

FLUX PARTICULAIRES DE QUELQUES NUTRIMENTS
ET METAUX DANS LES SUSPENSIONS DU RHONE
PRES DE SON EMBOUCHURE DANS LE LEMAN

Campagne 1989

PAR

PIERRE-YVES FAVARGER, SERGE SANTIAGO ET JEAN-PIERRE VERNET

INSTITUT F.-A. FOREL, VERSOIX

RESUME

Les flux annuel et saisonniers des sédiments en suspension dans le Rhône, ainsi que de nombreux éléments chimiques qui leur sont liés, ont été étudiés.

En 1989, la quantité moyenne de matière particulaire fut modérée comparée à celle des trois années précédentes. Quelques crues intenses, quoique de faible durée, se sont produites en période de hautes eaux, sans atteindre l'ampleur de celles de la période des hautes eaux de 1986 et 1987, ou celles de la période des basses eaux de 1988.

Le flux annuel de phosphore sous forme facilement disponible (PINA, soit phosphore inorganique non apatitique) continue à diminuer : étant passé de 69 tonnes en 1987 à 55 l'année suivante, il n'est plus que de 36 tonnes en 1989. La proportion de cette forme par rapport au phosphore total est toujours faible, et a peu varié depuis 1987 (respectivement 6.6, 7.6 et 6.1 %). L'examen détaillé des résultats obtenus montrent que la présence du PINA est liée à l'activité humaine.

Contrairement à ceux du carbone organique, les flux d'azote organique ont très fortement baissé en 1989; ainsi, le rapport C/N atteint en période de hautes eaux la valeur très élevée de 41, ce qui indique que le ruissellement et les crues de cette période ont, malgré leurs durées relativement faibles, provoqué une érosion exceptionnelle des sols anciens.

En ce qui concerne le mercure, la succession des flux annuels 1986-1989 est la suivante : 109 - 285 - 64 - 110 kg. Quant à sa concentration dans la matière en suspension, elle a doublé par rapport à 1988.

Par rapport à ces chiffres, ceux du cadmium sont stables (tendance à la diminution).

L'arsenic, analysé en 1989 pour la première fois, présente un flux annuel considérable de 8 tonnes. La concentration de cet élément est trois fois plus élevée en période de basses eaux qu'en période de hautes eaux, et cette anomalie suggère que les concentrations élevées puissent être dues à des causes non naturelles. Il conviendrait donc de déterminer la teneur naturelle des sédiments en arsenic afin d'en chiffrer le taux de contamination et enfin de préciser l'origine géographique d'éventuels rejets.

1. INTRODUCTION

Rappelons que l'eutrophisation du Léman, qui a pour conséquence l'appauvrissement progressif de ses eaux profondes en oxygène, résulte principalement d'un excès de phosphore. Cet excès provoque un développement exagéré de certains organismes (notamment les différentes formes de phytoplancton) et un déséquilibre écologique du milieu lacustre.

Seul le phosphore biodisponible, c'est-à-dire assimilable par les organismes vivants, joue un rôle dans les mécanismes de l'eutrophisation. Le degré de biodisponibilité des différentes formes de phosphore que l'on rencontre dans l'eau et les sédiments peut être mis en évidence par des techniques particulières d'analyse. Ainsi, pour le sédiment, on distingue trois formes principales (WILLIAMS et al., 1976; BURRUS, 1984) qui sont, par ordre d'importance :

• **PINA, phosphore inorganique non-apatitique**

Cette forme est extrêmement importante car très réactive et facilement utilisable par les organismes vivants (biodisponibilité élevée). Son origine est surtout liée aux activités humaines.

• **POP, phosphore organique**

La biodisponibilité de cette forme est faible, située entre celle des deux autres formes. En effet, la matière organique particulière est constituée pour l'essentiel de résidus (matière morte) peu solubles et dans lesquels le phosphore a atteint son niveau d'énergie le plus bas.

