

EVALUATION DES APPORTS FLUVIATILES DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE.

AVOINE J. *

INTRODUCTION

L'activité économique et l'urbanisation concentrées sur le bassin versant de la Seine sont à l'origine d'importants rejets s'ajoutant aux apports naturels. Un suivi régulier a permis d'estimer pour ce fleuve, principal exutoire de la baie de Seine, les apports en termes de débit liquide, de charge solide et de pollution métallique. Cette investigation s'avère indispensable, notamment pour l'établissement de bilans sédimentaires permettant d'expliquer l'origine des matériaux déposés dans l'estuaire de la Seine et pour le calcul du temps de résidence des polluants.

1 - DEBIT LIQUIDE et DEBIT SOLIDE

1.1. - Débit liquide

Les mesures sont effectuées au barrage de Poses, 160 km en amont de l'embouchure. L'examen des débits moyens calculés annuellement de 1960 à 1984 montre des variations notables d'une année sur l'autre (fig. 1). Durant cette période, la moyenne annuelle a été de 435 m³/s, avec des extrêmes de 240 m³/s en 1964 et de 625 m³/s en 1983. En régime tempéré humide, le débit liquide maximal s'observe en période hivernale et printanière, les crues se produisant généralement entre décembre et avril. Les débits instantanés dépassent exceptionnellement 2.000 m³/s lors des crues et sont de l'ordre de 100 m³/s en étiage (fig. 2 A).

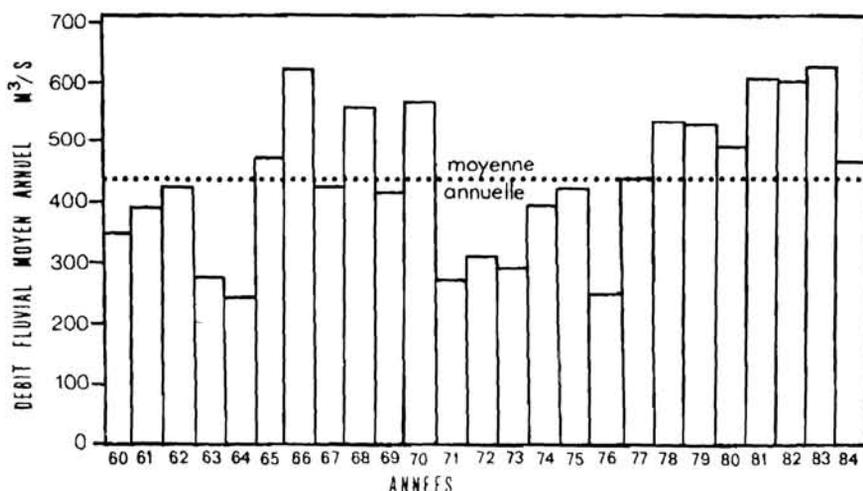


Fig. 1. Débit liquide moyen mesuré à Poses de 1960 à 1984.

* Laboratoire de Géologie Marine, Université de Caen, 14032 CAEN CEDEX.

