avant tout dépendants des débits (Q), il est en effet rarissime qu'un flux diminue avec Q. Dans la plupart des cas, les flux augmentent modérément avec Q, mais pour les éléments polluants associés aux MES les flux augmentent plus vite. Il est donc essentielle dans une stratégie d'échantillonnage des flux polluants d'établir d'abord le régime des débits et plus particulièrement celui des hautes eaux et des crues.

2.1.- Variation du débit à Maxau 1962 à 1993:

La moyenne inter-annuelle des débits (sur les 32 ans) est de 1280 m³/s.

2.1.1.- Régime hydrologique du Rhin basé sur les débits mensuels:

La figure 1 montre la distribution statistiques (quantiles: déciles, quartiles et médiane) des débits moyens mensuels de 1962/63 à 1993/94 pour chacun des mois de l'année.

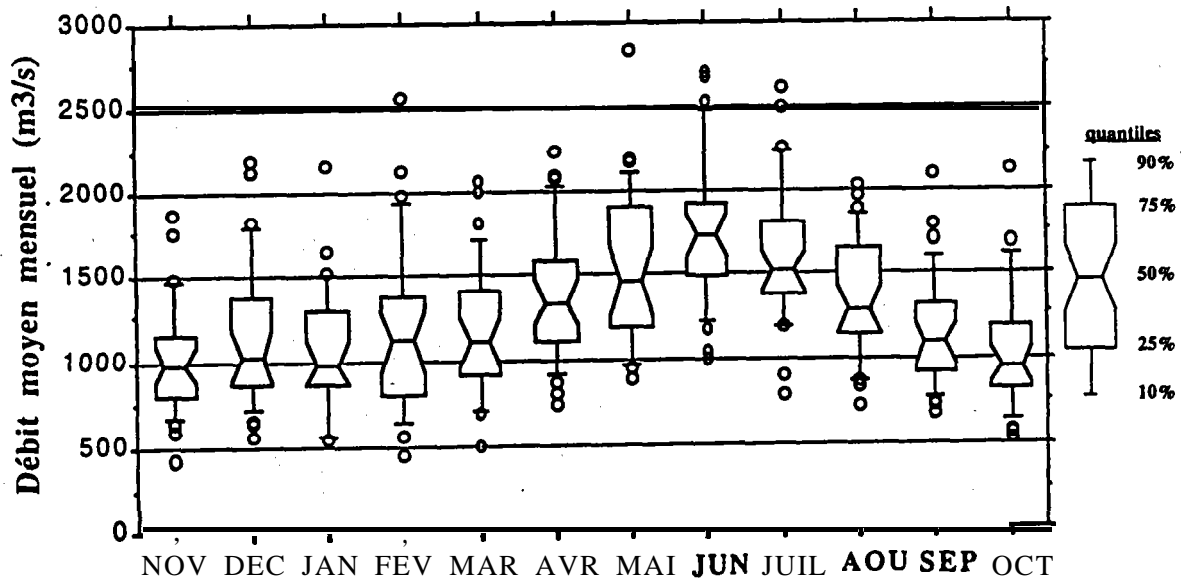


Figure 2

Variations des quantiles des débits moyens mensuels sur la période 1962/63 à 1993/94

(i) La variation des médianes et des quartiles met bien en évidence le régime complexe du Rhin caractérisé par une période principale de hautes eaux d'avril à août due à la fonte des neiges d'altitude moyenne puis des glaciers et par des maximums secondaires de pluies d'automne (novembre-décembre) et de fonte de neiges de basse altitude.

(ii) Les mois de très forts débits, bien mis en évidence par les déciles supérieures, se produisent principalement d'avril à juillet et en février (Q moyen ≥ 2000 m³/s). On note toutefois que certaines années (fréquence de retour décennale et au dessus) des très forts débits peuvent également se produire en décembre, janvier, mars, août, septembre et octobre, c'est à dire quasiment toute l'année!

(iii) Les étiages sont peu marqués en raison sans doute du soutien par les grands réservoirs alpins en période hivernale lors du turbinage pour l'hydro électricité.

(iv) Les écarts entre mois de hautes eaux et de basses eaux sont très faibles par rapport à la plupart des régimes mondiaux. Sur la base des médianes le rapport entre juin (maximum) et octobre (minimum) est inférieur à deux.

2.1.2.- Variations des débits moyens annuels:

La figure 3 montre l'évolution du débit moyen annuel (Q_a) pour chaque année par rapport à la moyenne interannuelle (Q_m) (moyenne des débits journaliers calculée sur la période de 1962/63 à 1993/94). La moyenne interannuelle sur les 32 années est de l'ordre de $1280 \text{ m}^3/\text{s}$, cette moyenne prend en compte des années d'écoulements assez différents (tableau 5). On notera que l'écart entre le minimum et le maximum d'écoulement est très modéré: seulement d'un facteur 2 (800 à $1750 \text{ m}^3/\text{s}$).

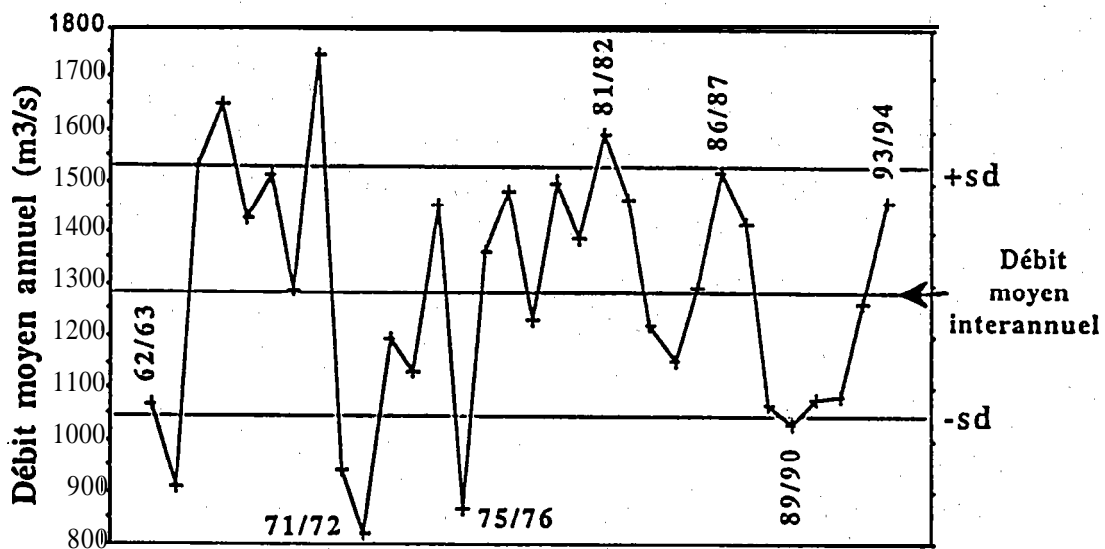


Figure 3

Variations des débits moyens annuels par rapport au débit moyen interannuel ($1280 \text{ m}^3/\text{s}$) sur la période 1962/63 à 1993/94.

Type d'année hydrologique	Caractéristique du Q_a (m^3/s)	Années correspondantes
(i) années de très fort écoulement	$Q_m + sd < Q_a$.	64/65, 65/66, 69/70, 81/82.
(ii) années de fort écoulement	$Q_m < Q_a < Q_m + sd$.	66/67, 67/68, 68/69, 74/75, 76/77, 77/78, 79/80, 80/81, 82/83, 85/86, 86/87, 87/88 et 93/94)
(iii) années faible écoulement	$Q_m - sd < Q_a < Q_m$.	72/73, 73/74, 78/79, 83/84, 84/85, 88/89, 90/91, 91/92.
(iv) années très faible écoulement	$Q_a < Q_m - sd$.	62/63, 63/64, 70/71, 71/72, 75/76, 89/90.

Tableau 5

Typologie des années hydrologiques (novembre à octobre) basée sur les débits moyens annuels.

Q_a : débit moyen annuel. Q_m : débit moyen interannuel, sd : déviation standard.

2.1.3.- Chroniques des débits journaliers (hydrogrammes annuels)

** Hydrogrammes annuels

L'ensemble des hydrogrammes annuels des débits journaliers de 1962/63 à 1993/94 est groupé dans l'annexe 1.

On note une grande variabilité des débits journaliers pendant l'année. Les débits des crues et leurs durées sont aussi assez variables: les crues d'automne et d'hiver sont généralement de courte durée (quelques jours) mais les débits journaliers peuvent atteindre des valeurs très élevées ($> 3500 \text{ m}^3/\text{s}$); les hautes eaux printanières et estivales sont toujours plus étalées dans le temps (> 2 mois) et peuvent aussi atteindre des débits maximums assez élevés ($> 3500 \text{ m}^3/\text{s}$).

** Variabilité interannuelle des hydrogrammes:

Nous avons souligné ci dessus que la période de cette étude a connu des années d'humidité assez variables en se basant sur les débits moyens annuels. Cette variabilité d'écoulement s'observe aussi au niveau des hydrogrammes annuels, ainsi nous avons procédé à une typologie des années hydrologiques sur cette base.

Quatre types d'années hydrologiques sont définies, la figure 4 regroupe des exemples de ces quatre types d'années hydrologiques: (i) très fort écoulement, ex. 1981/82, (ii) fort écoulement, ex. 1979/80, (iii) faible écoulement, ex. 1983/84, (iv) très faible écoulement, ex. 1975/76.

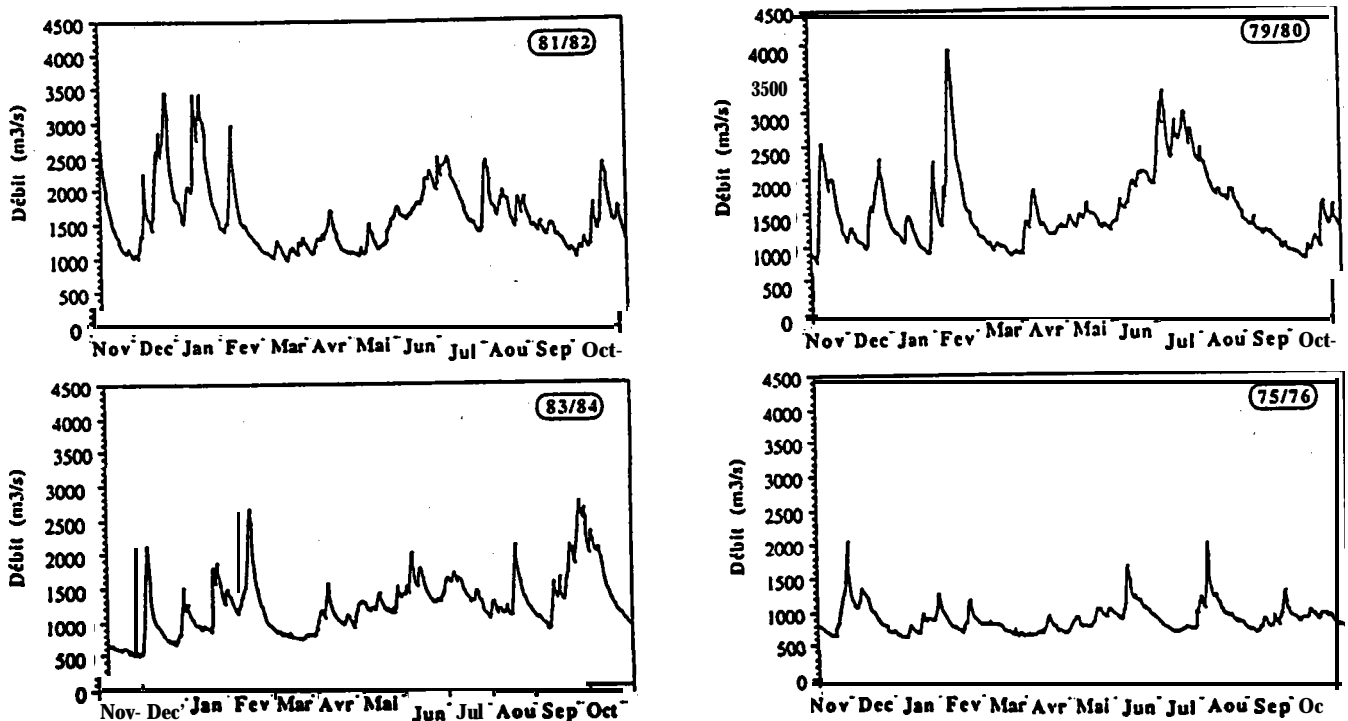


Figure 4

Hydrogrammes types observés sur le Rhin à Maxau.

Il faut noter que l'allure des hydrogrammes annuels est beaucoup plus variable que celle du régime à long terme préalablement défini, les crues pouvant se produire pratiquement toute l'année (voir annexe 1).

2.1.4.- Variation temporelle des débits journaliers:

Variations temporelles des débits journaliers:

La figure 5 montre les variations de quelques paramètres de débits déciles, quartiles, médianes, ainsi que les minimums, maximums et moyennes calculés pour chaque années.

Jusqu'au décile supérieur les différents paramètres varient globalement de la même façon. Les débits maximums annuels varient parfois différemment aux autres paramètres, c'est le cas par exemple en 1967/68, 1972/73, 1977/78, 1989/90, 1991/92 où les crues relatives au débit maximum annuel ont été de courtes durées puisque non reliées à des variations équivalentes des déciles supérieures.

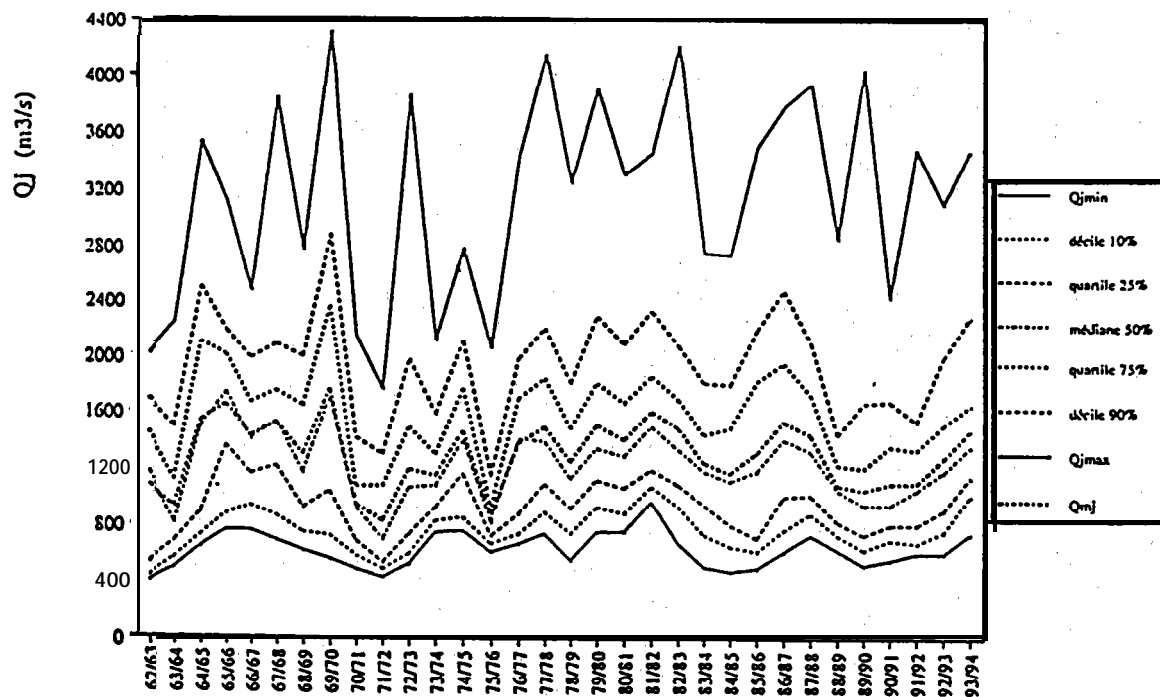


Figure 5

Distribution statistique des débits journaliers par année hydrologique de 1962/63 à 1993/94

Il faut noter aussi la grande concordance entre la courbe des médianes et celle des moyennes annuelles entre 1962 et 1977, de 1977 à 1994.

On observe que sur 30 ans, le régime du Rhin est resté très stable.

2.1.5.- Fréquence des crues:

Variations des quantiles des débits journaliers par mois sur la période 1962/63 à 1993/94:

La figure 6 montre la variation des percentiles des débits journaliers par mois sur la période 1962/63 à 1993/94. Cette figure confirme les observations précédentes: (i) arrivée des crues à n'importe quel moment de l'année, (ii) et la subdivision de l'année en deux grandes phases, basses eaux et hautes eaux.

On observe aussi que les débits journaliers maximums ne sont pas complètement liés aux périodes de hautes eaux: de très fortes crues ($Q > 3500 \text{ m}^3/\text{s}$) ont été observées en novembre, février, mars, avril et septembre alors que, à long terme, ces mois sont caractérisés par des débits moyens ou faibles.

Le régime des fortes crues est donc bien différent du régime des hautes eaux.

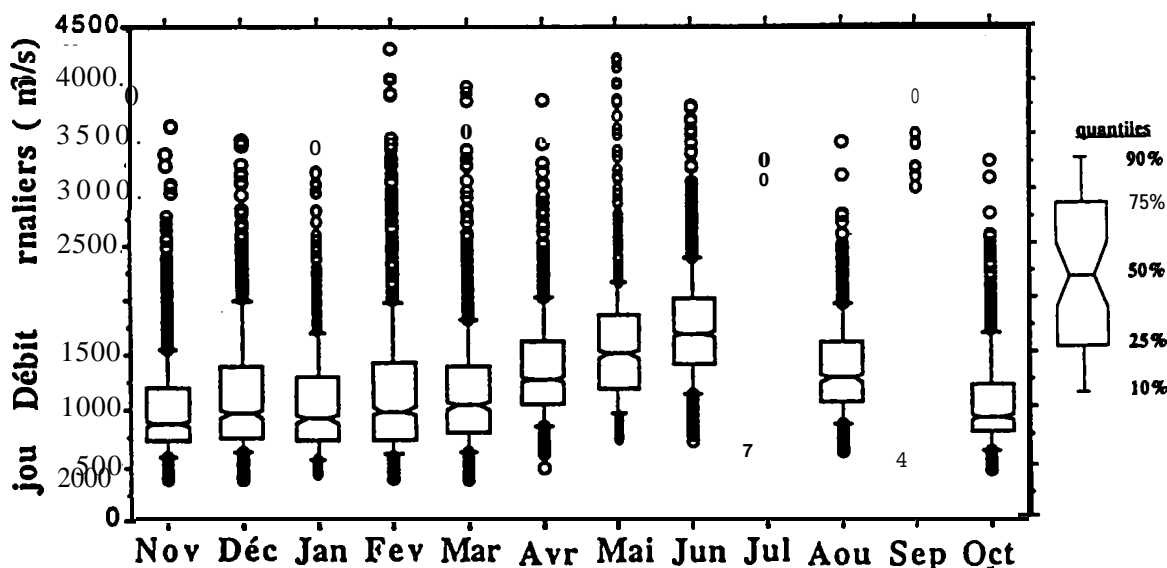


Figure 6

Distribution statistique des débits journaliers sur la période 1962/63 à 1993/94 mois par mois (déciles, quantiles et médiane).

Cette constatation est confirmée par une autre approche: on prend les débits journaliers supérieurs à un débit seuil et on regarde leurs fréquences d'apparition mois par mois au cours de l'année.

Distribution mois par mois des débits. $Q_i > Q_s$

Les débits seuil (Q_s) choisis sont: 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, et 4000 m^3/s . les fréquences de distributions au cours de l'année sont présentées dans la figure 7.

Les fréquences d'apparition des débits journaliers supérieurs à un seuil sont variables au cours de l'année et selon le débit seuil choisi. Plusieurs modes peuvent être observés, le tableau 6 résume les résultats pour les différents débits seuils. Les grandes crues ($Q > 3000 m^3/s$) sont observées en moyenne pendant 3 à 4 jours par an. Les très grosses crues ($Q > 3500 m^3/s$) ne sont observées que 0,27% du temps et se produisent de février à juin.

Seuil de débit (m^3/s)	nombre de valeurs	% du temps	dates des crues
> 1500	3286	28%	
> 2000	1179	10%	
> 2500	351	3.0%	Septembre Décembre Février Juin
> 3000	110	0.94%	Septembre Décembre Février Juin
> 3500	31	0.27%	Septembre Novembre Février Mai
> 4000	6	0,05%	Février Mai

Tableau 6

Distributions des débits journaliers supérieurs à un seuil sur le Rhin

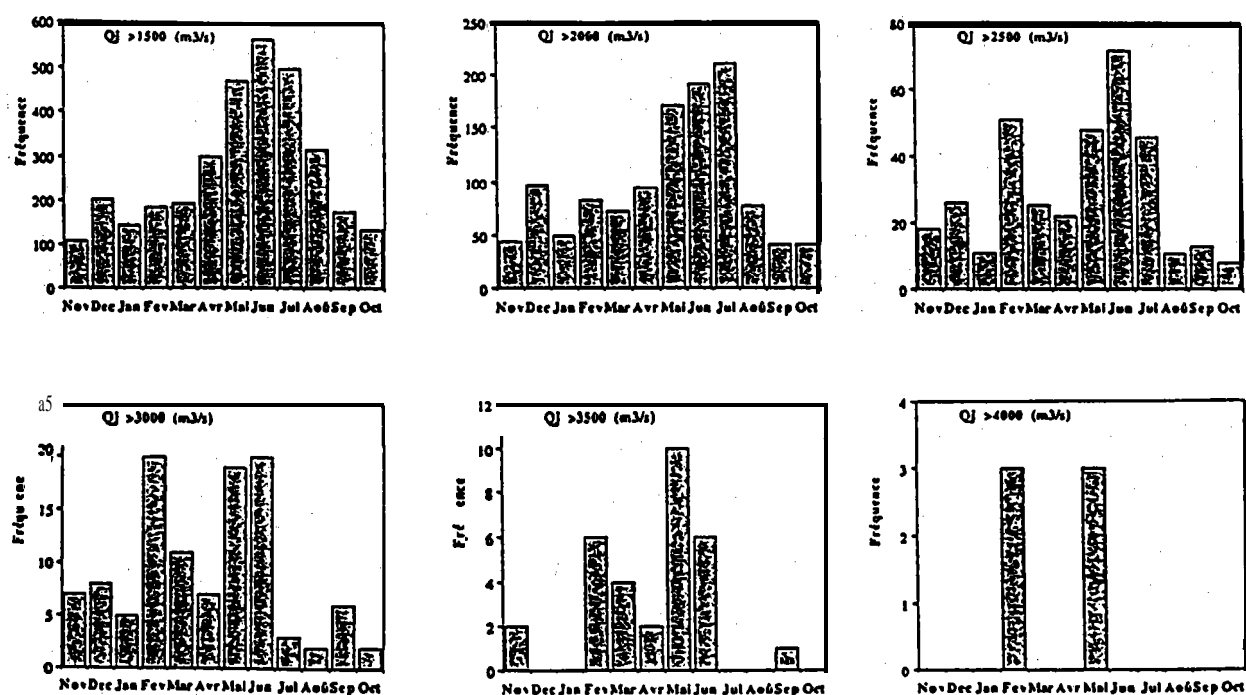


Figure 7

Fréquences d'apparition des débits journaliers supérieurs à un seuil, sur le Rhin (Maxau) (1962/63 à 1993/94).

Distribution mois par mois des débits journaliers par classe de débit. $O_{s1} \leq O_i < O_{s2}$:

Sont considérés ici les débits journaliers supérieurs à 1500 m³/s. ces débits sont ensuite classés en six classes (taille de classe = 500).

La figure 8 montre les fréquences de distributions au cours de l'année des débits journaliers pour chaque classe de débit. On retrouve le même schéma que précédemment avec des distributions plurimodales. Les résultats sont résumés dans le tableau 7.

intervalle de débit (m³/s)	nombre de valeurs	%	dates des max.
$1500 \leq Q_j < 2000$	2107	18%	Décembre < Juin
$2000 \leq Q_j < 2500$	828	7,1%	Décembre c Juillet
$2500 \leq Q_j < 3000$	241	2.1%	Décembre < Février c Juin
$3000 \leq Q_j < 3500$	79	0.68%	Septembre < Décembre < Février = Juin
$3500 \leq Q_j < 4000$	25	0.21%	Septembre < Novembre < Mars < Mai
≥ 4000	6	0,05%	Février = Mai

Tableau 7

Distributions des débits journaliers par intervalles de débits au Rhin

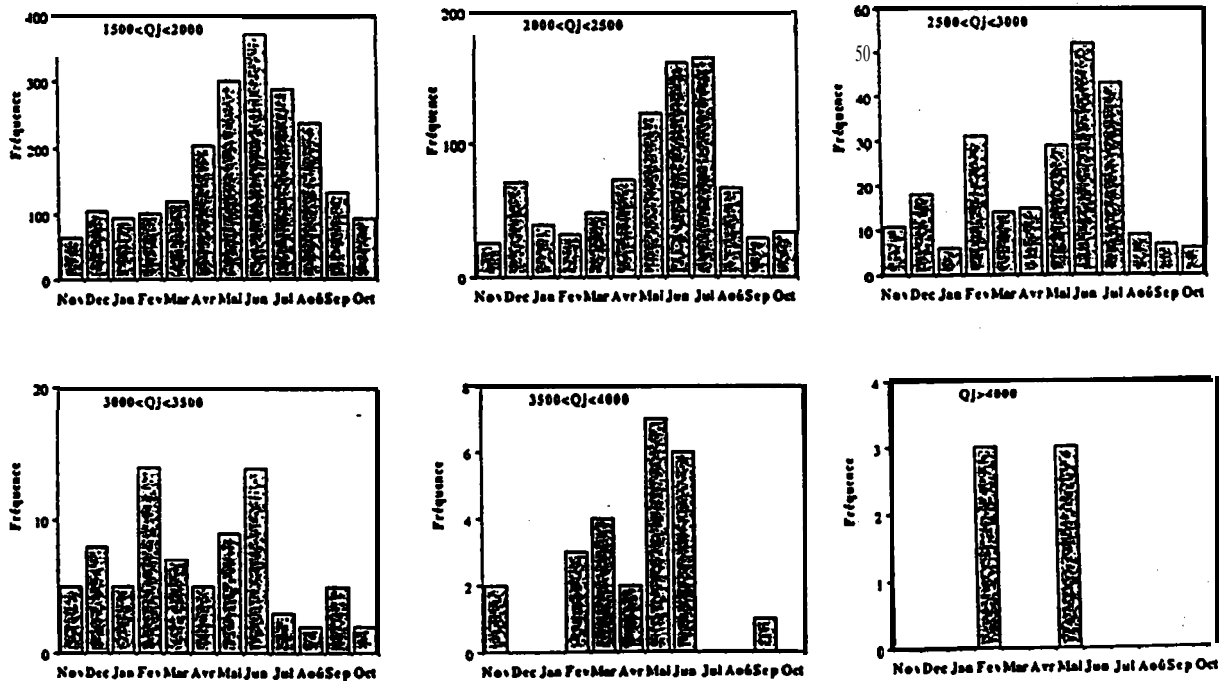


Figure 8

Fréquences d'apparition des débits journaliers par intervalles de débit, sur le Rhin, au cours de l'années.

2.1.6.- Conclusions:

1. A long terme (32 ans) le régime du Rhin est caractérisé par une stabilité importante, tant pour les débits moyens que pour les débits extrêmes.
2. Les hautes eaux de fonte des glaces et neiges (régime nival et glaciaire) s'observent d'avril à août avec un maximum en juin. Deux petits maximums secondaires sont notés en décembre et février.
3. D'une année sur l'autre la variation de l'écoulement annuel est très limitée puisqu'elle n'excède pas un facteur 2,2. Ce comportement est lié au régime glaciaire, de nature thermique.
4. En raison de sa complexité le régime du Rhin à Maxau est caractérisé par une faible amplitude saisonnière (rapport juin/octobre <2).
5. D'une année sur l'autre les hydrogrammes peuvent avoir des allures très variables. En effet les crues ($Q > 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ soit 2 fois le module annuel) peuvent se produire toute l'année, en particulier de novembre à juillet.
6. Les très forts débits ($Q > 3500 \text{ m}^3/\text{s}$) ne sont observés que 0,27 % du temps et peuvent se produire soit en période de débits moyens (novembre, février, mars) soit en période de hautes eaux (mai, juin). Mais des crues moyennes ($Q > 3000 \text{ m}^3/\text{s}$) ont aussi été remarquées d'août à janvier.
7. Les étiages sont remarquablement soutenus, sans doute par l'action des barrages hydroélectriques qui fonctionnent essentiellement en hiver.

2.2.- Variation du débit à Lauterbourg, Seltz et Village-Neuf:

Nous ne disposons pas de données de débits journaliers suffisamment complètes pour étudier le régime et les crues aux stations Seltz et Lauterbourg.

Nous avons tout d'abord testé les corrélations avec les débits observés à la station de Maxau pour vérifier si les observations effectuées à cette station pouvaient être extrapolées. Les débits journaliers de Village-Neuf sont aussi corrélés à ceux de Maxau sur la période 1985 à 1994.

2.2.1.- Corrélations des débits à Seltz et Maxau:

On note une très bonne corrélation entre ces deux stations avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,98$ pour plus de 540 points (figure 9A).

Cette corrélation concerne les débits entre 500 et 3000 m³/s et ne permet pas de conclure pour les débits lors des grandes crues ($Q > 3000$ m³/s). Les débits à Seltz (≈ 49500 km²) sont de 2 % inférieur à ceux de Maxau (50196 km²).

2.2.2.- Corrélations des débits à Lauterbourg et Maxau:

On note de la même façon une très bonne corrélation entre ces deux stations avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,97$ pour plus de 369 points (figure 9B).

Cette corrélation n'a pu être établie que pour des débits entre 500 et 3000 m³/s. Les débits à Lauterbourg (49947 km²) sont d'environ 10% plus faibles que ceux de Maxau.

La différence entre Seltz et Lauterbourg est suspecte, Seltz étant la station la plus amont. Les débits des deux stations sont légèrement plus faibles que ceux enregistrés à Maxau. Cependant cette différence est négligeable généralement (< 10 %) et les variations sont assez similaires entre les stations.

2.2.2.- Corrélations des débits à Village-Neuf et Maxau:

On note de la même façon une très bonne corrélation entre les débits en ces deux stations avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,88$ pour environ 3650 points (figure 9C).

Les débits à Village-Neuf sont d'environ 15% plus faibles que ceux de Maxau. Cette différence est liée à la différence des superficies de bassins versants correspondant à ces deux stations.

Bien qu'il y a des différences entre les trois stations (Seltz, Lauterbourg et Village-Neuf) et la station de Maxau ces corrélations témoignent de variations de débits similaires, le régime de débit est le même pour les quatre stations.

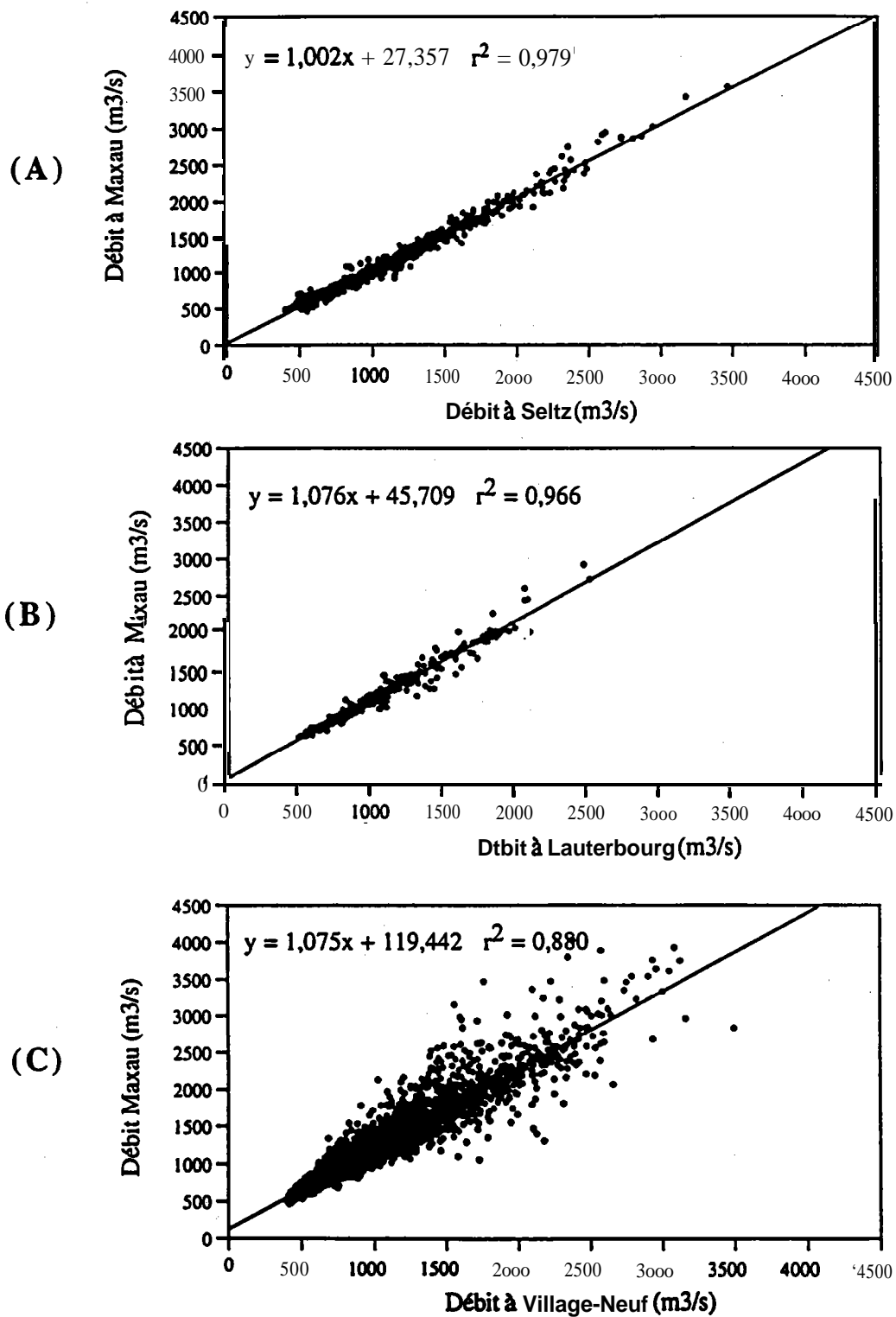


Figure 9

Corrélation des débits journaliers au stations (A) Rhin à Seltz et Rhin à Maxau, (B) Rhin à Lauterbourg et Rhin à Maxau, (C) Rhin à Village Neuf et Rhin à Maxau,

3.- Régime des matières en suspensions dans le Rhin:

Les matières en suspension (MES) jouent un grand rôle dans les transferts de polluants inorganiques (métaux) et organiques (organochlorés, etc...) ainsi que pour les nutriments (carbone, azote, phosphores).

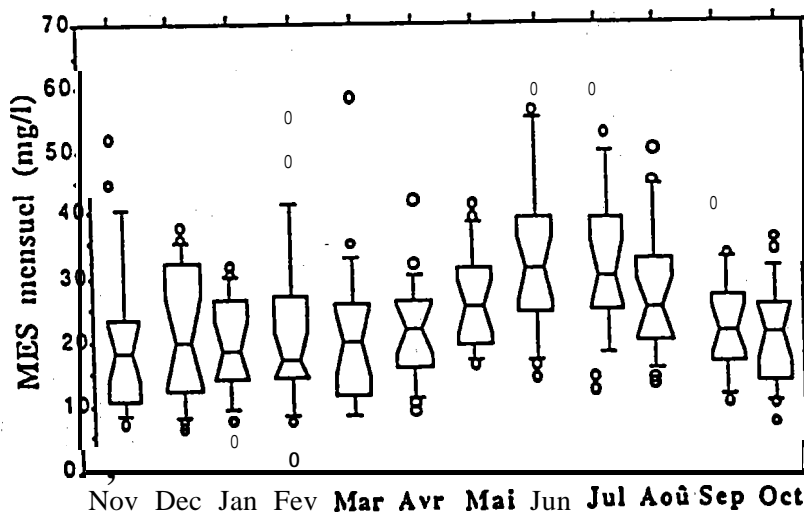
3.1.- Comportement des matières en suspensions dans le Rhin à Maxau 1973/74 à 1992/93:

Pour les MES nous disposons de données journalières des concentrations de MES (en mg/l) depuis novembre 1973 et jusqu'à octobre 1993.

Rappel: les données de Maxau sont ordonnées en années hydrologiques commençant en novembre d'une année et se terminant en octobre de l'année suivante.

3.1.1- Régime des concentrations de MES basé sur les moyennes mensuelles:

Pour chaque année hydrologique (de 1973/74 à 1992/93) les concentrations moyennes mensuelles de MES sont calculées à partir des données journalières des concentrations instantanées des MES. Les distributions statistiques mois par mois des concentrations mensuelles est représenté dans la figure 10, elles correspondent au régime à long terme des MES à Maxau. Ces moyennes mensuelles individuelles varient en général de 5 mg/l à environ 60 mg/l. Les valeurs médianes sur 20 ans varient entre 15 et 30 mg/l.



Figure

Variations des quantiles des concentrations moyennes mensuelle pour chaque mois sur la période 1973/74 à 1992/93

Cette distributions est comparable à celle des débit mensuels (cf. figure 2); elle met en évidence:

(i) les variations des médianes et quartiles retracent les deux grandes phases au cours de l'année: d'abord une phase peu turbide et qui correspond à la période des basses eaux (de septembre à février), et une phase relativement plus turbide correspondant à la période des hautes eaux (de mars à août).

(ii) Des turbidités importantes peuvent être notées certaines années en novembre et février.

(iii) D'une façon générale, les moyennes mensuelles mettent en évidence un fleuve peu riches en MES (de l'ordre de 25 mg/l) en raison de la rétention très efficace des MES

Constance) et de certains barrages réservoirs de type alpin mais surtout les barrages au fil de l'eau dans le Rhin canalisé en aval de Bâle.

3.1.2- Chronique des concentrations annuelles de MES sur 20 ans:

Les concentrations moyennes annuelles (moyennes arithmétiques) varient de l'ordre de 15 mg/l à environ 30 mg/l ce qui représente une faible variation par rapport à d'autres grands fleuves?. Au cours de cette période (1973/74 à 1992/93) sur la base des MES annuels on note des différences relatives de turbidités d'une année à l'autre des groupement d'années avec:

- (i) des années "peu turbides" (MES < 20 mg/l): 75/76, 78/79, 83/84 et 88/89;
- (ii) des années "turbides" ($20 \leq \text{MES} < 25$ mg/l): 77/78, 79/80, 80/81, 82/83 et 84/85;
- (iii) et des années "très turbides" (MES ≤ 25 mg/l): 73/74, 74/75, 76/77, 81/82, 85/86, 86/87, 87/88, 89/90, 90/91, 91/92 et 92/93.

La figure 11 montre la variation temporelle des concentrations moyennes annuelles des matières en suspension sur la période de l'étude.

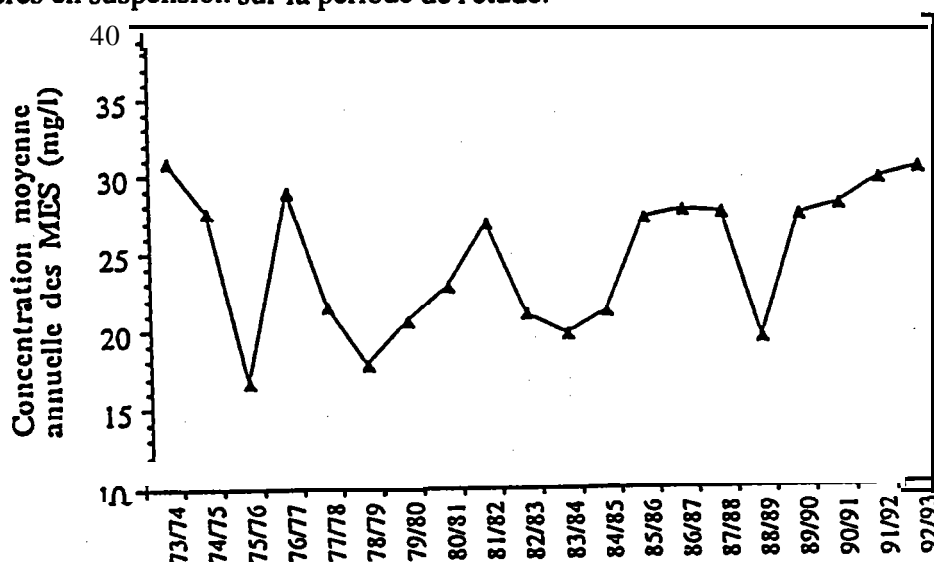


Figure 11

Variation temporelles des concentrations moyennes annuelles des MES dans le Rhin à Maxau (1973/74 à 1992/93).

3.1.3.- Chronique des concentrations journalières de MES:

Les concentrations des MES journalières varient sur deux ordres de grandeurs comme pour la plupart des fleuves: (i) en étiages elles sont de l'ordre de quelques (mg/l) à quelque dizaines de (mg/l), (ii) lors des crues les MES augmentent considérablement et peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 200 mg/l (pendant les 20 années du suivi les MES > 200 mg/l ont été observé deux fois).

Cependant le maximum atteint lors des crues est variable d'une crue à l'autre.

Les variations des concentrations journalières de MES de 1973/74 à 1992/93 sont présentées année par année dans l'annexe.

En général lors des crues l'augmentation des concentrations des MES se fait au même moment que la montée des eaux. En phases de décrues la chute des concentrations des MES se fait de façon plus rapide que la descente des débits, ainsi dès les premiers jours de la décrue les concentrations des MES redeviennent assez faibles et comparables à celle observées en étiage.

Ce comportement des MES est identique à celui observé sur d'autres fleuves notamment la Seine et la Garonne.

