

Fluctuations de la pluviosité, de l'écoulement et de la température sur le bassin de l'Amazonie et oscillations du climat global au cours du siècle écoulé

Yves Tardy, Jefferson Mortatti, Aristides Ribeiro, Reynaldo Victoria et Jean-Luc Probst

C.R. Acad. sci. Paris,
t. 318, série II,
p. 955 à 960,
1994

Résumé Au cours du siècle écoulé, le climat du monde a changé. La pluviosité sur les continents, le débit de l'ensemble des fleuves, la température globale et la teneur en CO₂ de l'atmosphère ont ensemble augmenté. Cependant, sur le bassin de l'Amazonie, l'examen des données existantes et l'estimation des données manquantes permettent de montrer qu'au cours du siècle écoulé, pendant 80 ans entre 1910 et 1990, la température a diminué, la pluviosité et le débit ont augmenté en montrant de fortes fluctuations. Le fait reconnu que l'évolution du climat global, sur l'ensemble des continents, devenu plus chaud et plus humide ne doit pas masquer les réalités suivantes : (1) l'amplitude des fluctuations est grande ; (2) les tendances régionales ne se produisent pas nécessairement dans le même sens que la tendance globale et (3) les fluctuations régionales et globales, bien que d'amplitude comparable et de périodicité semblable, ne sont pas synchrones.

Mots-clés : climat global, oscillations climatiques, hydrologie, Amazonie.

Y. T. : ORSTOM, CENA, av. Centenario, CP 96, 13400 Piracicaba SP, Brésil.
Adresse présente : Institut de Géologie, Université Louis Pasteur, Centre de Géochimie de la Surface, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex, France;

J. M., A. R. et R. V. : CENA, av. Centenario, CP 96, 13400 Piracicaba SP, Brésil;

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

Abstract **Rainfall, runoff and temperature fluctuations in the Amazon basin and oscillation of global climate over the last century**

Over the past century, the world's climate has been changing. The rainfall over the continents, the global stream water discharge, the global air temperature and the CO₂ content in the atmosphere have together been increasing. However, in the Amazon basin, examination of data existing and the estimation of missing data reveal that for about the past century, between 1910 and 1990, the air temperature has been decreasing, and the rainfall and the river discharge have been increasing but showing very large fluctuations. It is shown that the evolution of the global climate, over continents becoming warmer and wetter, should not mask the following realities: (1) amplitudes of fluctuations are large; (2) regional and global trends do not necessarily move in the same directions and (3) regional and global fluctuations, even if of similar amplitude and of equal periodicity, are not synchronous.

Keywords : global climate, climatic oscillations, hydrology, Amazon.

**Abridged
English
Version**

FOR the last century over 80 years, roughly between 1910 and 1990, the world climate has become warmer and wetter, while the CO₂ content in the atmosphere has been increasing significantly. Also the total river discharge has been rising, as the consequence of rainfall increase over the continents (but not necessarily over the oceans) (Probst

and Tardy, 1987, 1989; Tardy and Probst, 1992 *a* and *b*; Probst, 1992).

Numerous models or scenarios, used in attempts to predict what the world climate would be if the CO₂ content of the atmosphere doubled, yield an increase of the global air temperature of 2-5°C accompanying an augmenta-

Note

présentée par
Jean Dercourt.
remise le 19 juillet 1993,
acceptée après révision
le 11 février 1994.

tion of 20% of the global rainfall (Mitchell *et al.*, 1990).

Rainfall in the Amazon basin (4.169×10^6 km²) varies between 1,500 and 3,500 mm/year depending on the region and as an average between 1,700 and 2,700 mm/year, depending on the year. The average rainfall has been estimated variously to be close to 2,000 mm/year (Salati and Marques, 1984) and 2,200 mm/year (Mortatti *et al.*, 1985). In the city of Manaus, which is located close to the centre of the basin (figure 1), the rainfall is 2,200 mm/year (Ribeiro, 1991) and the average air temperature is 26.7°C. As the century has progressed since 1912 the air temperature has been fluctuating but decreasing while the rainfall variations present an average increasing trend (figure 2).

