

Flux de carbone organique de l'Amazonie et de ses principaux affluents

Patrick Seyler^{1*}, Patricia Moreira-Turcq², Alexandra Coynel³,
Henri Etcheber³, Jean-Loup Guyot¹

¹ IRD - UMR LMTG, 39, allées Jules Guesde, 31000 – Toulouse, France
pseyler@lmtg.ups-tlse.fr

² IRD, Centre d'Ile de France, 32, avenue Henri Varagnat
93143-Bondy cedex, France

³ Université de Bordeaux, Dépt. de Géologie et Océanographie
Av. Des Facultés 33405-Talence, France

Résumé

L'étude menée dans le cadre du projet de recherche franco-brésilien, intitulé " Hydrologie et Géochimie du bassin amazonien ", sur le suivi de 1994 à 2000 des concentrations de carbone organique dissous et particulaire dans le bassin amazonien l'Amazonie et ses affluents nous a permis de calculer avec une précision raisonnable les apports en carbone organique de chacun des principaux affluents (Rio Negro, Rio Solimões, Rio Madeira, Rio Tapajós, Rio Xingú et Rio Trombetas) et de l'Amazonie vers l'Océan Atlantique. Le fleuve Solimões (nom de l'Amazonie en amont de sa confluence avec le Rio Negro) et le Rio Negro contribue pour 40% au flux total de carbone organique (COT) de l'Amazonie. 14% du flux de l'Amazonie provient du Rio Madeira et 6% environ des fleuves restants (Tapajós, Xingú et Trombetas). Ces proportions changent au cours de l'année en fonction du régime hydrologique de chacun des fleuves, mais les Rio Negro et Solimões restent toujours les principaux contributeurs en carbone. L'étude des variations temporelles montre que le Solimões apporte environ 7,9 Gg de carbone organique total (COT) pendant la période des hautes eaux (entre mars et août) et environ 4,7 Gg de COT pendant la période des basses eaux (entre septembre et février). Le flux annuel moyen du carbone organique total calculé à la station d'Óbidos (station située immédiatement en amont de l'estuaire) est de $32.7 \pm 3.3 \text{ Tg an}^{-1}$, dont une contribution en carbone organique dissous (DOC) de $26.9 \pm 3.0 \text{ Tg C an}^{-1}$ et en carbone organique particulaire (POC) de $5.8 \pm 0.3 \text{ Tg C an}^{-1}$. Le flux annuel moyen du COT de l'ensemble des principaux tributaires (Negro, Solimões, Madeira, Tapajós, Xingú et Trombetas) est d'environ 28 Tg C an^{-1} . En comparant cette valeur à celle calculé à Óbidos ($32,7 \text{ Tg C an}^{-1}$), on estime un apport net de carbone organique des zones humides et des affluents secondaires du cours inférieur de l'Amazonie de 4 Tg C an^{-1} . Cet apport est attribué en majeure partie à l'ensemble du système fluvio-lacustre de la plaine d'inondation amazonienne nommés "várzea". Du fait de leur forte productivité biologique les "várzeas" représentent une source potentielle importante de carbone organique autochtone "labile". Basée sur cette étude et l'évaluation la plus récente de la quantité annuelle de carbone organique transportée par les fleuves vers les océans (500 Tg an^{-1} ; Spitzky et Ittekkot, 1991), nous concluons que l'Amazonie est responsable de 8-10% de l'exportation totale de carbone organique des fleuves aux océans.

Mots clés : Brésil, Carbone organique, Flux, Amazonie, Tributaires

Abstract:

As part of a joint Brazilian-French project, entitled "Hydrology and Geochemistry of the Amazon basin", we carried out a seven-year study (1994-2000) on the distribution, behavior and flux of particulate and dissolved organic carbon in the Amazon River and its main tributaries (the Negro, Solimões, Branco, Madeira, Tapajós, Xingú and Trombetas Rivers). Our study showed that the Solimões River contributed 40% to the TOC flux of the Amazon River. The

Negro River also contributed 40%, the Madeira River contributed ~14% and the clear water rivers (Tapajós, Xingú and Trombetas) contributed ~6%. These proportions varies during the different water seasons, but the Negro and Solimões Rivers were always the principal carbon contributors. The Solimões River contributed to the Amazon River: about 7.9 Gg of total organic carbon (TOC) during the high water period (between March and August) and about 4.7 Gg of TOC during the low water period (between September and February). The mean annual flux of TOC at Óbidos (the final gauging station upstream of the estuary) was about $3.27 \cdot 10^{13}$ g C yr⁻¹ (i.e. 32.7 ± 3.3 Tg yr⁻¹). Of this, the flux of dissolved organic carbon (DOC) represents about $2.7 \cdot 10^{13}$ g C yr⁻¹ (26.9 ± 3.0 Tg C yr⁻¹) and the flux of particulate organic carbon (POC) represents about $0.5 \cdot 10^{13}$ g C yr⁻¹ (5.8 ± 0.3 Tg C yr⁻¹). The mean annual input of TOC by all tributaries (Negro, Solimões, and Madeira) was about $2.8 \cdot 10^{13}$ g C yr⁻¹. When we compared this input with the output recorded at Óbidos ($3.27 \cdot 10^{13}$ g C yr⁻¹), we found that the amount of organic carbon increased about $0.4 \cdot 10^{13}$ g C yr⁻¹ (4 Tg C yr⁻¹). This shows that other important sources of organic carbon exist in the lower reaches of the Amazon River. These inputs can be attributed mostly to “várzea” systems (floodplains). These additional inputs from floodplains to the mainstream are sufficient to account for the gain in carbon observed in Óbidos. Amazon “várzeas” are an important natural source of labile organic carbon.

Based on this study and the most recent estimate of the annual amount of organic carbon transported into oceans by rivers ($500 \cdot 10^{12}$ g yr⁻¹, Spitzky and Ittekkot, 1991), we conclude that the Amazon River is responsible for a mean organic carbon export of about 8-10%.

Key words :Brazil, Organic carbon, Flux, Amazon river, Tributaries

Introduction :

L'étude du cycle global du carbone et de ses principaux réservoirs suscite, depuis plusieurs décennies, un intérêt croissant. En effet l'augmentation des teneurs en CO₂ dans l'atmosphère, imputable à l'utilisation accrue des combustibles fossiles depuis l'ère industrielle, et à des activités telles que la déforestation et l'érosion accélérée des sols, induirait des changements climatiques majeurs perceptibles dans un futur proche. Pour appréhender la dimension de ces changements au niveau global, les modèles numériques utilisés nécessitent de maîtriser équations de transfert et variables d'état correspondant aux différents réservoirs modélisés. Le transfert de carbone des continents vers les océans constitue l'une de ces variables qu'il est important de contraindre.

