

Pluviométrie et crises climatiques en Afrique Tropicale : changements durables ou fluctuations interannuelles ?

par Pierre CAMBERLIN*, Gérard BELTRANDO**, Bernard FONTAINE*, Yves RICHARD*

Les 30 dernières années ont vu se succéder en Afrique tropicale différentes " crises climatiques " : sécheresses récurrentes de l'Éthiopie à l'Afrique de l'Ouest notamment en 1983-1984, en Somalie et en Afrique australe en 1992, au Kenya en 2000 ; inondations au Soudan en 1988, en Afrique de l'Est en 1997, au Mozambique en 2000. Ces crises s'inscrivent-elles dans une réelle modification sur le long terme des conditions climatiques ? Si oui, sont-elles à relier à des changements d'échelle globale, ou au contraire d'échelle régionale ? Reflètent-elles plutôt une sensibilité accrue des sociétés, ou bien une attention plus grande portée par certains médias ?

Ce travail vise ainsi deux objectifs : décrire l'évolution du climat africain au cours des 50 dernières années, en fournissant une géographie de la variabilité climatique sur cette période ; faire le point des avancées concernant la compréhension des facteurs de ces variations, en particulier à travers les travaux français menés depuis une quinzaine d'années. Cet aperçu ne prétend pas faire le tour des recherches engagées en France sur le sujet, mais donner les grands traits de l'évolution de nos connaissances, notamment par la contribution de la communauté des géographes.

I - LA MULTIPLICITÉ DES FORMES DE VARIATIONS PLUVIOMÉTRIQUES DEPUIS 50 ANS

A. Structures spatiales et modes de variabilité

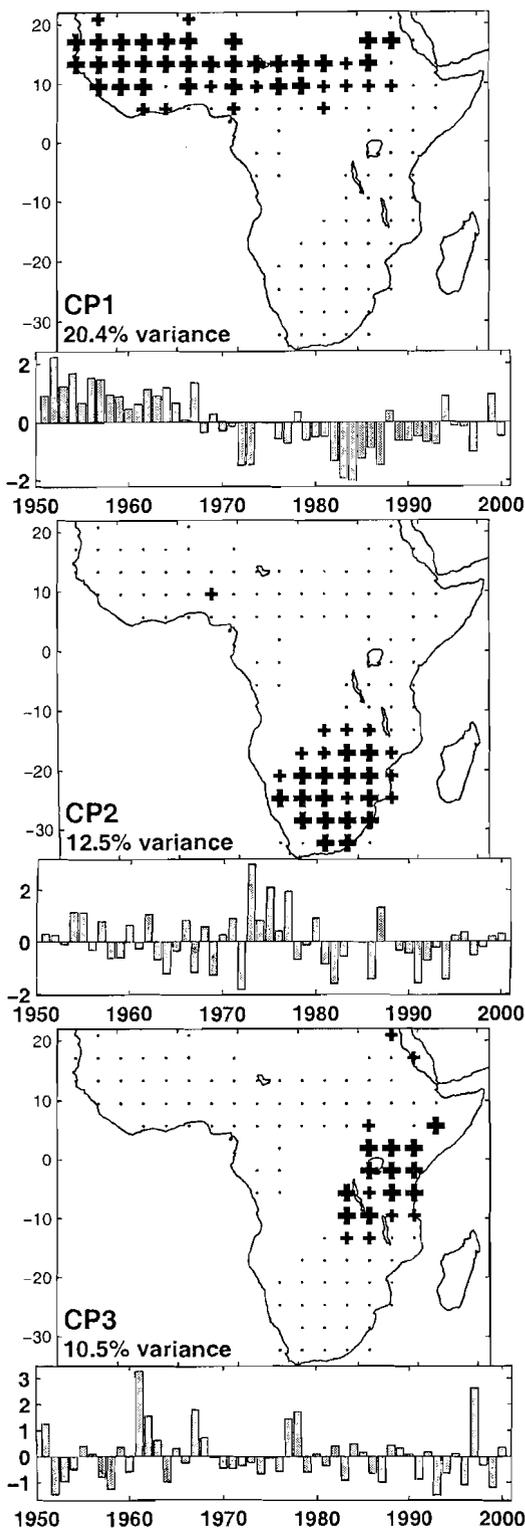
À l'échelle continentale, une synthèse spatiale des variations pluviométriques interannuelles peut être réalisée efficacement par analyse en composantes principales (ACP). Ce type de traitement permet de regrouper des stations qui subissent en même temps les mêmes variations, pour un pas de temps donné, formant ainsi des ensembles dont la variabilité est synchrone (Bel-

trando, 2000). Les cumuls annuels de 693 stations extraites de la base de données du CRC (Bigot *et al.*, 1997) sont analysés sur la période 1951-2000. Pour gommer les particularités locales, les stations sont replacées sur une grille régulière de 3,75° côté, et les séries moyennées pour chacun des 83 points de grille. Certaines régions n'ont pas de données (nord du Tchad, cuvette congolaise...). Les trois premières composantes matérialisent trois régions dont l'évolution pluviométrique est retranscrite par les chroniques correspondantes (fig. 1, page suivante).

