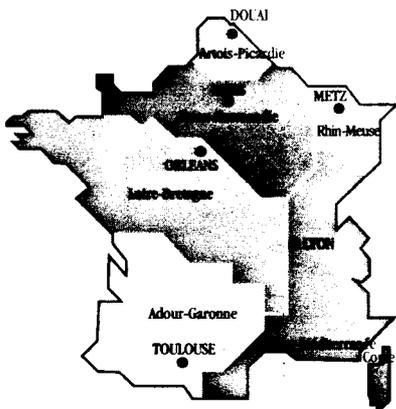


# EVALUATION DES FLUX POLLUANTS DANS LES RIVIERES POURQUOI, COMMENT ET A QUEL PRIX ?



*Document réalisé sous la direction des Agences de l'Eau  
et du Ministère de l'Environnement.*

*Chargé d'étude : NATURALIA ET BIOLOGIA*

*46, rue Saint-Jacques*

*75005 PARIS*

*Laboratoire de Géologie Appliquée*

*Université Pierre et Marie-Curie*

*4, place Jussieu*

*75005 PARIS*

*Prix : 150 F*

*1994*

# EVALUATION DES FLUX POLLUANTS DANS LES RIVIERES POURQUOI, COMMENT ET A QUEL PRIX?

## SYNTHESE

**M.MEYBECK, A.PASCO, A.RAGU**  
**Laboratoire de Géologie Appliquée**  
**Université Pierre et Marie Curie**

La détermination des flux polluants dans les rivières est restée jusqu'ici une activité accessoire, voire confidentielle de la majeure partie des programmes de surveillance de la qualité des eaux dans le monde entier (Meybeck, Chapman et Helmer, 1989), et notamment en France où le Réseau National de Bassin (RNB), épine dorsale de la surveillance effectuée par les Agences de Bassin, n'a pas du tout été conçu à cet effet. Cependant, on note que, dans des cas très particuliers, les flux ont pu représenter une part essentielle de la surveillance. C'est le cas des flux d'azote et surtout de phosphore apportés aux lacs, ainsi que des flux de chlorure de sodium transitant dans le cours du Rhin en aval de Bâle. Ainsi, la Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman (CIPEL) réalise depuis 20 ans des bilans réguliers et se situe, grâce à ses experts, à la pointe de la recherche dans ce domaine. Ceux-ci ont étudié les flux de  $N_{total}$  et  $P_{total}$ , des formes spécifiques du phosphore, du mercure particulaire etc... (travaux de Burrus et *al.*, 1988 et 1990 Favarner et Vernet, 1989, Zhang Li, 1988, etc...). Sur le Rhin, c'est la Commission Internationale du Rhin qui effectue des études poussées sur les flux journaliers de  $Cl^-$ . Notons également que le groupe GRECO-LACS du CNRS, a également effectué des travaux sur les apports en N et P aux systèmes lacustres (GRECO-LACS, 1987 ; Hubert et *al.*, 1988).

En Angleterre, la recherche méthodologique sur l'établissement des flux des rivières est menée depuis 15 ans à l'Université d'Exeter, par D. Walling et B. Webb, en particulier sur le site pilote de la rivière Exe, où ont été étudiés les flux de matières en suspension (MES), de sels dissous ou de  $NO_3^-$  (Walling, 1977, Walling et Webb, 1983, 1985, 1987). Mais ce sont très certainement les flux de MES qui ont fait l'objet de plus de recherches : méthodologie d'échantillonnage, optimisation des fréquences, importance des éléments rares, etc... Les travaux hongrois (Rakoczi, 1977) et américains (Meade et Parker, 1985, Meade et Stevens, 1990) font autorité. Citons également une excellente étude vénézuélienne sur la Tuy, rivière drainant Caracas (Ramirez et *al.*, 1988).

En France, il nous faut encore citer les travaux du CEMAGREF effectués sur des petits bassins (Bellamie et *al.*, 1988), ou sur les apports au lac du Bourget (Balland et Varet, 1979), ainsi que quelques travaux universitaires (Meybeck, 1970 ; Etchanchu, 1988 ; Kattan 1989).

En raison des nouvelles conventions internationales portant sur la réduction des flux de polluants fluviaux arrivant aux océans et aux mers régionales, l'établissement des flux devient maintenant une mission majeure de la surveillance du milieu aquatique. A cet effet, les six Agences de l'Eau françaises (Adour-Garonne, Artois-Picardie, Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Rhône-Méditerranée-Corse et Seine-Normandie) ont confié à Naturalia et Biologia la charge d'établir un rapport bibliographique de synthèse (Meybeck et *al.*, 1992) sur ce sujet, et de faire des propositions générales pour évaluer les flux polluants.

## 1.1 Les flux et les débits

Mis à part la chlorophylle "a", dont l'estimation des flux reste une préoccupation mineure, aucune variable dont le flux F ne croisse pas avec le débit n'a été rencontrée. Cette relation est directement liée au coefficient "b" de la relation concentration (C) - débit (Q) :

$$C = a Q^b, \text{ d'où } F = a Q^{b+1}$$

b est toujours supérieur à -1, souvent proche de zéro (relation indéterminée) et souvent supérieur à zéro.

**Si  $-1 < b < 0$**  les flux croissent moins vite que les débits ; leur variabilité est légèrement inférieure à celle des débits. C'est le cas général des ions majeurs, et des nutriments dans certains cas.

**Si  $0 < b < 1$**  les flux croissent plus vite que les débits, leur variabilité leur est légèrement supérieure. C'est le cas en général pour Ptotal et Nk sur eau brute, du COT, et assez fréquemment des  $\text{NO}_3^-$ ...

**Si  $b > 1$**  les flux croissent beaucoup plus vite que les débits, leur variabilité est nettement supérieure à ceux-ci. C'est le cas des MES, et, très souvent, de leurs polluants associés, exprimés en concentrations.

La distribution des débits dans le temps va conditionner celle des flux : la majeure partie des flux transitera pendant une faible proportion du temps. Cette disproportion sera d'autant plus forte que le cours d'eau est plus petit et que le régime hydrique est plus irrégulier. Ainsi, les petits fleuves méditerranéens voient leurs flux annuels passer en moins de 20 % du temps.

Pour pouvoir apprécier cet effet, il faut disposer de suivis au moins journaliers pour les petites rivières : de telles surveillances sont rarissimes. Nous donnons ici un exemple complet pour le fleuve endoréique Tuy, qui draine Caracas au Venezuela (Tableau 1).

Pour la Tuy, de régime tropical humide assez régulier, 18.4% du temps (67 jours) apportent 69.3 % du volume d'eau. Cette proportion est légèrement inférieure pour les éléments dissous plus ou moins dilués : sels dissous totaux (65.1 %), COD (50.5 %),  $\text{NH}_4^+$  (68.4 %). Pour les matières en suspension, la proportion transportée dans le même temps est beaucoup plus grande : 95.4 %. Elle est identique pour les nutriments associés au COP (95.6 %, Carbone organique Particulaire).

Enfin, pour les orthophosphates, essentiellement rejetés par la ville de Caracas à un flux peu variable, leur proportion de flux suit celle du temps écoulé et non pas celle des volumes.



Lorsque les fleuves sont très dépendants de pollutions spatialement ponctuelles : cas de la Seine en aval des rejets de la station d'épuration d'Achères (un exceptionnel rapport de force entre la cité et le Fleuve) et du Rhin en aval des rejets des Mines De Potasse d'Alsace (MDPA), le comportement des éléments ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Cl}^-$ , pour Achères ;  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  pour les MDPA) dans le fleuve devient étroitement lié aux rejets (cycles journaliers à Achères, hebdomadaires aux MDPA, grèves bénéfiques des usines pour le Rhin et grèves de station d'épuration catastrophiques pour la Seine, etc...).

