

Evolution de l'hydrologie du Congo-Zaïre et de ses affluents rive droite et dynamique des transports solides et dissous

A. LARAQUE & J. C. OLIVRY

Centre Orstom, Laboratoire d'Hydrologie, BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex, France

Résumé Le fleuve Congo-Zaïre, deuxième de la planète, tant par son module interannuel que par la superficie de son bassin versant, bénéficie d'une chronique limnimétrique de 90 ans. Il présente un hydrogramme bimodal et régulier, dû à la situation de son bassin versant de part et d'autre de l'équateur, où hautes eaux et basses eaux de l'hémisphère sud succèdent respectivement à celles de l'hémisphère nord. Cette régularité saisonnière et interannuelle se retrouve également dans ses flux de matières en raison des forts débits en cause. Le rôle déterminant de la partie septentrionale du bassin versant dans la baisse récente d'hydraulicité du Congo-Zaïre à Brazzaville a été mis en évidence. Une classification de ses affluents rive droite a été adaptée à leurs caractéristiques biogéohydrodynamiques. Enfin les domaines tropical humide de transition de l'Oubangui et équatorial du Congo-Zaïre ont été comparés, tant par leurs régimes d'écoulement que par leurs dynamiques de transport de matière.

Hydrological evolution of Congo-Zaïre river and its right bank tributaries – consequences for the transport of solid and dissolved matter

Abstract The Congo-Zaïre river is the world's second largest river, both for its mean flow and for its catchment area. Daily discharge data are now available for the last 90 years. The flow regime is regular and has two peaks: the catchment is partly in the northern hemisphere and partly in the southern hemisphere. This means that peak and low flows of the southern part follow peak and low flows of the northern part. The regularity of the runoff, shown by the low variability between seasons and years (1.77 and 1.67 respectively), is also observed in the transport of solid and dissolved material. The recent decrease in the flow regime of the river observed at Brazzaville is mainly due to the northern part of the basin. The tributaries of the right bank were classified according to their biogéohydrodynamic characteristics. The moist tropical domain of the Oubangui river was compared to the equatorial one of the Congo-Zaïre both with respect to their flow regimes and transport of solids.

INTRODUCTION

Le programme de recherche PEGI/GBF (PEGI/GBF = Programme d'Etude de la Géosphère Intertropicale - Opération Grands Bassins Fluviaux), réalisé entre 1987 et

1993 sur le bassin du fleuve Congo-Zaïre, avait pour finalité de décrire et de comprendre le fonctionnement de ce grand écosystème intertropical humide ainsi que celui des différentes unités qui le constituent.

Après avoir rappelé le contexte déficitaire de la période d'étude et souligné la part prépondérante des affluents rive droite du Congo-Zaïre dans ces déficits, une différenciation est faite dans la réponse hydrologique de leurs bassins sur la base de leurs caractéristiques géologiques et phytogéographiques qui illustre la complexité du fonctionnement biogéohydrodynamique du grand bassin du Congo-Zaïre. Un aperçu des bilans d'exportation de matière et des différentes composantes de ces exportations (suspensions, matières dissoutes, matières minérale et organique) permet d'appréhender les différentes dynamiques en jeu sur l'hydrosystème du Congo-Zaïre.

Long de 4700 km avec une pente moyenne très faible de 0,033 %, le fleuve Congo-Zaïre dessine une large courbe qui traverse deux fois l'équateur (Fig. 1).

Son bassin situé entre les parallèles 9°N et 14°S et les méridiens 11°E et 31°E, couvre une superficie totale de 3,7 millions de kilomètres carrés. Il présente une structure globalement concentrique, tant par sa forme, son relief, sa géologie, son climat que par son couvert végétal. En son centre, une dépression ne dépassant pas 400 m d'altitude, constituée essentiellement de formations gréseuses sablonneuses et d'argilites d'âge mésozoïque surmontées de sols ferrallitiques, est couverte d'une forêt pluviale dense (35% de la superficie du bassin (Marlier, 1973)) en partie inondée lors des crues. La pluviométrie y est importante (2000 à 2300 mm an⁻¹).

Sur le pourtour de cette cuvette centrale affleure le socle continental africain, composé de roches cristallines et cristallophylliennes surmontées de quelques dépôts sédimentaires (schisto-calcaires, dolomites, ...). La pluviométrie y est plus faible (moins de 1400 mm an⁻¹). Une succession de massifs allongés et de plateaux couverts d'une savane plus ou moins arbustive à arborée ceinture cette cuvette. Ces reliefs inégaux avoisinent 700-800 m au sud-ouest et à l'ouest (chaîne du Mayombe, du Chaillu, puis les plateaux Batékés), 1500 m pour le massif de l'Adamaoua, plus au nord, et 600-700 m pour la dorsale Congo-Tchad bordant la périphérie septentrionale du bassin. Les reliefs les plus importants qui sont également les plus arrosés (2000-2500 mm an⁻¹) restent ceux des contreforts volcaniques du rift Est-Africain qui atteignent 2000-3000 m d'altitude. La dorsale Congo-Zambèze (1000-2000 m) ferme au sud ce vaste bassin versant, le deuxième de la planète par sa taille.

EVOLUTION RECENTE DE L'HYDROLOGIE DU CONGO-ZAÏRE ET DE SES AFFLUENTS RIVE DROITE

Si le régime hydrologique du Congo-Zaïre est suivi depuis le début du siècle, ce n'est qu'à partir de 1953 que l'hydrologie de ses affluents rive droite a commencé à être étudiée, certes plus ou moins régulièrement suivant les cours d'eau. Il y a néanmoins quelques exceptions comme l'Oubangui suivi depuis 1911, avec cependant d'importantes lacunes (Wesselink *et al.*, 1994) et la Sangha suivie depuis 1948. Nous avons dû effectuer, pour les autres affluents rive droite du Congo-Zaïre, une homogénéisation et une reconstitution des débits manquants sur les quarante dernières années (1953-1993), afin de pouvoir comparer leurs évolutions.