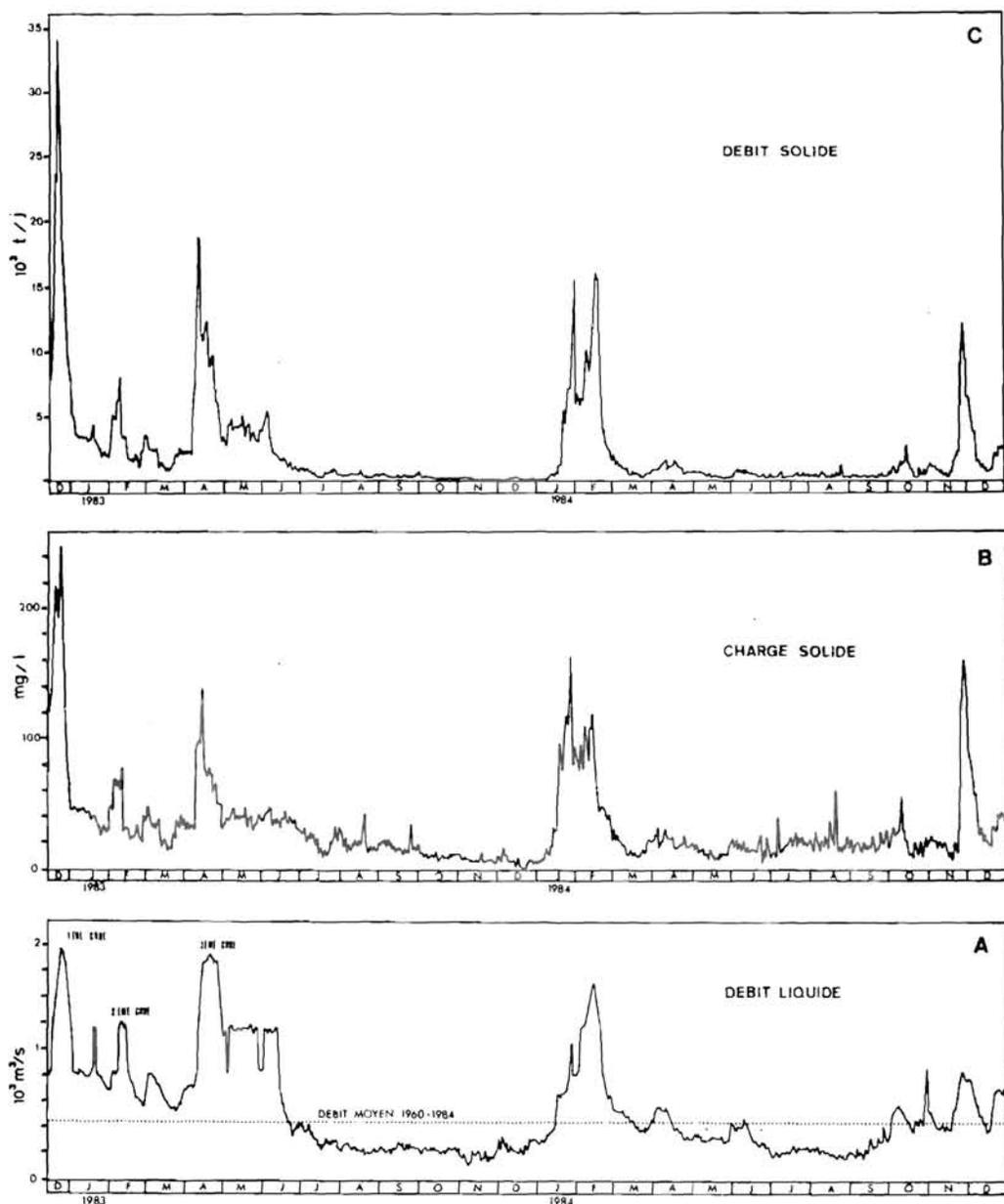


Fig. 2.- Evolution journalière à Poses du débit liquide (A), de la concentration en M.E.S. (B) et des apports solides (C) de décembre 1982 à décembre 1984.

1.2. - Charge solide

Dans les rivières soumises à un climat tempéré, les apports sédimentaires se font essentiellement en suspension, le charriage restant très subordonné (Müller et Förstner, 1968). De nombreux travaux ont montré que la charge solide est généralement bien corrélée avec le débit fluvial, le transport sédimentaire étant beaucoup plus important en crue qu'en étiage (Al - Jabbari et al, 1980 ; Milliman, 1981 ; Müller et Förstner, 1968) : Dans le cas de la Seine, une précédente étude, basée sur des données incomplètes, avait montré une corrélation identique (Avoine, 1981). Un suivi quotidien entrepris au niveau du déversoir du barrage de Poses a permis de préciser cette relation. Le choix du

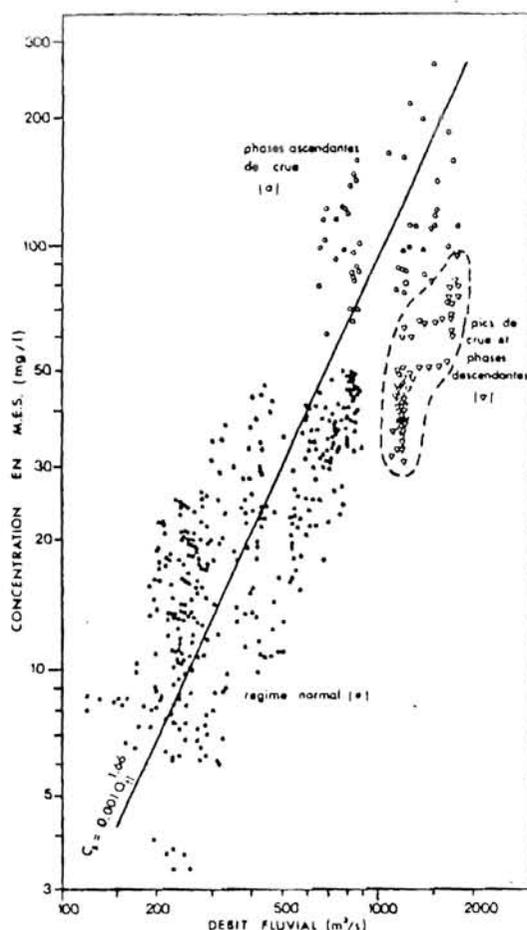


Fig. 3. Relation entre la charge solide et le débit fluvial à Poses. Mesures de décembre 1982 à décembre 1984.