Parmi l'ensemble des fleuves, l'Amazone est responsable de 20% des apports aux océans, et représente 5% de la surface continentale de la terre (Molinier et al, 1997). La détermination des apports dissous et particulaire de l'Amazone est donc primordiale dans la connaissance du cycle global des éléments. De nombreuses données géochimiques ont été publiées sur l'Amazone (Richey *et al.*, 1980; Ertel *et al.*, 1986; Hedges *et al.*, 1986; Quay *et al.*, 1992; Hedges *et al.*, 1994, Mounier *et al.*, 1998; Patel *et al.*, 1999). Richey et al. (1990) ont calculé un flux annuel en carbone organique de $36,1$ Tg an⁻¹ pour l'Amazone. Ces résultats montrent que l'Amazone est la principale source pour l'océan de matière organique terrestre.

D'autre part, de récentes études ont montré que la déforestation affecte l'accumulation et la perte de carbone dans des écosystèmes terrestres (Bernoux et al, 2001 et ref. citées). Au cours des dix dernières années, une moyenne de $14\ 000$ km² an⁻¹ ont été soumis à la déforestation dans le bassin amazonien (Fearnside, 1997). Il nous a donc semblé pertinent de réaliser un nouveau bilan de carbone organique 10 ans après celui de Richey et al, afin d'estimer l'influence de la déforestation sur les flux de carbone organique de l'Amazone.

Site d'étude :

Le bassin de l'Amazone, situé entre 5° de latitude Nord et 20° de latitude Sud, est limité au Nord par les reliefs du bouclier guyanais, à l'Ouest par la chaîne des Andes, au Sud par le plateau du bouclier brésilien, et à l'Est par l'océan Atlantique. Le bassin amazonien est divisé en

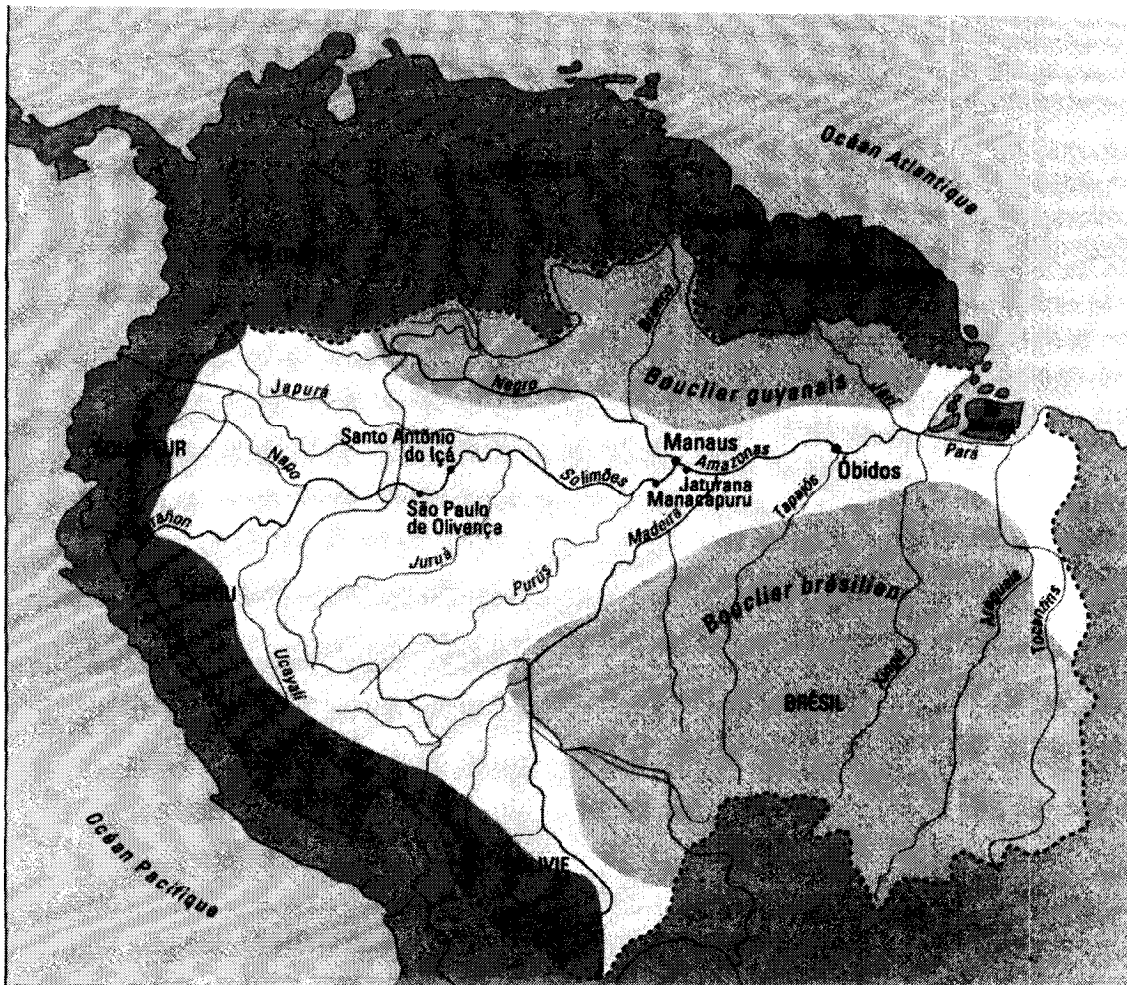


Figure 1: Les grandes unités physiographiques et les principaux affluents du bassin amazonien.