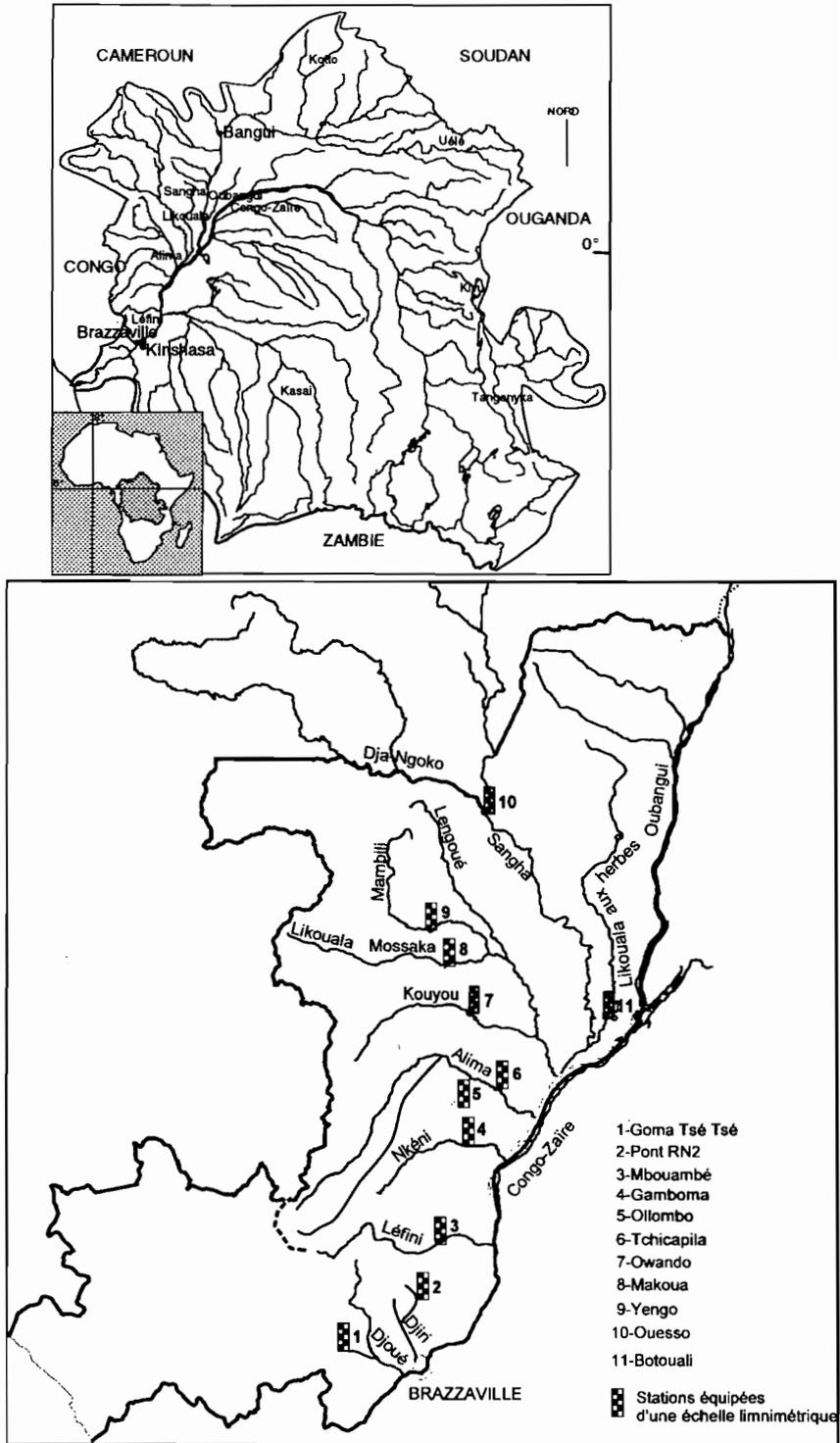


Fig. 1 Bassin versant du Congo-Zaïre et zone étudiée.

Variations spatiales des régimes hydrologiques du Congo-Zaïre et de ses affluents rive droite

La position du bassin du Congo-Zaïre coupé par l'équateur, confère à son régime hydrologique une grande régularité avec, en moyenne sur la période 1953-1993, une variation interannuelle de ses débits (module annuel maximum sur module annuel minimum) de 1,67 pour une variation saisonnière de 1,77 (moyenne des débits mensuels maximum sur moyenne des débits mensuels minimum) ainsi qu'une bimodalité caractéristique (Fig. 2(a)). En effet, les apports austraux et septentrionaux se succèdent et se complètent. L'année hydrologique, qui va de septembre à août, est marquée par l'alternance de deux périodes de hautes eaux (octobre-janvier et avril-mai) et de deux périodes basses eaux (février-mars et juin-septembre).

Pour une pluviométrie moyenne sur tout le bassin de 1560 mm an⁻¹ pour la période 1953-1989 (Mahé, 1995), le coefficient d'écoulement du Congo-Zaïre est de 24%. Son débit spécifique moyen proche de 12 l s⁻¹ km⁻² correspond à une exportation interannuelle de 1312 milliards de mètres cubes à la station de Brazzaville qui contrôle 97% de la superficie totale de son bassin versant.

En fait, sur ce vaste bassin, les débits spécifiques varient considérablement suivant les régions entre un minimum de 0,5 l s⁻¹ km⁻² à l'exutoire du lac Tanganyika et un maximum de près de 35 l s⁻¹ km⁻² rencontré dans les plateaux Batékés.

La Fig. 2 illustre les variations de régimes hydrologiques rencontrés sur les affluents et sous-affluents de rive droite du Congo-Zaïre. Ces tributaires passent progressivement d'un régime unimodal, dans la zone tropicale humide de l'hémisphère nord à une seule saison des pluies (Fig. 2(b)), à un régime bimodal caractéristique de la zone équatoriale à deux saisons des pluies (Fig. 2(c)).

Comme leurs cycles hydrologiques ne débutent pas à la même époque, nous raisonnerons par année calendaire pour faciliter les comparaisons inter-bassins.

Evolution des débits du Congo-Zaïre et de ses affluents rive droite entre 1953 et 1993

Baisse des écoulements En comparant la période du déroulement du programme PEGI (1987-1993) à celle des observations communes pour l'ensemble des cours d'eau de rive droite (1953-1993), nous constatons que le Congo-Zaïre à Brazzaville a enregistré une baisse de près de 10% de son module interannuel qui est passé de 41 600 à 37 500 m³ s⁻¹. Cette baisse récente de régime a déjà été mentionnée par plusieurs auteurs (Laraque *et al.*, 1993, 1995a; Olivry, 1993; Mahé, 1995).

A partir de 1970, après la décade humide des années 1960, l'hydraulicité (rapport des modules annuels sur le module interannuel) du Congo-Zaïre reste le plus souvent inférieure à 1. Le même phénomène a été observé de manière synchrone aux principales stations hydrométriques de ses affluents rive droite, mais avec des intensités différentes suivant leur latitude (Fig. 3). En comparant les moyennes interannuelles de leurs débits sur ces deux périodes (1953-1993 et 1987-1993), nous pouvons quantifier ces diminutions de régime et localiser ainsi l'origine géographique de la baisse d'hydraulicité enregistrée à Brazzaville (Tableau 1).

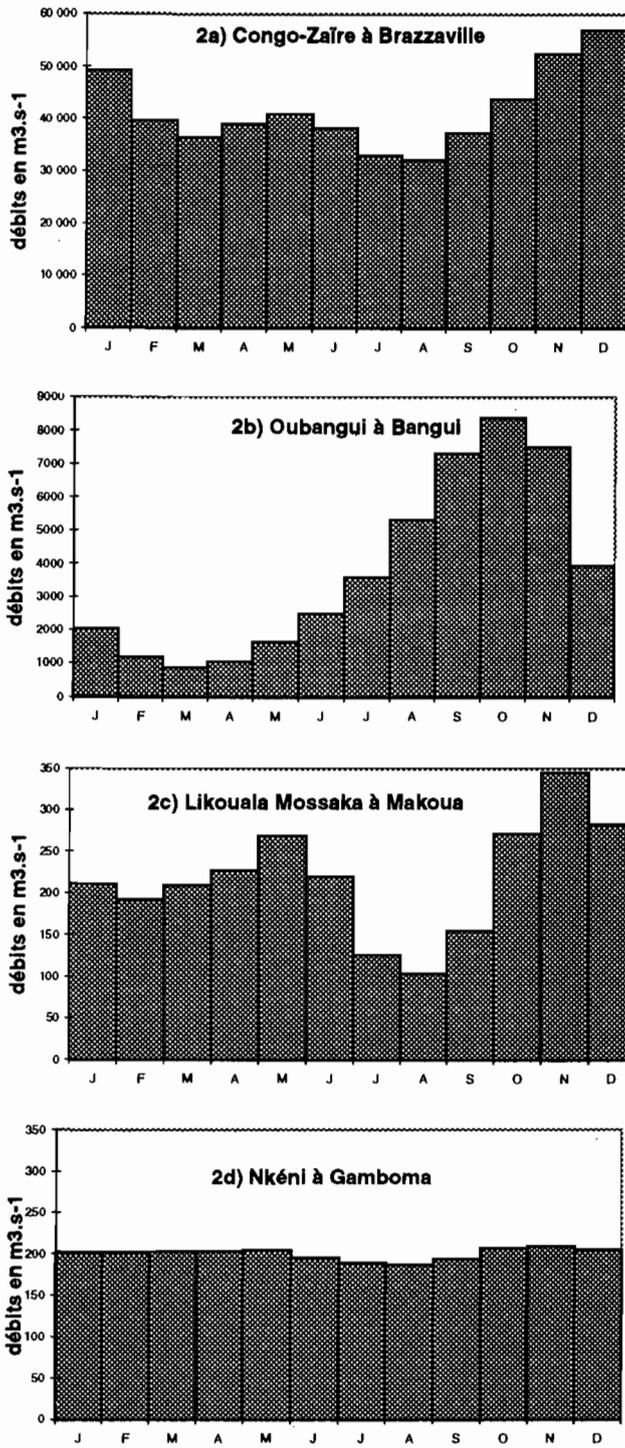


Fig. 2 Hydrogrammes moyens (1953-1993) du Congo-Zaïre et de ses affluents caractéristiques de rive droite.

