

## EROSION CHIMIQUE DU BASSIN VERSANT DU CONGO : VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES FLUX DE CO<sub>2</sub> CONSOMME PAR ALTERATION DE LA CROUTE CONTINENTALE

P. AMIOTTE SUCHET & J. L. PROBST

### RESUME

Pour étudier les variations spatio-temporelles de la consommation de CO<sub>2</sub> d'origine atmosphérique par érosion chimique des roches sur le bassin du Congo, deux approches sont utilisées dans ce travail. Les variations temporelles des flux de CO<sub>2</sub> sont déterminées en appliquant un modèle de décomposition des flux d'élément majeurs (modèles MEGA) exportés par le Congo et l'Oubangui. Pour étudier les variations spatiales des flux de CO<sub>2</sub>, nous avons utilisé un modèle global d'érosion (GEM-CO<sub>2</sub>) qui permet d'établir une cartographie des flux de CO<sub>2</sub> consommés. Les deux approches donnent des résultats tout à fait comparables quant à l'estimation du flux moyen annuel de CO<sub>2</sub> consommé sur le bassin du Congo; celui-ci varie entre 60 10<sup>3</sup> moles/km<sup>2</sup>.an (modèle MEGA) et 65 10<sup>3</sup> moles/km<sup>2</sup>.an (modèle GEM-CO<sub>2</sub>). Ce flux de CO<sub>2</sub> constitue 75 à 80% du flux total de bicarbonates déterminé à l'exutoire du bassin. En outre, les résultats du modèle MEGA montrent que près du tiers des flux molaires d'éléments majeurs dissous issus de l'érosion chimique proviennent de l'altération des minéraux par d'autres acides que H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, acides qui sont probablement organiques. Les variations saisonnières des flux de CO<sub>2</sub> consommé sont principalement contrôlées par les débits. Sur le bassin de l'Oubangui, les mois de basses eaux sont également des mois de faible consommation de CO<sub>2</sub>, alors que le flux de CO<sub>2</sub> consommé est maximum en période de hautes eaux. Par contre, sur le bassin du Congo, les variations saisonnières des flux de CO<sub>2</sub> évoluent plutôt en opposition de phase par rapport à celles du débit. Enfin, les résultats du modèle GEM-CO<sub>2</sub> montrent que l'essentiel des flux de CO<sub>2</sub> est consommé au niveau d'une bande de 10° de latitude environ, centrée sur l'équateur.

**ABSTRACT :CHEMICAL EROSION IN THE CONGO RIVER BASIN: SPATIAL AND  
TEMPORAL VARIABILITY OF CO<sub>2</sub> FLUXES CONSUMED BY  
CONTINENTAL CRUST WEATHERING.**

In order to study the spatial and temporal variations of atmospheric CO<sub>2</sub> consumption by chemical erosion of rocks in the Congo basin, two methods have been used in this work. Temporal variations have been determined applying a geochemical model (MEGA) on the dissolved major element fluxes transported by the Congo and the Ubangui rivers. Spatial variations have been studied using a Global Erosion Model (GEM-CO<sub>2</sub>) which allows to establish a map of CO<sub>2</sub> consumption. The two approaches provide very close results concerning the mean annual CO<sub>2</sub> fluxes: 60 10<sup>3</sup> moles.km<sup>-2</sup>.y<sup>-1</sup> (model MEGA) to 65 10<sup>3</sup> moles.km<sup>-2</sup>.y<sup>-1</sup> (model GEM-CO<sub>2</sub>) for the Congo river. This flux supplies 75 to 80% of the total bicarbonate flux exported by the Congo river. Moreover, the results given by the MEGA model show that about one third of the molar fluxes of dissolved major elements coming from chemical erosion, are probably supplied by organic acid weathering reactions. Seasonal variations of CO<sub>2</sub> fluxes are mainly controlled by runoff fluctuations. In the Ubangui basin, low flow periods are also low CO<sub>2</sub> consumption periods, whereas, CO<sub>2</sub> fluxes are high during high flow periods. Inversely, in the Congo basin, the seasonal variations of CO<sub>2</sub> fluxes and drainage intensity are opposite. Finally, the results of the GEM-CO<sub>2</sub> model show that atmospheric CO<sub>2</sub> is mainly consumed of both side of the equator, between latitude 5° north and 5° South.

### 1. INTRODUCTION

L'altération chimique des roches est essentiellement le fait de l'attaque des minéraux par l'acide carbonique. Ce dernier est indirectement issu du CO<sub>2</sub> atmosphérique, via la photosynthèse puis la dégradation de la matière organique dans les sols. C'est pourquoi on parle plus généralement de consommation de CO<sub>2</sub> atmosphérique par érosion chimique des roches. Le CO<sub>2</sub> dissous, qui est impliqué dans les réactions d'altération, se retrouve alors dans les eaux de drainage puis il est

exporté par les fleuves vers les océans, principalement sous forme d'ions bicarbonates. En outre, les ions  $\text{HCO}_3^-$  proviennent également de la dissolution des minéraux carbonatés. C'est ainsi que la quantité de  $\text{CO}_2$  d'origine atmosphérique consommé par érosion chimique sur un bassin versant peu être estimée à partir du flux d'ions  $\text{HCO}_3^-$  exporté par les eaux de drainage en utilisant des méthodes qui permettent de distinguer la proportion de  $\text{CO}_2$  atmosphérique dans le flux total de bicarbonates.

L'altération chimique des continents a joué un rôle important dans la régulation des teneurs en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère au cours des temps géologiques (WALKER ET AL., 1981; BERNER ET AL., 1983 ; BERNER, 1991). Actuellement, le flux moyen de  $\text{CO}_2$  atmosphérique consommé par l'érosion chimique est estimé entre 0,28 et 0,30  $10^{15}$  g de carbone par an (0,26 à 0,30 GtC/an) (BERNER ET AL., 1983 ; MEYBECK, 1987; PROBST, 1992 ; AMIOTTE SUCHET, 1994). A ce flux, qui rejoint les océans via les fleuves sous forme d'ions bicarbonates, il faut ajouter les flux de carbone organique dissous et particulaire transportés par les fleuves (0,33 GtC/an, DEGENS ET AL., 1991, à 0,40 GtC/an; MEYBECK, 1992). Au total, ces flux d'origine atmosphérique et biogénique représentent 0,6 à 0,7 GtC/an. Les principaux facteurs qui contrôlent le flux de  $\text{CO}_2$  consommé par altération chimique continentale sont le drainage, la température de l'air (GARRELS ET MACKENZIE, 1971 ; HOLLAND, 1978 ; BERNER ET AL., 1983 ; TARDY, 1986 ; MEYBECK, 1987 ; AMIOTTE SUCHET ET PROBST, 1992 ; PROBST, 1992 ; PROBST ET AL., 1992a ; AMIOTTE SUCHET, 1994) et l'abondance des roches carbonatées affleurant à la surface des continents (PROBST ET AL., 1994).

Sur le bassin versant du Congo, les études déjà réalisées permettent de chiffrer le flux de carbone minéral dissous à environ 3  $10^6$  t/an (PROBST ET AL., 1992) et le flux de carbone organique à 14  $10^6$  t/an dont près de 80% est sous forme dissoute (NKOUNKOU ET PROBST, 1987; MARTINS ET PROBST, 1991).

Les flux moyens annuels de  $\text{CO}_2$  consommés ont déjà été estimés de différentes façons par NKOUNKOU ET PROBST (1987) et PROBST ET AL. (1994). Les premiers ont estimé le flux de  $\text{CO}_2$  consommé sur le bassin du Congo sur la base d'un bilan de l'altération chimique des roches affleurant sur le bassin. En effet, ils ont déterminé la composition chimique moyenne des eaux drainant les trois principaux types de roche (cristallines, gréseuses-sableuses et carbonatées) d'après des données de CLERFAYT (1956) et SYMOENS (1968) sur les concentrations en éléments majeurs sur des petits bassins versants monolithologiques du bassin du Congo. Le drainage correspondant à chacun des types de roche a également été estimé. NKOUNKOU ET PROBST (1987) ont alors déterminé les flux d'éléments majeurs en solution provenant de l'érosion chimique de ces trois types de roche et ont fait le bilan du  $\text{CO}_2$  consommé en considérant que la totalité des ions bicarbonates sont d'origine atmosphérique dans les eaux drainant les roches non carbonatées, et que la moitié seulement sont d'origine atmosphérique dans les eaux drainant les roches carbonatées. De cette manière, le flux de  $\text{CO}_2$  consommé par érosion chimique sur le bassin du Congo est estimé en moyenne à 115  $10^9$  moles/an, soit 76% du flux total de bicarbonates exportés par le Congo.

PROBST ET AL. (1994) proposent une nouvelle estimation du flux de  $\text{CO}_2$  consommé sur les bassins du Congo et de l'Oubangui, en déterminant la part d'ions bicarbonates provenant de l'altération des carbonates, sur la base d'un modèle géochimique. Ils estiment alors le flux de  $\text{CO}_2$  consommé sur les bassins de l'Oubangui et du Congo à 37 et 208  $10^9$  moles/an respectivement, soit 75,2% et 74,7% du flux total de bicarbonates. Pour le bassin de l'Oubangui, cette contribution confirme l'apport de la dissolution des roches carbonatées au flux total de bicarbonates (paléo-cryptokarsts signalés par BOULVERT ET SALOMON, 1988).