Monthly averages of rainfall in Manaus and of Amazon River discharge at Obidos are very well correlated if one adopts a dephasing of 3 months (figure 3), corresponding more or less to the residence time of rainwater in the basin. This relationship was used to estimate the missing values of discharge for the periods 1911-1928 and 1949-1969 (figure 4) and to confirm the results of Probst and Tardy (1987) established with another method. Despite large fluctuations, the Amazon River discharge has been increasing over the last 80 years, while the air temperature has been decreasing. Furthermore, the wettest years are also the coolest and the driest years are the warmest, relatively speaking.

At different time-scales, climatic fluctuations can occur along two different modes in such a way as to associate air temperature and rainfall oscillations (Tardy, 1986). The first, the

normal mode, is the most commonly found: warm periods are also wet and cool periods are also dry. The second, so called abnormal mode, is less frequently encountered: warm periods are also dry and cool periods are also wet. Secular tendencies and annual fluctuations—for most of 80 years considered—of global annual air temperature and global annual runoff belong to the normal mode: the beginning of this century was cooler and drier while the end of it was warmer and wetter; for 75% of the years considered, those which were warm were also wet and those which were cool were also dry (Probst and Tardy, 1989).

Conversely, for the remaining 25%, fluctuations of the global parameters belong to the abnormal mode. The same kind of relationship can be observed for temperature, rainfall and runoff in the Amazon basin where almost the whole of the 80 years considered also belongs to the abnormal mode: years which were warm were also dry whereas those which were cool were also wet. The secular tendencies of temperature, rainfall and runoff in the Amazon basin also belongs with the abnormal mode: the beginning of this century was warmer and drier, while the 1980s were cooler and wetter.

The periodicity of the Amazon discharge and the periodicity of the global runoff fluctuations are about the same (respectively 5.8 years and 5.1 years) while the periodicity of the sunspot activity (5.4 years) is between the two (Kayser *et al.*, 1990). However, minima and maxima do not correspond in time, so that fluctuations of the global runoff and of the Amazon water discharge are of the same periodicity, but are not synchronous; they are out of phase.

INTRODUCTION

Au cours du siècle écoulé, le climat du monde a – à première vue – changé. La teneur en CO₂ de l'atmosphère s'est accrue ; le globe terrestre, océans et continents réunis, s'est réchauffé (Houghton *et al.*, 1990) ; l'écoulement continental global a augmenté (Probst et Tardy, 1987 et 1989 ; Tardy et Probst, 1992 *a* et *b* ; Probst, 1992).

Le climat global, c'est-à-dire le climat du globe terrestre en entier, fluctue schématiquement selon deux modes principaux : un mode normal, plus fréquent, où les épisodes chauds et humides alternent avec les périodes froides et sèches et un mode anormal, moins fréquent, où alternent les épisodes chauds et secs et les périodes froides et humides (Tardy, 1986).

Manifestement, l'augmentation conjointe de la température globale de l'air et de

l'écoulement sur l'ensemble des continents est volontiers considérée comme une tendance du climat global actuel, sur le mode normal. L'augmentation de la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère est généralement regardée comme l'une des causes possibles de ces évolutions conjointes, au demeurant bien marquées à l'échelle du siècle écoulé (Houghton *et al.*, 1990; Folland *et al.*, 1990; Mitchell *et al.*, 1990).

Cependant si tendance il y a, celle-ci est masquée par d'importantes fluctuations dans le temps et de grandes variations dans l'espace. C'est ce que montrent les variations de l'humidité et de la température de l'air tant sur l'ensemble des continents que sur le bassin de l'Amazone, en Amérique du Sud, choisi ici comme un exemple représentatif du particularisme régional.

