

Érosion chimique et mécanique dans le bassin de l'Amazone. Évaluation du ruissellement par la méthode dite des réservoirs à contribution variable mais à composition constante

Yves Tardy, Jefferson Mortatti et Jean-Luc Probst

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 320, série II a,
p. 853 à 860,
1995

Résumé Une méthode de séparation des écoulements constituant les hydrogrammes de crue : ruissellement et écoulement de base, est proposée et appliquée au bassin de l'Amazone. Les deux écoulements ainsi que les concentrations supposées constantes dans chacun des deux réservoirs dont ils sont issus, sont calculés à partir du débit total et des concentrations en substances dissoutes ou particulaires, organiques ou minérales, mesurées au cours de 7 campagnes de prélèvements effectuées entre 1982 et 1984.

Mots-clés : Érosion chimique et mécanique, Ruissellement, Découpage de l'hydrogramme, Amazone.

Y. T. : Institut de Géologie de
l'Université Louis-Pasteur,
1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex,
France ;

J.-L. P. : Centre de Géochimie de la
Surface, CNRS, 1, rue Blessig,
67084 Strasbourg Cedex, France ;

J. M. : Centro de Energia Nuclear na
Agricultura,
Universidade de Sao Paulo,
av. Centenario, CP 96,
13400 Piracicaba, Brésil.

Abstract **Chemical and mechanical erosion in the Amazon basin.
Surface runoff estimation by using the method
of reservoirs of variable contribution and constant load in time**

A hydrograph separation model in two components: surface runoff and baseflow, is presented and applied to two sampling stations of the Solimões/Amazon river. The two contributions are calculated using the measured concentrations of organic or mineral substances, dissolved (Na, K, NO₃) or suspended loads (particulate fine POCF, SSF, and coarse POCC, SSC) in samples collected on 7 cruises, during the hydrological cycles 1982-1984.

Keywords: Chemical and mechanical erosion, Surface runoff, Hydrograph separation, Amazon.

**Abridged
English
Version**

ONE of the problem encountered to assess the mechanical erosion of the continents is the lack of data concerning the surface runoff. Most of the results concerning the particulate river fluxes are referred to the total river discharge. Very few are referring to the surface runoff but in these cases, parameters of calculations are very often estimated *a priori*, while direct measurements are only applicable to very small watersheds and not to large basins.

In watersheds of various size, shape and slope, submitted to various kinds of climates

and covered by different types of vegetation, the river flow may be considered, at a given instant of the hydrological cycle, as the sum of at least two types of water discharge (Pilgrim *et al.*, 1979; Hooper and Shoemaker, 1986; Robson and Neal, 1990). The first, named quick flow, involves the superficial horizons of soils and is somewhat associated with the surface runoff. It is generated quickly after rainfall in the so-called superficial reservoir and is mainly responsible for the mechanical erosion. The second, named baseflow, involves the deep horizons of soils or the groundwater aquifers.

Note

présentée par
Georges Pédro.

remise le 28 juin 1994,
acceptée après révision
le 20 février 1995.

It is generated by the slow discharges of deep reservoirs supplied by long subterranean circulations, sometimes a long time after their alimentation by rain water. The baseflow reservoir is responsible for the largest quantity of soluble material coming from rock weathering and mineral dissolution, while the surface runoff may carry soluble substances preferentially generated by soil organic horizons or by specific superficial zones such as floodplains, called *varzeas* in the Amazon basin (Martinelli *et al.*, 1989).

Several techniques were used for separating hydrographs of total runoff into their different components. Some of them are graphical (*see* for example Barnes, 1939; Roche, 1963; Chow, 1964; Etchandu and Probst, 1986; Probst and Bazerbachi, 1986; Kattan *et al.*, 1987). The major difficulty encountered in these types of graphical procedures is to estimate the baseflow and to localize its maximum, during the high water periods (Pinder and Jones, 1969; Fritsch, 1992).