**Même si on peut regrouper les polluants en deux catégories très distinctes, dissous et particulaire, leur comportement dans le milieu fluvial est spécifique du fleuve, de la station, du polluant et parfois même de la crue.**

### 1.3 IMPORTANCE DES MES

Les matières en suspension sont un vecteur essentiel de la pollution en métaux, micropolluants organiques, matières organiques, nutriments et radio-éléments. **Toutes les analyses effectuées sur "eau brute" ont des corrélations positives avec les MES** :  $\text{DBO}_5$ , NK,  $\text{Ptot}$ , métaux totaux, micropolluants organiques. De nombreuses études de pollution en milieu fluvial ou estuarien effectuées sur des eaux brutes aboutissent à ces corrélations : on ne mesure pas l'évolution de pollution du milieu mais celle de la concentration en MES, parfois par des analyses très coûteuses (métaux, radio-éléments). Les "turbidimètres" à  $\text{Ptot}$ ,  $\text{Cdtot}$  ou même  $^{40}\text{K}$  rapportés dans la littérature sont très nombreux. On mélange ainsi dans l'analyse sur eau brute des formes dissoutes et particulaires, de comportements très différents, quelquefois opposés : Sur la Seine, en aval d'Achères, le  $\text{Ptot}$  sur eau brute combine les orthophosphates, qui sont dilués, le Porg. particulaire qui croît avec les crues. De même le COT combine le COD, parfois dilué, et le COP qui croît avec les MES.

**En France, le suivi des MES effectué actuellement sur le Réseau National des Bassins ne permet absolument pas d'en établir les flux** : 12 échantillons mensuels (même 24) sont totalement inadaptés. Il est difficile d'effectuer des moyennes annuelles sur la base d'un tel échantillonnage, vu la variabilité spécifique des MES. De plus, la mesure des MES dans une section fluviale est une opération longue et nécessite un matériel particulier. Cette surveillance spéciale a été mise en place dans beaucoup de pays d'Europe et en Amérique du Nord dans les années 50, pour des besoins de contrôle de l'érosion des sols et d'envasement des barrages. Elle a été totalement abandonnée vers 1970 en France et dans la plupart des pays européens. L'importance de la mesure des flux polluants rend à nouveau cette surveillance prioritaire sur quelques stations.

### 1.4 METAUX DISSOUS

Une des conclusions majeures de cette synthèse bibliographique est la **très grande difficulté de surveiller les métaux dissous en raison des risques de contamination** qui sont présents depuis la préparation des flacons de prélèvements jusqu'en laboratoire. Ces risques perçus par les chercheurs depuis 15 ans, ne sont pris en compte que depuis quelques années seulement par les agences de surveillance!

Tableau 2. Flux de substances dissoutes et flux de substances particulaires, comparaison.

	Dissous	Particulaire
Mode de transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- continu.</li> <li>- total.</li> <li>- même vitesse que l'eau.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- discontinu (dépôt-transport-érosion).</li> <li>- sélectif (fonction de la granulométrie).</li> <li>- vitesse inférieure à celle de l'eau.</li> </ul>
Relation avec le débit	<p>(i) <math>C = a Q^b</math> avec généralement - <math>-1 &lt; b &lt; 0</math> pour les éléments majeurs <math>0 &lt; b &lt; 1</math> pour les COD variable pour les nutriments</p> <p>(ii) Hystérésis de crue orthogrades ou rétrogrades.</p>	<p><math>C = a Q^b</math> avec toujours <math>b &gt; 1</math> et généralement <math>b &gt; 2</math>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hystérésis de crue orthogrades.</li> </ul>
Durée de 50 % du transport annuel	Proches de la durée de 50 % de volumes d'eau écoulés. (15 à 25 % du temps écoulé)	Nettement inférieure à celle des volumes écoulés (2 à 10 % du temps)
Etudes préliminaires nécessaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>- gamme de variation annuelle des concentrations (médiane, déciles).</li> <li>- relation concentration-débit annuelle.</li> <li>- cycles de crue.</li> <li>- relation polluants totaux (ou particulaires) - MES.</li> </ul>	
Stratégie de surveillance des polluants	Echantillons représentatifs des volumes écoulés pris à des débits variés.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour le bilan des MES transportés :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• échantillonnage des crues (montées)</li> <li>• + échantillons réguliers en hautes eaux.</li> </ul> </li> <li>• Pour le bilan des polluants particulaires                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- bilan annuel des MES.</li> <li>- analyses des MES (12/an) lors des crues.</li> </ul> </li> </ul>
Principaux problèmes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- conservation des échantillons prélevés.</li> <li>- contamination des échantillons (pour les micropolluants).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hétérogénéité de la section mouillée.</li> <li>- grande variabilité temporelle des MES.</li> </ul>

Ainsi, l'US Géological Survey, qui est chargée par l'US EPA d'effectuer le suivi des métaux dans les fleuves, a-t-elle lancé il y a trois ans seulement un grand programme de critique des protocoles de suivi. Il en résulte une déclassification générale des analyses effectuées depuis plus de 20 ans, en particulier sur Zn, Pb, Cd, As dissous, mais aussi sur les autres métaux.

**Ainsi, les tendances à la diminution entre 1970 et 1990 des concentrations fluviales en métaux dissous ne sont généralement que des artéfacts liés à une réduction progressive, mais non totale, des contaminations d'échantillons. La surveillance des métaux dissous nécessite une équipe spécialement formée, du matériel particulier, des soins spécifiques et donc du temps de préparation des campagnes. C'est donc là une opération nécessairement coûteuse.**

En France, la première surveillance réalisée (sur 2 années) avec les précautions requises a été faite sur la Seine, en aval de Poses, par l'IFREMER et le Service de la Navigation de la Seine (Bombed et Cossa, 1992). Elle a permis de résoudre certains

problèmes techniques qui demeuraient dans les équipes fluviales les plus expérimentées, et met en évidence des comportements particulièrement intéressants des métaux, laissant supposer des rejets ponctuels importants. Ainsi, la nécessité de filtrer sur le terrain dans des conditions ultra-propres (hotte à flux laminaire) et d'effectuer les analyses, notamment de plomb, dans des pièces décontaminées (salle blanche) sont apparues nettement.

### **1.5 ANALYSE DE LA MATIERE PARTICULAIRE**

**L'analyse chimique des MES, isolées par filtration ou par centrifugation, devient une nécessité absolue dans l'établissement des flux polluants** dès lors qu'on reconnaît que l'analyse sur eau brute est inadaptée et que, très souvent, la plus grande partie du polluant est sous forme particulaire, et ce d'autant plus que les teneurs en MES seront plus élevées. C'est le cas de beaucoup de métaux (Cd, Pb, Hg, Zn, Cu, etc...) et des organo-chlorés qui sont transportés à 80 % et plus dès que les MES atteignent 100 mg/l, c'est-à-dire pendant les périodes de crue.

Si l'analyse des sédiments déposés est une forme de surveillance en développement, en particulier pour repérer spatialement les zones de pollutions, elle ne peut être utilisée directement dans l'établissement des flux polluants. Les sédiments déposés sont, par nature même, plus grossiers et donc moins contaminés que les MES plus fines et aux capacités d'adsorption plus grandes.

**La composition chimique des MES, lorsqu'elle est surveillée, met en évidence une relative constance** : les variations relatives des teneurs en nutriments, micropolluants, carbone organique etc... varient entre 10 % et 100 %, alors que celles des MES elles-mêmes varient couramment sur 2, voire sur 3 ordres de grandeur dans le fleuve. **Ainsi, la concentration du polluant particulaire (exprimé en mg/l) sera-t-elle bien plus fonction de la concentration des MES (mg/l) que de la teneur du polluant dans les MES (en g/g).** Il n'est donc pas nécessaire de faire beaucoup d'analyses chimiques de matière particulaire si on dispose d'un bilan fiable des MES, réalisé à partir de mesures très fréquentes des MES (journalières lors de crues).