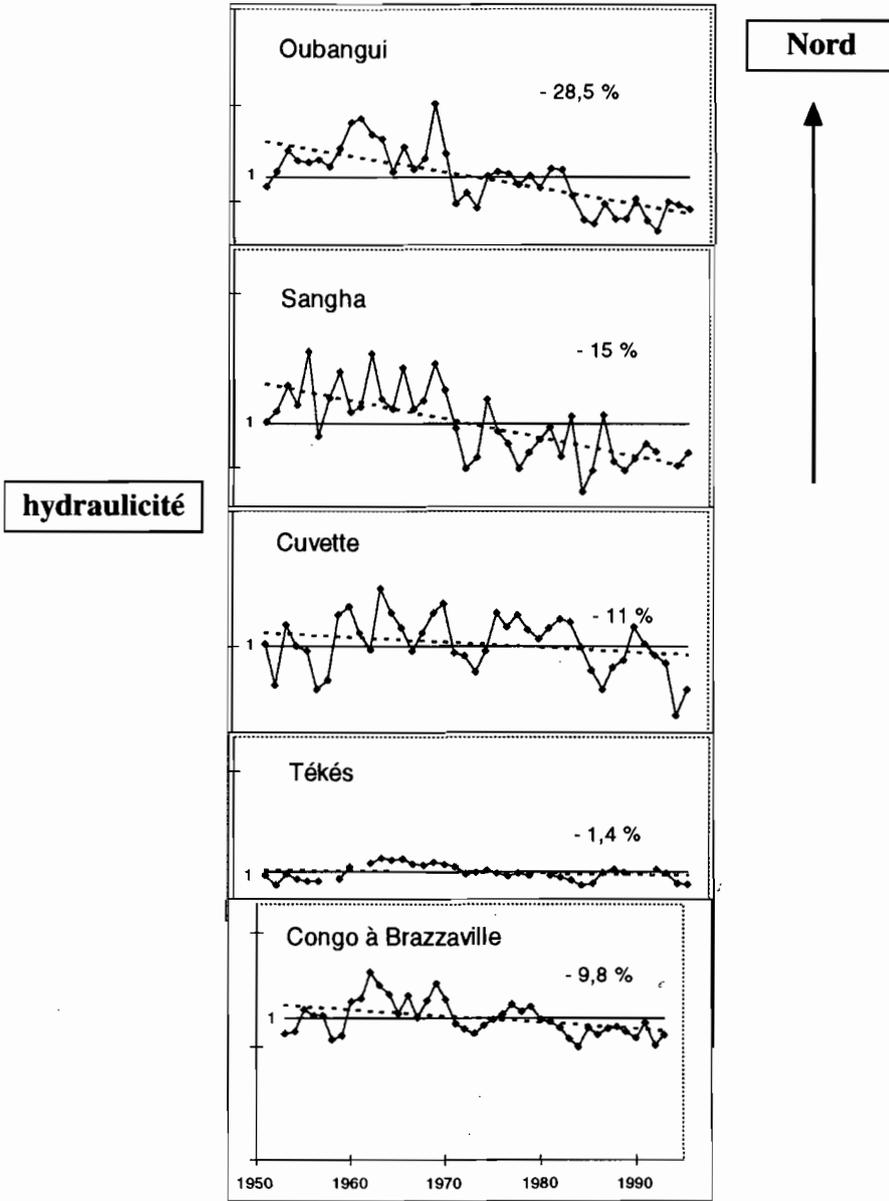


Fig. 3 Origine géographique de la baisse d'hydraulicité du Congo-Zaïre à Brazzaville.

De Bangui à Brazzaville, sur un transect approximativement nord-sud qui relie les principales stations de ces affluents, on observe un gradient de baisse des écoulements qui va diminuant du nord au sud, avec respectivement $-28,6\%$ pour l'Oubangui, -15% pour la Sangha et la Mambili, -11% pour la Likouala Mossaka et le Kouyou (Figs 3 et 4). Cette baisse de régime disparaît pour l'ensemble des plateaux Batékés ($-1,4\%$), qui constituent la dernière zone d'apports hydriques de rive droite située juste en amont de Brazzaville.

Tableau 1 Bilans hydrologiques des affluents rive droite du Congo-Zaïre pour les périodes 1953-1993 et 1987-1993.

(a) Période 1953-1993

| Rivière | Station principale | Surface station (km ²) | Surface exutoire (km ²) | Q moyen station (m ³ s ⁻¹) | Q spéc. station (l s ⁻¹ km ⁻²) | Q spéc. exutoire (l s ⁻¹ km ⁻²) | Qmoyen exutoire (m ³ s ⁻¹) |
|--------------------------|--------------------|---------------------------------------|--|--|--|---|--|
| Oubangui | Bangui | 488 500 | 643 900 | 3780 | 7,7 | 8,4 | 5 423 |
| Mpoko | Mbali-icot | 4 560 | 23 890 | 219 | 9,2 | 9,2 | 219 |
| Lobaye | Mbata | 30 300 | 31 100 | 311 | 10,3 | 10,3 | 319 |
| BV Oubangui restant | - | - | 100 410 | - | - | 11,0 | 1 105 |
| Ngoko | Moloundou | 67 075 | - | 758 | 11,3 | - | - |
| Sangha | Ouessou | 158 300 | 211 120 | 1616 | 10,2 | 10,5 | 2 226 |
| Likouala aux herbes | Botouali | 24 800 | 25 000 | 285 | 11,5 | 11,5 | 287 |
| BV Sangha restant | - | - | 28 020 | - | - | 11,5 | 322 |
| Lengoué | - | - | 12 125 | - | - | 15 | 182 |
| Mambili | Yengo | 12 080 | 13 700 | 190 | 15,7 | - | - |
| Likouala Mossaka | Makoua | 14 100 | 69 800 | 215 | 15,2 | 15,2 | 1 058 |
| Kouyou | Linnengue | 10 100 | 16 000 | 215 | 21,3 | - | - |
| Vouma | Pont RN 2 | 1 624 | 1 700 | 18,6 | 11,5 | - | - |
| BV Lik Mos restant | - | - | 19 771 | - | - | 12,0 | 237 |
| Alima | Tchicapika | 20 070 | 21 030 | 585 | 29,1 | 29,1 | 613 |
| Nkéni | Gamboma | 6 200 | 8 000 | 200 | 32,3 | 32,3 | 258 |
| Lefini | Bwambe | 13 500 | 14 000 | 416 | 30,8 | 30,8 | 431 |
| Plateaux Tékés | - | - | 43 030 | - | - | 30,3 | 1 302 |
| Congo | Brazzaville | 3 550 000 | 3 700 000 | 41609 | 11,7 | - | - |
| Haut Zaïre | - | - | 1 700 000 | - | - | - | - |
| Kassaï | - | - | 904 000 | - | - | - | - |
| Ht Zaïre + Kassaï | - | - | 2 604 000 | - | - | 12,1 | 31601 |

(b) Période 1987-1993

| Rivière | Station principale | Surface station (km ²) | Surface exutoire (km ²) | Q moyen station (m ³ s ⁻¹) | Q spéc. station (l s ⁻¹ km ⁻²) | Q spéc. exutoire (l s ⁻¹ km ⁻²) | Qmoyen exutoire (m ³ s ⁻¹) |
|--------------------------|--------------------|---------------------------------------|--|--|--|---|--|
| Oubangui | Bangui | 488 500 | 643 900 | 2700 | 5,5 | 6,1 | 3 953 |
| Mpoko | Mbali-icot | 4 560 | 23 890 | 160 | 6,7 | 6,7 | 160 |
| Lobaye | Mbata | 30 300 | 31 100 | 204 | 6,7 | 6,7 | 209 |
| BV Oubangui restant | - | - | 100 410 | - | - | 8,8 | 884 |
| Ngoko | Moloundou | 67 075 | - | 720 | 10,7 | - | - |
| Sangha | Ouessou | 158 300 | 211 120 | 1374 | 8,7 | 9,2 | 1 941 |
| Likouala aux herbes | Botouali | 24 800 | 25 000 | 265 | 10,7 | 10,7 | 267 |
| BV Sangha restant | - | - | 28 020 | - | - | 10,7 | 300 |
| Lengoué | - | - | 12 125 | - | - | 12,8 | 155 |
| Mambili | Yengo | 12 080 | 13 700 | 161 | 13,3 | - | - |
| Likouala Mossaka | Makoua | 14 100 | 69 800 | 192 | 13,6 | 13,3 | 928 |
| Kouyou | Linnengue | 10 100 | 16 000 | 191 | 18,9 | - | - |
| Vouma | Pont RN 2 | 1 624 | 1 700 | 16,24 | 10,0 | - | - |
| BV Lik Mos restant | - | - | 19 771 | - | - | 10,8 | 214 |
| Alima | Tchicapika | 20 070 | 21 030 | 593 | 29,5 | 29,5 | 621 |
| Nkéni | Gamboma | 6 200 | 8 000 | 202 | 32,6 | 32,6 | 261 |
| Lefini | Bwambe | 13 500 | 14 000 | 388 | 28,7 | 28,7 | 402 |
| Plateaux Tékés | - | - | 43 030 | - | - | 29,8 | 1 284 |
| Congo | Brazzaville | 3 550 000 | 3 700 000 | 37542 | 10,6 | - | - |
| Haut Zaïre | - | - | 1 700 000 | - | - | - | - |
| Kassaï | - | - | 904 000 | - | - | - | - |
| Ht Zaïre + Kassaï | - | - | 2 604 000 | - | - | 11,3 | 29 435 |