Other methods are models based on chemical or isotopic mixing between different reservoirs (Pinder and Jones, 1969; Fritz *et al.*, 1976; Sklash and Farvolden, 1979; Gac, 1980; Takeuchi *et al.*, 1984; Probst, 1992; O'Brien and Hendershot, 1993). They generally suppose constant—but *a priori* measured or estimated—compositions of the different reservoirs which contribute to the river flow. The difficulty encountered, particularly in large basins, comes from the estimation of the representative compositions.

The method presented here is also based on a mixing approach, but totally independent on any pre-selected hypothesis or pre-determined initial composition. It was applied to the downstream of the Amazon river at Obidos and to the upstream part of the basin, involving the Solimões river at Vargem Grande, Brazil. Within the course of the CAMREX program (Meade, 1985; Meade *et al.*, 1985; Richey *et al.*, 1986), the Amazon and its tributary rivers were sampled 7 times, along the 3 hydrological cycles, during years 1982-1984 (figures 1 and 2). The reason why it could be done successfully is that we have been using, besides four classical chemical soluble elements (Na, K, NO_3 and DOC), four suspended organic and mineral components (POCC:

particulate organic carbon, coarse fraction; POCF: particulate organic carbon, fine fraction; SSF: fine suspended material and SSC: coarse suspended material) which are supposed to belong (with no *a priori*) to the surface reservoir.

The calculation procedure defines Q_n , the total discharge, at the sampling time n ($n = 7$, from 2 to 8) which is known, as well as its flux components: X_n^i , the surface runoff, and Y_n^i , the baseflow which are unknown. C_n^i is the known concentration of each of the 7 elements i , in the total flow for sample n . C_x^i and C_y^i are respectively the unknown concentrations of the element i in the surface runoff and in the baseflow. F_n^i is the total conserved flux of the element i for the sampling excursion n . One has consequently:

$$Q_n = X_n^i + Y_n^i$$

and

$$F_n^i = Q_n C_n^i = X_n^i C_x^i + Y_n^i C_y^i$$

The calculation procedure, solving simultaneously 21 equations, yields values for C_x^i and C_y^i but also for X_n^i and Y_n^i , which can be obtained independently, for each element i . The validity of the method can be verified in two ways. First, the calculated suspended material concentrations (POCC, POCF, SSF and SSC) are very small in baseflow (should be theoretically equal to 0) and comparatively very high in the surface runoff (which should supply all the river particulate material). Secondly, the calculated concentrations of soluble elements (NO_3 , K, Na) in baseflow should be close to these analysed in river water, during the low water period.

Results given in tables I and II allow us to reconstitute, as shown in figures 1 and 2, the two types of discharge. Both surface runoff and baseflow, but also the surface runoff coefficient ($R_s = D_s/D_0$), rise together when the total runoff increases.

The validity of the method seems confirmed by the fact that the concentrations of the particulate materials appear essentially explained by the surface runoff, mainly responsible of the mechanical erosion, while highly soluble elements such as Na, not involved in the surficial biological cycle, appear essentially explained by the base flow, mainly

responsible of the chemical erosion. Some elements such as K and NO_3 are involved in different concentrations in the two reservoirs.

This approach will be developed further ahead by considering more than two reservoirs and by taking into considerations, if necessary, that concentrations of the elements within

each of the reservoirs selected could vary along the hydrological cycle.

It must be finally emphasized that such refinements would be available only if the sampling frequency is sufficiently high and could not be used if the sampling program is too short or punctual.

INTRODUCTION

À l'exutoire d'un bassin versant, la lame d'eau écoulée (D_0) résulte, en simplifiant, de la combinaison de deux types d'écoulements : un écoulement rapide superficiel appelé ruissellement (D_r) et un écoulement lent et profond appelé écoulement de base (D_b). Au cours du cycle hydrologique, la contribution de ces écoulements varie (Pilgrim *et al.*, 1979 ; Hooper et Shoemaker, 1986 ; Robson et Neal, 1990).

