

Conséquences de la Variabilité Hydrologique du Niger supérieur sur le Transport Particulaire : évolution des concentrations en suspension au cours du cycle hydrologique

C. PICOUET, D. ORANGE, J.P. BRICQUET & J.C. OLIVRY

ORSTOM, Montpellier, BP 5045, F-34 032 Montpellier cedex 1, France

Résumé Depuis 1991, des prélèvements hebdomadaires de matière en suspension (MES) sont effectués à la station de Banankoro sur le Niger supérieur au Mali. Ces six années d'observations regroupent des années hydroclimatiques contrastées. Les relations entre les concentrations des eaux en MES, les flux transportés et les débits du fleuve à l'échelle mensuel et hebdomadaire, ont mis en évidence deux types de comportements de la charge particulaire des eaux suivant les années de faible ou de forte hydraulicité. Ceux-ci sont liés au volume d'eau écoulée durant la période de mise en place effective de la végétation mais aussi à l'état du bassin en début de crue, dépendant de l'importance de la crue de l'année précédente.

INTRODUCTION

Un réseau de surveillance des flux particulaires transportés par le fleuve Niger au Mali a été mis en place depuis 1991. Ces six années de prélèvement regroupent des années représentatives des fluctuations hydrologiques de ces 20 dernières années (Bricquet *et al*, 1996) et permettent donc d'effectuer une interprétation des conséquences de la variabilité hydroclimatique régionale sur le transport particulaire du fleuve Niger. Les relations entre la concentration des eaux en MES (Matière En Suspension), les débits du fleuve à l'exutoire du bassin sont discutés à l'échelle hebdomadaire, mensuels et annuels.

SITE ET CONTEXTE DE L'ETUDE

La station choisie pour représenter le bassin supérieur du Niger est la station de Banankoro au Mali. Son bassin de 71 800 km² se situe presque entièrement en Guinée. Il couvre du Sud au Nord les domaines climatiques guinéen et soudanien. La pluviométrie annuelle est d'environ 1500 mm.an⁻¹ sur l'ensemble du bassin versant (Soumaguel, 1996). Le Niger supérieur a un régime tropical classique avec une crue annuelle unique de juillet à novembre, liée au régime annuel des précipitations. L'année hydrologique commence en mai et le maximum de crue a lieu généralement dans la deuxième quinzaine de septembre.

Les prélèvements de MES sont hebdomadaires et s'effectuent en surface sur 3 verticales de la section du fleuve. Les MES sont recueillies par filtration sur des membranes en nitrate de cellulose de 0.22µm de porosité. L'échantillonnage hebdomadaire est adapté à l'hydrologie du bassin versant et à la variabilité du phénomène de transport particulaire (Olivry *et al*, 1995). Les chroniques de MES n'étant

pas continues (à l'inverse des débits), une procédure de calcul des bilans de MES s'appuyant sur l'interpolation linéaire des concentrations hebdomadaires entre deux valeurs connues a été adoptée (Olive & Rieger, 1992 ; Meybeck *et al.*, 1996).

La période d'étude s'étale sur 6 cycles hydrologiques : 1991-92, 1992-93, 1993-1994 sont des années de faible hydraulicité (dites, "années sèches"), 1994-95, 1995-96 sont deux années de bonne hydraulicité ("années humides") et le cycle 1996-1997 est une "année-moyenne" (Tableau 1).

Tableau 1 Caractéristiques hydrologiques des années d'observation des MES des eaux du fleuve Niger à Banankoro (Niger supérieur) (d'après Marieu *et al.*, 1998 et Soumaguel, 1996)

| | 1991/92 | 1992/93 | 1993/94 | 1994/95 | 1995/96 | 1996/97 |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Débit moyen annuel ($m^3.s^{-1}$) | 532 | 521 | 521 | 1070 | 976 | (858) |
| Pluviométrie annuelle (mm) | 1399 | 1460 | 1586 | 1726 | 1526 | - |
| Lame d'eau écoulée annuelle (mm) | 233 | 228 | 228 | 461 | 433 | (380) |
| Coefficient d'écoulement annuel (%) | 16.5 | 16 | 14 | 27 | 28 | - |

() débit calculé à partir d'une série incomplète de débits journaliers (mois de mai)

RÉSULTATS

Quelle que soit l'année d'observation, l'évolution de la concentration mensuelle en MES des eaux du Niger à Banankoro, en fonction du débit mensuel du fleuve montre une relation d'hystérésis classique pour les fleuves tropicaux à crue unique (Fig. 1) : les concentrations moyennes maximales sont atteintes en juillet bien avant le maximum de