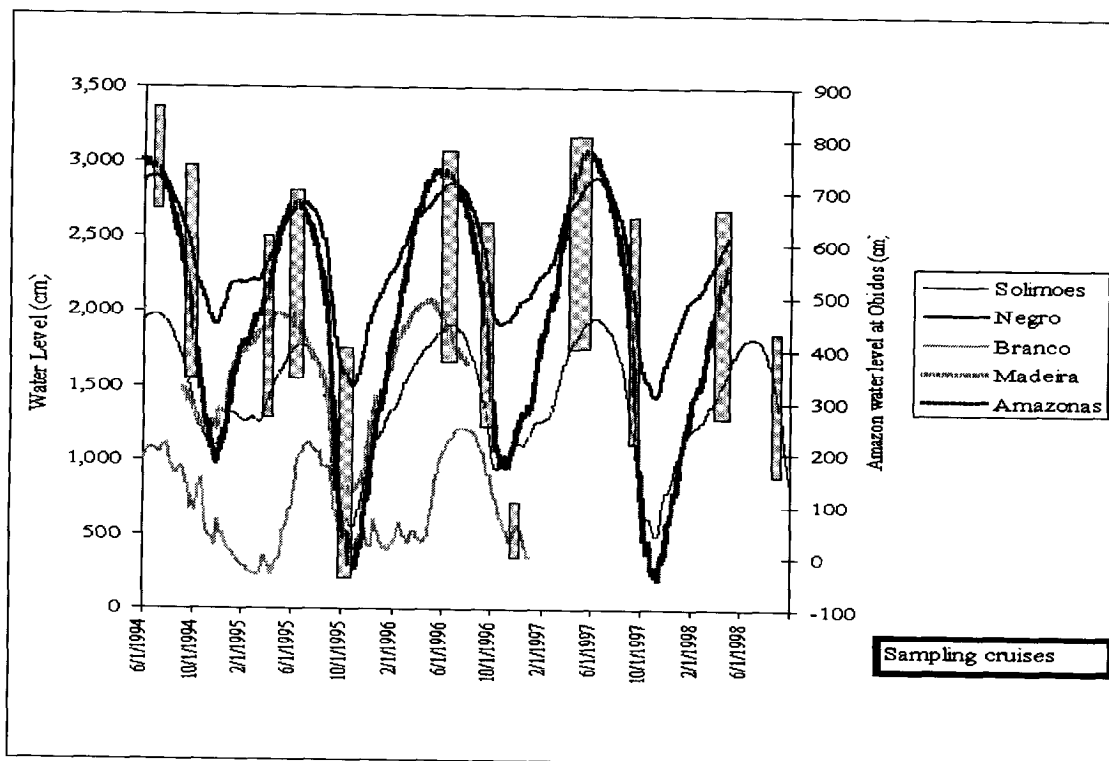


Figure 2: Localisation des campagnes de mesures sur le cycle hydrologique de l'Amazone et de ses principaux affluents.

trois grandes unités morpho-structurales héritées de l'histoire géologique du bassin : les boucliers, la chaîne des Andes et la plaine amazonienne, qui occupent respectivement 44%, 11% et 45% de la superficie totale du bassin versant.

Ce bassin, le plus important des bassins fluviaux en terme de surface drainée et de débit, couvre 6 112 000 km² (près de 5% des terres émergées) et apporte à l'Atlantique un volume d'eau de 209 000 m³/s (Molinier et al, 1997), ce qui représente environ 15% des apports hydriques aux océans. Ce bilan résulte de l'immensité de son bassin versant et de sa position géographique sur l'Equateur. La pluviosité moyenne annuelle est de 2460 mm (Molinier et al, 1997). La station d'Óbidos, station de référence des débits de l'Amazone et de cette étude est située immédiatement en amont de l'influence de la marée dynamique à environ 800 km de la côte Atlantique.

Les tributaires principaux de l'Amazone sont (Fig. 1):

le Rio Madeira et le Rio Solimões qui prennent naissance dans les Andes;

le Rio Negro et le Rio Trombetas dont l'origine se situe dans le domaine du bouclier guyanais;

le Rio Xingú et le Rio Tapajós provenant du bouclier brésilien.

Les principaux formateurs de l'Amazone présentent des caractéristiques hydrographiques et physico-chimiques liées aux grandes unités morpho-structurales traversées. Les deux fleuves d'origine andine (Rio Marañón/Solimões et Rio Madeira) signent leurs apports à l'Amazone par des eaux chargées en matières dissoutes et particulaires et un pH de 6.2-7.2; Le Rio Negro est caractérisé par ses eaux noires riches en matières organiques dissoutes et acides (pH ~ 4); les affluents dits "de couleur claire" (Trombetas, Tapajós, Xingú) s'écoulent sur des reliefs plus atténués et présentent des eaux peu turbides (Gibbs, 1967). La variabilité hydrologique saisonnière, amplifiée par l'étendue du bassin et le faible gradient topographique, génère des zones humides connexes aux fleuves (várzeas pour les cours d'eau andins, igapós pour les autres) dont l'étendue est estimée à 300 000 km² (Junk, 1997).

Méthode

L'échantillonnage a été réalisé au cours de 12 campagnes réalisées entre 1994 et 2000 (Fig. 2) sur la plupart des affluents de l'Amazone et sur son cours principal entre Manaus et Óbidos. Sur l'ensemble des cours d'eau échantillonnés les points de collecte correspondent généralement aux stations du réseau hydrométrique brésilien. A chaque station est effectuée une mesure du débit liquide obtenue par courantométrie Doppler (la précision sur les débits est de 5%) et des prélèvements d'eau pour l'analyse chimique. Pour le carbone organique les échantillons ont été filtrés à bord sur filtre Whatman GFF pré-pesé et préalablement décarbonaté (combustion à 450°). La fraction organique retenue sur le filtre est considérée conventionnellement comme particulaire (COP) et celle passant à travers les pores du filtre comme dissoute (COD). L'aliquote correspondant à l'analyse du carbone organique dissous (COD) est conservé jusqu'à l'analyse dans des flacons en borosilicate décontaminés en présence d'acide phosphorique. Ce traitement vise à maintenir l'intégrité de l'échantillon en stoppant l'activité bactérienne qui fait évoluer les teneurs en COD.

Les analyses de COD et de COP sont réalisées par combustion à haute température dans un four après décarbonatation. Un analyseur LECO CS 125 est utilisé pour la détermination du COP et un Shimadzu TOC-5000 pour celle du COD. La précision de la mesure est toujours inférieure à 5%.

La teneur en COP est exprimé en % de matière sèche (COP %).

Résultats

Pour plus de clarté les résultats sont présentés en fonction des sous-bassins étudiés.