successives de l'hiver 1982-83. Ces courbes forment dans les trois cas une boucle d'hystérésis, la charge solide maximale précédant le maximum de débit liquide, phénomène décrit dès 1935 par Hjülstrom dans plusieurs rivières, et plus récemment par Milliman (1980) et Wood (1977). Par ailleurs, les plus fortes concentrations se rencontrent lors de la première crue, après une longue période de faible débit. Lors des crues suivantes, les teneurs en M.E.S. sont beaucoup plus faibles, d'autant plus que l'intervalle séparant deux crues successives est court, respectivement 39 jours et 55 jours dans l'exemple présenté. Des observations comparables ont été faites par Al-Jabbari et al (1980) et Milliman (1980). Les mécanismes entrant en jeu sont décrits par Wood (1977). Selon cet auteur, le phénomène d'hystérésis caractérise un apport de particules correspondant à un épuisement total du stock sédimentaire disponible en quelques jours au début des crues. La reconstitution de ce stock demande du temps et, s'il y a plusieurs crues successives, le matériel épuisé ne se réaccumule pas. Ainsi la charge solide reste-t-elle faible, d'autant plus que les crues sont rapprochées. Ce schéma s'applique parfaitement à la Seine et correspond au modèle e de la terminologie de Wood (1977). Les données disponibles dans des rivières comparables à la Seine, telles la Gironde

site a été dicté, d'une part par la nécessité de s'affranchir des fluctuations de la charge solide, sous l'influence des courants de marée, dans la partie aval de la rivière soumise à la marée dynamique, d'autre part pour disposer parallèlement de mesures du débit fréquentes et sûres.

Au cours du suivi, de décembre 1982 à décembre 1984, les concentrations en matières en suspension (M.E.S.) ont varié de 3,3 mg/l à 267 mg/l (fig. 2 b). L'ensemble des résultats, au total 750 mesures, et les débits liquides correspondants sont reportés sur la figure 3. Malgré une certaine dispersion des valeurs, il existe une relation évidente entre les deux paramètres. Une observation plus approfondie montre que la charge solide atteint un maximum durant la phase ascendante des crues, comparativement à celle anormalement faible mesurée durant les maxima de débit et lors de la phase descendante des crues. En faisant abstraction de ces dernières valeurs, la relation entre la charge solide C_s et le débit fluvial Q est une droite dont l'expression dans une échelle logarithmique est :

$$C_s \text{ (à Poses)} = 0,001 \cdot Q^{1,66} \quad (1)$$

Afin de préciser la relation entre la concentration en M.E.S. et le débit liquide durant les crues, la figure 4 donne à titre d'exemple les courbes individuelles correspondant aux crues