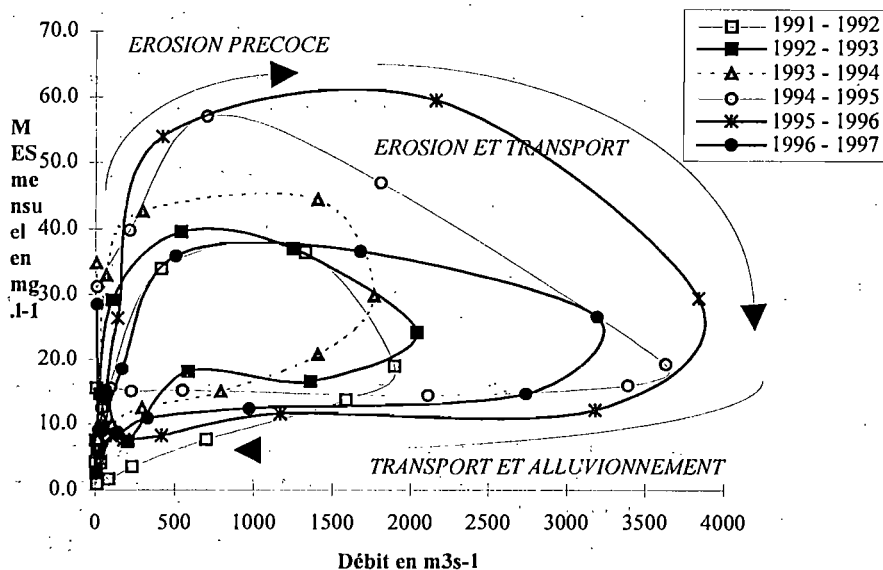


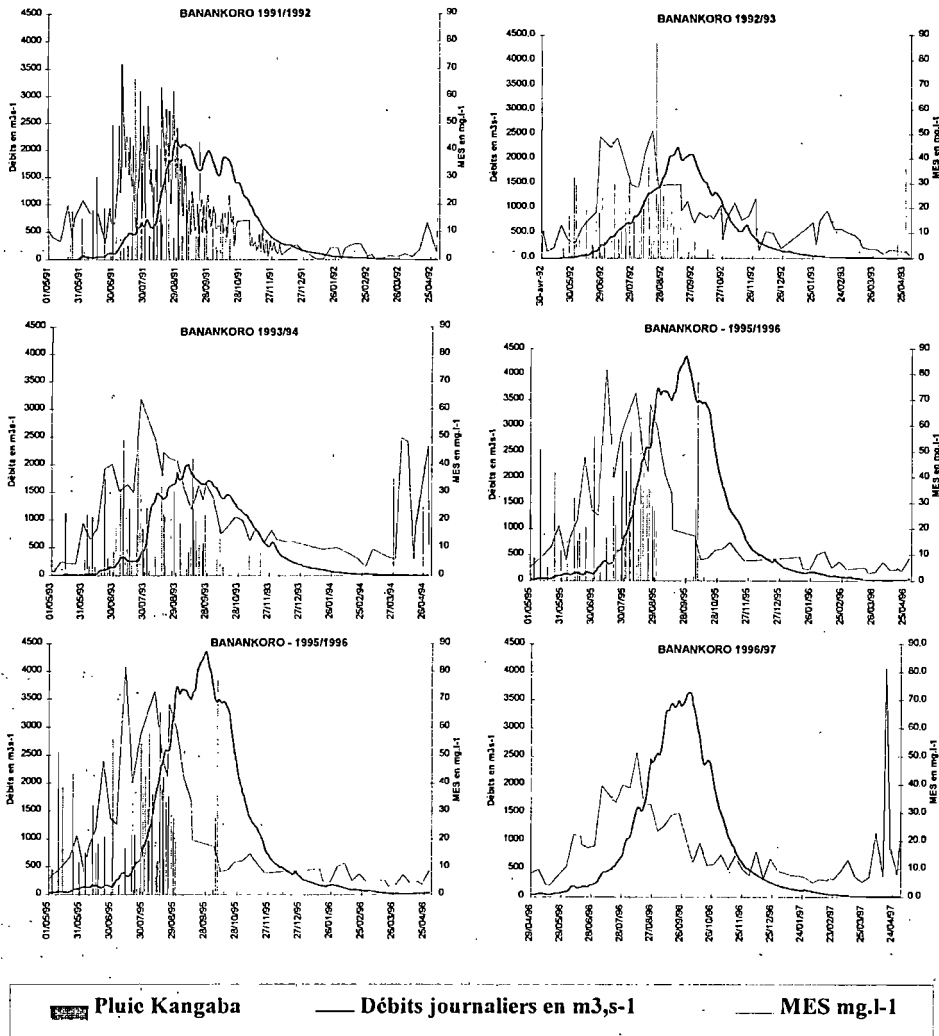
Fig. 3 Evolution des concentrations mensuelles en MES en fonction du débit du fleuve Niger à Banankoro (Niger supérieur) pour six années d'observation (de 1991/92 à 1996/97)