Le sous-bassin du Rio Negro :

Originaire du bouclier guyanais, le Rio Negro a une superficie de 696 800 km² et un débit à sa confluence de 28 400 m³ s⁻¹ (Molinier et al, 1997). L'hydrogramme caractéristique présente une période de hautes-eaux entre mai et septembre (débit moyen Qm ~ 40 000 m³ s⁻¹) et une période de basses-eaux d'octobre à juin (Qm ~ 20 000 m³ s⁻¹), soit un facteur 2 entre ces deux périodes (Fig. 2). Les données de carbone organique obtenues au cours des différentes campagnes montrent le caractère très organique de ces eaux et la faible teneurs en MES (5 mg l⁻¹). Le carbone organique dissous, composés essentiellement d'acides humiques provient principalement du lessivage des podzols (Leenheer, 1980). Globalement les teneurs en COD varient corrélativement avec le débits. Le même schéma a été trouvé pour les variations de POC. Les concentrations en POC sont relativement faibles (moyenne = 0,86 mg C l⁻¹) en comparaison avec les autres affluents de l'Amazone (voir infra) et ne représente que 9% du carbone organique total. En % des matières en suspension les teneurs restent élevées, comprises entre 5,4 et 31,5 avec une moyenne de 13. La majeure caractéristique du Negro est la très forte proportion (90 %) de carbone transporté sous forme dissoute.

Bien que le Rio Branco appartienne au bassin du Rio Negro, c'est un fleuve dit "à eaux blanches" dont les caractéristiques sont liées à la physiographie de son bassin de drainage et à son couvert constitué de savane arborée. Le Rio Branco contribue fortement au flux de matière en suspension du Rio Negro, mais faiblement à l'apport en carbone organique. Les concentrations en POC sont comprises entre 0,31 et 2,67 mg l⁻¹ et suivent les variations saisonnières de MES. Le POC en proportion pondérale représente 5% des MES. Le COD est la fraction principale (80%) de carbone et les concentrations dissoutes varient le long du fleuve et au cours des saisons, avec un moyenne de 3,5 mg l⁻¹.

Le sous-bassin du Solimões:

Le bassin de Solimões est caractérisé par un bassin versant de 2 148 000 km² et un débit annuel moyen à Manacapuru de 103 000 m³.s⁻¹(Molinier et al, 1997). Trois campagnes de mesure ont été réalisées sur le Solimões et ses affluents, de Tabatinga située sur la frontière Colombie/Pérou/Brésil, à Manacapuru, près du confluent avec le Rio Negro (Fig 1). Les hautes eaux se situent entre mars et août (Qm ~120 000m³.s⁻¹), les basses eaux entre septembre et février (Qm ~ 82 000 m³.s⁻¹). Le Solimões est caractérisé par une forte concentration en MES (moyenne 81 mg.l⁻¹) dû à la forte activité érosive de ce fleuve dans la chaîne andine. Les concentrations de MES obtenues à la station de Manacapuru montre que le maximum de MES arrive entre les mois de février et avril soit 2 à 3 mois avant le maximum hydrologique et les plus faibles en juillet/août, 1 mois après les plus forts débits. Les valeurs en COP varient entre 0,60 et 2,16 mg.l-1 et coïncident avec la variation temporelle des MES . En ce qui concerne le COP %, il varie entre 0,6 en mars au moment des fortes teneurs en MES et 3,7 en juillet au moment ou les MES sont les plus faibles. La concentration moyenne de DOC est de 5,88 mg l-1 dans le Solimões. L'absence de données en juillet et août ne nous permet pas de savoir s'il existent un déphasage entre les maxima des teneurs et des débits. Dans le Solimões, comme dans le Negro, le DOC est la forme dominante de carbone organique et correspond à environ 76% du COT, tandis que la concentration moyenne de POC est de 1,19 mg l-1 et de 4,6% en pourcentage pondéral.

Le sous-bassin du Rio Madeira:

Le Rio Madeira est le premier affluent de l'Amazone en terme d'apports sédimentaire. Il draine une grande partie des Andes boliviennes par l'intermédiaire de ses deux affluents principaux, le Beni et le Mamore, puis une partie du bouclier brésilien et de la plaine amazonienne. A l'exutoire du bassin, sa superficie est de 1 420 000 km² pour un débit moyen

annuel de $31\,200\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. le Rio Madeira présente un régime saisonnier marqué par une période de hautes eaux de janvier à mai et une période de basse eaux de juillet à novembre. La concentration en MES varient fortement au cours d'un cycle hydrologique; les concentrations les plus élevées (jusqu'à environ 500 mg l^{-1}) ont été trouvées au cours de la campagne d'avril 1998 et les plus basses concentrations (environ 18 mg l^{-1}) en juin 1995. A l'exutoire, en coïncidence avec la variation des MES, les valeurs de COP varient entre 0,17 et $4,46\text{ mg.l}^{-1}$, respectivement en septembre et avril. En % les COP varient de 3, en juillet durant les basses eaux et 0,8 en avril au moment du maximum de MES. Concernant le COD, la concentration moyenne annuelle à l'exutoire est de $3,80\text{ mg.l}^{-1}$, ce qui représente 64 % de la charge de carbone organique transportée.

Les sous-bassins des Rio Tapajós, Xingú et Trombetas

Les affluents de l'Amazone aval drainant les boucliers guyanais et brésilien sont le Tapajós (superficie $490\,000\text{ km}^2$, débit moyen = $13\,500\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$), le Xingú (superficie $504\,300\text{ km}^2$, débit moyen $9\,700\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$) et le Trombetas (superficie $128\,000\text{ km}^2$, débit moyen $2\,555\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$). Ces fleuves sont caractérisés par des concentrations en MES proches de celles des fleuves à eaux noires (Rio Negro). Le Rio Tapajós a une concentration moyenne en MES de $7,2\text{ mg l}^{-1}$, des concentrations moyennes en COD de $4,2\text{ mg l}^{-1}$ et en COP % de 12,8. Les concentrations en MES et du COD sont du même ordre pour le Xingú. Dans le Trombetas, la concentration moyenne de MES est le $16,2\text{ mg l}^{-1}$, la concentration moyenne de COD de $5,5\text{ mg l}^{-1}$, la concentration moyenne de COP de $0,69\text{ mg l}^{-1}$ ce qui correspond à un pourcentage pondéral de 9,8. La production phytoplanctonique est généralement importante sur ces trois fleuves. Les concentrations organiques en carbone rencontrées dans le bassin amazonien sont dans la même gamme que celles obtenues pour les autres grands fleuves mondiaux (Meybeck, 1982; Ittekkot *et al.*, 1985; Spitzzy and Ittekkot, 1991; Zhang *et al.*, 1992; Meybeck, 1993; Seyler *et al.*, 1993) et pour les autres fleuves sud-américains tels que l'Orénoque (COD: $1,6\text{--}6,3\text{ mg l}^{-1}$ et POC: $0,46\text{--}4,79\text{ mg l}^{-1}$; Paolini, 1990), et le Paraná (COD: $9,3\text{ mg l}^{-1}$ et COP: $2,1\text{ mg l}^{-1}$; Depetris et Lenardon, 1982). La concentration moyenne pour l'ensemble des fleuves mondiaux serait de $5,8\text{ mg l}^{-1}$ en COD et de 1% en POC (Meybeck, 1982).