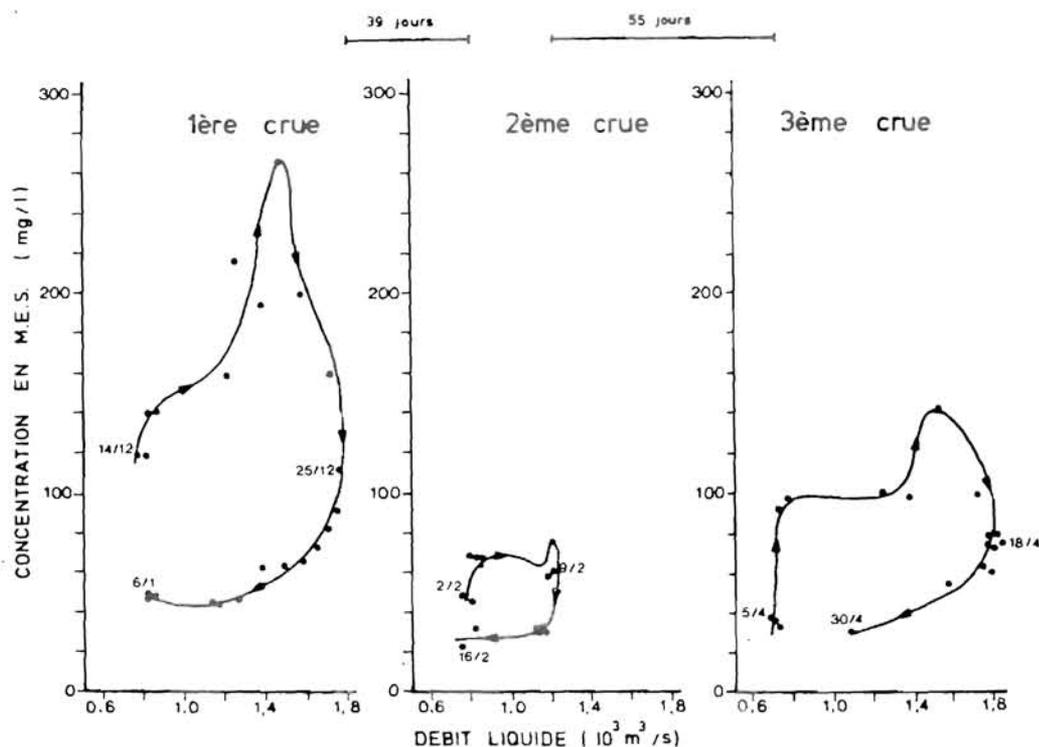


Fig. 4 Relation entre la charge solide et le débit fluvial à Poses durant les 3 crues de l'hiver 1982-83.

(Jouanneau, 1982) et la Loire (Guillaud, 1983 ; Manickam, 1982) montrent un schéma analogue sans doute généralisable à l'ensemble des rivières en climat tempéré humide.

1.3. - Débit solide

Compte-tenu de l'existence d'hystérésis entre la charge solide et le débit fluvial lors des crues, le calcul des apports sédimentaires à partir de la relation (1) est source d'importantes erreurs. Les brusques variations ne peuvent être mises en évidence que par un suivi très serré dans le temps. La figure 2 C montre l'évolution du débit solide de la Seine calculé quotidiennement de décembre 1982 à décembre 1984. Les valeurs extrêmes sont de 33900 T/j en crue et de 63 T/j en étiage pour des concentrations en M.E.S. de 267 mg/l et 3,3 mg/l respectivement. 75 % des apports annuels de la Seine se produisent en période de crue chiffre comparable à celui calculé dans d'autres rivières (Al-Jabbari et al, 1980 ; Schubel, 1974 ; Vale, 1981). Les apports solides durant la phase ascendante des crues représentent à eux seuls 50 % des apports annuels en 20 jours, dont une large part revient à la première crue. Le total annuel calculé à Poses est de $1,01 \cdot 10^6$ T de l'hiver 1982 au début de l'hiver 1983, et de $0,53 \cdot 10^6$ T l'année suivante. Ces résultats comparés à ceux obtenus précédemment (Avoine, 1981) ne montrent pas de divergence considérable. La moyenne calculée antérieurement reste donc valable, soit $0,5 \cdot 10^6$ T/an, avec une fourchette allant de $0,2 \cdot 10^6$ T/an à $1 \cdot 10^6$ T/an selon les années.

A partir de ces chiffres, il est possible d'évaluer le taux d'érosion du bassin versant. Pour un débit solide annuel de $0,5 \cdot 10^6$ T (mini $0,2 \cdot 10^6$, maxi $1 \cdot 10^6$), le taux d'érosion est de $7,5$ T/km²/an (mini 3, maxi 15), ce qui est très faible comparativement aux grands fleuves mondiaux (Milliman, 1981). D'après ces chiffres l'arasement du bassin versant de la Seine est de l'ordre de 0,4 cm par millénaire en conditions moyennes.

2 - APPORTS en METAUX-TRACES

Les teneurs et les apports annuels de la Seine en métaux dissous et particulaires ont été calculés à partir des analyses effectuées depuis 1976 à la Bouille, 100 km en amont de l'embouchure, par la cellule anti-pollution du Service de la Navigation de la Seine. Les métaux mesurés sont : Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Ti, V. Le protocole d'analyses et l'interprétation de l'ensemble des résultats ont fait l'objet d'une synthèse détaillée (Avoine et al, 1984) dont les principales conclusions seront reprises ici.