### **1.6 STOCKAGE ET REMOBILISATION DES POLLUANTS**

**La connaissance exacte de l'évolution des flux polluants transitant à une station est une information différente de la dégradation ou de l'amélioration de la pollution des eaux du bassin, surtout pour les polluants associés à la matière particulaire.** En effet, celle-ci peut être stockée dans le lit fluvial, lors d'une succession d'années sèches (par exemple 1989-1990-1991 en France), dans les lacs, (les grands lacs subalpins stockent à 99 % des polluants particulaires de leurs bassins amont c'est le cas du mercure dans le Lac Léman) ou dans les réservoirs. Le stockage du cadmium dans les sédiments du Lot est un exemple typique de ce processus. Inversement, une année particulièrement humide pourra remettre en mouvement vers l'aval une partie, voire la totalité, des sédiments déposés dans les lits fluviaux. **Même pour les polluants dissous, il résulte des relations flux-débits qu'une année humide sera toujours une année de flux polluants élevés, alors que l'état de pollution du bassin peut être en amélioration.**

## 1.7 DUREE DE SURVEILLANCE DES FLUX

Même pour les fleuves aux régimes les plus réguliers (comme le régime pluvial océanique pour l'Europe de l'Ouest), une durée de 10 ans semble être un minimum pour juger de l'évolution des flux polluants. Ceci est dû, d'abord à la variabilité des débits eux-mêmes. Pour des régimes plus irréguliers, comme en zone méditerranéenne, où une crue décennale peut influencer notablement les volumes moyens écoulés, il importe de rallonger encore cette durée. En ce qui concerne les flux de polluants particuliers, beaucoup plus variables d'une année sur l'autre que les débits, si on souhaite avoir tout de même des réponses au bout de 10 ans, il faut avoir alors conscience que les incertitudes seront plus grandes que sur les flux en solution.

Par contre, on peut avoir une très bonne appréciation de l'évolution générale de la contamination du bassin en examinant la composition chimique des suspensions transportées (g/g), beaucoup moins variable, et donc plus fiable, que les concentrations (g/l) et que les flux (g/s) en gardant à l'esprit les restrictions de stockage et de remobilisation évoquées plus haut.

## 2. POINTS CRITIQUES DE LA CHAÎNE DE SURVEILLANCE : INCERTITUDES ET BIAIS

La surveillance de la qualité du milieu aquatique est une chaîne à plusieurs maillons : la qualité finale du résultat obtenu dépend de la solidité de chaque maillon (Meybeck et *al.*, 1992).

### 2.1 Choix de la station

- La station de mesure des flux doit correspondre à une **section mouillée bien mélangée verticalement et latéralement**. Elle ne doit pas être située directement en aval d'une confluence ou d'un rejet ponctuel (ville, industrie, mine) important.
- La station doit être proche d'une station de jaugeage: il ne doit pas y avoir de prélèvements ou des rejets appréciables entre les deux.
- **La station doit être accessible facilement, quel que soit le débit**, et doit permettre la mise à l'eau d'un bateau et/ou doit pouvoir être traversée par une passerelle ou par un pont. La possibilité d'obtenir du courant électrique pour les appareils de prélèvements ou de surveillance est un atout supplémentaire.

### 2.2 Mesure des débits

**L'établissement des flux polluants implique nécessairement la connaissance en continu des débits avec précision, particulièrement dans les périodes de crues et de hautes eaux.**

Les jaugeages doivent être effectués plus particulièrement dans les débits élevés, à partir du double du débit moyen annuel, jusqu'à 10 fois celui-ci si possible : la station ne doit pas se détacher aux très forts débits. **La précision des flux dissous est liée directement à celle des débits élevés se produisant**

seulement 20 % du temps, celle des flux de polluants particuliers à des épisodes de plus courtes durées encore, correspondant à 10 % du temps. La précision sur les débits plus fréquents, c'est-à-dire en étiage, n'a que très peu d'importance sur celle des flux polluants.

### **2.3 Fréquences d'échantillonnage et surveillance en continu**

La fréquence d'échantillonnage est une des clés de l'établissement des flux polluants. Elle doit être modulée en fonction du régime fluvial et du comportement des polluants. Plusieurs problèmes se posent : (i) crues, (ii) cycles, (iii) accidents.

- (i) Les crues et les périodes de fortes eaux doivent bénéficier d'une fréquence nettement plus grande que les étiages pour deux raisons : les concentrations y sont beaucoup plus variables, les flux journaliers de crue sont de 10 à 100 fois plus élevés que ceux d'étiage pour les matières dissoutes, et de 100 à 10.000 fois plus élevés pour les polluants particuliers. Plus le fleuve est petit et son régime irrégulier, et plus la fréquence doit être élevée.
- (ii) Les cycles journaliers ou hebdomadaire, liés le plus souvent à des influences humaines, nécessitent de rompre un échantillonnage régulier, effectué à la même heure ou le même jour de la semaine, afin de ne pas introduire de biais systématiques.
- (iii) Les pollutions accidentelles, par définition imprévisibles, ne peuvent pas être prises en compte par un échantillonnage fixé à l'avance. Par contre, un échantillonnage "continu" - par exemple une prise tous les 1/4 heure - par un préleveur manuel ou automatique permet l'analyse fine du passage d'une vague polluante, et plus généralement la confection d'échantillons moyens, généralement hebdomadaires, proportionnels aux débits.

L'échantillonnage automatique, s'il a en principe tous les avantages, possède de nombreux inconvénients :

- (i) il est peu représentatif des MES sauf si les eaux sont efficacement refoulées par une pompe immergée,
- (ii) il pose de gros problèmes de contamination ambiante pour les métaux (les métaux dissous en sont exclus) et pour certains micropolluants organiques (nécessité de pompes en Téflon, etc...),
- (iii) il pose des problèmes de conservation des échantillons dans le préleveur lui-même (par exemple  $\text{NH}_4^+$ ).

**Pour les grands fleuves, l'échantillonnage manuel reste actuellement le seul à conseiller pour les micropolluants, mais l'échantillonnage automatique en continu peut toutefois présenter quelque intérêt pour les micropolluants en phase particulière. L'échantillonnage automatique en**

continu n'est conseillé que pour les petits fleuves où la qualité varie beaucoup en 24 H et/ou en cas d'accidents signalés en amont. Dans la perspective des flux polluants, il ne nous semble pas encore acceptable de baser la surveillance des nutriments et des micropolluants sur des sondes automatiques en continu, à moins que celles-ci n'aient fait leurs preuves *in situ* sur un cycle hydrologique complet, et en particulier lors des crues (MES très élevées) et des étiages (développement d'algues sur les sondes). Les principales critiques actuelles à de telles sondes sont la dérive des appareils, l'encrassement, les pannes, le coût élevé de la maintenance, les niveaux élevés des limites de détections des micropolluants dissous, en particulier des métaux, comparé aux très faibles teneurs réelles.

Par contre, l'utilisation d'une station de mesure en continu de conductivité et turbidité est un appui essentiel dans l'établissement des flux polluants, par les corrélations possibles entre ces variables, les ions majeurs et les MES. L'adjonction du pH, de la température et de l'oxygène dissous, réalisé aux "grandes stations" suisses depuis plusieurs années, ou sur le Danube à Budapest, depuis plus de 15 ans, permet de connaître une définition maximum de la qualité générale de la rivière.