La figure 12 regroupe quelques exemples de variations des MES et de débits lors de certaines crues observées entre 1973/74 et 1992/93. Ces crues sont choisies pour différentes périodes de l'année: hivers, printemps, été et automne.

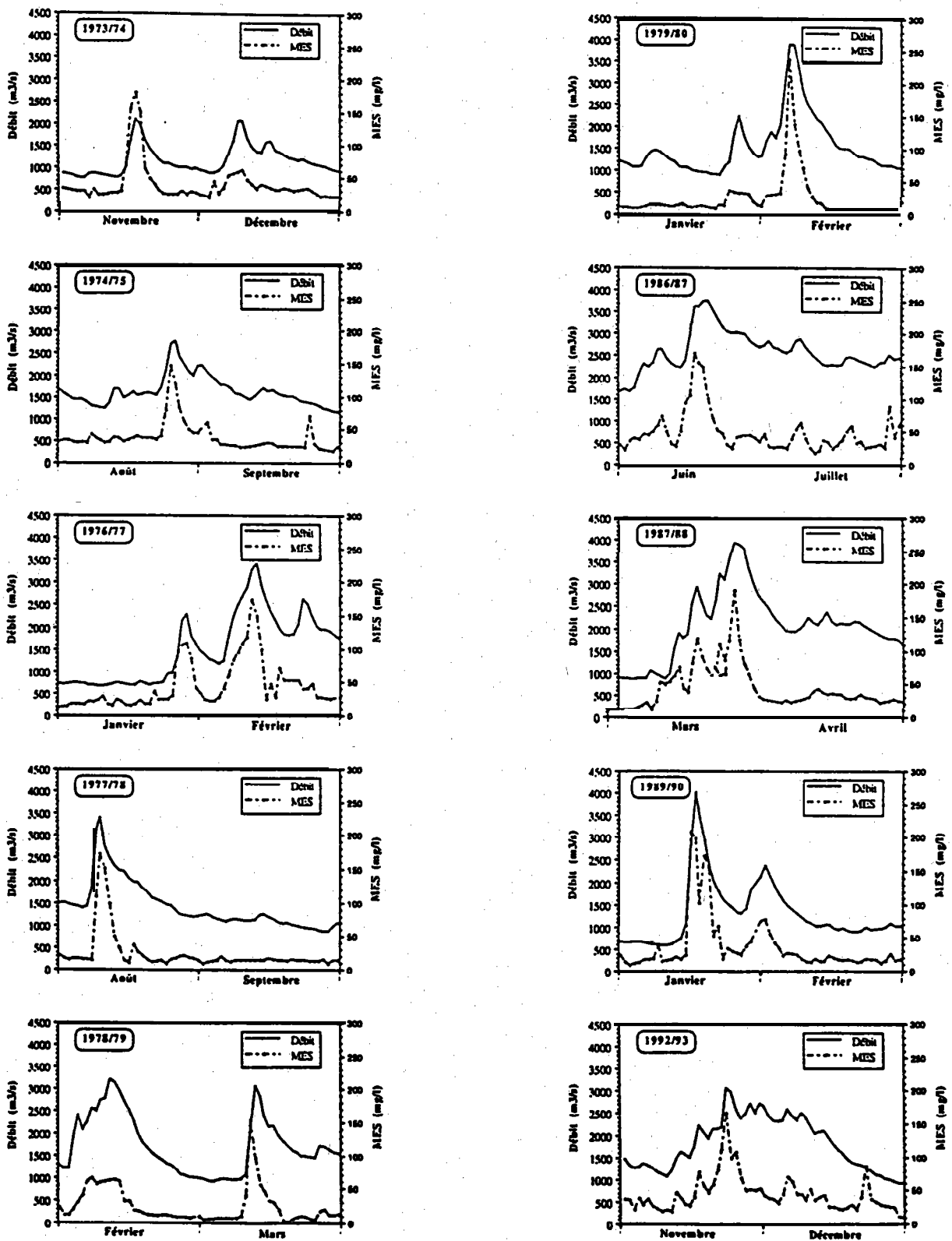


Figure 12

Variations comparées des débit journaliers et des concentrations journalières des MES lors des certaines crues observées sur la période 1973/74 à 1992/93. Les années hydrologiques vont de nov. à oct.

3.1.4.- Variabilité interannuelle des concentrations journalières de MES:

La variabilité des concentrations de MES étant liés à celle des débits, nous avons choisi pour illustrer cette variabilité interannuelle les mêmes exemples que ceux choisis pour les débits (1975/76, 1979/80, 1981/82, et 1983/84). Ainsi la figure 13 montre l'évolution des MES journalières correspondant à ces années types.

1975/76 - à cette année de faible hydraulicité correspond des MES inférieures à 30 mg/l avec trois pics de courtes durée entre 60 et 140 mg/l (novembre, juin, juillet).

1979/80 - la très grande crue de février 1980 est caractérisée par des MES record dépassant 200 mg/l. La période estivale de hautes eaux très marquée ($Q > 2000 \text{ m}^3/\text{s}$) n'est pas accompagnée par des MES élevées.

1981/82 - les pics de crues hivernales (décembre, janvier, février) ne sont pas caractérisés par des MES élevées: le maximum annuel (MES > 100 mg/l) est noté en juillet et août pour des débits modérés.

1983/84 - les deux crues principales (février et septembre) sont caractérisées par des fortes MES (> 80 mg/l).

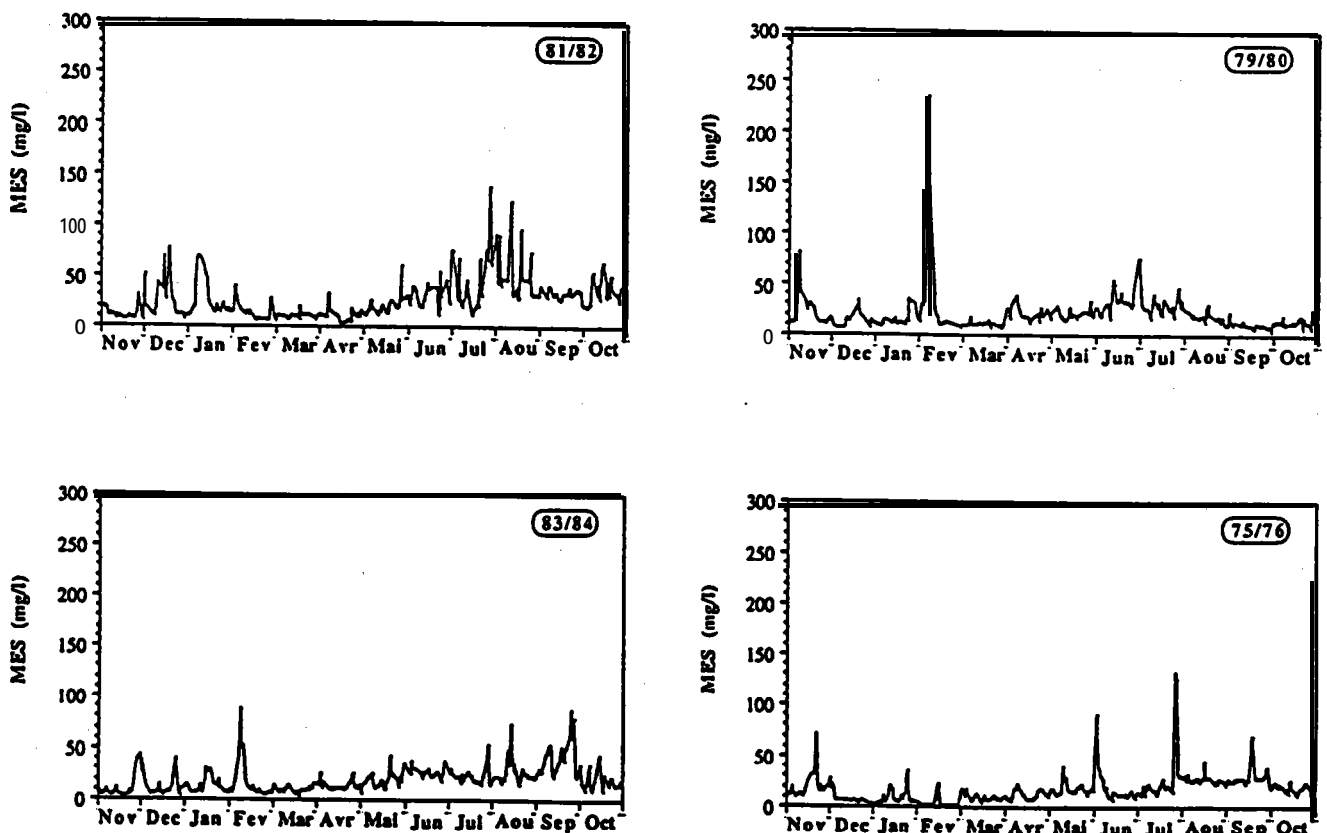


Figure 13

Concentrations des matières en suspensions journalières correspondant à quatre types d'années hydrologiques observées sur le Rhin à Maxau (voir figure 3).

3.1.5.- Statistiques sur les concentrations extrêmes des MES:

Nous avons vu précédemment que les crues arrivent n'importe quand dans l'année et lors des montées des eaux les concentrations des MES augmentent aussi. La distribution des concentrations élevées de MES au cours de l'année reflètent-elle celle des débits?

La distribution des fréquences d'apparition des MES supérieures à un seuil (MES > 50, MES > 100, MES > 150 et MES > 200 mg/l) mois par mois pendant l'année est présentée dans la figure 14.

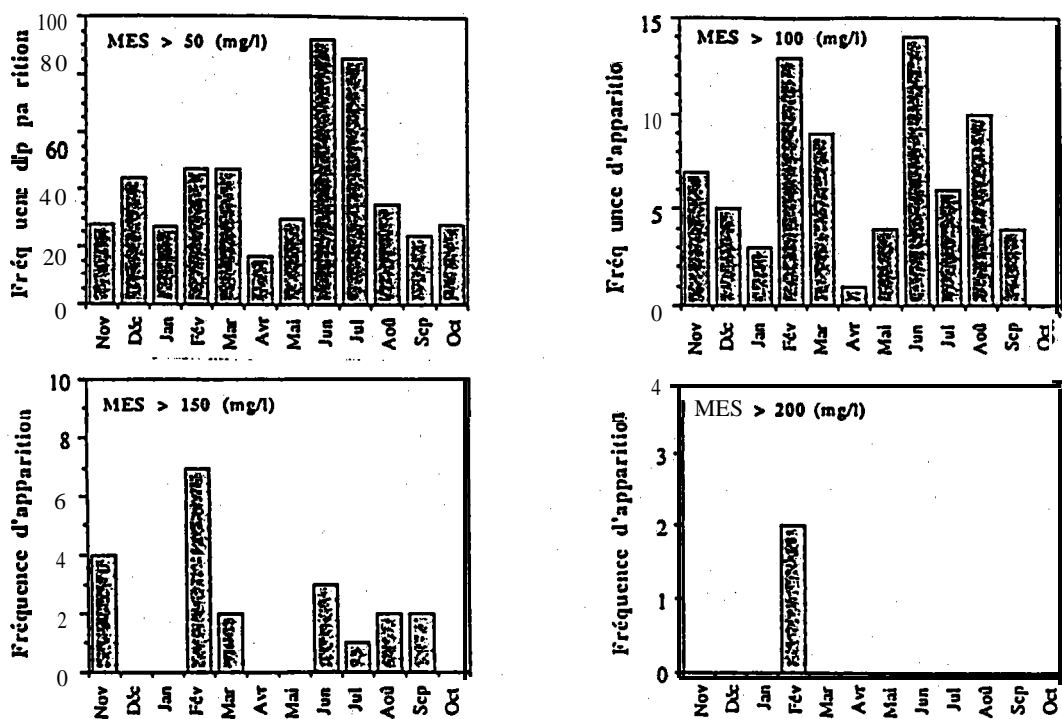


Figure 14

Distribution des concentrations de MES supérieurs à 50, 100, 150 et 200 mg/l au cours de l'année, données de 1973/74 à 1992/93.

Le tableau 8 résume les résultats pour les différentes concentrations seuil choisie. On note en particulier que pendant les 20 ans de ce suivi: (i) les concentrations de MES > 50 mg/l (double de la moyenne à long terme) apparaissent durant toute l'année, (ii) les MES > 100 mg/l n'ont jamais été observées en octobre, (iii) les MES > 150 mg/l n'ont jamais été observé en décembre, janvier, avril, mai et octobre, (iv) et les MES > 200 mg/l n'ont été observé qu'en février (deux jours pendant les 20 ans).

Seuil de MES (mg/l)	nombre de valeurs	%	dates des modes
> 50	505	6.9 %	Décembre < Février-Mars c Juin
> 100	76	1.0 %	Novembre < Août < Février c Juin
> 150	21	0.3 %	Juin < Novembre < Février
> 200	2	0.03 %	Février

Tableau 8

Distributions des concentrations de MES journalières supérieurs à un seuil sur le Rhin à Maxau

3.2.- Relation MES-Débit

3.2.1.- Limites de la relation générale MES-Débit journaliers.

** Établissement de la relation générale:

Afin de tester une éventuelle tendance à long terme, la relation générale MES-Débit est réalisée par groupe de cinq années hydrologiques, les quatre relations obtenues sont présentées par la figure 15.

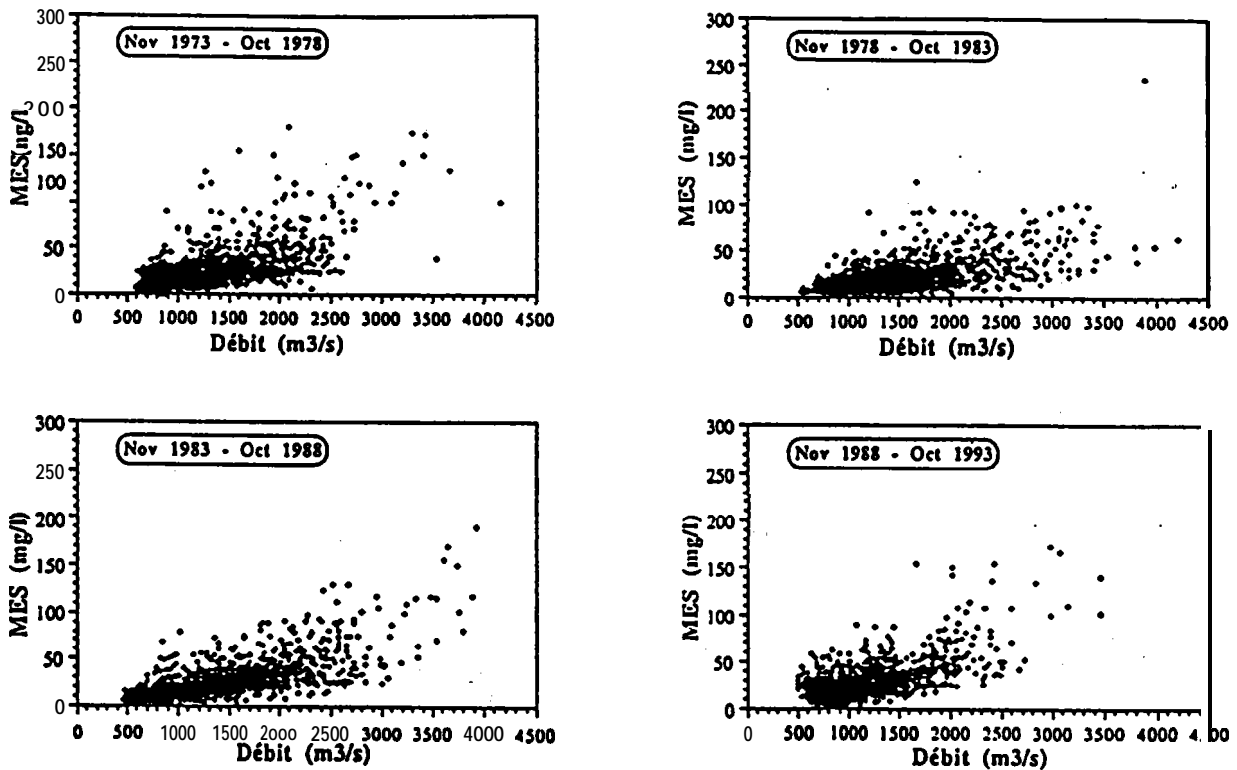


Figure 15

Rhin à Maxau (1973/74 à 1992/93)

Relation générale MES-Débit journaliers, réalisée en quatre groupes de cinq années hydrologiques.

Pour chacune de ces relations on remarque: (i) un groupement général de plus de 90% des mesures pour les points correspondants à des débits compris entre 500 et 2500 m³/s et des concentrations de MES < 50 mg/l, (ii) Les points correspondants à des débits Q > 2500 m³/s (débits de crues) et/ou MES > 50 mg/l sont nettement plus dispersés.

À ce niveau il est clair qu'il n'est pas possible de conclure à une relation générale entre les débits et les MES, le comportement en étiage et lors des crues n'étant pas le même, et les crues étant différentes les une des autres. On note d'autre part que les différences entre les quatre périodes considérées ne sont pas significatives.

3.2.2.- Relation MES-Débit pour les débit de crues et les MES extrêmes:

Pour cette relations trois cas sont étudiés sur les 20 années du suivi: (i) Q > 3500 m³/s, (ii) MES > 50 mg/l, (iii) MES > 100 mg/l. Les relations MES-Débits sont présentés par la figure 16, les mois correspondant à chaque couple MES/Q ont été identifiés.

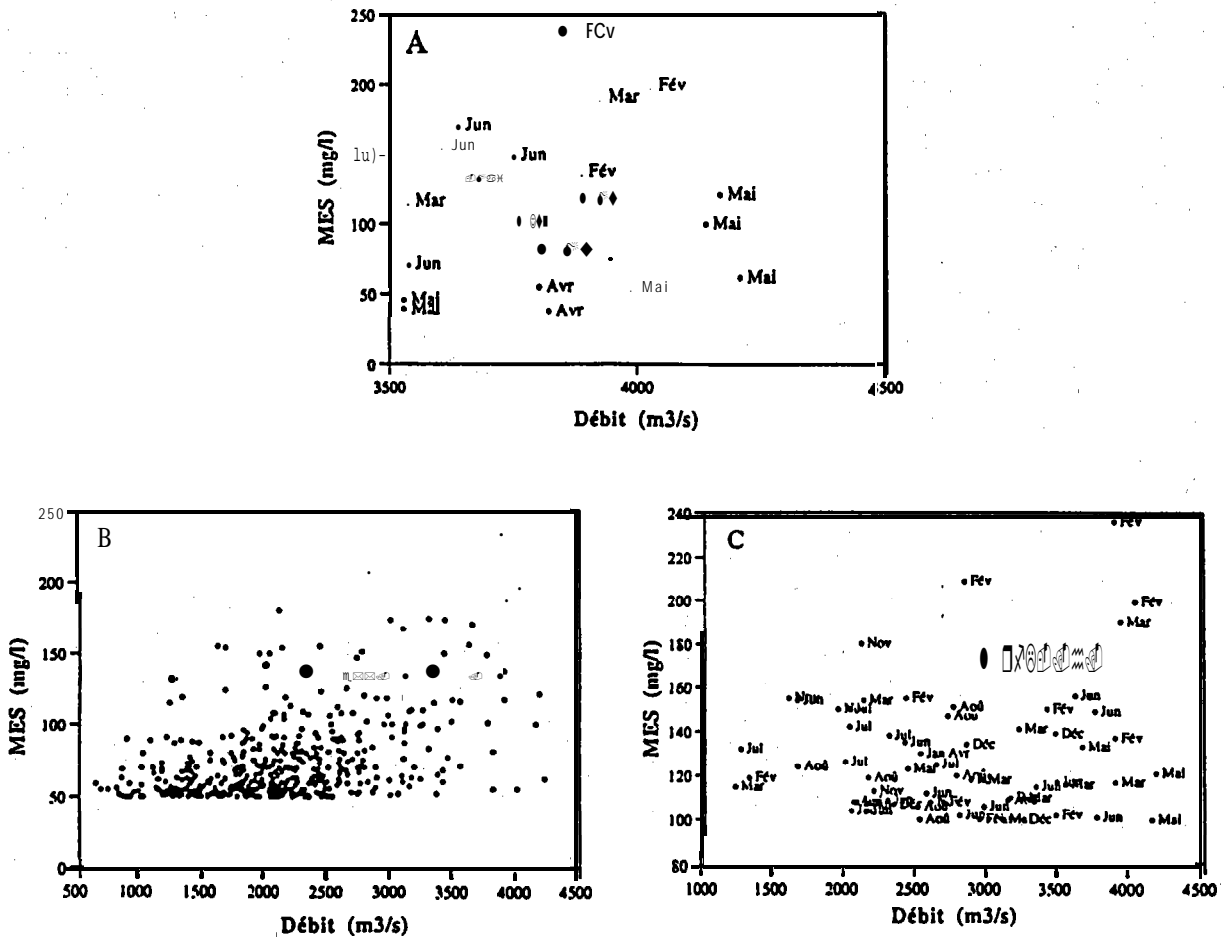


Figure 16

Rhin à Maxau, (1973/74 à 1992/93)

Relations MES-Débit pour les débits de crues (A) $Q > 3500 \text{ m}^3/\text{s}$, et pour les MES extrêmes (B) $\text{MES} > 50 \text{ mg/l}$ et (C) $\text{MES} > 100 \text{ mg/l}$.

Si on considère les débits supérieurs à $3500 \text{ m}^3/\text{s}$, on note quelques regroupements de points notamment:

(i) Si on considère les 21 débits journaliers excédant $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ sur 20 ans (très fortes crues) 5 sont en février et mars et 15 d'avril à juin; les épisodes hivernaux sont légèrement plus turbides.

(ii) Si on considère les 22 jours (sur 20 ans) excédant 140 mg/l de MES on compte 10 épisodes en février-mars, 3 en novembre et 8 de mai à avril. Les épisodes automnaux et hivernaux sont donc particulièrement turbides.

3.2.3.- Relations MES-Débit par type de crues:

Lors des crues les MES décrivent des cycles d'hystérésis avec le débit. Quelques exemples de ces cycles sont présentés sur la figure 17. On note que tous les diagrammes montrent des cycles orthogrades sauf celui de la crue du mois d'août 1977/78 (figure 18 D).

Il faut remarquer cependant que lors de chaque crue les matières en suspensions (MES) ont un comportement particulier avec le débit, l'allure des cycle étant différente d'un diagramme à l'autre. Cette différence de comportement est sans doute liée à la différence de variabilité des débit journaliers.

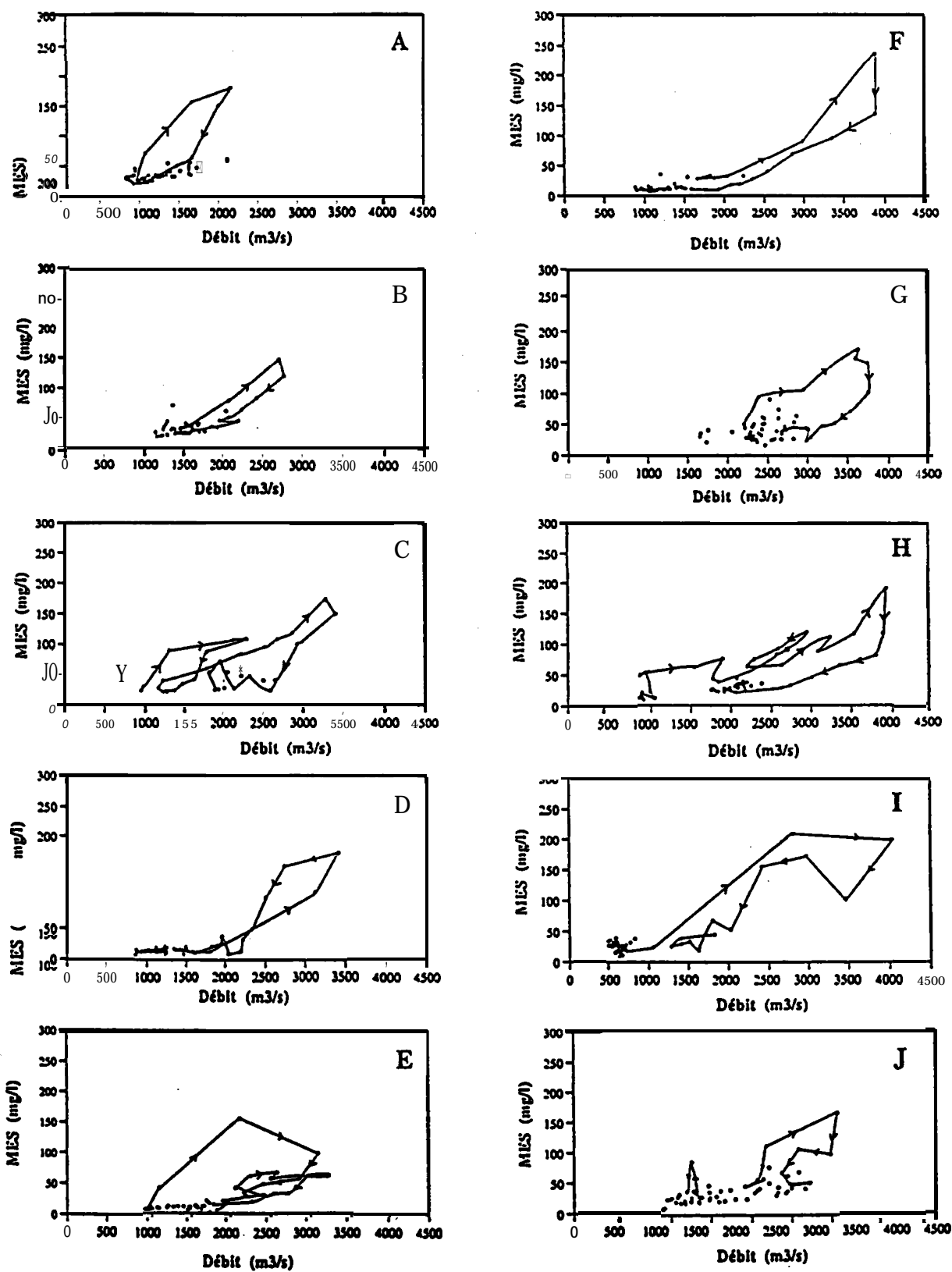


Figure 17

Rhin à Maxau, 1973/74 à 1992/93. Relations MES-Débits journaliers pour quelques crues typiques.

A: novembre et décembre 1973, B: août et septembre 75, C: janvier et février 77, D: août et septembre 78,

E: février et mars 79. F: janvier et février 80, G: juin et juillet 87.

H: mars et avril 88. I: janvier et février 90, J: novembre et décembre 93.

A débit égal la montée des eaux est donc nettement plus turbide que la décrue. Cette caractéristique est très répandue. On note que, généralement, le pic de MES coïncide avec le pic de débit sauf en février / mars 1979 (figure 17E).

La position de la crue dans l'année hydrologique et son origine jouent aussi un rôle important dans l'évolution des MES. Il ne nous a pas été possible ici d'étudier en détail la genèse des crues mais l'influence de leur position peut être étudiée sur les périodes présentées à la figure 12. En règle générale, à débit équivalent les dernières crues sont moins turbides que les premières comme en janvier-février 1977 ou en novembre-décembre 1973. Toutefois on se doit de noter des comportements inverses comme en mars 1979 et même des épisodes turbides sans variations de débits (septembre 1975) qui pourraient correspondre à des apports anthropiques ou à des erreurs de mesures. En effet les rejets anthropiques (villes, industries, et surtout les activités minières) et la manœuvre des vannes des barrages sur le Rhin canalisé entre Bâle et la station Maxau peuvent jouer un rôle majeur sur l'évolution des MES à certaines périodes de l'année. Dans le cas de très fortes crues on note une augmentation des MES de 10 ou 20 mg/l à plus de 150 mg/l en 2 ou 3 jours (mars 1979, février 1980, janvier 1990, juin 1987). Mais cette croissance des MES peut être étalée comme en mars 1988 ou en novembre 1992. On voit donc que le comportement des MES lors de chaque crue reste très difficile à prédire.

4.- Variabilité des flux de MES:

Le flux journalier FMES_j d'un jour "j" est ici le produit du débit journalier Q_j de ce jour multiplié par la concentration instantanée des MES_j mesurée pendant ce jour considérée comme représentative de l'ensemble de la journée.

À Maxau les flux journaliers sont donc connus sur les 20 années du suivi. Le traitement statistique effectué a été analogue à celui des MES et des débits.

4.1.- Régime des flux basé sur les flux mensuels.

La distribution statistique des flux mensuels sur 20 ans (déciles, quartiles, médiane) permet d'établir le régime des flux de MES (figure 18).

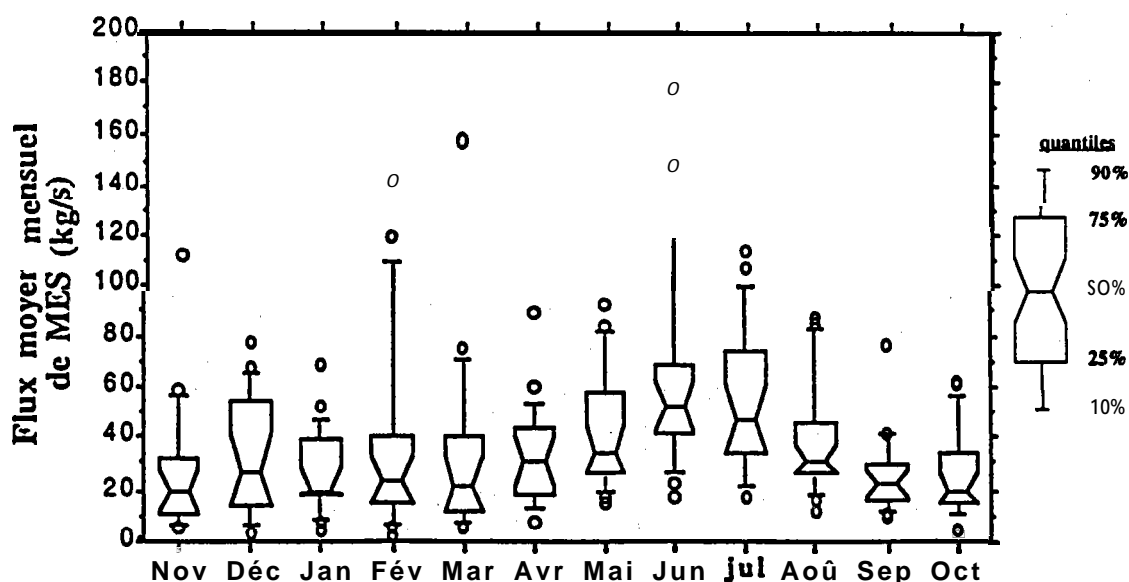


Figure 18

Rhin à Maxau, 1973/74 à 1992/93

Variations des percentiles des flux mensuels mois par mois sur la période

On retrouve très sensiblement cependant le même schéma que ce qui a été observé pour le débit et les MES, avec deux grandes phases au cours de l'année:

(i) une phase de faible flux allant de septembre à mars et qui correspond à la période des basses eaux,

(ii) et une phase montrant des flux relativement plus élevés allant de avril à août et qui correspond à la période des hautes eaux (figure 18).

Comme pour les MES et les débits le contraste saisonnier reste très modéré: le rapport des médianes maximum (juin) et minimum (octobre) est de l'ordre de 2 seulement. Pour d'autres fleuves ce rapport est beaucoup plus élevé. Les extrêmes (déciles et maximum pour chaque mois) sont plus contrastés et présentent deux périodes de forte valeurs (FMES_j > 100 kg/s) pour février et juin.

4.2.- Chronique des flux annuels sur 20 ans

4.2.1.- variation temporelle des flux annuels:

Le transport annuel des matières en suspensions à Maxau varie de l'ordre de 500000 t/an à environ 1600000 t/an pour une moyenne à long terme de 1100 000 t/an. Cette fluctuation très modérée est remarquable: la plupart des fleuves présentent une fluctuation d'un ordre de grandeur voire plus pour les fleuves méditerranéens. Les variations de ce transport sont assez comparables à ce qui a été observé pour les débits et les concentrations de matières en suspensions, on note en particuliers trois groupes d'années hydrologiques: (i) des années à faible flux de MES: 75/76, 78/79, 83/84 et 88/89; (ii) des années à flux moyens de MES: 77/78, 79/80, 80/81, 82/83 et 84/85; (iii) et des années à flux relativement fort de MES: 73/74, 74/75, 76/77, 81/82, 85/86, 86/87, 87/88, 89/90, 90/91, 91/92 et 92/93.

La figure 19 montre la variation temporelle des transports annuels des suspensions sur les 20 années de l'étude.

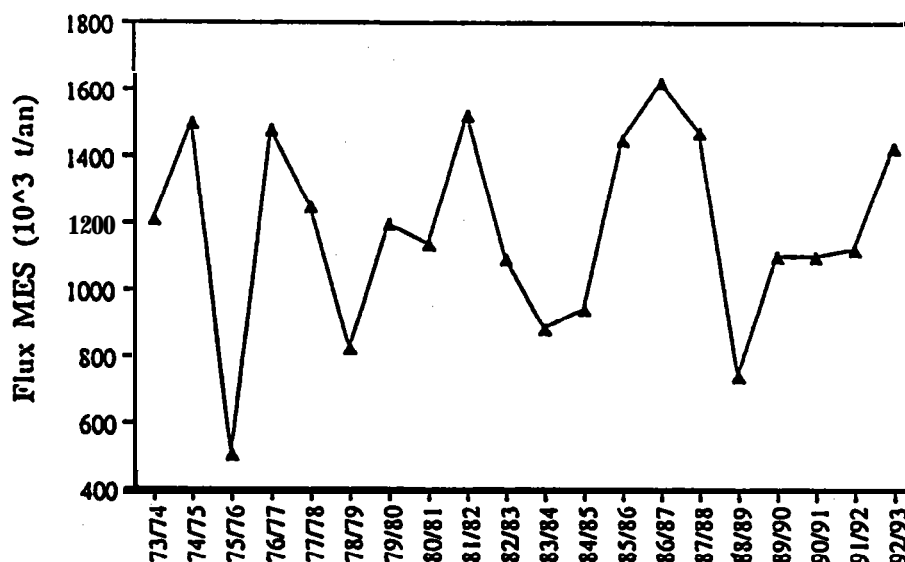


Figure 19

Variation temporelle des transports annuels de matières en suspension à Maxau (1973/74 à 1992/93).

4.3.- Chroniques des flux journaliers

La chronique des flux journaliers de 1973/74 à 1992/93 est présentée année par année dans l'annexe 3. Le Rhin est un fleuve au régime des débits relativement régulier et au régime des MES peu contrasté. Cependant en raison de la croissance des MES avec Q. L'allure des chroniques des flux journaliers est donc très particulière et caractérisée par des pics aigus (1979/80, 1977/78, 1989/90, etc...).

Les flux minimums enregistrés à Maxau sont de 2,5 kg/s et les flux maximums sont proches de 1000 kg/s.

4.4.- Variabilité interannuelle des chroniques de flux journaliers

La figure 20 présente les variations des flux journaliers correspondant aux quatre types d'années hydrologiques vues précédemment (1981/82, 1979/80, 1983/84, et 1975/76).

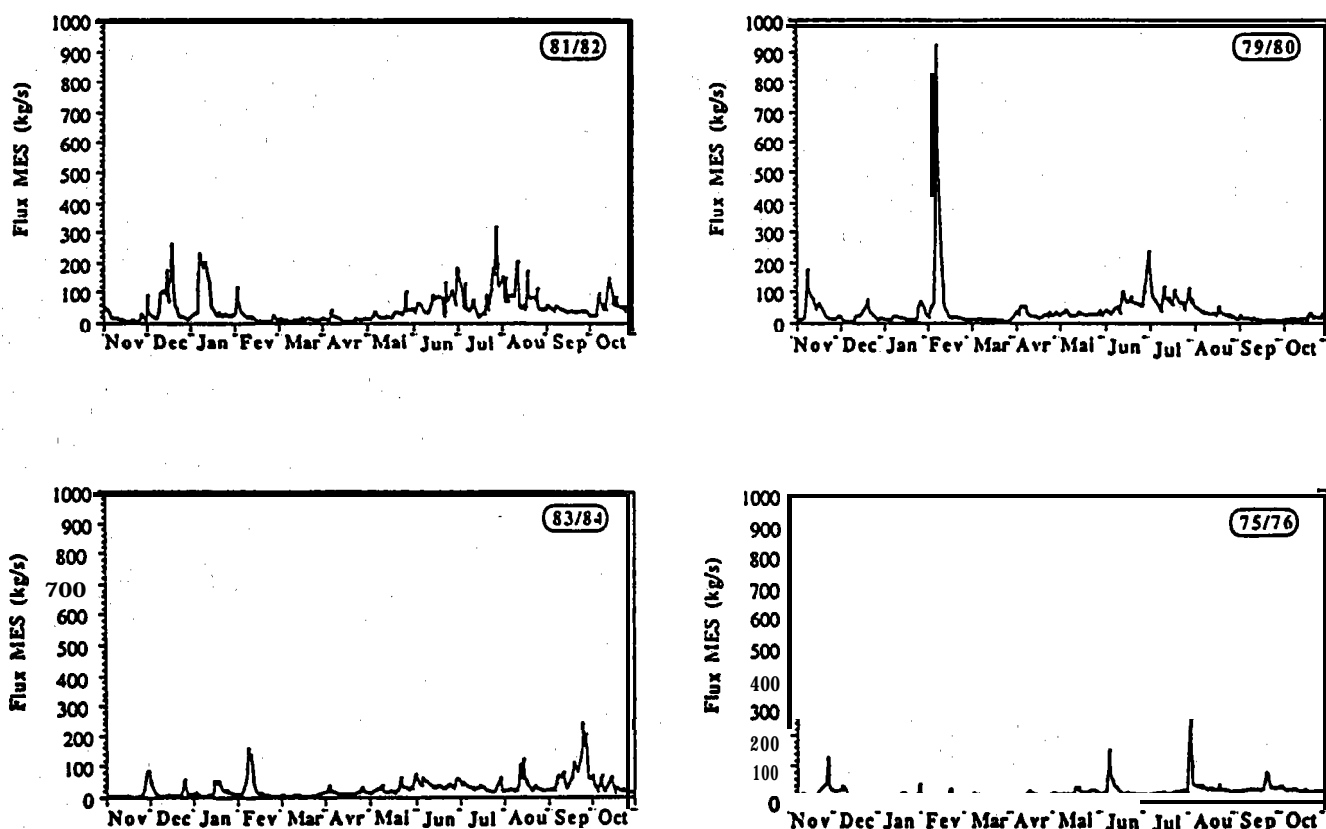


Figure 20

Variations des flux journaliers des matières suspension correspondant aux quatre années hydrologiques types.

4.5.- Statistiques sur les flux extrêmes

Les flux de MES extrêmes ont fait l'objet d'un traitement statistique analogue à celui des MES (figure 21):

(i) Les flux excédant 100 kg/s (soit environ quatre fois le flux moyen inter-annuel) s'observent principalement en juin et juillet suite à la fonte de neige et des glaciers alpins.

(ii) Les flux excédant 200 kg/s s'observent surtout à deux époques février-mars et mai-juin.

(iii) Les flux extrêmes (> 500 kg/s) ont été principalement observés en février c'est à dire à une période où les débits sont généralement modérés. Ces flux peuvent être dûs aux pluies sur le plateau Suisse, mais des influences anthropiques (manœuvre de barrages, rejets, etc...) ne sont pas à exclure dans certains épisodes turbides.

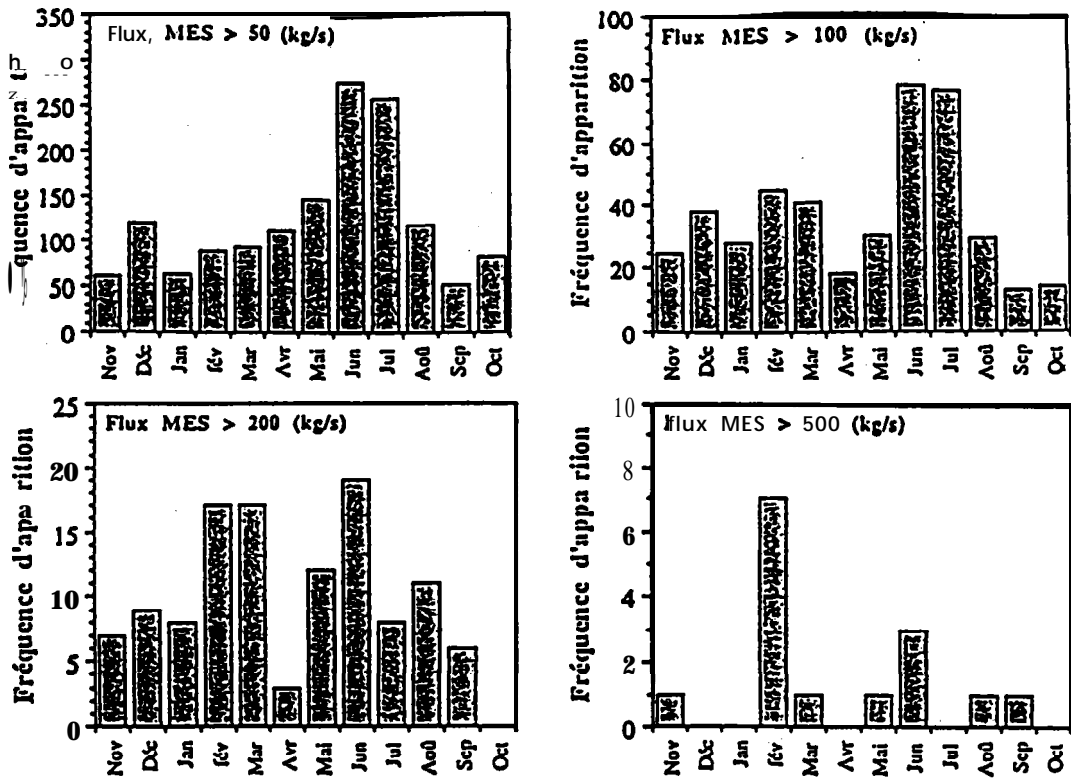


Figure 21

Distribution statistiques des flux journaliers supérieurs à 50, 100, 200, et 500 kg/s au cours de l'année, données de 1973/74 à 1992/93.