en italique = estimations

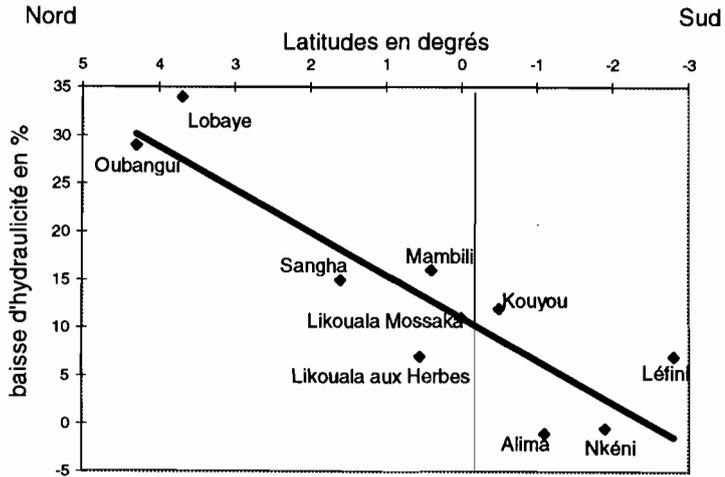


Fig. 4 Variation d'hydraulicité entre les périodes 1987-1993 et 1953-1993 pour les affluents rive droite du Congo-Zaïre suivant un transect nord-sud passant par leurs stations hydrométriques.

Estimation des apports au Congo-Zaïre de ses affluents rive droite Déterminer la part exacte des affluents de rive droite dans le déficit d'écoulement enregistré à Brazzaville nécessite de quantifier leurs apports à leur confluence pour les deux périodes de référence sélectionnées. Les zones non contrôlées par des stations hydrométriques couvrent près de 19% de l'ensemble des bassins étudiés. On leur a appliqué des débits spécifiques analogues à ceux obtenus sur des bassins voisins connus, de taille et de physiographie similaires, situés sous des latitudes proches et suivis durant les mêmes périodes (Tableau 1).

Pour les affluents de l'Oubangui situés entre le bassin de la Lobaye au sud de Bangui et sa confluence avec le Congo-Zaïre, des valeurs comprises entre 10,3 (pour la Lobaye) et 11,5 l s⁻¹ km⁻² (pour la Likouala aux Herbes) permettent de retenir une valeur moyenne intermédiaire de 11 l s⁻¹ km⁻². Cela se traduit par une valeur moyenne pour tout le bassin Oubanguien de 8,4 l s⁻¹ km⁻² et par un module interannuel à sa confluence de 5400 m³ s⁻¹ pour la période 1953-1993 (Tableau 1). Pour la période 1987-1993, nous avons appliqué pour les écoulements de cette partie aval du bassin, une baisse de 20%, valeur intermédiaire entre celles enregistrées sur les bassins environnants.

L'écoulement correspondant passe alors de 11 à 9 l s⁻¹ km⁻². Cela correspond pour tout le bassin Oubanguien à un déficit d'environ 1500 m³ s⁻¹ de ses apports hydriques au Congo-Zaïre.

Pour la rive droite de la Sangha à l'aval de Ouesso, ce sont les valeurs du débit spécifique (11,5 l s⁻¹ km⁻²) et de la baisse d'écoulement (-7%) du bassin versant de la Likouala aux Herbes, aux physiographie et superficie semblables, qui lui ont été appliquées. Pour tout le bassin versant de la Sangha, c'est donc pour la période 1953-1993 une valeur moyenne de 10,5 l s⁻¹ km⁻² qui génère à son exutoire un module interannuel de 2220 m³ s⁻¹. Ces mêmes valeurs chutent à 9,2 l s⁻¹ km⁻² et 1940 m³ s⁻¹ pour la période 1987-1993.

En ce qui concerne le bassin versant de la Likouala Mossaka, nous adoptons pour son affluent le plus septentrional, la Lengoué, un débit spécifique de 15 l s⁻¹ km⁻², valeur

un peu plus faible que celle de la Mambili, autre affluent dont le bassin est situé plus au sud. Une valeur moyenne de $12 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ a été attribuée aux $20\,000 \text{ km}^2$ restant du bassin de la Likouala Mossaka, à l'aval des zones contrôlées de ses affluents et déduction faite de la Lengoué. Cette valeur est en accord avec celles rencontrées dans la cuvette congolaise. Il en résulte un débit spécifique à l'exutoire de $15,2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, soit une exportation hydrique interannuelle de $1060 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Une baisse des débits de 15 %, identique à celle de la Mambili, a été adoptée pour la Lengoué. Pour le reste du bassin versant, nous avons appliqué une baisse moyenne de 10 %, intermédiaire entre celles enregistrées aux stations des affluents de la Likouala Mossaka et celle de la Likouala aux Herbes.

Pour les plateaux Batékés, nous considérons que les débits spécifiques aux exutoires de chaque tributaire sont identiques à ceux des stations, compte tenu de leur alimentation directe et presque exclusive par l'important aquifère qui les constitue. Cette spécificité de leur régime hydrologique sera développée ultérieurement.

Pour ces deux périodes, les apports hydriques des affluents rive gauche du Congo-Zaïre et ceux du haut Zaïre (en amont de la confluence avec l'Oubangui) sont donc déduits, en l'absence de chroniques de débits équivalentes sur ces parties du bassin, par différence entre les débits du Congo-Zaïre à Brazzaville et le cumul des débits de ses affluents rive droite.

Origine du déficit récent d'écoulement des affluents rive droite

Nous avons représenté sur le Tableau 1 la comparaison des bilans hydrologiques des périodes 1953-1993 et 1987-1993. Les apports rive droite ont subi une baisse de près de 20 % entre 1953-1993 et 1987-1993 en passant de $10\,000$ à $8000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Quant à ceux du reste du bassin, ils ont diminué seulement de 7 % en passant de $31\,600$ à $29\,400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Avec un déficit des apports hydriques du Congo-Zaïre à Brazzaville d'environ $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, on relève que, pour seulement le quart de la superficie totale du bassin, la baisse d'hydraulicité des affluents rive droite représente 46 % du déficit. Cela signifie également que la participation de la rive droite aux écoulements du fleuve Congo-Zaïre à Brazzaville a diminué de 24 à 21 %, entre ces deux périodes.

C'est l'Oubangui, tant par l'importance de ses apports (plus de la moitié) que par celle de sa baisse d'écoulement (-28,6 %), qui explique à lui seul plus des trois quarts de la diminution des apports rive droite, ce qui représente 35 % de la baisse des débits du Congo-Zaïre à Brazzaville, alors que la superficie du bassin oubanguien représente moins du cinquième de la totalité du bassin Congo-Zaïrois. Pour l'ensemble du bassin du Congo-Zaïre, c'est donc sa partie septentrionale, occupée par le bassin de l'Oubangui, qui a le plus souffert ces dernières années de la péjoration climatique du régime des précipitations.

Le gradient de baisse des modules de rive droite est en concordance avec ceux des déficits pluviométrique et d'écoulement relevés à plus grande échelle sur la façade Atlantique de l'Afrique par Mahé (1993), lesquels diminuent pour ensuite s'annuler des régions soudano-sahéliennes vers le sud de l'équateur.