• **PIA, phosphore apatitique (inorganique)**

Cette forme, contenue dans le minéral apatite, est la plus importante en quantité mais présente une biodisponibilité quasi-nulle. Elle provient essentiellement de l'érosion des roches cristallines (origine détritique naturelle) et ne joue aucun rôle dans les phénomènes d'eutrophisation par le fait de sa solubilité extrêmement réduite.

Les études de modélisation du cycle du phosphore dans le Léman effectuées récemment (FAHRNI et RAPIN, 1985a, 1985b et 1986; BURGMAN et ARDITI, 1989) se sont heurtées à quelques difficultés dues à certaines lacunes dans les données disponibles, lacunes que les études sur le phosphore particulaire dans les apports devraient contribuer à combler, permettant ainsi d'améliorer la précision des modèles.

Ce travail poursuit l'étude commencée en 1986. Il se propose de déterminer la composition chimique des flux solides (suspensions) charriés par le Rhône en 1989, en utilisant un nombre restreint mais suffisant d'échantillons de sédiment obtenu par pompage et centrifugation de l'eau brute. Les résultats de ces analyses sont mis en relation avec la teneur de l'eau en matière solide (en suspension dans l'eau), obtenue toutes les deux semaines à partir de l'échantillonneur automatique de la Porte du Scex.

Outre ceux du phosphore et de ses formes, nous avons calculé les flux de mercure et de cadmium, auxquels ont été ajoutés ceux de huit éléments toxiques ou indicateurs de pollution : chrome, cuivre, plomb, zinc, étain, antimoine, sélénium et arsenic.

2. METHODOLOGIE

Les analyses chimiques ont été effectuées sur sept échantillons de sédiments en suspension prélevés au cours des deux régimes caractéristiques du Rhône : hautes eaux et basses eaux. La composition des matières en suspension variant peu à l'intérieur de chacun de ces deux groupes saisonniers (BURRUS, 1984), on peut, en extrapolant les concentrations sur les périodes adjacentes aux dates de prélèvement, estimer le flux annuel et les flux saisonniers pour chaque élément ou forme chimique.

La figure 1 illustre les variations des débits solides et liquides, ainsi que des concentrations particulières tout au long de l'année. Le tableau 1 récapitule les dates des hautes eaux pour les quatre dernières années :

TABLEAU 1 - Régimes des hautes eaux

Année	début	fin	nombre de semaines
1986	12 mai	24 septembre	20
1987	26 mai	26 octobre	22
1988	26 avril	12 septembre	20
1989	8 mai	11 septembre	18