5.- Simulations de fréquences d'échantillonnage pour le calcul des flux des MES

La banque de données journalières des MES et de débit (73/74 à 92/93) a permis de calculer les flux des matières en suspension pour chaque année hydrologique. Ces flux basés quasiment sur des données journalières de débit et de concentrations de matières en suspension ($F = \sum(C_j * Q_j)$) représentent les flux réels qui transitent par cette station.

Dans la suite de cet exercice des tirages au sort sont effectués sur cette banque de données en adoptant des stratégies d'échantillonnages régulières dans le temps (mensuelle, bimensuelle, et hebdomadaire). Deux méthodes de calcul de flux sont testées. Les flux tirés sont comparés aux flux réels.

5.1.- Stratégies d'échantillonnages testées:

Trois stratégies d'échantillonnage sont testée (tableau 9).

	pas de temps	nombre de tirages possibles
mensuelle	30 jours	30
bimensuelle	15 jours	15
hebdomadaire	7 jours	7

Tableau 9

Stratégie d'échantillonnages testée pour le calcul de flux des MES.

5.2.- Méthodes de calcul de flux testées:

Deux méthodes de calcul de flux sont testées pour ce travail (nomenclature de Walling reprise et complétée par Meybeck et al. 1992):

**** méthode F2:** c'est la méthode de calcul de flux la plus simple, le flux annuel (F2) est donné par la moyenne des flux des jours de l'échantillonnage ($(\sum F_i)/n$).

$$F2 = \sum F_i/n$$

$$F_i = C_i * Q_i$$

F_i : flux instantané du jour de l'échantillonnage (kg/s).

C_i : concentration de l'échantillon (mg/l).

Q_i : Débit du jour de l'échantillonnage (m³/s).

**** méthode F4:** cette méthode adoptée par Walling utilise la moyenne pondérée par les débit des concentrations des échantillons ($(\sum(C_i * Q_i)/\sum Q_i)$) multipliée par le débit moyen des débit journaliers.

$$F4 = (\sum(C_i * Q_i)/\sum Q_i) * Q_{mj}$$

$(\sum(C_i * Q_i)/\sum Q_i)$: concentration moyenne pondérée par les débits (mg/l).

Q_{mj} : Débit moyen annuel des débits journaliers (m³/s).

Cette méthode permet de corriger les biais quand les débits moyens des prélèvements sont nettement différents des débits moyens annuels.

5.3.- Calcul d'erreur

Pour chaque année, les flux calculés (Fc) pour les différents tirages sont comparés aux flux réels (Fr), en calculant les erreurs relatives.

$$\text{Erreur (\%)} = ((F_c - F_r) / F_r) * 100$$

si erreur > 0 sur-estimation

si erreur < 0 sous-estimation

5.4.- Résultats et discussion

L'ensemble des résultats des tirages de flux est présenté sur la figure 22.

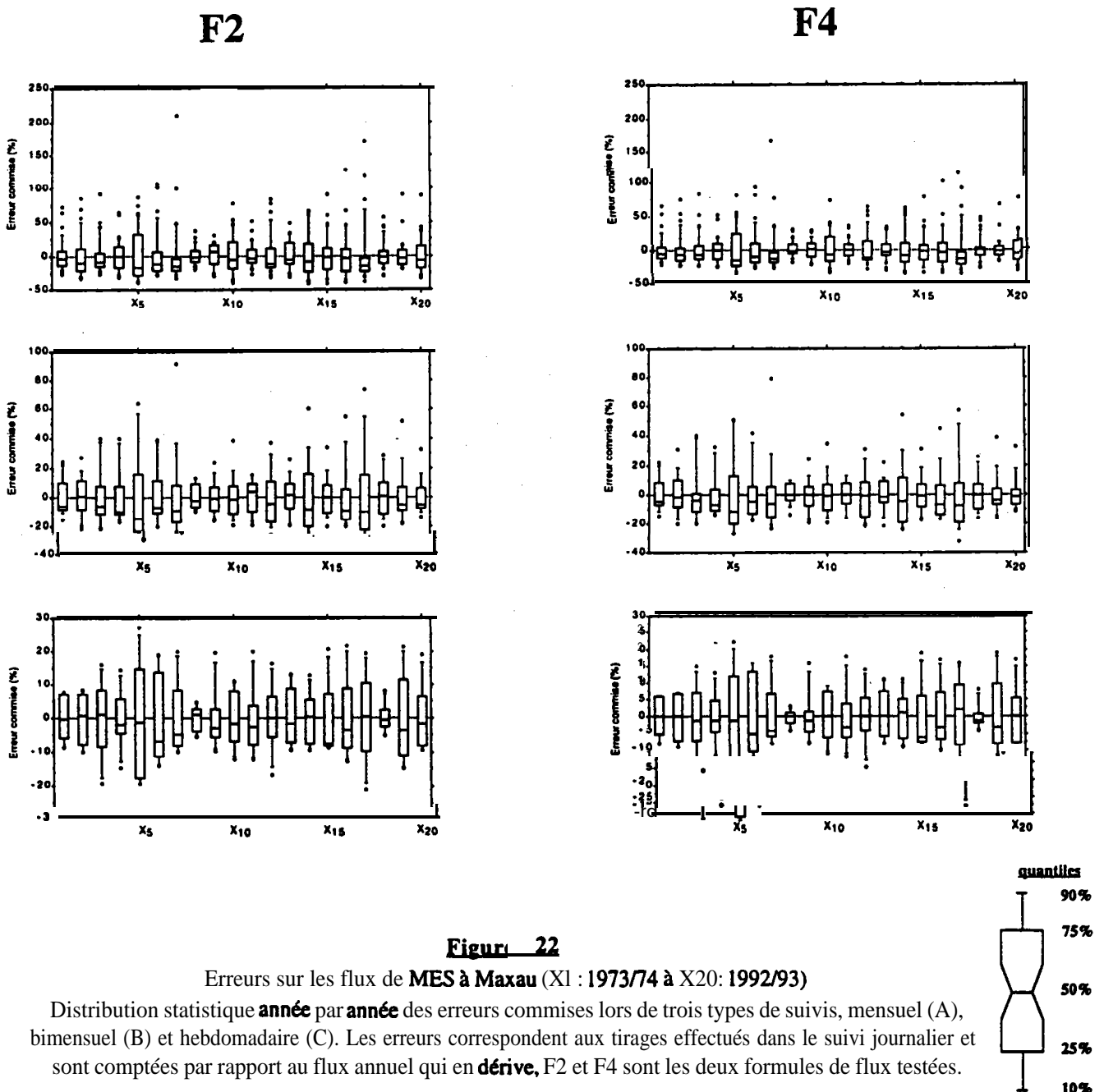


Figure 22

Erreurs sur les flux de **MES à Maxau** (X1 : 1973/74 à X20: 1992/93)

Distribution statistique **année par année** des erreurs commises lors de trois types de suivis, mensuel (A), bimensuel (B) et hebdomadaire (C). Les erreurs correspondent aux tirages effectués dans le suivi journalier et sont comptées par rapport au flux annuel qui en **dérive**, F2 et F4 sont les deux formules de flux testées.

Le problème est abordé ici en se basant sur deux paramètres: (i) erreur maximale commise (valeur absolue), importante pour le court terme (échelle annuelle), (ii) médiane des erreurs commises, importante pour le long terme (échelle interannuelle).

Les erreurs maximales commises (figure 23) dépendent (i) de l'année (ii) de la stratégie d'échantillonnage et dans une moindre mesure (iii) de la méthode de calcul adoptée.

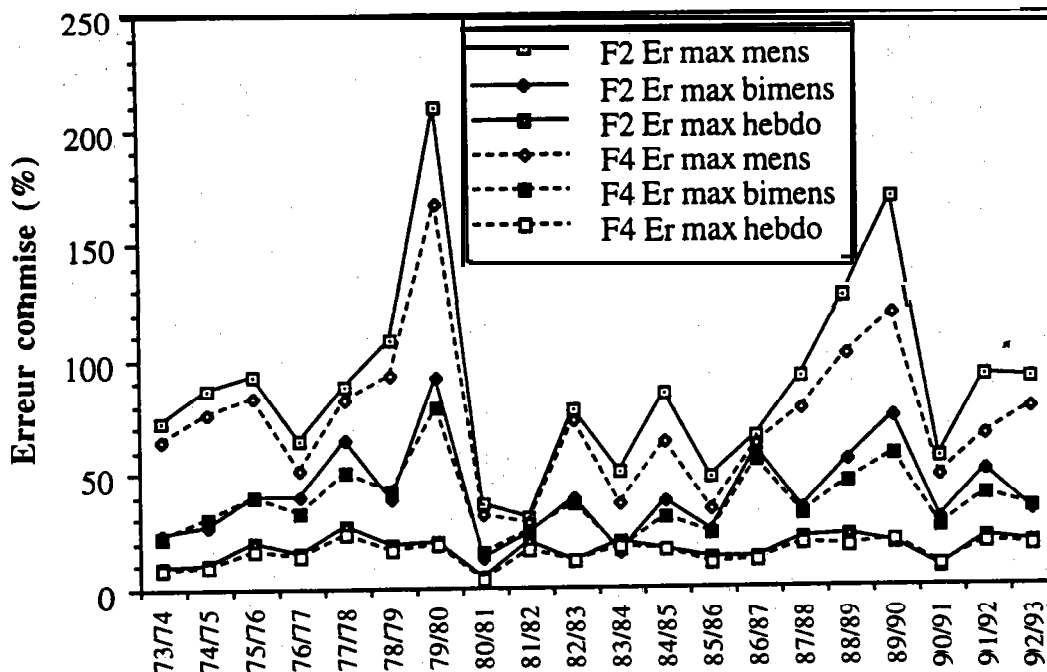


Figure 23

Erreurs sur les flux de MES à Maxau (1973 à 1993)

Erreurs maximales relatives commises sur des échantillonnages simulés mensuels et hebdomadaires.

Pour une même stratégie d'échantillonnage les erreurs maximales peuvent varier d'un facteur 4, quelquefois pour deux années consécutives (1979/80 et 1980/81), mais la plupart des cas la variation interannuelle est d'un facteur 2 seulement.

Les erreurs augmentent bien sûr avec la diminution des fréquences. Pour une stratégie hebdomadaire les erreurs maximales vont de 4% à 20% maximum, pour une stratégie bimensuelle de 20% à 90%, et pour une stratégie mensuelle de 40% à 200% environ.

La méthode de calcul de flux joue un rôle mineur pour un échantillonnage hebdomadaire et bimensuel et est plus significative pour une fréquence mensuelle. Dans tous les cas la méthode F4 minimise les erreurs maximales commises.

En résumé pour un échantillon hebdomadaire de MES l'erreur maximale annuelle commise (càd pour 1 tirage sur 7) est de 20% une année sur 20 et de 10% la plupart du temps. Pour un échantillon bimensuel l'erreur maximale commise (pour un tirage sur 15 possibles) est de 20% la plupart du temps.

La figure 24 concerne les médianes des erreurs commises pour les trois types d'échantillonnages sur les tirages de chaque année. Elle permet de tester s'il y'a des biais systématiques.

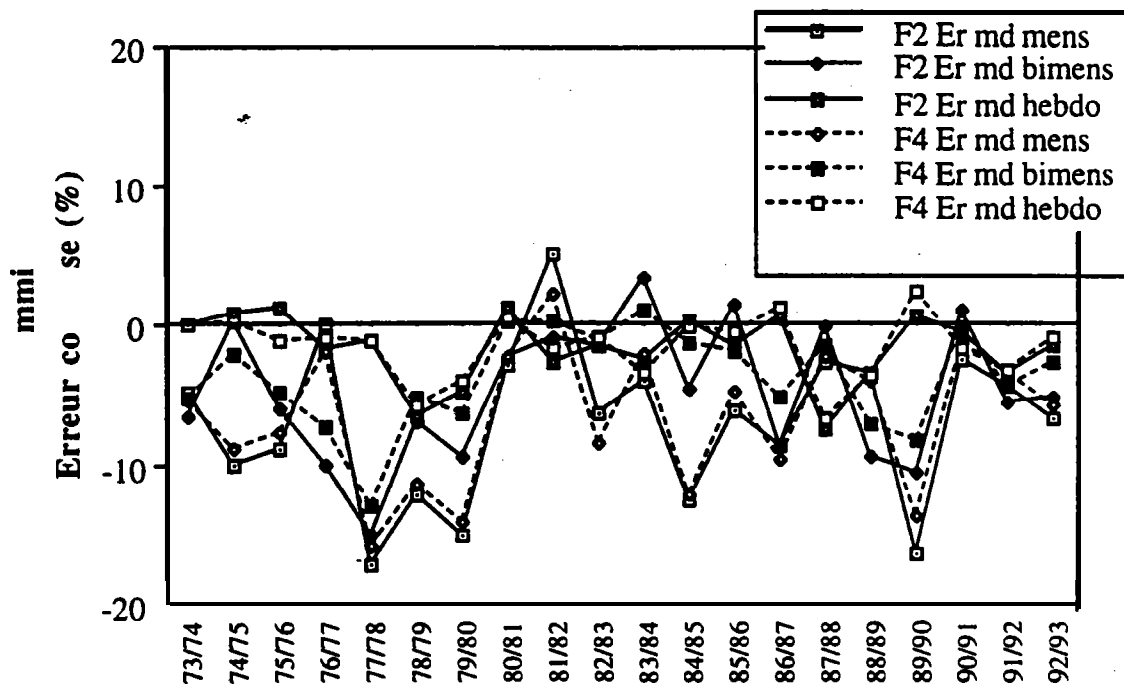


Figure 24

Erreurs sur les flux de MES à Maxau (1973 à 1993)

Médianes des erreurs absolues commises sur des **échantillonnages** simulés mensuels, bimensuels et hebdomadaires (valeurs > 0: surestimation; valeurs < 0: sous-estimation).

La fréquence hebdomadaire n'induit qu'un très léger biais: les médianes des erreurs vont de -7% à +2% et se situent généralement vers -2%.

La fréquence bimensuelle induit des médiane des erreurs allant de -12% à +3% avec un biais général de -5%.

La fréquence mensuelle induit des médianes des erreurs de -18% à +5% avec un biais générale de -8%.

5.6.- Conclusions:

Dans les trois cas de fréquence le mode de calcul F2 ou F4 n'a guère d'influence par rapport à la variabilité interannuelle et à celle liée aux fréquences de prélèvements. En effet si on considère la médiane des erreurs médianes annuelles On trouve les résultats suivant (tableau 10):

	F2	F4
Mensuel	-6,2	-5,6
Bimensuel	-5,4	-3,5
Hebdomadaire	-1,5	-1,1

Tableau 10

Médianes des erreurs **médianes** annuelle commises sur le calcul de flux, pour les trois **stratégies** d'échantillonnage et les deux mode de calcul des flux.

À long terme l'erreur commise par les stratégies d'échantillonnage et les méthodes de calcul de flux est donc assez faible voire négligeable.

L'application d'une méthode d'échantillonnage dépend de la marge d'erreur que l'on peut tolérer pour le calcul des flux des MES. L'échantillonneur doit adapter sa fréquence d'échantillonnage à la précision qu'il veut obtenir sur les calculs de flux, à l'échelle annuelle et/ou interannuelle. Plusieurs cas de figures sont possibles, la précision à l'échelle interannuelle dépend en tout cas de la précision fixée pour l'échelle annuelle.

A long terme les erreurs positives et négatives se compensent nettement: il ne reste pratiquement pas de biais pour la fréquence hebdomadaire et la médiane des erreurs médianes annuelles n'est que de -6% pour une fréquence mensuelle. Cette absence de biais se confirme si on considère les bilans tirés sur les 20 ans de suivis (tableau 11).

	F 2		F 4	
	<i>Annuelle*</i>	<i>interannuelle**</i>	<i>Annuelle*</i>	<i>interannuelle**</i>
Mensuel	200%	6%	170%	6%
Bimensuel	90%	5%	80%	4%
Hebdomadaire	22%	2%	22%	1%

Tableau 11

Erreurs commises sur les flux pour les trois stratégies d'échantillonnage et les deux modes de calcul de flux,

* erreur maximale, ** médiane des erreurs.

La question qui se pose donc est de préciser la marge d'erreur à accepter sur les bilans de MES pour le cours terme (échelle annuelle), une bonne précision nécessite absolument un échantillonnage serré (des suspensions). Pour le long terme (échelle interannuelle) la précision reste relativement assez bonne quelque soit la fréquence d'échantillonnage adopté (même pour un échantillonnage mensuel).

CHAPITRE III

*Régimes des descripteurs de la
qualité chimique du Rhin à:*

- * Seltz,*
- * Lauterbourg,*
- * Village-Neuf.*

6.- Régime des descripteurs de qualité des eaux du Rhin:

Le régime des différents polluants dans le Rhin est étudié ici principalement à Seltz sur environ 20 ans de données (1971 à 1993). Des données de Lauterbourg (1993), et de Village-Neuf (1985 à 1994) sont traités pour compléter les informations acquises à Seltz.

6.1.- régime des éléments chimique au Rhin à Seltz (1971-1993)

6.1.1.- Représentativité des débits échantillonnés par rapport à la variabilité des débits journaliers:

Les données de débit utilisées ici sont ceux de la station de Maxau. Les débits échantillonnés retracent dans l'ensemble (figure 25) le même régime que celui observé sur les débits journalier (cf. figure 6). Les moyennes des débits échantillonnés année par année sont très proches des moyennes des débits journaliers, les différences sont au maximum d'environ 4% (figure 26). Il n'y a donc pas de biais systématiques, les débits échantillonnés sont donc bien représentatifs de la variabilité hydrologique annuelle.

6.1.2.- Régime des concentrations des éléments au Rhin à Seltz (1971/93):

Le régime à long terme (21 ans de 1971/72 à 1992/93) de la qualité des eaux a été établi pour la station de Seltz. On postule ici que la tendance à long terme est négligeable, quelque soit le descripteur considéré, par rapport à la variabilité saisonnière. Celle ci est déterminée en considérant les distributions statistiques de l'ensemble des valeurs recueillies chaque mois sur la période considérée. On présente ensuite chacune de ces distribution statistique par une "boîte à moustache" de façon analogue aux distribution des débit et des MES à Maxau basée elle sur des mesures journalières. L'ensemble de ces régimes est présenté sur la figure 27.

Ions majeurs:

Les comportements des différents éléments sont résumés dans le tableau 12. On note deux regroupement d'éléments ayant des comportements identiques: (i) Na^+ , K^+ et Cl^- , (ii) Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^{-2} et HCO_3^- .

	Variabilité des quantiles mois par mois	Variabilité saisonnière des quantiles	Origine possible de la variabilité	Remarques
Na^+ K^+ Cl^-	Variabilité plus importante de octobre à mars par rapport aux autres mois	les quantiles sont dans l'ensemble relativement plus faibles de mars à août	rejet constant des mines de potasses de l'Alsace	$\cong 38$ éch/mois représentatif
Ca^{++} Mg^{++} SO_4^{-2} HCO_3^-	Variabilité toujours plus importante mais mois marquée de octobre à mars par rapport aux autres mois	les quantiles sont dans l'ensemble légèrement plus faibles de mars à août (effet saisonnier moins marqué)	apport naturel par lessivage des roches du bassin versant	$\cong 38$ éch/mois représentatif

Tableau 12

Comportement des ions majeurs dans le Rhin à Seltz, données de 1971 à 1993

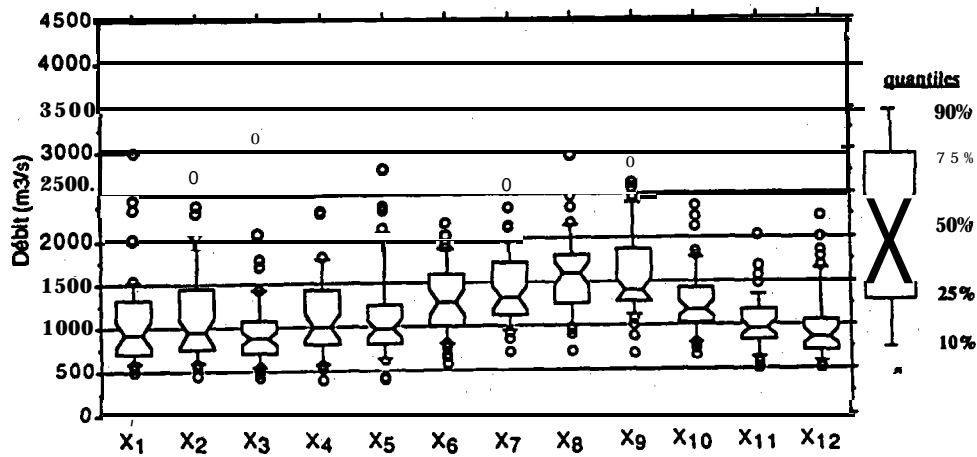


Figure 25

Distribution statistique (déciles, quartiles et médianes) des débits échantillonnés sur la période 1971/72 à 1992/93 mois par mois (X1: novembre, à X12: octobre).

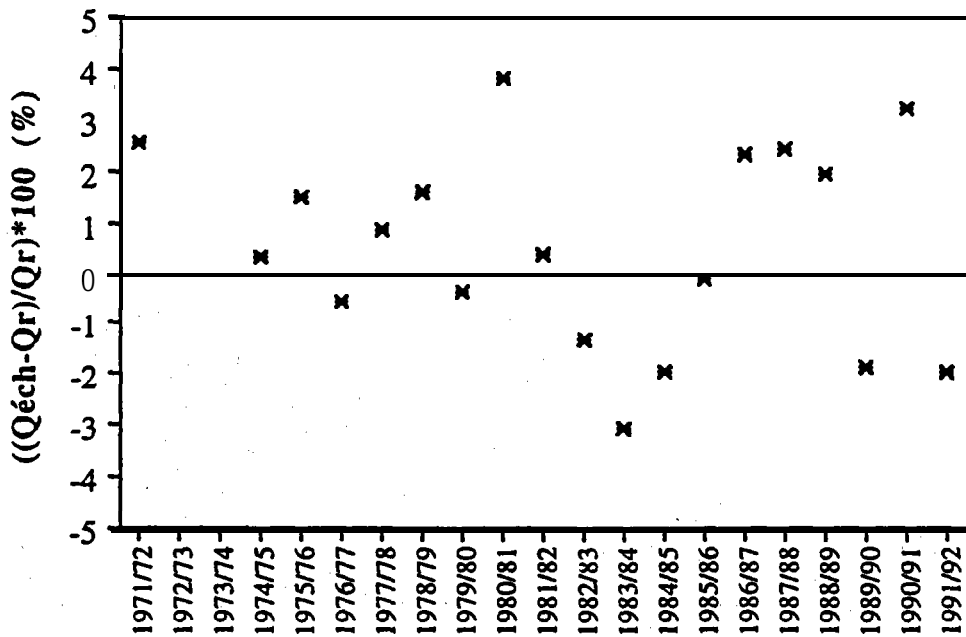


Figure 26

Comparaison des débits moyens des jours d'échantillonnage ($Q_{a.éch}$) et des débits moyens annuel des débits journaliers (Q_a) à Seltz, (erreur commise = $(Q_{a.éch} - Q_a) * 100 / Q_a$) par années hydrologiques.

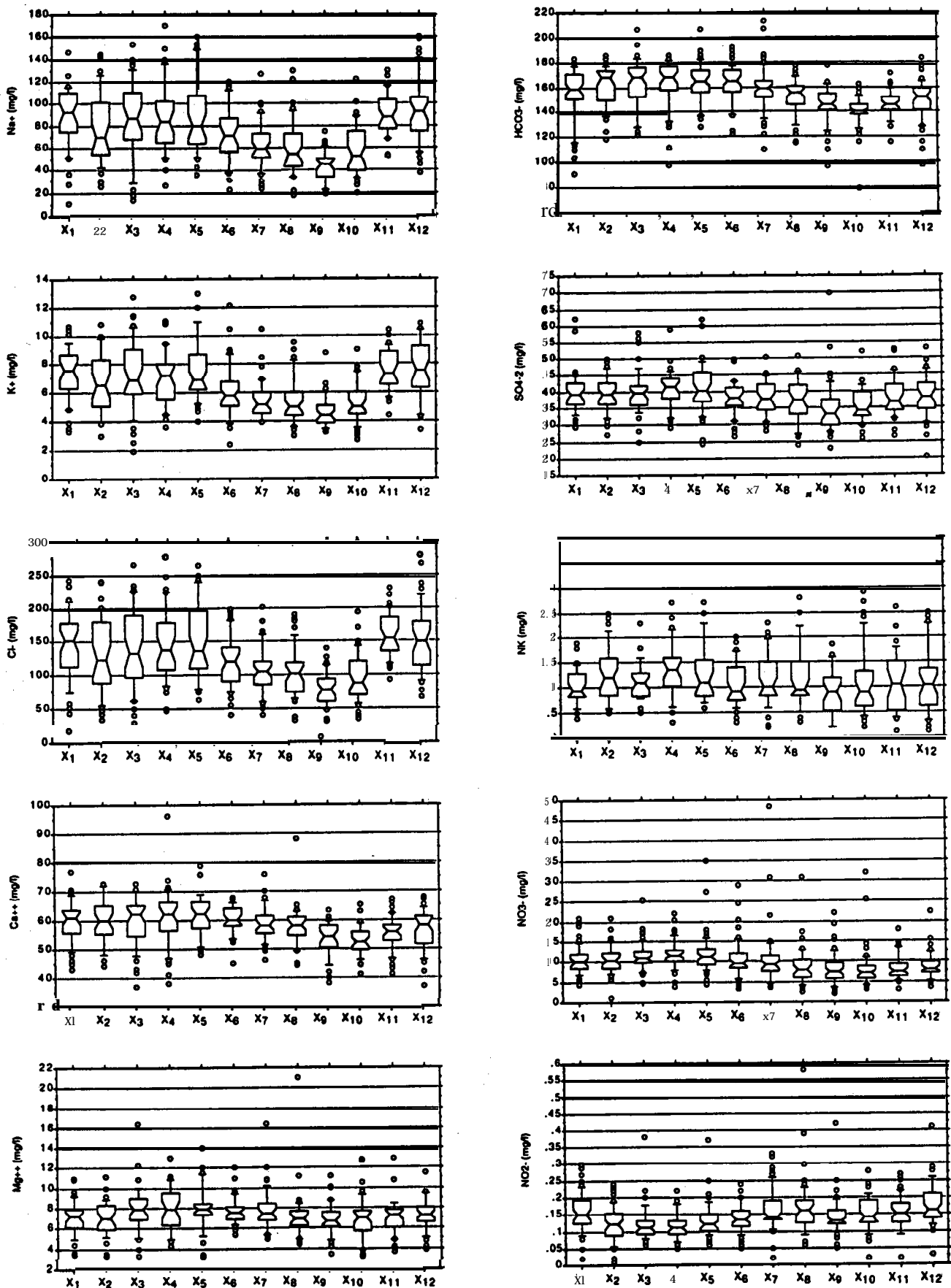
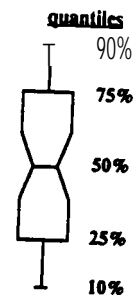
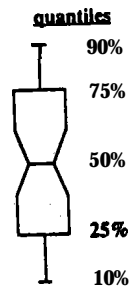
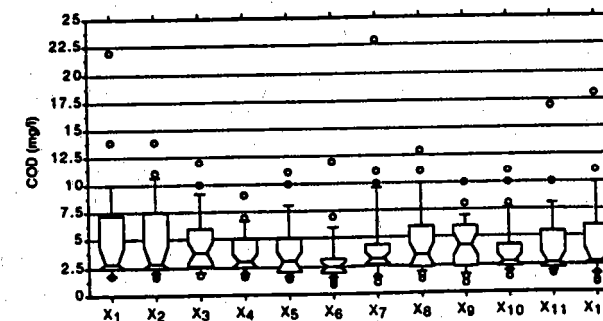
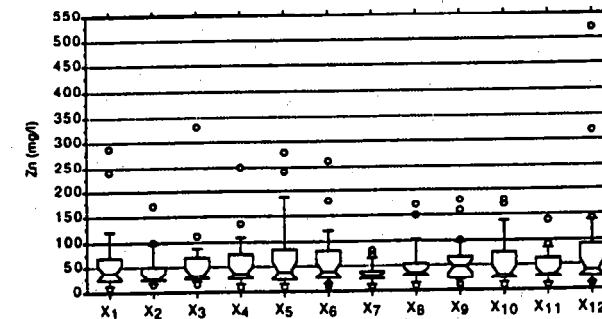
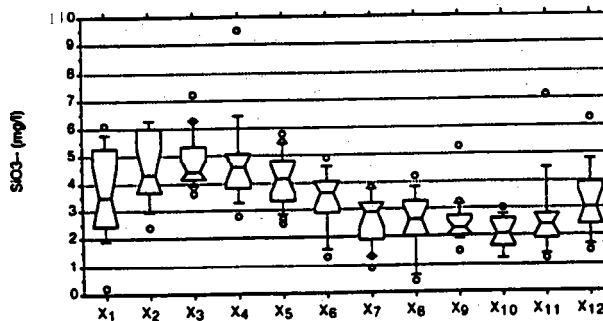
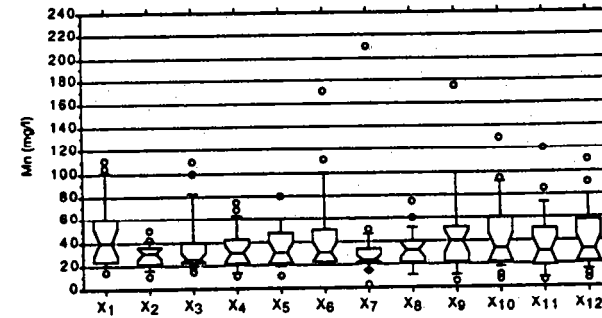
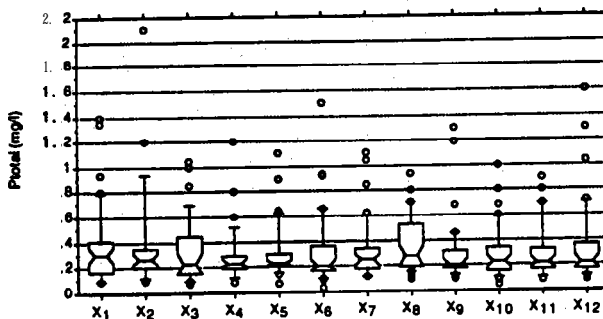
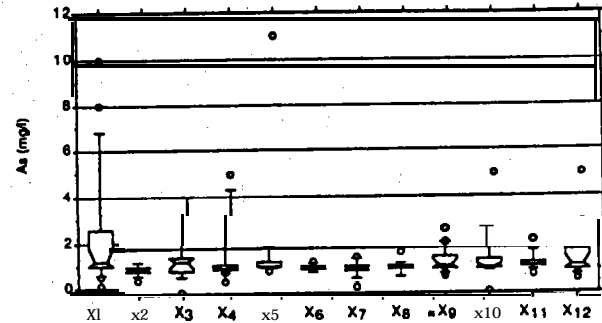
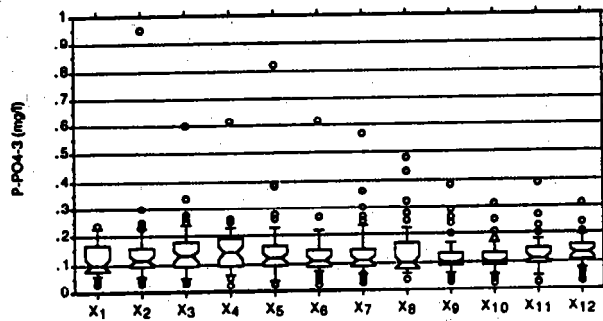
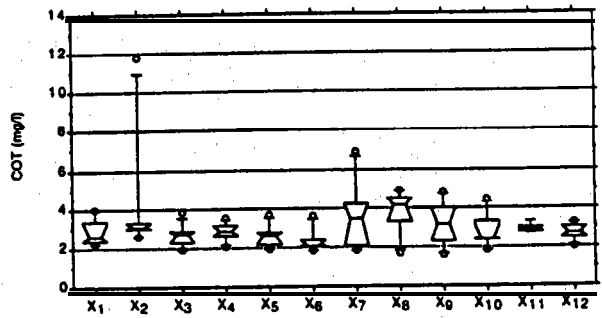
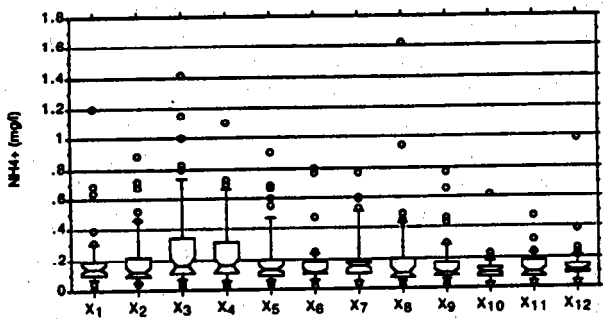


Fig. 27

Régime des concentrations des différents polluants mesurés à Seltz,
Données 1971 à 1993 (X1: novembre, à X12: octobre).





127.ure suite)

Régime des concentrations des différents polluants mesurés à Seltz, Données 1971 à 1993 (X1: novembre, à X12: octobre).

sels nutritifs:

Dans l'ensemble les variabilités des sels nutritifs sont moins marquées que celles des ions majeurs. Les comportements des différents nutriments sont groupés dans le tableau 13. Il faut remarquer que pour certains éléments (SiO_3^{--} et COT) le nombre faible des échantillons limite la représentativité des données pour tracer la variabilité saisonnière de ces éléments.

Pour les éléments nutritifs les comportements sont contrastés:

* nitrates: maximum de janvier à mars et minimum de août à septembre. Dans d'autres bassins comme la Seine le maximum est aussi hivernal (décembre à février) lorsque les sols sont nu et le ruissellement intense.

* l'azote kjeldhal (NK): faibles variations peu significatives.

* nitrites: minimum hivernal net, et deux maximums en juin et septembre.

* ammoniacque, phosphates et phosphore total: variations saisonnières peu significatives masquée par la variabilité sur un mois. Il peut s'agir ici d'un effet de masque par une tendance (chute avérée en suisse à la suite des mesures de régulation notamment l'interdiction des polyphosphates dans les détergents en 1985).

* silice dissoute: maximum en janvier et février, minimum en juillet et août. Cette chute estivale est sans doute liée à l'utilisation biologique de la silice dans les lacs subalpin comme cela a été observé dans le lac Léman.

	Variabilité des quantiles mois par mois	Variabilité saisonnière des quantiles	Remarques
NK	variabilité homogène pendant l'année	pas de variation saisonnière net des quantiles	≅ 33 éch/mois, représentatifs
NH4+	Variabilité plus importante en janvier et février	déciles 90% et quartiles 70% sont plus élevés en janvier et février, pas de variation saisonnière net des médianes et percentiles inférieurs	≅ 44 éch/mois, représentatifs
NO3-	variabilité homogène pendant l'année	pas de variation saisonnière net des quantiles	≅ 48 éch/mois, représentatifs
NO2-	variabilité moins importante en hivers de janvier à avril	quantiles généralement légèrement plus faibles de janvier à avril	≅ 48 éch/mois, représentatifs
PO4-3	variabilité homogène pendant l'année	pas de variation saisonnière net des quantiles	≅ 52 éch/mois, représentatifs
Ptot	variabilité "homogène" pendant l'année	pas de variation saisonnière net des quantiles	≅ 35 éch/mois, représentatifs
SiO3--	variabilité plus importante de octobre à décembre	quantiles relativement plus élevé de octobre à avril	≅ 15 éch/mois, "représentatifs"
COD	variabilité relativement moins importante de février à mai	pas de variation saisonnière net des quantiles	≅ 28 éch/mois, "représentatifs"
COT	?	?	≅ 6 éch/mois, non représentatif

Tableau 13

Comportement des sels nutritifs dans le Rhin à Seltz, données de 1971 à 1993.

Pour le COD, il faut noter qu'une bonne partie des données semble être douteuse (COD > 5 mg/l). A notre connaissance dans un fleuve comme le Rhin le COD ne doit guère dépasser cette valeur (≈ 5 mg/l), alors que le maximum des données va ici jusqu'à COD > 20 mg/l. Dans la Seine le maximum observé à Poses lors de l'étude pilote (90/92) est de l'ordre de 7 mg/l. Les données de COT ne sont pas représentatives pour tracer une variabilité saisonnière interannuelle mais restent assez représentatives de la variabilité annuelle lors des années 86/87, 88/89 et 89/90.

Pour l'ensemble de ces éléments la fréquence des données assez faible, pendant certaines années, limite la représentativité à l'échelle annuelle des données acquises.

Éléments en traces:

Les éléments en traces concernés ici sont (i) traces inorganiques: As, Mn, Zn (ii) traces organiques: gamma HCH. L'examen des données acquises montre une baisse générale des concentrations de ces éléments depuis 1973. Cette baisse est sans doute à lier à l'amélioration progressive des techniques d'échantillonnage et d'analyses des éléments en traces.

A ce stade et vu la très faible fréquence des données du gamma-HCH, les données de cet élément restent inutilisables pour l'établissement des flux. Pour l'As, le Mn et le Zn la fréquence des données acquises de 1983/84 à 1989/90 semble suffisante (20 à 27 échantillon par an), cependant la question reste posée concernant la qualité de ces données.

La variabilité saisonnière à l'échelle annuelle et la variabilité interannuelle restent donc à établir pour ces éléments.

6.1.3.- Établissement des relations "Concentration-Débit":

Les relations générales des concentrations des différents éléments avec le débit sont établis sur l'ensemble de la période recouverte par notre banque de données (de 1971 à 1993). Seuls les ions majeurs et les éléments nutritifs sont pris en compte dans cet exercice.

L'ensemble des relations établis est groupé dans la figure 28. On note en particulier:

** trois types de relations pour les ions majeurs:

(i) dilutions fortes: Na^+ , K^+ et Cl^- issus de sources ponctuelles notamment les Mines de Potasse d'Alsace (MDPA),

(ii) dilutions moyennes: c'est le cas des SO_4^{2-} ,

(iii) très légère dilution: Ca^{++} , Mg^{++} , HCO_3^- .

** Les éléments nutritifs ne montrent pas de relation nette avec le débit, cependant lors des très hautes eaux ($q > 50$ l/s/km²) les concentrations mesurées en NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , COD, PO_4^{3-} et P_{tot} sont toujours dans les faibles valeurs.

En ce qui concerne le P_{total} et le COT on n'observe pas d'augmentation avec les très forts débits. Ce comportement est étonnant car si les eaux ne sont pas filtrées, le phosphore et le carbone particulaires évacués lors des crues peuvent devenir alors des formes prépondérantes lorsque MES > 100 mg/l. Sans doute l'échantillonnage bimensuel n'a guère permis de rencontrer de tels épisodes.

Pour le carbone organique dissous les concentrations élevées (> 5 mg/l et surtout celles > 10 mg/l) sont à questionner: s'agit-il de valeurs anciennes sujettes à caution ou de réelles pollutions?. Les valeurs de COT semblent plus plausibles.

Pour les métaux les relations concentrations-débits ne sont guère probantes. En particulier on note une abondance de mesures d'As à 1 $\mu\text{g/l}$ (et non pas 1 mg/l) ce qui correspond sans doute à la limite de détection.

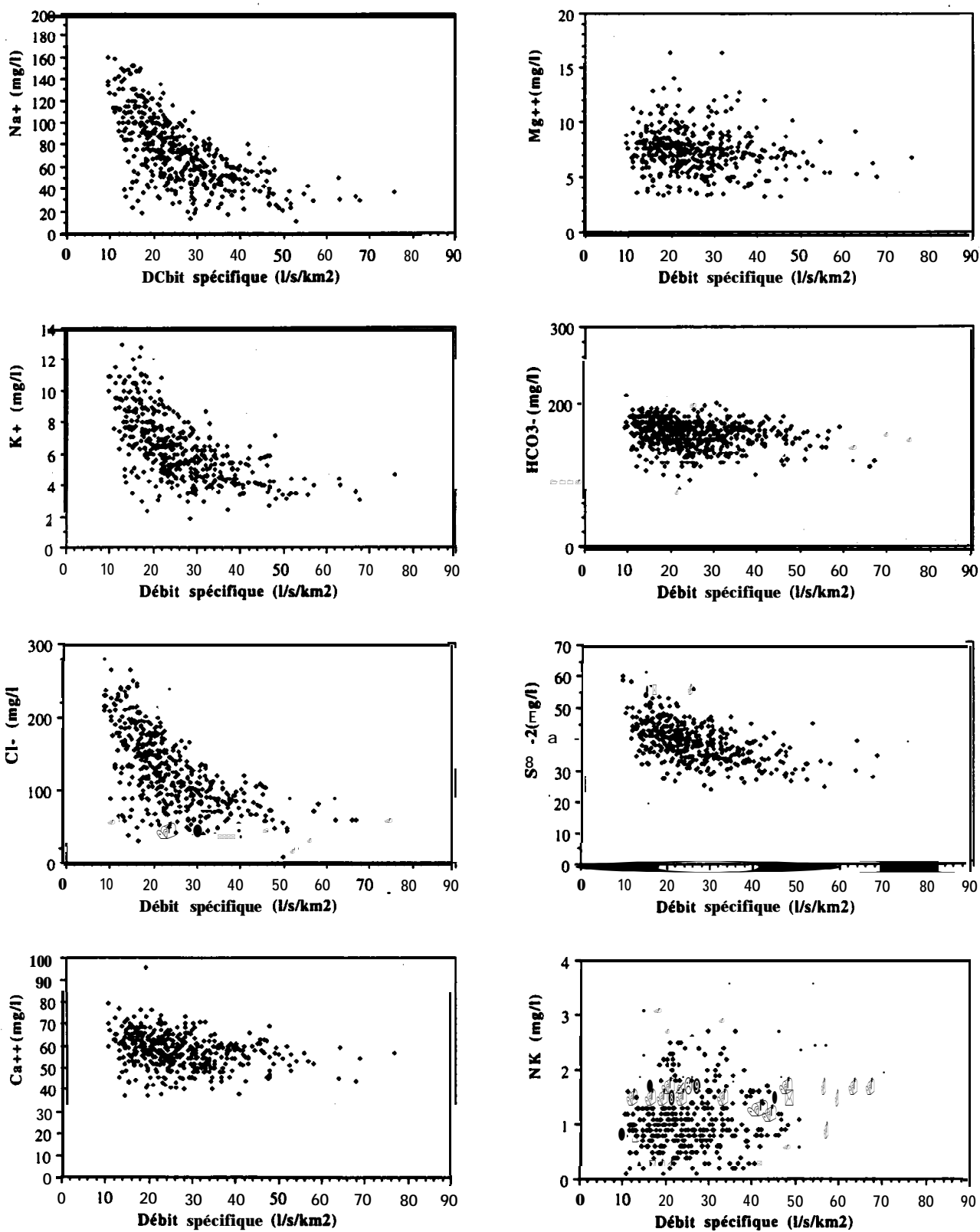


Figure 28

Relations concentrations-débits (spécifiques à Seltz) pour les différents polluants.