Au-delà de l'évolution récente contrastée des déficits hydriques des tributaires congolais de rive droite, il convient de caractériser les deux catégories de régimes

d'écoulements rencontrés sur des cours d'eau (Fig. 2(c) et (d)), drainant des secteurs géographiques voisins mais bien individualisés.

CARACTERISATION DES REGIMES HYDROLOGIQUES DES AFFLUENTS RIVE DROITE DU CONGO-ZAÏRE

Les affluents congolais de rive droite du Congo-Zaïre drainent toute la partie occidentale et septentrionale de son bassin versant. Leurs confluences se situent le long d'un tronçon de 600 km, de direction globale nord-sud, en amont de Brazzaville.

Physiographie régionale

Au nord de Brazzaville jusqu'à l'Equateur, se développent, sur près de 45 000 km² pour la portion congolaise, les plateaux Batékés constitués par des formations sablo-gréseuses de 200 à 400 m d'épaisseur. Ces formations se prolongent dans les territoires gabonais et zaïrois pour couvrir près de 115 000 km². Les rivières Batékés coulant au fond de vallées profondes et encaissées sont très régulières et le contraste est frappant entre l'aridité des plateaux et l'importance de leurs écoulements en saison sèche (Molinier, 1974). Même en saison des pluies, les ruissellements sont quasiment inexistant.

Bien que la pluviométrie annuelle soit élevée (1900 mm), le rôle déterminant des brûlis pratiqués par l'homme et l'infiltration facilitée par ces formations très perméables, limitent la végétation à une simple savane plus ou moins arbustive (Maziezoula, 1992).

Plus au nord jusqu'à la frontière avec la Centre-afrique, s'étend le vaste domaine forestier équatorial où domine une forêt ombrophile dense et humide. C'est autour de l'important « carrefour » de confluences avec le Congo-Zaïre, de l'Oubangui, de la Sangha, de la Likouala aux Herbes et de la Likouala Mossaka que s'étend la Cuvette Congolaise, prolongation de la vaste dépression Zaïroise, recouverte de marécages, prairies et forêts pluviales en partie inondées en périodes de crue. Les cours d'eau qui sillonnent cette plaine inondable sont très sinueux, parfois anastomosés à proximité de leurs confluences et reliés entre eux par de nombreux chenaux naturels ou anthropiques, où les courants s'inversent au gré des fluctuations de niveaux des rivières qu'ils desservent. Pouyaud (1970a, 1970b) a amplement décrit les particularités de ces bassins et en particulier de celui très marécageux de la Likouala aux Herbes.

Les formations de couverture de cette région sont constituées d'alluvions quaternaires fluviales argileuses ou sableuses et le climat passe du type équatorial, marqué par deux saisons des pluies à peu près identiques, à tropical humide de transition plus au nord.

Ces deux régions moyennes mais très différentes présentent des caractéristiques hydrologiques contrastées avec des coefficients d'écoulement et des débits spécifiques plus de moitié moindre dans la Cuvette que sur les Plateaux. La seule et légère baisse de la pluviométrie, des Plateaux (1800-2000 mm an⁻¹) vers la Cuvette (1600-1800 mm an⁻¹), ne semble pas suffisante pour expliquer de tels écarts.

Classification hydrologique régionale

La Fig. 5 représente ces cours d'eau en fonction de leur coefficient d'écoulement interannuel et de la variabilité saisonnière moyenne de leurs débits pour la période 1953-1993, qui correspond en fait au rapport moyen des débits de crue sur ceux d'étiages. Elle met en évidence le rôle prépondérant des formations géologiques et de la couverture végétale sur leur régime d'écoulement et permet d'identifier deux entités hydrologiques régionales. Un premier nuage de points très compact, correspondant à des valeurs respectives des coefficients d'écoulement et de variabilité saisonnière de 45-60% et de 1,1 à 1,5, se distingue d'un deuxième groupe plus allongé, où ces mêmes paramètres varient respectivement entre 20-30% et 2,5 à 5,5.

Pour la première catégorie correspondant aux rivières Batékés (Djiri, Léfini, Nkéni, Alima, Djoué), le rôle régulateur de l'aquifère est mis en évidence par le contraste entre les faibles variations saisonnières de leurs débits, évoquées précédemment (Fig. 2(d)) et l'importante variabilité saisonnière de la pluviométrie sur cette région qui présente une saison sèche bien marquée de juin à août (Fig. 5). Cela se traduit par des hydrogrammes particulièrement « monotones ». Leurs crues sont atténuées par un fort taux d'infiltration vers l'aquifère et leurs étiages sont soutenus par la lente vidange de la nappe (Olivry, 1967). Les cours d'eau parmi les plus réguliers de la planète (la Nkéni et la Léfini) en sont issus. Ce puissant aquifère est aussi à l'origine de l'extraordinaire constance de leurs modules annuels (Fig. 3) tout comme de leur certaine inertie face aux baisses des régimes pluviométriques de ces dernières années, plus modérées il est vrai que celles des bandes tropicales humides de transition situées de part et d'autre de l'équateur. Cette région, véritable château d'eau du Congo, détient les plus forts débits spécifiques de tout le bassin du Congo-Zaïre avec des valeurs dépassant $30 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.

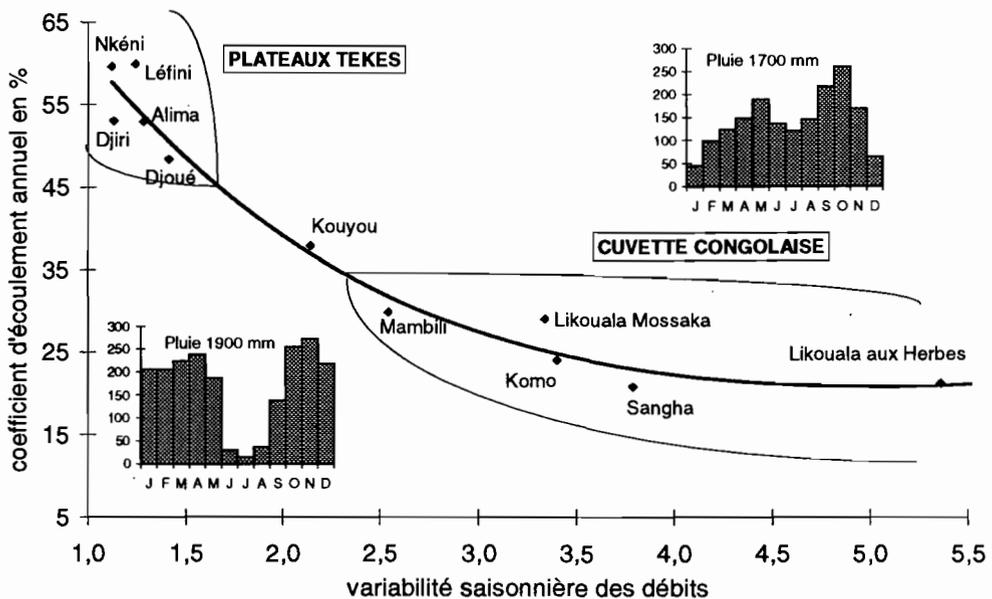


Fig. 5 Fonctionnement des affluents congolais du fleuve Congo-Zaïre.

Tout au contraire, pour les cours d'eau du domaine forestier du deuxième groupe (Likouala aux Herbes, Likouala Mossaka, Mambili), l'évapotranspiration relativement plus élevée et l'évaporation directe sur les zones inondables aux pentes quasi nulles et à l'écoulement très lent, voire inexistant dans les marécages, entraînent un déficit hydrique important. On obtient des coefficients d'écoulements et des débits spécifiques plus faibles de l'ordre de $10\text{-}15\text{ l s}^{-1}\text{ km}^{-2}$. En l'absence d'important aquifère régulateur, leurs régimes hydrologiques reflètent plus fidèlement le régime pluviométrique de cette région (Figs 2(c) et 5) et leurs débits présentent des variabilités saisonnières plus élevées alors que la pluviométrie y est bien moins contrastée que celle des plateaux.