Discussion :

Les synthèses réalisées sur le transport du carbone organique par les fleuves (Degens, 1985 et références citées) et par l'Amazone en particulier (Guyot et Wasson, 1994, Richey, 1982, 1989, 1990) ont montré qu'un certain nombre de variables caractéristiques (altitude, climat, type de végétation, type de sols) et de processus internes au fleuve (Ertel *et al.*, 1986; Hedges *et al.*, 1994; Moreira-Turcq *et al.*, in press) permettait d'expliquer la distribution des concentrations en carbone organique. Nous discuterons plus particulièrement de l'influence des sols, du régime hydrologique et du celle liée aux échanges avec la zone d'inondation.

Influence du type de sols:

La matière organique des fleuves résulte d'une part de l'érosion, de l'altération et de la dégradation de la biomasse continentale (composante allochtone) et d'autre part de la présence d'organismes vivant dans la rivière (composante autochtone). Le carbone organique d'origine allochtone, issu des sols du bassin versant est lié chimiquement (plus ou moins fortement) à la matrice minérale et ces apports vont donc directement dépendre de la nature du sol. En zone tropicale amazonienne, deux grands types de sols sont observés: les sols ferrallitiques argileux (latosols) et les podzols sableux. Dans les terrains ferrallitiques argileux du bassin de l'Amazone, la matière organique est retenue et dégradée lentement dans les premiers centimètres de surface sous l'influence de l'activité microbienne et la vitesse de percolation est extrêmement lente (2 m.an^{-1} ; (Briand *et al.*, 1995). Ces caractéristiques permettent une décomposition poussée des composés organiques. A l'inverse, dans les podzols, l'eau s'infiltré très rapidement entraînant avec elle la matière organique peu dégradée jusqu'aux horizons profonds ou elle s'humifie

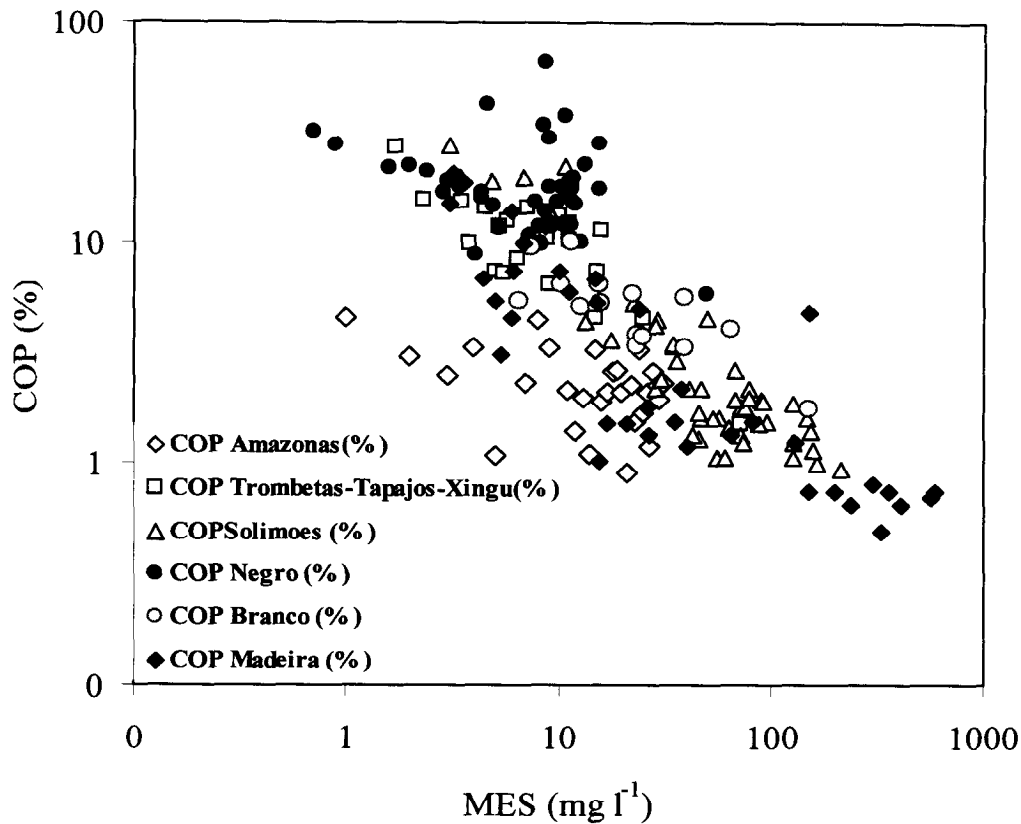


Figure 3: Relation entre les MES (mg l^{-1}) et les COP(%) de l'Amazonie et de ses principaux affluents.

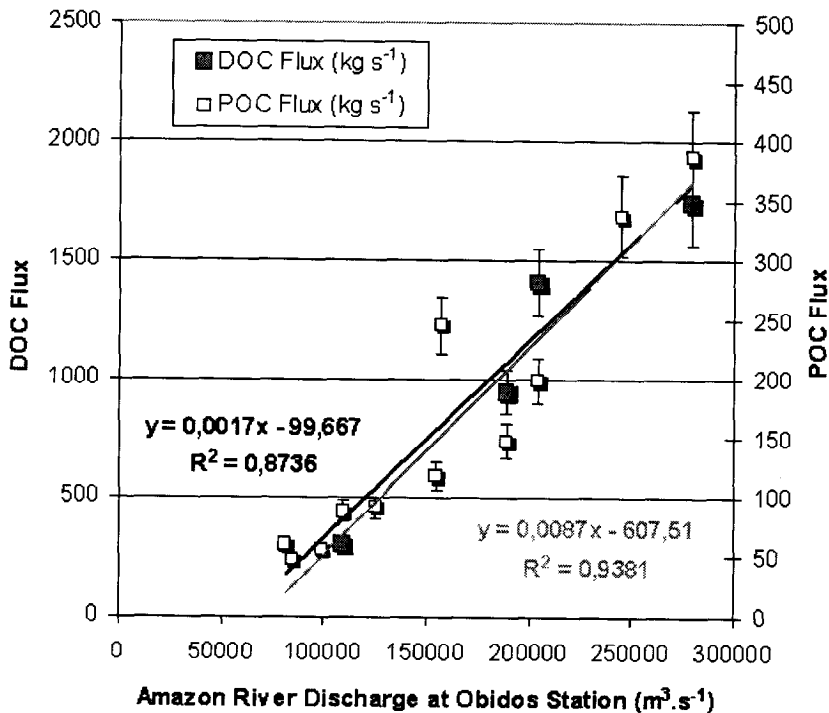


Figure 5: Relation entre les flux dissous (DOC flux) et particulaire (POC flux) et les débits de l'Amazonie à Obidos.