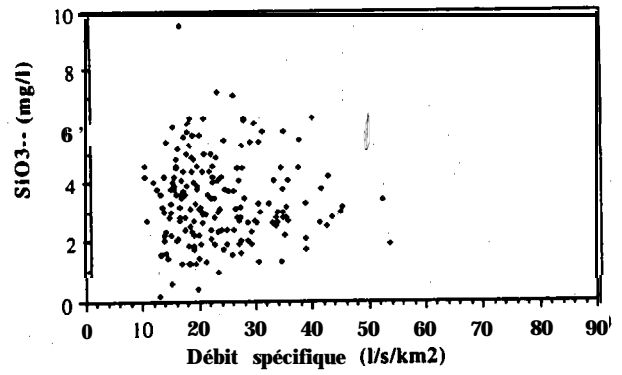
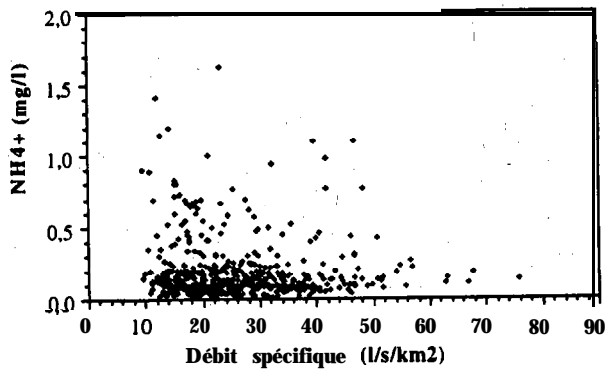
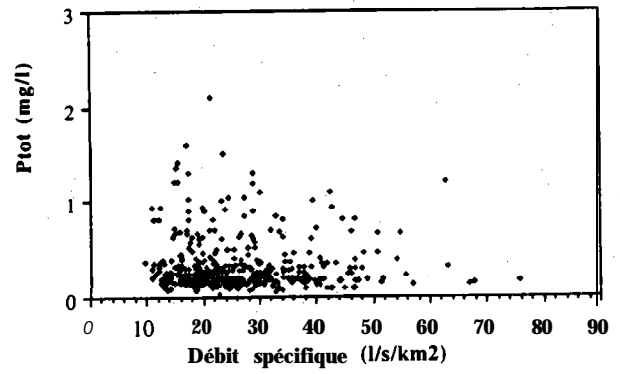
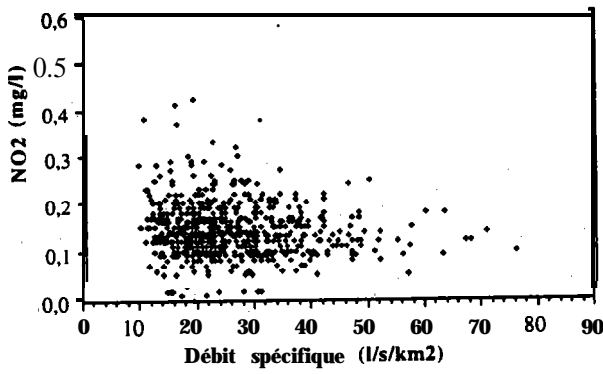
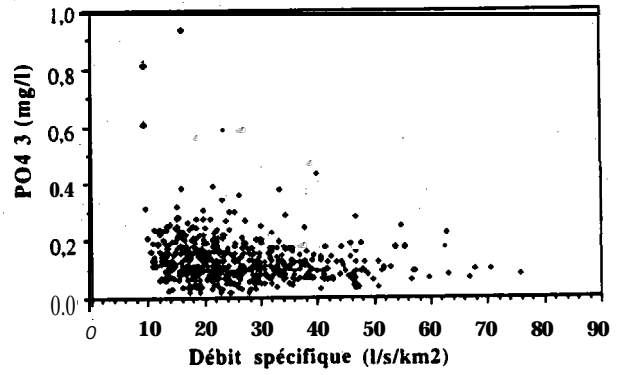
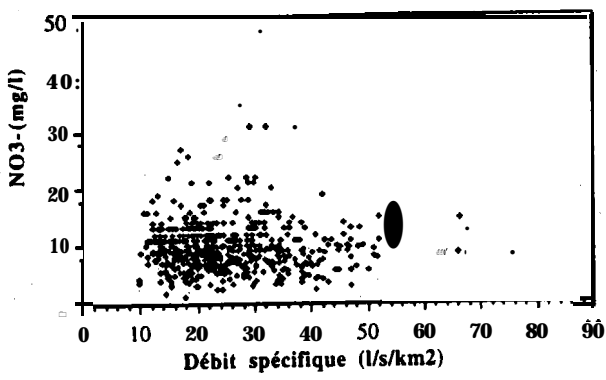


Figure 28 (suite)

Relations concentrations-débit (spécifiques à Seltz) pour les différents polluants.

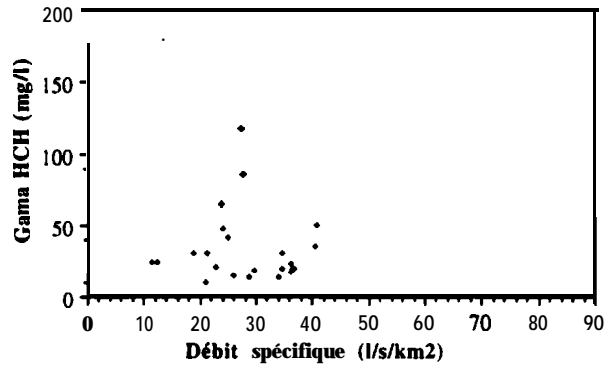
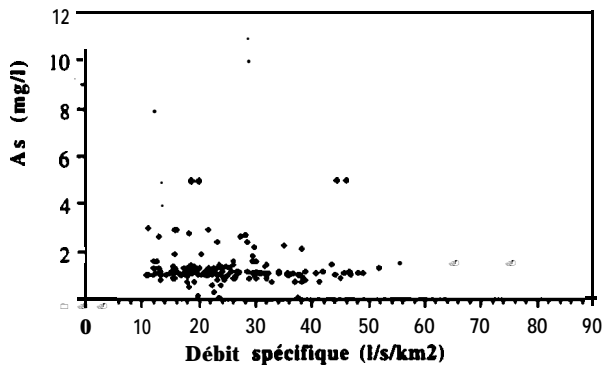
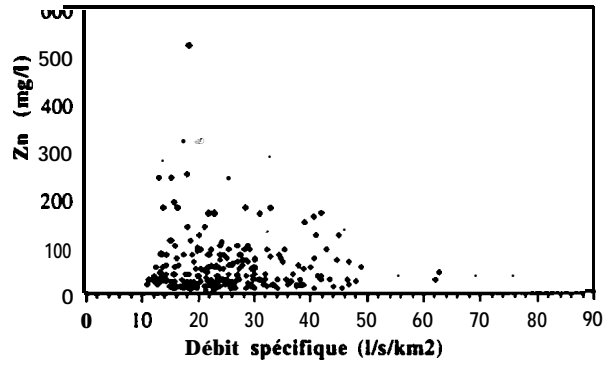
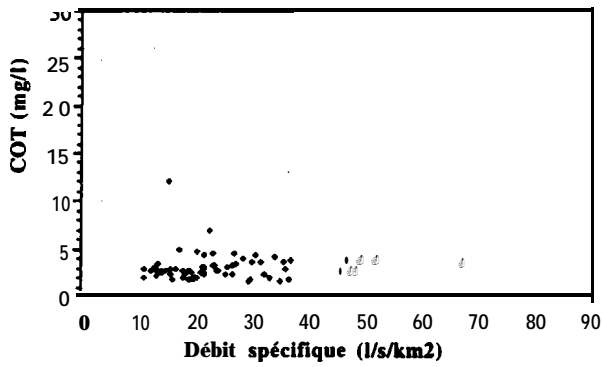
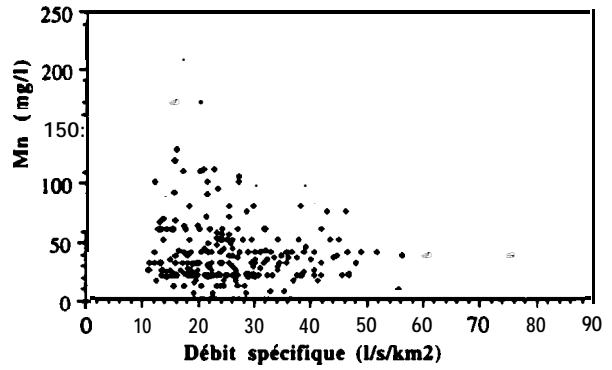
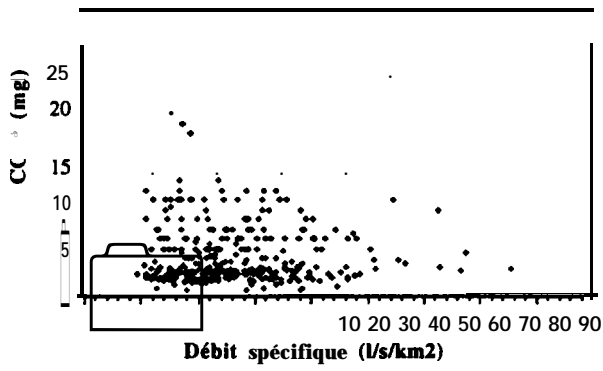


Figure 28. (suite)

Relations concentrations-débit (spécifiques à Seltz) pour les différents polluants.

6.1.4.- Variabilité des flux instantanés des différents éléments:

Le flux instantané (F_i) d'un élément est donné par le produit de la concentration instantanée (C_i) de l'échantillon par le débit (Q_j) du jour de l'échantillonnage:

$$F_i = C_i * Q_j$$

Les variabilités des flux instantanés sont établis pour les ions majeurs et les éléments nutritifs, elles sont groupés dans la figure 29. Les variabilités des flux instantanés sont relativement plus complexes car elles découlent à la fois de la variabilité des débits et des variabilités des concentrations.

Ions majeurs:

On retrouve les mêmes groupement des éléments que précédemment:

(i) Na^+ , K^+ et Cl^- : la variabilité des flux est relativement assez homogène au cours de l'année avec une baisse nette en juillet et août liée sans doute à la baisse des activités humaines alors qu'un léger maximum est observé en juin

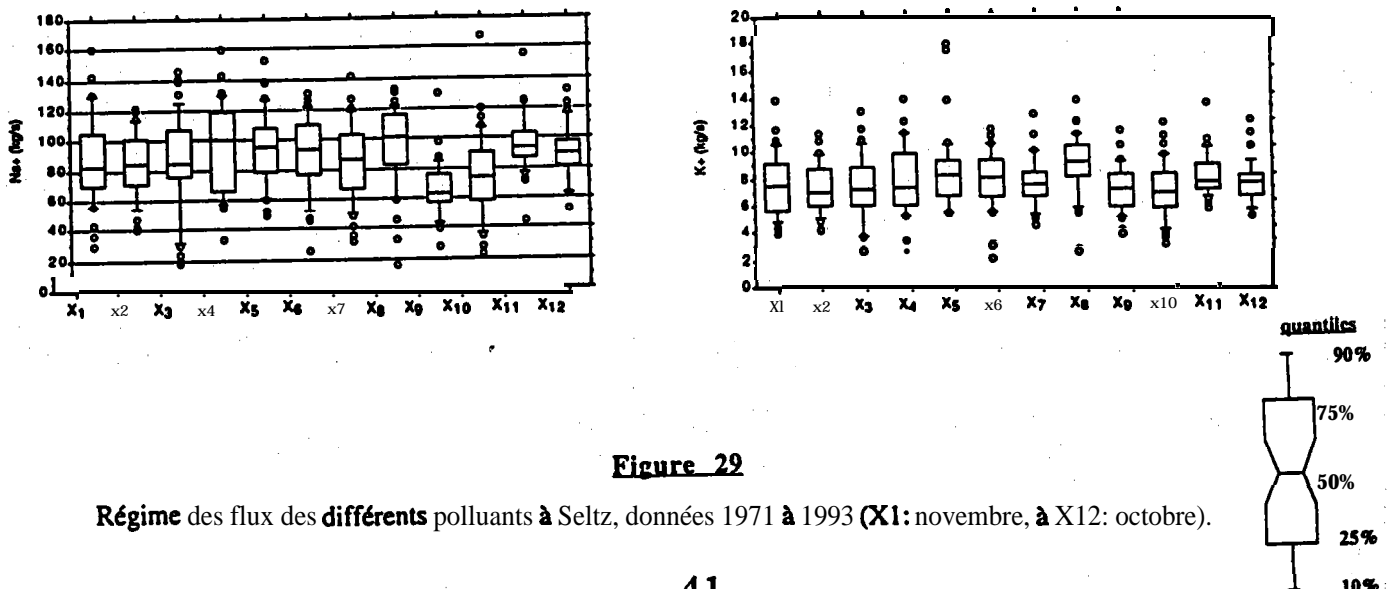
(ii) Ca^{++} , Mg^{++} , HCO_3^- et SO_4^{-2} : la variabilité des flux suit celle des débits et est relativement homogène au cours de l'année.

Éléments nutritifs:

Les flux instantanés des élément nutritifs sont relativement peu variables au cours de l'année. Lorsque les variations des concentrations sont peu marquées on retrouve le régime des débits (NO_2^- , NK , PO_4^{-3} et $Ptotal$).

La silice par contre montre des flux plus variables et plus élevés lors des basses eaux (automne et hiver) par rapport aux hautes eaux (printemps et été).

Les flux en solution à Seltz présentent donc une grande homogénéité saisonnière contrairement à certains fleuves où flux mensuels maxima et flux mensuels minima sont éloignés d'un facteur 5 à 10, les flux médians des flux journaliers de chaque mois ne présentent ici guère de différences excédant un facteur 2.



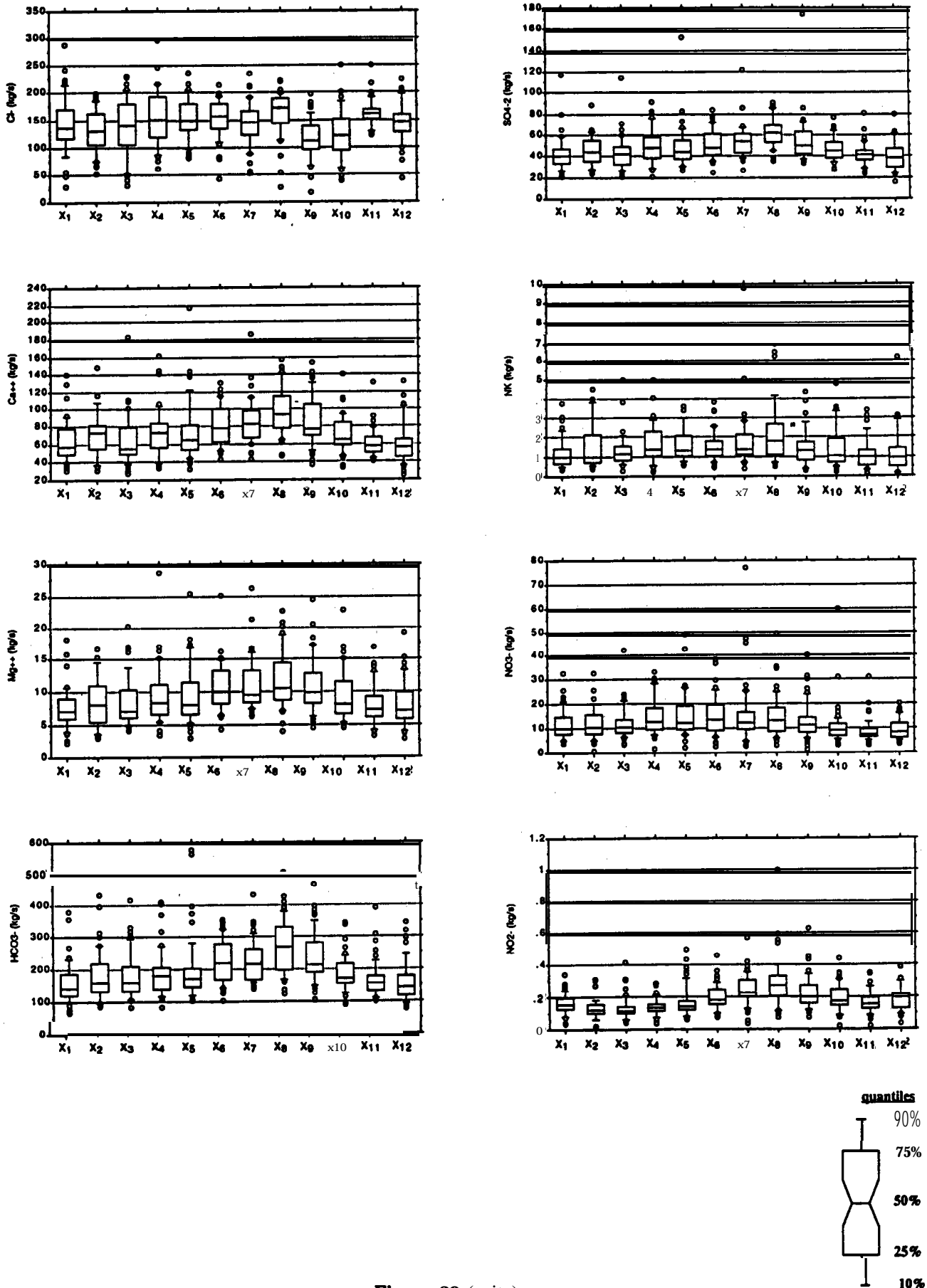


Figure 29 (suite)

Régime des flux des différents polluants à Seltz, données 1971 à 1993 (X1: novembre, à X12: octobre).

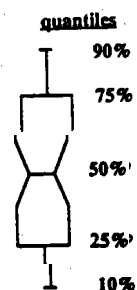
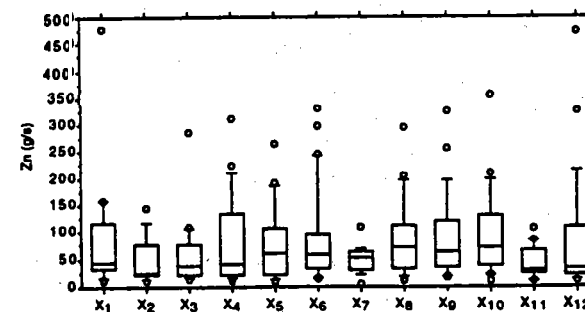
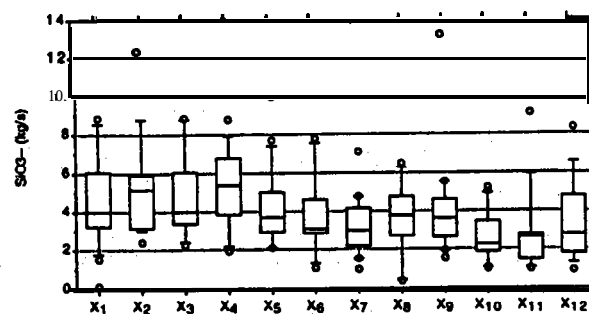
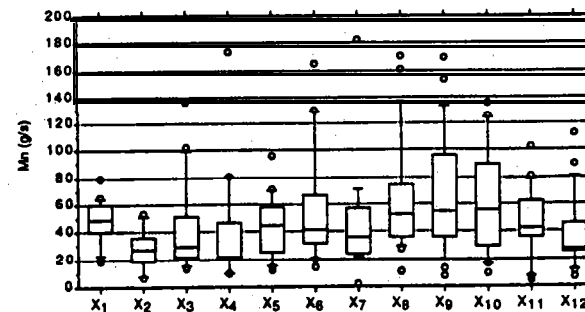
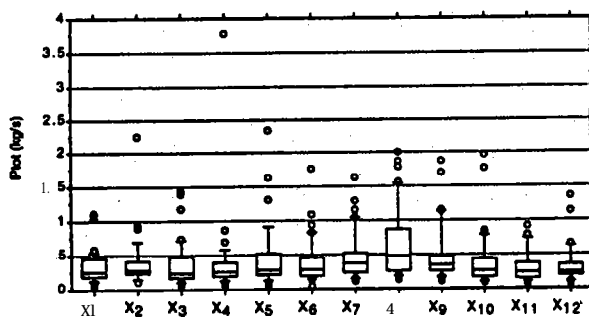
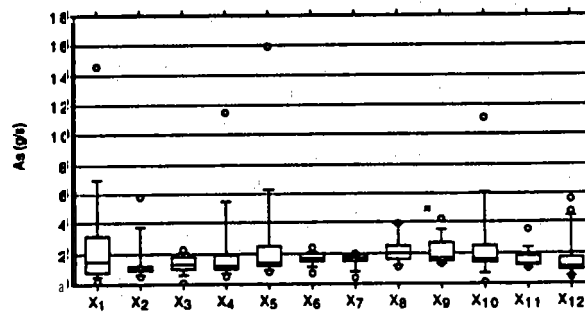
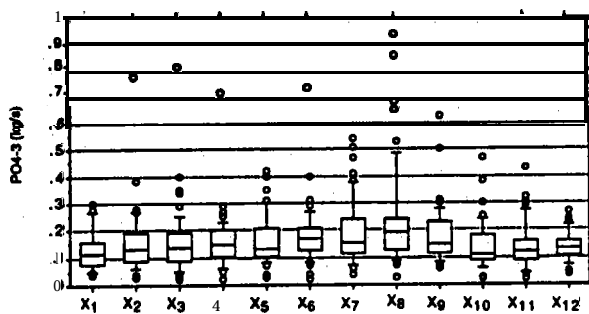
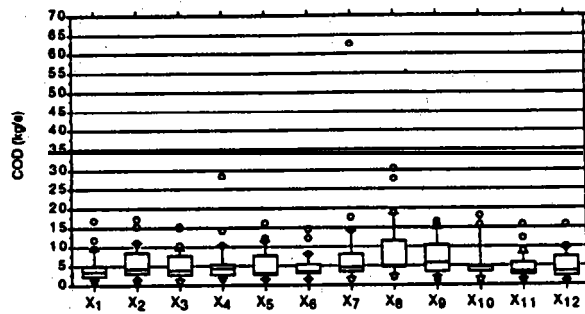
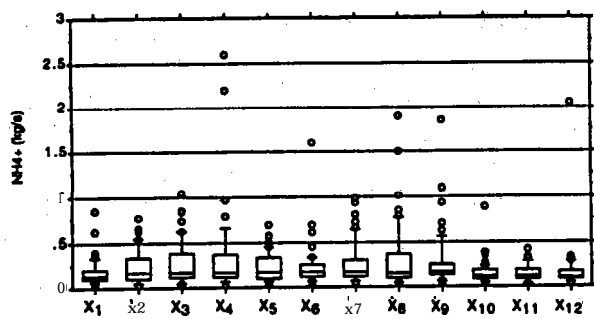


Figure 29 (suite)

Régime des flux des différents polluants à Seltz, données 1971 à 1993 (X1: novembre, à X12: octobre).

6.2.- Variabilités des différents polluants au Rhin à Lauterbourg (28 Déc 92 à 30 Déc 93)

Des données de débits, MES, ions majeurs, éléments nutritifs, et contaminants en traces organiques et inorganiques sont acquises entre le 28 décembre 1992 et le 30 décembre 1993. Les débits et les chlorures ont été mesurés tous les jours, les ions majeurs et les éléments nutritifs tous les 14 jours et les contaminants en traces tous les 28 jours.

Pour certains contaminants en traces les valeurs mesurées sont parfois inférieures à la limite de détection ce qui limite le nombre des données utilisables.

Les données sont pris ici en année civil allant de janvier à décembre et non en année hydrologique comme précédemment.

6.2.1.- Variation des débits journaliers à Lauterbourg (1993):

L'année 1993 est relativement sèche, les hautes eaux du printemps et d'été sont moins marquée.

L'hydrogramme (figure 30) de cette année est relativement commun sans crue exceptionnelle. On note toutefois une crue marquée vers la mi-décembre qui s'est produite entre deux prélèvements. Il en résulte que les concentrations en MES mesurées sont restées assez modestes, ne dépassant guère 30 mg/l la plupart du temps. Le débit moyen annuel est de 1049 m³/s.

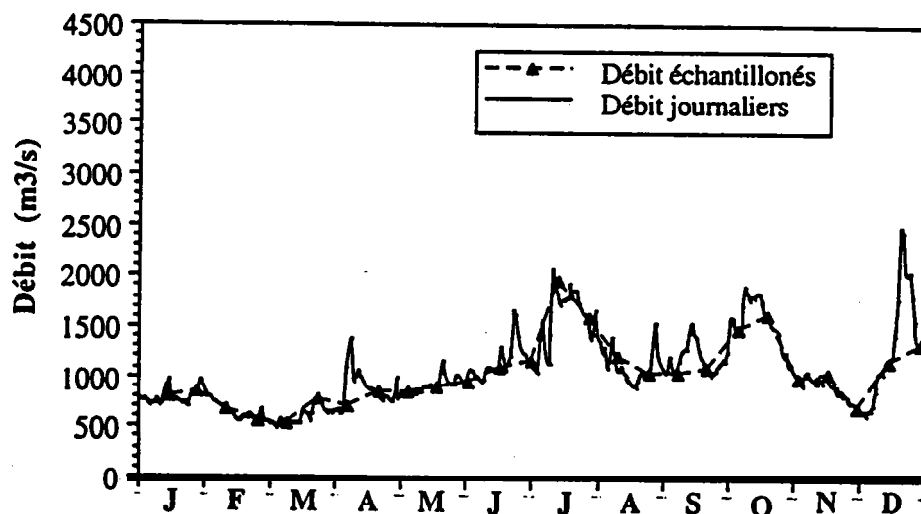


Figure 30

Variation des débits journaliers dans le Rhin à Lauterbourg en 1993.

6.2.2.- Représentativité des débit échantillonné par rapport à la variabilité des débits journaliers:

Le tableau 14 montre une comparaison entre la variabilité et moyenne des 365 débits journaliers (du 1er janvier 1993 au 31 décembre 1993) avec les moyennes et variabilités des débits échantillonnés (13 ou 26 par an selon les éléments) ainsi qu'une comparaison entre la variabilité et moyenne de 304 concentrations journalières à Maxau (du 1er janvier 1993 au 31 octobre 1993) avec les variabilités et moyennes des MES échantillonnées (13 ou 22 selon les éléments). Le domaine de variabilité est donné ici par les maximums et minimums des données.

	Analyses sur	n	Maximum	Minimum	Moyenne	Erreur
Débits (m ³ /s) journaliers	-	365	2490	480	1049	-
Débits (m ³ /s) échantillonnés	Eau	26	1970	530	1036	-1,2 %
		13	1590	530	1012	-3,5 %
	MES	13	1740	480	1008	-3,9 %
MES (mg/l) * journalières (Maxau)	-	304	150	8	27,5	-
MES (mg/l) * échantillonnés à Lauterbourg	Eau	22	39	5,5	16,6	-39,6 %
		13	39	7	16,8	-38,9 %
	MES	11	21,6	8,5	14	-49 %

Tableau 14

Représentativité des débits et des MES échantillonnés (à Lauterbourg) par rapport aux débits journaliers (à Lauterbourg) et MES journalières (à Maxau). * sur 10 mois Janvier à octobre, n: nombre d'échantillons.

Trois points essentiels sont tirés de ce tableau:

(i) les débits moyens des jours d'échantillonnages sont peu différents du débit moyen des débits journaliers, la différence ne dépasse pas 4 %.

(ii) Les débits extrêmes de l'année sont peu échantillonnés, aucun débit > 2000 m³/s n'a été échantillonné alors que le débit maximum de l'année est de l'ordre de 2500 m³/s.

(iii) Les MES échantillonnées sont très faibles: les moyennes des MES échantillonnées sont inférieures à la moyenne des MES journalières d'environ 40% à 50%.

6.2.3.- Variabilités des différents éléments:

Vu la faible variabilité des débits au cours de cette année, mais aussi la faible fréquence d'échantillonnage les concentrations des matières en suspensions sont restées assez faibles, généralement < 30 mg/l comme le montre la figure 31.

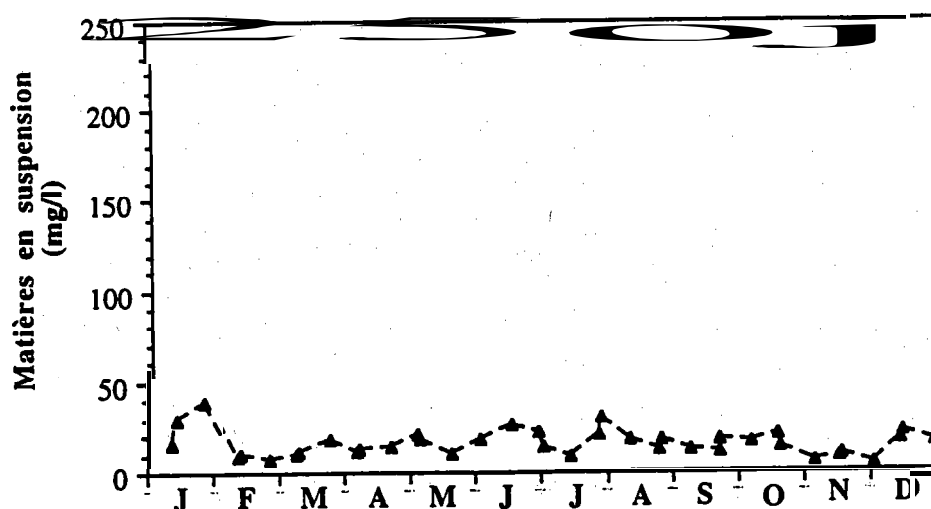


Figure 31

variation des concentrations des MES au Rhin à Lauterbourg (1993).

Dans l'ensemble les variations temporelles (figure 32) ne présentent pas de points particuliers par rapport au suivi antérieur mené à Seltz: les niveaux et les relations concentrations-débits sont respectées. Toutefois on observe des variations particulières pour l'azote kjeldhal (et donc Ntotal) et pour Ptotal: il s'agit d'un pic en début de juin et juillet pour les premiers et fin mai pour le second. Dans les deux cas ces pics excèdent d'un facteur 3 ou 4 les valeurs saisonnières sans qu'une augmentation du même ordre ne soit observée sur le carbone organique dissous ou total. Ces fortes valeurs ne sont pas non plus accompagnées par un épisode hydrologique marquant. Il conviendrait sans doute d'en vérifier la validation.

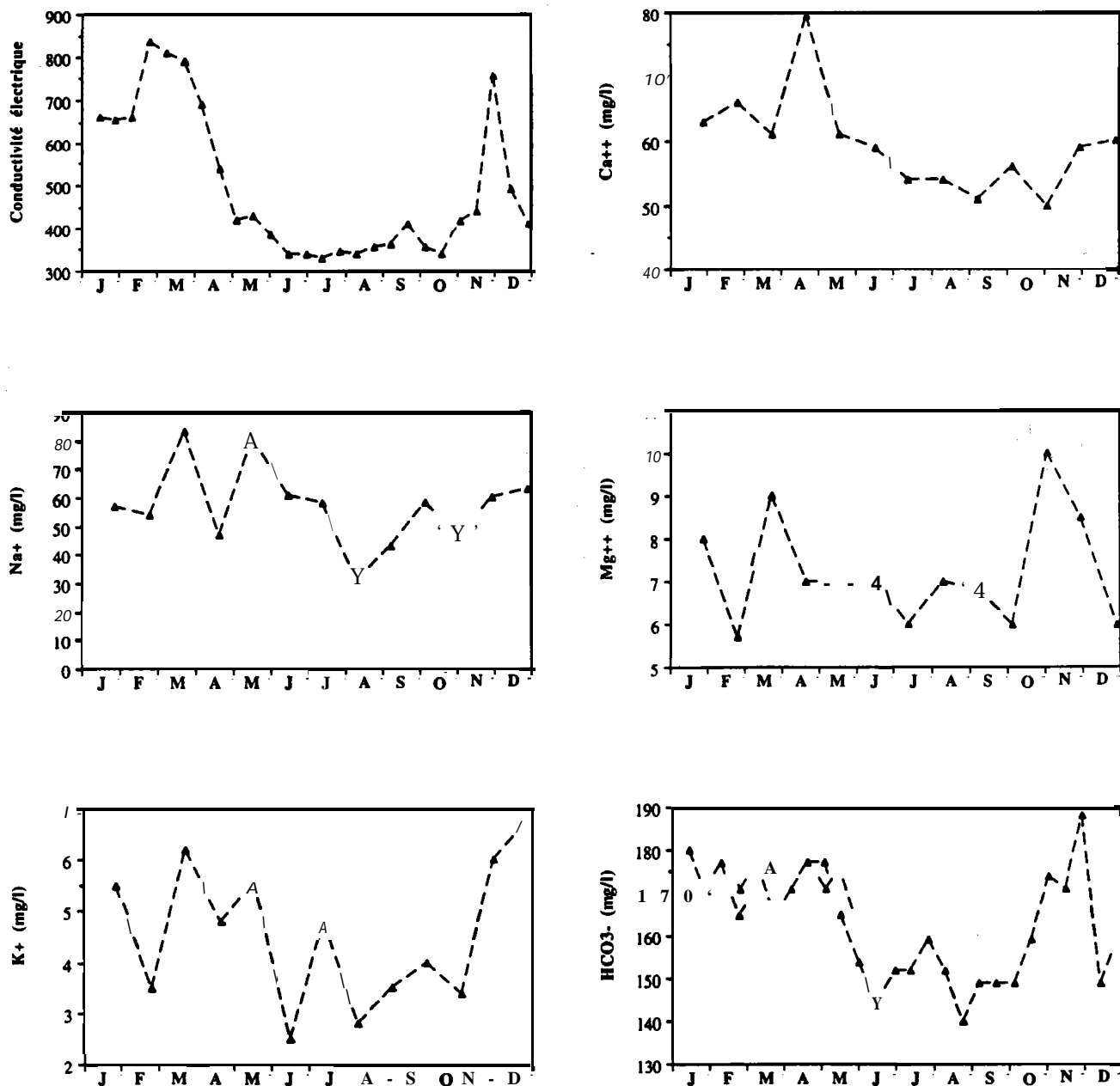


Figure 32
variation des concentrations des différents polluants au Rhin à Lauterbourg (1993).

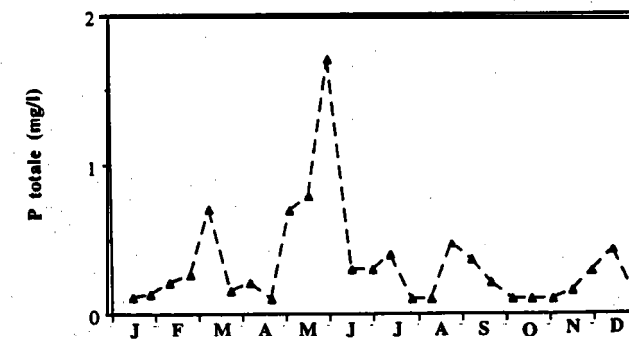
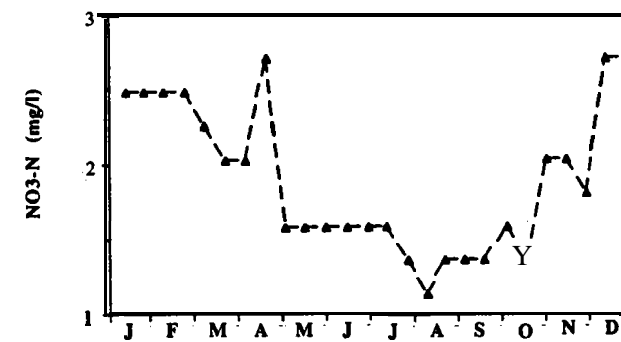
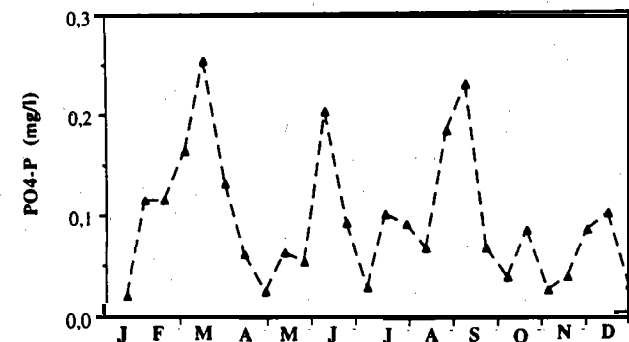
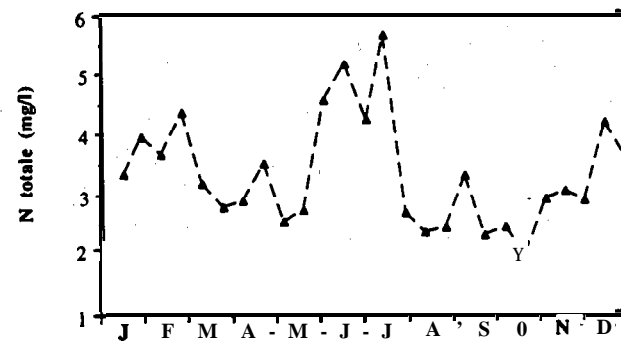
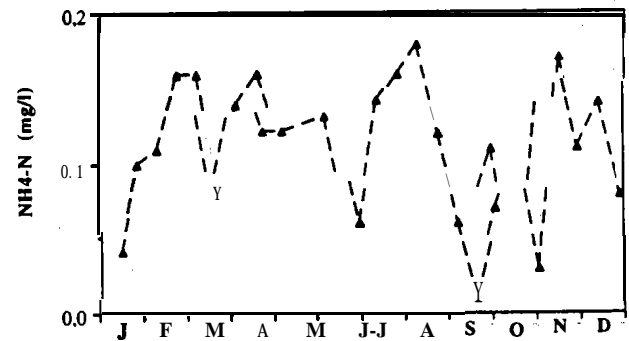
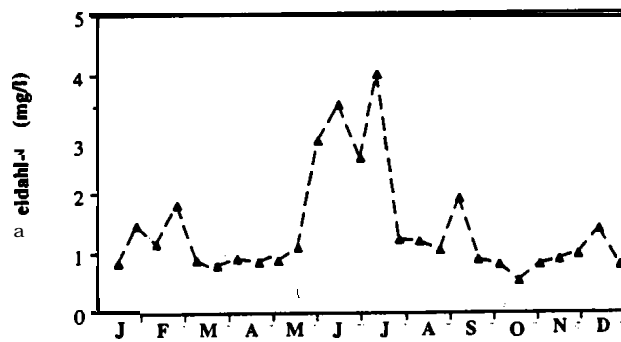
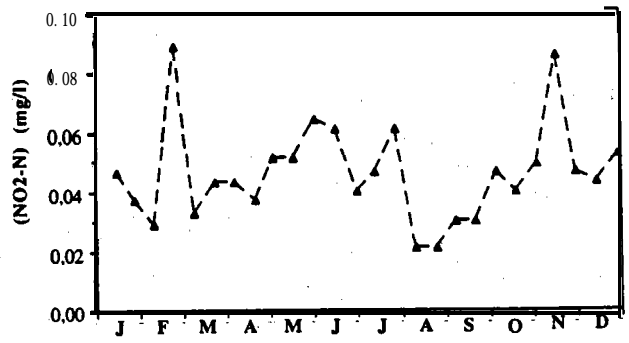
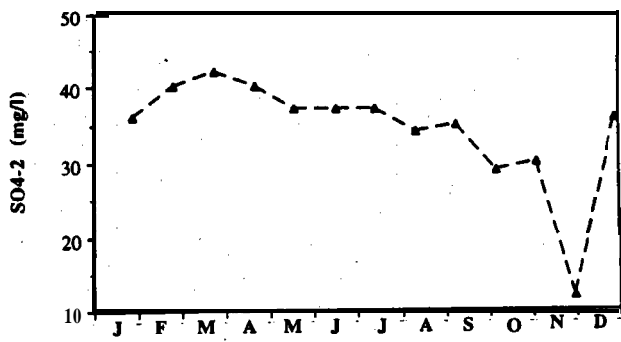


Figure 32 (suite)

variation des concentrations des différents polluants au Rhin à Lauterbourg (1993).