#### 2.4 Techniques d'échantillonnage

Le matériel et les techniques d'échantillonnage doivent être impérativement diversifiées suivant les polluants. Les bouteilles de prélèvements pour les MES sont des engins spécifiques à ouverture horizontale, profilés et lestés, à petite ouverture permettant un remplissage progressif proportionnel au débit. Certains dispositifs (Meade et Stevens) permettent de prélever d'un seul coup une verticale entière proportionnellement au flux de MES. Ces engins sont en général en laiton, et ne permettent pas d'autres déterminations que celle des MES (à part les ions majeurs). **La mesure des MES à une station implique obligatoirement ces profils verticaux** (de 6 à 12), au moins suffisamment pour permettre de déterminer la représentativité d'un échantillonnage plus léger effectué en un point, ou quelques points, de la section avec un dispositif plus léger (par exemple une pompe immergée, ou même un prélèvement au seau du bord) mais avec une fréquence très grande.

L'échantillonnage pour les métaux nécessite un matériel ultra-propre, nettoyé par des chimistes confirmés : bouteille de prélèvement, flacons de prélèvement, flacons de stockage des eaux filtrées, matériel de filtration, etc... (Bombléd et Cossa, 1992). Le métal, et même certains plastiques sont exclus pour cet échantillonnage.

L'échantillonnage pour les micropolluants organiques nécessite un matériel ultra-propre, nettoyé par des chimistes organiciens aux solvants décontaminés. Contrairement aux précédents prélèvements, le plastique est ici proscrit au bénéfice du Téflon ou de l'acier inox. Des volumes moyens (10 l) sont nécessaires et donc des installations de filtrations de gros diamètres (150 mm).

## 2.5 Traitement et conservation des échantillons

**Pour les micropolluants organiques et les métaux dissous**, il importe de filtrer dans les heures qui suivent le prélèvement, afin d'empêcher une réadsorption possible sur les MES. Ainsi, le protocole de Bomblet et Cossa (1992) recommande-t-il **l'emploi sur le terrain d'une hotte à flux laminaire pour filtrer en atmosphère propre surpressée dès le prélèvement terminé.**

Les métaux dissous doivent être analysés après filtration et non après centrifugation. Par contre, **la centrifugation en continu permet d'isoler facilement une grande quantité de MES sur laquelle peut s'effectuer la totalité des analyses de métaux, de carbone organique, et des micropolluants organiques**, ainsi que les analyses d'appui indispensables (minéralogie et granulométrie). L'échantillon de MES nécessaire peut ainsi aller jusqu'à plusieurs dizaines de grammes, ce qui serait impossible à obtenir par filtration, et qui nécessite la centrifugation des plusieurs centaines de litres (et parfois jusqu'à plusieurs mètres cubes !). Une telle opération nécessite, prélèvement compris, jusqu'à une journée complète et un matériel *ad hoc* embarqué sur camionnette ainsi qu'une source d'énergie.

Pour les micropolluants organiques, certains auteurs pratiquent l'extraction au solvant sur l'échantillon non filtré. Cette procédure est à la rigueur acceptable pour des produits assez solubles et des rivières aux faibles niveaux de MES, mais ne l'est plus pour les rivières turbides et les produits peu solubles, car les concentrations mesurées sur eau brute sont alors essentiellement liées au MES et non pas aux niveaux de pollution.

## 2.6 Contrôle de la qualité analytique

C'est un point clé très souvent absent des réseaux de surveillance des rivières. Il convient d'abord d'effectuer le contrôle interne de la qualité par des blancs de labo, bien sûr, mais aussi par des blancs de terrain : des flacons remplis d'eaux de concentrations connues et/ou nulles sont filtrés, transvasés, et conservés comme les flacons de terrain.

Lorsque plusieurs équipes travaillent sur le même fleuve, ou lorsque l'on veut comparer les flux d'un fleuve à un autre, il importe de s'assurer de la "comparabilité", des analyses. Deux stratégies de contrôle sont alors nécessaires : l'envoi d'échantillons de même concentration à tous les labos (généralement à plusieurs niveaux de concentrations), c'est l'intercomparaison la plus commune et la plus facile. Des standards commerciaux, y compris pour la matière particulaire sont disponibles. L'autre stratégie est plus rare : il s'agit de comparer les techniques de terrain (prélèvement, traitement, conservation) entre elles. Toutes les équipes prélèvent en même temps sur le même site, mais avec leur propre matériel, et traitent les échantillons qui seront ensuite analysés par un même laboratoire réputé pour sa compétence (il peut s'agir de l'un des participants). Une telle intercomparaison, réalisée par l'US Geological Survey a révélé des différences de plus d'un facteur 100 sur le zinc dans l'eau distillée prise avec les préleveurs des différents laboratoires américains, utilisés couramment dans leur réseau national NASQAN (D. Rickert, U.S.G.S., Reston, comm. pers.).

## 2.7 Validation des données et archivage.

**Avant de les rentrer dans des banques de données, il importe de vérifier une par une les données.** Cet exercice est encore plus important pour les flux polluants à cause d'un coefficient multiplicateur des débits. Les points décimaux, les fautes d'unités (nitrates et phosphates exprimés en  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{PO}_4^{3-}$  au lieu de  $\text{N-NO}_3^-$  et  $\text{P-PO}_4^{3-}$ ), le manque de précision sur la filtration ou non des échantillons pour  $\text{N}_k$  et  $\text{P}_{\text{total}}$ , voire même pour les métaux, sont les erreurs ou les lacunes les plus fréquentes. Mais on trouve aussi, parfois, des inversions d'échantillons ou des inversions de variables. Une des vérifications les plus simples est la balance ionique. Etchanchu (1988) s'est livré à un contrôle systématique de celles-ci dans le bassin de la Garonne, à partir des analyses de routine du RNB : la plupart des stations testées révèlent une différence de balances ioniques supérieure à 10 % dans 50 % des analyses. On mesure ici la difficulté à travailler en routine avec des laboratoires très divers : **si l'analyse des ions majeurs pose déjà de gros problèmes, qu'en sera-t-il des flux de micro-polluants ! L'archivage et la critique des données doit être un exercice régulier confié à des ingénieurs expérimentés qui connaissent bien leur station. Les erreurs potentielles découvertes doivent faire l'objet d'un questionnement du laboratoire concerné, qui doit valider sa donnée.**

## 2.8 Modes de calcul

Certains modes de calcul introduisent des biais systématiques dans l'établissement des flux polluants et sont donc à proscrire. A chaque type de polluant (dissous, particulaire, ion majeur, nutriment...) correspond un mode de calcul optimal. Quelquefois, d'autres modes sont possibles. Ils dépendront des données disponibles et en particulier de la connaissance fine du bilan des MES, de la mesure en continu de la conductivité ou de la turbidité, des relations établies entre les variables telles que COP-MES ou  $\text{Na}^+$  - conductivité, etc.... Le tableau 3 détaille une sélection de 9 modes de calcul liés à des stratégies de surveillance variées sur 18 modes de calculs décrits (Meybeck et al., 1992). Les numéros 1 à 6 correspondent aux méthodes très bien exposées par Walling et Webb. Pour avoir la présentation complète des méthodes, on se référera au rapport complet.

## 3 RECOMMANDATIONS

Au vu des analyses précédentes, il est difficile de donner des recommandations précises valables dans tous les cas, tant les conditions locales, voire stationnelles, telles que le régime de la rivière, l'origine des polluants, les liens avec les MES, jouent un rôle dans les stratégies d'établissement des flux. On peut cependant avancer quelques grands principes et faire quelques propositions détaillées.

### 3.1 Définir les objectifs

**Avant toute chose, les autorités compétentes doivent sélectionner les polluants et les hiérarchiser.** C'est-à-dire, établir des ordres de priorité entre eux. Par exemple, si la surveillance de l'ammoniaque, composé éminemment variable, coûte trois fois plus cher que celle des nitrates, qui représentent un flux d'azote

$C$  : Concentration moyenne arithmétique sur l'intervalle de temps de surveillance.