L'étude statistique des concentrations en métaux dissous ne permet pas de mettre en évidence de relations systématiques entre les teneurs observées pour chaque métal et les variations du débit fluvial. Un certain équilibre existe au cours de l'année et, à l'instar de Jouanneau (1982) en Gironde, une teneur moyenne a été calculée pour estimer les apports moyens annuels correspondant à un débit fluvial de 435 m³/s (tableau 1). Par rapport aux concentrations habituellement rencontrées dans les fleuves (Martin et Meybeck, 1979), certains métaux présentent des teneurs plus élevées dans la Seine. C'est le cas notamment de Zn, Pb, Cr (2 fois), de Ni (4 fois) et de Cd qui apparaît très élevé.

MÉTAL	TENEUR MOYENNE (µg/l)	APPORTS ANNUELS MOYENS t/an
Cd	0,4 ± 0,3	5,5
Co	0,5 ± 0,4	6,9
Cr	1,4 ± 1,0	19
Cu	4,2 ± 2,0	58
Fe	13,3 ± 11,9	182
Hg	0,04 ± 0,03	0,5
Mn	5,9 ± 5,2	81
Ni	7,8 ± 4,9	107
Pb	1,0 ± 0,6	13,7
Zn	32 ± 24	440

Tableau 1.- Teneur moyenne en métaux dissous et écart-type mesurés à la Bouille de 1976 à 1984. Apports annuels moyens pour un débit de 435 m³/s.

Les teneurs en métaux-traces liées aux suspensions montrent des variations notables au cours de l'année, difficilement corrélables avec les fluctuations de la charge solide et du débit fluvial. Cependant, un bilan moyen peut s'avérer utile à long terme, en considérant les concentrations moyennes pour chaque métal et les apports solides annuels estimés précédemment. (Tableau 2A). Comparée aux grands fleuves réputés non pollués (Martin et Meybeck, 1979), la Seine présente des teneurs élevées pour plusieurs métaux: Cr, Cu, Zn. La contribution anthropique dans les apports de la Seine a pu être estimée en évaluant le fond géochimique régional dans des sédiments de la période pré-industrielle de la région de Rouen issus du dépôt de M.E.S. apportées par le fleuve (Avoine et al., 1984).

Cette contribution est considérable pour la plupart des métaux, de l'ordre de 95 % pour Hg, Cu, Cd, Zn, de 85 % pour Ni, Pb, Cr, de 65 % pour Mn, Co, V (tableau 2 A). Le fer et le titane semblent au contraire d'origine principalement naturelle. Ces chiffres sont à considérer avec prudence mais ils illustrent parfaitement le fort degré de pollution engendré par l'activité humaine dans une région où les teneurs naturelles restent faibles par rapport aux moyennes mondiales, du fait de la nature géologique essentiellement sédimentaire du bassin versant. La comparaison des pourcentages obtenus dans la Seine pour les métaux qui semblent principalement d'origine anthropique, avec ceux calculés récemment en Gironde par Donard et al. (1983), montre que dans ce dernier cas la part des apports naturels est plus grande, compte-tenu de la présence d'un substratum partiellement cristallin qui enrichit le milieu en métaux.

A	Teneurs en métaux particulaires (A)		Apports moyens de la Seine				B
	Suspensions fluviales (b) (µg/g)	Sédiments fluviaux non pollués (c) (µg/g)	TOTAUX (d) (T/an)	NATURELS (d) (T/an)	ANTHROPIQUES (d) (T/an)	CONTRIBUTION ANTHROPIQUE (%)	
Cd	13,1 ± 6,5	0,34 ± 0,04	6,6	0,17	6,4	97	55
Co	13,6 ± 6,5	5,2 ± 1	6,8	2,4	4,4	65	50
Cr	167 ± 80	29 ± 1	84	15	69	83	82
Cu	260 ± 140	5 ± 1	130	2	128	98	59
Fe	25500 ± 7000	15500 ± 600	12250	7400	4850	40	99
Hg	2,5 ± 1,6	0,034 ± 0,01	1,3	0,02	1,3	98	72
Mn	110 ± 500	340 ± 30	555	170	385	70	87
Ni	75 ± 50	16 ± 2	38	8	30	79	26
Pb	180 ± 90	27 ± 1	90	13,5	77	85	97
Ti	2050 ± 800	1400 ± 20	1025	700	325	32	/
V	170 ± 110	69 ± 5	85	35	50	59	/
Zn	770 ± 250	34 ± 2	385	17	368	96	47

Tableau 2.-A: Apports naturels et anthropiques de la Seine en métaux particulaires;

a : calculés pour 3,6% d'Al (teneur moyenne des apports fluviaux et écart-type);

b : teneurs moyennes mesurées à la Bouille de 1976 à 1984;

c : sédiments pré-industriels de Tourville-la-Rivière;

d : calculés pour une charge annuelle de $0,5 \cdot 10^6$ T.