Malgré la physiographie plus composite de son bassin amont très étendu ($160\ 000\text{ km}^2$), la Sangha à Ouesso présente des comportements similaires. Ils sont dus en grande partie au sous bassin forestier du Dja-Ngoko affluent provenant du Cameroun et dont le cours inférieur marque la frontière avec le Congo. Ce dernier présente encore les caractéristiques hydrologiques observées dans la Cuvette avec des débits spécifiques à sa confluence de $11,3\text{ l s}^{-1}\text{ km}^{-2}$ pour une variabilité saisonnière des débits un peu plus élevée, de l'ordre de 6,4.

Le Kouyou quant à lui mérite une attention particulière. Il se détache nettement du « noyau » des rivières Batékés et présente une variabilité saisonnière (2,14), un coefficient d'écoulement (40%) et un débit spécifique ($21\text{ l s}^{-1}\text{ km}^{-2}$) (Tableau 1) intermédiaires avec ceux du groupe des rivières forestières. L'influence régulatrice de l'aquifère Batéké sur le flanc sud de son bassin et le début de la grande forêt équatoriale se font sentir simultanément. Ce cours d'eau marque la limite entre ces deux domaines aux fonctionnements biogéohydrodynamiques différents.

Ces deux groupes d'affluents déjà individualisés par des critères hydrologiques, s'opposent également sous l'angle biogéochimique. En effet, les rivières « claires » des plateaux Batékés sont très peu minéralisées (conductivités électriques de l'ordre de $6\text{-}7\ \mu\text{S cm}^{-1}$ à 25°C , semblables à celles des eaux de pluie!), car tous les ions solubles ont été presque totalement lessivés. Avec des concentrations totales en ions majeurs de 2 mg l^{-1} , ce sont les eaux les moins minéralisées de tout le bassin du Congo-Zaïre! Mais toutes proportions gardées, elles peuvent être définies comme hypersiliceuses puisque la silice dissoute représente les trois quart des espèces minérales dissoutes. Elles font face aux cours d'eau de la cuvette congolaise, dites « noires » (ou coca cola rivers) plus chargées en espèces minérales (conductivités électriques moyennes allant de $17\text{-}40\ \mu\text{S cm}^{-1}$ à 25°C suivant les rivières), mais surtout en matière organique dissoute. Ces dernières présentent des pH pouvant descendre en dessous de 4, en présence des acides fulviques et humiques caractéristiques des sols forestiers. Comme nous l'avons déjà signalé, la Sangha, de part l'extension de son bassin versant et son hétérogénéité physiographique, se détache quelque peu de ces grandeurs. Sa conductivité électrique moyenne est de $55\ \mu\text{S cm}^{-1}$ à 25°C pour des pH oscillant autour de la neutralité entre 6,8 et 7,2 et ses eaux sont par conséquent bien plus riches en bicarbonates (près de 50%).

BILAN ET DYNAMIQUE DES TRANSPORTS DE MATIERE DU CONGO-ZAÏRE

Un bilan des transports et une décomposition des flux de matières ont été établis pour la période 1987-1992. Quant aux protocoles de prélèvement et de traitement des

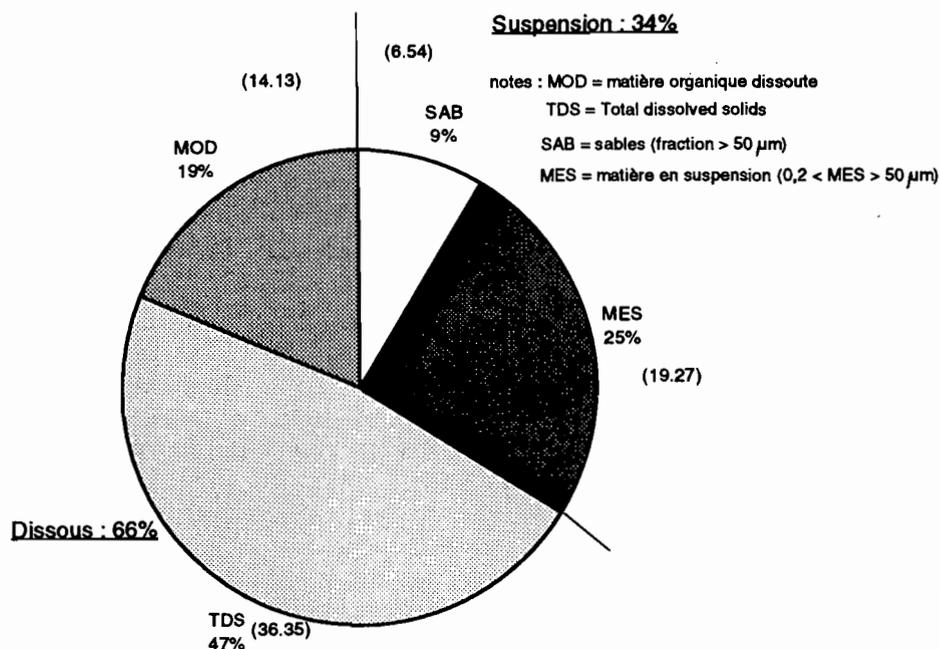


Fig. 6 Répartition des transports de matières (en mg l⁻¹) du Congo-Zaïre à Brazzaville (moyenne 1987-1992).

échantillons d'eau, et aux calculs de flux de matière, ils ont déjà été décrits par plusieurs auteurs (Olivry *et al.*, 1988; Moukolo *et al.*, 1990; Laraque *et al.*, 1993).

Bilan des transports

La concentration moyenne interannuelle des transports de matière, de 76,2 mg l⁻¹ du Congo-Zaïre à Brazzaville, est répartie en 34% de transports particuliers (25,8 mg l⁻¹) et 66% de transports dissous, soit 50,4 mg l⁻¹ (Fig. 6). Ces valeurs sont faibles par rapport à celles des autres grands fleuves de la planète. Les suspensions du Congo-Zaïre se décomposent en une fraction grossière ou sableuse dont la granulométrie dépasse 50 µm et une fraction fine située entre 0,2 et 50 µm. Elles représentent respectivement 8,6% et 25,4% du total des transports (Fig. 6). Dans la fraction fine, la part revenant à la matière organique particulière est de l'ordre de 12%.

Quant à la partie dissoute, elle est composée matière organique et de matière minérale, qui constituent respectivement 18,5% et 47,6% des transports totaux. La portion minérale est composée essentiellement de silice (26%) et de bicarbonates (42%). Les concentrations de silice dissoute restent remarquablement constantes (entre 8,5 et 10,5 mg l⁻¹) tout au long du cycle hydrologique, mais de manière relative elles augmentent considérablement en crue aux dépens des bicarbonates.

En terme de bilan, ce sont près de 92×10^6 t de matières qui sont exportées annuellement, comprenant 31×10^6 t de matières en suspension, valeur en accord avec les résultats de Gibbs (1967), et 61×10^6 t de matières dissoutes, qui se partagent elles-

mêmes en 44×10^6 t pour la fraction minérale, (moyenne semblable à celle obtenue par Probst *et al.* (1992) pour les années 1987-1989), et 17×10^6 t pour la fraction organique.

Le flux annuel moyen de matière avoisine les 3000 kg s^{-1} . Les variations saisonnières des flux de matières du Congo-Zaïre sont en phase avec celles de ses hydrogrammes. Les faibles concentrations de matières et leurs faibles variations saisonnières, pas toujours synchrones avec celles des débits, sont en fait contrôlées et occultées par les très fortes valeurs de ces derniers qui expliquent l'importance de ces flux (Laraque *et al.*, 1995a).

Les valeurs spécifiques de ses flux moyens sont respectivement de $26,3 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour le transport spécifique global, $12,1 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour l'exportation chimique minérale, $8,8 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour les flux issus de l'érosion mécanique et $5,4 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour la matière organique dissoute. Les flux dissous d'origine biogéochimique ($17,5 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) placent le Congo-Zaïre en première position pour l'Afrique juste avant le Zambèze. Il s'agit ici d'exportation et non d'altération spécifique du fait que ces valeurs incluent les apports atmosphériques, dont l'influence relative est d'autant plus importante que les eaux sont peu chargées. Ainsi, pour les matières dissoutes, Nkounkou & Probst (1987) estiment ces apports à 34% de leur tonnage total. Les valeurs d'érosion intrinsèque du bassin versant sont donc inférieures à celles données précédemment.