L'objectif de cette étude est d'étudier les variations spatio-temporelles de la consommation de  $\text{CO}_2$  sur les bassins du Congo et de l'Oubangui. Les variations temporelles des flux de  $\text{CO}_2$  seront déterminées en appliquant un modèle géochimique de décomposition des flux d'éléments majeurs exportés par le Congo et l'Oubangui (modèle MEGA: Major Element Geochemical Approach). Pour étudier la variabilité spatiale de la consommation de  $\text{CO}_2$ , nous avons utilisé un modèle global d'érosion: le modèle GEM- $\text{CO}_2$  (Global Erosion Model for  $\text{CO}_2$  fluxes), basé sur un ensemble de relations empiriques entre le flux de  $\text{CO}_2$  consommé et l'intensité du drainage pour les principaux types de roche affleurant à la surface des continents. Le modèle GEM- $\text{CO}_2$  permet d'établir une cartographie des flux de  $\text{CO}_2$  consommés par érosion chimique sur le bassin du Congo.

## 2. CONSOMMATION DE CO<sub>2</sub> AU COURS DE LA PERIODE 1987-1990

### 2.1. Matériel et méthode

#### 2.1.1. Caractéristiques des bassins du Congo et de l'Oubangui

Le bassin du Congo est l'un des plus grands bassins fluviaux du monde. Avec une superficie totale de 3,7 km<sup>2</sup>, il draine une bonne partie de l'Afrique centrale. Son débit moyen inter annuel est de 41000 m<sup>3</sup>/s à Brazzaville, pour une superficie de 3,475 millions de km<sup>2</sup> (PROBST ET TARDY, 1987ERREUR! SIGNET NON DEFINI.). Il est situé en région tropicale équatoriale, à cheval sur les deux hémisphères, drainant des zones aussi diverses que les forêts humides, les prairies à arbustes ou les savanes. Son substratum est essentiellement composé de roches plutoniques et métamorphiques (42% de la surface totale du bassin) et de roches gréseuses et sableuses (49%), les roches carbonatées (9%) n'étant localisées que dans la partie est et sud-est du bassin (NKOUNKOU ET PROBST, 1987).

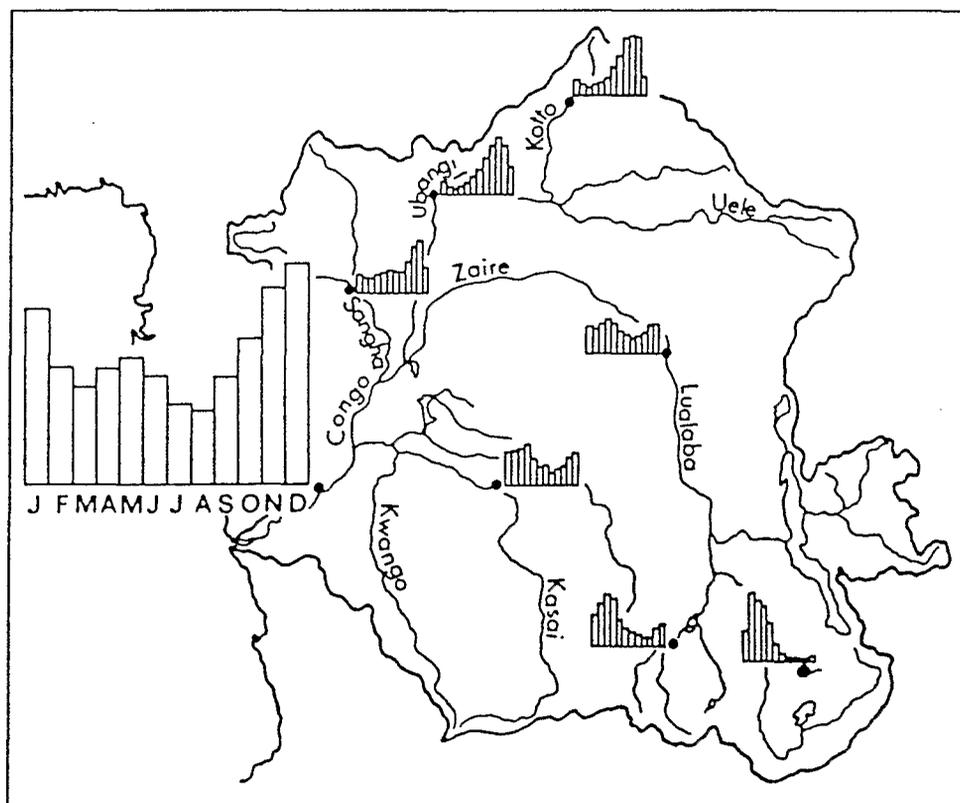


Figure n° 1

Régimes hydrologiques du Congo et de ses principaux affluents (Nkounkou et Probst (1987) d'après UNESCO (1977))

Le bassin de l'Oubangui est l'un des principaux affluents de l'hémisphère Nord du Congo. Son débit moyen inter annuel est de 4300 m<sup>3</sup>/s à Bangui, pour une superficie de 0,5 millions de km<sup>2</sup> (PROBST ET AL., 1992b). Sa surface est essentiellement couverte par des forêts claires et des savanes. Son substratum est avant tout composé de roches plutoniques et métamorphiques. Cependant, BOULVERT ET SALOMON (1988) signalent l'existence de paléo-crypto-karsts d'âge protérozoïque sur le bassin de l'Oubangui.

Le régime hydrologique du bassin du Congo (fig. 1) est caractérisé par deux périodes de basses eaux, l'une, en juillet-août, correspond aux basses eaux des affluents équatoriaux et à la décrue des affluents du sud du bassin, l'autre, en février mars, est moins importante et correspond aux basses eaux des affluents de l'hémisphère Nord (NKOUNKOU, 1989). Ces deux

périodes sèches sont séparées par une période de hautes eaux, dont le point culminant est observé en novembre décembre, et correspond à la fois à la crue des affluents de l'hémisphère Nord et à la montée des eaux dans le Sud du bassin (NKOUNKOU, 1989). Une deuxième période de hautes eaux est observée en mai juin, rendant compte de la saison humide dans le sud du bassin. Le régime hydrologique de l'Oubangui est un régime tropical unimodal type avec un débit maximum observé en octobre et un étiage en février mars (NKOUNKOU, 1989).

### 2.1.2. Les données utilisées

Ce n'est que depuis quelques années seulement que les caractéristiques hydro-géochimiques du fleuve Congo sont étudiées sur une période de temps suffisamment longue pour couvrir plusieurs cycles hydrologiques. Ceci a pu se réaliser dans le cadre du Programme PIRAT-GBF, (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur les Environnements Intertropicaux Peri-Atlantique - opération Grand Bassins Fluviaux, INSU-CNRS/ORSTOM) de 1987 à 1990, puis du Programme PEGI (Programme sur l'Environnement de la Géosphère Intertropical) depuis 1991. Les échantillons sont prélevés chaque mois depuis 1987, à la station de Bangui sur l'Oubangui et à 40 km en amont de Brazzaville sur le Congo par les équipes de l'ORSTOM. Les analyses des éléments majeurs dissous ont été effectuées au Centre de Géochimie de la Surface (CNRS) à Strasbourg (NKOUNKOU ET AL., 1990 ; PROBST, 1991; PROBST ET AL., 1992b). Nous utiliserons dans cette étude une série de données allant de janvier 1987 à mai 1990 pour le Congo et d'octobre 1987 à mai 1990 pour l'Oubangui. Ces données concernent principalement les concentrations en éléments majeurs dissous et les débits, à partir desquels sont calculés les flux moyens mensuels d'éléments majeurs exportés en solution par les fleuves Congo et Oubangui.

### 2.1.3. Procédure de calcul du flux de CO<sub>2</sub> consommé

Pour déterminer les flux moyens mensuels de CO<sub>2</sub> consommés par érosion chimique sur les bassins de l'Oubangui et du Congo, nous avons appliqué aux flux moyens mensuels d'éléments majeurs exportés en solution et corrigés des apports atmosphériques, un modèle de décomposition des flux d'éléments majeurs: le modèle MEGA.

#### 2.1.3.1. Correction des apports atmosphériques

La correction des apports atmosphériques est effectuée d'après les rapports ioniques C<sub>i</sub>atm/C<sub>Cl</sub>atm donnés par MEYBECK (1984) pour les eaux de pluie des régions tropicales (tableau 1). Ensuite, considérant qu'il n'y pas d'évaporites sur le bassin du Congo, le rapport C<sub>i</sub>atm/C<sub>Cl</sub>atm des eaux de pluie peut être conservé dans les eaux du fleuve et la totalité des chlorures mesurés dans les eaux du fleuve (C<sub>Cl</sub>t) est supposée être d'origine atmosphérique.

Tableau 1

Rapports C<sub>i</sub>/C<sub>Cl</sub>, en eq/eq, pour chaque élément majeur (i) dans les eaux de pluie des bassins du Congo et de l'Oubangui (d'après MEYBECK, 1984).

	Ca <sup>++</sup> /Cl <sup>-</sup>	Mg <sup>++</sup> /Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup> /Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup> /Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> /Cl <sup>-</sup>
CONGO (tropical humide)	0,3	0,3	0,8	0,1	0,9
OUBANGUI (tropical contrasté)	1,3	0,8	1,5	0,5	1,1

Pour chaque élément de concentration C<sub>i</sub>t dans les eaux du fleuve, et connaissant le débit Q du fleuve, on peut calculer le flux d'un élément (i) issu de l'érosion chimique (F<sub>i</sub>ec) de la manière suivante :

$$F_{i}ec = [C_{i}t - (C_{i}atm/C_{Cl}atm) \cdot C_{Cl}t] \cdot Q \quad 1)$$

### 2.1.3.2. Décomposition des flux d'éléments majeurs: le modèle MEGA

Après correction des apports atmosphériques, un modèle de décomposition est appliqué aux flux d'éléments majeurs en solution (modèle MEGA "Major Elements Geochemical Approach"). Ce modèle a été développé par AMIOTTE SUCHET (1994) et est inspiré de nombreux travaux antérieurs visant à reconstituer l'origine minéralogique des flux d'éléments majeurs transportés par les fleuves (GARRELS ET MACKENZIE, 1971 ; HOLLAND, 1978 ; MEYBECK, 1979 ; STALLARD, 1980 ; BERNER ET AL., 1983 ; WOLLAST ET MACKENZIE, 1983 ; TARDY ET AL., 1993 ; PROBST ET AL., 1994).