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour découper l'hydrogramme de crue en deux ou trois composantes : méthodes graphiques (Barnes, 1939 ; Roche, 1963 ; Chow, 1964 ; Etchanchu et Probst, 1986 ; Probst et Bazerbachi, 1986 ; Kattan *et al.*, 1987 ; Fritsch, 1992), et méthodes chimiques ou isotopiques (Pinder et Jones, 1969 ; Fritz *et al.*, 1976 ; Sklash et Farvolden, 1979 ; Takeuchi *et al.*, 1984 ; O'Brien et Hendershot, 1993). Gac (1980), Tardy (1986, 1990, 1993) et Probst (1992) ont introduit la charge solide des rivières comme marqueur exclusif du ruissellement superficiel, en faisant l'hypothèse que, sur un bassin versant donné, la charge solide dans l'écoulement superficiel ne variait pas. Ceci revient à dire que, lorsque le débit solide d'une rivière augmente ou diminue, ce n'est pas la charge en suspension dans l'écoulement de surface qui varie, mais la proportion du débit ruisselé par rapport au débit de base qui augmente ou qui diminue.

Cette idée est reprise, appliquée et vérifiée ici sur le bassin de l'Amazone où l'on a retenu deux stations de mesure : Obidos, à l'aval du cours majeur de l'Amazone et Vargem Grande à l'aval du Rio Solimões situé à 1 700 km plus en amont. À la différence des méthodes pré-citées, la procédure d'évaluation utilisée est sans *a priori* d'aucune sorte,

quant à la composition des réservoirs. L'hypothèse de l'invariance de cette composition au cours du cycle hydrologique devrait être confirmée dans les deux cas pour la concordance des résultats obtenus à partir de 7 variables indépendantes : Na, K, NO_3 en solution ; POCF et SSF, POCC et SSC qui désignent respectivement les concentrations en matières organiques (POC) et minérales (SS) en suspension (F, fraction fine ; C, fraction grossière).

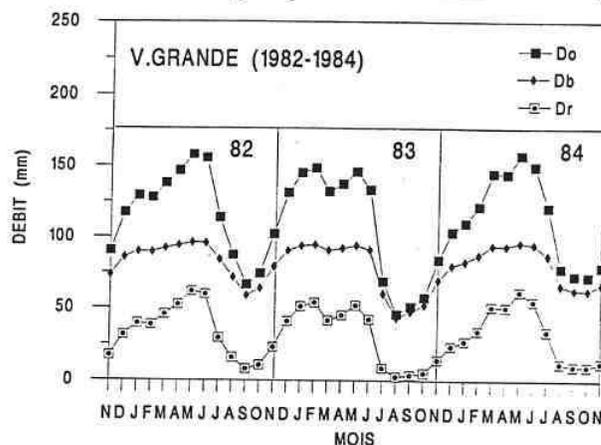
MÉTHODES

Nous utilisons les données de base de sept missions de prélèvement à Obidos et à Vargem Grande (située à 1 500 km du piedmont des Andes) qui ont été effectuées entre 1982 et 1984 dans le cadre du projet CAMREX (figures 1 et 2) (Meade, 1985 ; Meade *et al.*, 1985 ; Richey *et al.*, 1986).

Les valeurs des débits et des concentrations sont données dans le tableau I. On remarque que la concentration en NO_3 , Na et K en solution est d'autant plus faible que le débit est plus fort, tandis que la concentration des matières organiques ou minérales

Figure 1 Variations du débit total (D_0), du débit ruisselé (D_r) et du débit de base (D_b) du rio Solimões à Vargem Grande au cours de la période 1982-1984. D_r et D_b sont calculés à partir du modèle de séparation des composantes de l'écoulement fluvial proposé dans cette étude. Positions sur l'hydrogramme des excursions d'échantillonnage n° 2 à 8 du programme CAMREX.

Total discharge (D_0), surface runoff (D_r) and baseflow (D_b) variations of the rio Solimões at Vargem Grande during the period 1982-1984. D_r and D_b are calculated using the hydrograph separation modelling proposed in this study. Locations on the hydrograph of the sampling cruises Nos. 2 to 8 of the CAMREX project.