I. FLUCTUATIONS DU CLIMAT GLOBAL DEPUIS 100 ANS

Les variations de la teneur en CO₂ de l'atmosphère (Keeling *et al.*, 1982), de la température globale de l'air (Hansen et Lebedeff, 1987; Jones *et al.*, 1986 *a* et *b*; Jones, 1988) et de l'écoulement continental global (Probst et Tardy, 1987) (somme du débit de l'ensemble des fleuves du monde) montrent que la tendance séculaire des principaux paramètres du climat (humidité et température de l'air) se fait sur le mode normal. Cependant si, en tendance, l'écoulement continental global et la température globale de l'air augmentent ensemble, des fluctuations importantes (de l'ordre de 30%) apparaissent autour des courbes moyennes. Dès lors, il est intéressant de remarquer qu'au cours du siècle écoulé, 3 années sur 4 montrent des oscillations qui se produisent aussi sur le mode normal (année chaude et humide ou année froide et sèche), tandis qu'environ une année sur quatre se range dans la catégorie des fluctuations qui suivent le mode anormal (année chaude et sèche ou année froide et humide) (Probst et Tardy, 1989).

Les oscillations sur le mode normal, montrées ici à l'échelle séculaire, sont également marquées à différentes échelles de temps: Holocène, Quaternaire, Tertiaire et Phanéro-

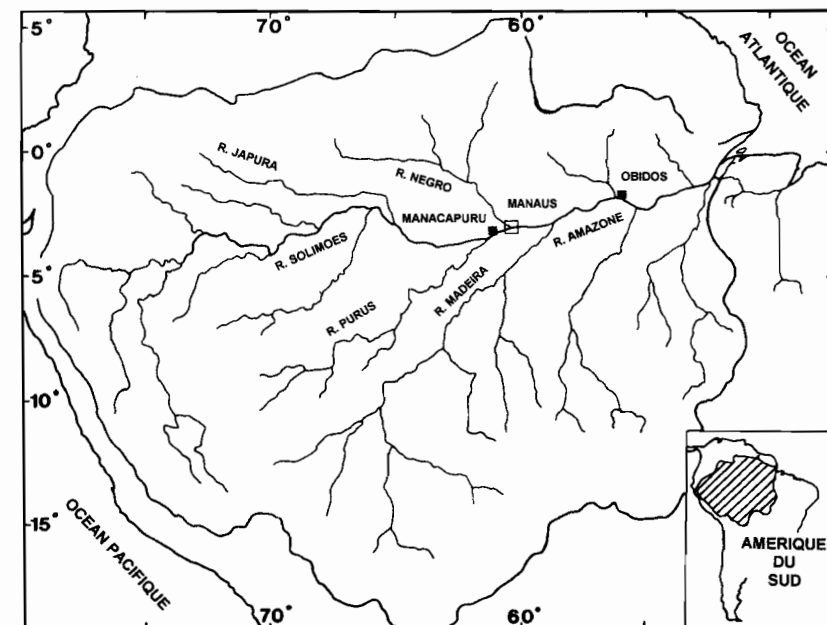


Figure 1 Carte de situation géographique du bassin versant de l'Amazone et position des différentes stations de mesure.

Amazon river basin and location of the different measurement stations.

zoïque (Petit-Maire, 1992; Lorius *et al.*, 1979; Barnola *et al.*, 1987; Neftel *et al.*, 1982; Berner *et al.*, 1983).

La tendance séculaire à l'augmentation conjointe du débit continental global et de la température globale est, en fait, la résultante d'importantes fluctuations annuelles ou pluriannuelles qui ne se produisent pas systématiquement dans le même sens. Le signal climatique global apparaît donc sensible à l'effet d'échelle de temps. Il est aussi sensible à un effet d'échelle d'espace.