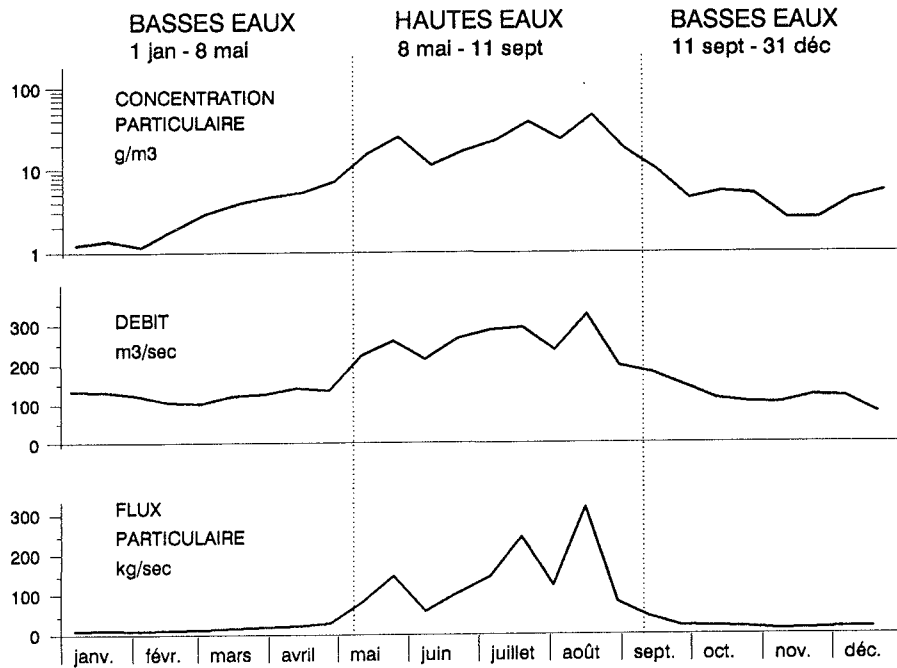


FIGURE 1 : DEBIT MOYEN, CONCENTRATION ET FLUX DE MATIERE EN SUSPENSION DANS LE RHÔNE AMONT À SON EMBOUCHURE EN 1989

Pour chacun des échantillons, 700 à 1'400 litres d'eau ont été prélevés par pompage et les suspensions isolées par centrifugation en continu. Pour les analyses chimiques effectuées sur une partie de l'échantillon, la fraction fine inférieure à 63 μm a été isolée par tamisage en laboratoire, puis séchée par lyophilisation. Ces analyses sont les suivantes :

- Formes du phosphore par colorimétrie (WILLIAMS et al., 1976) : PINA, POP et PIA (voir ci-dessus pour la signification de ces formes).
- Carbone inorganique et organique (titrations acide-base et par oxydo-réduction).
- Azote organique (KJELDAHL, 1883).
- Mercure et cadmium par absorption atomique.
- Autres éléments (chrome, cuivre, plomb, zinc, étain, antimoine, sélénium, arsenic) par ICP (émission atomique en plasma inductif) avec, pour les quatre derniers, générateur d'hydrures.

Le flux de sédiment en suspension transitant par l'embouchure est estimé avec, d'une part, les débits journaliers moyens mesurés à la Porte du Scex par le Service Hydrologique et Géologique National, et d'autre part les concentrations en matière particulaire dans l'eau, déterminées après filtration à l'Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux (EAWAG). Ces concentrations proviennent d'échantillons hebdomadaires, regroupés par deux semaines (26 valeurs), l'eau brute étant prélevée en continu par l'échantillonneur automatique assujéti au débit (Porte du Scex-programme NADUF).

Par ailleurs, les résultats d'analyses pour les sept échantillons obtenus par pompage/centrifugation ont été utilisés pour calculer les flux par deux semaines selon le schéma de la figure 2 (flèches horizontales). Ce report tient compte, autant qu'il est possible, des deux régimes distincts de basses et de hautes eaux. Le report des concentrations en mg/kg sur les quinzaines proches des sept dates de pompage permet de calculer le flux annuel et les flux saisonniers pour chaque élément ou forme chimique.