Flux de CO_2 , bicarbonates et matière organique

L'érosion chimique des roches est essentiellement le fait de l'attaque des minéraux par l'acide carbonique directement issu du CO_2 atmosphérique et de la dégradation de la biomasse dans les sols. Le CO_2 dissous est exporté dans les fleuves sous forme de bicarbonates.

Amiotte-Suchet *et al.* (1995) ont estimé à partir du modèle MEGA, basé sur l'altération des principaux minéraux des roches, le flux de CO_2 consommé à 210 milliards de moles par an, soit 75% du flux de bicarbonates, les 25% restant provenant des roches carbonatées des crypto karsts de l'Oubangui et du sud du Zaïre. Un modèle spatialisé basé sur la géochimie et l'importance de l'écoulement donne des résultats comparables avec des flux spécifiques de 65×10^3 moles km^{-2} de CO_2 et 81×10^3 moles km^{-2} de HCO_3 .

Le flux de carbone minéral dissous a été estimé à trois millions de tonnes par an. Le Congo-Zaïre exporte en année moyenne 1,6 millions de tonnes de carbone organique particulaire (COP) et 11,4 millions de tonnes de carbone organique dissous (COD), soit au total 13 millions de tonnes de carbone. L'étude des variations saisonnières montre que le carbone organique vient essentiellement du lessivage du bassin versant en période de crue et notamment du « rinçage » de la forêt inondée de la cuvette congolaise. C'est bien ce que montre l'évolution des concentrations lors de la crue de 1988 sur le bief Oubangui-Congo. La production de COD est trois fois plus importante sur le bassin forestier de la Ngoko que sur le bassin couvert de savane de l'Oubangui. Les faibles fluctuations saisonnières du COP sont liées à la production primaire du fleuve, plus abondante en période de basses eaux.

Dynamique des transports en suspension

Afin d'illustrer les mécanismes de transports caractéristiques de deux régimes d'écoulement distincts, tropical humide de transition d'une part et équatorial d'autre part, nous avons comparé durant leur cycle hydrologique, l'évolution des cumuls des exportations solides de l'Oubangui avec celles du Congo-Zaïre.

Ainsi, l'Oubangui présente un régime unimodal contrasté, avec un étiage important de mars à avril précédant une crue prononcée de septembre à novembre et pour lesquels on observe de franches variations des concentrations. Par exemple pour l'année hydrologique 1987/1988, les débits mensuels et les concentrations en matières en suspension ont varié respectivement entre les extrêmes de 480 à 6580 à $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ et de 50 à 3 mg l^{-1} . En étudiant cette année, nous constatons grâce à la Fig. 7 que le cumul des exportations solides présente une courbe en forme de « S couché » (Orange *et al.*, 1995) qui est divisée en trois portions. La première courbure, concave, du « S » correspond à une phase d'érosion précoce d'avril à août, durant laquelle les tonnages exportés augmentent rapidement en début de crue. Il s'agit d'un phénomène de « chasse d'eau » avec une reprise en suspension des alluvions déposés par l'étiage précédent. La pente du « S couché », située entre ses deux courbures, caractérise les plus hautes eaux, étalées de septembre à novembre, où érosion et transport se conjuguent, avant de céder le pas à une phase d'alluvionnement marquée par le palier des exportations solides (dernière courbure, convexe, du « S »), qui signe l'arrêt du processus érosif avec la décrue de décembre, et ce jusqu'au cycle suivant.

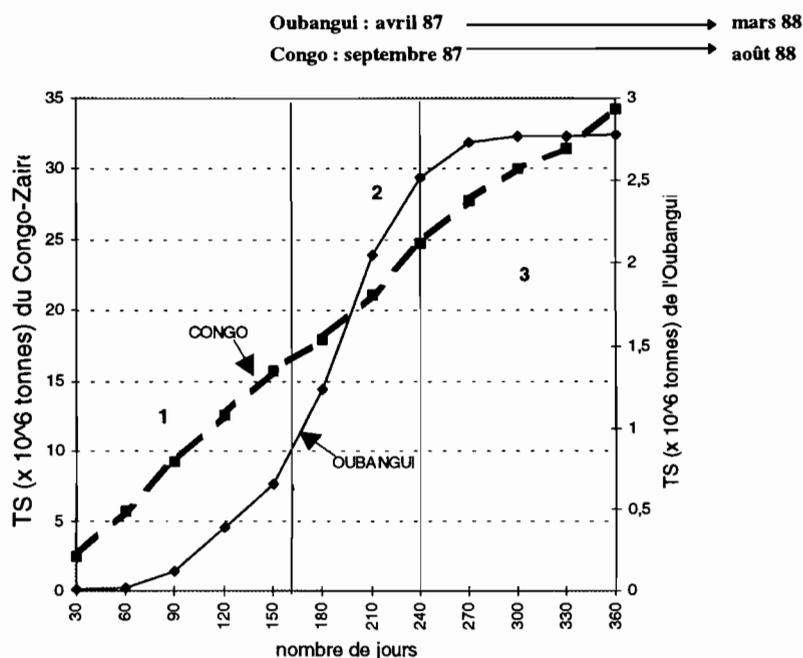


Fig. 7 Dynamique comparée des transports particuliers du Congo-Zaïre à Brazzaville et de l'Oubangui à Bangui (évolution des tonnages solides (TS) cumulés durant les cycles hydrologiques 1987/1988; Oubangui: avril 1987 à mars 1988, Congo: septembre 1987 à août 1988).

Ces trois phases successives *d'érosion–transport–alluvionnement*, schéma classique des rivières tropicales, s'opposent à l'unique phase de transport remarquable par la pente quasi régulière des tonnages cumulés du Congo-Zaire (Fig. 7). Pour ce fleuve, l'ascension régulière et monotone de ce cumul, sans apparition de cycles de transport bien définis, est à l'image de celle de ses exportations hydriques et provient des faibles variations saisonnières de ses concentrations particulières et de ses débits (respectivement 1,5 et 2). Ces dernières soulignent la contribution, au régime d'exportation du fleuve, des apports successifs de diverses régions du bassin versant, qui se trouvent tour à tour en pleine activité érosive.

Dynamique des transports dissous

Les fluctuations saisonnières des concentrations des transports dissous renseignent, quant à elles, sur certains aspects du fonctionnement de cet écosystème forestier inter-tropical.

Les concentrations en matières dissoutes du Congo-Zaire ont montré une fraction minérale deux fois et demi plus importante que la fraction organique. Ces fractions ont des comportements inverses durant l'année hydrologique, comme le soulignent les courbes de la Fig. 8.

Les dilutions et concentrations cycliques des concentrations minérales totales (TDS) sont provoquées par l'alternance des crues et des étiages, avec cependant des facteurs de variations faibles, de l'ordre de 1,33-1,87 suivant les années.

Les plus importantes fluctuations saisonnières (rapports mensuels extrêmes par cycle, allant de 1-30) sont rencontrées pour la matière organique dissoute, dont les concentrations maximales (aux alentours de 30 mg l⁻¹) s'observent en général en décembre et janvier, au moment de la principale crue de chaque cycle. Elles proviennent de l'intense lessivage de la cuvette congolaise alors inondée, qui libère dans le Congo une grande quantité de matière organique. Lors de l'étiage principal en juillet-août, ces

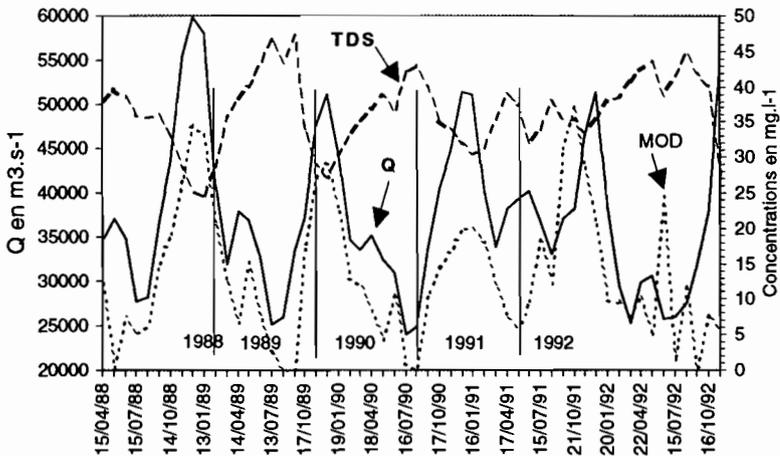


Fig. 8 Variations des débits et des concentrations en matière dissoute minérale (TDS) et organique (MOD) du Congo-Zaire à Brazzaville.

concentrations peuvent chuter jusqu'à un milligramme par litre. De telles fluctuations et ordres de grandeurs des concentrations organiques ont déjà été enregistrées par Clerfayt (1956) pour ses affluents de rive gauche.