La région la plus homogène quant à son comportement pluviométrique correspond à une vaste bande zonale soudano-sahélienne allant du Sénégal aux contreforts éthiopiens, et débordant au sud presque jusqu'au golfe de Guinée. C'est avant tout la vigoureuse diminution de la pluviométrie vers le début des années 1970 qui fonde l'homogénéité de cet ensemble. Sa structure zonale laisse penser que cette diminution peut s'interpréter en termes d'activité ou de position en latitude de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) durant l'été boréal (Citeau, 1991). Rappelons que la ZCIT est une large bande (ouest-est le plus souvent) d'ascendance de l'air où se développent des nuages cumuliformes, fortement plu-

* Centre de recherches de climatologie, UMR 5080 CNRS CRC, Université de Bourgogne, DIJON

** Centre de Géographie Physique, UMR 8586 CNRS PRODIG, Université Denis Diderot, PARIS



viogènes, et migrant dans le sens nord-sud d'une saison à l'autre. L'Afrique australe, moins la région du Cap à régime méditerranéen, s'individualise sur la seconde composante principale : de forts excédents pluviométriques (1973-74 et 1975-76) alternent avec de redoutables sécheresses (1982-83 et 1991-92), sans tendance. L'Afrique de l'Est équatoriale apparaît comme une troisième entité, dotée d'une très forte cohérence quant aux variations pluviométriques, en dépit de sa faible taille. Si le manque de données récentes en Afrique équatoriale occidentale l'exclut de fait de la régionalisation, une analyse limitée aux années 1951-1988 avait permis de conclure à l'absence de mode organisé d'échelle macro-régionale dans cette partie de l'Afrique (Bigot *et al.*, 1997).

B. L'Afrique de l'Ouest à l'épreuve de la péjoration climatique

Sur les marges sud du Sahara, de climat sahélien ou soudanien à unique saison des pluies d'été boréal, la fin des années 1960 a vu l'initiation d'une période de faible pluviométrie, ponctuée de sécheresses catastrophiques (1972-73 ; 1983-84). Cette péjoration climatique s'est atténuée à partir du milieu des années 1990 (fig.1), sans pour autant que la bande soudano-sahélienne ne retrouve les précipitations abondantes qu'elle connaissait au cours des décennies 1950 et 1960. La péjoration pluviométrique ne se traduit pas que par une diminution du cumul précipité, mais aussi et surtout pour les agriculteurs, par une contraction de la saison des pluies (exemple du Sénégal, Diop *et al.*, 1996), et par une moindre fréquence des pluies journalières intenses (> 40mm), comme il a été montré pour le Burkina-Faso (Carbonnel & Hubert, 1992) et le Nord-Bénin (Houndiéno & Hernandez, 1998). Ces résultats ne sont cependant pas forcément généralisables ; plus au nord au Niger la diminution des précipitations provient essentiellement d'une réduction du nombre d'événements pluvieux (Le Barbé & Lebel, 1997).

Une semblable dégradation a été reconnue plus récemment sur les régions plus méridionales de l'Afrique de l'Ouest, y compris sur le littoral du golfe de Guinée (Moron, 1994 ; Paturel *et al.*, 1998), sans que la succession d'années très sèches soit aussi marquée. Dans ces régions de la

Fig. 1 Régionalisation des variations pluviométriques en Afrique subsaharienne. Analyse en composantes principales des cumuls annuels de précipitations (juillet-juin), période juillet 1951-juin 2001. Les signes "+" désignent les points de grille dont les précipitations sont corrélées significativement (seuil 99%) avec les séries temporelles de la composante principale (CP) considérée.

Basse Côte, où l'on a souvent deux saisons des pluies (maxima de juin et octobre), c'est la "Grande Saison Sèche" d'hiver boréal et ces deux saisons qui sont concernées, tandis que la rémission intercalaire ("Petite Saison Sèche") ne présente pas de tendance (Janicot & Fontaine, 1997). Les précipitations de la zone guinéenne ne sont corrélées significativement avec celles du Sahel que du point de vue des tendances pluriannuelles. Si certaines années ont pu être marquées par des anomalies pluviométriques de signe opposé entre Afrique guinéenne et Afrique soudano-sahélienne (été boréal 1958 ou 1968 par exemple), cette structure dipolaire est devenue plus rare depuis les années 1970 (Moron, 1994).