$C = f(Q)$  : relation entre les concentrations et les débits.

$C_i$  : Concentration de l'échantillon instantané prélevé.

$C_k$  : Concentration des échantillons moyens confectionnés à partir d'échantillons instantanés prélevés automatiquement ou manuellement.

$C_m$  : Concentrations moyennes arithmétiques ( $m$  échantillons par mois).

$C_{pxi}$  : teneur du polluant  $x$  dans les MES de l'échantillon instantané.

$C_{px} = f(\text{MES})$  : relation entre les teneurs du polluant  $x$  dans les MES et la concentration en MES.

$F$  : flux de matière dissoute ou totale.

$F_{MESi}$  : flux de MES dans l'intervalle de temps affecté à l'échantillon  $i$  (sur lequel l'analyse de polluant particulière est faite).

$F_{px}$  : flux du polluant particulaire  $x$ .

$MES_i$  : Concentrations de matières en suspension de l'échantillon instantané.

$MES_j$  : Concentrations de matières en suspension effectué à une fréquence plus grande que la surveillance  $i$  (sert à établir  $F_{MESi}$ ).

$n$  : nombre d'échantillons ponctuels.

$Q$  : débit moyen.

$Q = f(t)$  : enregistrement en continu du débit.

$Q_i$  : débit instantané correspondant à l'échantillon instantané.

$Q_k$  : débit moyen dans l'intervalle de temps affecté à l'échantillon  $i$  (l'intervalle peut avoir une durée variable lors de la surveillance).

$Q_k$  : débit moyen pendant la période de  $k$ .

$Q_m$  : débits moyens mensuels (enregistrement en continu).

#	Données nécessaires	Critique	Domaine d'application
1	Produits des moyennes arithmétiques : $F1 = C \cdot Q$ $C = \sum C_i / n$ ; $Q = \sum Q_i / n$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ne tient pas compte de <math>C = f(Q)</math></li> <li>Ne tient pas compte de la distribution des débits.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A proscrire partout.</li> </ul>
2	Moyenne des flux instantanés : $F2 = \sum F_i / n$ $F_i = C_i \cdot Q_i$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ne tient pas compte de la distribution des débits.</li> <li>N'induit pas de biais mais une grande dispersion des flux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pour éléments dissous si <math>C = a \cdot Q^b</math> avec <math>-1 &lt; b &lt; 0</math></li> <li>Pour éléments non liés au débit (chloro. A).</li> <li>Valable si <math>(\sum Q_i / n) = \bar{Q}</math></li> </ul>
3	Concentration moyenne x débit moyen : $F3 = \bar{Q} \times (\sum C_i / n)$ $C_i, Q = f(t)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ne tient pas compte de <math>C = f(Q)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A proscrire partout.</li> </ul>
4	Concentration moyenne pondérée x volume écoulé : $F4 = \bar{Q} \cdot (\sum Q_i C_i / \sum Q_i)$ $C_i, Q = f(t)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ne tient pas compte de <math>C = f(Q)</math></li> <li>Tient compte de la distribution de <math>Q</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recommandée pour les éléments dissous.</li> <li>i) si <math>C = a \cdot Q^b</math> avec <math>-1 &lt; b &lt; 0</math></li> <li>ii) non liés au débit</li> <li>Médiocre pour matériaux particuliers.</li> </ul>
5	Moyenne des flux estimés : $F5 = (\sum C_i \times \bar{Q}_i) / n$ (Hypothèse des concentrations constantes) $C_i, Q = f(t)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tient compte de la distribution de <math>Q</math></li> <li>Ne tient pas compte de <math>C = f(Q)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Moins bonne que (4)</li> <li>Possible pour éléments dissous si <math>C = a \cdot Q^b</math> avec <math>-1 &lt; b &lt; 0</math></li> </ul>
6	Produit des moyennes mensuelles : $F6 = \sum_{1 \text{ à } 12} (\bar{C}_m \times \bar{Q}_m)$ $C_m = \sum C_i / m$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ne tient pas compte de <math>C = f(Q)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A proscrire (intermédiaire entre #1 et #2)</li> </ul>
9	Méthodes des débits classés $C_i, Q = f(t)$ sur très longue période.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ne permet pas de comparaison de flux année par année.</li> <li>Prend en compte la variabilité des débits et des flux, particulièrement dans les crues extrêmes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pour flux moyens à long terme surtout de matériaux particuliers.</li> <li>Convient pour débits très variables (régimes méditerranéens).</li> <li>Ne convient pas si <math>C = f(Q)</math> mal définie.</li> </ul>
13	Polluants particuliers : hypothèse des flux constants : $F_{px} = \sum C_{pxi} \cdot MES_i \cdot Q_i$ $C_{pxi}, Q_i, MES_i$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ne prend pas en compte les variations de <math>Q</math></li> <li>Ne prend pas en compte les variations de MES</li> <li>Conduit à des sous estimations des flux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rarement applicable (rejet particulaire à flux constant)</li> </ul>
14	Polluants particuliers, hypothèse des teneurs constantes : $F_{px} = \sum F_{MESi} \cdot C_{pxi}$ $C_{pxi}, Q = f(t), MES_j$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessite une très bonne connaissance du bilan des MES (surveillance <math>j</math> plus fréquente que la surveillance <math>i</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recommandé pour tous les polluants particuliers</li> <li>Applicable à court terme (échelle annuelle)</li> </ul>

Tableau 3 : Critique des modes de calcul des flux.

PRODUITS	MES COP Métaux part. Nutrim. part. Micropoll. org. part.	COT P total micropoll. org. totaux	COD nutriments dissous silice	ions majeurs	Métaux dissous	Micropolluants organiques dissous
MAILLON DE SURVEILLANCE						
Emplacement de station	Mauvais mélange vertical et latéral					
Mesure des débits	Station de jaugeage trop éloignée. Incertitudes dans les débits élevés : cycles de débits (journaliers, hebdomadaires)					
Fréquence échantillonnage	absence de prélèvements lors des crues		cycles de rejets (jours, semaines)		rejets accidentels	
Echantillonnage des crues	montée des crues non prise en compte		Basses eaux surreprésentées dans l'échantillonnage			
Echantillonnage dans la section	mauvaise représentativité des échantillons vis-à-vis des MES				Contamination par manipulation	
Appareils de prélèvement	échantillons vis-à-vis des MES				Contamination des préleveurs et des bouteilles	
Traitement et conservation des échantillons			Contamination (NH <sup>4+</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> )	Précipitation CaCO <sub>3</sub>	Contamination lors de la filtration	
			Utilisation biologique		Volatilisation	
Analyse		Reproductibilité			Contamination ambiante	
					Limite de détection	
Saisie des données	Erreurs de report des données : inversion des échantillons ; points décimaux.					
Calcul des flux	Biais					

Tableau 4 : Principaux problèmes rencontrés dans l'établissement de flux polluants (M. Meybeck, 1992)

souvent bien plus élevé, à précision égale, la dépense est-elle justifiée ? Ou bien, peut-on se contenter d'une médiocre précision sur NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, si la précision de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et donc sur le bilan d'azote total est correcte ? Même question pour les métaux : le cuivre, beaucoup moins toxique que le plomb, mais beaucoup plus facile à surveiller compte tenu des contaminations moindres est-il à mettre sur le même plan que ce dernier ? **Quant aux micropolluants organiques**, le casse-tête est complet pour choisir parmi les dizaines de produits recommandés. Nous proposons ici une approche pragmatique en deux temps :

- (i) établir des inventaires annuels poussés sur des échantillons en nombre très limité, par exemple, sur un échantillon composite de plusieurs culots de centrifugation pour les MES, et quelques échantillons de gros volumes filtrés (fin de l'hiver au lessivage des terres agricoles pour les pesticides ; étiage estival pour les produits d'origine domestique et industriels) pour les matériaux en solution. Sur ces 2 ou 3 échantillons des inventaires très poussés seront établis, et les micropolluants organiques

classés en deux catégories: d'une part les composés détectés mais proches des limites de détection, et/ou très loin des doses critiques (micropolluants à surveiller), d'autre part les composés présents dans des concentrations de même ordre que celles des valeurs guides (micropolluants à risques) sur lesquels les flux sont nécessaires.