(Briand et al, 1995). En fonction du type de sols lessivés la nappe phréatique apporte au système fluvial des eaux fortement colorées par les composés organiques ou au contraire claires et peu concentrées en COD. Le rôle du type de sols est clairement mis en évidence sur les sous-bassins amazoniens étudiés. Ainsi les eaux du bassin du Rio Negro qui s'écoule principalement sur des sols podzoliques (Leenheer et Menezes Santos, 1980) présentent une concentration moyenne de COD de 10,25 mg.l⁻¹, alors que les fleuves Tapajós, Xingú et Trombetas qui coulent essentiellement sur des latosols ont des valeurs de COD comprises entre 3,40 et 5,75 mg.l⁻¹.

Impacts du cycle hydrologique:

Le modèle le plus commun observé dans la plupart de fleuves dans le monde (Ittekkot et al, 1985; Spitzky et Ittekkot, 1991; Telang et al, 1991), est une relation de type hystérésis entre les teneurs en POC et les débits. Ce type de fonctionnement, décrit de nombreuses fois dans la littérature est également valable pour l'Amazonie et ses tributaires. Lors de la montée des eaux, le lessivage des horizons superficiels humifères apportent au fleuve une forte quantité de MES et de COP. Au moment des plus forts débits, la capacité d'érosion augmentent moins vite que le volume d'eau écoulé et on assiste à un phénomène de dilution. Cette dilution s'accroît au cours de la décrue d'autant plus que les litières ont déjà été lessivées et que le ruissellement diminue. Ce fonctionnement n'est pas limité à la ceinture tropicale et a été observé dans d'autres régions du monde (Meybeck, 1982; Ittekkot et al, 1985; Spitzky et Ittekkot, 1991; Zhang et al, 1992; Meybeck, 1993; Telang et al, 1991, Kaplan et al, 1980).

La relation COP(%) –MES (Fig 3) montre une décroissance de la fraction organique contenue dans les suspensions lorsque les MES augmentent. Deux phénomènes concomitants peuvent expliquer cette décroissance: (i) l'augmentation de la charge turbide de la rivière limite ou stoppe la production primaire autochtone; (ii) cette augmentation "dilue" la charge particulaire organique de la rivière avec des MES surtout minérales (Ittekkot et al, 1985; Meybeck, 1982). Dans le bassin amazonien, les fortes teneurs en MES observées dans fleuves andins d'une part et l'acidité des eaux des fleuves de type Rio Negro d'autre part limitent très fortement l'activité phytoplanctonique, si bien que le premier processus invoqué doit avoir une influence modérée. Les tributaires amazoniens présentent tous ce même comportement, mais on peut distinguer sur la fig. 3 deux groupes de bassin en fonction du type d'érosion. Pour les fleuves fortement chargés (Madeira, Solimões, Branco) le processus d'érosion mécanique domine (MES fortes et COP(%) faible alors que pour les fleuves peu turbides (Negro, Tapajós, Xingú, Trombetas), le processus d'érosion chimique est prépondérant. L'Amazonie résultant du mélange de ces deux types présente un comportement intermédiaire.

Influence des várzeas:

Sur les Rio Madeira, Solimões et sur l'Amazonie-aval, on observe au cours de la phase de décrue, un deuxième maximum des concentrations en COD. Cette source additionnelle de COP qui ne peut être reliée à la phase de lessivage des sols est attribuée à l'apport des várzeas qui se vidangent dans le système fluvial pendant cette phase. La dynamique d'échange entre le cours principal de l'Amazonie et sa plaine d'inondation est relativement complexe puisqu'il dépend en premier lieu de la pente de la ligne d'eau du fleuve (qui varie au cours du cycle hydrologique) et de la géométrie des chenaux d'interconnexion fleuve-várzeas. Schématiquement la phase de "remplissage" devient significative 1 à 2 mois après le début de la montée des eaux et se poursuit au delà du maximum de crue tant que le niveau du fleuve est supérieur à celui de la várzea. Durant la phase de décrue, les várzeas restituent une eau plus chargée en carbone organique que celle au fleuve. Dans la partie aval de l'Amazonie, la phase de stockage a lieu de janvier à juillet et la phase de vidange d'août à novembre.