II. FLUCTUATIONS HYDROCLIMATIQUES SUR LE BASSIN DE L'AMAZONE

Le bassin de l'Amazone est situé de part et d'autre de l'Équateur (**figure 1**). A la station d'Obidos, proche de l'exutoire, la superficie est de 4,619.10⁶ km² (Denaee, 1987). La pluviosité moyenne annuelle varie entre 1 500 et 3 500 mm/an au sein de l'Amazonie; elle est donc difficile à estimer pour l'ensemble du bassin. Les valeurs moyennes d'ensemble se rangent selon les auteurs entre 2 000 mm/an (Salati et Marques, 1984) et 2 200 mm/an (Mortatti *et al.*, 1985).

Or il se trouve que la ville de Manaus, située au centre du bassin, a reçu pendant le siècle écoulé une quantité de précipitation

Figure 2 Fluctuations de la température moyenne annuelle de l'air et des précipitations moyennes annuelles à Manaus au cours de la période 1912-1984.

Fluctuations of mean annual air temperature and mean annual rainfall at Manaus during the period 1912-1984.

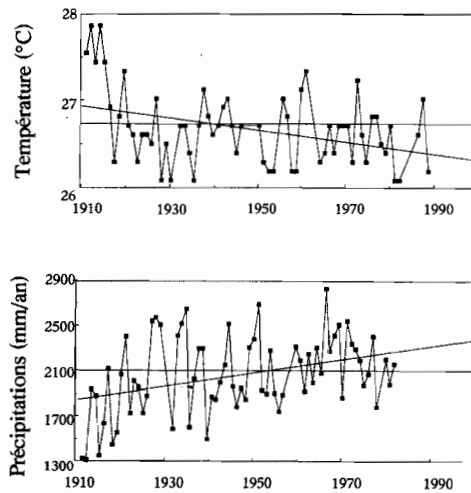
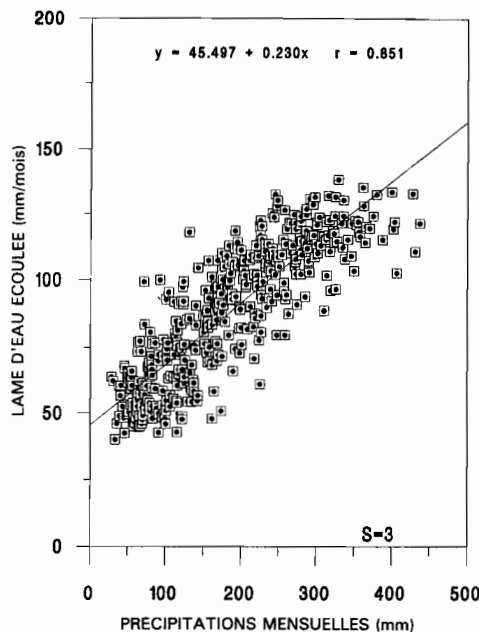


Figure 3 Relations entre la pluviométrie mensuelle à Manaus et le débit moyen mensuel de l'Amazone à Obidos. Moyennes mobiles sur 3 mois reportées avec un décalage de 3 mois pour le débit.

Relationships between the monthly rainfall at Manaus and the mean monthly discharge of the Amazon at Obidos. Moving averages on 3 months with a discharge lag of 3 months.



proche de 2 200 mm/an. La pluviométrie moyenne annuelle des années 1911-1985 est de 2 110 mm/an, tandis que la température moyenne annuelle de l'air est de 26,7°C. Pendant cette période, comme le montrent les résultats de la figure 2, la température diminue, mais la pluviométrie augmente (Ribeiro, 1991).

Par ailleurs, les débits mensuels de l'Amazone à Obidos ont été mesurés par la Denaece entre 1928 et 1947 ainsi qu'entre 1969 et 1984 (Unesco, 1971, 1974, 1979 et 1985). Les me-

sures entre 1911 et 1929 et entre 1947 et 1970, correspondant à 41 ans, manquent.