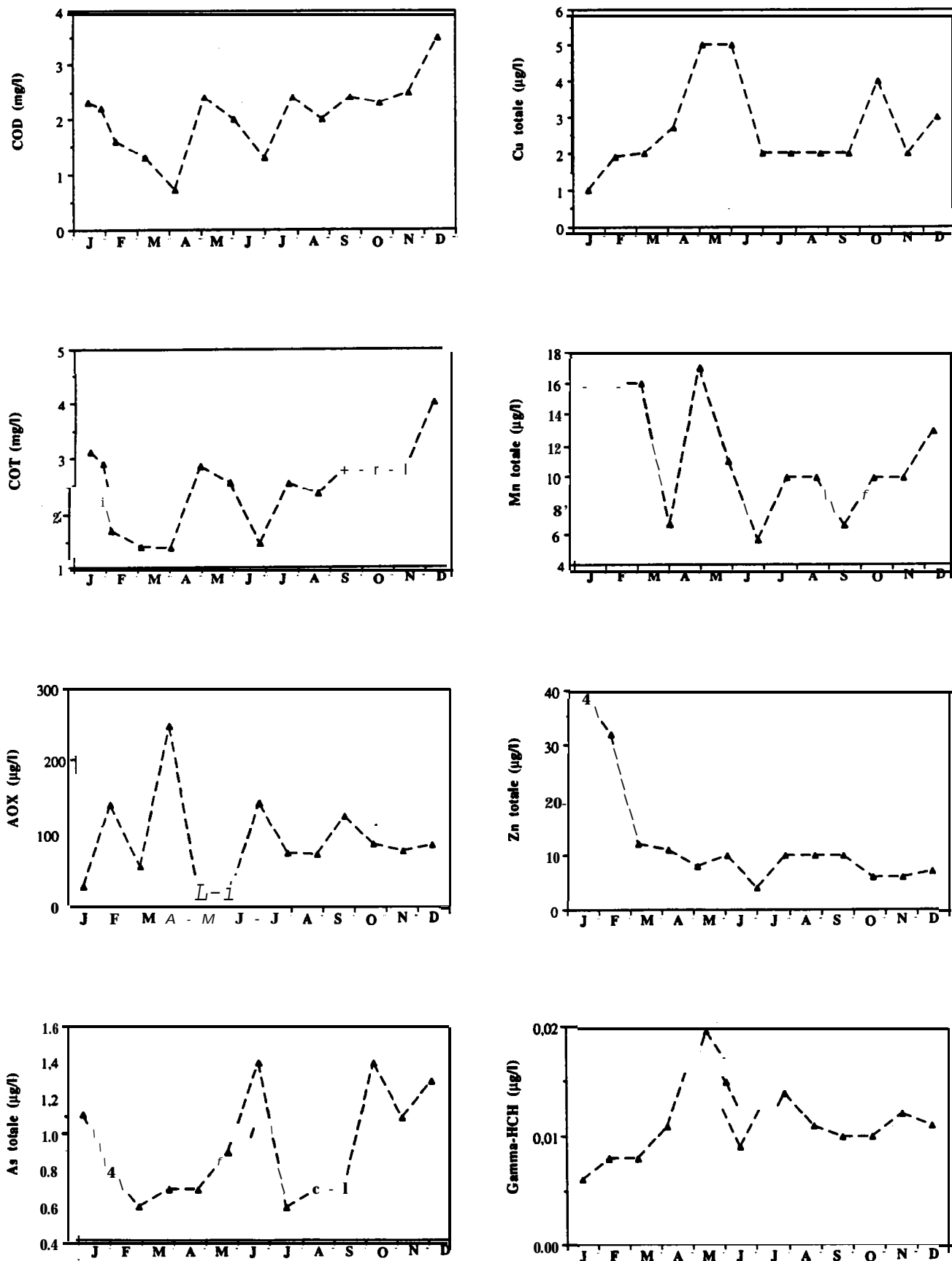


Figure 32 (suite)

variation des concentrations des différents polluants au Rhin à Lauterbourg (1993).

La fluctuations des chlorures à Lauterbourg (figure 33) est remarquable: on observe une tendance générale à la baisse lors des hautes eaux de juillet à octobre mais surtout une très grande variabilité au pas de temps hebdomadaire, caractéristique des activités anthropiques, ici vraisemblablement les rejet miniers. Par exemple vers fin février 1993 on note qu'en quelques jours les Cl^- sont passés de 280 mg/l à 50 mg/l sans que les débits ne varient. Cette fluctuation hebdomadaire à très bien été mise en évidence sur les variogrammes de suivi journaliers par Toma et al. (1992).

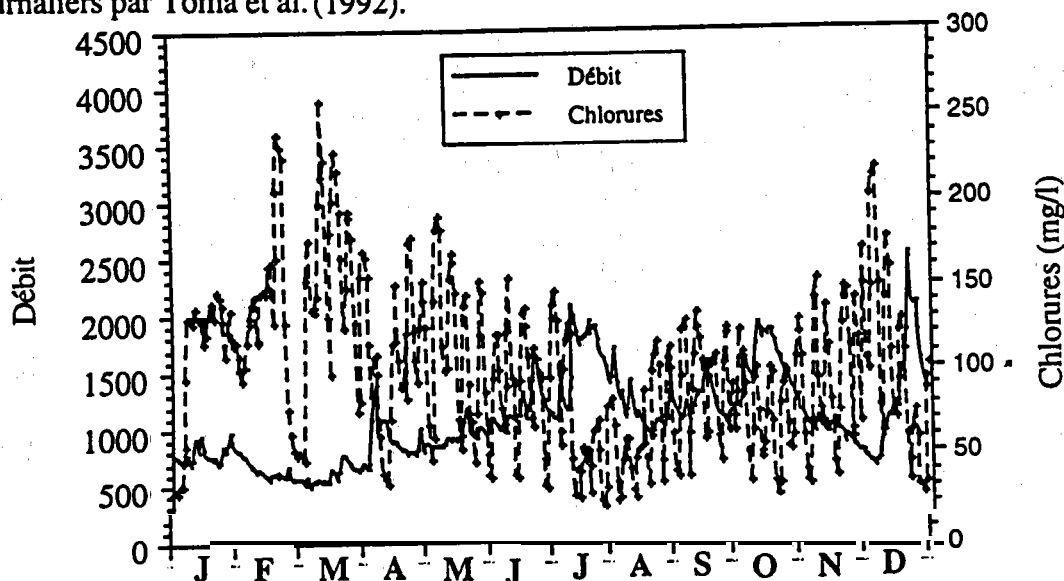


Fig 33

Fluctuations des concentrations journalières des chlorures dans le Rhin à Lauterbourg (1993)

6.2.4.- Simulations de calculs de flux des chlorures:

Données utilisées:

Nous disposons sur la période de 28 décembre 1992 au 30 décembre 1993 de données journalières de débit et de concentrations de chlorures.

Ces données permettent de calculer le flux réel en chlorures qui transite à la station de Lauterbourg et qui est de l'ordre de 94,4 kg/s.

Méthode utilisée:

Sur cette période nous avons testé quatre stratégies d'échantillonnages (mensuelle, bimensuelle, hebdomadaire et bihebdomadaire) et deux méthodes de calcul de flux (F2 et F4) (cf. 5.1. et 5.2.).

Résultats et discussion:

** Cyclicité des flux: la figure 34 présente les résultats des simulations de calcul de flux en utilisant la formule de calcul de flux F2.

Si on considère une fréquence de suivi seulement mensuelle on obtient donc 30 tirages de 12 flux journaliers. les médianes comme les moyennes de ces flux varient peu ainsi que nous le verrons plus loin et les extrêmes tirés sont également très comparables.

Pour les tirages bimensuels les flux sont encore très comparables et les écarts d'un tirage à l'autre sont bien sur resserrés. Dans ces cas le jour de prélèvement change à chaque mois ou à chaque quinzaine.

Par contre dans l'échantillonnage hebdomadaire, chaque tirage parmi les 7 possibles, correspond à un jours de la semaine (X1: lundi, X2: mardi, ..., X7: dimanche). Il en résulte une différence marquée entre les flux médians (et également les quantiles des distributions) d'un jour à l'autre, avec un flux minimum sur l'ensemble des mercredi de l'année (62 kg/s)

et un flux maximum pour l'ensemble des samedi (120 kg/s). Cette différence du simple au double illustre très bien les biais possibles même pour des suivi de hautes fréquences.

Un échantillonnage tous les quatre jours, enfin, "casse" le biais et les flux médians des quatre tirages (comme les flux moyens) sont alors quasiment identiques.

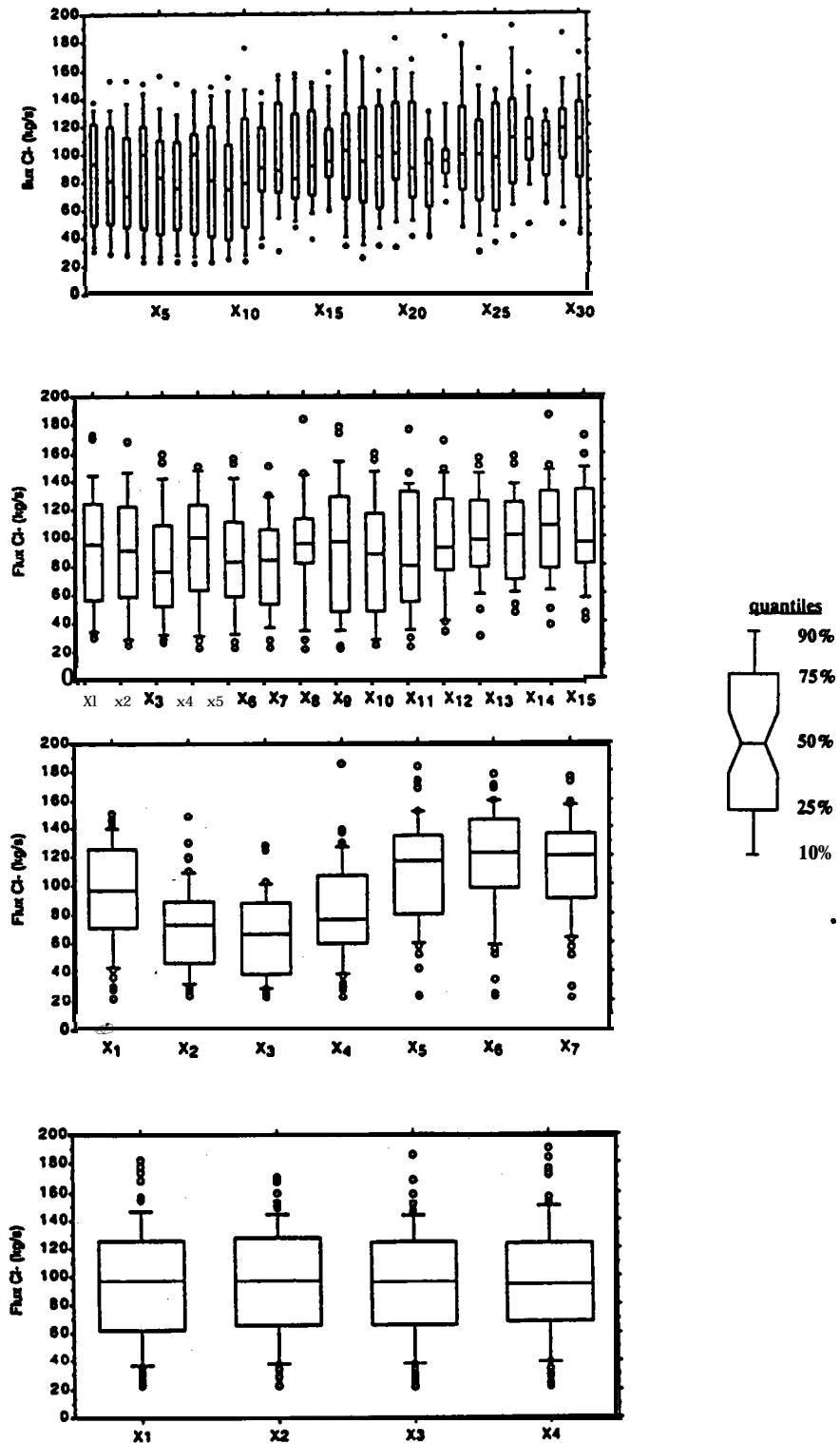


Figure 34

Distribution statistiques des flux tirés lors de chaque simulation de calcul de flux, pour l'échantillonnage:

(A) mensuel (30 possibilité X1 à X30), (B) bimensuel (15 possibilité X1 à X15),

(C) hebdomadaire (7 possibilité, X1=lundi à X7=dimanche), (D) bihebdomadaire (X1 à X4)

**** Erreurs:** pour chaque stratégie d'échantillonnage les flux calculés (F_c) pour chaque tirage sont comparés aux flux réel (F_r) en examinant les deux méthodes de calculs des flux (F2 et F4). Ainsi on a calculé les erreurs commises sur les flux tirés ($\text{Erreur} = (F_c - F_r) * 100 / F_r$), la figure 35 montre la variation des erreurs commises en fonction des tirages.

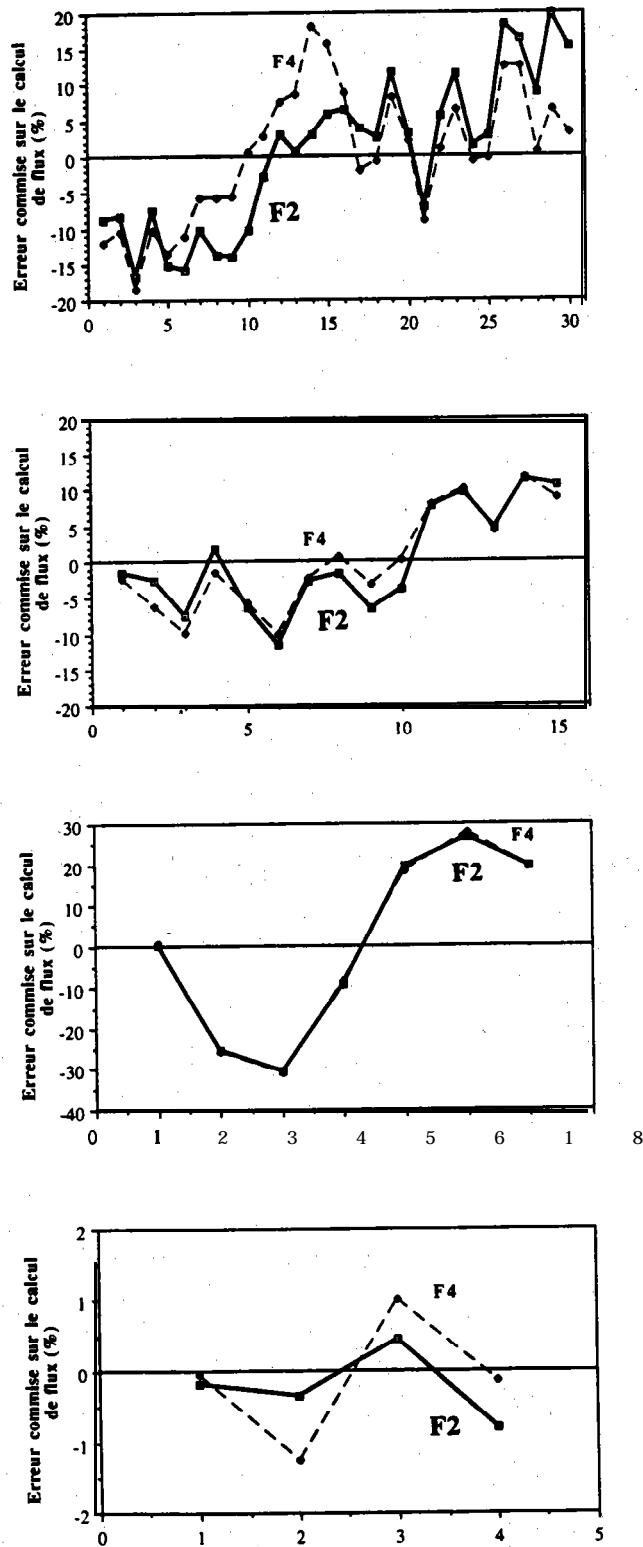


Figure 35

Variations des erreurs commises sur les flux tirés (tirages en abscisses, ex: 30 tirages pour le mensuel) des chlorures pour l'échantillonnage (A) mensuel (30 tirages), (B) bimensuel (15 tirages), (C) hebdomadaire (7 tirages), (D) bihebdomadaire (4 tirages). Teste des deux méthodes de calcul de flux F2 et F4.

Comme pour les simulations de calcul de flux des MES, deux paramètres importants sont examinés ici:

- (i) l'erreur maximale commise pour une stratégie d'échantillonnage donnée,
- (ii) la médiane des erreurs commises.

L'erreur maximale commise sur un échantillonnage seulement mensuel est de l'ordre de 20% (figure 35A). Il n'y a presque pas de biais sur ces erreurs maximales et les 2/3 de ces erreurs maximales sont comprises entre 0 et 10%, tantôt en surestimation, tantôt en sous-estimation.

Pour un échantillonnage bimensuel (figure 35B) la gamme des erreurs maximales se restreint entre -10% et +10%. Un léger biais à la sous estimation est possible, et la moitié des erreurs n'excède pas 5% en valeur absolue.

Par contre l'échantillonnage hebdomadaire effectué systématiquement le même jour de la semaine induit une erreur systématique avec une sous estimation de 30% les mercredis et une surestimation de 30% les samedis (figure 35C).

Un échantillonnage bihebdomadaire (figure 35D) conduit à des flux très proches de 0,2 à 1% d'erreur si on adopte le mode de calcul F1 et de 0 à 1,3% si on adopte le mode de calcul F4.

Les modes de calcul F2 et F4 sont, comme pour les flux de MES de Maxau, identiques. Le tableau 15 récapitule les résultats obtenus pour cet exercice de simulation.

	Erreur maximale (%)		médiane des erreurs (%)	
	F2	F4	F2	F4
Mensuel	20	18	+2,7	+0,71
Bimensuel	12	12	-1,6	-1,4
Hebdomadaire	31	31	+0,23	+0,6
Bihebdomadaire	0,8	1,2	-0,26	-0,09

Tableau 15

Erreurs maximales et médianes de erreurs commises sur les bilans simulés des chlorures pour les quatre stratégies d'échantillonnage et les deux modes de calcul des flux (1993).

Trois constatations majeures sont tirées de ce tableau:

(i) erreur maximale accentuée par l'échantillonnage hebdomadaire à cause de la cyclicité hebdomadaire dans la variation des concentrations des chlorures.

(ii) pas de différence au niveau de l'erreur maximale entre les deux méthodes de calcul des flux (F2 et F4),

(iii) les médianes des erreurs sont assez faibles et proches de 0 pour les différentes stratégies d'échantillonnages et les deux méthodes de calcul de flux.

**** Conclusion:**

Au vu de ces résultats il semble donc:

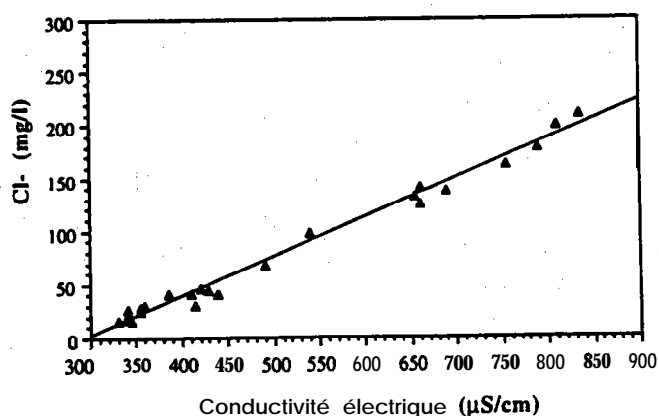
(i) si on privilège les flux de Cl- à long terme, des échantillons mensuels sont suffisants pour avoir une bonne estimation des flux (<5%) à long terme, et de l'ordre de (10%) sur le moyen terme.

(ii) si l'on veut une bonne précision à cours terme il est nécessaire d'adopter un échantillonnage bimensuel pour avoir une estimation des flux chaque année de l'ordre de (<15%), ou un échantillonnage bihebdomadaire pour avoir une estimation des flux à 5% près.

(iii) l'échantillonnage hebdomadaire est à proscrire car l'échantillonnage le même jour toute les semaines conduirait à une erreur systématique, même à long terme (si l'année 1993 est reproductible), allant jusqu'à plus ou moins 30%.

6.2.5.- Autre possibilité pour l'estimation des flux des chlorures:

La régression chlorures-conductivités est très bien établie (figure 36), elle peut permettre d'effectuer une estimation satisfaisante des concentrations de Cl⁻ en vue d'établir les flux par l'installation d'une surveillance en continue des Cl⁻. De plus les fluctuations possibles de moins de 24 h, liées aux rejets des MDPA, pourraient ainsi être étudiées particulièrement lors des journées de forte évolution de Cl⁻ comme le mardi et le mercredi.



Fi 36

Corrélation entre les conductivités électriques (µS/cm) et les concentrations des chlorures au Rhin à Lauterbourg (1993).

6.2.6.- calcul de flux des micropolluants particuliers à Lauterbourg:

Les flux particuliers sont plus complexes à établir, ils dépendent à la fois de trois paramètres: débit, MES, et teneurs en micropolluants. Dans la plus part des fleuves l'ordre des variabilités est MES ≥ Q > teneurs.

Il ne s'agit pas ici d'établir des bilans précis pour les différents éléments, mais nous avons essayé de comparer deux modes de calcul de flux (F13 et F14) en utilisant les débits et les teneurs des micropolluants dans les MES mesurés à Lauterbourg, ainsi que les MES mesurés à Lauterbourg ou à Maxau.

Modes de calcul de flux:

Deux modes d'établissements des flux sont testés: F13 et F14 (Meybeck et al., 1994, Rapport inter-agences).

**** Méthodes F13:** Le flux est donnée par la moyenne des flux instantanés.

$$F13(\mu) = \sum (T_{\mu i} * MES_i * Q_i) / n$$

F13(µ): Flux du micropolluant (µ). **T_{µi}:** teneur du micropolluant (µ) dans les MES le jour de l'échantillonnage i. **MES_i:** concentrations des MES mesurés le jour de l'échantillonnage i. **Q_i:** Débit du jour de l'échantillonnage i. n: nombre des échantillons.

Méthode F14: On suppose que la teneur du micropolluants dans les MES est constante pendant un intervalle autour de l'échantillon.

$$F14(\mu) = \sum (T_{\mu i} * \sum(MES_j * Q_j)_i)$$

F14(μ): Flux du micropolluant (μ). **T μ i:** teneur du micropolluant (μ) dans les MES le jour de l'échantillonnage i . **$\sum(MES_j * Q_j)_i$:** Flux des MES pendant l'intervalle de temps autour de l'échantillon i .

Rq: l'intervalle de temps autour de l'échantillon est défini par un simple partage de la durée entre deux échantillons en deux périodes d'égales durées.

Le bilan type F14 ne peut être établi que si les flux de MES réel autour des analyses de micropolluants particuliers sont connus, ici à la station de Maxau seulement. Comme les MES de Maxau sont supérieures de 50% à celles de Lauterbourg on tentera aussi le calcul F13 avec les analyses de Lauterbourg et les MES de Maxau.

Données utilisées:

Période du 1er janvier au 30 octobre 1993 soit 304 jours.

Débits journaliers à Lauterbourg

304 valeurs

Concentrations de MES à Lauterbourg

11 échantillons

Teneurs des micropolluants dans les MES à Lauterbourg

\approx 11 échantillons

Concentrations journalières des MES à Maxau

304 échantillons

Les MES à Maxau ne sont pas connus au delà du 30 octobre 1993, les bilans sont donc limités à 10 mois.

Résultats et discussions:

Le flux réel des MES est calculé sur la base des données journalières de concentrations de MES à Maxau et des débits journaliers à Lauterbourg est de 35,8 kg/s (du 1er janvier au 30 octobre 1993).

Le tableau 16 regroupe les résultats de ce test de calcul de flux par les deux modes. En premier lieu nous avons calculé les flux des micropolluants par la méthode F13 en utilisant toutes les données prises à Lauterbourg de débits, des MES et des teneurs en micropolluants des jours d'échantillonnages, ce qui correspond à 11 triplets: Q_i , MES_i , $T_{\mu i}$, (colonne: F13 MES Lauterbourg). Dans la colonne suivante (colonne: F13 MES Maxau) les MES de Lauterbourg sont remplacés par les MES mesurés les mêmes jours à Maxau. Enfin les flux sont établis en utilisant les débits journaliers et les teneurs mesurés à Lauterbourg et les MES journalières mesurées à Maxau (colonne: F14 MES Maxau).

Comparaison des flux de MES:

1 - Les flux de MES conditionnent en grande partie les flux des micropolluants particuliers. En comparant F13 MES Lauterbourg et F13 MES Maxau: les flux de MES établis sur la période choisie (même fréquence des données) sont plus faibles par rapport au "flux réel" respectivement d'environ 54% et 22%. La différence entre F13 MES Maxau et le "flux réel" (F14 MES Maxau) s'explique par l'échantillons restreint de la première méthode ou seulement 11 échantillons de MES, correspondant aux analyses chimiques, sont considérées par rapport à 304 valeurs journalières. C'est un exemple concret de la représentation médiocre des MES surveillées à faibles fréquence. La différence entre F13 MES Lauterbourg et F14 MES Maxau combine à la fois les incertitudes d'un échantillon à faible fréquence et une erreur plus grande liée au fait que les mesures des concentrations de MES sont généralement plus faibles à Lauterbourg par rapport à Maxau (on ne note aucun affluent important entre les deux stations et qui soit susceptible de modifier considérablement les concentrations de MES).

éléments	Unité	F13 (MES Lauterbourg)	F13 (MES Maxau)	F14 (MES Maxau)	F13 (t) (MES Lauterbourg)	F13 (t) (MES Maxau)	F14 (t) (MES Maxau)	F14/F13 (MES MAXAU)
		(1).	(2).	(2).	(1).	(2).	(2).	
MES	Kg/s	16,52	27,93	35,83	433807	733718	941096	1,28
As	mg/s	238	390	486	6,25	10,25	12,76	1,24
Cd	mg/s	11,75	20,12	25,99	0,31	0,53	0,68	1,29
Cr	mg/s	1417	2359	2994	37,22	61,97	78,65	1,27
CU	mg/s	1042	1893	2400	27,37	49,71	63,05	1,27
Fe	g/s	427	726	927	11226	19068	24361	1,28
Hg	mg/s	11,50	18,07	18,70	0,31	0,47	0,49	1,03
Mn	mg/s	11834	19700	25514	311	517	670	1,30
Ni	mg/s	600	1166	1487	18,12	30,63	39,05	1,27
Pb	mg/s	922	1598	2056	24,21	41,98	54,00	1,29
Zn	mg/s	2841	4762	6031	74,63	125,07	158,42	1,27
4,4'-DDE	mg/s	1,00	1,82	220	2,85	4,77	5,77	1,21
Hexachlorobenzène	mg/s	1104	1695	2180	29,00	44,53	57,26	1,29
1,2,4-Trichlorobenzène	mg/s	343	552	661	9,01	14,50	17,35	1,20
PCB 28	µg/s	73,92	116,09	132,51	0,0019	0,0030	0,0035	1,14
PCB 52	µg/s	54,10	89,33	112,62	0,0014	0,0023	0,0030	1,26
PCB 101	µg/s	99,65	134,68	170,50	0,0022	0,0035	0,0045	1,27
PCB 138	µg/s	160	266	338	0,0042	0,0070	0,0089	1,27
PCB 153	µg/s	151	252	320	0,0040	0,0066	0,0084	1,27
PCB 180	µg/s	91	158	201	0,0024	0,0042	0,0053	1,27
PCB 118	µg/s	93	156	198	0,0024	0,0041	0,0052	1,27
Fluoranthène	mg/s	6,18	10,34	13,18	0,1623	0,2716	0,3463	1,27
Benzo(k)fluoranthène	mg/s	1,92	3,31	4,19	0,0505	0,0868	0,1099	1,27
Benzo(b)fluoranthène	mg/s	4,01	6,48	8,29	0,1054	0,1703	0,2178	1,28
Benzo(a)pyrène	mg/s	2,69	4,41	5,64	0,0706	0,1157	0,1482	1,28
Benzo(ghi)perylène	mg/s	2,99	4,91	6,23	0,0786	0,1264	0,1637	1,29
Indeno(1,2,3-cd)pyrène	mg/s	4,46	7,15	9,19	0,1172	0,1878	0,2414	1,28
Pentachlorophénol	µg/s	58,56	96,98	101,76	0,0015	0,0025	0,0027	1,05

Tableau 16: Calcul des flux des polluants à la station de Lauterbourg (1er janvier 93 au 31 octobre 93). (1) Q, MES et teneurs à Lauterbourg, (2) Q et teneurs à Lauterbourg, MES à Maxau.

2 - Flux de micropolluants (F13 MES Lauterbourg) et (F13 MES Maxau): les flux des différents micropolluants reflètent ces différences: ne disposant pas de données suffisantes pour établir les flux réel, on note ici simplement les différences entre les deux tests avec une sous estimation toujours liée aux suspensions mesurés à Lauterbourg du premier test par rapport au deuxième d'environ 35% à 45% selon les éléments.

3 - Comparaison (F13 MES Maxau) et (F14 MES Maxau): on effectue ici un vrai test pour comparer les méthodes de calcul, mais sur un échantillon de données artificielles puisqu'on mélange les MES de Maxau avec les teneurs en micropolluants de Lauterbourg. En raison du tirage au sort des 11 valeurs de MES et des débits correspondant, le flux F13 de MES est donc de 27,9 kg/s comparé à 35,8 kg/s calculé sur l'ensemble des valeurs journalières. La méthode F14 qui attribue une teneur constante pendant un intervalle de temps autour de l'analyse est en général de 28% supérieure à la méthode F13 des moyennes des flux particulières à l'instant de l'analyse pour la plupart des micropolluants. Aucun d'entre eux ne présente un écart supérieur à +29%, par contre pour le Hg et le pentachlorophénol les flux F13 et F14 sont très proches avec des écarts de +3 et +5% seulement, mais ce comportement ne s'observe ici que sur 2 polluants sur 27.

Conclusions:

Nous avons signalé ci dessus que les flux des micropolluants particuliers dépendent de la variabilité des débits qui est supérieure à la variabilité des MES, elle même supérieure à la variabilité des teneurs des micropolluants dans les suspensions.

Nous attachons une importance majeure ici à la mesure des concentrations des matières en suspensions, car si les débits demeurent relativement plus faciles à mesurer, il n'en est pas de même pour les concentrations des suspensions. En effet la répartition des MES au sein d'une section de la rivière est hétérogène et la mesure en un point unique de la section risque de biaiser fortement les données de MES. Il est recommandable de faire des prélèvements au milieu de la rivière en plein ligne de courant (une mesure sur la rive peut induire une grande sous-estimation des matières en suspensions).

Pour les teneurs des différents polluants des efforts importants restent à faire pour mieux comprendre les variabilités des différents éléments.

Il est encore tôt pour conclure au rendement d'un mode de calcul de flux, toutefois le mode F14 semble être le meilleur car il tient compte du flux réel des suspensions, mais nécessite donc des mesures journalières des matières en suspensions.

6.3.- Variabilité des descripteurs de la qualité de l'eau au Rhin à Village-Neuf (aval de Bâle) 1985 à 1994:

La station de Village-Neuf est située légèrement en aval de Bâle et est surveillée par la "Service Hydrologique et Géologique fédéral, Bern".

Les données de débits, MES, ions majeurs, éléments nutritifs, et contaminants en traces inorganiques (métaux totaux) sont acquises entre le 1er janvier 1985 et le 30 décembre 1994. Les débits et les conductivités électriques ont été mesurés tous les jours, les ions majeurs, les éléments nutritifs et les métaux en traces deux fois par mois.

Pour certains éléments nutritifs et certains contaminants en traces les périodes de suivi sont plus courtes (cf. tableau 4).

Les données sont prises ici en année civil allant de janvier à décembre et non en année hydrologique comme précédemment..

Ces données nous sont parvenues le 22 novembre 1995, nous en présentons donc seulement un dépouillement sommaire.

6.3.1.- Variation des débits journaliers à Village-Neuf:

Il ne s'agit pas ici de rentrer dans les détails des variations des débits journaliers, nous avons tout simplement considéré la corrélation établie précédemment (cf.: 2.2.2.) entre les débits de cette station et les débits de la station de Maxau. La corrélation donnée par les 3650 points de cette période est très bonne, elle donne un coefficient de corrélation $R^2 = 0,88$ avec les débits de la station Village-Neuf qui sont relativement plus faibles de 15 à 20% par rapport à ceux de Maxau (station située en aval).

6.3.2.- Variabilités des différents éléments:

Il ne s'agit, non plus, pas ici de rentrer dans le détail des variabilités des différents descripteurs. Nous avons donc simplement examiné s'il y a un apport de plus par rapport aux données des autres stations pour compléter nos connaissances sur les variabilités des différents paramètres. Dans l'ensemble trois cas de figures sont observés:

(i) concentrations mesurées à Village-Neuf sont plus faibles à celles à Seltz et Lauterbourg: P-PO₄, NH₄⁺, NK, NO₂⁻, Ptotal, Zn total, K⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄⁻², et COD.

(ii) concentrations mesurées à Village-Neuf sont dans la gamme de celles mesurées à Seltz: c'est le cas de COT, SiO₂, NO₃⁻, Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺.

(iii) pour les métaux en traces totaux, le problème de fiabilité des données resurgi, et on note pour certains éléments un nombre non négligeable de données inférieures à la limite de détection (Cdtotal, Nitotal, Hgtotal, Cr total).

Cycles saisonniers:

Les variations temporelles des différents éléments sont groupés dans la figure 37.

La conductivité, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, PO₄⁻³, NO₃⁻, Ntotal, SiO₂ présentent de remarquables variations saisonnières sur la période de 10 ans considérée. L'origine de ces variations est sans doute multiple. Pour les ions majeurs elle résulte sans doute de processus de dilution (des eaux souterrains par les eaux de surface et des apports domestiques et industriels par les hautes eaux d'été), en effet les variations temporelles des concentrations et des débits sont opposées. Ces variations sont éclairées par les relations concentrations-débits (annexe). Les cycles de Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, et Cl⁻ sont dus aux variations saisonnières des débits. Par contre il n'y a pas de variations nettes de SiO₂, et Ca⁺⁺ avec le débit. Elles seraient plutôt liées à l'utilisation biologique (SiO₂) et à la précipitation (Ca⁺⁺) en période estivale, ce qui coïncide avec la période des hautes eaux.

Les cycles saisonniers de N-NH₄⁺ et P-PO₄⁻³ sont probablement liés à la dilution des effluents mais l'absence de relation concentration-débit pour N-NO₃⁻ et donc pour Ntotal empêche d'attribuer ce processus aux nitrates.

Tendances:

Les tendances à long terme sont bien visibles (figure 37). On remarque une diminution nette pour les phosphates - et donc le Ptotal - interdits dans les lessives suisses depuis 1985, les chlorures et les sulfates. Le potassium pourrait croître légèrement et le calcium diminuer. En ce qui concerne les métaux des maximums de Pb total et de Zn total sont visibles, dans les périodes de 1988 à 1992, surtout sur les valeurs fortes qui augmentent. Les données de Cd, Cr, Hg et Ni sont difficilement exploitables. Les données de Zn total deviennent beaucoup plus régulières à partir de 1990. Le Cu total diminue d'un facteur 3 en 10 ans. Des tendances à la baisse des concentrations similaires sur d'autres fleuves sont expliqués par les auteurs comme étant le résultat de l'amélioration des techniques d'échantillonnages et d'analyses et non une diminution de la pollution. Il convient donc de rester prudent sur ces évolutions à long terme et ces mesures effectuées sur l'eau brute.

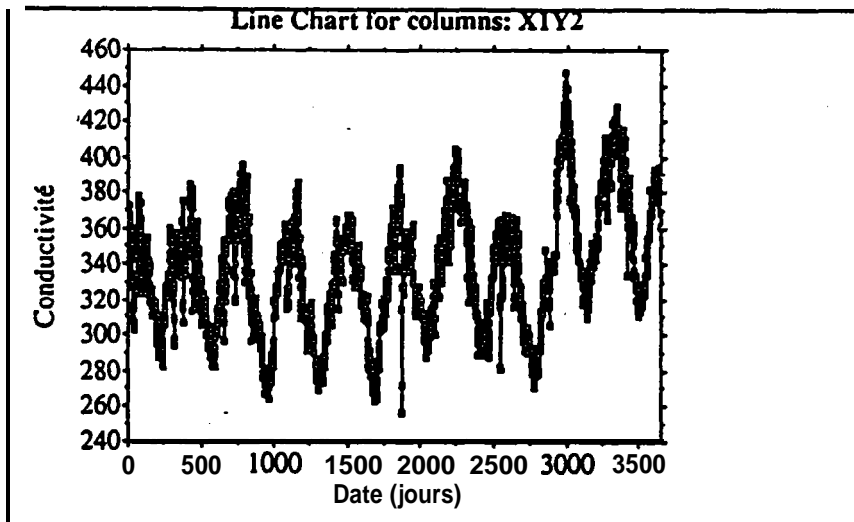
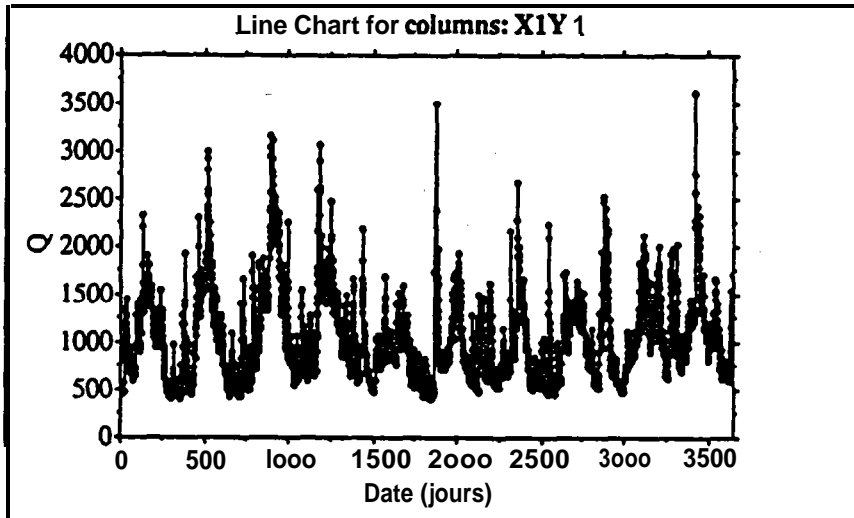


Figure 37

Variations temporelles des différents éléments analysés à Village-Neuf (1985 à 1994).