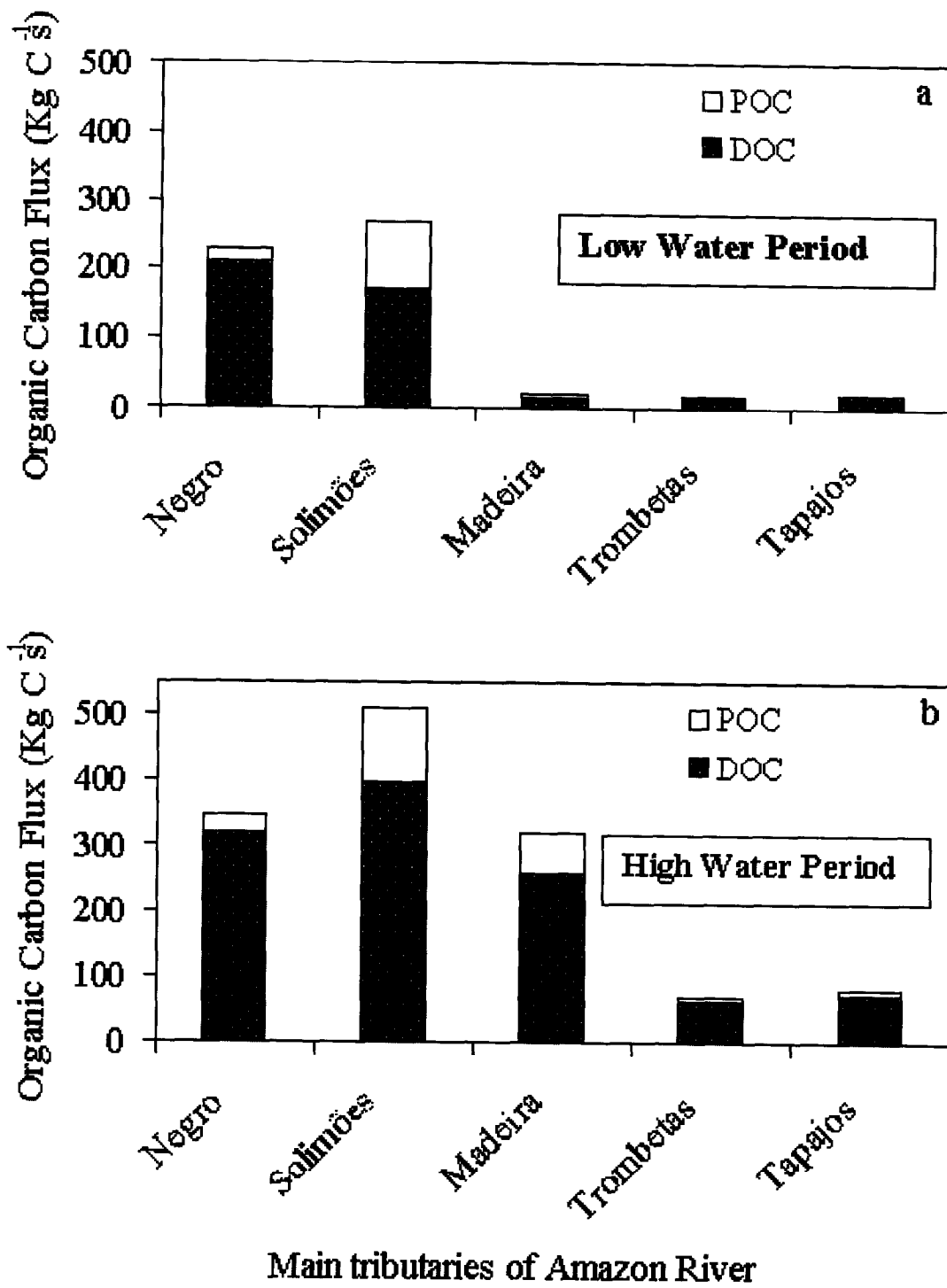


Figure 4: Flux de carbone dissous et particulaire (en kg C s⁻¹) des principaux tributaires de l'Amazone.

Bilan de carbone organique dans le bassin amazonien

A partir des moyennes établies pour chacun des affluents pour les périodes de d'été et de crues (Fig. 4), un bilan du COD et du COP a été calculé. Plusieurs remarques peuvent être faites:

Pour l'ensemble de tributaires, les flux de carbone dissous sont toujours supérieurs aux flux de carbone particulaire.

Quelque soit la phase hydrologique (crue ou étiage), le Solimões et le Negro contribuent majoritairement aux flux de carbone dissous et particulaire de l'Amazonie; pour les autres affluents, seul le Madeira a un apport significatif pendant la période de crue.

En bilan annuel, le Solimões et le Negro apportent chacun 40% du flux total de l'Amazonie à Óbidos, 14% de ce flux provient du bassin du Madeira et 6% des affluents drainant les zones de boucliers (Tapajós, Xingú).

A la station d'Óbidos, le flux de COD varie de 300 kg.s⁻¹ en étiage à 2200 kg.s⁻¹ en période de crue, et le flux de COP de 50 kg.s⁻¹ à 300 kg.s⁻¹ (Fig. 4).

La relation obtenue à Óbidos (Fig. 5) a été utilisée pour calculer les flux totaux de carbone de l'Amazonie (la station d'Óbidos est situé en amont de la confluence avec le Tapajós et Xingú, mais la contribution estimée de ces derniers est de 3 %). Pour le COD, l'apport de l' Amazonie est estimé à 26.9±3.0 Tg de C an⁻¹ et celui de COP à 5.8±0.3 Tg de C an⁻¹. Comparées aux valeurs obtenues par Richey et al (1990), notre estimation est inférieure pour le COP et supérieure pour le COD. Cette différence nous semble due essentiellement à l'utilisation de protocoles d'échantillonnage et de filtration différents dans les deux cas. En effet, Richey et al (1990) ont estimé un flux annuel de COT (COD + COP) de 36,7 Tg.an⁻¹, ce qui est remarquablement proche de la valeur que nous avons obtenue. Il ne semble donc pas que l'influence de la déforestation sur le bilan du carbone organique soit perceptible pour le moins à l'échelle spatiale de l'ensemble du bassin amazonien et pour une échelle de temps de l'ordre de la décennie.

En comparant la somme des flux des affluents principaux (Negro, Solimões, Madeira et dans une bien moindre mesure Trombetas) et le flux calculé à Óbidos, on observe une différence négative d'environ 4 Tg C an⁻¹ (28,7 Tg C an⁻¹ au lieu au 32,7 Tg C an⁻¹). Richey et al (1990) ont estimé que le bilan net de carbone provenant des lacs de la plaine d'inondation située entre Manacapuru et Óbidos était positif et compris entre 400 et 500 kg.s⁻¹ au cours de la période de décrue. Cet apport est largement suffisant pour expliquer le déficit en carbone que nous observons et nous suggérons que le flux manquant à Óbidos dans notre bilan est à attribuer aux apports des várzeas.

Basé sur cette étude et l'évaluation la plus récente de la quantité annuelle de carbone organique transportée dans des océans par les fleuves (500 10¹² g.y⁻¹, Spitzky et Ittekkot, 1991), l'Amazonie serait responsable de 8 à 10% des apports fluviaux de carbone organique à l'Océan.

Remerciements:

Cet travail a été soutenu par le programme HyBAm (Hydrologie et Géochimie du Bassin Amazonien) dans le cadre de l'accord de coopération entre le CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa Tecnológica - Brésil) et l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement - France).

Références

Bernoux M., Graça PMA., Cerri CC., Fearnside PM., Feigl BJ., Piccolo M. 2001. Carbon Storage in Biomass and Soils. In: The Biogeochemistry of the Amazon Basin .ME McClain, R.L. Victoria, JE Richey (Eds). Oxford, 365p.