B : Importance relative des apports annuels particuliers (P) et dissous (D) en métaux-traces à la Bouille.

L'importance de la phase particulaire par rapport à la phase dissoute est représentée sur le tableau 2B. Il apparaît que la plupart des métaux sont amenés par la Seine sous forme particulaire, c'est-à-dire associés au matériel en suspension qui est un vecteur de pollution métallique.

Bien que l'influence des rejets effectués directement dans l'estuaire peut être localement mise en évidence, les apports provenant de la Seine demeurent prépondérants pour la plupart des métaux. Seuls Ti, Mn et à moindre degré Fe, sont rejetés en fortes quantités dans l'estuaire, surtout sous forme dissoute, et sont la cause de pollutions locales.

CONCLUSION

Cette étude met en évidence l'extrême variabilité des apports fluviaux au cours de l'année, d'un point de vue quantitatif. Ces apports s'effectuent principalement durant la phase ascendante des crues, et surtout lors des premières pluies hivernales, résultats à prendre en considération dans tout calcul du temps de résidence dans l'estuaire, non seulement de l'eau et des suspensions, mais surtout des métaux-traces apportés par le fleuve. Par ailleurs, la Seine apparaît à l'heure actuelle comme une rivière sénile à faible capacité d'érosion, du fait principalement de la topographie adoucie de son bassin versant, du couvert végétal important et des travaux de régularisation de son cours.

- Al-Jabbari M.H., McManus J. & Al-Ansari N.A. (1980).- Sediment and solute discharge into the Tay estuary from the river system. Proc. R. Soc. Eding., vol. 78 B, p. 15-32.
- Avoine J. (1981).- L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. Thèse 3ème cycle, Caen, 236 p.
- Avoine J., Boust D. & Guillaud J.F. (1984).- Flux et comportement des contaminants dissous et particuliers dans l'estuaire de la Seine (France). Proc. Symp. on Contaminant Fluxes through the Coastal Zone, Nantes, (à paraître).
- Donard O., Latouche C., Bourg A.C.M. & Vernet J.P. (1983).- Occurrence and behaviour of mercury and cadmium in the sediments of an estuarine system: the Gironde. Int. Conf. "Heavy Metals in the Environment", Heidelberg, p. 960-963.
- Guillaud J.F. (1983).- Evaluation des apports en matières en suspension à Montjean (Loire) pour une année hydrologique moyenne. Rap. Ronéot. CNEXO, 5 p.
- Jouanneau J.M. (1982).- Matières en suspension et oligo-éléments métalliques dans le système estuarien girondin: comportement et flux. Thèse, Bordeaux, 150 p.
- Manickam S. (1982).- Etude hydrologique et sédimentologique de la zone de transition entre la Loire fluviale et l'estuaire. Thèse 3ème cycle, Nantes, 281 p.
- Martin J.M. & Meybeck M. (1979).- Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. Mar. Chem., vol. 7, p. 173-206.
- Milliman J.D. (1980).- Sedimentation in the Fraser river and its estuary, southwestern British Columbia (Canada). Estuar. Coast. Mar. Sci., vol. 10, p. 609-633.
- Milliman J.D. (1981).- Transfer of river-borne particulate material to the oceans. In : Martin J.M., Burton J.D. & Eisma D. (eds.). River inputs to ocean systems, United Nations, New York, p. 5-12.
- Müller G. et Förstner V. (1968).- General relationship between suspended sediment concentration and water discharge in the Alpenhein and some other rivers. Nature, vol. 217, p. 244-5.
- Schubel J.R. (1974).- Effects of tropical storm Agnes on the suspended solids of the northern Chesapeake bay. In: Gibbs R.J. (ed). Suspended solids in water, Plenum Press, New York, p. 113-132.
- Vale C. (1981).- Entrada de matéria em suspensão no estuário do Tejo durante as cheias de Fevereiro de 1979. Recursos Hídricos, vol. 2, n° 1, p. 37-45.
- Wood P.A. (1977).- Controls of variation in suspended sediment concentration in the River Rother, West Sussex, England. Sedimentology, vol. 24, p. 437-445.