- (ii) **établissement de protocoles de flux polluants pour les micropolluants à risques.** Pour les micropolluants particulaires, la combinaison de culots de centrifugation proportionnellement au flux des MES (en utilisant des classes de MES) permet de réaliser une analyse annuelle ayant une représentativité forte, et d'avoir une estimation correcte des flux. Pour les micropolluants en solution, l'échantillonnage doit être déterminé sur la base des études préliminaires. Un effort de prélèvement de 24/an, dont la moitié lors des hautes eaux, peut être considéré comme une hypothèse de départ.

### **3.2 Assurer la pérennité de la surveillance**

Un autre point important est de s'assurer un dispositif permanent et un financement pour une surveillance continue pendant 10 ans au minimum. Il vaut mieux surveiller correctement quelques stations clés sur un territoire donné (soit, en France, 5 ou 6 stations indispensables) plutôt que de couvrir tous les petits fleuves de surveillances médiocres entachées d'imprécision par manque de moyens. **S'ils convient de fournir à la communauté internationale des chiffres globaux pour un pays, on extrapolera les flux établis *per capita* et/ou par km<sup>2</sup>, au reste du territoire non surveillé. Mais ceci à condition que les cours d'eau surveillés soient représentatifs du reste du ou des territoires.**

### **3.3 Effectuer les études préliminaires**

Elles sont absolument nécessaires pour éviter les biais et réduire les incertitudes. Assez complètes par nécessité, elles doivent ultérieurement conduire à une optimisation de la surveillance et donc à une réduction de l'effort de terrain (fréquence) et de laboratoire (nombre de variables).

#### **(i) Homogénéité spatiale de la station**

Il importe d'effectuer des tests sur l'homogénéité verticale et latérale de la station choisie en prenant des échantillons à trois profondeurs et sur 6 à 8 verticales. Ces tests doivent bien sûr être affectés plus particulièrement aux débits élevés (supérieurs à la moyenne). On peut ainsi s'assurer de la représentativité spatiale d'un échantillon unique pris au bord ou au milieu du fleuve et, plus généralement, pris en surface. Il est cependant conseillé dans tous les cas de procéder à un échantillon moyen de surface (rive droite, rive gauche, milieu). Pour les MES, l'homogénéité est rarement assurée.

Si un échantillonnage léger quotidien est prévu à partir d'un prélèvement unique effectué dans la section mouillée (par exemple, milieu du fleuve à partir d'un pont), il importera de déterminer le facteur de correction qui lui sera appliqué, et qui pourra varier avec la hauteur d'eau.

**(ii) Connaissance de chroniques de débits et de MES**

Il est très difficile d'installer une station de mesure des flux polluants si les débits ne sont pas connus sur une grande période. En effet, il faut connaître le régime hydrologique de la rivière : distribution des crues et débits moyens mensuels (sur 10 ans minimum) sur lesquels on pourra baser une stratégie de surveillance. Le régime des MES (mais il n'est en général pas connu) est une information particulièrement importante pour la même raison.

**(iii) Contamination et conservation des échantillons**

L'année d'études préliminaires doit permettre de tester le matériel d'échantillonnage, de filtration et/ou de centrifugation, ainsi que les techniques de conservation adaptées avec les objectifs suivants : éliminer la contamination des échantillons, assurer la reproductibilité des méthodes de traitement, conserver l'échantillon traité jusqu'à l'analyse.

Des intercomparaisons sur le terrain entre plusieurs laboratoires travaillant sur le même fleuve ou des fleuves voisins sont également nécessaires si on veut s'assurer de la reproductibilité des techniques utilisées.

**(iv) Variabilité dans le temps**

Les tests de variabilité des concentrations dans le temps sont essentiels et doivent être conçus sur l'ensemble d'une étude préliminaire. La variabilité sur 24 heures devra être testée en crue (influence de la fluctuation du débit) et en étiage (cycles éventuels de rejet), tout d'abord sur des variables simples et peu coûteuses, telles que la conductivité,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ . Si leur variabilité est élevée, d'autres éléments doivent être pris en compte. La variabilité hebdomadaire est également à vérifier, s'il y a soupçon de cycles de rejet en amont (grosse station d'épuration, industrie, mine) ou si les manoeuvres de barrages induisent des cycles de débits connus, comme c'est le cas, fréquemment, dans les rivières de montagne. Les comportements des variables de qualité des eaux lors des crues sont à vérifier. Un minimum de 6 échantillons par crue est nécessaire pour définir l'existence et le sens de cycles éventuels et de relations concentrations-débits. Les fréquences d'échantillonnage sont présentées plus en détail à la section 3.5.

**(v) Relations concentration-débit**

L'établissement d'une relation générale concentration-débit, si elle existe, permet de mieux fixer la stratégie de surveillance, et aussi d'interpoler les concentrations à partir des débits entre deux prélèvements analysés. Pour les matières en suspension, et donc pour l'ensemble des polluants organiques, cette relation est essentielle, en particulier pour les débits les plus élevés supérieurs à 2 ou 3 fois la moyenne annuelle.

**(vi) Corrélations entre variables**

La phase préliminaire doit également permettre d'établir les multiples relations entre les différentes variables telles que :

- ions majeurs-conductivité
- relations entre ions majeurs
- COD-Nk filtré
- $\text{NO}_2\text{-NH}_4^+$
- MES-turbidité, etc...

**(vii) Analyses chimiques des MES**

Les études préliminaires doivent permettre d'établir les relations entre les teneurs en polluants particulaires (g/g) et les concentrations en MES. En général, les teneurs sont moins variables que les concentrations des polluants en solution (mg/l) et surtout que les concentrations des MES. Il est très rare que les teneurs en polluants augmentent avec les MES, par contre, on note des relations inverses, telles la relation COP-MES (Meybeck, 1982) ou Cd-MES sur le Danube (OERTEL, 1991), qui sont ensuite utilisables pour interpoler les valeurs sur la base des MES. Pour la plupart des micropolluants particulaires provenant de sources ponctuelles, on peut s'attendre à de telles dilutions.

**(viii) Inventaires des micropolluants organiques**

Ainsi que nous l'avons proposé, des inventaires les plus complets possibles de micropolluants organiques choisis tout d'abord dans les listes réglementaires, peuvent être effectués sur des échantillons en nombre restreint : 1 échantillon moyen de MES, 1 ou 2 échantillons filtrés (crue de printemps, étiage). Cet inventaire doit permettre de sélectionner les produits existants déjà en quantités appréciables, et sur lesquels l'effort de surveillance des flux sera fourni.

**(ix) Saisie des données et calculs de flux**

L'année préliminaire doit également permettre d'établir la chaîne de transmission, validation des saisies de données de terrain et de laboratoire. Il importe en particulier de **raccourcir considérablement la transmission des données de débit à la**

**station de mesure des flux** : idéalement, le débit doit être connu approximativement lors du prélèvement, ainsi que celui des jours précédents, et sa validation doit s'effectuer dans les mêmes délais que ceux de la transmission des analyses chimiques, soit de quelques semaines à 2 ou 3 mois maximum.

### **3.4 Adapter et stratifier l'échantillonnage**

Pour beaucoup de polluants, et en particulier pour les micropolluants, les préleveurs automatiques et les sondes en continu sont déconseillés actuellement, car encore inadaptés et/ou peu fiables. Des prélèvements ponctuels sont donc encore nécessaires.