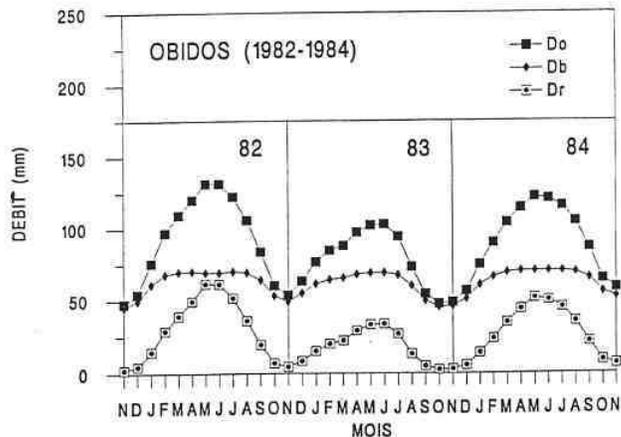


Figure 2 Variations du débit total (D_0), du débit ruissellé (D) et du débit de base (D_b) de l'Amazone à Obidos au cours de la période 1982-1984. D , et D_b sont calculés à partir du modèle de séparation des composantes de l'écoulement fluvial proposé dans cette étude. Positions sur l'hydrogramme des excursions d'échantillonnage n° 2 à 8 du programme CAMREX.

Total discharge (D_0), surface runoff (D) and baseflow (D_b) variations of the Amazon at Obidos during the period 1982-1984. D , and D_b are calculated using the hydrograph separation modelling proposed in this study. Locations on the hydrograph of the sampling cruises Nos. 2 to 8 of the CAMREX project.

(POCF, POCC, SSF, SSC) en suspension est d'autant plus forte que le débit est plus fort. Cette observation est à la base de la méthode de calcul proposée ici. L'écoulement total Q_n résulte de l'addition en proportions variables d'un écoulement rapide X_n (ou ruissellement), qui entraîne avec lui les matériaux en suspension, et d'un écoulement lent Y_n (ou écoulement de base) qui entraîne avec lui les éléments lessivés en solution :

$$(1) \quad Q_n = X_n + Y_n$$

Pour l'élément i (Na, K, NO_3 , POCF, POCC, SSC et SSF), C_n , C_x et C_y sont respectivement les concentrations de cet élément mesuré dans l'eau du fleuve et calculé dans

Tableau I Débit total (D_0) et concentrations en éléments dissous (NO_3 , Na, K) et particulaires (POCF et POCC : carbone organique particulaire dans les fractions fines et grossières ; SSF et SSC : fractions fines et grossières des matières en suspension) dans les eaux de l'Amazone à Obidos et du rio Solimões à Vargem Grande. Résultats obtenus par le programme CAMREX (1982-1984) (Meade, 1985, pour les débits et les matières en suspension).

Total discharge (D_0) and concentrations of the solute (NO_3 , Na, K) and particulate (POCF and POCC: organic carbon in fine and coarse fractions; SSF and SSC: suspended matter in fine and coarse fractions) elements in the river water of the Amazon at Obidos and of the rio Solimões at Vargem Grande. Results obtained during the execution of the CAMREX project (1982-1984), (Meade, 1985, for river discharges and suspended sediment concentrations).

Obidos								
Excursion	D_0	NO_3	Na	K	POCF	POCC	SSF	SSC
2	161 300	9,00	90,00	21,00	2,35	0,27	145,00	43,00
3	122 900	18,90	120,00	49,00	2,24	0,24	238,00	11,00
4	166 800	11,00	93,00	28,00	2,57	0,42	254,00	31,00
5	177 300	9,20	105,00	23,50	2,43	0,34	188,00	28,00
6	91 700	17,50	183,00	19,70	1,17	0,05	88,00	5,00
7	177 000	14,10	86,90	25,30	3,28	0,38	345,00	40,00
8	203 000	7,90	108,70	22,50	1,66	0,35	148,00	47,00
Moyenne....	157 142,9	12,50	112,40	27,00	2,24	0,29	200,90	29,30