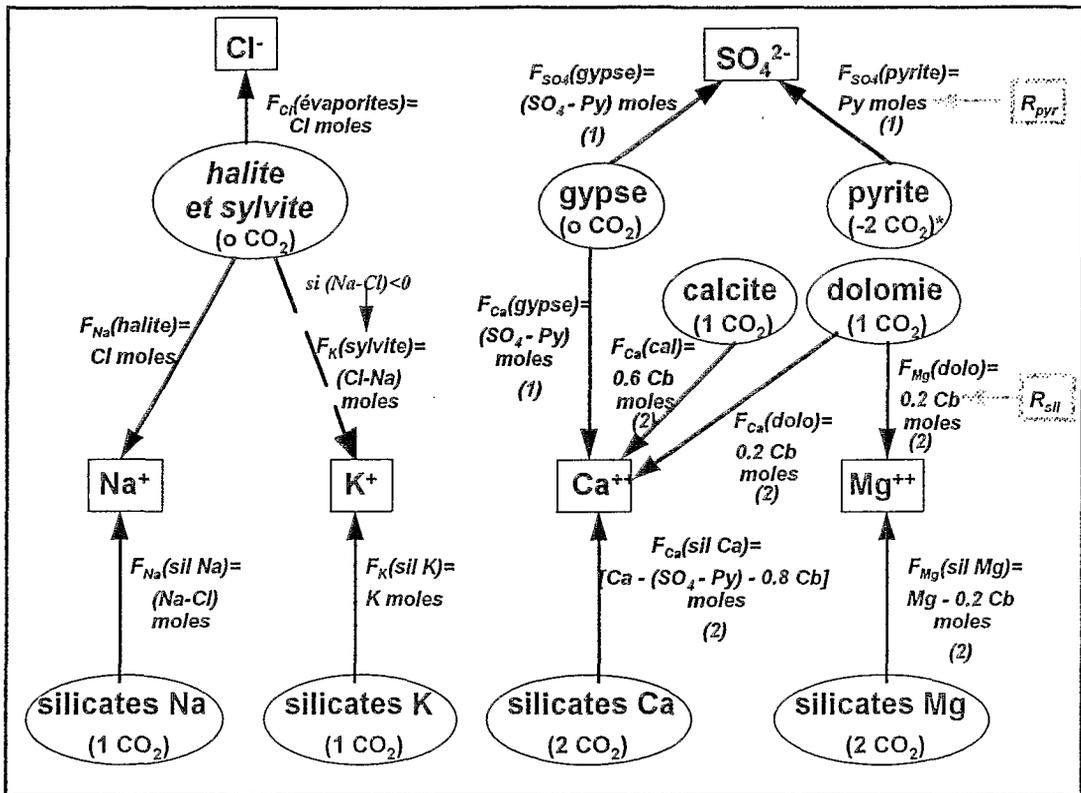
Dans cette méthode, on utilise directement les flux d'éléments majeurs exportés en solution à l'exutoire d'un bassin donné. Après correction des apports atmosphériques, le flux de chaque élément est attribué à la dissolution des différentes catégories de minéraux présents dans le substratum du bassin, en faisant les hypothèses suivantes (fig. 2) :

- la totalité des ions chlorures proviennent en priorité de la dissolution de la halite (NaCl), qui produit une quantité équivalente d'ions sodium. Dans le cas où il y a plus de Cl<sup>-</sup> que de Na<sup>+</sup> dans les eaux, le surplus de Cl<sup>-</sup> provient de la dissolution de la sylvite (KCl), ce qui produit une quantité équivalente de K<sup>+</sup>.
- le sodium restant provient de l'hydrolyse des minéraux silicatés sodiques.
- le potassium restant provient de l'hydrolyse des minéraux silicatés potassiques.
- le flux de calcium comporte trois sources: i) la dissolution du gypse (CaSO<sub>4</sub>), ii) l'altération chimique des minéraux carbonatés et iii) l'altération des minéraux silicatés.
- le magnésium est produit par l'altération chimique des minéraux carbonatés et des minéraux silicatés.
- le flux de Ca et de Mg produit par l'altération des minéraux silicatés est estimé à partir du flux de Na et de K produit par l'altération des minéraux silicatés et du rapport molaire moyen  $R_{sil} = (Na+K)/(Ca+Mg)$  dans les eaux de drainage des roches silicatées, rapport considéré comme constant pour un bassin donné.  $R_{sil}$  peut être déterminé à partir de données de concentrations en éléments majeurs dissous de petits ruisseaux drainant des types de roches similaires à celles du bassin étudié.
- les ions sulfates proviennent de la dissolution du gypse et de l'oxydation de la pyrite contenue dans les roches silicatées.
- la quantité d'ions sulfates libérés par oxydation de la pyrite est estimée en utilisant le rapport molaire moyen  $R_{pyr} = SO_4/(Ca+Mg+Na+k)$  des eaux de drainage des roches silicatées, qui est constant pour un bassin donné. On détermine la valeur de  $R_{pyr}$  de la même façon que pour  $R_{sil}$ .
- enfin, comme nous l'avons déjà vu, les ions bicarbonates proviennent de l'altération des minéraux carbonatés et du CO<sub>2</sub> atmosphérique. En outre, on fait ici l'hypothèse que l'altération des minéraux carbonatés n'est effectuée que par l'attaque de l'acide carbonique.

Le rapport  $R_{sil} = (Na+K)/(Ca+Mg)$  dans les eaux drainant les roches silicatées du bassin du Congo est calculé par PROBST ET AL. (1994 sur la base de la composition chimique des eaux de petits bassins monolithologiques appartenant au bassin ou drainant des types de roche appartenant aux mêmes formations géologiques que celles du bassin (CLERFAYT, 1956 ; SYMOENS, 1968 ; GAC ET PINTA, 1973). Les rapports moyens par type roche sont ensuite pondérés par le débit moyen drainant chaque type de roche. PROBST ET AL. (1994) déterminent alors des rapports  $R_{sil}$  de 1,7 pour le bassin du Congo et de 1,4 pour le bassin de l'Oubangui. Le rapport  $R_{pyr} = SO_4/(Ca+Mg+Na+K)$  dans les eaux drainant les roches silicatées ne sera pas déterminé ici car après correction des apports atmosphériques, le flux de SO<sub>4</sub><sup>-</sup> restant est nul.

Pour différencier la part de Ca<sup>++</sup> de celle Mg<sup>++</sup> dans le flux de Ca+Mg issu de l'altération des roches carbonatées, le modèle MEGA utilise un rapport moyen  $Mg^{++} / (Ca^{++}+Mg^{++})$  dans les eaux drainant les roches carbonatées égale à 0,2. Pour le bassin du Congo, nous avons recalculé ce rapport à partir de la composition chimique moyenne des eaux drainant les roches carbonatées du bassin déterminée par NKOUNKOU ET PROBST (1987) d'après la composition chimique de 6 petits bassins versants monolithologiques (SYMOENS, 1968). Le rapport  $Mg^{++} / (Ca^{++}+Mg^{++})$  est alors égale à 0,4 pour le bassin du Congo. Nous utiliserons également ce même rapport pour le bassin de l'Oubangui. En effet, les seules roches carbonatées semblent

être les crypto-karsts d'âge protérozoïque. Or, selon GARRELS ET MACKENZIE (1971), les roches carbonatées datant du protérozoïque sont plus riches en magnésium que les roches plus jeunes et ont un rapport  $Mg^{++} / (Ca^{++} + Mg^{++})$  d'environ 0,4.



\* équivalent d'acide sulfurique issu de l'oxydation de la pyrite et qui participe à la libération des cations majeurs lors de l'altération chimique des roches silicatées

(1)  $Py =$  flux molaire de  $SO_4$  issu de l'oxydation de la pyrite,  $Py = R_{pyr}(Na + K - Cl) / (R_{sil} + 1)$

avec  $R_{pyr} = SO_4 / (Na + K + Ca + Mg)$  et  $R_{sil} = (Na + K) / (Ca + Mg)$  dans les eaux drainant les roches silicatées

(2)  $Cb =$  flux molaire de  $Ca$  et de  $Mg$  issu de l'altération des carbonatés;

$Cb = Ca + Mg - (SO_4 - Py) - 1/R_{sil}(Na + K + Cl)$  avec  $R_{sil} = (Na + K) / (Ca + Mg)$  dans les eaux drainant les roches silicatées

**Figure n° 2**

Reconstitution des flux d'éléments majeurs issus de l'altération des différents minéraux par le modèle MEGA (tous les flux sont en moles), (AMIOTTE SUCHET, 1994).

### Bilan géochimique direct basé sur le flux total de bicarbonates

D'après le modèle MEGA (fig. 2), on peut estimer le flux de  $CO_2$  consommé par érosion chimique de la manière suivante:

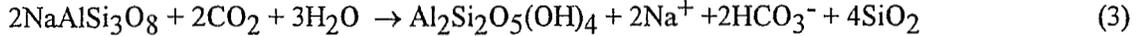
$$F_{HCO_3^-}^{atm} = F_{HCO_3^-}^{tot} - F_{Ca+Mg}^{tot} + F_{SO_4}^{tot} + (F_{Na+K}^{tot} - F_{Cl}^{tot}) \cdot \left[ \frac{1}{R_{sil}} - \left(1 + \frac{1}{R_{sil}}\right) \cdot R_{pyr} \right] \quad (2)$$

Les flux de  $CO_2$  consommé sont ainsi déterminés en faisant la différence entre le flux total de bicarbonates et le flux de  $Ca+Mg$  provenant de la dissolution des minéraux carbonatés. La précision de ces calculs est liée à celle des rapports  $R_{sil}$  et  $R_{pyr}$ , ainsi qu'à celle de la correction des apports atmosphériques. En outre, une telle démarche ne tient pas compte de l'attaque des minéraux par d'autres acides que l'acide carbonique ou l'acide sulfurique, tels que les acides organiques.