crue (Fig. 2). En fait, les teneurs des eaux fluviales en MES suivent un cycle annuel se décomposant en trois phases déjà décrites par Gac & Kane (1986), Orange (1992), Orange *et al.* (1994): "érosion précoce", "érosion et transport", "transport et alluvionnement". Pour l'ensemble des années, la phase d'érosion précoce (correspondant à l'augmentation des concentrations en MES) se termine en juillet avec la mise en place de la végétation (notamment tapis de graminées), puis la phase d'érosion et transport (durant laquelle la concentration en MES diminue) se poursuit jusqu'au maximum de crue vers novembre ; ensuite la phase de transport et alluvionnement, correspondant à la diminution conjointe des teneurs en MES et du débit, boucle le cycle annuel. La comparaison interannuelle des courbes enveloppes montre que la surface de la courbe est dépendante de l'intensité du débit de crue (Tableau 2), lui-même dépendant de la pluviométrie, de la répartition des événements pluvieux et de leur intensité pour l'année considérée.

A l'échelle hebdomadaire (Fig. 2), la courbe d'évolution des MES décrit au cours du cycle hydrologique une série de pics liée aux épisodes élémentaires de crue et de décrue successifs qui composent l'hydrogramme final (et donc aux événements pluvieux). L'amplitude de ces variations dépend de l'intensité et de la proximité de l'événement pluvieux considéré (Droux *et al.*, 1997) et de la période du cycle hydrologique. En effet, la variabilité des pics est plus importante en début de saison humide (Fig. 2), lors du commencement de la montée des eaux (c'est la phase d'érosion précoce). Ensuite, les eaux continuent à monter, et les concentrations en MES diminuent de façon plus régulière lors de la phase d'érosion et transport. Ces deux premières phases du cycle annuel de l'érosion ont un comportement différent selon l'intensité du cycle hydrologique. L'intensité des concentrations atteintes pendant la phase d'érosion précoce (caractérisée, quelle que soit l'année, par une courbe d'évolution des concentrations en MES décrivant une fonction puissance positive) dépend de l'hydraulicité du cycle hydrologique considéré : en "année humide", les concentrations moyennes mensuelles atteignent des valeurs plus élevées à débit mensuel égal par rapport aux autres années (Fig. 1). Ensuite, la courbe d'évolution des concentrations en fonction du débit (Fig. 1) montre une rupture nette entre 300 et 800 m³.s⁻¹, caractérisant le passage à la phase suivante dite d'érosion et transport. En "année humide", la relation concentrations-débits est alors décrite par une fonction linéaire, tandis qu'en "année sèche" cette relation décrit une fonction puissance négative. "L'année moyenne" 1996-97 montre un comportement intermédiaire. Enfin, la troisième et dernière phase, transport et alluvionnement, est sensiblement égale d'une année sur l'autre avec une concentration stable de l'ordre de 10 mg.l⁻¹, pour chuter très rapidement à moins de 5 mg.l⁻¹ dès que les débits sont inférieurs à 100 m³.s⁻¹ (Fig. 1).

Les flux de matières particulaires exportées, calculés par année hydrologique, montrent une variation importante des flux annuels exportés entre les "années humides" et les "années sèches" (Tableau 2). Par contre, la concentration annuelle en MES (déduite du flux annuel) reste du même ordre de grandeur (25 mg.l⁻¹) quelle que soit l'hydraulicité de l'année considérée (Tableau 2). Ceci semble traduire que le paramètre explicatif de l'érosion à l'échelle du bassin versant de 71 800 km² est avant tout la quantité d'eau mise en jeu dans l'écoulement (puisque le flux de matières transportées est directement corrélé à l'hydraulicité de l'année considérée) et non aux conditions de

Fig. 2 Evolution des concentrations hebdomadaires en MES, du débit journalier du fleuve Niger à Banankoro (Niger supérieur) et des pluies journalières à Kangaba, pour six années d'observation (de 1991/92 à 1996/97)



terrain et/ou physionomie de la pluviosité (puisque la concentration annuelle est relativement constante d'une année sur l'autre).

