

COMPTES RENDUS
DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

1993 — Tome 317

Série II :

MÉCANIQUE - PHYSIQUE - CHIMIE
SCIENCES DE LA TERRE
ET DE L'UNIVERS

gauthier-villars

Hydrologie/Hydrology
(Géochimie/Geochemistry)

Flux de CO₂ consommé par altération chimique continentale : influences du drainage et de la lithologie

Philippe AMIOTTE SUCHET et Jean-Luc PROBST

Résumé – Le flux de CO₂ consommé par altération chimique continentale (F_{CO_2}) peut être estimé à partir de la teneur en bicarbonates des eaux de surface. En utilisant les données de la bibliographie sur 232 petits bassins versants monolithologiques, on détermine des relations entre F_{CO_2} et le débit (Q), pour les principaux types de roche affleurant à la surface des continents. Les modèles ajustés à ces relations sont appliqués aux bassins versants de la Garonne et du Congo, afin de déterminer le flux de CO₂ consommé par érosion chimique. Les résultats obtenus sont comparables aux estimations basées sur les mesures de terrain.

CO₂ flux consumed by chemical weathering of continents: influences of drainage and lithology

Abstract – The flux of atmospheric/soil CO₂ consumed by chemical weathering of the continents (F_{CO_2}) can be estimated from bicarbonate concentrations in surface water. Using data from the bibliography for 232 small monolithologic watersheds, relationships between F_{CO_2} and the runoff (Q) have been determined for the major rock types outcropping on the continents. The models fitted to these relationships are then applied to the Garonne and Congo river basins, in order to calculate the mean CO₂ flux consumed in these basins. The results obtained are close to previous estimates based on field measurements.

Abridged English Version – The present-day total carbon flux coming from the atmosphere/soil and transported into the oceans is estimated to be about 0.6 to 0.7 GtC.y⁻¹ (Amiotte Suchet and Probst, 1992; Probst *et al.*, 1992). This flux is divided into two parts: *a*) the dissolved and particulate organic carbon (0.3 GtC.y⁻¹, Degens *et al.*, 1991, to 0.4 GtC.y⁻¹; Meybeck, 1982) supplied by erosion of soil organic matter and *b*) the atmospheric/soil (biogenic) CO₂ released as HCO₃⁻ ions during chemical weathering of rocks (0.3 GtC.y⁻¹, Berner *et al.*, 1983; Meybeck, 1987; Probst, 1992).

In a drainage basin, the amount of atmospheric/soil CO₂ consumed by chemical weathering can be estimated from the bicarbonate ion fluxes measured at the outlet of the basin. Indeed, for the weathering of silicate minerals, the entire bicarbonate flux comes from atmospheric/soil CO₂ as seen for albite hydrolysis [equation (1)]. In the weathering of carbonate minerals, only half of the bicarbonate flux originates from atmospheric/soil CO₂. The other half is supplied by the dissolved carbonate minerals, as seen for calcite dissolution [equation (2)]. The objective of this work is to determine the relationships between the CO₂ flux consumed by rock weathering and the drainage intensity, for the major continental rock types. These relationships will then be used to model the CO₂ consumption by rock weathering in the major river drainage basins and on the whole land area. As examples, the first results obtained for the Garonne basin, in temperate climate, and for the Congo basin, in tropical equatorial climate, are discussed.

The relationships between the CO₂ flux consumed by rock weathering and the drainage are based on the data published by Meybeck (1986) for concentration of major dissolved elements in surface water and for the runoff, concerning 232 small monolithologic watersheds in France. For each watershed, the HCO₃⁻ flux has been calculated using river runoff and bicarbonate concentrations. The atmospheric/soil CO₂ flux is equivalent to half of the HCO₃⁻ flux for

Note présentée par Jean DERCOURT.

streams draining carbonate rocks, and to the total HCO_3^- flux on silicate rocks. Transfer functions between the flux of atmospheric/soil CO_2 consumed by rock weathering (F_{CO_2}) and runoff (Q) are calculated using linear regression.

Strong positive relationships have been observed for each rock type (table). Using these relationships, a relative index of CO_2 consumption (I_{CO_2}) has been calculated for each type of rock. This index is the ratio between the mean CO_2 flux consumed by the weathering of a given rock and the CO_2 flux consumed by the weathering of plutonic and metamorphic rocks. As seen in table, I_{CO_2} varies from 1.6, for sands and sandstones, to 17 for carbonate rocks (*fig. 1 a*). Results show that: *a*) the CO_2 flux consumed by the weathering of basalts is twice as high as that consumed by the weathering of acid volcanic rocks (*fig. 1 b*); *b*) after carbonate rocks, argillaceous detritic rocks show the highest index of CO_2 consumption (I_{CO_2}); *c*) although evaporitic rocks are very sensitive to chemical erosion, I_{CO_2} for these rocks amounts only to 3 because dissolution of evaporitic minerals does not use up CO_2 .