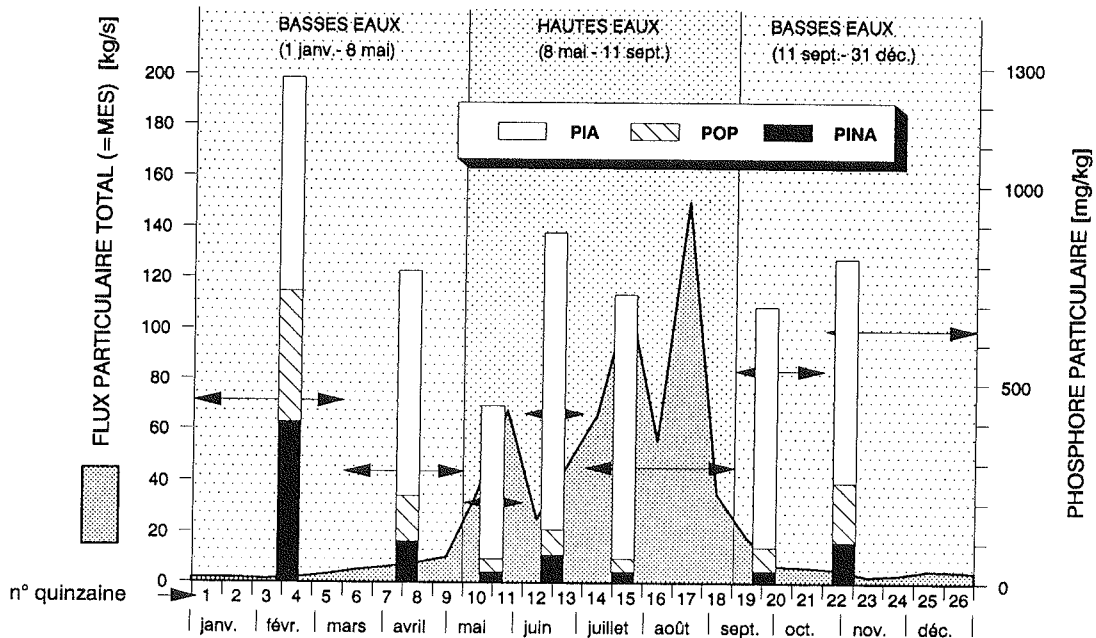


FIGURE 2 : CALCUL DU FLUX EN PHOSPHORE PARTICULAIRE EN 1989.
SCHEMA D'APPLICATION AUX TROIS FORMES (PINA, POP ET PIA)

3. RESULTATS

Le tableau 2 présente l'estimation des différents flux et concentrations. Les chiffres de "flux annuels" (totaux pour l'année et chacune des périodes basses eaux - hautes eaux) ont été obtenus en additionnant les flux des périodes de deux semaines, et ceux de "flux, moyenne quotidienne" (moyennes par jour pour les périodes considérées) en divisant les précédents par le nombre de jours. Les chiffres des années 1986 à 1988 ont été rappelés. Les figure 3 et 4 donnent une représentation graphique de l'évolution des flux depuis 1986.

3.1 MATIERE PARTICULAIRE (Fig. 1, tabl. 2)

En 1989 la quantité moyenne de matière particulaire fut inférieure ou très inférieure à celle des trois années précédentes. Quelques crues intenses, quoique de faible durée, se sont produites en période de hautes eaux, sans atteindre l'ampleur de celles de 1986-1987 (hautes eaux) ou de 1988 (basses eaux). La répartition entre les flux de basses et de hautes eaux peut être considérée comme normale.

3.2 PHOSPHORE (Fig. 2 et 3, tabl. 2)

Les concentrations en PIA, phosphore apatitique détritique provenant de l'érosion des roches, restent relativement constantes (entre 451 et 709 mg/kg pour les quatre années, quelle que soit la saison), et les flux varient fortement, tout comme ceux de la matière particulaire à laquelle ils sont fortement liés (voir tableau 3). Rappelons que cette forme inerte du phosphore ne joue aucun rôle dans l'eutrophisation du lac.

TABLEAU 2 - Flux et concentrations liés à la matière particulaire mesurés à l'embouchure. Chiffres annuels, basses eaux et hautes-eaux ensemble (B+H) et chiffres saisonniers (Basses, Hautes eaux)