V. Grande								
Excursion	D_0	NO_3	Na	K	POCF	POCC	SSF	SSC
2	31 700	14,00	125,00	28,00	2,58	0,92	217,00	59,00
3	57 100	17,30	170,00	36,00	4,65	0,82	470,00	136,00
4	52 400	14,00	212,00	31,00	4,64	0,94	436,00	92,00
5	38 800	14,20	227,00	29,90	3,34	0,61	299,00	41,00
6	26 600	15,50	241,00	26,30	2,81	0,56	232,00	44,00
7	51 500	14,90	203,80	29,90	4,96	0,81	486,00	106,00
8	48 000	12,80	217,40	31,20	2,65	0,54	252,00	71,00
Moyenne....	43 728,6	14,67	199,46	30,33	3,66	0,74	341,70	78,40

D_0 (m^3/s); NO_3 , Na et K (μM); POCF, POCC, SSF et SSC (mg/l).

Tableau II Concentrations moyennes en éléments dissous et particulaires mesurés dans le fleuve (C_n) et calculées dans le ruissellement de surface (C_r) et dans l'écoulement de base (C_b) en utilisant le modèle proposé à Obidos et Vargem Grande au cours de la période 1982-1984. D_r % et D_b % sont respectivement les contributions du ruissellement de surface et de l'écoulement de base au débit fluvial total.

Average concentrations of solute and particulate elements measured in the river water (C_n) and calculated in the surface runoff (C_r) and in the baseflow (C_b) using the hydrograph separation modelling at Obidos and Vargem Grande during the period 1982-1984. D_r and D_b are respectively the contributions of surface runoff and base flow to the total river discharge.

Obidos	Concentration			Débit	
	C_n	C_r	C_b	D_r (%)	D_b (%)
NO ₃ (µM).....	12,50	-3,70	19,00	25,96	74,04
Na (µM).....	112,40	-20,00	165,60	31,37	68,63
K (µM).....	27,00	56,90	19,30	22,68	77,32
POCF (mg/l).....	2,24	5,96	0,73	28,14	71,86
POCC (mg/l).....	0,29	0,82	0,07	29,93	70,07
SSF (mg/l).....	200,90	582,50	72,20	25,64	74,36
SSC (mg/l).....	29,30	92,80	7,20	26,16	73,84
Moyenne.....				27,13	72,87

V. Grande	Concentration			Débit	
	C_n	C_r	C_b	D_r (%)	D_b (%)
NO ₃ (µM).....	14,67	8,05	16,67	23,23	76,77
Na (µM).....	199,46	-28,61	257,98	20,20	79,80
K (µM).....	30,33	41,33	27,42	19,03	80,97
POCF (mg/l).....	3,66	7,31	2,08	27,56	72,44
POCC (mg/l).....	0,74	2,10	0,36	21,35	78,65
SSF (mg/l).....	341,70	771,29	172,33	25,76	74,24
SSC (mg/l).....	78,40	250,13	5,96	27,73	72,27
Moyenne.....				23,55	76,45

l'eau du ruissellement et dans l'eau de l'écoulement souterrain, variables d'une excursion à l'autre. Le flux de l'élément i dans l'eau du fleuve, au moment du prélèvement n , est donné par l'équation de mélange suivante :

$$(2) \quad F_n^i = Q_n C_n^i = X_n^i C_x^i + Y_n^i C_y^i$$

Le modèle est construit sur deux hypothèses. La première veut que les concentrations C_x^i et C_y^i soient constantes d'une excursion à l'autre. Mais X_n^i et Y_n^i calculés à partir de l'élément i , varient bien entendu, d'un prélèvement à l'autre. Pour chacun des 7 prélèvements n , on calcule donc 2 jeux de 7 valeurs X_n^i et Y_n^i ($i = 1 \rightarrow 7$). La seconde hypothèse veut que X_n soit toujours inférieur

à 50 % de Q_n et que, par conséquent, Y_n soit toujours supérieur à ce pourcentage.