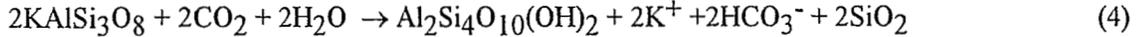
**Bilan géochimique indirect basé sur les bilans par minéraux**

Cette seconde méthode consiste à faire le bilan des moles de CO<sub>2</sub> consommé par l'altération des différents minéraux (fig; 2), à partir des flux déterminés par le modèle MEGA et en utilisant les coefficients stoechiométriques des équilibres chimiques suivants (GARRELS ET MACKENZIE, 1971):

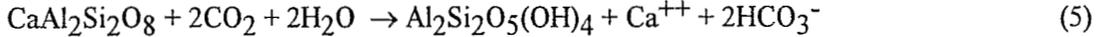
*altération d'albite en kaolinite:*



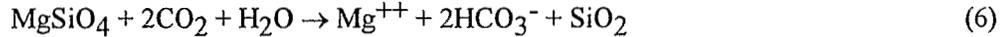
*altération d'orthose en montmorillonite:*



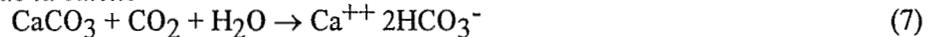
*altération d'anorthite en kaolinite*



*altération de l'olivine*



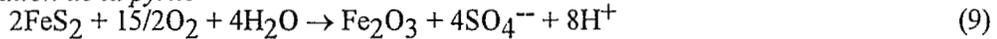
*altération de la calcite*



*dissolution de l'anhydrite*



*oxydation de la pyrite*



On peut alors calculer la quantité de CO<sub>2</sub> consommée (en moles) en fonction de celle des cations libérés par attaque à l'acide carbonique, diminuée de celle des cations libérés par attaque à l'acide sulfurique produit par oxydation de la pyrite :

$$\text{FCO}_2 = 2\text{FCaMg}(\text{silicates}) + \text{FNaK}(\text{silicates}) + \text{FCaMg}(\text{carbonates}) - 2\text{FSO}_4(\text{pyrite}) \quad (10)$$

**2.2. Bilan moyen annuel de la consommation de CO<sub>2</sub>**

Après correction des apports atmosphériques et en appliquant le modèle MEGA, nous avons calculé le flux moyen mensuel de CO<sub>2</sub> consommé à partir des concentrations instantanées en éléments majeurs dissous et des débits moyens mensuels, pour les bassins du Congo et de l'Oubangui. Le flux moyen interannuel de CO<sub>2</sub> consommé est alors la somme des flux moyens mensuels. Le flux de CO<sub>2</sub> consommé par érosion chimique est calculé selon les deux méthodes de bilan géochimique citées précédemment: directement selon l'équation (2) (tableau 2), indirectement selon l'équation (10) (tableau 3).

**Tableau 2**

Bilan de la consommation de CO<sub>2</sub> sur les bassins du Congo (moyenne annuelle pour la période 1987-1989) et de l'Oubangui (moyenne annuelle pour la période 1988-1989); bilan géochimique direct comparé avec les résultats obtenus par PROBST ET AL. (1994)

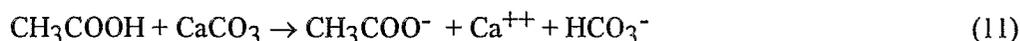
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (10 <sup>3</sup> moles/km <sup>2</sup> .an)			FCO <sub>2</sub> / FCO <sub>3</sub> (%)
		FCO <sub>2</sub> (atmosphère)	FCaCO <sub>3</sub> (minéraux)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> total	
CONGO	altération des carbonates	17,1	17,1	34,2	50
	altération des silicates	42,9	0	42,9	100
	total	60,0	17,1	77,1	77,8
	total Probst et al. (1994)	56,2	18,9	75,1	74,8
OUBANGUI	altération des carbonates	12,1	12,1	24,2	50
	altération des silicates	24,3	0	24,3	100
	total	36,4	12,1	48,5	75,1
	total Probst et al. (1994)	37,0	12,0	49,0	75,5

**Tableau 3**

Bilan moyen annuel des flux d'éléments majeurs dissous libérés par l'altération des principaux types de minéraux et bilan du CO<sub>2</sub> consommé sur les bassins du Congo (moyenne annuelle pour la période 1987-1989) et de l'Oubangui (moyenne annuelle pour la période 1988-1989); bilan géochimique indirect.

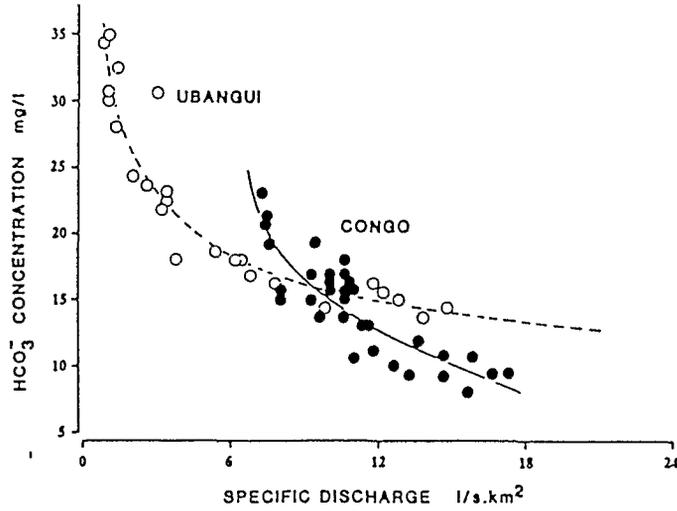
minéral source	minéral dissous (10 <sup>3</sup> moles/km <sup>2</sup> .an)		CO <sub>2</sub> consommé (10 <sup>3</sup> moles/km <sup>2</sup> .an)	
	Congo	Oubangui	Congo	Oubangui
Na - silicates	19,2	5,8	19,2	5,8
K - silicates	11,2	3,7	11,2	3,7
Ca - silicates	7,4	3,5	14,8	7,0
Mg - silicates	10,4	3,3	20,8	6,6
total silicates			66,0	23,1
Ca - carbonates	11,2	7,3	11,2	7,3
Mg - carbonates	7,5	4,9	7,5	4,9
total carbonates			18,7	12,2
total altération			84,7	35,3

Nos résultats (tableau 2) sont similaires à ceux obtenus par PROBST ET AL. (1994) et montrent que le flux de bicarbonates est composé à près de 78% de CO<sub>2</sub> d'origine atmosphérique. Pour le bassin de l'Oubangui, le bilan de la consommation de CO<sub>2</sub> par types de minéraux dissous (tableau 3) est similaire au flux de CO<sub>2</sub> déterminé directement à partir du flux de bicarbonates, montrant que l'altération chimique est presque uniquement le fait de l'acide carbonique. Par contre, pour le bassin du Congo le bilan de la consommation de CO<sub>2</sub> par type de minéraux dissous (tableau 3) est nettement supérieur au flux de CO<sub>2</sub> déterminé directement à partir du flux de bicarbonates. Cette différence non négligeable (environ 25 10<sup>3</sup> moles/km<sup>2</sup>.an, soit une augmentation de 45%) est à mettre en relation avec le déficit de charges anioniques des solutions (22% en moyenne, 30% après correction des apports atmosphériques) observé par PROBST ET AL. (1992b) dans les eaux du Congo. Ces déficits anioniques pourraient être attribués à la présence d'importantes quantités d'anions organiques dans les eaux du Congo, anions qui ne sont pas pris en compte par la mesure de l'alcalinité car ils ne sont pas dissociés aux valeurs de pH des eaux du Congo (pH moyen de 6,9). PROBST ET AL. (1992b) signalent en outre que la matière organique en solution représente 30 à 40% de la charge totale dissoute dans les eaux du Congo. On peut alors penser que les acides organiques, qui sont mis en solution au niveau des sols, dans les eaux qui percolent, participent ensuite à l'altération des minéraux, comme dans l'équation schématique suivante (MCMAHON ET AL., 1991) :



### 2.3. Fluctuations saisonnières de la consommation de CO<sub>2</sub>

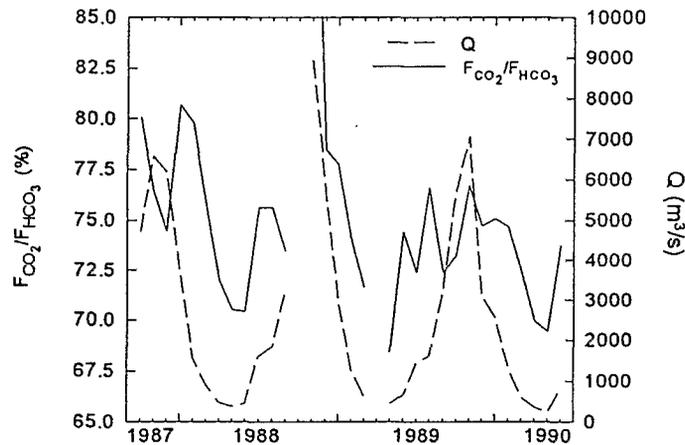
PROBST ET AL. (1992b, 1994) ont étudié en détail l'influence du débit sur les concentrations en bicarbonates (fig. 3). Ainsi, les concentrations en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> suivent une loi bilogarithmique décroissante en fonction du débit, tant pour l'Oubangui que pour le Congo. Ces relations sont caractéristiques d'une dilution des eaux de nappe concentrées par des eaux de ruissellement moins minéralisées. On remarquera cependant que la dilution est plus forte pour les eaux du Congo que pour celle de l'Oubangui (fig. 3). Les concentrations en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> varient ainsi d'un facteur 3 environ dans les eaux du Congo et d'un facteur 2 seulement dans les eaux de l'Oubangui.