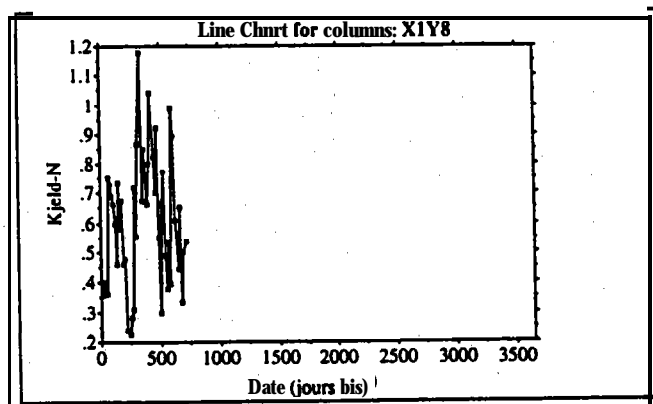
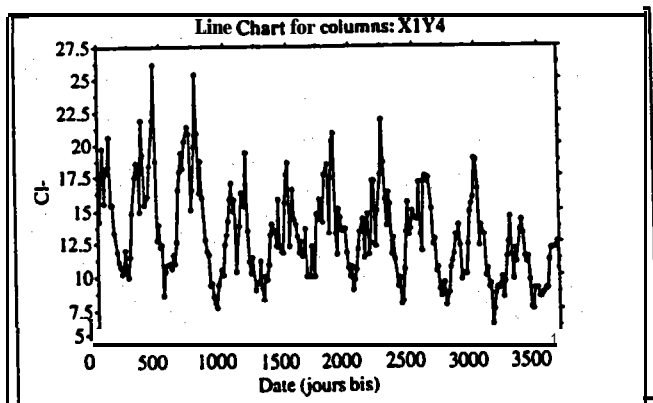
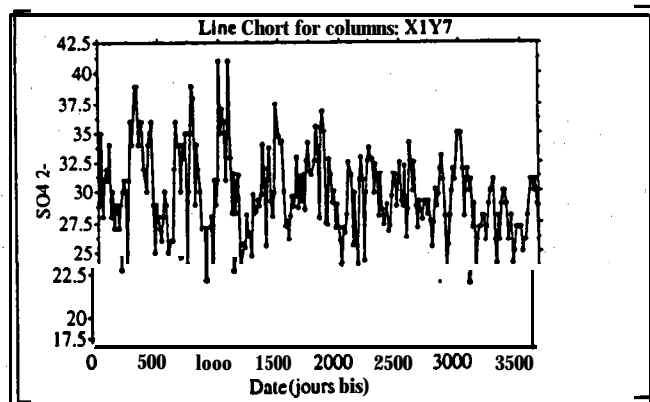
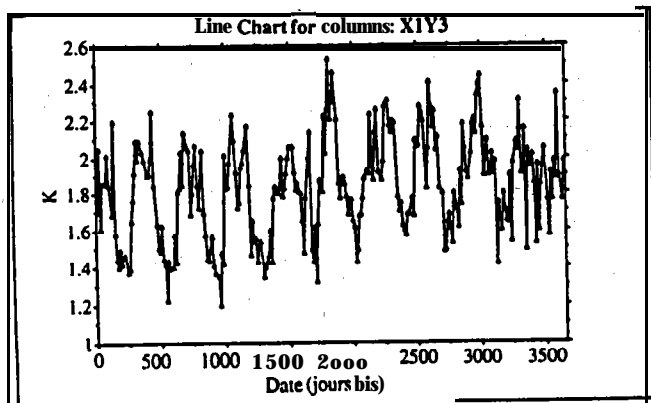
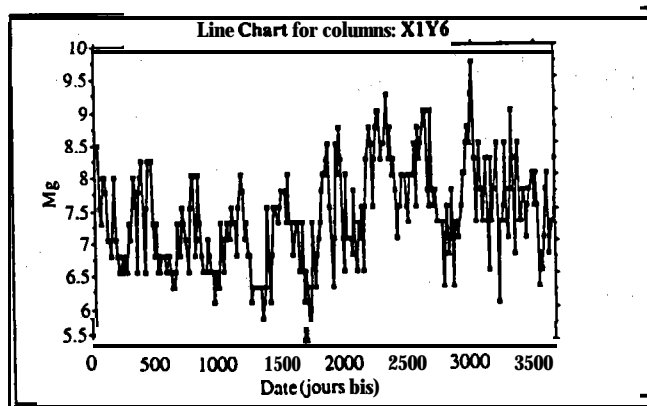
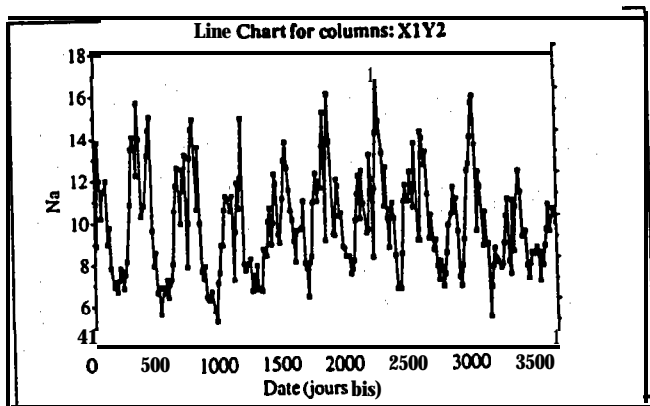
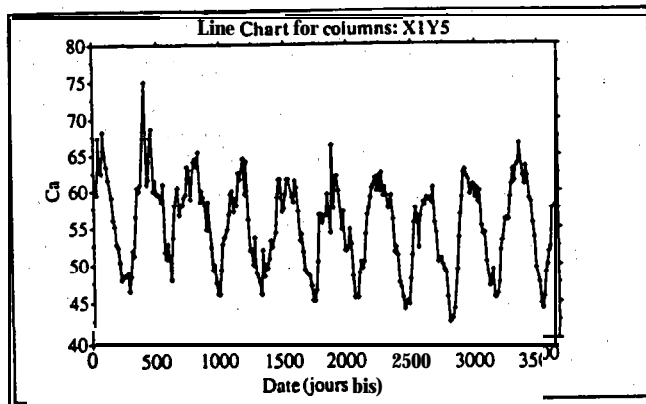
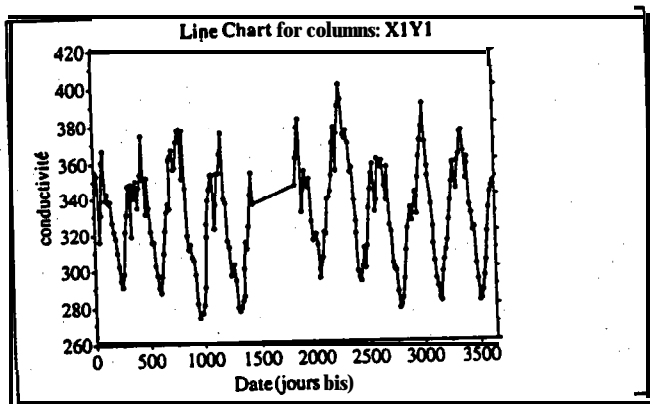


Figure 1 e)

Variations temporelles des différents éléments analysés à Village-Neuf (1985 à 1994).

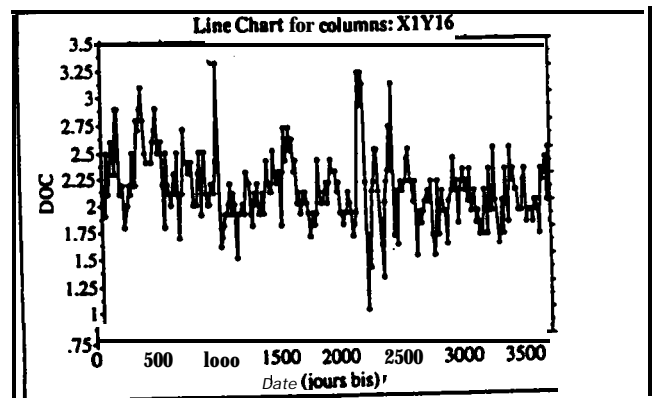
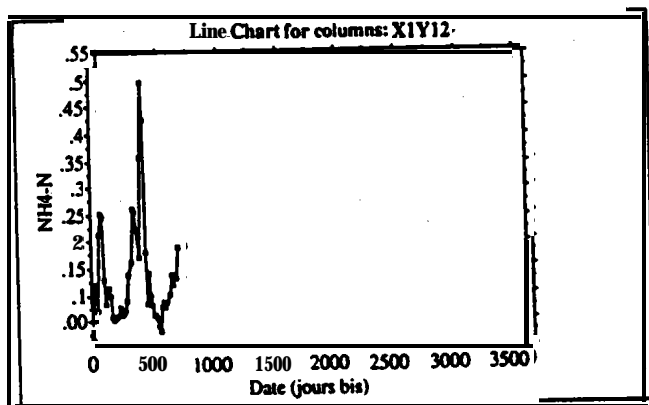
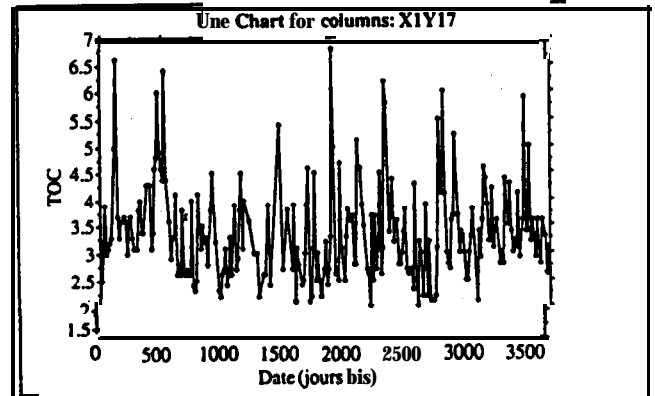
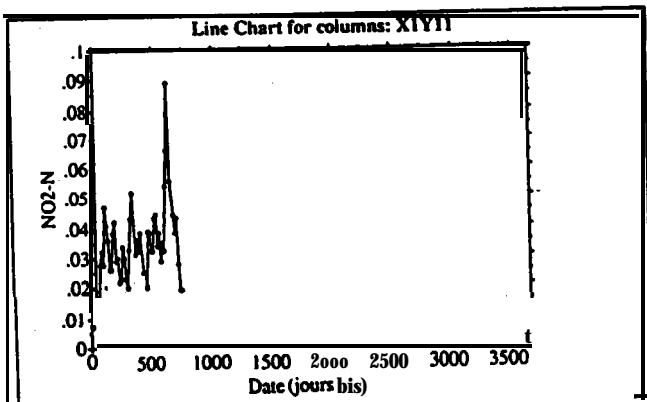
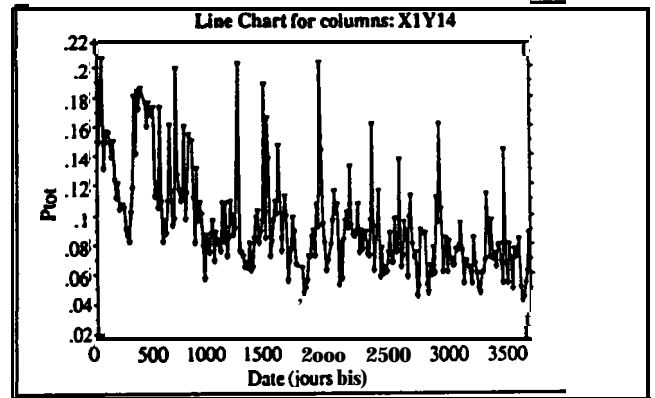
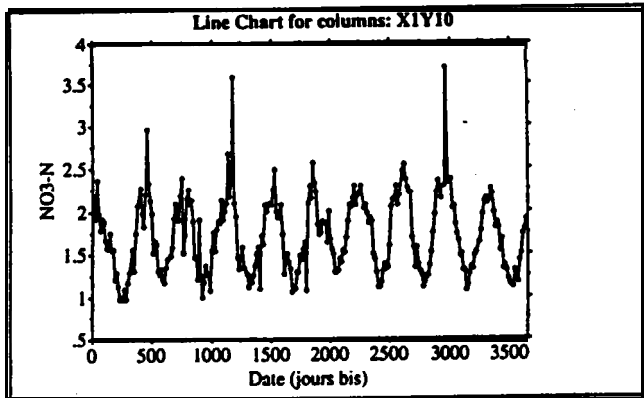
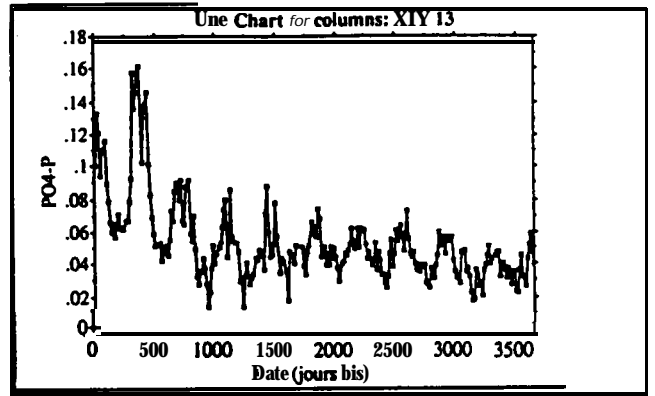
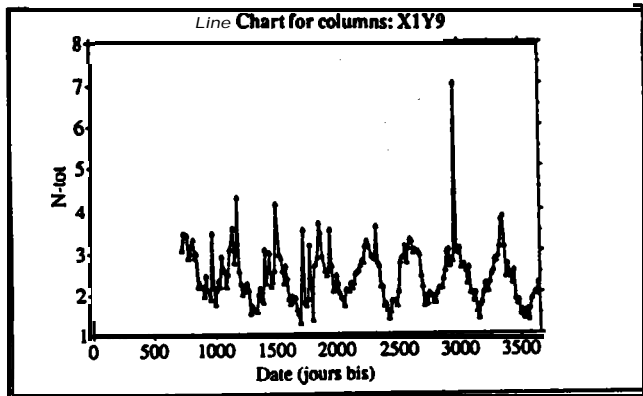


Figure 37 (suite)

Variations temporelles des différents éléments analysés à Village-Neuf (1985 à 1994).

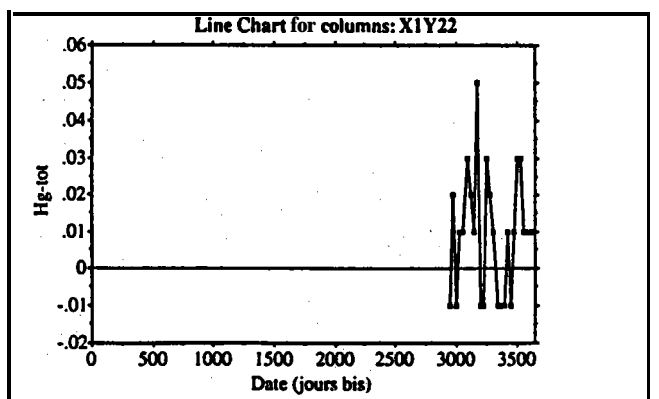
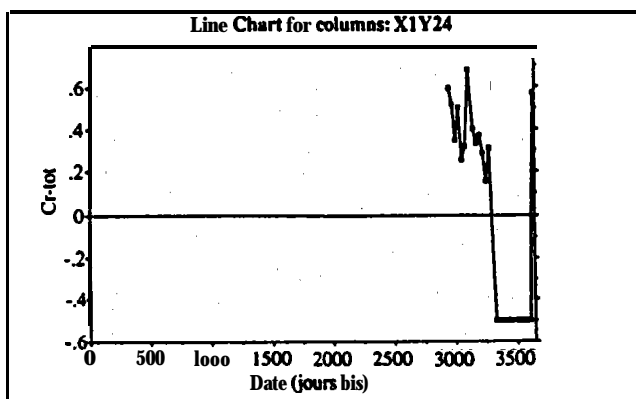
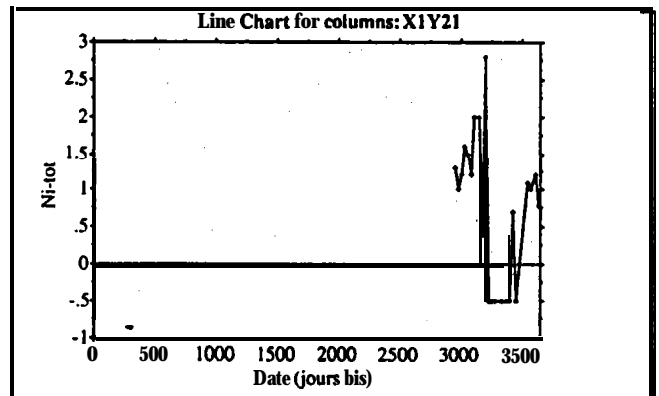
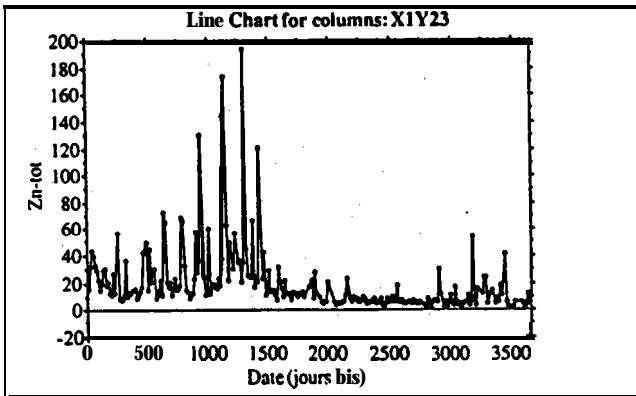
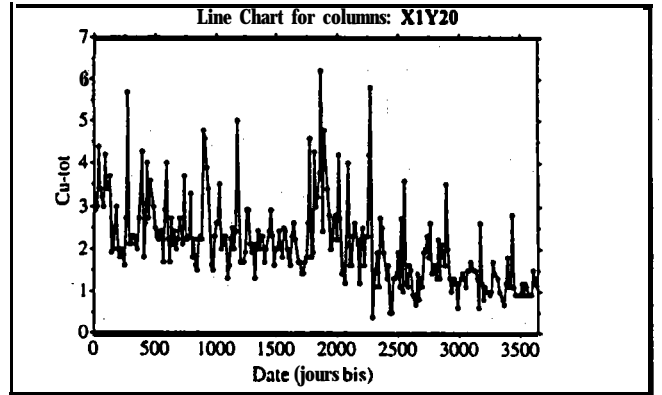
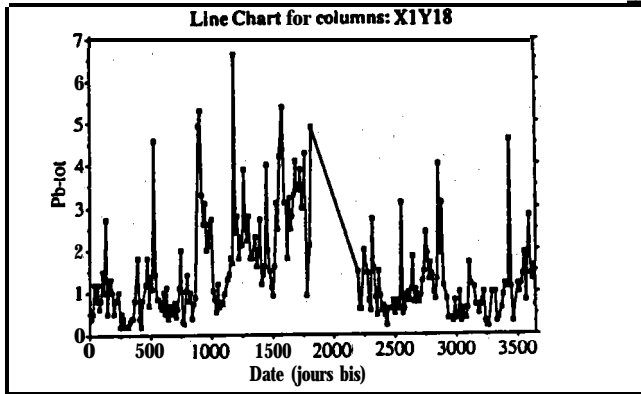
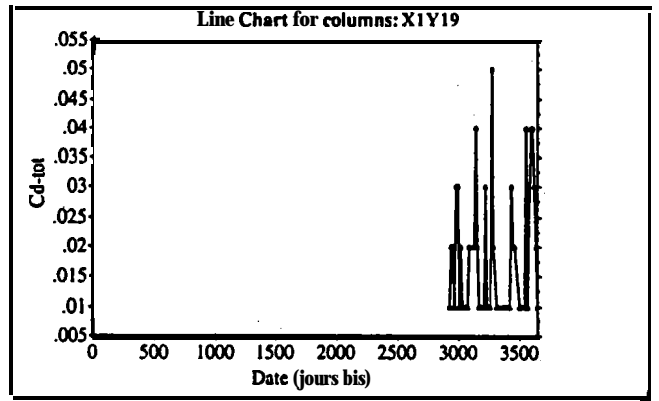
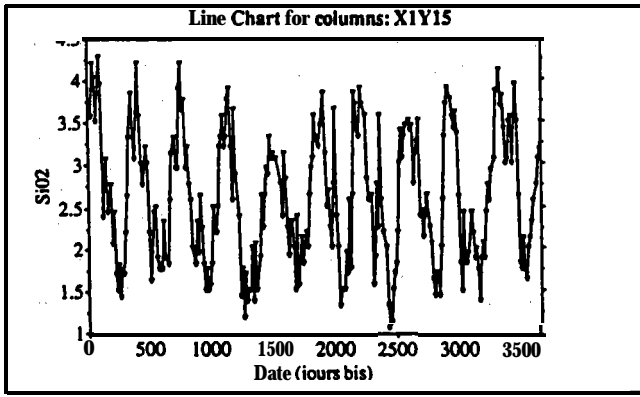


Figure 37 (suite)

Variations temporelles des différents Cléments analysés à Village-Neuf (1985 à 1994).

Variabilité avec le débit:

Seules Na⁺, Cl⁻, PO₄⁻³ et NH₄⁺ présentent une diminution marquée avec le débit, très vraisemblablement liée à la dilution d'effluents ponctuels. Le Pb total et le COT augmentent légèrement avec le débit sans doute en raison de la hausse des MES qui est attachée aux épisodes de crues. Ces relations restent cependant médiocres par rapport à celles observées dans les fleuves turbides, en raison du niveau général très faible des MES. L'ensemble des variations des différents éléments avec le débit sont présenté dans la figure 38.

Niveaux généraux des concentrations: comparaison Village-Neuf et Lauterbourg

Les gammes de variations présentées ici représentent environ 95% des résultats (les valeurs extrêmes qui peuvent être accidentelles ou douteuses sont exclues) et permettent de comparer les niveaux de Village-Neuf et ceux de Lauterbourg (tableau 17).

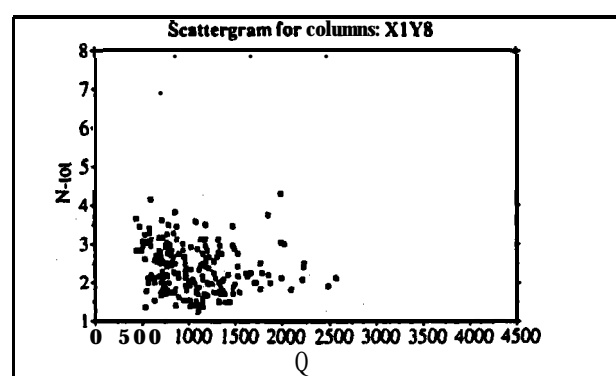
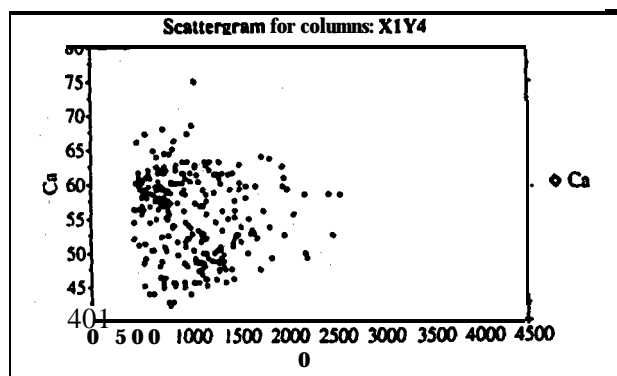
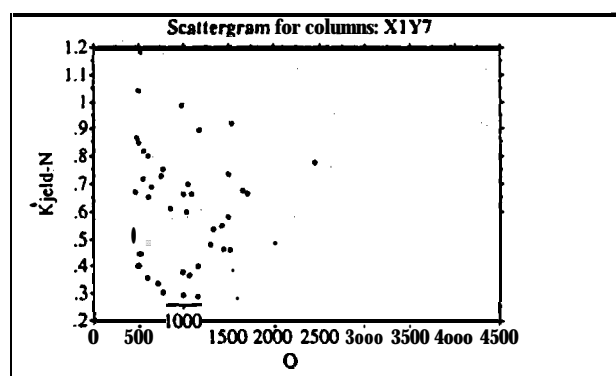
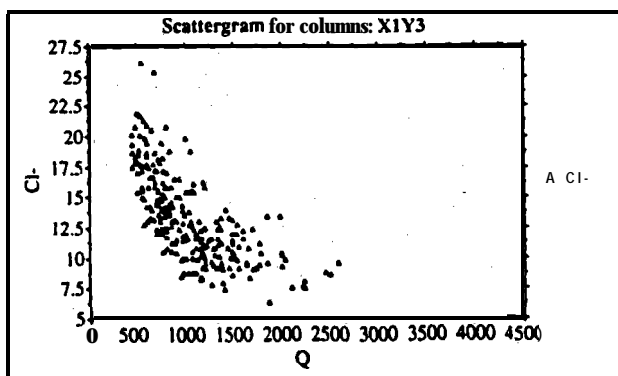
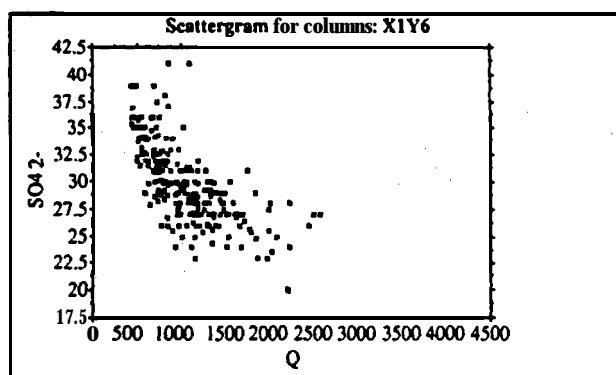
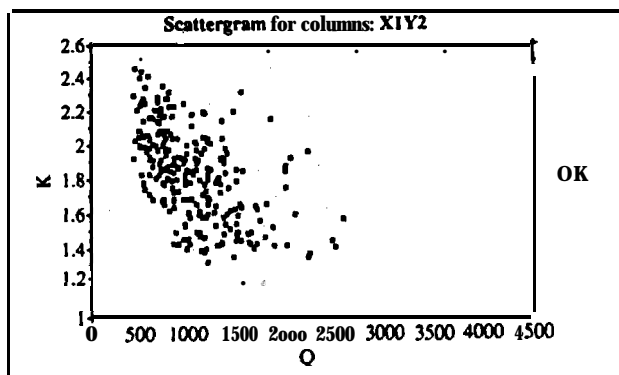
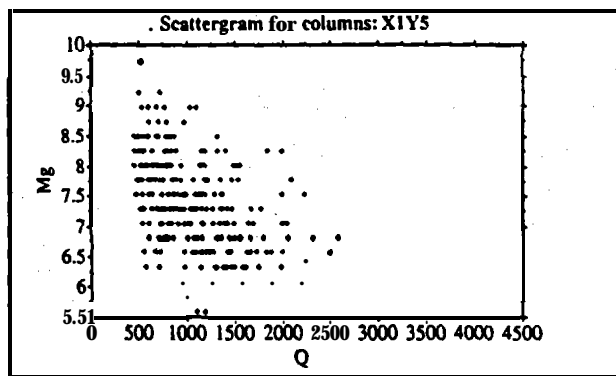
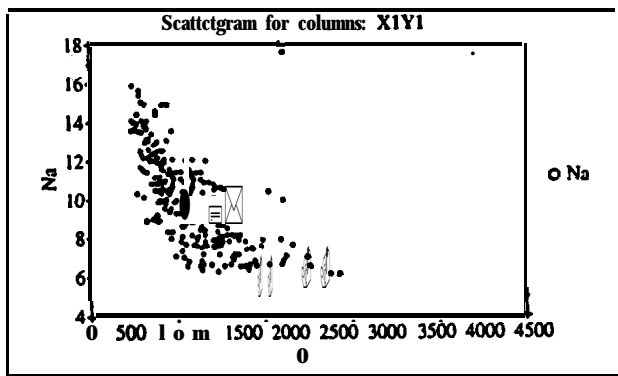
Descripteurs de qualité	Gamme 1993, Lauterbourg (7)	Gamme de variations 1985-1994, Village-Neuf (7)	Cycle saisonnier (1)	relation concentration - débit (2)	Tendance à long terme (3)
Conductivité	380 - 830	280 - 380	++		
SiO₂ (mg/l)		1,25 - 4,2	++	0	0
Ca⁺⁺ (mg/l)	50 - 80	42 - 67	++	0	- (58 à 55)
Mg⁺⁺ (mg/l)	6 - 8,5	6 - 9	+		0
Na⁺ (mg/l)	31 - 65	5 - 15	++		- 0
K⁺ (mg/l)	2.5 - 6,5	1.3 - 2.4	++		+ ? (1.7 à 1.8)
Cl⁻ (mg/l)	17-200	7,5 - 22,5	++		- (16 à 10)
SO₄⁻² (mg/l)	30 - 40	23 - 38	+		- ? (31 à 28)
HCO₃⁻ (mg/l)	?	?	?	?	?
N-NO₃ (mg/l)	1.35 - 2.7	1 - 2.6	++	0	0
N-NH₄ (mg/l) (4)	0.03 - 0,18	0,05 - 0.35	++		
N-NO₂ (mg/l) (4)	0.02 - 0,085	0,02 - 0.05	0	0	
NK (mg/l) (4)	0,8 - 3,5	0.3 - 1	+(?)	0	
Ntotal (mg/l)	2 - 5	1,2 - 4	++	0	0
P-PO₄ (mg/l)	0.02 - 0.2	0,01 - 0,15	++		-- (0,1 à 0,04)
Ptotal (mg/l)	0.1 - 0,8	0,05 - 0,18	+(?)	0	-- (0.14 à 0,06)
Cd total (µg/l) (4)	LD-3	0.01 - 0,04	0	0	
Cr total (µg/l)	ID- 1,5	LD - 0.6	0	0	
CU total (µg/l)	1 - 5	0.7 - 4,5	0	0	- (3.5 à 1.2)
Hg total (µg/l) (4)	LD	LD - 0.03	0	0	
Ni total (µg/l) (4)	LD - >4	LD - 2,5	0	0	
Pb total (µg/l)	LD-3	0.02 - 4,5	+(?)	+	+ puis - (5)
Zn total (µg/l)	5 - 35	5 - 120	0	0	+ puis - (6)
COD (mg/l)	1 - 3	1.3 - 3	0	0	- ? (2.3 à 2.1)
COT (mg/l)	1,4 - 3.1	2,2 - 6	0	+(?)	0

T a b l e a u .

Comportements et gammes de variation des descripteurs de **qualité** des eaux à Village-Neuf (1985 - 1994).

Données du Service Hydrologie, Géologie **Fédérale**, Berne.

(1) ++ variation **marquée**, + variation possible, 0 non significatif. (2) -- forte diminution, - diminution, 0 non significatif. (3) -- forte diminution, - faible diminution, 0 stable, + faible augmentation. (4) deux ou trois années seulement. (5) maximum vers **1990/92** (3.5 µg/l en moyenne). (6) maximum vers **1988/90** (50 µg/l en moyenne). (7) valeurs extrêmes exclues.



Figur 38

Variations Avec le débit des différents éléments analysés à Village-Neuf (1985 à 1994).

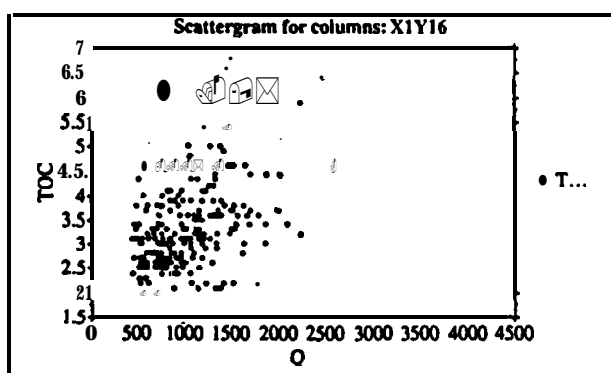
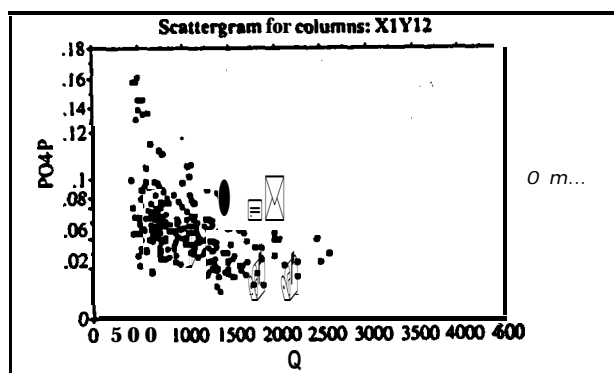
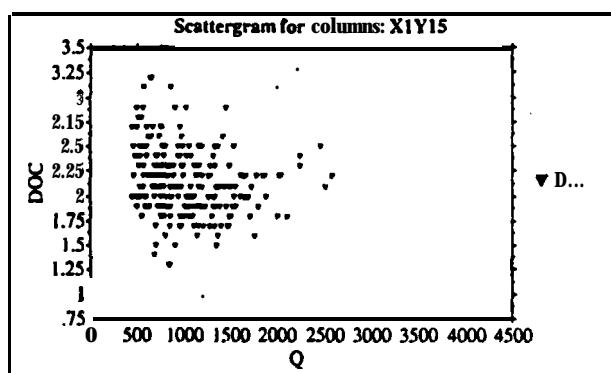
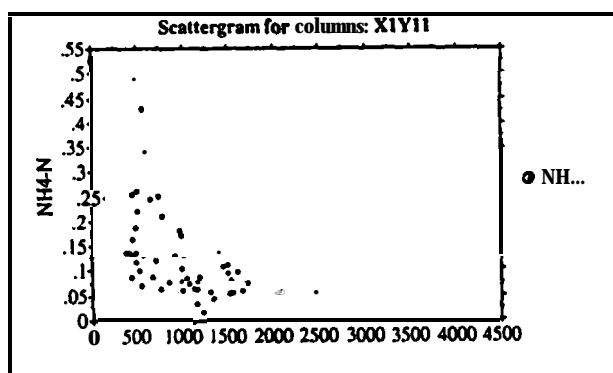
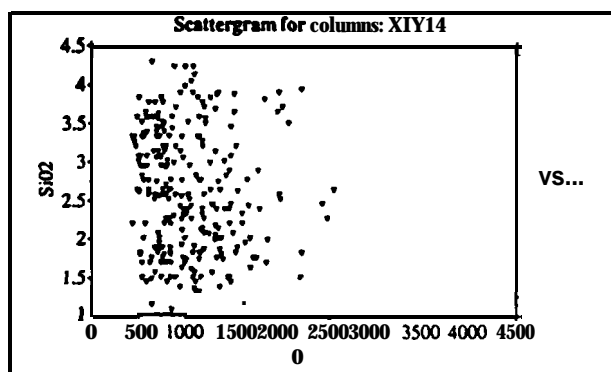
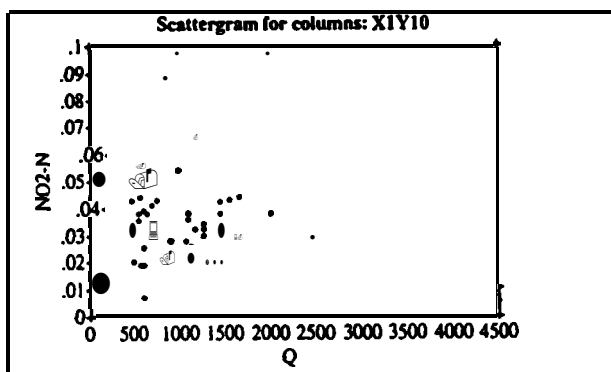
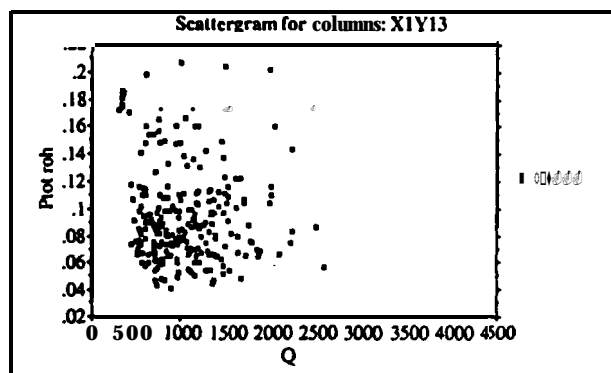
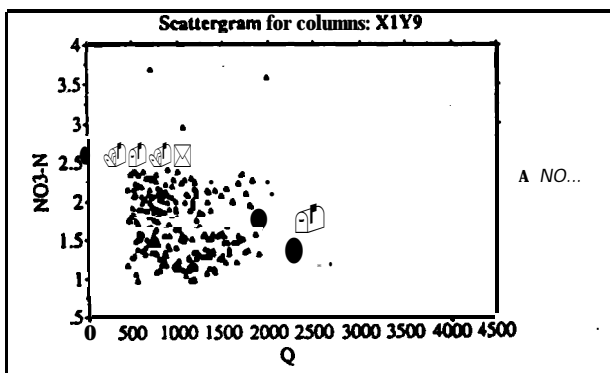


Figure 38 (suite)

Variations Avec le débit des différents éléments analysés à Village-Neuf (1985 à 1994).

On note une très forte augmentation amont aval attendue pour Cl^- , Na^+ , K^+ et donc pour la conductivité. Si les valeurs de COD et COT, NO_3^- , NH_4^+ , Ntotal sont très comparables il n'est pas de même pour celles de PO_4^{3-} , et surtout de Ptotal qui sont nettement plus fortes à Lauterbourg pour la même année 1993.

En ce qui concerne les métaux totaux les niveaux de Zn, seraient du même ordre. Pour le Cu et le Pb les niveaux de Lauterbourg seraient plus élevés.

Pour les autres métaux la comparaison est difficile du fait des limites de détection trop élevées des analyses de Lauterbourg et de leurs précision plus faible par rapport à Village-Neuf. Les limites de détections sont les suivantes ($\mu\text{g/l}$) (tableau 18).

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Lauterbourg	0,5	0,1	1	1	0,1	1	1	1
Village - Neuf	-	0.01	0,2	<0,5	0,01	0,5	0,1 ou 0.2	1 ou 2

Tableau 18

Limites de détections des analyses de métaux à Lauterbourg et Village-Neuf

CHAPITRE VI

Conclusions:

*Stratégies d'échantillonnages
à Lauterbourg en vue de
l'établissement des flux
polluants.*

7.- Acquis de l'analyse des données à Lauterbourg, Seltz, Maxau et Village-Neuf

7.1.- Variabilité générale des descripteurs de la qualité des eaux:

Nous disposons d'une année (1993) de suivi bimensuel ou mensuel de la qualité des eaux. La présentation critique en est faite aux tableaux pour les concentrations en solution et sur eau brute et au tableau pour les teneurs des MES en micropolluants.

7.1.1.- Eléments dissous:

Nous avons indiqué (tableau 19) le nombre de données totales, le nombre de données inférieures à la limite de détection, et le nombre de données significatives. On remarque que l'ensemble des micropolluants organiques dissous (sauf le beta-HCH et le gamma-HCH) n'excède pas 6 analyses significatives par an et qu'il n'est pas possible de baser un bilan sur ces données. Il en est de même pour certains métaux totaux (Hg).

Les relations avec le débit ont été systématiquement testées et moins d'un tiers des descripteurs ont des relations définies (diminution ou augmentation). Les relations avec les MES ont été également testées pour les analyses effectuées sur eau brute: elles sont quasiment inexistantes pour NK, Ntotal, Ptotal, positive pour COT. En ce qui concerne les "métaux totaux" les relations avec les MES ne peuvent pas être établies soit à cause de la trop grande dispersion des résultats analytiques, soit par manque de forte variabilité des MES lors de l'année 1993.

Ces résultats sont un peu décevants et ne permettent pas de proposer l'utilisation des régressions concentrations-débits ou concentrations-MES comme guide d'extrapolation des concentrations entre deux prélèvements.

7.1.2.- Eléments particuliers:

Nous avons effectués les mêmes recherches sur le comportement des teneurs des micropolluants de la matière particulaire recueillie par centrifugation en continu au rythme de 13 prélèvements annuels. Là encore les relations avec les MES ou les débits sont très médiocres (tableau 20).

On note toutefois une légère dilution possible pour As, Cr, Ni, Pb, qui serait à confirmer sur les analyses ultérieures.

A l'opposé une légère augmentation des teneurs des PCB 28 et 118 avec les MES est possible. Si cette tendance était vérifiée elle signifierait que les flux des PCB augmenteraient plus vite que les flux des MES, eux même augmentant plus vite que les débits. Pour ces polluants il conviendrait alors de focaliser plus particulièrement l'échantillonnage lors des crues turbides.

Si on considère les analyses des micropolluants particulières plus en détail on note des comportements variés et des niveaux de teneurs assez variables. Les rapports maximum / minimum sont de 3,8 pour As, 12 pour Cd, 2 pour Cr, 4,5 pour Cu, > 10 pour Hg, 2,2 pour Pb et 2,8 pour Zn. Pour Ni par contre les teneurs sont très constantes avec une fluctuation de l'ordre de $\pm 20\%$ seulement.

L'absence d'analyses d'aluminium particulaire empêche d'examiner les variations des teneurs en métaux avec la granulométrie, en considérant Al comme un bon indicateur de celle ci. On ne peut donc pas normaliser les teneurs à Al, ce qui est aussi utile pour comparer les stations entre elles, dans le bassin du Rhin, ou avec d'autres fleuves.

E A U	Eléments	nombre total des données	Nombre de données significatives	Données < LD	représentativité pour le calcul de flux	relation avec	relation avec
						le débit	les MES
	Debits	365	365		OUI	X	SO
	Mat. en suspension	39	39		OUI	0	SO
	Conductivité électrique	26	26		-	(--)	SO
	Cl	365	365		OUI	(--)	SO
	SO4	13	13		OUI	(-)	SO
	K	13	13		OUI	0	SO
	Na	13	13		OUI	0	SO
	Ca	13	13		OUI	(-)	SO
	Mg	13	13		OUI	(--)	SO
	HCO3	26	26		OUI	(--)	SO
	NH4-N	26	26		OUI	0	SO
	(NO2-N)	26	26		OUI	0	SO
	NO3-N	26	26		OUI	0	SO
	(Kjeldahl-N)	26	26		OUI	0	X
	N total	26	26		OUI	0	X
	o-PO4-P	26	26		OUI	(-)	SO
	P total	26	26		OUI	(-)	X
	COT	27	27		OUI	(+)	(++)
	COD	14	14		(OUI)	(+)	SO
	Chlorophylle A	10	10		-	0	(++)
	Phéopigments	10	7	3	-	0	X
	AOX	13	13		OUI	0	X
	POX	13	3	10	NON	ND	ND
	As total	13	13		OUI	(++)	X
	Cd total	13	7	6	NON	ND	ND
	Cr total	13	11	2	OUI	ND	ND
	Cu total	13	13		OUI	0	X
	Fe total	13	7	6	NON	ND	ND
	Hg total	13	2	11	NON	ND	ND
	Mn total	13	13		OUI	(--)	X
	Ni total	13	8	5	NON	(-)	X
	Pb total	13	8	5	NON	ND	ND
	Zn total	13	13		OUI	(--)	X
	Endosulfan	13	6	7	NON	ND	ND
	Gamma-HCH	13	13		OUI	0	X
	Pentachlorophénol	13	4	9	NON	ND	ND
	Trichloréthène	13		13	NON	ND	ND
	Tétrachloréthène	13		13	NON	ND	ND
	1,1,1-Trichloréthane	13		13	NON	ND	ND
	Tétrachlorure de carbone	13		13	NON	ND	ND
	Chloroforme	13	3	10	NON	ND	ND
	2-chloroaniline	13		13	NON	ND	ND
	3-chloroaniline	13		13	NON	ND	ND
	4-chloroaniline	13		13	NON	ND	ND
	1,2,3-Trichlorobenzène	13		13	NON	ND	ND
	1,2,4-Trichlorobenzène	13	6	7	NON	ND	ND
	1,3,5-Trichlorobenzène	13	2	11	NON	ND	ND
	Hexachlorobutadiène	13	1	12	NON	ND	ND
	Parathion-méthyl	13		13	NON	ND	ND
	Trifluraline	13		13	NON	ND	ND
	Simazine	13	1	12	NON	ND	ND
	Bentazone	13		13	NON	ND	ND
	Atrazine	13	3	10	NON	ND	ND
	Alpha-HCH	13	1	12	NON	ND	ND
	Beta-HCH	13	9	4	NON	(+)	X
	Parathion-éthyl	13		13	NON	ND	ND
	Détergents	26	1	25	NON	ND	ND
	Phénols	26		26	NON	ND	ND
	Cyanures totaux	26		26	NON	ND	ND

Tableau 19

Fréquence et représentativité des données, ainsi que les relations avec le débit et les MES des différents éléments dissous analysés au Rhin à Lauterbourg (1993). x: grande dispersion des points, 0: constance des concentrations, --: forte dilution, -: dilution, +: augmentation. ++ forte augmentation, ND: non défini, SO: sans objet, ?: variabilité réelle non connue.