Finally, the relationships between F_{CO_2} and Q , described in the table, are used in the modelling of the consumption of atmospheric/soil CO_2 by rock weathering in the Garonne basin and on the Congo basin. The Garonne basin is divided into 2.5×2.5 km grid cells for which the type of rock and the drainage are known. Then, for each grid cell, the flux of CO_2 consumed by weathering is calculated using the relationships $F_{\text{CO}_2} = f(Q)$ (table) corresponding to the dominant lithology of the grid cell. The resulting map (*fig. 2*) shows that the specific flux of CO_2 consumed by rock weathering in the Garonne basin can vary from 13×10^3 to $2,400 \times 10^3$ moles. $\text{km}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$. The mean CO_2 flux consumed in the entire basin is equal to 224×10^3 moles. $\text{km}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ for a drainage of 345 mm. y^{-1} . This result is comparable to the fluxes calculated by Etchanchu (1988) and Semhi (1993) on the basis of the weathering budget of the basin and which are respectively 441.5×10^3 moles. $\text{km}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ for a drainage of 415 mm. y^{-1} (wet period) and 151.4×10^3 moles. $\text{km}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ for drainage of 156 mm. y^{-1} (dry period). Moreover, the CO_2 contribution to the bicarbonate flux is equal to 57% after this model, which is close to the estimate of Etchanchu (1988) (55%).

The flux of CO_2 consumed by rock weathering has also been calculated for the Congo basin, using the relationships $F_{\text{CO}_2} = f(Q)$ defined in this study. After Nkounkou and Probst (1987), the major rock types outcropping in the Congo basin are crystalline rocks, sands and sandstones and carbonate rocks which cover 42, 49 and 9% respectively of the basin. The drainage intensity is estimated by Nkounkou and Probst (1987) to be 240 mm. y^{-1} for crystalline rocks, 430 mm. y^{-1} for sands and sandstones and 73 mm. y^{-1} for carbonate rocks in the Congo basin. Applying the transfer functions calculated in this study to these major rock types, the mean flux of atmospheric/soil CO_2 consumed by chemical erosion in the Congo basin is estimated to be 50.5×10^3 moles. $\text{km}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$. This value is higher than the flux (31.1×10^3 moles. $\text{km}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$) calculated by Nkounkou and Probst (1987) using mean concentrations in river water which drains monolithologic basins of Central Africa. However, the estimate of this study is close to that (56.2×10^3 moles. $\text{km}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$) calculated by Probst *et al.* (1993) after a model based on the concentrations of the major dissolved elements measured at the outlet of the Congo basin.

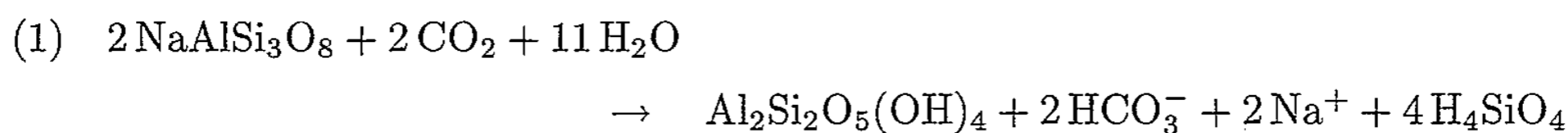
These first results allow us to apply the relationships determined in this study to the total land area, in order to estimate and model the global CO_2 consumption by rock weathering.

INTRODUCTION. – L'altération chimique des continents a joué un rôle important dans la régulation des teneurs en 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 CO_2

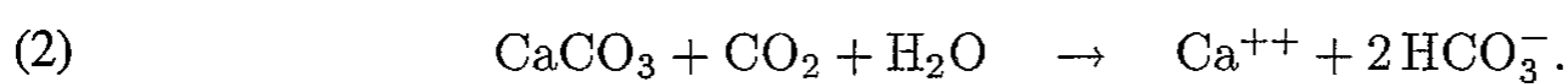
atmosphérique consommé par l'érosion chimique est estimé entre 0,28 et 0,30.10¹⁵ g de carbone par an (0,28 à 0,30 GtC/an) (Berner *et al.*, 1983; Meybeck, 1987; Probst, 1992). A ce flux, qui rejoint les océans via les fleuves sous forme d'ions bicarbonates, il faut ajouter les flux de carbone organique dissous et particulaire transportés par les fleuves (0,33 GtC/an, Degens *et al.*, 1991, à 0,40 GtC/an; Meybeck, 1982). 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 CO₂ consommé par altération chimique continentale sont le drainage, la température de l'air (Garrels et Mackenzie, 1971; Amiotte Suchet et Probst, 1992; Probst, 1992; Probst *et al.*, 1992) et l'abondance des roches carbonatées affleurant à la surface des continents (Probst *et al.*, 1993).