Tableau 2 Caractéristiques, par année hydrologique du transport particulaire du fleuve Niger à Banankoro (Niger supérieur): concentration moyennes annuelles (C_{MESan}), mensuelles maximales ($C_{m\ max}$) et mensuelles du maximum de crue ($C_{m\ Q_{man}}$) des eaux en matières en suspension, débit annuel (ou hydraulicité, Q_{an}) et débit maximum (Q_{max}), flux annuel (F_{MESan}) et du bassin supérieur du Niger de 1991 à 1996.

| Année Hydrologique | 1991/92 | 1992/93 | 1993/94 | 1994/95 | 1995/96 | 1996/97 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| C_{MESan} (mg.l ⁻¹) | 20 | 25 | 29 | 24 | 28 | 22.1 |
| $C_{m\ max}$ (mg.l ⁻¹) | 36 | 40 | 44 | 57 | 59 | 37 |
| $C_{m\ Q_{man}}$ (mg.l ⁻¹) | 19 | 24 | 29 | 19 | 29 | 26 |
| Q_{an} (m ³ .s ⁻¹) | 532 | 521 | 521 | 1070 | 978 | 858 |
| Q_{max} (m ³ .s ⁻¹) | 2180 | 2230 | 2000 | 4110 | 4350 | 3640 |
| F_{MESan} (t.an ⁻¹) | 338 000 | 412 000 | 467 000 | 800 000 | 862 000 | 598 000 |

DISCUSSION

La différence d'intensité des concentrations en MES lors de la phase d'érosion précoce entre les "années sèches" et les "années humides" reflète que cette première phase du cycle d'érosion est fortement liée aux apports de l'érosion des versants et donc à la participation du ruissellement superficiel (lié au régime des pluies de l'année considérée). En effet, Droux (1997) a montré que les transports de matières en suspension (étudiés sur 3 petits bassins représentatifs du Niger amont) sont conditionnés avant tout par la pluviométrie. Par ailleurs, comme le montre Orange (1992), les concentrations rencontrées au début de la crue dépendent non seulement du volume d'eau écoulé durant cette période de mise en place effective de la végétation mais aussi de l'état du bassin versant au moment de l'arrivée de la nouvelle saison des pluies, état lié à l'intensité de la crue de ou des années précédentes et dont dépend le stock de matière mobilisable par l'érosion. En effet, sur les 3 "années sèches" faisant suite à une "année sèche", le premier pic de MES observé atteint de 15 à 20 mg.l⁻¹, alors que sur le cycle 1994-95, de bonne hydraulicité faisant suite à plusieurs "années sèches" successives, ce pic atteint 45 mg.l⁻¹. Les concentrations de "l'année moyenne" 1996-97, faisant suite à deux cycles humides, n'atteignent en revanche que 10 mg.l⁻¹.

La phase d'érosion et transport (débits croissants et concentrations décroissantes) correspond à la mise en place de la végétation (dès mi-juillet) pouvant assurer alors son rôle effectif de protection des sols et par la diminution de la disponibilité des matériaux sur les versants au cours de l'avancement de la saison des pluies, ce qui se traduit par une diminution des concentrations malgré une augmentation des débits. A l'échelle du bassin, tout se passe comme si la charge solide des eaux du fleuve était diluée par une augmentation de débit plus rapide que la capacité des versants à être érodés. La dilution est donc plus importante pour les années de meilleure hydraulicité : les concentrations rencontrées lors du maximum de crue sont alors plus faibles que pour les années sèches. Ce phénomène de dilution des concentrations en MES peut être accentué par le débordement des rives lors des forts débits, entraînant un alluvionnement probable des MES sur les berges. Effectivement, les cycles 1994-95, 1995-96 et 1996-97 ont débordé en rive droite pendant respectivement 82, 74 et 63 jours.