	Eléments	nombre total des données	Nombre de données significatives	Données < LD	représentativité pour le calcul de flux	relation avec le débit	relation avec les MES
M E S	As	13	13		?	X	(-)
	Cd	13	13		?	X	0
	Cr	13	13		?	(-)	(-)
	Cu	13	13		?	X	0
	Fe	13	13		?	(-)	(-)
	Hg	13	10	3	?	0	0
	Mn	13	13		?	(-)	(-)
	Ni	13	13		?	0	(-)
	Pb	13	13		?	(-)	(-)
	Zn	13	13		?	X	X
	4,4'-DDD	13	6	7	NON	ND	ND
	4,4'-DDE	13	12	1	?	X	X
	4,4'-DDT	13	4	9	NON	ND	ND
	Hexachlorobenzène	13	13		?	X	X
	1,2,3-Trichlorobenzène	13	6	7	NON	ND	ND
	1,2,4-Trichlorobenzène	13	12	1	?	(+)	0
	1,3,5-Trichlorobenzène	13	7	6	NON	ND	ND
	PCB 28	13	11	2	?	0	* (+)
	PCB 52	13	13		?	0	(+)
	PCB 101	13	13		?	X	(+)
	PCB 138	13	13		?	X	(+)
	PCB 153	13	13		?	X	(+)
	PCB 180	13	13		?	X	(+)
	PCB 118	13	13		?	X	(+)
	Fluoranthène	13	13		?	(-)	0
	Benzo(k)fluoranthène	13	13		?	0	0
	Benzo(b)fluoranthène	13	13		?	(-)	0
	Benzo(a)pyrène	13	13		?	(-)	0
	Benzo(ghi)perylène	13	13		?	(-)	(-)
	Indeno(1,2,3-cd)pyrène	13	13		?	0	0
	Hexachlorobutadiène	13	8	5	NON	ND	ND
	Aldrine	13	3	10	NON	ND	ND
	Dieldrine	13		13	NON	ND	ND
	Endrine	13		13	NON	ND	ND
	Isodrine	13	2	11	NON	ND	ND
	Alpha-HCH	13	8	5	NON	ND	ND
	Beta-HCH	13	2	11	NON	ND	ND
	Gamma-HCH	13	4	9	NON	ND	ND
	2,4'-DDD	13		13	NON	ND	ND
	2,4'-DDE	13	1	12	NON	ND	ND
2,4'-DDT	13		13	NON	ND	ND	
alpha Endosulfan	13		13	NON	ND	ND	
bêta Endosulfan	13		13	NON	ND	ND	
Pentachlorophénoi	13	10	3	?	(+)	X	

Tableau 20

Fréquence et **représentativité** des données, ainsi que les relations avec le débit et les MES des différents éléments **particulaires analysés** au Rhin à Lauterbourg (1993). x: grande dispersion des points, 0: constance des concentrations, -: forte dilution, -: dilution, +: augmentation, ++ forte augmentation, ND: non définie.

SO: sans objet, ?: variabilité **réelle** non connue.

Pour beaucoup de métaux (Cr, Cu sauf le 28 juin, Zn) et pour As, les teneurs des hautes eaux estivales de mai à août sont nettement inférieures à celles de l'automne ou de l'hiver. Mais pour le Hg la tendance est inverse avec le maximum très net en mai et juin. Il est donc difficile de conclure à un comportement général des micropolluants inorganiques. Sur la Seine nous avons vu des regroupements nets: (i) As, (ii) Hg, (iii) Cd, Pb, Cu et Zn.

En ce qui concerne les micropolluants organiques il reste beaucoup d'analyses inférieures à la limite de détection. Il en résulte que, bien souvent, la variabilité des teneurs excède un facteur 10. Pour l'hexachlorobenzène, bien supérieur à la limite de détection, on note une variabilité d'un facteur 70 qui est peut être excessive comparée à la variabilité du PCB52 qui est seulement d'un facteur 3.

7.2.- Surveillance des polluants en solution (Ions majeurs, nutriments, carbone organique)

7.2.1.- Caractéristiques des stations de Village-Neuf, Seltz, Lauterbourg et Maxau:

Les fluctuations de débit du Rhin moyen de Village-Neuf à Maxau sont relativement modérées tant pour les débits mensuels moyens que pour les débits moyens annuels. Cette pondération du régime hydrologique à long terme vient de la possibilité de crues, en toutes saisons. Ces crues se surimposent à la période de hautes eaux annuelle due à la fonte des neiges et des glaces de mai à septembre.

Un échantillonnage bimensuel est en général assez bien représentatif des débits moyens annuels: les écarts observés sur 20 ans sont au maximum de 4%.

En raison de la pondération des débits, et de la présence de nombreux grands lacs dans le haut bassin, la composition chimique du Rhin est assez peu variable sauf des bouffées de pollution peu expliquées (comme en NK, et Ptotal en mai-juin 1993).

7.2.2.- Chlorures, sodium et potassium:

La chronique exceptionnelle des Cl⁻ journaliers analysée ici en 1993 permet de tester les stratégies d'échantillonnage de façon très performante. Les chlorures et les ions associés (Na⁺ et K⁺) présentent des variations à l'échelle hebdomadaire nettement plus élevées que celles observées à l'échelle saisonnière. Il est donc impératif d'exclure les prélèvements hebdomadaires à pas de temps régulier (exemple tous les jeudis) qui induiraient des biais systématiques allant jusqu'à 30% des flux réels.

Un échantillonnage bimensuel - avec des jours de la semaine décalés - permettrait d'apprécier les flux annuels avec une erreur la plupart du temps inférieure à 10% et les flux moyens sur quelques années à au moins 5% près.

Un échantillonnage bihebdomadaire (tous les 4 jours) réduirait les risques d'erreurs à moins de 1%.

7.2.3.- Polluants autres que Cl⁻, Na⁺ et K⁺:

En raison des faibles écarts entre les débits mensuels minimum et maximum et à l'opposé des fleuves plus contrastés comme les fleuves méditerranéens et même la Seine, il ne semble pas nécessaire de moduler la fréquence de prélèvement à Lauterbourg proportionnellement aux volumes moyens écoulés ainsi qu'évoqué dans le rapport inter-agences sur les flux polluants.

Au vu de la variabilité générale des concentrations en ions majeurs, carbone organique, et

nutriments qui est nettement inférieure à celle des chlorures il est correcte de proposer une fréquence d'échantillonnage bimensuelle. Elle ne devrait pas occasionner des erreurs par rapport aux bilans réels supérieures à celles commises pour les chlorures, et les biais systématiques devraient être négligeables. En utilisant de préférence la formule de calcul F4 les erreurs commises sur les bilans annuels devraient être de l'ordre de 5 à 10%.

7.3.- Surveillance des MES

La surveillance des matières en suspensions tous les 14 jours à Lauterbourg ne permet pas d'effectuer des tests précis de calculs de flux, aussi nous avons considéré ici les exceptionnelles chroniques de MES journalières à la station de Maxau en aval de Lauterbourg, et sans apport majeur entre les deux. Les résultats des tests sont réputés ici être valables pour Lauterbourg.

Avec une fréquence bimensuelle l'erreur maximale possible pour un flux annuel est de 20 à 30% sur un tirage quelconque de 26 flux. Mais une année sur dix l'erreur maximale pourrait monter à 70%. La médiane des erreurs commises serait alors de l'ordre de -5% pour une période de 20 ans, indicateur d'une légère sous-estimation générale dans le bilan des suspensions. Le passage à une fréquence hebdomadaire améliore nettement les estimations. Les erreurs maximales sont de l'ordre de 15% et la médiane des erreurs de l'ordre de -1,5%.

Il faut noter ici que la mesure instantanée des MES est elle même entachée d'une assez forte imprécision relative, particulièrement en dehors des crues. Il est donc illusoire de rechercher des précisions sur les flux de MES de moins de 15%. La mesure systématique des MES sur une rive (par opposition à un échantillon composite recueilli dans toute la section mouillée) peut également induire un biais sur les bilans.

7.4.- Surveillance des micropolluants dissous

Elle reste difficile à établir tant que les limites de détection des micropolluants ne seront pas abaissées. L'échantillonnage et l'analyse actuels permettent en effet de bien détecter des pollutions supérieures à certains niveaux mais pas d'établir des flux, même à un ordre de grandeur près puisque la majeure partie des déterminations reste inférieure à la limite de détection. On ne peut fixer qu'une barre supérieure aux bilans.

7.5.- Surveillance des micropolluants particuliers

La contamination en métaux et en micropolluants organiques des MES centrifugés est variable. Pour les métaux et l'arsenic, à l'exception notable du mercure, les teneurs sont plus faibles en périodes de hautes eaux et les variations observées sont assez régulières d'un prélèvement mensuel à l'autre. Pour l'année 1993, les fluctuations des teneurs sont au moins aussi grandes que celles des MES, d'un facteur 2 à 10, généralement d'un facteur 4. Cela signifie que dans le Rhin à Lauterbourg la variabilité des flux polluants particuliers aura comme causes principales: Variabilité des débits >> variabilité des MES >> variabilité des teneurs. Pour certains polluants et/ou pour certaines années les trois types de variabilité pourront avoir des influences équivalentes. Ceci est rare car dans la plupart des fleuves les ordres de variabilités sont différents.

Dans la Seine on a: variabilité des débits \geq variabilité des MES > variabilité des teneurs. Dans les rivières de type méditerranéen on peut s'attendre à: variabilité des MES > variabilité des débits >> variabilité des teneurs.

La fréquence mensuelle de l'analyse chimique des MES est ici un peu juste pour espérer des prévisions de moins de 10%. Pour cela il conviendrait de compléter les analyses par deux ou trois prélèvements centrifugés lors des crues les plus turbides. Une autre alternative

serait la confection de prélèvements moyens réalisés à partir d'échantillonnage automatique journaliers. Cependant ce type d'approche en continu n'est pas celui considéré par le CIPR à l'heure actuelle, cela nécessiterait ainsi un double programme d'échantillonnage, en continu et discret difficilement envisageable. Enfin un échantillon moyen de trappes à sédiments relevées 2 fois par mois peut être aussi envisagé. Pour minimiser les coûts analytiques des échantillons moyens composés proportionnellement aux flux de MES peuvent être constitués.

8.- Suggestions pour une amélioration du suivi en vue de l'estimation des flux polluants

8.1.- Analyse des micropolluants organiques:

Les limites de détection sont encore beaucoup trop élevées pour espérer même des ordres de grandeurs pour la plupart des micropolluants. Il conviendrait de les abaisser sur les analyses régulières soit d'effectuer des échantillons composites par exemple 2 par an, en particulier pour les micropolluants associés aux MES sur de longues périodes et de confier ces quelques échantillons à des laboratoires plus performants. On pourrait ainsi obtenir au moins un ordre de grandeur correct des flux, tant des produits en voie de disparition que de ceux en voie d'apparition.

8.2.- Analyses des micropolluants inorganiques:

Les analyses des métaux réalisées sur eaux brutes ne conviennent guère à l'heure actuelle au vue des limites de détection et des précisions insuffisantes. Il serait plus approprié de se focaliser sur les 13 analyses des MES centrifugées et de les compléter par deux ou quatre analyses de métaux dissous par an effectuées par des laboratoires spécialisés (prélèvement et analyses). Les bilans de métaux seraient basés sur les analyses chimiques de MES et sur un suivi plus poussé des concentrations en MES soit avec un pas de temps hebdomadaire, soit par un préleveur automatique avec un pas de temps journalier (échantillons composites de prises toutes les quatre heures par exemple).

Il convient de remarquer que l'absence d'analyses d'aluminium, très lié aux particules argileuses les plus fines empêche d'interpréter complètement les différences de teneurs en métaux. On note également l'absence d'analyses de phosphore total sur les MES centrifugées, comme d'azote particulaire, ces analyses permettraient de calculer les apports de P et N associés à la matière particulaire et de boucler ainsi les bilans totaux de ces éléments, basés jusqu'ici sur les analyses sur eaux brutes.

8.3.- Recueil des MES:

Une autre option serait l'installation de trappes à sédiments qui remplaceraient les prises d'eau mensuelles pour centrifugation. Chaque procédure à ses avantages et ses inconvénients. Dans les fleuves à fortes variations de débit solide, ce qui n'est pas le cas du Rhin, les prises mensuelles peuvent ne pas refléter la composition chimique des MES sur l'ensemble de cette période surtout celles qui sont réalisées après la ou les premières crues des années hydrologiques, susceptibles d'entraîner les sédiments contaminés accumulés. Par contre les trappes, si elles échantillonnent bien en continu l'ensemble d'une période 7 à 15 jours maximum, peuvent introduire des biais granulométriques et donc chimiques, dans les MES recueillies.

Toutefois les premières inter-comparaison effectuées sur la Seine ne mettent pas en

évidence de différences marquées par rapport à la centrifugation sur une période de deux jours consécutifs. Un test comparatif des deux méthodes est nécessaires avant d'adopter pour une stratégie de trappes. Il convient de remarquer que la mise en place des trappes nécessite un site protégé de la navigation et non accessible au public.

Enfin on note que, pour les MES des trappes comme pour les MES centrifugées, on pourrait confectionner un échantillon moyen annuel, au prorata des flux de MES passés, sur le quel on pourrait chaque année effectuer des analyses très poussées ("screening") de la matière particulaire, tant pour les micropolluants inorganiques non analysés jusqu'ici (Sb, Se, etc....) que pour les micropolluants organiques peu solubles.

8.4.- Surveillance continue des chlorures:

Au vue de l'excellente corrélation chlorure-conductivité, la surveillance des chlorures pourrait être basée sur une mesure continue de la conductivité. En plus de la vérification de cycles journaliers éventuels non effectuée jusqu'ici, cette procédure abaisserait considérablement les coûts d'analyses. Les mesures bimensuelles de Cl^- seraient maintenues pour vérifier la relation chlorures-conductivité.

L'échantillonnage moyen hebdomadaire, comme celui réalisé en Suisse aux stations clés du réseau, est aussi une alternative séduisante. Les prises d'eau sont associées au débit de la station et/ou les échantillons hebdomadaires moyens sont reconstitués en fonction des volumes journaliers écoulés. Seuls les échantillons hebdomadaires sont analysés. Le calcul des flux est alors simplement effectué en couplant les analyses hebdomadaires et les volumes écoulés correspondant.

Pour les nutriments il convient de garder réfrigérée la chambre du préleveur automatique pour assurer une bonne conservation des échantillons. Si la fréquence de 26 échantillons annuels doit être conservée on pourrait en plus mélanger deux échantillons hebdomadaires consécutifs; il n'est pas conseillé en effet de garder les échantillons prélevés automatiquement plus d'une semaine.

8.5.- Episodes de crues:

Dans l'hypothèse d'une série d'échantillons ponctuels au rythme bimensuel il importe de prélever en plus les crues les plus significatives pour les flux si elles se produisent entre deux prélèvements réguliers. Toutefois le repérage de ces crues est difficile et doit être modulé suivant la saison. Nous proposons ici de compléter le suivi annuel régulier par 1 à 3 (maximum) prélèvements effectués lors des crues, suivant les années.

Les crues visées seraient, pour la période d'Octobre à Mars la première augmentation de débit prévue à Lauterbourg supérieure à $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ en une semaine, et pour la période d'avril à septembre les crues ou l'augmentation de débit prévue est supérieure à $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ en une semaine. Dans tous les cas le prélèvement supplémentaire doit être réalisé préférentiellement dans le dernier tiers de la période de montée des eaux prévue.

9.- Stratégies d'échantillonnage à Lauterbourg pour l'établissement des flux polluants.

9.1.- Débits:

- * Les débits à Lauterbourg sont équivalents à ceux de Maxau à 1 ou 2 % près.
- * Le régime des débits montre une régularité saisonnière et interannuelle très marquée

(moyenne de juin pour 32 ans / moyenne d'octobre pour 32 ans > 2, Qmax annuel pour 32 ans / Qmin annuel pour 32 ans = 2,2).

* Les minimums sont très soutenus ($500\text{m}^3/\text{s}$), les maximums restent modérés ($4000\text{m}^3/\text{s}$).

* Les crues normales ($Q > 2500\text{m}^3/\text{s}$) occupent 3% du temps (sur 32 ans à Maxau et peuvent avoir lieu tous les mois surtout de novembre à juillet).

* Les crues très fortes ($Q > 3500\text{m}^3/\text{s}$) occupent 0,3% du temps sur 32 ans et se produisent de novembre à mars et en mai / juin.

Un échantillonnage à 26 échantillons par an (fréquence maximale observée pour certains polluants) correspond aux débits moyens annuels à $\pm 4\%$ maximum (période de 20 ans à Maxau) il est donc très représentatif. Cette fréquence convient bien pour les produits solubles dilués par les débits, ou indifférents à ceux-ci, ou encore qui augmentent modérément avec ceux-ci.

9.2.- MES:

Concentrations de MES:

* Les MES extrêmes vont de 4 à 200 mg/l environ (20 ans à Maxau)

* Les MES journaliers sur 20 ans disponibles à Maxau permettent d'établir des régimes et des bilans avec certitude et de tester des échantillonnages et des modes de calcul des flux.

* Les MES mensuelles ne vont que de 5 à 60 mg/l sur 20 ans et leurs moyenne a long terme vont de 17 à 32 mg/l. Les MES annuelles vont de 17 à 31 mg/l sur 20 ans et ne présentent pas de tendance a long terme.

* Les MES sont médiocrement reliées aux débits par des cycles d'hystérésis lors des crues

* Les MES de plus de 50 mg/l se produisent 7% du temps, celles de plus de 100 mg/l 1% du temps, et de plus de 150 mg/l 0,3% du temps soit environ un jour par an ou plutôt 20 jours en 20 ans.

Flux des MES à Maxau:

* Les extrêmes des flux journaliers à Maxau vont de 2,5 à 1000 kg/s sur 20 ans. En 8 jours ils peuvent exceptionnellement varier d'un facteur 50 comme du 1^{er} au 15 février 1980. De tels épisodes rares peuvent donc échapper à un échantillonnage bimensuel (26 échantillons par an).

* Les flux moyens mensuels sur 20 ans vont de 20 à 50 kg/s et les flux annuels de 0,5 à 1,6 Mt/an (sans tendance).

* avec une fréquence bimensuelle à pas régulier l'erreur maximale sur les flux annuels de MES est de 20%, exceptionnellement de 80%. A long terme l'erreur est de l'ordre de 4% mais on observe un biais sur les bilans qui sont sous-estimés de 5%.

* Avec une fréquence hebdomadaire l'erreur maximale annuelle est de 10% (22% exceptionnellement) avec un biais de -2% et l'erreur à long terme est de 1%.

MES Lauterbourg /Maxau:

Sur la base des 13 valeurs communes en 1993 les flux de MES à Lauterbourg sont d'environ 30% inférieurs à ceux de Maxau.

* Ceci peut résulter d'un biais systématique dû au prélèvement au bord à Lauterbourg (le protocole de Maxau demande confirmation).

9.3. Cl^- , Na^+ et K^+ :

Concentrations:

* Les concentrations Cl^- , Na^+ et K^+ sont corrélées entre elles et les Cl^- présentent une excellente corrélation avec la conductivité qui permet: (i) de reconstituer les valeurs de Cl^- entre deux mesures, si besoin est, (ii) et de vérifier l'absence de cycles journaliers de Cl^- .

* Les concentrations en Cl^- , Na^+ et K^+ décroissent nettement avec les débits.

Flux:

* Il résulte de la relation $C = f(Q)$ que les flux mensuels sont relativement constants ($\pm 15\%$) pendant l'année.

* Les fréquences bimensuelles en Cl^- (à pas constant mais à jours de la semaine décalés permettent la reconstitution des flux annuels à 12% près au maximum et sur le long terme à -1,5% seulement.

* Les fréquences hebdomadaires à jours fixes (ex tous les mardis) induiraient des biais marqués avec une valeur minimale de -30% pour les mercredis et de +30% les samedis par rapport au flux réel annuel. Ceci est dû à un cycle hebdomadaire marqué des concentrations lié aux activités anthropiques.

* Des fréquences bihebdomadaires (pas de temps de 4 jours) permettraient une estimation des flux à 1% maximum par rapport aux flux réels base sur 365 échantillons.

* Une surveillance de Cl^- , Na^+ et K^+ par la conductivité enregistrée en continue est tout à fait possible pour autant qu'on garde quelques analyses (ex. 26 par an) pour vérifier la stabilité des relations avec la conductivité.

9.4.- *Nutriments et carbone organique:*

Concentrations à Seltz 1971-1993):

* Seuls NH_4^+ et PO_4^{3-} présentent une légère décroissance avec les débits indicatrice de dilution de sources ponctuelles. On note également des cycles saisonniers marqués repérables sur les moyennes mensuelles à long terme des concentrations. Les cycles de SiO_2 peuvent être liés à l'utilisation biologique dans les lacs et ceux de NO_3^- à un lessivage des sols en hivers.

* On remarque une chute de PO_4^{3-} et P_{total} à Village-Neuf depuis 1985 due à l'interdiction des phosphates dans les produits lessiviels en Suisse.

Flux:

Au vu des variations modérées des concentrations en nutriments et carbone, la plupart du temps d'un facteur 3, il semble adapté de prévoir un échantillonnage bimensuel. En effet, les chlorures qui varient d'un facteur 10 peuvent être suivis à environ 12% près avec une telle stratégie. Il semble correct d'espérer des erreurs du même ordre avec ces composés.

9.5.- *Micropolluants organiques dissous:*

Mis à part pour le gamma-HCH et les AOX, et à la rigueur le beta-HCH, le nombre d'analyses inférieures à la limite de détection est très grand et on ne peut donner que des bornes supérieures pour les flux de 26 micropolluants surveillés. Cette stratégie ne convient donc pas et il serait préférable dans l'optique de la surveillance des flux de restreindre le nombre de composés recherchés et/ou le nombre d'échantillons (fréquence tous les deux mois) mais en abaissant nettement les limites de détection afin d'avoir au moins des ordres de grandeur des concentrations et des flux.

9.6.- Métaux totaux sur eau brute:

Au vu de la variabilité relativement faible des MES dans le Rhin moyen, il ne semble pas illogique de surveiller les métaux totaux. Toutefois dans une rivière de turbidité faible comme la Seine on a observé que les flux des métaux restaient associés (en moyenne annuelle) à plus de 90% avec les MES (sauf pour As: 65% en solution, 35% associé aux MES). Il semble donc quand même plus approprié de baser les flux des métaux sur les analyses des MES et sur leurs bilans, d'autant que les limites de détection des métaux totaux restent trop élevées - comparées à celles de Village-Neuf - pour espérer des flux avec précision.

9.7.- Micropolluants particuliers:

~~Teneurs dans les MES (Lauterbourg 1993):~~

Les teneurs analysées sur 1 an présentent des fluctuations variables allant de 2 à 12 (Cd et Cu) voir 70 pour l'hexachlorobenzène. Ces variations sont donc d'un ordre de grandeur proche de celui des MES et des débits, alors que pour beaucoup d'autres rivières les variations des MES sont les plus fortes suivies par celles des débits, enfin celles des teneurs.

* On n'observe guère de relations des teneurs avec Q ou avec les MES et certains pics (pollutions?) restent peu interprétables.

* Environ la moitié des micropolluants organiques analysés ne sont pas détectés. Il convient donc: (i) d'augmenter autant que possible les analyses, (ii) de diminuer les limites de détection et d'améliorer les précisions analytiques.

Flux:

En ce qui concerne les métaux et les autres substances liées aux MES, il est important d'affiner les bilans de MES (voir 9.2.) de façon à pouvoir attribuer à une teneur supposée constante pendant toute la période autour des analyses un flux des MES déterminé avec précision. En effet c'est cette méthode qui convient le mieux lorsque les teneurs présentent des variabilités inférieures à celles des flux de MES.

10.- Formules de calcul:

10.1.- Flux des substances dissoutes et "totales":

En raison de la faible variabilité des débits, les débits échantillonnés avec une fréquence bimensuelle sont très proches des débits annuels moyens dans ce cas les formules F2 et F4 sont très proches. Cependant on gagnera en général à utiliser la formule F4.

$$F2 = \sum F_i/n$$

$F_i = C_i * Q_i$, F_i : flux instantané du jour de l'échantillonnage (kg/s). C_i : concentration de l'échantillon (mg/l). Q_i : Débit du jour de l'échantillonnage (m³/s).

$$F4 = (\sum(C_i * Q_i) / \sum Q_i) * Q_{mj}$$

$(\sum(C_i * Q_i) / \sum Q_i)$: concentration moyenne pondérée par les débits (mg/l). Q_{mj} : Débit moyen annuel des débits journaliers (m³/s).

10.2. Flux des polluants particuliers:

La formule F14 (hypothèse des "teneurs constantes") est vraisemblablement à favoriser

dans la plupart des cas sur la formule F13 (hypothèse des "flux constants") en raison des variabilités des flux particulières plus grandes.

$$F13(\mu) = \sum (T_{\mu i} * MES_i * Q_i) / n$$

F13(μ): Flux du micropolluant (μ). $T_{\mu i}$: teneur du micropolluant (μ) dans les MES le jour de l'échantillonnage i . MES_i : concentrations des MES mesures le jour de l'échantillonnage i . Q_i : Débit du jour de l'échantillonnage i . n : nombre des échantillons.

$$F14(\mu) = \sum (T_{\mu i} * \sum(MES_j * Q_j))_i$$

F14(μ): Flux du micropolluant (μ). $T_{\mu i}$: teneur du micropolluant (μ) dans les MES le jour de l'échantillonnage i . $\sum(MES_j * Q_j)_i$: Flux des MES pendant l'intervalle de temps autour de l'échantillon i .

11.- Etudes complémentaires souhaitables:

11.1.- MES:

- * Etude des MES journalières à Lauterbourg sur au moins 3 mois
- * Etude de la distribution du champ des MES dans la section mouillée de Lauterbourg (avec de préférence une bouteille à ouverture horizontale).
- * Comparaison systématique des MES à Lauterbourg et Seltz avec celles de Maxau.

11.2.- Analyses des MES:

- * Rajout des analyses de Al, Pparticulaire et Nparticulaire.
- * Abaissement des limites de détections.
- * Prélèvement complémentaire (1 à 3 / an) pendant la montée des crues en particulier de la première crue de l'année hydrologique.
- * Comparaison des analyses effectuées sur les culots de centrifugation avec celles effectuées sur le matériel des trappes à sédiments qui intègrent des périodes de 1 à 2 semaines.
- * Effectuer des exercices d'intercalibration avec d'autres laboratoires français et/ou étrangers (Suisses, Allemands, ...).

11.3.- Echantillonnage:

Comparaison pendant une année des prélèvements bimensuels (26 par an) avec des prélèvements automatiques intégrés sur une semaine. Deux prélèvements automatiques consécutifs pourrait être mélangés pour garder le même nombre d'analyses annuelles.

Le tableau 21 récapitule l'ensemble de ces recommandations.

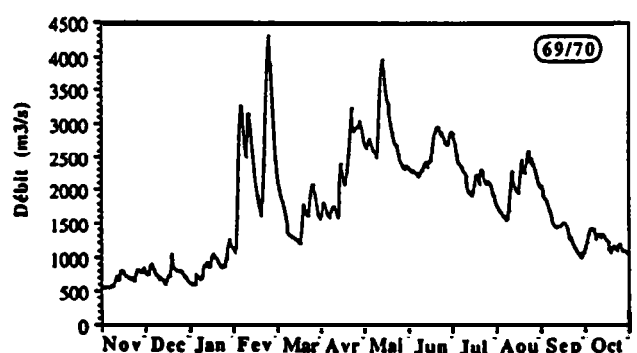
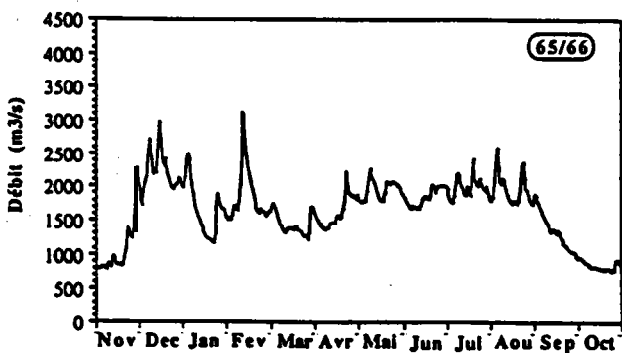
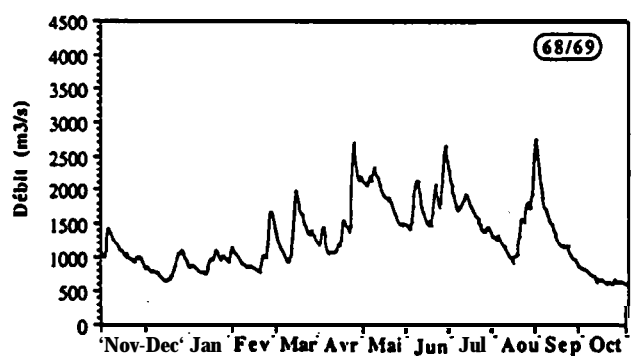
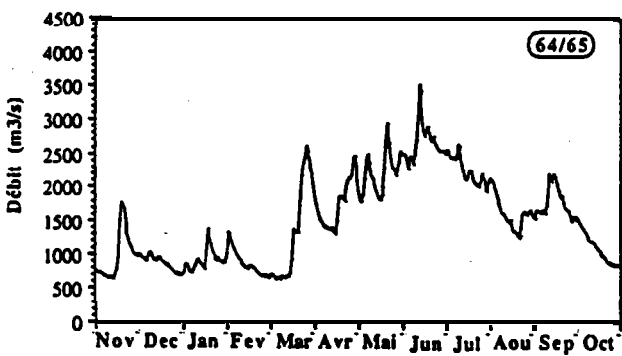
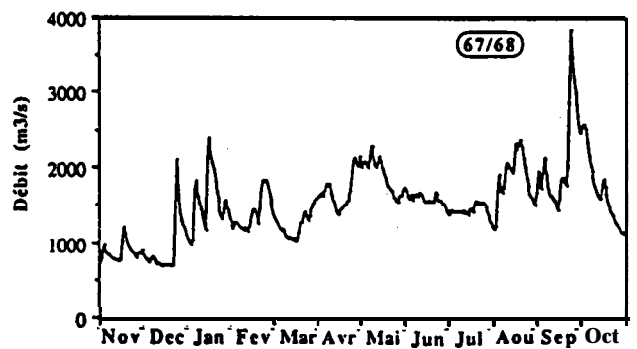
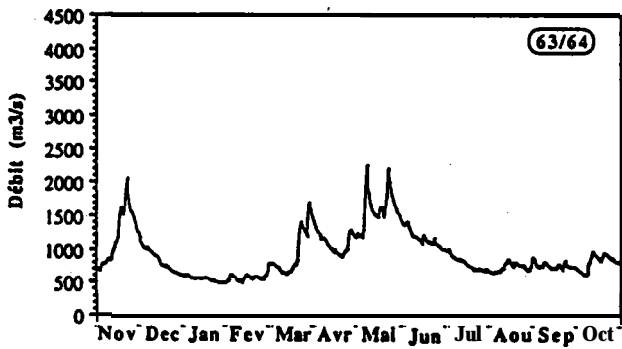
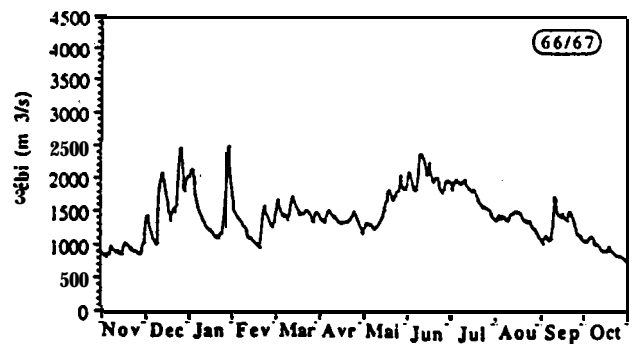
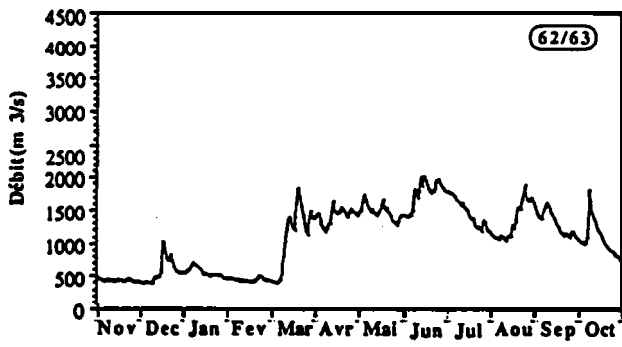
	Fréquence actuelle (1)	Fréquence conseillée (1)	Fréquence exceptionnelle (1)	Formule de calcul de flux (2)	Précision sur les flux (3)	Suggestions et études complémentaires	Remarques
Débit	E1	E1					
MES	E14	E7 "E1"	E4 lors des crues	F4	A: 22% I: 2%	* tchantillonnage journaliers pendant au moins 3 mois * étude du champs des MES au sein de la section mouillée.	• régime des crues est différent du régime des hautes eaux, * définition d'une crue??
Cl⁻, Na⁺, K⁺	*E1 pour Cl ⁻ * E14 pour Na ⁺ et K ⁺	* E15 * E15 + conductivité		F4	A: 12% I: 2%	* Ctude du "cycle" journalier des chlorures pendant au moins une semaine.	* Cycle hebdomadaire net. * proscrire tout échantillonnage à pas de temps multiple de 7. • bonnes corrélations entre Na ⁺ , K ⁺ et Cl ⁻ . * très bonne corrélation entre Cl ⁻ et conductivité.
Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, So₄⁻², HC03⁻	E14	E15		F4	A: 10% ? I: 2% ?		
Nutriments et carbone organique	E28	E15		F4	A: 12% ? I: 5% ?	* Analyses de COP * Nparticulaire et Pparticulaire	Tendance à la baisse de P04-3 et Ptotal depuis 1985
Micropolluants organiques dissous	E28	"E15"		"F4"	A: ? I: ?	* amélioration des limites de détection pour la majorité des éléments	
Métaux totaux sur eau brute	E28	"E15"	E4 lors des crues	"F4"	A: ? I: ?	* amélioration des limites de détection pour la majorité des éléments	
Micropolluants particulaires	E28	"E15"	E4 lors des crues	* F13 * F14 si MES journalières	A: ? I: ?	* amélioration des limites de détection pour la majorité des éléments * analyses d'Al particulaire	Al est un traceur des particules fines. argileuses qu transportent la majeure partie de la micropollution.

Tableau 21

Stratégies d'échantillonnage à Lauterbourg pour l'établissement des flux' polluants

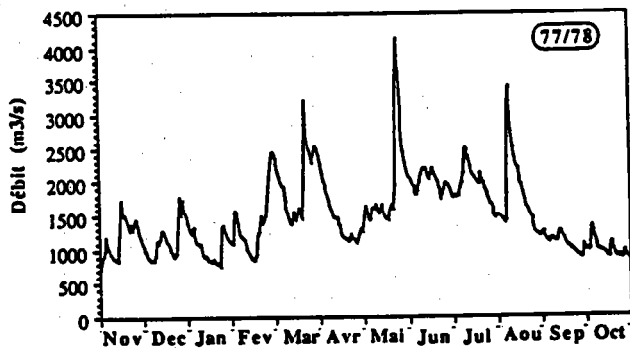
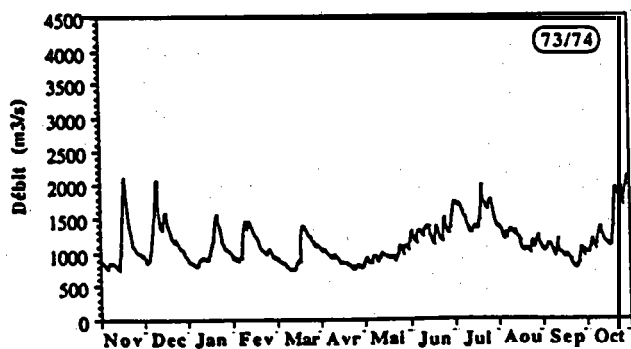
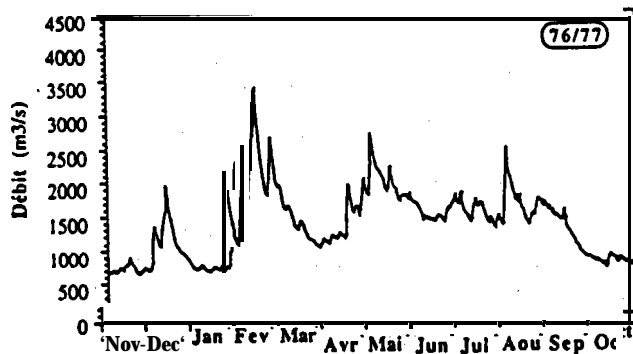
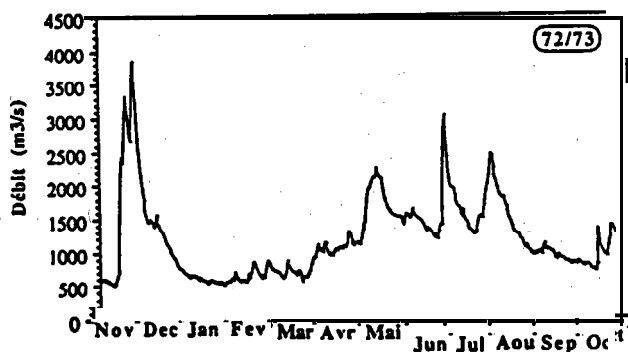
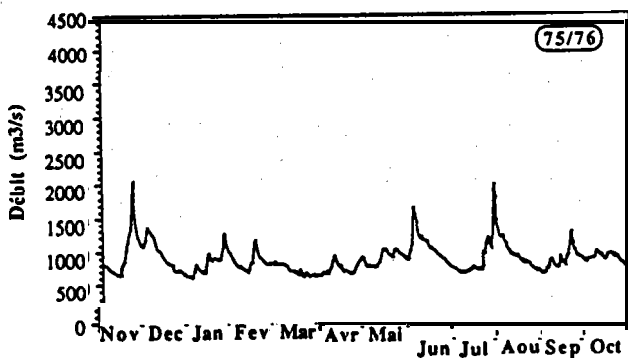
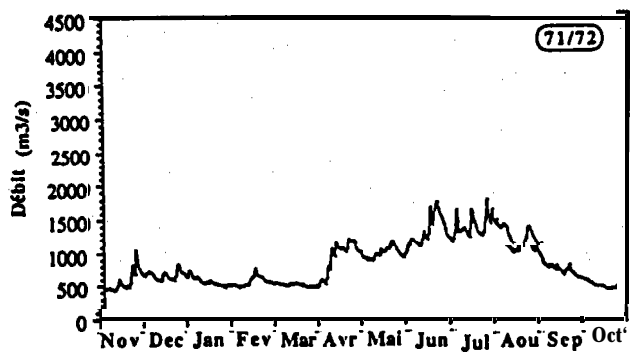
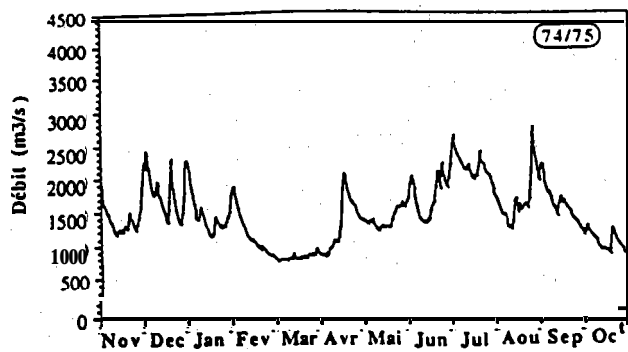
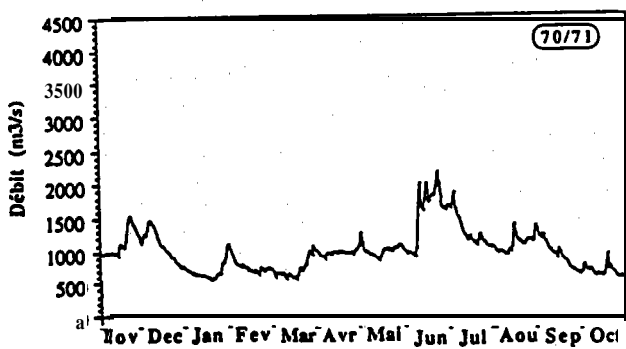
(1) fréquence d'échantillonnage: E1: journalier, E4: échantillonnage tous les 4 jours, E14: échantillonnage tous les 14 Jours, E15: échantillonnage tous les 15 Jours, E28 échantillonnage tous les 28 jours. (2) mode de calcul de flux: $F4 = (\sum(C_i \cdot Q_i) / \sum Q_i) \cdot Q_{mj}$, $F13 = \sum(C_i \cdot Q_i \cdot T_{\mu i}) / n$, $F14 = \sum(T_i \cdot \sum(MES_j \cdot Q_j))$, (3) précision sur le calcul de flux à l'échelle: A: annuelle. I: interannuelle.