Sur un bassin versant, les ions bicarbonates mesurés dans les eaux de drainage proviennent principalement de la dissolution des carbonates des roches et du CO₂ d'origine atmosphérique libéré par l'oxydation de la matière organique des sols, et utilisé lors de l'altération des minéraux silicatés et carbonatés selon, par exemple, les équations suivantes :

hydrolyse de l'albite :



dissolution de la calcite



L'objectif de cet article est de déterminer les relations entre le flux spécifique de CO₂ consommé et le drainage continental, pour chaque grand type de roche affleurant à la surface des continents. Ces relations seront ensuite utilisées pour modéliser la quantité de CO₂ consommé par l'érosion chimique à l'échelle des grands bassins fluviaux et à l'échelle globale. On présentera dans cette étude, à titre d'exemple, les premiers résultats obtenus sur les bassins versants de la Garonne, en climat tempéré, et du Congo en climat tropical équatorial.

I. RELATIONS ENTRE LE FLUX DE CO₂ ET LE DRAINAGE. – 1. *Matériel et méthode.* – Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé les données publiées par Meybeck (1986) sur les débits estimés et les concentrations en éléments majeurs dissous mesurées dans les eaux de surface de 232 petits bassins versants monolithologiques français. Le substratum géologique de ces bassins représente pratiquement tous les principaux types de roches affleurant actuellement à la surface des continents. Les bassins possèdent des caractéristiques morpho-climatiques homogènes, ils sont couverts par des forêts ou des pelouses alpines et ils ne subissent aucune pollution anthropique directe. Les analyses ont été effectuées sur un ou deux échantillons prélevés à l'exutoire de chaque bassin versant au cours de différentes périodes hydrologiques.

On calcule le flux de HCO₃⁻ à partir du débit estimé et de la concentration en bicarbonates mesurée. Le flux de CO₂ consommé par altération à l'exutoire du bassin est égal à la totalité du flux de bicarbonates pour les bassins versants à substratum non carbonaté [équation (1)] et à la moitié du flux de bicarbonates pour les bassins versants à substratum carbonaté [équation (2)] ou évaporitique (dans les eaux de drainage des bassins versants à substratum évaporitique, les bicarbonates proviennent principalement de la dissolution des carbonates). Les relations entre le flux spécifique (flux divisé par la surface du bassin) de CO₂ (F_{CO₂}) et le débit spécifique (Q) sont déterminées par régression linéaire.

2. *Résultats.* – En regroupant les bassins par grandes classes lithologiques, on peut observer de bonnes relations linéaires et positives entre F_{CO_2} et Q (tableau), bien que les débits n'aient pas été mesurés avec une grande précision. Ainsi, lorsque le débit augmente, l'érosion chimique et la consommation de CO_2 augmentent, mais à débit égal les flux de CO_2 (F_{CO_2}) sont plus importants pour les roches carbonatées que pour les roches silicatées (fig. 1 a).

Pour chaque type de roche on peut calculer un indice relatif de consommation de CO_2 (I_{CO_2}) sur le même modèle que l'indice relatif d'érosion chimique (I_E) déterminé par Meybeck (1987) (tableau). I_{CO_2} est égal au flux moyen de CO_2 consommé par un type de roche donné, rapporté au flux moyen de CO_2 consommé par les roches plutoniques et métamorphiques, pris comme référence, car ce sont les roches les moins sensibles à l'érosion chimique et celles qui consomment le moins de CO_2 (tableau). A l'inverse, les roches carbonatées sont celles qui utilisent le plus de CO_2 , soit près de 17 fois plus que les granites (fig. 1 a). L'altération des basaltes est deux fois plus consommatrice de CO_2 que l'altération des roches volcaniques acides, qui consomme elle-même deux fois plus de CO_2 que l'altération des roches du bouclier (fig. 1 b). De telles différences entre les basaltes et les roches volcaniques acides peuvent être expliquées par une plus forte proportion de minéraux ferromagnésiens (olivine et pyroxènes) dans les basaltes, minéraux dont la dissolution est plus rapide que celle des plagioclases ou des feldspaths (Madé, 1991). Les roches détritiques argileuses montrent le I_{CO_2} le plus fort après les roches carbonatées. On ne peut pas exclure, dans ce type de roches, la présence de minéraux carbonatés, qui pourrait expliquer la forte valeur de I_{CO_2} . Cependant, le rapport Ca^{++}/Na^+ restant assez faible dans les eaux drainant ces roches (Meybeck, 1986), les minéraux carbonatés ne peuvent être présents qu'en faible quantité, et ils devraient finalement modifier assez peu le flux de CO_2 calculé.