Enfin, on note que la différence entre les deux "années humides" pour la phase d'érosion et transport s'explique par une pluviométrie en août 1995 deux fois supérieure à celle d'août 1994. Ceci s'est traduit par un débit de crue en 1995 supérieur à celui de

1996 alors que l'hydraulicité du cycle 1995-96 est inférieure à celle de 1996-97 (Tableau 2). En effet, ce débit maximum dépend de la quantité de pluie mais aussi de la répartition des événements pluvieux et de leur intensité. Ainsi, cette deuxième phase du cycle annuel de l'érosion peut, comme la phase précoce, être influencée par la répartition temporelle des pluies et leur intensité, même si le facteur explicatif majeur reste avant tout pour ces 2 phases l'hydraulicité de l'année considérée.

CONCLUSIONS

Sur la période observée (de 1991 à 1996), le débit annuel (ou hydraulicité) du fleuve Niger à Banankoro a montré une forte variabilité, puisqu'il est passé de $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à plus de $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ceci a permis de classer les années étudiées en année sèche, moyenne ou humide. Quelle que soit l'année, le cycle annuel de l'érosion (appréhendé par la mesure de la teneur en MES des eaux) décrit un cycle composé de trois phases. La variabilité hydrologique interannuelle influence d'une part, l'intensité des concentrations en MES de la première phase dite "*d'érosion précoce*", et d'autre part l'évolution des concentrations en fonction du débit lors de la deuxième phase dite "*d'érosion et transport*". On a mis en évidence que l'intensité des concentrations en MES de la phase d'érosion précoce dépendait de l'intensité et de la répartition des événements pluvieux du début de la saison humide et de la mémoire érosive du bassin des années précédentes. Mais cette phase est peu significative en terme de flux de matières solides exportées à l'échelle de la crue. En effet, le transport particulaire annuel est avant tout expliqué par la forme de la phase érosive suivante dont l'évolution des concentrations dépend de l'intensité hydrologique du pic de crue. Or ce paramètre est directement lié à l'hydraulicité de l'année et, dans une moindre mesure, à la répartition des pluies. Il apparaît donc très clairement que le volume total d'eau écoulée (lié à la pluviométrie annuelle) est le paramètre explicatif majeur des quantités de matières solides transportées annuellement par le fleuve. Il est remarquable que ceci soit traduit par une concentration annuelle relativement stable d'une année sur l'autre, de l'ordre de $25 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ pour le Niger à Banankoro, indépendamment de l'hydraulicité.

REFERENCES

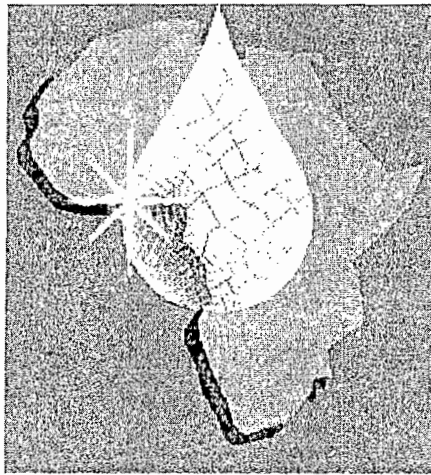
- Bricquet, J.P., Bamba, F., Mahé, G., Olivry, J.C. (1996) Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). In: *L'hydrologie tropicale: géosciences et outil pour le développement*, IAHS Publ. no 238. 157-166.
- Droux, J.P., Mietton, M., Olivry, J.C. (1997) Transport de matières en suspension sur petits bassins versants au Mali : influences des surfaces cultivées. In: *Human Impact on Erosion and sedimentation*, IAHS Publ., no. 245. 57-64.
- Gac, J.Y. & Kane, A. (1986) Le fleuve Sénégal - I. Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulaires à l'embouchure. *Sci. Géol. Bull., Strasbourg*, **39**, 99-130.
- Marieu, B., Bamba, F., Bricquet, J.P., Cissé, N., Gréard, M., Henry Des Tureaux, T., Mahé, G., Mahieux, A., Olivry, J.C., Orange, D., Picouet, C. (1998) Actualisation des données hydrométriques du fleuve Niger au Mali pour EQUANIS. Rapport final EQUANIS - volet Hydrologie, Programme PEGI/GBF/Niger, ORSTOM, Bamako, 85 p.
- Meybeck, M., Pasco, A., Ragu, A. (1996) Evaluation des flux polluant dans les eaux superficielles. Etude interagence de l'eau, Ministère de l'Environnement, 3 tomes.