La résolution du système formé par l'ensemble des équations (2) citées plus haut est conduite en croisant deux à deux les valeurs qui caractérisent chacune des excursions avec les valeurs qui caractérisent les six autres. Ainsi, par les excursions 2 et 3, on obtient :

$$(3) \quad F_2^i = Q_2 C_2^i = X_2^i C_x^i + Y_2^i C_y^i$$

$$(4) \quad F_3^i = Q_3 C_3^i = X_3^i C_x^i + Y_3^i C_y^i$$

La concentration moyenne dans l'eau du ruissellement est calculée à partir des équations (3) et (4) de la façon suivante :

$$(5) \quad [C_x^i]_2^3 = \frac{Y_3^i F_2^i - Y_2^i F_3^i}{Y_3^i X_2^i - Y_2^i X_3^i}$$

Pour chacun des éléments i , la totalité des combinaisons C_7^2 fournit 21 valeurs de C_x . Par une méthode de tirage au sort analogue à celle dite de Monte Carlo (Mortatti *et al.*, soumis), les calculs sont réalisés 1 000 fois en utilisant les sorties aléatoires des valeurs de X_n^i . Les valeurs retenues de X_n^i , Y_n^i et C_x correspondent à l'écart type minimum obtenu au cours du tirage au sort. On calcule ensuite (C_y) dans l'écoulement de base (Y) à partir de l'équation (2).

RÉSULTATS

Les résultats des calculs pour les 7 croisières organisées à Obidos et à Vargem Grande, sont donnés dans le tableau II. On remarque tout d'abord que la valeur moyenne de l'écoulement rapide (ou ruissellement) (D_r , avec $R_r = D_r/D_0$) calculée pour l'ensemble des 7 croisières, tous éléments confondus, est de l'ordre de 27 % (22 à 30 %) pour Obidos et de 23 % (19 à 23 %) pour Vargem Grande. L'écoulement différé (D_b , avec $R_b = D_b/D_0$), plus fort, est de l'ordre de 73 % pour Obidos et 77 % pour Vargem Grande. Pour un même élément ou pour l'ensemble des éléments, la part de l'écoulement superficiel (D_s) dans l'écoulement total (D_0) est le plus faible en période de décrue (excursion 2) ou en fin de décrue (excursion 6). L'écart entre les différentes valeurs calculées pour chaque élément est alors le plus faible. Le coefficient R_r moyen ainsi que les écarts entre coefficients calculés pour chacun des éléments sont les plus forts pendant la montée des eaux (excursion 4, 5 et 7). La valeur moyenne du ruissellement la plus faible est obtenue pour le potassium (23 et 19 % respectivement pour Obidos et Vargem Grande). La valeur la plus forte est atteinte pour le sodium (31 %) à Obidos et pour la fraction grossière des matériaux en suspension (28 %) à Vargem Grande. En fait, il ne semble pas que la valeur de chacun des écoulements dépende du type de variable utilisée pour la déterminer. La fourchette des valeurs autour des valeurs moyennes est de l'ordre de 20 %. Cependant, pour les deux stations, c'est la valeur

calculée par les nitrates qui est la plus proche de la valeur moyenne.

On remarque ensuite que la concentration des matières en suspension est beaucoup plus forte dans les eaux du ruissellement superficiel (C_r) que dans les eaux de l'écoulement de nappe (C_b). L'erreur – si l'on peut dire – correspondant à la part du matériel en suspension qui transiterait dans l'eau restituée par les nappes, est plus faible pour les matériaux grossiers (10 %) que pour les matériaux fins (20 %). De l'amont vers l'aval, la charge totale en suspension des eaux de ruissellement diminue (entre 1,021 et 0,675 g/l). Dans les suspensions, les proportions des fractions grossières diminuent également (entre 22 et 12 % pour la matière organique et entre 24 et 14 % pour la matière minérale).

On remarque encore que Na et NO_3 transitent en grande partie dans l'eau des nappes, mais que K est plus concentré dans l'eau du ruissellement. Ceci résulte sans aucun doute des remontées d'origine biologique (végétation, termites).