**(i) Dans tous les cas, on doit tenir compte également de la variabilité des concentrations.** Il est donc nécessaire de tenir compte à la fois de la taille du bassin qui est un des facteurs conditionnant la variabilité des débits, et donc la durée des crues, et de la nature des régimes hydrologiques (moyennes mensuelles à long terme).

Nous présentons au tableau 5 des fréquences d'échantillonnage prenant en compte ces paramètres dans les études préliminaires. Elles doivent être comprises comme des valeurs guides pour établir des études préliminaires : ces fréquences pourront être réduites ultérieurement au vu des premiers résultats. Pour les petits bassins de type méditerranéen, la variabilité probable des nutriments est telle que, parfois, plusieurs prélèvements journaliers seront nécessaires en crue, justifiant ainsi un observateur permanent voire même un échantillonneur automatique. On remarquera que l'établissement des flux de catégories très diverses de polluants nécessite des stratégies très variées que nous avons ici réduites au nombre de 12.

**(ii) Les prélèvements en vue des flux polluants ne doivent pas être régulièrement répartis sur toute l'année, mais être proportionnels aux volumes écoulés pour les polluants dissous, et aux flux de MES pour les polluants particuliers.** Or, un échantillonnage opérationnel nécessite la détermination, à l'avance, des dates de sorties, cette contrainte habituelle très forte est donc à l'opposé d'une bonne surveillance des flux polluants. Il y a donc un moyen terme à trouver si on ne dispose pas sur place d'un préleveur manuel (ou automatique pour certaines variables).

Aussi, nous proposons ici d'établir à priori un plan d'échantillonnage proportionnel aux volumes mensuels moyens écoulés sur 10 ans, et aux flux de MES transportés durant la même période. La première distribution est facilement disponible. La seconde l'est beaucoup moins, mais peut être approchée par l'utilisation des données de MES antérieures même si elles sont entachées de sous-estimations systématiques (absence de prélèvements par des bouteilles horizontales, absence de profils verticaux, fréquences totalement inadaptées).

Tableau 6. Exemple de Stratégies d'échantillonnage de flux (nombre de prélèvements mensuels).  
Fleuve de 10 000 à 100 000 km<sup>2</sup>. Régime pluvial océanique.

(A), (E), (F) : sur la base de 24 échantillons annuels  
(B) Sur la base de 100 échantillons annuels  
(C) Sur la base de 12 échantillons annuels et de  
transversales dans la section mouillée  
(D) Sur la base de 12 échantillons annuels  
(G) données de base fournies par l'étude préliminaire

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>I - MATÉRIAUX EN SOLUTION</b>												
% volume annuel écoulé	12,5	15,8	11,7	10,8	8,3	5,8	3,3	2,5	2,5	5,0	11,7	11,1
Fréquence d'échantillonnage	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Ions majeurs (A)	3	4	3	3	2	1	0	1	0	1	3	3
COD, métaux dissous, micropoll. org. dissous												
<b>II - MATÉRIAUX PARTICULAIRES</b>												
% MES annuelles transportées	14	16	9	6	3	2	1	1	2	7	22	17
Fréquence d'échantillonnage (G)	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Mesure des MES (B)	14	16	9	6	3	2	1	1	2	7	22	17
(C)	(1)	(3)	(1)	(1)						(1)	(3)	(2)
Analyse des micropoll. part. (D)	1	2	1	1	1	0	1	0	0	1	2	2
COP (E)	2	4	2	2	1	1	1	1	1	2	4	3
Chloro A. (F)	0	1	0	2	4	4	4	4	3	1	0	1

Tableau 5. Fréquences optimum d'échantillonnage.  
Etudes préliminaires pour établir des flux polluants

(A) Type pluvial atlantique, pluvionival, glaciaire

(B) Type pluvial méditerranéen, nivo-pluvial de montagne

(C) Compte tenu d'une mesure quotidienne de conductivité

(D) Ces fréquences peuvent être diminuées par 2, si la turbidité est enregistrée en continu

(E) Pour établir une corrélation avec les MES (suppose un bilan précis des MES)

COD Carbone Organique Dissous

COP Carbone Organique Particulaire

Régime	< 1000 km <sup>2</sup>	1000-10000	10000-100000	>> 100000
Régime Réguliers (A) superficiels				
Régime Irréguliers (B) superficiels				
Conductivité, turbidité O <sub>2</sub> dissous	← Enregistrement en continu →			
Ions majeurs NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SiO <sub>2</sub> (C)	100 / an	52/an	24/an	12/an
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> , Nk	prélèvement automatique réfrigéré	104/an	52/an	24/an
COD	100 / an	52/an	24/an	12/an
MES Montée (D) Décrue (D) Etiages (D)	2/jour 1/jour 1/semaine	1/jour 1/2 jours 1/semaine	1/2journs 2/semaine 1/jour	2/semaine 1/semaine 1/15 jours
Chloro A mai-octobre nov. - avril	2/semaine 1/mois	2/semaine 1/mois	1/semaine 1/mois	1/semaine 1/mois
COP (E)	24	24	24	24
Métaux et micropolluants org. dissous (F)	52	24	24	24
Métaux et micropolluants org. particulaires (E)	24	24	24	12

On peut, par exemple, considérer la population des flux de MES instantanés sur la période connue (20 ans de surveillance pour la France). On considère des distributions des flux pour chaque mois. La variation relative des quartiles supérieurs de ces distributions doit être assez proche de celle des flux moyens mensuels.

Le tableau 6 représente un exemple d'échantillonnage proportionnel pour un fleuve théorique de taille moyenne sur la base de 24 échantillons annuels pour des polluants dissous, le COP et la chlorophylle "a", 100 pour les MES, et 12 pour les polluants particulaires. On note que la distribution des volumes écoulés et celle des flux de MES étant différente, celles des fréquences l'est aussi. Les quatre mois d'été représentent 6 % des flux particulaires et 15 % en volume d'eau écoulée, par contre, le mois de novembre, époque des premières crues très turbides, a un poids double pour les MES.

### **3.5 Obtenir les moyens humains**

La surveillance de la qualité des eaux devient un exercice de plus en plus complexe qui met en jeu un matériel coûteux, des techniques d'analyse chimique et de traitement des données de plus en plus sophistiquées (voir Chapman, 1992). Il est aussi souhaitable que, **pour la surveillance des micropolluants, les opérations de terrains soient effectuées par un personnel spécialisé qui ait conscience des risques présents de contamination.**

Ce n'est possible que si les équipes de laboratoires en charge des analyses correspondantes sont également chargées du nettoyage des flacons, des engins de prélèvements, etc... et même de certains traitements de prélèvements sur le terrain (par exemple, pour les métaux dissous).

Enfin, l'équipe de surveillance de la qualité des eaux en particulier des flux polluants, doit être la même qui élabore la stratégie, valide les données avec le ou les laboratoires, décide des modes de calcul des flux et interprète les données sans délais.