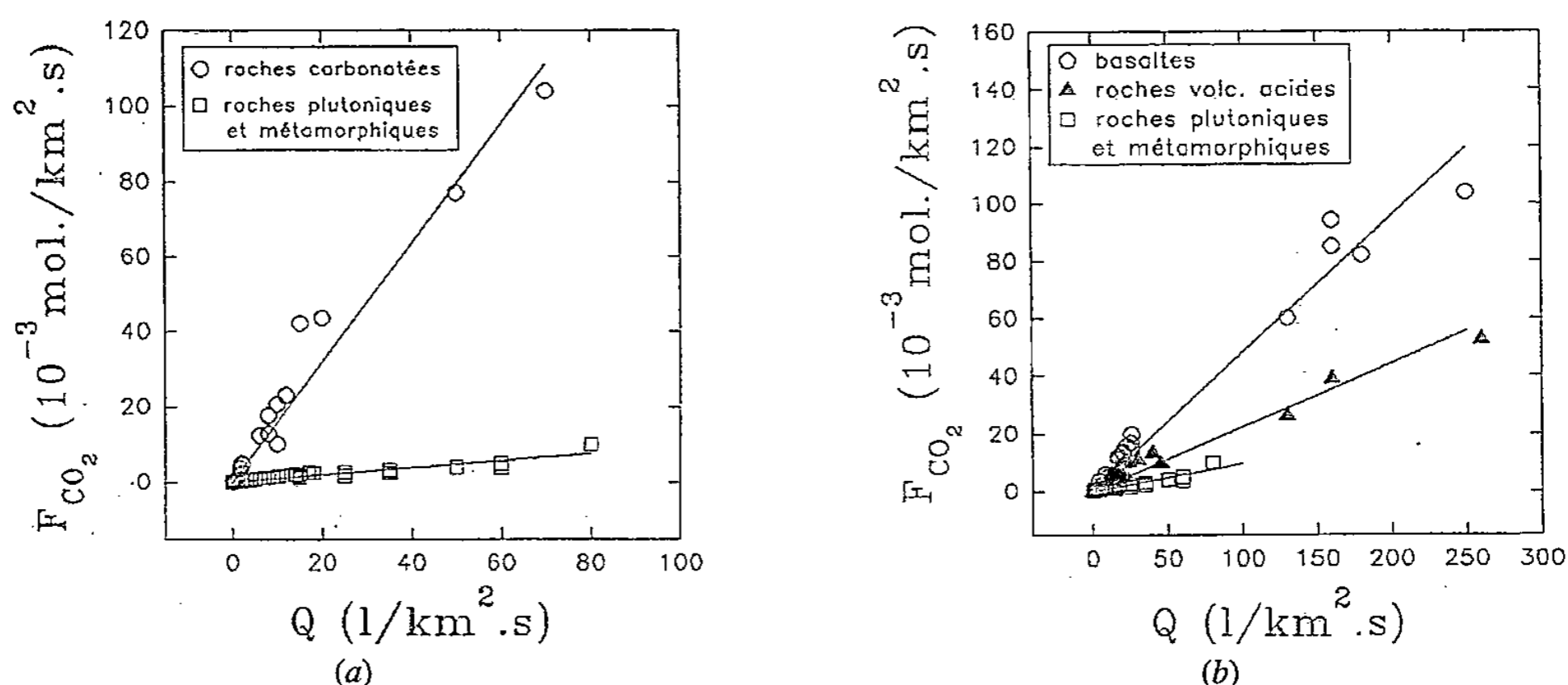


Fig. 1. – Relations entre le flux de CO_2 consommé par érosion chimique (F_{CO_2}) et le débit (Q) des ruisseaux pour les bassins versants (a) sur roches carbonatées et sur roches plutoniques et métamorphiques, et (b) sur basaltes, sur roches volcaniques acides et sur roches plutoniques et métamorphiques. Les concentrations en HCO_3^- et les débits qui ont été utilisés dans cette étude pour calculer les flux de CO_2 et les relations flux-débit ont été acquis par Meybeck (1986) sur des petits bassins versants monolithologiques français.