Jusqu'à ce jour, on disposait de deux estimations des débits de l'Amazone couvrant l'ensemble des 74 ans entre 1911 et 1985. La première, celle de Probst et Tardy (1987) est basée sur les corrélations entre les débits mesurés à Obidos et une estimation de la pluviométrie moyenne du bassin de l'Amazone, obtenue en pondérant les résultats des précipitations récoltées sur sept stations distribuées sur l'ensemble du bassin. Ces estimations ont permis de montrer par la suite que le débit, en fluctuant beaucoup, avait augmenté en moyenne au cours du siècle écoulé (Nkounkou, 1989; Probst, 1992; Tardy et Probst, 1992 a et Probst *et al.*, 1994). L'autre estimation, celle de Richey *et al.* (1989), est basée sur les corrélations entre le débit du Rio Solimoès à Manacapuru, le débit du Rio Negro à Manaus (pour les années manquantes) et le débit de l'Amazone à Obidos. Les résultats obtenus paraissent indiquer que, malgré d'importantes fluctuations, le débit reste constant et ne montre manifestement pas d'augmentation semblable à celle qui a été mise en évidence précédemment. La différence vient vraisemblablement du fait que la station de Manacapuru est située trop en amont pour refléter les nuances du climat de l'ensemble du bassin. En effet, les deux plus grands tributaires de l'Amazone, le Rio Madeira et le Rio Negro rejoignent le cours principal à l'aval de cette station. A Obidos, près de l'embouchure, tous les tributaires importants ont donc rejoint le cours principal.

Pour départager ces deux résultats, une troisième évaluation a été menée en utilisant des moyennes mensuelles de la pluviométrie à Manaus.

III. NOUVELLE ESTIMATION DES FLUCTUATIONS DE DÉBIT DE L'AMAZONE AU COURS DES 100 DERNIÈRES ANNÉES

Pour l'ensemble des 408 mesures mensuelles, réparties sur 34 ans, on a établi les relations existantes entre la pluviométrie enregistrée à Manaus et le débit mesuré à Obidos. La meilleure corrélation est obtenue, lorsque l'on adopte un déphasage de 3 mois corres-

pendant au temps de résidence de l'eau précipitée sur le bassin. La corrélation s'améliore encore, lorsque l'on remplace les données brutes par la moyenne mobile sur trois mois de la pluviosité mensuelle (figure 3).

On parvient de la sorte, à partir des données de pluviosité, à estimer les données de débits manquantes pour les années 1911-1928 et 1949-1969, et à reconstituer les fluctuations de débits de l'Amazonie sur la totalité de la période 1912-1984. Les données brutes et les moyennes mobiles du débit annuel montrent toutes deux une même tendance à l'augmentation, assortie cependant de très fortes fluctuations (figure 4).

À l'échelle de l'année, il arrive que le débit de l'Amazonie et le débit continental global ensemble augmentent (1927, 1950, 1970) ou ensemble diminuent (1935, 1945). Dans d'autres cas, les débits fluctuent en sens contraire. Ils sont relativement plus forts sur l'ensemble du monde et relativement plus faibles sur l'Amazonie pendant les années 1916-1917 et 1959-1960 par exemple; ou, au contraire des précédentes, les années 1920-1921 par exemple sont relativement plus sèches sur l'ensemble des continents et relativement plus humides sur l'Amazonie. L'effet d'échelle spatiale apparaît donc essentiel.

Par ailleurs, l'analyse spectrale des débits de l'Amazonie et de l'ensemble des fleuves du monde réunis montre que les périodicités dégagées sont de 5,8 ans pour l'Amazonie et 3,0, 5,1 et 12,5 ans pour le drainage continental global (Kayser et al., 1990). Ces périodicités correspondent assez bien avec celles de l'activité solaire (3,3, 5,4 et 10,5 ans).