Il existe enfin une bonne corrélation entre la valeur moyenne des coefficients R_r (sans dimension), calculée à partir des valeurs obtenues pour chacun des 7 éléments, et le débit total mesuré (D_0 , lame d'eau écoulée en millimètres) :

– à Obidos :

$$(6) \quad R_r = -0,187 + 0,005 D_0$$

avec $r = 0,870$, significatif à 1 % ;

– à Vargem Grande :

$$(7) \quad R_r = -0,082 + 0,003 D_0$$

avec $r = 0,889$, significatif à 1 %.

On peut ainsi, à l'aide de ces équations, reconstituer correctement le découpage des hydrogrammes entre ses deux composantes principales, débit ruisselé et débit de base (figures 1 et 2).

CONCLUSION

L'estimation du ruissellement ou de l'écoulement rapide et superficiel est indispensable à l'évaluation de l'érosion, qu'elle soit chimique ou mécanique. La méthode

proposée ici est basée sur un modèle de mélange à deux réservoirs dont les charges en solution et en suspension sont constantes, mais dont les contributions sont fluctuantes au cours du temps. À côté de la mesure directe qui ne peut s'appliquer qu'aux parcelles expérimentales, c'est à nos yeux la seule méthode dont nous disposons, qui soit à même de permettre une évaluation du ruissellement et de l'écoulement de base sur les bassins versants de grande ou de petite taille.

Cependant, le modèle présenté ici dans sa dimension la plus simple, fait délibérément fi de plusieurs contraintes qui n'ont provisoirement pas été prises en compte. Un bilan étendu à l'ensemble des stations du bassin permettra en effet de tester sa validité, en distinguant la part qui revient aux versants andins où les charges en suspension sont très élevées (Guyot, 1993), à la plaine amazonienne et aux plaines d'inondation (Martinelli et al., 1989). Doivent enfin être discutés les décalages éventuels des ondes de

crues caractéristiques de chacun des tributaires qui se rejoignent pour constituer le cours principal.

La méthode présentée prétend évaluer les composantes de l'écoulement à partir des données recueillies sur chacune des variables prises en compte séparément. La bonne homogénéité des résultats obtenus en justifiait la publication. Cependant, l'unicité des solutions n'est pas garantie, si bien que la méthode doit, pour être validée, être testée par confrontation avec d'autres approches, utilisant par exemple la prise en compte de plusieurs variables à la fois, offrant alors une solution mathématique stricte au problème.

Cette approche devra également être étendue dans le futur aux mélanges de 3 ou 4 types d'écoulement, en admettant, si nécessaire, que la concentration de chacun des éléments dans chacun des réservoirs peut elle-même varier au cours du cycle hydrologique.

Ce travail a été accompli dans le cadre du programme PIRAT INSU-ORSTOM et du projet CAMREX sur l'Amazonie (J. E. Richey de l'Université de Washington, R. L. Victoria et L. A. Martinelli du CENA/USP, Brésil) et bourse post-doctorale attribuée à Jefferson Mortatti (contrat CEE n° C11*-CT93-0160).