Briand G., Scribe P, Pepe C, Saliot A., Maritti A., Bruchet A. 1995. Transfert de la matière organique des sols aux matières en suspension. In: Grands Bassins Fluviaux (Olivry JC. Et Boulègue J. (Eds). Orstom Editions, Paris, 405-419.

Depetris P, Lenardon AM. 1982. Particulate and dissolved phases in the Parana river. In: Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers. Part I (Degens ET, ed.) *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* **52**: 385-395.

Degens ET., Ittekkot V. 1985 Particulate organic carbon: an overview. In: Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers. Part 3 (Degens ET, ed.) *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* **58**: 7-27.

Ertel JR, Hedges JI, Devol AH, Richey JE, Ribeiro MNG. 1986. Dissolved humic substances of the Amazon River system. *Limnology Oceanography* **31**: (4): 739-754.

Fearnside J. 1997. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: net committed emissions. *Journal Of Climate Change* **35**: 321-360.

Gibbs, R.J. 1967. The geochemistry of the Amazon river system: Part I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended Solids. *Geological Society of America Bulletin* **78**:1203-1232.

Guyot JL, Wasson JG. 1994. Regional pattern of riverine dissolved organic carbon in the Amazon drainage basin of Bolivia. *Limnology Oceanography* **39**: (2): 452-458.

Hedges JI, Clark WA, Quay PD, Richey JE, Devol A, Santos U. 1986. Composition and fluxes of particulate organic material in the Amazon River. *Limnology Oceanography* **31**: (4): 717-738.

Hedges JI., Cowi, G, Richey JE, Quay PD., Benner R, Strom M, Forsberg BR. 1994. Origins and processing of organic matter in the Amazon River as indicated by carbohydrates and amino acids. *Limnology Oceanography* **39**: (4): 743-761.

Ittekkot V, Safiullah S, Mycke B, Seifert R. 1985. Seasonal variability and geochemical significance of organic matter in the River Ganges, Bangladesh. *Nature* **317**: (6040): 800-802.

Junk WJ. 1997. The Central Amazon Floodplain: Ecology of a pulsing system. *Ecological Studies* **126**. Springer-Verlag: Berlin; 525.

Kaplan LA, Larson RA, Bott TL. 1980. Patterns of dissolved organic carbon in transport. *Limnology Oceanography* **25**: 1034-1043.

Leenheer JA. 1980. Origin and nature of humic substances in the waters of the Amazon river basin. *Acta Amazonica* **10**: 513-526.

Leenheer JA, Menezes Santos U. 1980. Considerações sobre os processos de sedimentação na água preta acida do rio Negro (Amazônica Central). *Acta Amazonica* **10**: (2): 343-355.

Meybeck M. 1982. Carbon, nitrogen, and phosphorous transport by world rivers. *American Journal of Sciences* **282**: 401-450.

Meybeck M. 1993. Riverine transport of atmospheric carbon: sources, global typology and budget. *Water, Air and Soil Pollution* **70**: 443-463.

Molinier M, Guyot JL, Calde J, Guimaraes V, Oliveira E, Filizola N. 1997. Hydrologie du bassin amazonien. In *Environnement et développement en Amazonie brésilienne*, Thery, H. (ed.); Belin: Paris; 24-41.

Moreira-Turcq P, Seyler P, Guyot JL., Etcheber H. (in press). Nature and behaviour of organic matter in the mixing zone of black and white waters of Amazon River.

Mounier S, Braucher R, Benaim JY. 1998. Differentiation of organic matter's properties of the Rio Negro basin by cross flow ultra-filtration and UV-spectrofluorescence. *Water Research* **33**:(10): 2363-2373.

Paolini J. 1990. Carbono organico dissuelto y particulado en grandes rios de la America del Sur. *Interciencia* **15**: (6): 358-366.

Patel N, Mounier S, Guyot JL, Benamou C, Benaim JY. 1999. Fluxes of dissolved and colloidal organic carbon, along the Purus and Amazonas rivers (Brazil). *The Science of the Total Environment* **229**, 53-64.

- Quay PD., Wilbur DO, Richey JE., Hedges JJ., Devol AH., Victoria R. 1992. Carbon cycling in the Amazon River: implications from the ^{13}C compositions of particles and solutes. *Limnology Oceanography* **37**: (4): 857-871.
- Richey JR, Brock JT, Naiman RJ, Wissmar, RC, Stallard RF. 1980. Organic carbon: oxidation and transport in the Amazon River. *Science* **207**: 1348-1351.
- Richey JR. 1982. The Amazon River System: A Biogeochemical Model. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg*; **52**: 365-378.
- Richey JR, Mertes LAK, Dunne T, Victoria R, Forsberg BR, Tancredi ACFNS, Oliveira, E. 1989. Source and routing of the Amazon River flood wave. *Global Biogeochemical Cycles* **3**: (3):191-204.
- Richey JR, Hedges JJ, Devol AH, Quay PD, Victoria R, Martinelli LA, Forsberg BR. 1990. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. *Limnology Oceanography* **35**: 352-371.
- Seyler P, Etcheber H, Orange D, Laraque A, Sigha-Nkamdjou L, Olivry JC. 1993. Concentrations, fluctuations saisonnières et flux de carbone dans le Bassin du Congo. In: Grands Bassins Fluviaux (Olivry JC, Boulègue J eds.) ORSTOM Editions: Paris; 217-228.
- Spitzky A, Ittekkot V. 1991. Dissolved and particulate organic matter in rivers. In *Ocean Margin in Global Change*, Mantoura, R.F.C., Martin, J.M. and Wollast, R. (eds.), John Willey & Sons Ltd; 5-17.
- Telang SA, Pocklington R, Naidu AS, Romankevich EA, Gitelson II., Gladyshev MI. 1991. Carbon and Mineral Transport in Major North American, Russian Arctic, and Siberian Rivers: the St Lawrence, the Mackenzie, the Yukon, the Arctic Basin Rivers in the Soviet Union and the Yenisei. In *Biogeochemistry of Major World Rivers*, Degens ET, Kempe S, Richey JE. (eds.), John Willey & Sons Ltd; 75-104.
- Zhang S, Gan WB, Ittekkot V. 1992. Organic matter in large turbid rivers: the Huanghe and its estuary. *Marine Chemistry* **38**: 53-68.