CONCLUSION

Les oscillations du débit de l'Amazonie et celles de l'écoulement continental global sont grandes, mais les amplitudes de ces fluctuations sont du même ordre de grandeur

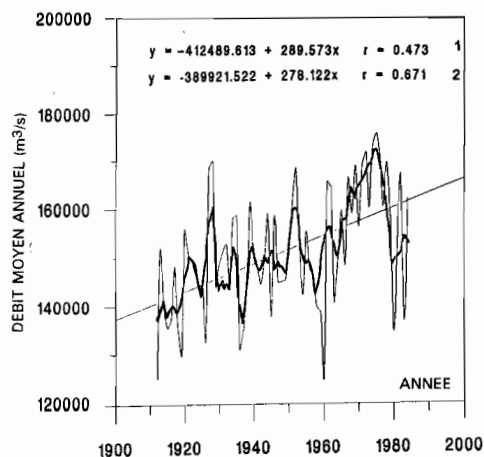


Figure 4 Reconstitution des variations de débits de l'Amazonie à Obidos pour la période 1912-1984 (équation 1). Courbe épaisse = moyennes mobiles sur 3 mois (équation 2).

Reconstitutions of the Amazon discharge fluctuations at Obidos for the period 1912-1984 (equation 1). Thick curve = 3 year moving average (equation 2).

(30% environ). En effet, le débit moyen annuel de l'Amazonie varie entre 125 et 175.10³ m³/s et l'écoulement continental global varie entre 110 et 150.10⁴ m³/s. On montre que, malgré ces fluctuations de forte amplitude, la pluviosité sur l'ensemble de l'Amazonie et le débit du plus grand fleuve du monde (12% de l'écoulement total) ont augmenté au cours du siècle écoulé. Entre 1911 et 1985, le débit de l'Amazonie présente donc la même tendance séculaire que l'écoulement global.

Si, pour l'ensemble du monde, la température a augmenté, elle a, pour l'Amazonie, diminué.

Ainsi, pour l'ensemble des continents, l'augmentation conjointe de l'humidité et de la température se fait sur le mode normal. En revanche, en Amazonie, l'augmentation de l'humidité et la diminution de température se font sur le mode anormal de Tardy (1986).

À l'échelle globale, les deux paramètres essentiels du climat ont augmenté ensemble. À l'échelle régionale, ces deux paramètres ont pu fluctuer en sens inverse. À une tendance générale du climat global correspondent des tendances régionales, tantôt dans le même sens, tantôt en sens contraire, toujours variables d'une région à l'autre.

Ce travail a été mené dans le cadre du programme PIRAT INSU-ORSTOM.

BARNOLA, J. M., RAYNAUD, D., KOROTKEVITCH, Y. S. et LORIUS, C., 1987. Vostok ice core: a 160,000 year records of atmospheric CO₂, *Nature*, 329, p. 408-414.