**Figure n° 3**  
Relation concentration en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> - débit (Q) dans les eaux du Congo et de l'Oubangui (PROBST ET AL., 1994).

### 2.3.1. Bassin de l'Oubangui

La contribution du flux de CO<sub>2</sub> consommé par érosion chimique au flux total de bicarbonates (%CO<sub>2</sub>) est un paramètre précieux dans l'étude des mécanismes de la consommation de CO<sub>2</sub>, car il permet de distinguer les contributions respectives de l'altération des carbonates et des silicates. Ainsi, lorsque %CO<sub>2</sub> tend vers 50%, le CO<sub>2</sub> est essentiellement consommé par l'altération des roches carbonatées. Par contre, lorsque %CO<sub>2</sub> tend vers 100%, le CO<sub>2</sub> est principalement consommé par l'altération des silicates.



**Figure n° 4**  
Variations saisonnières de la contribution du flux de CO<sub>2</sub> consommé (F<sub>CO<sub>2</sub></sub>) au flux total de bicarbonates (F<sub>HCO<sub>3</sub></sub>) exportés par l'Oubangui

La figure 4 montre les variations de %CO<sub>2</sub> sur le bassin de l'Oubangui d'octobre 1987 à mai 1990. %CO<sub>2</sub> est plus ou moins en phase avec le débit. Les périodes d'étiage (mars à avril), pendant lesquelles les eaux proviennent essentiellement des nappes, sont toujours marquées par une contribution (%CO<sub>2</sub>) minimum d'environ 70%, indiquant que, durant ces périodes, la contribution des carbonates est plus forte. C'est une nouvelle fois la confirmation de l'existence de paléo-crypto-karsts signalée par BOULVERT ET SALOMON (1988, dont l'altération contribue à la composition chimique du fleuve, notamment en période de basses eaux. Les périodes de hautes eaux sont plutôt marquées par une contribution (%CO<sub>2</sub>) maximum de 75 à 80%, montrant que le CO<sub>2</sub> est consommé par l'altération des silicates.

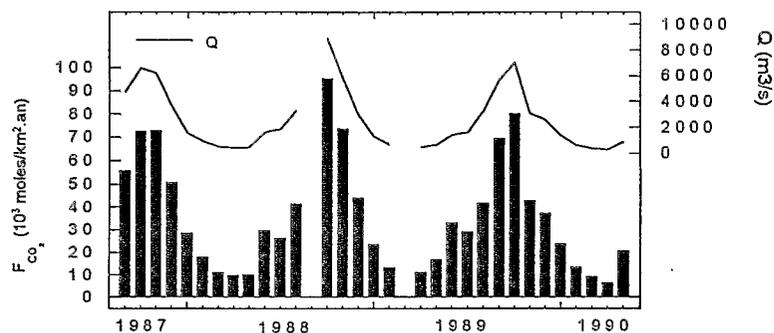


Figure n° 5

Variations saisonnières du flux de CO<sub>2</sub> consommé sur le bassin de l'Oubangui ( $F_{CO_2}$ )

Les contributions %CO<sub>2</sub> minimum restent cependant relativement élevées, marquant la prépondérance de l'altération des silicates sur celle des carbonates. Dès lors, le flux de CO<sub>2</sub> est en grande partie contrôlé par la contribution des eaux drainant les roches silicatées. La contribution des eaux drainant les carbonates ne peut compenser la forte baisse du débit, et le flux de CO<sub>2</sub> consommé est complètement en phase avec le débit (fig. 5). Il est alors logique d'observer une décroissance du flux de CO<sub>2</sub> consommé avec l'augmentation de la contribution de l'altération des carbonates (%CO<sub>3</sub>) (fig. 6).

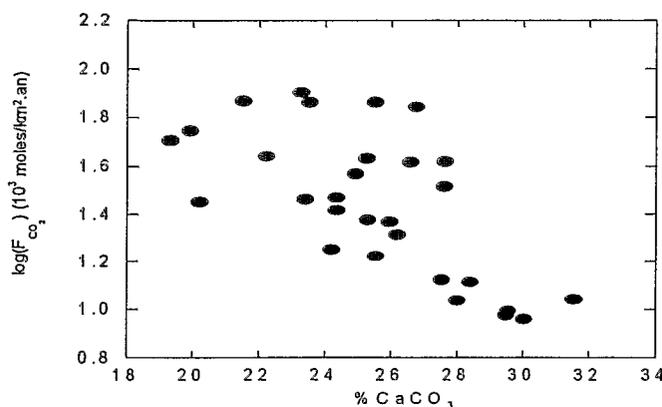


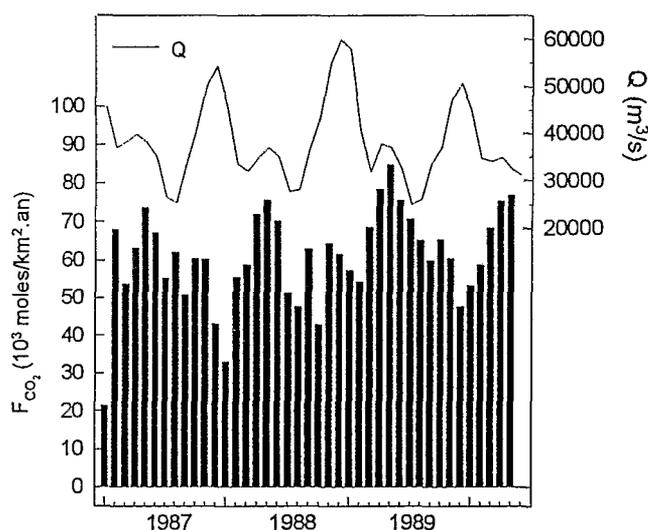
Figure n° 6

Relation entre le flux de CO<sub>2</sub> consommé sur le bassin de l'Oubangui ( $F_{CO_2}$ ) et la contribution de la dissolution des minéraux carbonatés (%CaCO<sub>3</sub>) au flux total de bicarbonates.

### 2.3.2. Bassin du Congo

Sur le bassin du Congo, les variations saisonnières du flux de  $\text{CO}_2$  consommé sont inverses de celles que nous avons pu observer sur le bassin de l'Oubangui. En effet, les flux de  $\text{CO}_2$  évoluent plutôt en opposition de phase par rapport au débit (fig. 7). Il faut imaginer alors que la dilution des concentrations est telle (voir la dilution des concentrations en  $\text{HCO}_3^-$  sur la fig. 3), que l'augmentation du débit n'arrive pas à compenser la perte de concentration. Ainsi, les concentrations totales en bicarbonates, qui sont relativement faibles, peuvent varier d'un facteur 3 alors que les débits ne varient que d'un facteur 2. C'est pourquoi les variations du flux de  $\text{CO}_2$  consommé sont plutôt contrôlées par les variations de la concentration que par les débits. Dès lors, on note sur la figure 7 que, pour chaque cycle hydrologique, le flux maximum de  $\text{CO}_2$  ne correspond pas à la période de hautes eaux des mois d'octobre à janvier mais à la petite saison humide (mai-juin).

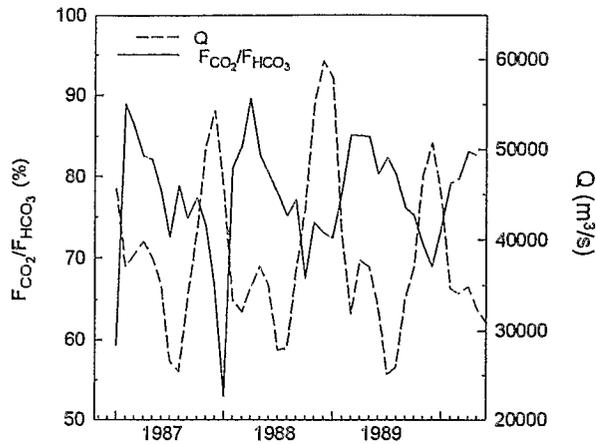
Pendant la crue principale de fin d'année (d'octobre à janvier), qui correspond à la saison humide des zones de l'hémisphère Nord, l'évolution des flux de  $\text{CO}_2$  est plus complexe. On observe ainsi un creux maximum en cours de crue (en fin de crue en 1987, en début de crue en 1988 et au maximum de hautes eaux en 1989), qui correspond à la contribution  $\% \text{CO}_2$  minimum (fig. 8). Dès lors, il n'est pas surprenant d'observer, comme sur l'Oubangui, une diminution du flux de  $\text{CO}_2$  consommé lorsque la contribution des carbonates au flux total de bicarbonates ( $\% \text{CaCO}_3$ ) augmente (fig. 9).