REGIME DES EAUX:	FLUX ANNUELS (TONNES CUMULEES)			FLUX, MOYENNES QUOTIDIENNES (kg/j)			CONCENTRATIONS MOYENNES (mg/kg)			
	B+H	BASSES	HAUTES	B+H	BASSES	HAUTES	B+H	BAS-SES	HAU-TES	
MATIERE PARTICULAIRE	1986 1,432,000 1987 1,600,000 1988 973,000 1989 826,000	114,000 133,000 302,000 109,000	1,318,000 1,463,000 671,000 717,000	3,920,000 4,370,000 2,660,000 2,260,000	506,000 631,000 1,340,000 455,000	9,417,000 9,500,000 4,793,000 5,693,000				
PINA	1986 1987 1988 1989	54 69 55 36	23 14 22 13	31 55 32 23	149 189 149 98	102 65 99 53	225 360 230 184	38 43 56 43	201 103 74 117	24 38 48 32
POP	1986 1987 1988 1989	83 144 48 43	26 32 22 14	57 112 26 29	227 394 132 116	117 152 96 58	404 725 189 227	58 90 50 51	231 241 72 128	43 76 39 40
PIA	1986 1987 1988 1989	758 839 612 513	54 69 136 63	703 770 476 450	2076 2298 1672 1405	242 325 603 263	5023 5001 3397 3572	529 525 629 621	478 515 451 577	533 526 709 627
CARBONE ORGANIQUE	1986 1987 1988 1989	11600 22900 5790 4190	3230 4470 2440 1240	8370 18400 3350 2940	31800 62800 15800 11500	14400 21200 10800 5200	59800 119800 23900 23300	8100 14400 5940 5070	28410 33600 8060 11420	6350 12600 4990 4100
AZOTE TOTAL ou ORGANIQUE	1986 1987 1988 1989	799 889 475 150	312 295 199 79	487 593 277 72	2189 2434 1299 412	1388 1399 880 329	3475 3853 1975 569	558 557 488 182	2740 2220 658 722	369 406 412 100
MERCURE (Hg)	1986 1987 1988 1989	0.11 0.28 0.06 0.11	0.04 0.04 0.03 0.02	0.07 0.24 0.03 0.09	0.30 0.78 0.17 0.30	0.16 0.19 0.15 0.09	0.52 1.59 0.22 0.69	0.08 0.18 0.07 0.13	0.32 0.30 0.11 0.21	0.06 0.17 0.05 0.12
CADMIUM (Cd)	1986 1987 1988 1989	0.28 0.24 0.29 0.16	0.05 0.02 0.08 0.03	0.22 0.22 0.21 0.13	0.76 0.65 0.79 0.44	0.24 0.10 0.34 0.12	1.60 1.40 1.51 1.04	0.19 0.15 0.30 0.19	0.47 0.16 0.25 0.26	0.17 0.15 0.32 0.18
CHROME (Cr)	1986 1987 1988 1989	179 194 100 49	19 18 31 9	160 176 69 40	490 532 274 134	84 85 138 36	1142 1143 493 320	125 122 103 59	167 135 103 79	121 120 103 56
CUIVRE (Cu)	1986 1987 1988 1989	55.4 60.1 27.8 15.0	8.7 8.6 9.3 3.0	46.7 51.5 18.5 12.0	152 165 76 41	39 41 41 13	333 334 132 95	39 38 29 18	77 65 31 28	35 35 27 17
PLOMB (Pb)	1986 1987 1988 1989	42 67 47 57	7 9 11 11	36 57 36 46	116 183 129 155	31 44 50 45	254 373 255 364	30 42 48 69	60 69 38 99	27 39 53 64
ZINC (Zn)	1986 1987 1988 1989	198 264 107 130	33 31 33 19	165 233 74 111	543 724 291 355	146 148 146 78	1182 1514 526 881	138 166 109 157	289 234 109 171	125 159 110 155
ETAIN (Sn)	1989	3.91	0.80	3.11	10.7	3.4	24.7	4.74	7.37	4.34
ANTIMOINE (Sb)	1989	0.98	0.27	0.70	2.7	1.1	5.6	1.18	2.52	0.98
SELENIUM (Se)	1989	0.18	0.04	0.14	0.5	0.2	1.1	0.22	0.35	0.20
ARSENIC (As)	1989	8.03	2.31	5.71	22.0	9.7	45.4	9.72	21.26	7.97

LEGENDE: PINA: PHOSPHORE BIODISPONIBLE
POP: PHOSPHORE ORGANIQUE, PEU MOBILE
PIA: PHOSPHORE DETRITIQUE INSOLUBLE

TABLEAU 3 - Rapports des flux saisonniers
(hautes eaux)/(basses eaux) pour la
matière particulaire et les formes du phosphore

	1986	1987	1988	1989
M. particulaire	18.6	15.1	3.6	12.5
PIA	20.8	15.4	5.6	13.6
PINA	2.2	5.5	2.3	3.5
POP	3.5	4.8	2.0	3.9

Pour le PINA (phosphore inorganique non apatitique, forme la plus potentiellement disponible pour les algues), la situation est différente. Comme le montre le tableau 3, les flux quotidiens varient beaucoup moins entre les saisons. Cela est dû au caractère essentiellement artificiel de cette forme du phosphore, produite surtout par les diverses activités de l'homme contrairement au PIA dont l'origine est naturelle.