BERNER, R. A., LASAGA, A. et GARRELS, R. M., 1983. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric CO₂, *Amer. J. Sci.*, 283, p. 641-683.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DENAE, 1987. Inventorio das estacoes fluviometricas. Ministerio das Minas e Energia, MME, Dept. Nac. de Agua e Energia. Eletrica, 100 p.
- FOLLAND, C. K., KARL, T. R. et VINNIKOV, K. Y., 1990. Observed climate variations and change. In: *Climate Change*, HOUGHTON, J. J., et al., éd., Cambridge University Press, p. 194-238.
- HANSEN, J. E. et LEBEDEFF, S., 1987. Global trends of measured surface air temperature, *J. Geophys. Res.*, 92, p. 13345-13372.
- HOUGHTON, J. T., JENKINS, G. J. et EPHRAUMS, J. J., 1990. *Climate Change*, Cambridge University Press, 365 p.
- JONES, P. D., 1988. Hemispheric surface air temperature variations: recent trends and an update to 1987, *J. Clim.*, 1, p. 654-660.
- JONES, P. D., WIGLEY, T. M. L. et WRIGHT, P. B., 1986 a. Global temperature variations between 1861 and 1984, *Nature*, 322, p. 430-434.
- JONES, P. D., RAPER, S. C. B., BRADLEY, H. F., DIAZ, H. F., KELLY, P. M. et WIGLEY, T. M. L., 1986 b. Southern hemisphere surface air temperature variations 1851-1984, *J. of climate and applied meteorology*, 25, p. 1213-1230.
- KAYSER, N., PROBST, J. L., CADET, D. et TARDY, Y., 1990. Propagation des ondes de sécheresse et d'humidité à travers le monde, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 310, série II, p. 757-763.
- KEELING, C. D., BACASTOW, R. B. et WHORF, T. P., 1982. Measurements of the concentration of carbon dioxide at Mauna Loa observatory, Hawaii, In: *Carbon dioxide review*, CLARCK, W. C., éd., Oxford University Press, p. 377-385.
- LORIUS, C., MERLIVAT, L., JOUZEL, J. et POURCHET, A., 1979. A 30,000 years isotope climatic record for Antarctic ice, *Nature*, 280, p. 644-648.
- MITCHELL, J. F. B., MANABE, S., MELESHKO, V. et TOKIOKA, T., 1990. Equilibrium climate change and its implications for the future, In: *Climate Change*, HOUGHTON, J. T., et al., éd., Cambridge University Press, p. 131-172.
- MORTATTI, J., SALATI, E., VICTORIA, R. L. et RIBEIRO, M. N. G., 1985. Analysis of the isotopic behaviour of hydrogen and oxygen of water in the main channel of the river Solimoes/Amazon, *Mitt. Geol. Paleont. Inst. univ. Hamburg*, Scope/Unep Sonderband Heft 58, p. 259-266.
- PETIT-MAIRE, N., 1992. Sur l'avenir dans les archives géologiques, *La Recherche*, 243, Paris, p. 566-569.
- NEFTEL, A., OESCHGER, J., SCHWANDER, J., STAUFFER, B. et ZUMBRUNN, R., 1982. Ice core samples measurements give atmospheric CO₂ content during the past 40,000 years, *Nature*, 295, p. 220-223.
- NKOUNKOU, R. R., 1989. Hydrogéodynamique actuelle du Congo, et de l'Amazonie. Cycle global de l'eau et bilan de l'érosion au cours des temps phanérozoïques (dernier 600 millions d'années), *Thèse*, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 183 p., déposée à la Société géologique de France.
- 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, *Mémoires Sci. Géol.*, 94, Strasbourg, 161 p.
- PROBST, J. L. et TARDY, Y., 1987. Long range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century, *Journal of Hydrology*, 94, p. 289-311.
- PROBST, J. L. et TARDY, Y., 1989. Global runoff fluctuations during the last 80 years in relation to world temperature change, *Amer. J. of Science*, 289, p. 267-285.
- PROBST, J. L., MORTATTI, J. et TARDY, Y., 1994. Carbon river fluxes and weathering CO₂ consumption in the Congo and Amazon river basins, *Applied geochemistry*, 9, p. 1-13.
- RIBEIRO, A. Analise das variacoes climaticas observadas na regio de Manaus (Amazonia), *These mestrado en Agronomia, ESALQ, Piracicaba, Brésil*, 113 p.
- RICHEY, J. E., NOBRE, C. et DESER, C., 1989. Amazon river discharge and climate variability: 1903 to 1985, *Science*, 246, p. 101-103.
- SALATI, E. et MARQUES, J., 1984. Climatology of the Amazon region. In: *The Amazon limnology and Landscape Ecology of a mighty tropical river*, SIOLI, H., éd., Dr W. Junk Publishers, Dordrecht, p. 85-126.
- TARDY, Y., 1986. *Le cycle de l'eau, Climats, paléoclimats et géochimie globale*, Masson, Paris, 338 p.
- TARDY, Y. et PROBST, J. L., 1992 a. Sécheresses, crises climatiques et oscillations téléconnectées du climat depuis cent ans, *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 3, p. 25-36.
- TARDY, Y. et PROBST, J. L., 1992 b. Sécheresses et crises climatiques, *Encyclopaedia Universalis, Universalis 92*, p. 167-174.
- UNESCO, 1971, 1974, 1979, 1985. *Discharge of selected rivers of the world*, III, part I, II, III, IV, Unesco, Paris.