**Figure n° 7**

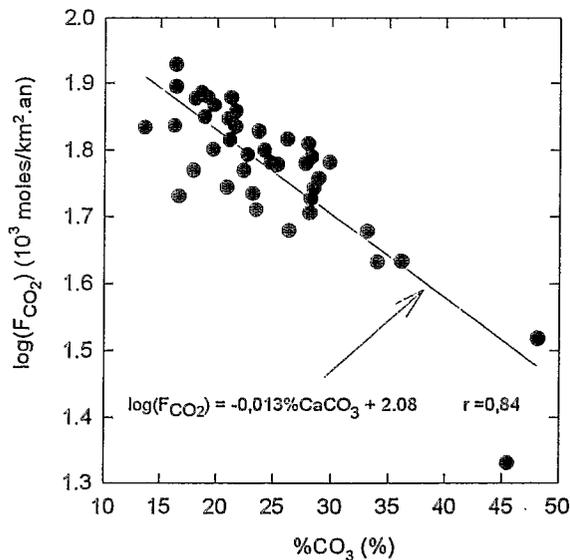
*Variations saisonnières du flux de  $\text{CO}_2$  ( $F_{\text{CO}_2}$ ) consommé sur le bassin du Congo.*

Les variations de la contribution  $\% \text{CO}_2$  en fonction du débit (fig. 8) sont beaucoup plus complexes que celle observées sur le bassin de l'Oubangui. En effet,  $\% \text{CO}_2$  est, dans l'ensemble, en nette opposition de phase par rapport au débit.  $\% \text{CO}_2$  est ainsi minimum durant les périodes de hautes eaux de décembre à janvier. Ce minimum, qui varie entre 65 et 70% mais qui descend jusqu'à moins de 55% en janvier 1988, peut être attribué à la contribution dominante de l'altération des carbonates du sud-est du bassin où la saison humide débute. En outre, cette contribution de l'altération des carbonates est probablement mise en relief par la faiblesse des flux de  $\text{CO}_2$  issus de l'altération des silicates. Ensuite,  $\% \text{CO}_2$  remonte rapidement, pour atteindre un maximum de février à mars, au début de la période de basses eaux des affluents de l'hémisphère Nord. Il semble donc que durant cette période, l'intensité de l'altération des silicates soit beaucoup plus forte que celle des carbonates et  $\% \text{CO}_2$  atteint près 90%.



**Figure n° 8**

Variations saisonnières de la contribution du flux de  $\text{CO}_2$  consommé ( $F_{\text{CO}_2}$ ) au flux total de bicarbonates ( $F_{\text{HCO}_3}$ ) exportés par le Congo.



**Figure n° 9**

Relation entre le flux de  $\text{CO}_2$  consommé sur le bassin du Congo ( $F_{\text{CO}_2}$ ) et la contribution de la dissolution des minéraux carbonatés ( $\% \text{CaCO}_3$ ) au flux total de bicarbonates.

Les fluctuations de la contribution de  $\text{CO}_2$  au flux total de bicarbonate traduisent bien, à l'image du régime hydrologique, la complexité du bassin du Congo. Cette contribution est toujours relativement forte (près de 78% en moyenne de 1987 à 1989) et ses variations semblent plutôt contrôlée par les fluctuations de la contribution des silicates aux flux de bicarbonates.

### 3. DISTRIBUTION SPATIALE DE LA CONSOMMATION DE CO<sub>2</sub>

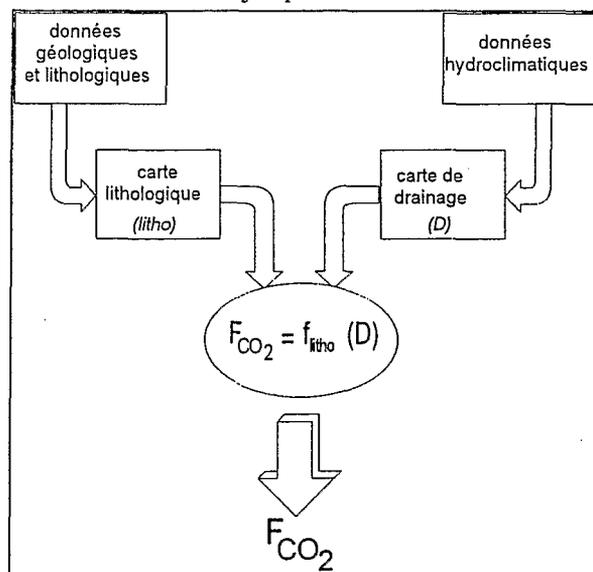
#### 3.1. Le modèle GEM-CO<sub>2</sub>

GEM-CO<sub>2</sub> (Global Erosion Model for CO<sub>2</sub> fluxes) est un modèle global d'érosion qui permet d'estimer le flux de CO<sub>2</sub> consommé par érosion chimique à partir de l'intensité du drainage et de la lithologie de la surface continentale considérée. Ce modèle a été développé par AMIOTTE SUCHET ET PROBST (1993A) et appliqué à différents bassins versants ainsi qu'à l'ensemble des surfaces continentales (AMIOTTE SUCHET ET PROBST, 1993B ET SOUS PRESSE).

Notre modèle est basé sur un ensemble de relations empiriques entre flux de CO<sub>2</sub> consommé (F<sub>CO<sub>2</sub></sub>) et drainage (D) calculées par type de roches. Ces relations ont été déterminées par AMIOTTE SUCHET ET PROBST (1993a) à partir des données acquises par MEYBECK (1986) sur la composition chimique des eaux de petits bassins versants monolithologiques. Les relations F<sub>CO<sub>2</sub></sub> = f(D) sont déterminées pour les 7 types de roche suivants: les roches plutoniques et métamorphiques, les roches volcaniques acides, les basaltes, les sables et les grès, les roches détritiques argileuses, les roches carbonatées et enfin les formations évaporitiques.

Le principe de la modélisation est illustré par la figure 10. L'ensemble des relations F<sub>CO<sub>2</sub></sub> = f(D) permet de calculer le flux de CO<sub>2</sub> (F<sub>CO<sub>2</sub></sub>) consommé par altération chimique d'un type de roche donné à partir du volume d'eau (D) drainant ce type de roches. Pour un bassin versant dont le substratum est composé de différents types de roche, le flux de CO<sub>2</sub> consommé sera la somme des flux élémentaires consommés par type de roche. Pour cela, la surface du bassin versant est divisée en petites cellules élémentaires pour lesquelles on détermine le type de roche dominant, à partir de cartes lithologiques, et un drainage moyen à partir de cartes de drainage. Le flux de CO<sub>2</sub> est alors calculé pour chaque cellule élémentaire, et le flux total pour l'ensemble du bassin est la somme des flux élémentaires. Le modèle est alors basé sur les conditions suivantes :

- ⇒ - les cellules élémentaires sont indépendantes les unes des autres et la solution altérante résultant de la percolation de l'eau n'est active qu'au niveau de la cellule élémentaire correspondante.
- ⇒ - la formation géologique affleurant à la surface d'une cellule élémentaire est supposée être suffisamment épaisse pour être la seule roche soumise à l'altération chimique.
- ⇒ - il y a conservation des flux de bicarbonates libérés par l'altération pendant le transport d'une cellule élémentaire à l'autre jusqu'à l'exutoire du bassin.

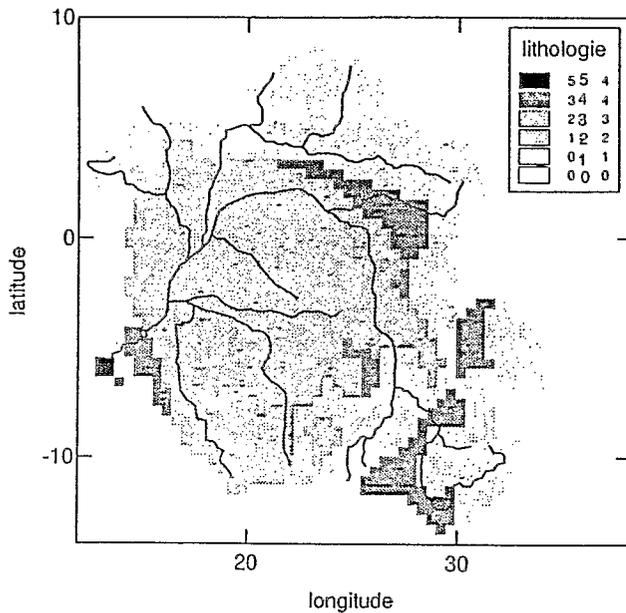


**Figure n° 10**  
Principales étapes de la modélisation (GEM-CO<sub>2</sub>).

### 3.2. Application de GEM-CO2 au bassin du Congo

Le bassin est divisé en cellules élémentaires de 50 km de côté. La carte lithologique numérisée (fig. 11) est basée sur la carte géologique simplifiée du bassin du Congo proposée par NKOUNKOU (1989).

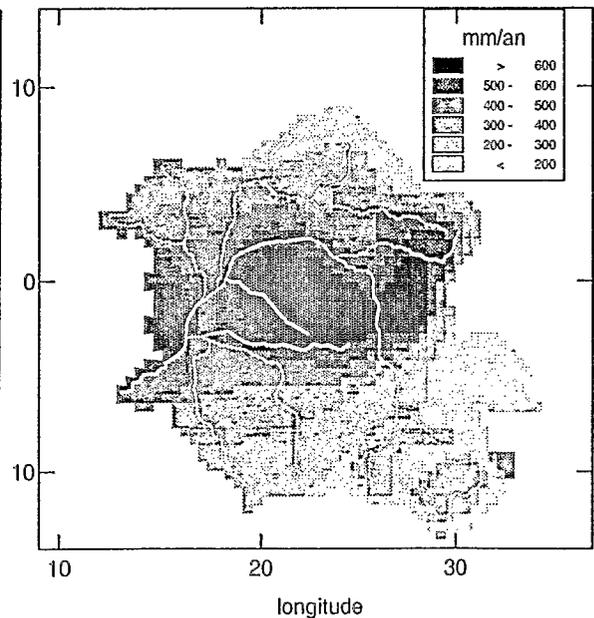
La carte de l'intensité du drainage (fig. 12) est numérisée à partir de la carte de drainage du continent Africain au 1/20 000 000 (UNESCO, 1977), qui est basée sur le drainage moyen mesuré de plus de 2000 stations réparties sur les cours d'eau africains. Le drainage moyen que nous avons calculé par type de roche est similaire à celui déterminé par NKOUNKOU ET PROBST (1987) à partir des mesures de débit effectuées par SAVAT (1973) sur 92 cours d'eau du bassin du Congo, excepté pour les surfaces occupées par les roches carbonatées. Pour ces dernières, les valeurs de drainage de la carte de la figure Erreur! Signet non défini. sont ajustées à la valeur moyenne du drainage des roches carbonatées (73 mm/an) déterminée par NKOUNKOU ET PROBST (1987).