On constate que le flux de PINA continue à diminuer (figure 3).

Quant à la proportion de PINA par rapport au phosphore particulaire total, elle est toujours faible.

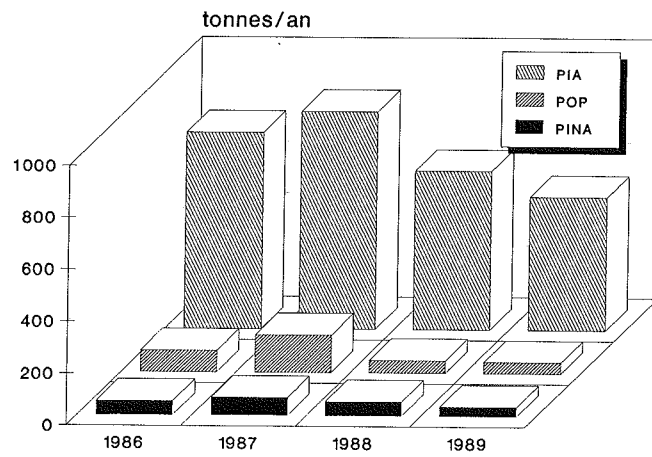
Les chiffres concernant le POP, phosphore organique moyennement mobile, sont du même ordre que ceux du PINA.

3.3 CARBONE ET AZOTE ORGANIQUES (Fig. 3, tabl. 2)

Les flux de carbone organique sont similaires à ceux de 1988. L'azote organique diminue par contre fortement et les concentrations mesurées en hautes eaux sont extrêmement faibles. Ainsi, le rapport C/N atteint en hautes eaux la valeur record de 41 (contre 12, 31 et 17 pour les mêmes périodes de 1988, 1987 et 1986).

Il est à noter que le rapport C/N est souvent utilisé dans les lacs pour déterminer l'origine autochtone ou allochtone des matières organiques, un rapport élevé révélant en principe une origine allochtone. Ainsi, MEYBECK (1985) admet une valeur de 10 pour le rapport C/N moyen dans les rivières, des chiffres inférieurs étant généralement rencontrés dans les lacs (GANDAIS, 1989). De façon plus globale, on peut dire qu'un rapport C/N élevé traduit un caractère relativement ancien ou fossile de la matière organique, la minéralisation de l'azote ayant lieu plus rapidement que celle du carbone. On peut donc penser que, malgré leur brièveté relative, les crues de 1989 ont été assez violentes pour éroder des matières organiques anciennes.