Fig. 1. – Relationships between the flux of CO_2 consumed by rock weathering (F_{CO_2}) and the stream runoff (Q) for watersheds (a) on carbonate rocks and on plutonic and metamorphic rocks, and (b) on basalts, on acid volcanic rocks and on plutonic and metamorphic rocks. HCO_3^- concentrations and stream discharges which have been used in this study to calculate CO_2 fluxes and the relationships flux-discharge have been obtained by Meybeck (1986) from small French monolithologic watersheds.

Enfin, les grès, associés aux sables, montrent un I_{CO_2} très faible (le plus faible après les roches plutoniques et métamorphiques), imputable au quartz qui est le principal composant de ces roches et qui est très résistant à l'érosion chimique.

TABLEAU

Caractéristiques (N, a, r, s) des modèles ajustés aux relations entre le flux de CO₂ consommé par érosion chimique (F_{CO_2}) et le débit (Q) pour chaque type de roche. Valeurs des indices d'érosion chimique et de consommation de CO₂, et flux moyens de CO₂ en climat tempéré. Les concentrations en HCO₃⁻ et les débits qui ont été utilisés dans cette étude pour calculer les flux de CO₂ et les relations flux-débit ont été acquis par Meybeck (1986) sur des petits bassins versants monolithologiques français.

Characteristics (N, a, r, s) of the regression models fitted to the relationships between the flux of atmospheric/soil CO₂ consumed by rock weathering (F_{CO_2}) and the runoff (Q), for each rock type. Values of chemical weathering and CO₂ consumption indices, and mean CO₂ fluxes in temperate climate. HCO₃⁻ concentrations and stream discharges which have been used in this study to calculate the CO₂ fluxes and the relationships flux-discharge have been obtained by Meybeck (1986) from small French monolithologic watersheds.

Types de roche	Composition lithologique	N (1)	Relation $F_{CO_2} - Q$ (2)			Indices		Flux moyen de CO ₂ (6)
			Coefficient a de $F_{CO_2} = a Q$	r (3)	s (4)	I _E (5)	I _{CO₂}	
Roches plutoniques et métamorphiques	granites, gneiss, micaschistes, schistes	41	0,095	0,92	1	1,0	1,0	0,9
Roches volcaniques acides	rhyolites, andésites, trachy-andésites, ordanchites	22	0,222	0,98	1	—	2,3	2,2
Basaltes	basaltes	18	0,479	0,98	1	—	5,0	4,8
Sables et grès	sables, sables argileux, grès, grès ferrugineux, grès quartzeux	47	0,152	0,71	1	1,3	1,5	1,5
Roches détritiques argileuses	schistes houillers et gréseux, schistes lustrés, argiles, grès argileux, gaizes	34	0,627	0,95	1	2,5	6,6	6,3
Roches carbonatées	calcaires, craies, calcaires dolomitiques, cailloutis calcaires, marnes	19	1,586	0,98	1	12,0	16,7	15,9
Roches évaporitiques	marnes à gypse et/ou à halite	9	0,293	0,99	1	40 à 80	3,1	2,9

(1) Nombre de bassins; (2) F_{CO_2} en 10^{-3} moles/km². s, Q en l/km². s; (3) coefficient de corrélation de Pearson; (4) seuil de signification (%); (5) Indice relatif d'érosion chimique (Meybeck, 1987), I_E = taux d'érosion de la roche/taux d'érosion des roches granitiques; (6) en 10^{-3} moles/km². s et sous climat tempéré européen, calculé d'après les relations $F_{CO_2} = f(Q)$ pour un débit moyen de 10 l/km². s.

(1) Number of basin; (2) F_{CO_2} in 10^{-3} moles/km². s⁻¹, Q in l/km². s⁻¹; (3) Pearson's correlation coefficient; (4) significant level (%); (5) relative index of chemical erosion (Meybeck, 1987), I_E = weathering rate of a given rock type/weathering rate of granitic rocks; (6) in 10^{-3} moles.km⁻². s⁻¹ under European temperate climate, calculated after the relationships $F_{CO_2} = f(Q)$, for an average discharge of 10 l.km⁻². s⁻¹.