Cette étude nous amène aux conclusions générales suivantes :

- 1- L'établissement des flux polluants n'est pas une science exacte définie dans les manuels mais un ensemble de choix à faire suivant des objectifs fixés (hiérarchie des polluants notamment), suivant les conditions locales de variation des débits et des polluants, et suivant les moyens disponibles.**
- 2 - D'après les études antérieures dans nos types de climat, au moins les 2/3 des flux polluants dissous passent en 1/4 du temps. Cette proportion s'aggrave pour les flux particulaires (jusqu'à 90 % des flux, et plus, en 1/4 du temps).**
- 3 - Chaque type de polluant nécessite une stratégie différenciée de surveillance des flux pour définir :**

- 4 - Des études préliminaires d'une année au minimum sont nécessaires pour tester les matériels, les méthodes et pour optimiser la surveillance ultérieure.
- 5 - Les flux polluants de matières en suspension, vecteurs essentiels de la pollution, doivent être connus avec exactitude, ce qui nécessite une surveillance spécifique.
- 6 - L'établissement de tendances requiert une surveillance à long terme, de l'ordre d'une dizaine d'années minimum.
- 7 - Le suivi des micropolluants en solution est une opération très délicate qui demande des moyens techniques et humains particuliers ; elle doit donc être abandonnée, en l'absence de ceux-ci.
- 8 - La précision des débits, en particulier de ceux dépassant deux ou trois fois les débits moyens annuels, limite celle des flux polluants.
- 9 - Des modes inadaptés de calculs des flux peuvent introduire des biais systématiques, par exemple une sous-estimation des flux particuliers.
- 10 - L'estimation des flux polluants est donc une activité spécifique et coûteuse qu'il n'est pas possible d'effectuer avec des moyens réduits (type RNB par exemple). Le réseau des stations de flux sera donc beaucoup moins dense (10 à 100 fois) que tout autre réseau. Le prix unitaire de la gestion d'une station de flux pourra être de l'ordre de 10 fois supérieur à celui d'une station classique (type RNB).

## REMERCIEMENTS

Cette synthèse est un extrait du Chapitre 9 du rapport complet de l'étude effectuée pour les six Agences de l'Eau françaises

Les travaux des autres participants à ce rapport (I. Bouloubassi, Huang Wei Wen, A. Toma et P. Hubert) ont également influencé ces conclusions.

## BIBLIOGRAPHIE

- BALLAND P, VARET G., 1979** Application des relations concentration-débit à l'estimation quantitative des apports en éléments fertilisants par le réseau hydrographique superficiel des lacs d'Annecy et du Bourget (France).
- in Colloque sur les lacs naturels de Chambéry, Ass. Française de Limnologie et Ass. Française pour la Protection des Eaux ,  
Thème 1,30 p.
- BELLAMIE R et al, 1988** Rapport de l'étude des pollutions d'origine diffuse dans le bassin lémanique. Comm. Inter. pour la protection des eaux du Léman contre la pollution, CH-1000 Lausanne, 120 p.
- BOMBLED B., COSSA D, 1992** Etude pilote des apports en contaminants par la Seine : niveaux de contamination, variations saisonnières et flux d'éléments traces à Poses en 1990 et 1991. Rapport interne IFREMER, Labo. Chimie des Contaminants et Modélisation, DEL/CCM, sept 1992, 34 p., annexes.
- BURRUS D., THOMAS R.L, DOMINIK B., VERNET JP, et DOMINIK, J., 1990**
- Characteristic of suspended sediment in the upper Rhône river, Switzerland, including the particulate forms of phosphorus.
- Hydrological Processes, Vol. 4, pp. 85-98.
- BURRUS D., THOMAS R.L, DOMINIK J., VERNET JP, 1988**
- Recovery and concentration of suspended solids in the Upper Rhône River by continuous flow centrifugation.
- Hydrological Processes, Vol 3, pp 65-74.
1989. Characteristics of suspended sediment in the Upper Rhône River, Switzerland, including the particulate formes of phosphorus.
- Hydrological Processes, Vol 4, pp 85-98.
- CIPEL**
- Commission Internationale de Protection des Eaux du Léman, Rapports annuels, Av. de Chailly, Lausanne.
- ETCHANCHUD., 1988** Géochimie des eaux du bassin de la Garonne. Transfert de matières dissoutes et particulaires vers l'Océan Atlantique. Thèse Univ. P. Sabatier, 178 p.
- FAVARGER P.Y., VERNET J.P, 1989.**

Pollution du Rhône par le mercure : un suivi de 17 ans . Cahier de la Fac. des Sci., Genève, 19, pp 35-44.

**GRECO-LACS 1987**                    Méthodologie de létablissement des bilans d'apports en éléments nutritifs aux systèmes lacustres.

Rapport final au Ministère de l'environnement, M. Meybeck coordinateur, Labo. Géol ENS Paris.

**HUBERT P., ADAMSKI M., MEYBECK M., 1988.**

Simulation de stratégies d'échantillonnage ; application à la Loire et à la Noé Sèche. IV journées Hydrologiques ORSTOM Montpellier, sept. 1988. Colloques et séminaires ORSTOM, Paris, pp 177-195.

**KATTAN Z. 1989**                    Géochimie et hydrologie des eaux fluviales des bassins de la Moselle et de la Mossig. Transport dissous et particulaires, cycles biogéochimiques des éléments. Thèse, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 218 p

**MEADE H, et PARKER R.S 1985.**

Sediments in rivers of the United States.  
National Water Summary U.S Geol. Survey Water-Supply Paper N°2275, pp 49-60.

**MEADE.H, STEVENS H.H, 1990**

Strategies and equipment for sampling suspended sediment ans associated toxic chemicals in large rivers - with emphasis on the Mississippi river. Sci. Total. Envir., 97-98, pp 125-135.

**MEYBECK M. 1970**                    Bilan hydrochimique et géochimique du Lac Léman. Thèse IIIème cycle, Fac. Sci. Paris, 245 p.

1982. Carbon, nitrogen, and Phosphorus transport by world rivers ?  
Américan Journal of Science, Vol. 282, pp 401-450.

1992. An introduction to water quality and Stratégies for water quality assessments. in D. Chapman ED., Water Quality Assessments, Chapman and Hall, London, pp 1-50.

**MEYBECK M, CHAPMAN D., HELMER R (eds.), 1989**

Global Freshwater Quality, A First Assessment.  
Balckwell Reference; Oxford, 306 p.

**MEYBECK M., BOULOUBASSI I., HUANG WEI WEN, HUBERT P., PASCO A., RAGU A, TOMA A. 1992**

Etablissement des flux polluants. Rapport interagences, Laboratoire de Géologie appliquée, Naturalia Biologia , 9 chapitres, annexes, 500 p.

**OERTEL N., 1991**

Heavyt metals in the river Danube water, suspended matter, periphyton . Verh. int. verein. Limnol., 24, pp 1961-1964.

**RAKOCZI L., 1977**

The significance of infrequent, high suspended sediment concentrations in the estimation of annual sediment transport. Int. Ass. Hydrol. Sci Publ., 122 , pp 19-25.

**RAMIREZ A., ROSE A.W., BIFANO C., 1988.**

Transport of carbon and nutrients by the Tuy River, Venezuela. Mitt. Geol. Paleont. Inst., Univ. Hambourg, 66, pp. 137-146.

**THOMAS R.L., MEYBECK M., 1992**

The use of particulate material. in Water Quality and Assessments, D. Chapman ed., Chapman and Hall, London, pp 121-170.

**WALLING D.E, 1977**

Limitations of the rating curve technique for estimating suspended sediment loads with particular reference to British rivers. Int. Ass. Sci. Hdyrol. Publ., 122, pp 34-48.

**WALLING D.E, WEBB B.W., 1983**

Patterns of sediment yeld.  
In : Background to paleohydrology, ed. Gregory K.J., John Wiley et Sons Ltd, Chap. 4, pp 69-100.

1985 . Estimating the discharge of contaminants to coastal waters by rivers : somme cautionary comments. Marine Pollution Bull., Vol. 16, N°12 , pp 488-492.

1987. Material Transport by the world's rivers : evolving perspectives. in Water for the future : hydrology in Perspective. Proceedings of the Rome Symposium; April 1987. IAHS Publ, n°164, pp 319-329.

**ZHANG L, 1988**

Evaluation of phosphorus loadings to lake Geneva from the Venoge and other rivers, Switzerland.  
Ph.D dissertation, University of Geneva, Institute F.-A. Forel, Versoix, Switzerland October 31, 1988, 96 p.