FLUX ANNUELS DE PHOSPHORE



FLUX ANNUELS DE N ET C ORGANIQUES

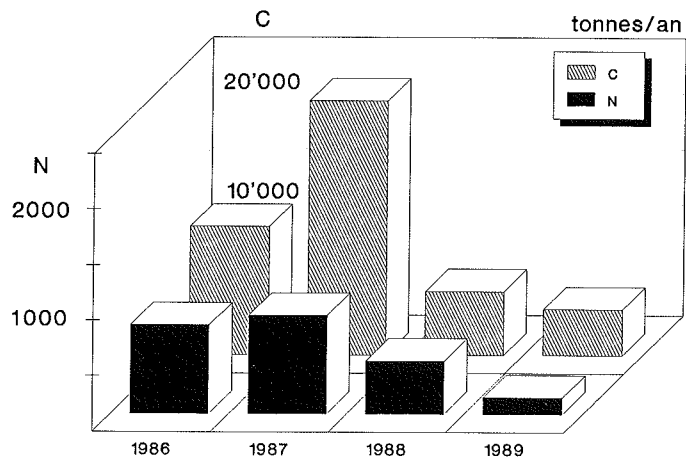


FIGURE 3 : FLUX ANNUELS DE NUTRIMENTS LIES AUX SUSPENSIONS

3.4 MERCURE ET CADMIUM (Fig. 4, tabl. 2)

En ce qui concerne le mercure, la succession des flux annuels 1986-1989 est la suivante : 109 - 285 - 64 - 110 kg. Quant à la concentration de ce métal dans la phase particulaire, elle a augmenté d'un facteur 2.0 par rapport à 1988, mais n'excède que de 23 % la moyenne 1986-1988. Les concentrations basses-eaux sont toujours sensiblement plus élevées que celles des hautes eaux (0.21 et 0.12 mg/kg) ce qui est une indication de l'origine non naturelle de ce métal dans le Rhône.

Le flux annuel du cadmium est relativement stable, avec une tendance à la diminution.

3.5 PLOMB, CHROME, CUIVRE ET ZINC (Fig. 4, tabl. 2)

Le plomb présente une légère augmentation de flux et les trois autres éléments pour lesquels nous disposons de valeurs pour la période 1986-1988 (chrome, cuivre et zinc) sont stables ou diminuent.

3.6 ETAIN, ANTIMOINE, SELENIUM ET ARSENIC (Tabl. 2)

En 1989 pour la première fois, nous avons pu intégrer à cette étude ces quatre éléments analysés par ICP-hydrures. Les teneurs en arsenic paraissent particulièrement importantes avec un flux annuel de 8 tonnes. Les concentrations 3 fois plus élevées en période de basses eaux indiqueraient une origine humaine.

Malheureusement, le nombre actuel de résultats pour l'arsenic se rapportant à des échantillons pour lesquels toute contamination est exclue est extrêmement faible et la teneur naturelle reste donc incertaine. Il est en outre possible à la rigueur que cette teneur ne soit pas uniforme dans l'ensemble du Rhône amont, auquel cas l'écart entre les concentrations basses-eaux/hautes-eaux pourrait, tout de même, avoir une composante naturelle.

Ce sujet mériterait d'être approfondi tout d'abord par une étude de la répartition géographique des teneurs des sédiments du lit du Rhône et de ses affluents que nous prélevons actuellement dans le cadre du plan intercantonal, puis si nécessaire par l'examen de sédiments de rivières prélevés les années précédentes sur l'ensemble du bassin et sur des carottes du Léman.

De toxicité bien moindre, l'étain et l'antimoine semblent également d'origine partiellement humaine, alors que la présence du sélénium, dont les teneurs très basses semblent constantes, serait entièrement naturelle.

Pour ces trois derniers éléments, le nombre d'analyses sur des sédiments non contaminés est, comme pour l'arsenic, encore insuffisant pour que l'on puisse en connaître les teneurs naturelles ou chiffrer les éventuels taux de contamination.

4. CONCLUSIONS

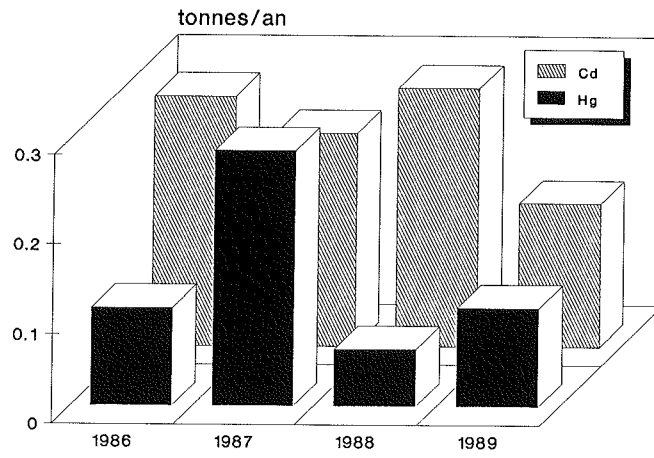
Cette quatrième année d'étude des flux chimiques liés aux particules en suspension dans le Rhône a permis de confirmer l'origine liée à l'activité humaine du phosphore biodisponible et du mercure.