Si des variations saisonnières significatives sont à noter pour les matières dissoutes, il y a par contre peu de variations interannuelles dans la répartition des différents transports solides et dissous, et leurs variations saisonnières restent très semblables d'une année à l'autre (Laraque *et al.*, 1993).

CONCLUSION

Durant ces sept dernières années, les écoulements du Congo-Zaïre ont baissé de près de 10% en se référant à son module interannuel calculé depuis 1953. Cette baisse est engendrée essentiellement par la partie septentrionale de son bassin versant, qui a le plus souffert de la péjoration climatique récente du régime des précipitations. Nous avons pu mettre en évidence un gradient de baisse des écoulements des affluents rive droite de ce fleuve qui concorde avec ceux des déficits pluviométriques et d'écoulement déjà relevés, à plus grande échelle, sur la façade Atlantique de l'Afrique et qui diminuent pour ensuite s'annuler des régions soudano-sahéliennes vers le sud de l'équateur.

Le programme PEGI a également contribué à une meilleure compréhension du fonctionnement de ce vaste bassin versant et de ses différentes unités. Ainsi, une classification des affluents congolais de rive droite (groupe « plateaux Batékés » et groupe « Cuvette Congolaise ») a permis d'expliquer par les caractéristiques biogéohydrodynamiques de leurs bassins versants, à la fois l'antagonisme de leurs régimes hydrologiques et celui de la géochimie de leurs eaux, ce dernier aspect étant toutefois moins marqué pour la Sangha en raison de l'hétérogénéité physiographique de son vaste bassin versant.

Les concentrations de matière du Congo-Zaïre sont relativement faibles (76 mg l^{-1}), mais le puissant débit du fleuve engendre un flux solide de près de 3000 kg s^{-1} . Ces exportations sont dominées par la fraction soluble (66%), dont 28% provient de la matière organique dissoute. Elles correspondent à une dynamique érosive ($26,3 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$, sans correction des apports atmosphériques) sur un relief ancien fortement pénéplané, à moitié recouvert d'une forêt dense et soumis à un lessivage intense sous climat équatorial humide. Enfin, la grande régularité des régimes d'exportations solides et liquides résulte des dynamiques complémentaires de ses affluents qui drainent des sous-bassins aux végétations et géomorphologies différentes, situés de part et d'autre de l'équateur.

REFERENCES

- Amiotte Suchet, P. & Probst, J. L. (1995) Erosion chimique du bassin versant du Congo: variabilité spatio-temporelle des flux de CO_2 consommé par altération de la croûte continentale. In: *Actes du colloque PEGI – Grands bassins fluviaux periatlantiques: Congo, Niger, Amazone* (Insu-CNRS-Orstom, 22-24 novembre 1993), 51-68. Colloques et séminaires, Orstom, Paris.
- Clerfayt, A. (1956) Composition des eaux de rivières du Congo: influence des facteurs géologiques et climatiques. *Centre Belge d'Etude et de Documentation des Eaux* 31(31), 26-31.
- Gibbs, R. (1967) The geochemistry of the Amazon river system. Part 1 : The factors that control the salinity and the concentration of suspended solids. *Geol. Soc. Am. Bull.* 78, 1203-1232.

- Laraque, A., Bricquet, J. P., Olivry, J. C. & Berthelot, M. (1993) Export of matter from the Congo river (PEGI programme). In: *First International Symposium on Perspectives for Environmental Geochemistry in Tropical Countries* (Niterói, Brazil, 29 novembre-3 décembre 1993).
- Laraque, A., Bricquet, J. P., Olivry, J. C. & Berthelot, M. (1995a) Transports solides et dissous du fleuve Congo (bilan de six années d'observations). In: *Actes du colloque PEGI - Grands bassins fluviaux periatlantiques: Congo, Niger, Amazone* (Insu-CNRS-Orstom, 22-24 novembre 1993), 217-228. Colloques et séminaires, Orstom, Paris.
- Laraque, A., Pandi, A., Berthelot, M. & Mietton, M. (1995b) Ecoulement et transport de matière dans le bassin versant du Djoué: affluent du fleuve Congo-Zaïre. In: *Hydrologie continentale* 10(1). Orstom, Paris (sous presse).
- Mahé, G. (1993) Les écoulements pluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique - étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle - analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Thèse de doctorat, Collection Etudes et Thèses, Orstom, Paris.
- Mahé, G. (1995) Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. In: *Sécheresse - les Sécheresses de Par le Monde* 6(1) (mars 1995, Bamako, Mali), 109-117.
- Marlier, G. (1973) Limnology of the Congo and Amazon rivers. In: *Tropical Forest Ecosystems in Africa and South America: A Comparative Review* (ed. par B. J. Meggers, E. S. Ayensu & W. D. Duckworth), 223-238. Smithsonian Inst. Press, Washington, DC, USA.
- Maziezoula, B. (1992) Hydrodynamique des formations tabulaires et sablo-gréseuses des pays Téké. *Rapport des activités juin 1990-décembre 1991*, Orstom, Brazzaville.
- Molinier, M., Barilly, A., Gathelier, R. & Thébé, B. (1974) Note hydrologique sur les rivières Mary et Gamboma. *Rép. Pop. Congo, Min. de l'Agriculture et de l'Elevage, Orstom, Centre de Brazzaville*.
- Moukolo, N., Bricquet, J. P. & Biyedi, J. (1990) Bilans et variations des exportations de matières sur le Congo à Brazzaville. *Hydrol. Continent.* 5(1), 41-52.
- Nkounkou, R. R. & Probst, J. L. (1987) Hydrology and geochemistry of the Congo River System. *Mitt. Geol.-Palaont. Inst., Univ. Hamburg*, 483-508.
- Olivry, J. C. (1967) *Régime hydrologique des rivières Batéké*. Rapport Orstom, Brazzaville.
- Olivry, J. C., Bricquet, J. P., Thiebaut, J. P. & Sigha-Nkamdjou, L. (1988) Transport de matières sur les grands fleuves des régions intertropicales. Les premiers résultats des mesures de flux particuliers sur le bassin du fleuve Congo. In: *Sediment Budgets* (ed. par M. P. Bordas & D. E. Walling) (Proc. Porto Alegre Symp., December 1988), 509-521. IAHS Publ. no. 174.
- Olivry, J. C., Bricquet, J. P. & Mahé, G. (1993) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide? In: *Hydrology in Warm Humid Regions* (ed. J. S. Gladwell) (Proc. Yokohama Symp., July 1993), 67-78. IAHS Publ. no. 216.
- Orange, D., Olivry, J. C. & Censier, C. (1995) Variations et bilans des flux de matières particulaires et dissoutes de l'Oubangui à Bangui. In: *Actes du colloque PEGI - Grands bassins fluviaux periatlantiques: Congo, Niger, Amazone* (Insu-CNRS-Orstom, 22-24 novembre 1993), 147-158. Colloques et séminaires, Orstom, Paris.
- Pouyaud, B. & Gathelier, R. (1970a) *Les rivières du bassin de la Likouala Mossaka*. Orstom Centre de Brazzaville.
- Pouyaud, B. (1970b) *La Likouala aux Herbes à Epéna et à Botouali*. Orstom Centre de Brazzaville.
- Probst, J. L., Nkounkou, R. R., Krempp, G., Bricquet, J. P., Thiebaut, J. P. & Olivry, J. C. (1992) Dissolved major elements exported by the Congo and the Ubangui rivers during the period 1987-89. *J. Hydrol.*
- Wesselink, A., Orange, D. & Randriamiarisoa Feizoure, C. (1994) Hydrométrie de l'Oubangui à Bangui de l'origine des observations à 1993: mise en évidence d'un détarage. *Projet PNUD/OMM CAF/91/021 « Assistance agrométéorologique et surveillance de l'environnement », Rapport de la Direction de la Météorologie en RCA. Laboratoire d'Hydrologie, Orstom, Bangui*.