**Figure n° 11**

Carte simplifiée des principaux types de roches affleurant à la surface du bassin du Congo (d'après NKOUNKOU, 1989).

0: lacs; 1: roches plutoniques et métamorphiques; 2,3 et 5 sables et grès; 4: roches carbonatées.

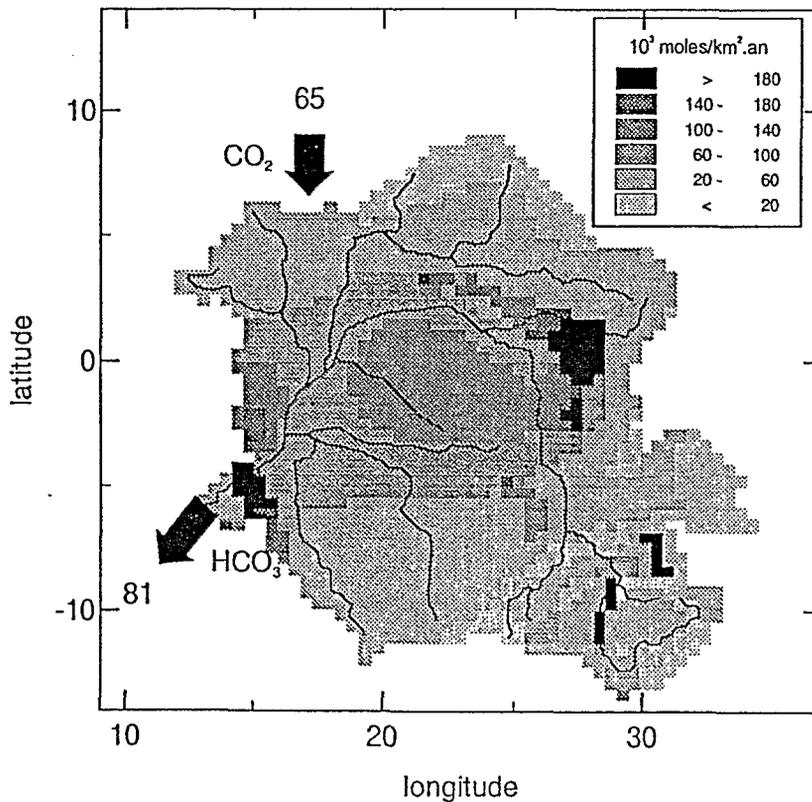


**Figure n° 12**

Carte de distribution de l'intensité moyenne du drainage sur le bassin du Congo (d'après UNESCO, 1977).

Le flux de  $\text{CO}_2$  consommé par altération chimique des roches est calculé pour chaque cellule élémentaire en appliquant le modèle ( $F_{\text{CO}_2} = f(D)$ ) correspondant à la lithologie dominante de la cellule. On obtient alors une cartographie de la consommation de  $\text{CO}_2$  sur le bassin du Congo (fig. 13). Le flux de  $\text{CO}_2$  consommé estimé par le modèle varie spatialement de  $14 \cdot 10^3$  moles/ $\text{km}^2 \cdot \text{an}$  à  $400 \cdot 10^3$  moles/ $\text{km}^2 \cdot \text{an}$ . La consommation moyenne annuelle sur l'ensemble du bassin est de  $64,9 \cdot 10^3$  moles/ $\text{km}^2 \cdot \text{an}$  pour un drainage moyen de 370 mm/an. Ce flux est comparable à ceux estimés à partir du flux moyen annuel de  $\text{HCO}_3^-$  transporté par le Congo (voir le tableau 2:  $60,0 \cdot 10^3$  moles/ $\text{km}^2 \cdot \text{an}$  d'après ce travail et  $56,2 \cdot 10^3$  moles/ $\text{km}^2 \cdot \text{an}$  d'après PROBST ET AL. 1994). L'estimation du modèle est cependant légèrement plus forte (+8%) que celles déterminées à partir des flux de bicarbonates transportés par le Congo car le modèle ne tient pas compte des formations latéritiques épaisses, couvrant une surface importante du bassin et très pauvres en minéraux altérables. La consommation de  $\text{CO}_2$  est donc plus faible au niveau de ces

formations qu'au niveau de la roche mère dont elles sont issues par altération chimique. Par conséquent, la contribution du flux  $\text{CO}_2$  au flux total de bicarbonates (80%) est plus élevée que celle calculée en appliquant le modèle MEGA aux flux de bicarbonates mesurés (tableau 2).



**Figure n° 13**

*Distribution spatiale de la consommation de  $\text{CO}_2$  par érosion chimique sur le bassin du Congo (tous les flux sont en  $10^3$  moles/ $\text{km}^2$ .an)*

Les résultats des simulations de GEM- $\text{CO}_2$  permettent de calculer la distribution latitudinale des flux de  $\text{CO}_2$  consommés sur le bassin du Congo (fig. 14). La consommation de  $\text{CO}_2$  est la plus intense autour de l'équateur, entre  $3^\circ$  de latitude Nord et  $3^\circ$  de latitude Sud environ. Elle diminue progressivement lorsqu'on s'éloigne de l'équateur, vers le Nord ou le Sud du bassin; la décroissance vers le Nord est plus rapide. La figure Erreur! Signet non défini. montre que sur le bassin du Congo, la consommation de  $\text{CO}_2$  est essentiellement contrôlée par l'intensité du drainage. La proportion des affleurements de carbonates, roches très consommatrices de  $\text{CO}_2$ , semble jouer un rôle secondaire car ces roches sont situées en partie dans les zones les plus sèches du bassin.

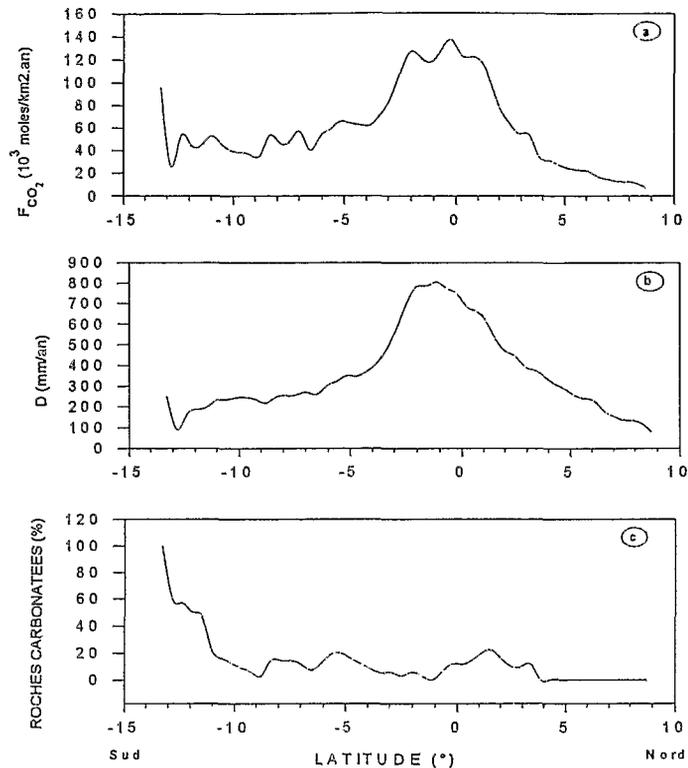


Figure n° 14

Distribution latitudinale a) du flux spécifique de  $\text{CO}_2$  consommé, b) de l'intensité du drainage (D) et c) de la proportion de surfaces de roches carbonatées, sur le bassin du Congo.

#### 4. CONCLUSIONS

Dans ce travail, deux approches différentes ont permis d'étudier la consommation de  $\text{CO}_2$  d'origine atmosphérique par érosion chimique sur le bassin du Congo. Le flux moyen annuel de  $\text{CO}_2$  est estimé à  $60 \cdot 10^3$  moles/ $\text{km}^2$ .an ( $2,5 \cdot 10^{12}$  g/an) selon le modèle de décomposition des flux d'éléments majeurs MEGA et à  $65 \cdot 10^3$  moles/ $\text{km}^2$ .an ( $2,7 \cdot 10^{12}$  g/an) selon le modèle d'érosion GEM- $\text{CO}_2$ . Sur le bassin de l'Oubangui, le flux spécifique de  $\text{CO}_2$  est presque 2 fois plus faible ( $36,4 \cdot 10^3$  moles/ $\text{km}^2$ .an).

C'est grâce à l'analyse des variations saisonnières et interannuelles de la consommation de  $\text{CO}_2$  sur les bassins de l'Oubangui et du Congo, que nous avons pu comprendre les mécanismes qui contrôlent cette consommation.

Le débit reste le principal facteur qui contrôle le flux de  $\text{CO}_2$  consommé sur le bassin de l'Oubangui les mois de basses eaux sont des mois de faible consommation de  $\text{CO}_2$ , alors que le flux de  $\text{CO}_2$  est maximum en période de crue. La contribution du  $\text{CO}_2$  atmosphérique au flux total de bicarbonates est plus faible en périodes de basses eaux (environ 70%) qu'en période de hautes eaux (environ 80%). Ceci traduirait la présence d'un réservoir profond de type nappe constitué de roches carbonatées, réservoir qui contribuerait significativement au flux total de matières dissoutes exportées par l'Oubangui, notamment en période de basses eaux. des analyses isotopiques  $\delta^{13}\text{C}$  du carbone minéral dissous devraient permettre de confirmer cette hypothèse.