L'utilisation d'une nouvelle méthode d'analyse a permis de révéler des flux importants en arsenic. Leur impact éventuel sur l'environnement ainsi que leur cause et leur origine géographique exacts restent à définir. Une étude plus étoffée de cette question semble s'imposer, et nous espérons trouver les moyens pour la réaliser.

L'ensemble des résultats reflète les différences importantes existant entre 1986, 1987, 1988 et 1989, cette dernière année pouvant seule être considérée comme "année sèche" du point de vue hydrologique.

Ces résultats sont une contribution à l'étude générale du Léman et de son bassin versant. Elle permettra de mieux connaître les problèmes liés à l'évolution de ce lac qui constitue, rappelons le, la plus grande masse d'eau douce d'Europe occidentale.

FLUX ANNUELS DE Hg et Cd



FLUX ANNUELS DE Cu, Pb, Cr ET Zn

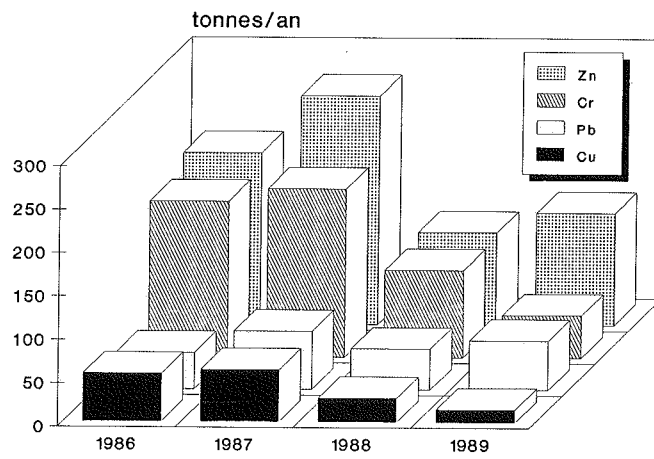


FIGURE 4 : FLUX ANNUELS DE METAUX LIES AUX SUSPENSIONS

BIBLIOGRAPHIE

- BURGMAN, M.A. et ARDITI, R. (1989) : Modélisation du cycle du phosphore.
Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1988, 107-138.
- BURRUS, D. (1984) : Contribution à l'étude du transport du phosphore dans le Rhône alpin.
Thèse No 2135, Fac. Sci., Univ. Genève, 100 p.
- FAHRNI, H.P. et RAPIN, F., (1985a) : Modélisation du cycle du phosphore dans le Léman.
(Rapport intermédiaire, septembre 1984)
Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1984, 207-233.
- FAHRNI, H.P. et RAPIN, F. (1985b) : Modélisation du cycle du phosphore dans le Léman.
(Rapport final). Rapp. interne Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut.,
Lausanne, 90 p.
- FAHRNI, H.P. et RAPIN, F. (1986) : Modélisation du cycle du phosphore dans le Léman.
Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1985, 153-189.
- GANDAIS, V. (1989) : Origines et variations spatio-temporelles des flux de matière particulaire dans le Léman. Thèse No 2345, Fac. Sci., Univ. Genève, 104 p.
- KJELDAHL, J. (1883) : A new method for the determination of nitrogen in organic matter.
Z. Anal. Chem., 22, 336.
- MEYBECK, M. (1985) : Carbon, Nitrogen and Phosphorus Transport by World Rivers.
American J. Sci., 282/4, 401-450.
- WILLIAMS, J.D., JAQUET, J.-M. et THOMAS, R.L. (1976) : Forms of Phosphorus in the Surficial Sediments of Lake Erie. J. Fish. Res. Board Canada, 33, 462-465.