II. APPLICATIONS AUX BASSINS DE LA GARONNE ET DU CONGO. — 1. La Garonne. — On propose ici une première application des modèles précédents au bassin de la Garonne qui couvre une superficie de 52 000 km² à la station de La Réole. Le bassin a été divisé en mailles élémentaires (2,5 × 2,5 km) pour lesquelles on a déterminé l'intensité du drainage moyen annuel (BRGM, 1983) et la nature de la roche (BRGM, 1980; BRGM, ELF/RE, ESSO/REP, SNPA, 1979). Pour chaque maille élémentaire, le flux

de CO_2 consommé est calculé en appliquant le modèle correspondant à la lithologie dominante de la maille. Les flux spécifiques de CO_2 ainsi calculés (fig. 2) varient entre $13 \cdot 10^3$ et $2400 \cdot 10^3$ moles/ $\text{km}^2 \cdot \text{an}$ avec un flux moyen sur l'ensemble du bassin de $224 \cdot 10^3$ moles/ $\text{km}^2 \cdot \text{an}$ correspondant à un drainage moyen de 345 mm/an. Ce flux moyen est plus faible que celui ($441,5 \cdot 10^3$ mole/ $\text{km}^2 \cdot \text{an}$ pour un débit de 415 mm/an, période 1971-1984) estimé par Etchanchu (1988) pour une période plus humide, et il est légèrement supérieur à celui ($151,4 \cdot 10^3$ moles/ $\text{km}^2 \cdot \text{an}$ pour 156 mm/an, période 1989-1990) récemment calculé par Semhi (1993) pour une période plus sèche. Mais, la méthode utilisée par Etchanchu (1988), basée sur les relations concentrations/débits, surestime nettement le flux de HCO_3^- exporté hors du bassin et donc, par conséquence, le flux de CO_2 consommé par altération, notamment pour les forts débits. Cependant, la contribution du CO_2 au flux de bicarbonates transporté par la Garonne est de 57 % selon le modèle proposé dans cette étude, ce qui est tout à fait comparable à l'estimation (55%) faite par Etchanchu (1988) à partir des contributions de l'érosion chimique de chaque type de roche au flux total d'éléments dissous exportés par la Garonne.