Annexes



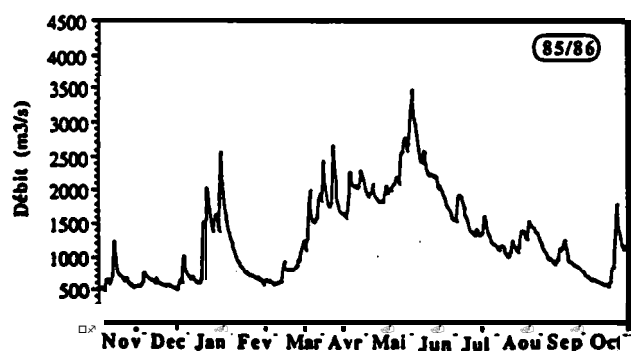
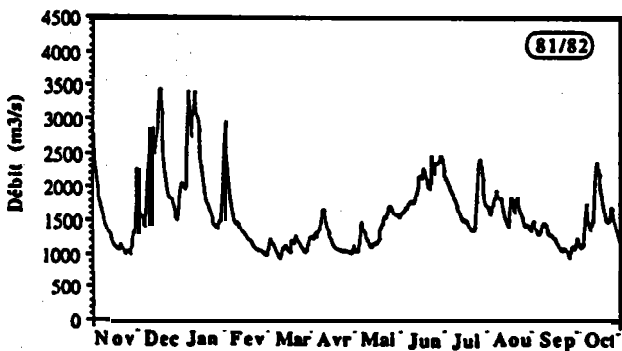
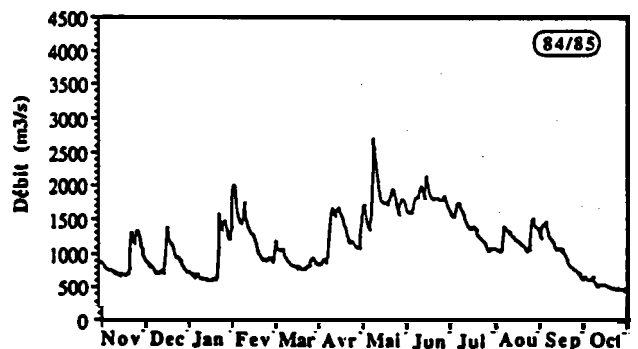
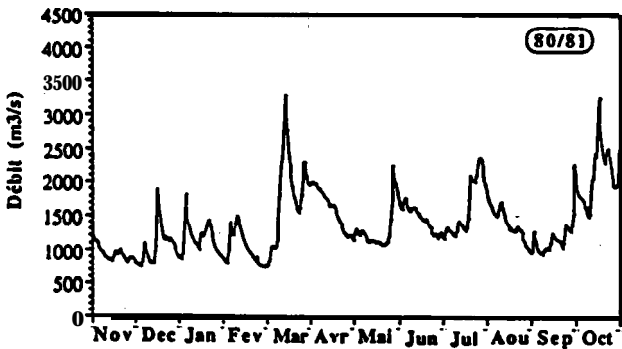
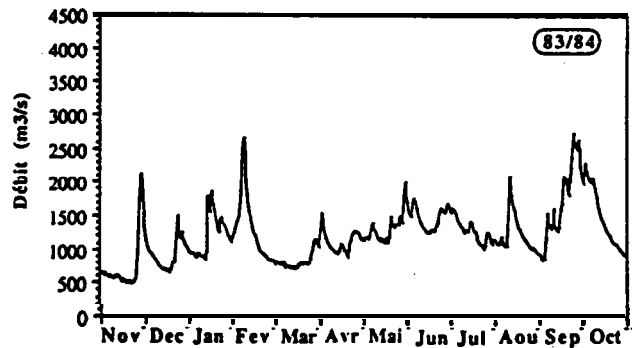
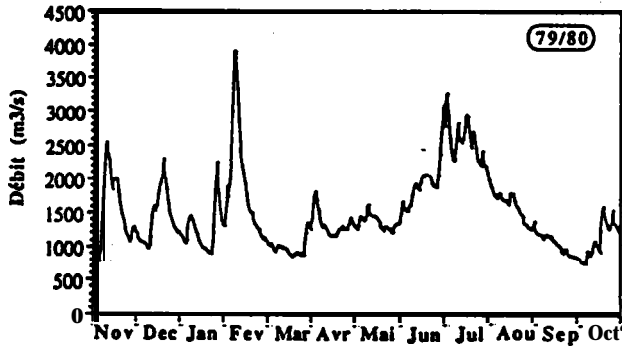
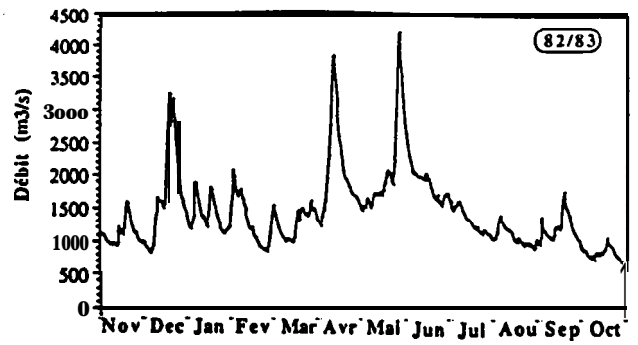
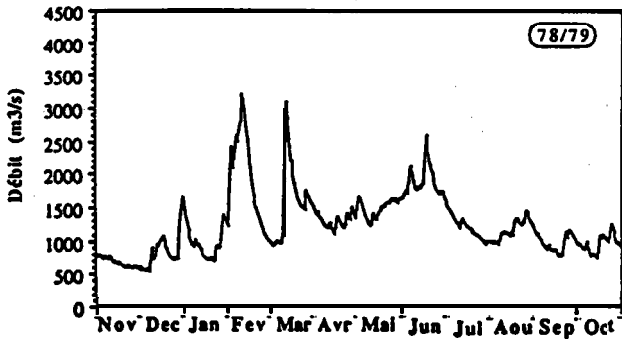
Annexe 1

Rhin à Maxau, 1962/63 à 1993/94. Variation temporelle des débits journaliers par années hydrologiques



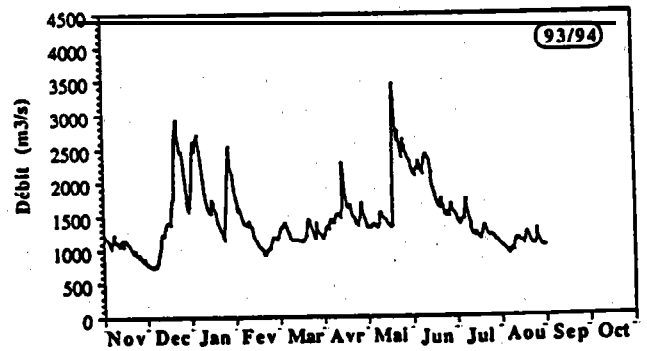
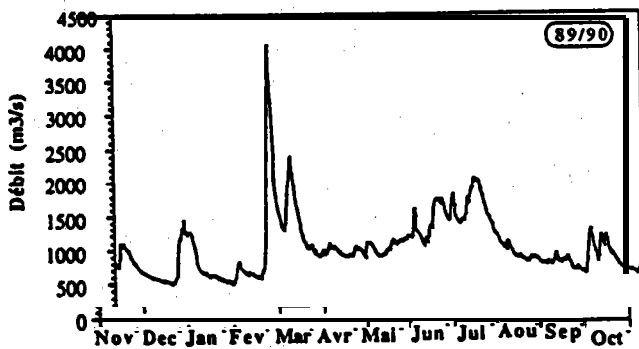
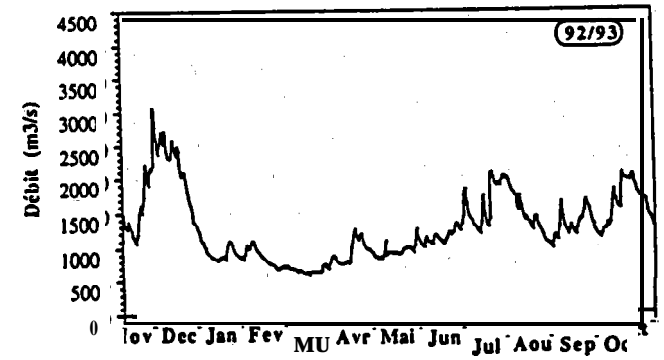
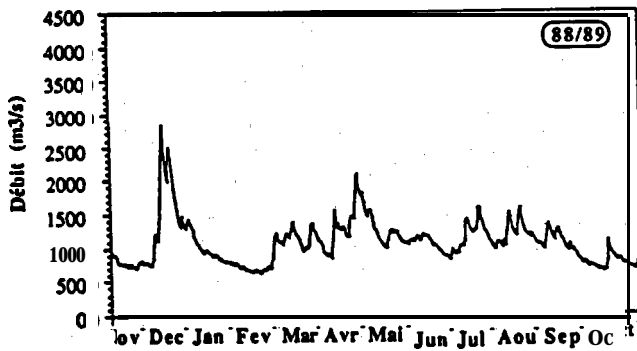
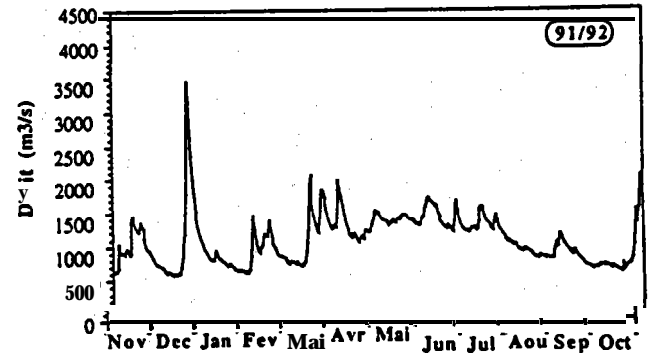
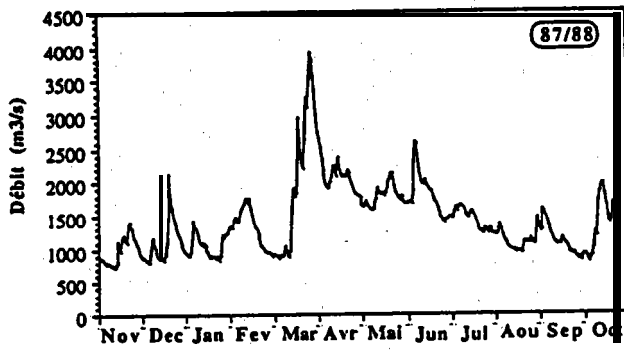
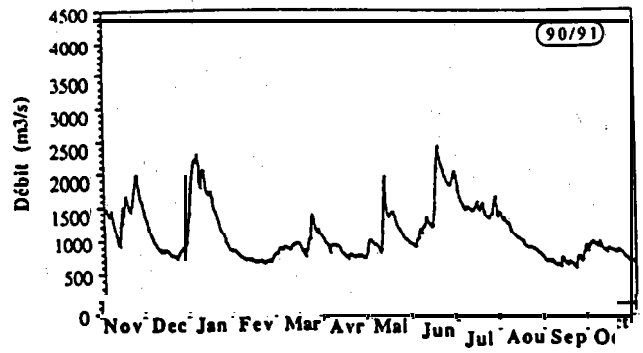
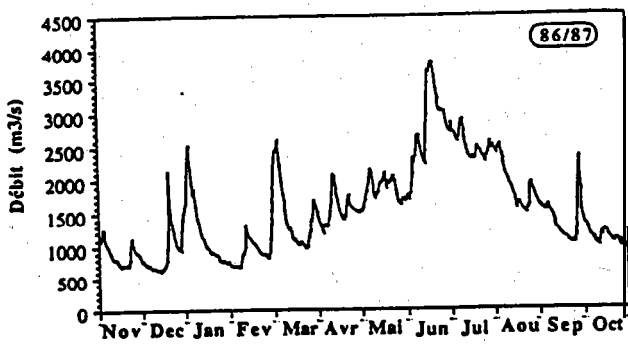
Annexe 1 (Suite)

Rhin à Maxau, 1962/63 à 1993/94. Variation temporelle des débits journaliers par années hydrologiques



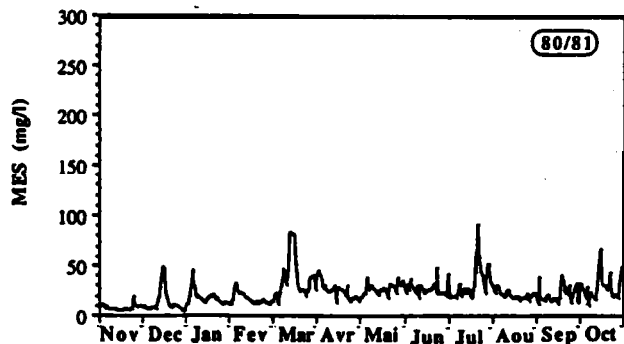
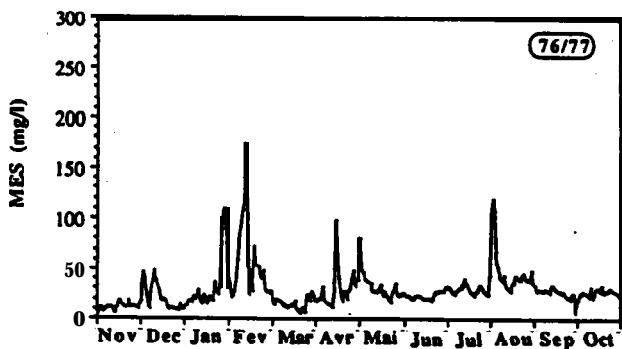
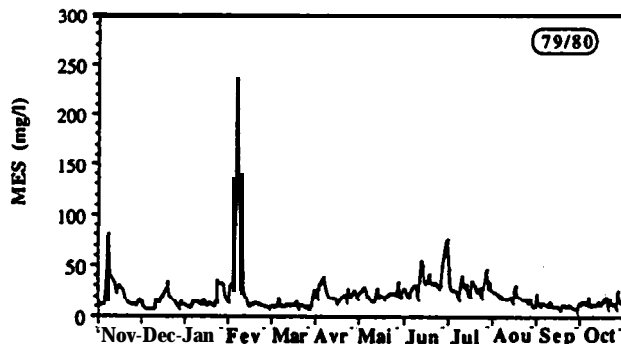
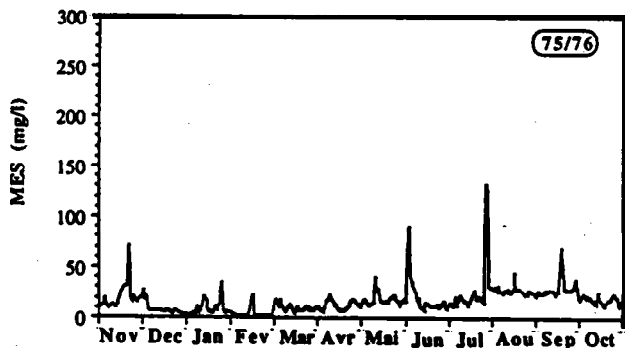
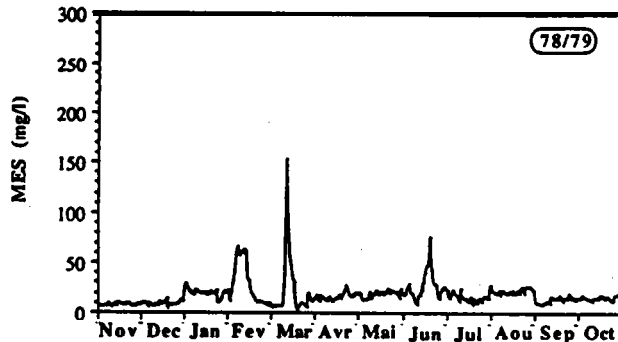
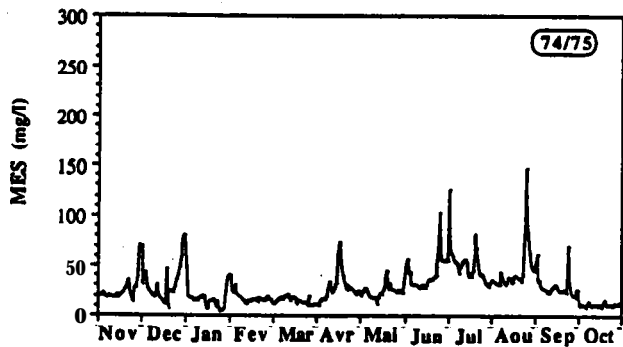
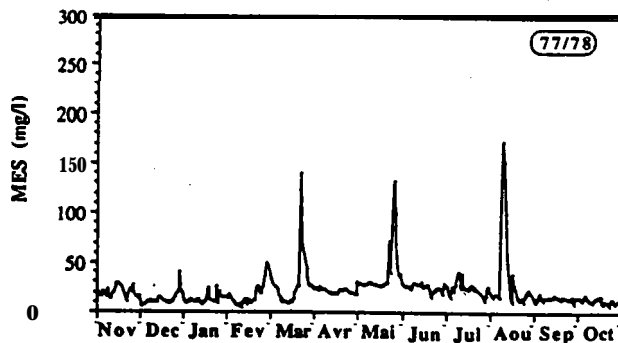
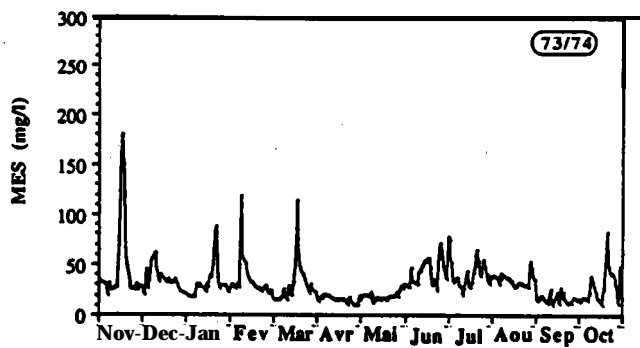
Annexe 1 (Suite)

Rhin à Maxau, 1962/63 à 1993/94. Variation temporelle des débits journaliers par années hydrologiques



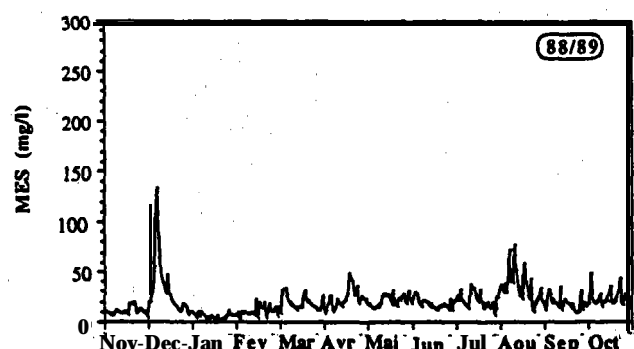
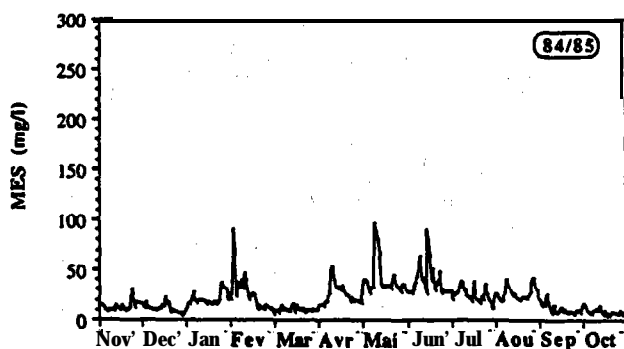
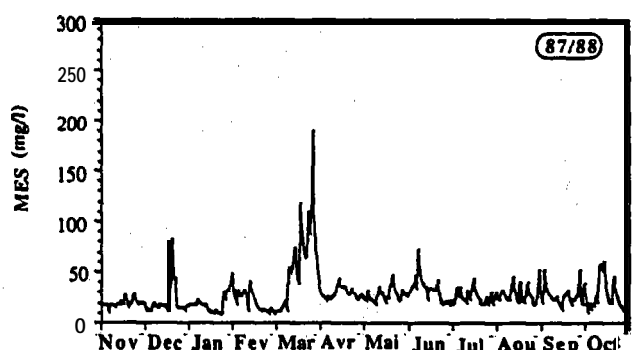
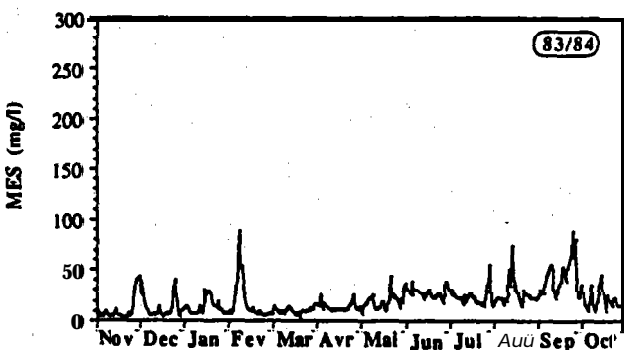
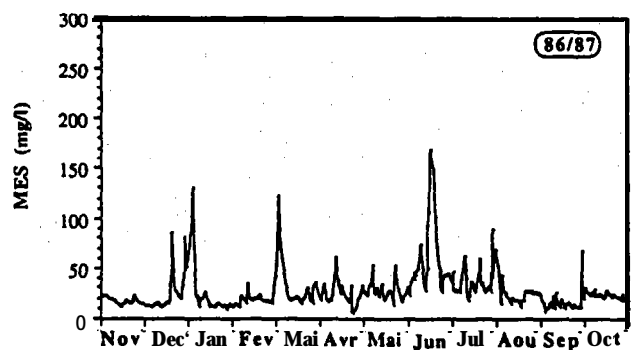
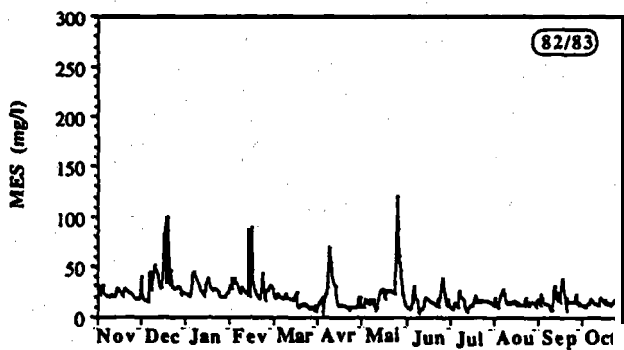
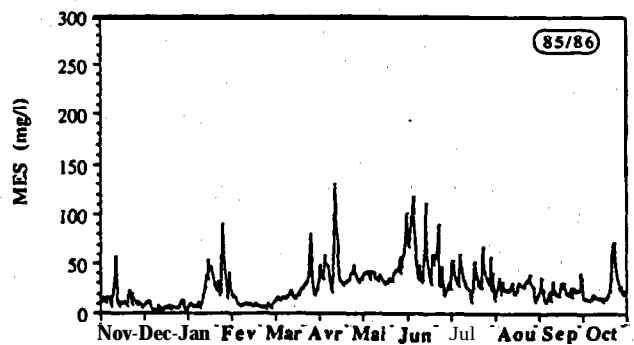
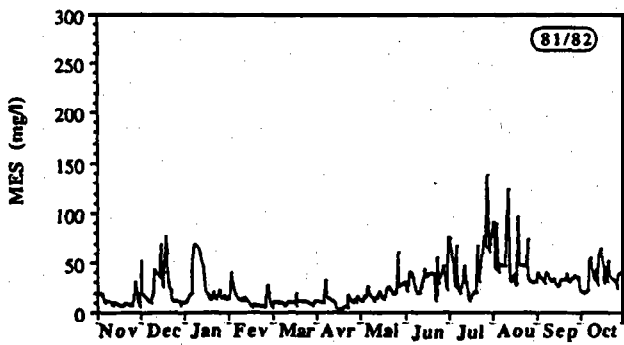
Annexe 1 (Suite)

Rhin à Maxau, 1962/63 à 1993/94. Variation temporelle des débits journaliers par années hydrologiques



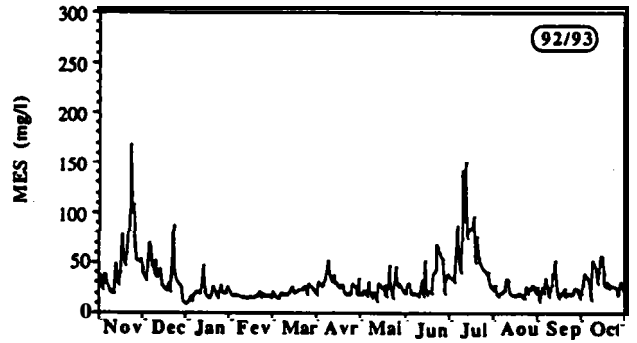
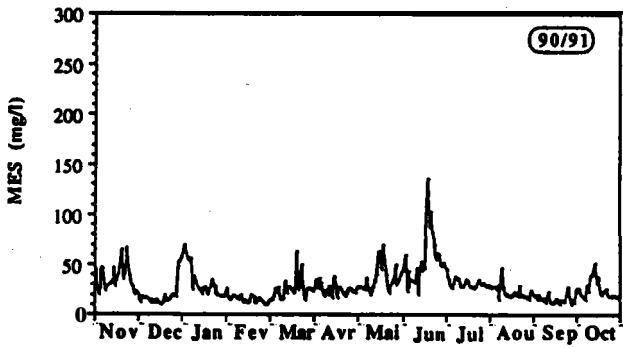
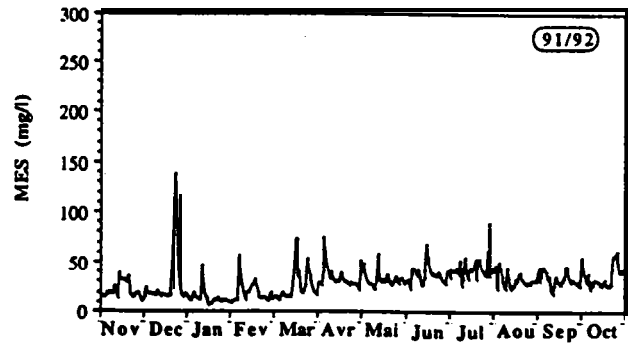
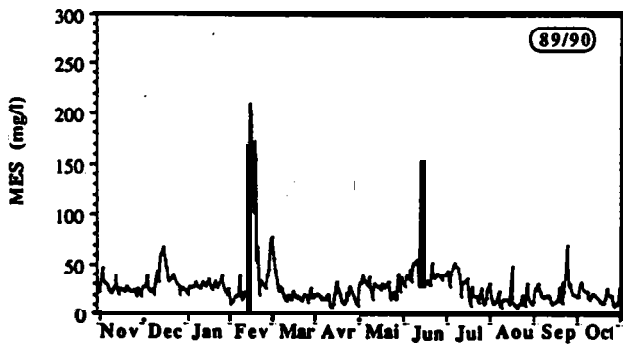
Annexe 2

Rhin à Maxau, 1973/74 à 1992/93. Variation temporelle des concentrations journalières des matières en suspensions (MES) par années hydrologiques



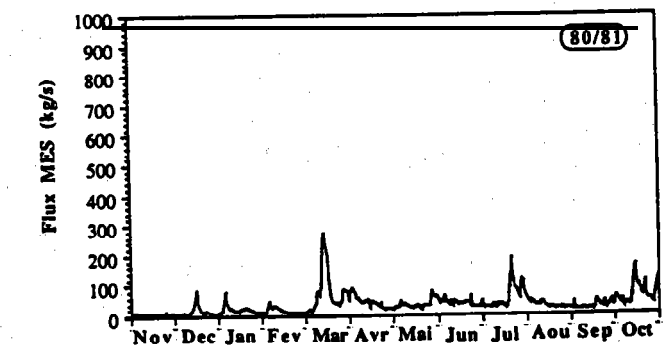
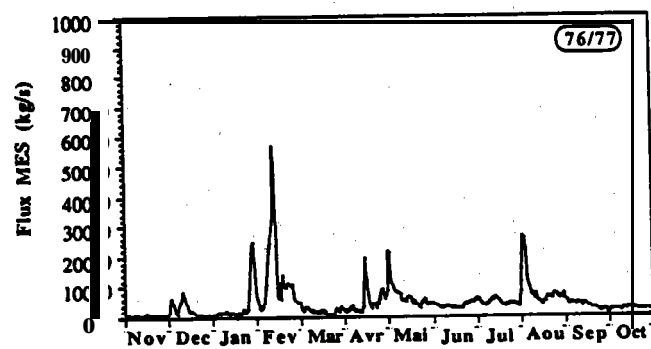
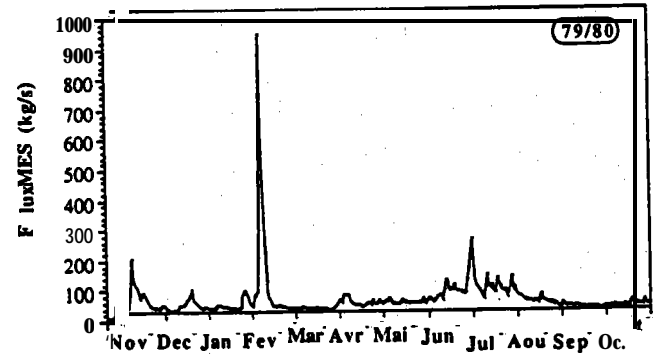
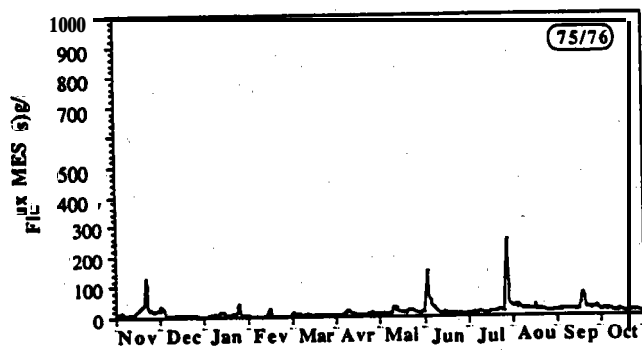
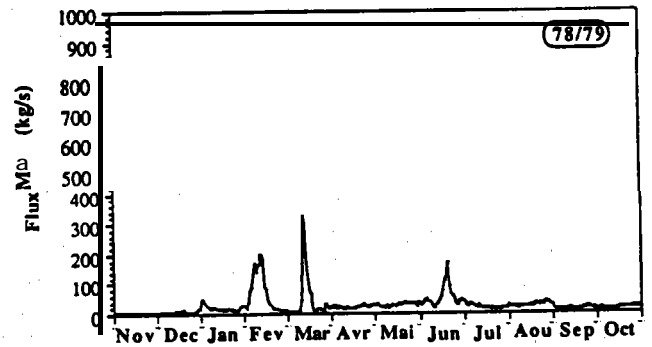
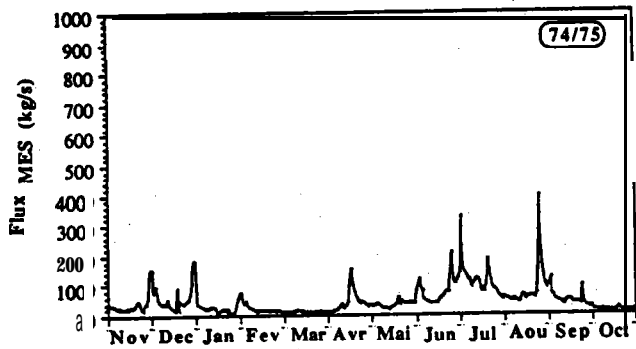
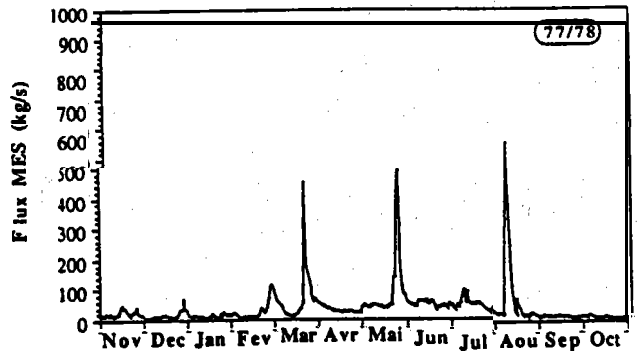
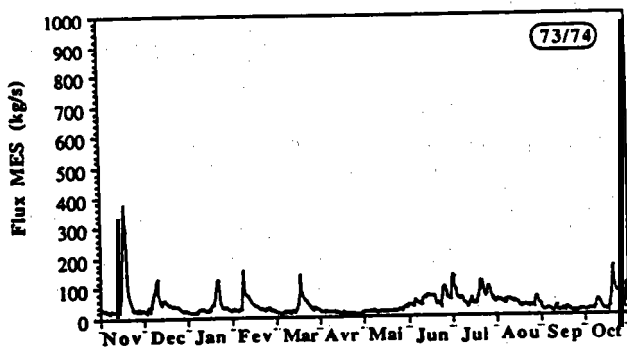
Annexe 2 (Suite)

Rhin à Maxau, 1973/74 à 1992/93. Variation temporelle des concentrations journalières des matières en suspensions (MES) par années hydrologiques



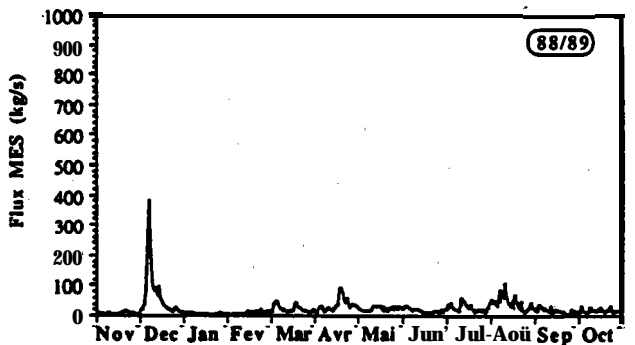
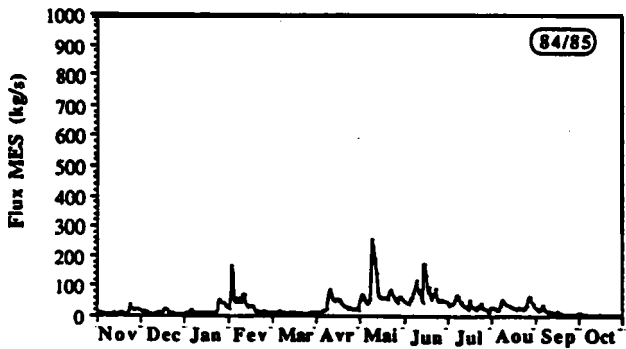
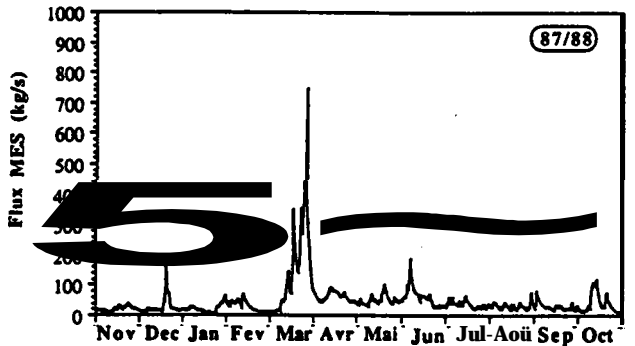
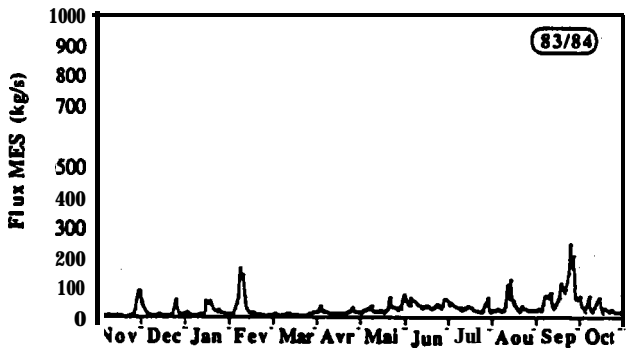
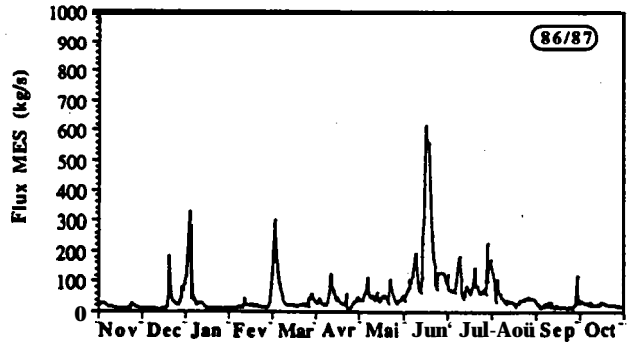
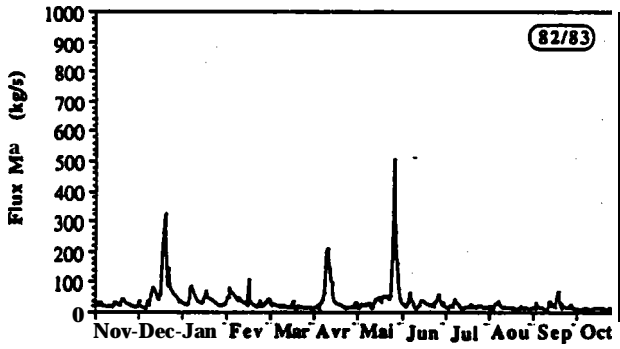
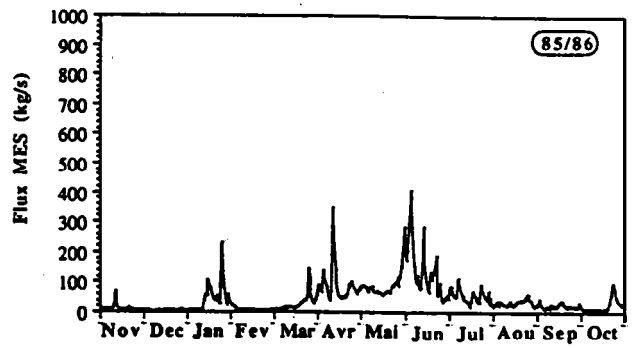
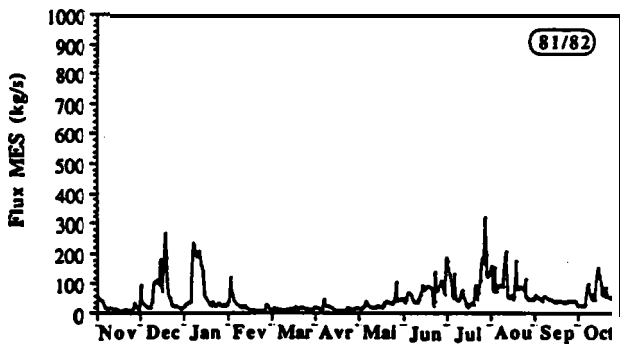
Annexe 2 (Suite)

Rhin à Maxau, 1973/74 à 1992/93. Variation temporelle des concentrations journalières des matières en suspensions (MES) par années hydrologiques



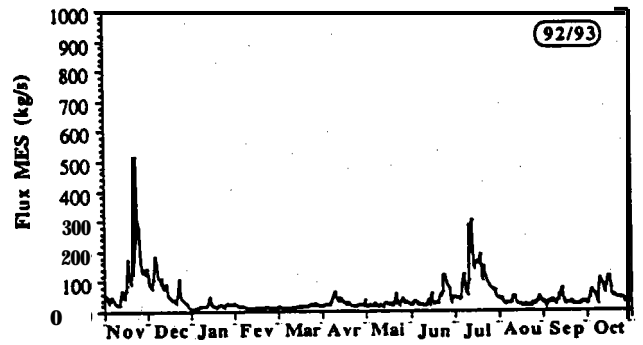
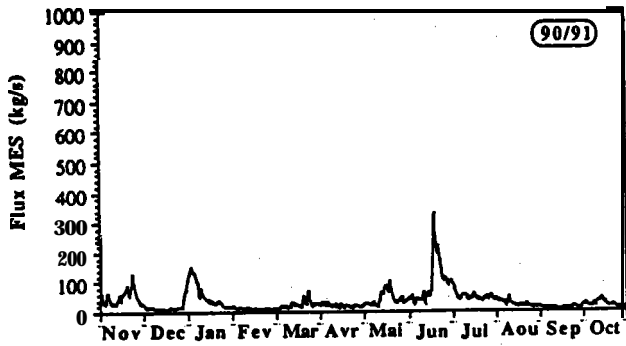
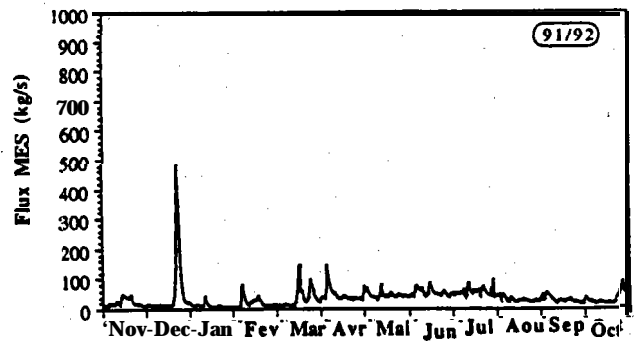
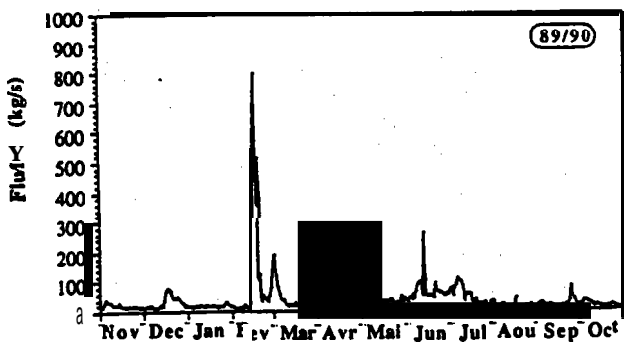
Annexe 3

Rhin à Maxau, 1973/74 à 1992/93. Variation temporelle des flux journaliers des matières en suspensions (MES) par années hydrologiques



Annexe 3 (Suite)

Rhin à Maxau, 1973/74 à 1992/93. Variation temporelle des flux journaliers des matières en suspensions (MES) par années hydrologiques



Annexe 3 (Suite)

Rhin à Maxau, 1973/74 à 1992/93. Variation temporelle des flux journaliers des matibres en suspensions (MES) par années hydrologiques