- Olive, L.J., Rieger, W.A. (1992) Stream suspended sediment transport monitoring - why, how and what is being measured ? In: *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*, IAHS Publ., no 210. 245-253.
- Olivry, J.C., Gourcy, L., Touré, M. (1995) Premiers résultats sur la mesure des flux de matières dissoutes et particulaires dans les apports du Niger au Sahel. In : *Grands Bassins Fluviaux Périallantiques : Congo, Niger, Amazone*, Collection Colloques et Séminaires ORSTOM, Paris, p. 281-292.
- Orange, D. (1992) Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest). *Sci. Géologiques, Mémoires*, Strasbourg, 93, 206 p.
- Orange, D., Olivry, J.C., Censier, C. (1994) Variations des flux de matières particulaires et dissoutes de l'Oubangui à Bangui (de 1987 à 1992). In *Grands Bassins Fluviaux Périallantiques: Congo, Niger, Amazone*. Collection Colloque et Séminaire ORSTOM, Paris, 147-158.
- Soumaguel, A. (1996) Première exploitation des fichiers opérationnels des pluies sur le bassin versant du Niger : étude témoin. Rapport d'activité, Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, Bamako, 31 p.

**CONFERENCE INTERNATIONALE
INTERNATIONAL CONFERENCE**

ABIDJAN'98

**VARIABILITE DES RESSOURCES EN EAU EN AFRIQUE AU XXEME SIECLE
WATER RESOURCES VARIABILITY IN AFRICA DURING THE XXTH CENTURY**



**RECUEIL DES POSTERS
POSTERS PROCEEDINGS**

*16-19 NOVEMBRE 1998 – ABIDJAN – COTE D'IVOIRE
NOVEMBER 16-19 - ABIDJAN – IVORY COAST*

**CONFERENCE INTERNATIONALE
INTERNATIONAL CONFERENCE**

ABIDJAN'98

**VARIABILITE DES RESSOURCES EN EAU EN AFRIQUE AU XXEME SIECLE
WATER RESOURCES VARIABILITY IN AFRICA DURING THE XXTH CENTURY**

**RECUEIL DES POSTERS
POSTERS PROCEEDINGS**

**16-19 NOVEMBRE 1998 – ABIDJAN – COTE D'IVOIRE
NOVEMBER 16-19 - ABIDJAN – IVORY COAST**

**Sous le Haut Patronage du Ministre de l'Enseignement Supérieur,
de la Recherche et de l'Innovation Technologique de Côte d'Ivoire**
*Under the Patronage of the Minister of Higher Education, Research and
Technological Innovation of the Republic of Ivory Coast*

COMITE SCIENTIFIQUE INTERNATIONAL
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

| | |
|--------------|----------------|
| A. AFOUDA | Bénin |
| B. BOBEE | Canada |
| A. BULLOCK | Royaume-Uni |
| G. DEMAREE | Belgique |
| J.M. FRITSCH | France |
| D. HUGHES | Afrique du Sud |
| M. HULME | Royaume-Uni |
| S. JANICOT | France |
| R. KACHROO | Tanzanie |
| Z. KOLI BI | Côte d'Ivoire |
| P. LAMB | Etats-Unis |
| S. MKHANDI | Tanzanie |
| A. MUSY | Suisse |
| S. NICHOLSON | Etats-Unis |
| J.C. OLIVRY | France |
| J.E. PATUREL | France |
| E. SERVAT | France |

COMITE INTERNATIONAL D'ORGANISATION
INTERNATIONAL ORGANISING COMMITTEE

| | |
|--------------|----------------|
| AAH | A. AFOUDA |
| AISH | P. HUBERT |
| ASSN | A. MUSY |
| COOP. FRANCE | P. ICARD |
| COOP. SUISSE | A. HARTMANN |
| OMM | D. KRAEMER |
| ORSTOM | J.M. FRITSCH |
| TROPENBOS | M. DE PAUW |
| UE | M. KAYAMANIDOU |
| UNESCO | H. ZEBIDI |

COMITE LOCAL D'ORGANISATION
LOCAL ORGANISING COMMITTEE

| | | |
|--------------|-----------------|----------------------|
| A. AMAN | A. GOULA BI TIE | J.E. PATUREL |
| V. BEAUVILLE | Z. KOLI BI | I. SAVANE |
| J.F. BOYER | B. KOUAME | E. SERVAT (Chairman) |
| P. BOYER | H. LUBES-NIEL | M. TRAVAGLIO |
| T. BROU YAO | M. OUEDRAOGO | B. UZEL |