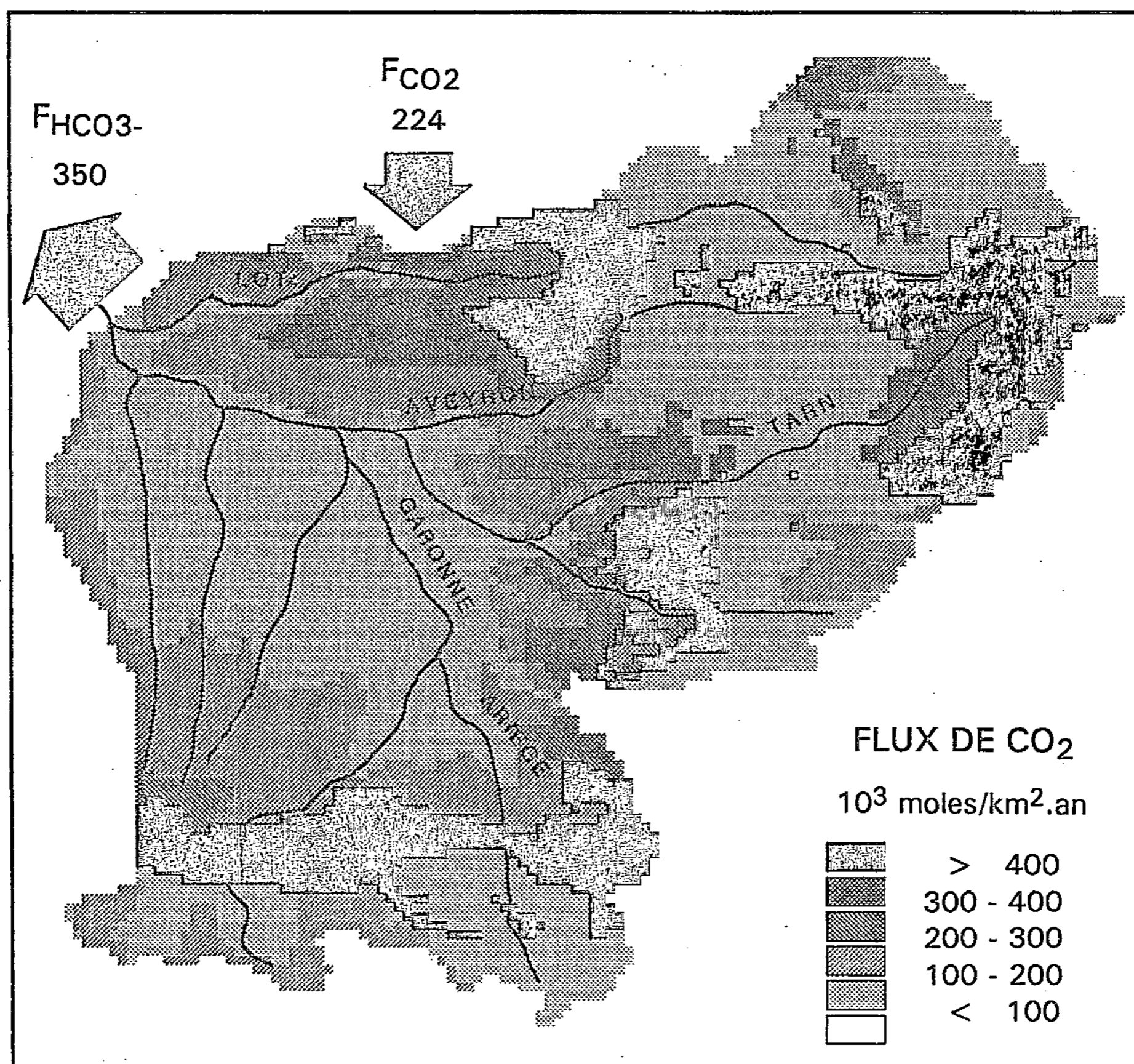


Fig. 2. – Carte des flux moyens annuels spécifiques de CO_2 (F_{CO_2}) consommés par altération chimique des roches (résolution $2,5 \times 2,5$ km) et flux total de bicarbonates sur le bassin de la Garonne. Tous les flux sont exprimés en 10^3 moles/ $\text{km}^2 \cdot \text{an}$.

Fig. 2. – Map of the mean annual specific CO_2 fluxes (F_{CO_2}) consumed by rock weathering (grid 2.5×2.5 km) and total bicarbonate river flux in the Garonne basin. All the fluxes are expressed in 10^3 moles . $\text{km}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$.

2. *Le Congo.* – Les trois principaux types de roche qui affleurent sur le bassin du Congo sont les roches cristallines, les sables et les grès, et les roches carbonatées, qui occupent respectivement 42, 49 et 9 % de la surface du bassin ($3,5 \cdot 10^6$ km²) et dont l'intensité moyenne du drainage annuel a été estimée respectivement à 240, 430 et 73 mm (Nkounkou et Probst, 1987). En appliquant à ces principales formations les modèles $F_{\text{CO}_2} = f(Q)$ correspondants (tableau), on peut estimer le flux moyen de CO₂ consommé sur l'ensemble du bassin du Congo à $50,5 \cdot 10^3$ moles/km².an pour un drainage moyen de 370 mm/an. Ce résultat est supérieur au flux ($31,1 \cdot 10^3$ moles/km².an) estimé par Nkounkou et Probst (1987) à partir des flux d'éléments dissous libérés par l'altération de chaque type de roche; par contre, il est très proche des résultats ($56,2 \cdot 10^3$ moles/km².an) obtenus par Probst *et al.* (1993) en utilisant une méthode globale basée sur les rapports ioniques des éléments majeurs dissous transportés par le Congo à Brazzaville. La contribution du flux de CO₂ consommé par altération au flux total de bicarbonates représente 83 %, pourcentage légèrement supérieur à ceux calculés par Nkounkou et Probst (1987) (76 %) et Probst *et al.* (1993) (75 %).

CONCLUSIONS. – Le flux de CO₂ d'origine atmosphérique consommé par l'altération chimique des roches est principalement influencé par l'intensité du drainage et par la nature de la roche. On a ainsi défini 7 grands types de roche représentatifs de l'ensemble des roches affleurant à la surface des continents. Pour chaque type de roche, on a pu mettre en évidence des relations linéaires simples entre le flux de CO₂ consommé et le débit, en utilisant des données déjà publiées sur plus de 200 petits bassins versants monolithologiques. On a pu alors déterminer, pour chaque type de roche, un indice de consommation de CO₂ (I_{CO_2}). On remarque alors que cet indice varie de 1,6, pour les grès, à 17 pour les roches carbonatées et qu'il est deux fois plus fort pour les basaltes que pour les roches volcaniques acides. Enfin, les roches détritiques argileuses montrent le I_{CO_2} le plus élevé après les roches carbonatées.

Les modèles $F_{\text{CO}_2} = f(Q)$ utilisés ensuite sur les bassins de la Garonne et du Congo, ont permis d'estimer le flux de CO₂ respectivement à $224 \cdot 10^3$ moles/km².an (soit 57 % du flux de bicarbonates exporté par le fleuve) et $50,5 \cdot 10^3$ moles/km².an (soit 83 % du flux de bicarbonates). Ces valeurs sont comparables à celles estimées respectivement par Semhi (1993) et Probst *et al.* (1993) à partir des mesures de terrain. Ces résultats montrent que le flux moyen spécifique de CO₂ est plus élevé pour le bassin de la Garonne que pour celui du Congo où la proportion de roches carbonatées est plus faible (9 % contre 61 % pour la Garonne).