- BARNES, B. S., 1939. The structure of discharge recession curves, *Trans. Amer. Geophys. Union*, 20, 4, p. 721-725.
- CHOW, V. T., 1964. *Handbook of applied hydrology*, Mac Graw Hill Book Company, New York, 1 400 p.
- ETCHANCHU, D. et PROBST, J. L., 1986. Érosion et transport de matières en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure du ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 302, série II, p. 1063-1068.
- FRITSCH, J. M., 1992. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en attente sur l'hydrologie des petits bassins versants, *Études et thèses*, ORSTOM, Paris, 392 p.
- FRITZ, P., CHERRY, J. A., WEYER, K. U. et SKLASH, M. G., 1976. Storm runoff analysis using environmental isotopes and major ions, In *IAEA publ., Interpretation of environmental isotopes and hydrochemical data in groundwater hydrology*, p. 111-116.
- GAC, J. Y., 1980. Géochimie du bassin du Lac Tchad. Bilan de l'érosion, de l'altération et de la sédimentation, *Travaux et documents ORSTOM*, Paris, 123, 241 p.
- GUYOT, J. L., 1993. Hydrochimie des fleuves de l'Amazonie Bolivienne, *Études et thèses*, ORSTOM, Paris, 261 p.
- HOOPER, R. P. et SHOEMAKER, C. A., 1986. A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation, *Water Resources Research*, 22, p. 1444-1454.
- KATTAN, Z., GAC, J. Y. et PROBST, J. L., 1987. Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin, estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion, *Journal of Hydrology*, 92, p. 59-76.
- MARTINELLI, L. A., DEVOL, A. H., FORSBERG, B. R., VICTORIA, R. L., RICHEY, J. E. et RIBEIRO, M. N. G., 1989. Descarga de sólidos disueltos totales de rio Amazonate e sais principais tributarios, *Géochimica Brasiliensis*, 2, n° 2, p. 141-148.
- MEADE, R. H., 1985. Suspended sediment in the Amazon river and its tributaries in Brazil during 1982-1984, US Geological Survey, Open-File Report 85-492, 39 p.
- MEADE, R. H., DUNNE, T., RICHEY, J. E., SANTOS, U. de M. et SALATI, E., 1985. Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon river of Brazil, *Science*, 228, p. 488-490.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- MORTATTI, J., CLEMENT, A., DALL'OLIO, A., PROBST, J. L. et TARDY, Y., (soumis). HYDROS: a new hydrochemical modelling procedure for hydrograph into river flow components, *Computers and Geosciences*.
- O'BRIEN, C. et HENDERSHOT, W. H., 1993. Separating stream flow into groundwater, solum and upwelling flow and its imputations for hydrochemical modelling, *Journal of Hydrology*, 146, p. 1-12.
- PILGRIM, D. H., HUFF, D. D. et STEELE, T. D., 1979. Use of specific conductance and contact time relations for separating flow components in storm runoff, *Water Resources Research*, 15, n° 2, p. 329-339.
- PINDER, G. F. et JONES, J. F., 1969. Determination of the groundwater component of peak discharge from chemistry of total runoff, *Water Resources Research*, 5, n° 2, p. 438-445.
- PROBST, J. L., 1992. Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale : mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années, *Sci. Géol. Mém. Strasbourg*, 94, 161 p.
- PROBST, J.-L. et BAZERBACHI, A. 1986. Transport en solution et en suspension par la Garonne supérieure, *Sci. Géol. Bull. Strasbourg*, 39, n° 1, p. 79-98.
- RICHEY, J. E., MEADE, R. H., SALATI, E., DEVOL, A. H., NORDIN, C. F. Jr. et DOS SANTOS, U., 1986. Water discharge and suspended sediment concentrations in the Amazon river: 1982-1984, *Water Resources Research*, 22, n° 5, p. 756-764.
- ROBSON, A. et NEAL, C., 1990. Hydrograph separation using chemical techniques: an application to catchments in mid Wales, *Journal of Hydrology*, 116 (1/4), p. 345-363.
- ROCHE, M., 1963. Hydrologie de surface, Gauthier-Villars, ORSTOM, Paris, 430 p.
- SKLASH, M. G. et FARVOLDEN, R. N., 1979. The role of groundwater in storm runoff, *Journal of Hydrology*, 43, p. 45-65.
- TAKEUCHI, K., SAKAMOTO, Y. et HONGO, Y., 1984. Discharge characteristics of NO₃ for the analysis of basin, wide circulation of water and environmental pollutants in a small river basin, *Journal of Hydrology*, 2, n° 1, p. 73-85.
- TARDY, Y., 1986. *Le cycle de l'eau : climats, paléoclimats et géochimie globale*, Masson, Paris, 338 p.
- TARDY, Y., 1990. Érosion, *Encyclopaedia Universalis*, 8, p. 615-627.
- TARDY, Y., 1993. *Climats, paléoclimats et biogéodynamique du paysage tropical*, Coll. Acad. Sci. Paris, « Sédimentologie et géochimie de la surface » à la mémoire de Georges Millot, p. 141-175.