En ce qui concerne le bassin du Congo, les mécanismes réglant la consommation de  $\text{CO}_2$  semblent plus complexes, à l'image du régime hydrologique du fleuve. Les flux mensuels de  $\text{CO}_2$  évoluent saisonnièrement en opposition de phase par rapport aux débits. En effet, les flux de  $\text{CO}_2$  suivent les mêmes variations que les concentrations en  $\text{HCO}_3^-$ , car ces dernières, qui sont relativement faibles, varient d'un facteur 3 au cours d'un cycle hydrologique alors que le débit ne varie que d'un facteur 2. Par contre, si l'on considère les flux annuels de  $\text{CO}_2$ , on n'observe pas de

variations significatives sur les 3 années qui ont été étudiées, car celles-ci sont faiblement contrastées d'un point de vue hydrologique. Néanmoins, lors de périodes beaucoup plus sèches ou beaucoup plus humides, on devrait observer des flux de CO<sub>2</sub> respectivement plus faibles et plus forts que ceux mesurés actuellement. Il est donc nécessaire de continuer à mesurer pendant plusieurs années les transports fluviaux de matières dissoutes sur les deux observatoires permanents de l'environnement que sont maintenant Bangui sur l'Oubangui et Brazzaville sur le Congo, de manière à pouvoir apprécier l'influence d'une période de sécheresse ou d'une période de grande humidité sur l'intensité de l'érosion chimique du bassin et sur les apports de matières à l'océan.

La contribution du CO<sub>2</sub> atmosphérique au flux de bicarbonates transporté par le Congo varie elle aussi à l'opposé des fluctuations du débit. La contribution de l'altération des carbonates est ainsi plus forte en période de hautes eaux qu'en période de basses eaux.

L'altération chimique sur le bassin du Congo est également influencée par l'apport d'autres acides que l'acide carbonique. On calcule en effet que les acides organiques, très présents dans les eaux du Congo où la matière organique représente souvent près de 30% de la charge dissoute, provoqueraient une diminution de 30% (en moles) de la consommation de CO<sub>2</sub> atmosphérique par érosion chimique. On doit donc aujourd'hui étudier sérieusement la contribution de ces acides organiques à l'érosion chimique des roches et à la qualité des eaux de surface sur ce bassin versant.

## BIBLIOGRAPHIE

- Amiotte Suchet P. (1994) - Cycle du carbone, érosion chimique des continents et transferts vers les océans. *Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg*, 182 pp.
- Amiotte Suchet P. and Probst J.L. (1992) - Flux de CO<sub>2</sub> atmosphérique consommé par érosion chimique des continents et transfert de carbone du réservoir biosphère-sol vers les océans. *14e R.S.T., Toulouse, 13-15 avril 1992, Soc. Géol. Fr. ed. Paris*, p. 5.
- Amiotte Suchet P. and Probst J.L. (1993a) - Flux de CO<sub>2</sub> atmosphérique consommé par altération chimique continentale. Influence de la nature de la roche. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 317, Série II, 615-622.
- Amiotte Suchet P. and Probst J.L. (1993b) - Modelling of atmospheric CO<sub>2</sub> consumption by chemical weathering of rocks: application to the Garonne, Congo and Amazon basins. *Chemical Geology*, 107, 205-210.
- Amiotte Suchet P. and Probst J.L. (sous presse) - A global model for present day atmospheric CO<sub>2</sub> consumption by chemical erosion of continental rocks (GEM-CO<sub>2</sub>). *Tellus B, sous presse*.
- Berner R.A. (1991) - A model for atmospheric CO<sub>2</sub> over phanerozoic time. *Am.J. Sci.*, 291, 339-376.
- Berner R.A., Lasaga A.C. et Garrels R.M. (1983) - The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 millions years. *Amer. J. Sci.*, 283, p. 641-683.
- Boulvert Y. et Salomon J.N. (1988) - Sur l'existence de paleo-cryptokarts dans le bassin de l'Oubangui. *Karstologia*, 11-12, p. 37-48.
- Clerfayt A. (1956) - Composition des eaux de rivière au Congo. Influence des facteurs géologiques et climatiques. *Centre Belge d'étude et de documentation des eaux*, n°31(I), 26-31.
- Degens E.T., Kempe S and Richey J.E. 1991. Biogeochemistry of major world rivers, In: *Biogeochemistry of Major World Rivers (eds. Degens, Kempe and Richey)*, Scope 42, J. Wiley and Sons, 323-344.
- Gac J.Y. et Pinta M. (1973) - Bilan de l'érosion et de l'altération en climat tropical humide, estimation de la vitesse d'approfondissement des profils: étude du bassin versant de l'Ouham (R.C.A.). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, V, 83-96.
- Garrels R.M. et Mackenzie F.T. (1971)- Evolution of sedimentary rocks. *W. W. Norton and Co. Inc., New-York*, 397 p..
- Holland D.H. (1978) - The chemistry of atmosphere and oceans. *Wiley-Intersciences Publ., Chichester, New York*, 351 pp.
- Martins O. et Probst J.L. (1991) - Biogeochemistry of major african rivers. carbon and mineral transport. In: *Biogeochemistry of Major World Rivers (eds. Degens, Kempe and Richey)*, Scope 42, J. Wiley and Sons, 129-157.
- McMahon P. B., Chapelle F. H., Falls W. F. et Bradley P. M. (1992) - Role of microbial processes in linking sandstone diagenesis with organic-rich clays. *J. Sed. Petrol.*, 62, p. 1-10.

- Meybeck M. (1984) - Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. *Thèse Sciences, Univ. Paris 17*, 558 p..
- Meybeck M. (1986) - Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. *Sci. Géol. Bull.*, 39, p. 3-77.
- Meybeck M. (1987) - Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *Amer. J. Sci.*, 287, p. 401-428.
- Meybeck M. (1993) - C, N; P; and S in rivers: from sources to global inputs. in: *interaction of C, N, P, and S biogeochemical cycles*, R. Wollast, F.T. Mackenzie and L. Chou eds, Springer Verlag, 163-193.
- Nkounkou 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 (derniers 600 millions d'années). *Thèse de doctorat, Université, Louis Pasteur, Strasbourg*, 183 p..
- Nkounkou R.R. et Probst J.L. (1987) - Hydrology and geochemistry of the Congo river system. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. univ. Hamburg, SCOPE/UNEP Sonder bd. 64*, p. 483-508.
- Nkounkou R.R., Krempp G. et Probst J.L. (1990) - Géochimie et hydrologie des eaux de surface: exemple du bassin du fleuve Congo. *Comptes Rendus de Journées Laboratoires ORSTOM, Centre ORSTOM de Bondy, 18-20 septembre 1990*, 25-36.
- Probst J.L. (1991) - Thème "Matières Minérales 1986-1991. Transports de matières minérales dissoutes et particulaires et bilans de l'érosion sur les grands bassins fluviaux intertropicaux périatlantiques. Rapport de fin de programme PIRAT (INSU-ORSTOM), Opération Grands Bassins Fluviaux, Thème "Matières Minérales", Strasbourg, mars 1991, 20 p. + publications et thèses
- 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.*, 94, Strasbourg, 167 pp.
- Probst J.L., Amiotte Suchet P. and Tardy Y. (1992a) - Global continental erosion and fluctuations of atmospheric CO<sub>2</sub> consumed during the last 100 years. In: *Proc. 7th Intern. Symp. W.R.I., Park City, Utah, USA, 13-18 juillet 1992, (Kharaka and Maest ed.), Balkema, Rotterdam, 1992*, 483-486.
- Probst J.L., Nkounkou R.R., Krempp G., Bricquet J.P., Thiébaux J.P. et Olivry J.C. (1992b) - Dissolved major elements exported by the Congo and the Ubangui rivers during the period 1987-1989. *J. of Hydrology*, 135, p. 237-257.
- Probst J.L., Mortatti J. et Tardy Y. (1994) - Carbon river fluxes and weathering CO<sub>2</sub> consumption in the Congo and Amazon river basins. *Applied Geochem.*, 9, p. 1-13.
- Probst J.L. et Tardy Y. (1987) - Long range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century. *J. of Hydrology*, 94, p. 289-311.
- Savat J. (1973) - Een morphologische en sedimentologisch-hydraulische indeling van de rivieren van het Zaire-bekken. *Kath. Univ. Leuven thes.*, 399 p.
- Stallard R.F. (1980) - Major element geochemistry of the Amazon river system. *PhD. Thesis, MIT-WHOI Joint Program in Oceanography, Cambridge MA.*, 362 p.
- Symoens J.J. (1968) - La minéralisation des eaux naturelles. In: *"Exploration hydrobiologique du bassin du lac Bangweolo et du Luapula"*, 2 (1), 199 p.
- Tardy Y. (1986) - Le cycle de l'eau; climats, paléoclimats et géochimie globale. *Ed. MASSON, Paris*, 338 p.
- Tardy Y., Mortatti J., Victoria R., Martinelli L., Ribeiro A., Cerri C., Piccolo M., Leite de Moraes J., Probst J.L., Andreux F. et Volkoff B. (1993) - Hydroclimatology and biogeochemistry of the Amazon 2. geochemical cycles. *Chemical Geology*, 107, p. 411-414.
- UNESCO (U.N. Educational, Scientific, and Cultural Organization). 1977. Atlas of World Water Balance. *UNESCO Press, Paris*.
- Walker J.C.G., Hays P.B. et Kasting J.F. (1981) - A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *J. Geophys. Research*, 86, p. 9776-9782.
- Wollast R. et Mackenzie F.T. (1983) - The global cycle of silica. In: *Silicon geochemistry and biogeochemistry, ASTON S. E. Ed., Academic Press, London*, p. 39-76.