Ces premiers résultats vont nous permettre d'appliquer les modèles proposés dans cette étude à l'ensemble des surfaces continentales, pour estimer et modéliser le flux de CO₂ consommé par érosion chimique à l'échelle globale.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme Environnement des Communautés Européennes *The Global Carbon Cycle and its Perturbation by Man and Climate II – Terrestrial Biosphere*.

Note remise le 21 décembre 1992, acceptée après révision le 30 juin 1993.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- P. AMIOTTE SUCHET et J.-L. PROBST, Flux de CO₂ atmosphérique consommé par érosion chimique des continents et transfert de carbone du réservoir biosphère-sol vers les océans, 14^e RST, Toulouse, 13-15 avril 1992, Soc. géol. Fr., Paris, 1992, p. 5.
BRGM, EIH/RE, ESSO/REP, SNPA, *Géologie du bassin d'Aquitaine*, BRGM, Orléans, 1979.
BRGM, *Carte géologique de la France et de la marge continentale à l'échelle de 1/1 500 000*, BRGM, Orléans, 1980.
BRGM, Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1946-1976), *carte à 1/1 500 000*, Rapport BRGM 83 SGN 003 EAU, Orléans, 1983.

- R. A. BERNER, A model for atmospheric CO₂ over Phanerozoic time, *Amer. J. Sci.*, 291, 1991, p. 339-376.
- R. A. BERNER, A. C. LASAGA et R. M. GARRELS, The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric CO₂, *Amer. J. Sci.*, 283, 1983, p. 641-683.
- E. T. DEGENS, S. KEMPE et J. E. RICHEY, Biogeochemistry of major world rivers, In *Biogeochemistry of Major World Rivers*, Scope 42, DEGENS, KEMPE et RICHEY éd., J. Wiley and Sons, 1991, p. 323-344.
- D. ETCHANCHU, Géochimie des eaux du bassin de la Garonne, transfert de matières dissoutes et particulaires vers l'océan Atlantique, *Thèse de Doctorat*, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1988, 178 p., déposée à l'Atelier National de Reproduction des Thèses (ANRT), Grenoble.
- R. M. GARRELS et F. T. MACKENZIE, *Evolution of sedimentary rocks*, W. W. Norton and Co. Inc., New York, 1971, 397 p.
- B. MADÉ, Modélisation thermodynamique et cinétique des réactions géochimiques dans les interactions eau-roche, *Thèse de Doctorat*, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1991, 308 p., déposée à la Société géologique de France.
- M. MEYBECK, Carbon, nitrogen and phosphorus transported by world rivers, *Amer. J. Sci.*, 282, 1982, p. 401-450.
- M. MEYBECK, Composition chimique des ruisseaux non pollués de France, *Sci. Géol. Bull.*, 39, 1986, p. 3-77.
- M. MEYBECK, Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved load, *Am. J. Sci.*, 287, 1987, p. 401-428.
- R. R. NKOUNKOU et J.-L. PROBST, Hydrology and geochemistry of the Congo river system, *Mitt. Geol. Paläont. Inst., Univ. Hamburg, SCOPE/UNEP Sonderband*, Helf 64, 1987, p. 483-508.
- J.-L. PROBST, 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, 1992, 167 p.
- J.-L. PROBST, P. AMIOTTE SUCHET et Y. TARDY, Global continental erosion and fluctuations of atmospheric CO₂ consumed during the last 100 years, *Proc. 7th Intern. Symp. WRI*, Park City, Utah, USA, 13-18 juillet 1992, KHARAKA et MAEST éd., Balkema, Rotterdam, 1992, p. 483-486.
- J.-L. PROBST, J. MORTATTI et Y. TARDY, Carbon river fluxes and global weathering CO₂ consumption in the Congo and Amazon river basins, *Applied Geochemistry*, 1993 (sous presse).
- K. SEMHI, Érosion et transfert de matière sur le bassin de la Garonne, *Thèse de Doctorat*, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1993 (à paraître).
- J. C. G. WALKER, P. B. HAYS et J. F. KASTING, A negative feedback mechanism for the long term stabilization of Earth's surface temperature, *J. of Geophys. Res.*, 86, 1981, p. 9776-9782.

Centre de Géochimie de la Surface, CGS, CNRS,
1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex, France.