C. L'Afrique de l'Est entre sécheresse et inondation

L'Afrique orientale diffère de l'ouest africain tant par son climat moyen que par son évolution pluviométrique. Dans un contexte général de faibles précipitations, la région possède une grande diversité de régimes pluviométriques, le cas le plus fréquent étant celui de deux saisons des pluies, en mars-mai et octobre-décembre. Au cours des 50 dernières années, aucune tendance pluviométrique à long terme n'est apparue. La variabilité s'exprime par des séries d'années médiocrement arrosées. Celles-ci sont interrompues par des années isolées mieux pourvues (avec un pseudo-cycle de 5-6 ans : Beltrando, 1990 ; Moron, 1997), voire quelques événements extrêmes occasionnant des inondations de grande ampleur, en 1961 et 1997. Ceux-ci interviennent lors de la saison des pluies d'octobre-décembre ("short rains"), dont la variabilité présente une forte amplitude, en même temps qu'une grande cohérence spatiale (Richard *et al.*, 1998). C'est ainsi que l'épisode de 1997 a été marqué par des écarts à la moyenne dépassant +100 % du cumul moyen d'octobre-décembre (1951-1996) dans 22 stations sur 30 au Kenya et en Ouganda, et +200 % dans 8 stations sur 30. La réponse hydrologique de surface à de tels événements se trouve amplifiée, de façon d'autant plus durable que sont impliqués de grands organismes lacustres : le niveau du lac Tanganyika est monté de près de 3 m suite aux pluies de 1961, et de 2 m après celles de 1997 (Bergonzini *et al.*, 2001 ; Mercier *et al.*, 2001).

D. L'Afrique australe : les changements ne sont pas que dans le climat moyen

En Afrique australe, à l'exception de la région du Cap qui bénéficie essentiellement de précipitations hivernales, le régime est tropical avec une

saison pluvieuse unique centrée sur décembre-mars. La zonalité climatique est perturbée par une opposition entre façades, des côtes atlantiques sèches aux côtes indiennes humides. Les volumes précipités varient considérablement selon un gradient sud-ouest / nord-est, mais l'ensemble du sous-continent connaît une très forte homogénéité quant à son histoire pluviométrique (Bigot *et al.*, 1997 ; Richard *et al.*, 2001). Cette cohérence spatiale est liée à la circulation atmosphérique : l'intégralité de cette région (fig. 1) est en toutes saisons située au sud de la ZCIT et, exception faite de l'Angola pour lequel les données sont incomplètes, l'humidité advectée provient essentiellement de l'Océan Indien.

Partout la moyenne des cumuls pluviométriques est restée stable au cours du XX^e siècle. Il n'en est pas de même de la variabilité interannuelle. Certaines périodes sont marquées par de faibles différences entre les années (décennies 1940, 1950 et 1960), par opposition à d'autres (décennies 1970 et 1980 notamment) où sécheresses comme années excédentaires sont particulièrement prononcées et étendues spatialement (Richard *et al.*, 2001).

E. L'Afrique centrale, des variations pluviométriques sans grande cohérence spatiale

La régionalisation des variations pluviométriques africaines sur la période 1951-1990 ne permet pas d'individualiser l'Afrique centrale comme un ensemble cohérent (Bigot *et al.*, 1997). À l'échelle bimestrielle, une étude menée sur la bande 10° N-12° S, et incluant l'Afrique et l'Amérique du Sud, confirme que l'Afrique centrale, avec la cuvette amazonienne, sont les régions où la covariabilité interannuelle des pluies est la moins forte (Moron *et al.*, 1995). Bigot *et al.* (1998) ont montré qu'à l'échelle de l'Afrique centrale, les 8 premiers modes d'une ACP n'expliquent que 28 % de la variance des totaux annuels de précipitations sur la période 1951-1990. C'est donc l'échelle fine qui prime dans cette région, et la stationnarité du climat (absence d'un quelconque changement climatique) qui l'emporte, ce qui n'exclut pas l'existence de toute cohérence régionale (Maloba & Samba, 1997). L'analyse par transformée en ondelettes révèle que cette variabilité repose sur une modulation du cycle saisonnier, c'est-à-dire de l'amplitude entre saisons des pluies et saisons sèches (Bigot *et al.*, 1998). La médiocre structuration spatiale des variations pluviométriques inter-annuelles se retrouve à l'échelle d'un pays de superficie modeste comme le Rwanda, où le relief accidenté et de nombreux lacs donnent aux facteurs locaux un rôle décisif (Douguedroit & Bart, 1989).

II - FACTEURS EXTERNES, FACTEURS INTERNES DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE EN AFRIQUE

A. Les variations interannuelles des températures de surface des océans bordiers : océan Indien, océan Atlantique

C'est des océans bordiers du continent africain que provient la plus grande partie de la vapeur d'eau qui alimente la convection humide : elle est advectée à partir de l'Atlantique équatorial via le flux de basses couches (mousson de sud-ouest) sur l'Afrique de l'Ouest, ou par les alizés de l'océan Indien vers l'Afrique orientale, l'Afrique australe, voire l'Afrique ouest-équatoriale. L'humidité atmosphérique des basses couches augmente avec la température des eaux de surface océanique (TSO). Les variations des TSO ont également une incidence sur les gradients horizontaux d'énergie, et donc sur la position des ascendances au sein de la ZCIT.

Cet effet a été reconnu pour l'Afrique de l'Ouest, où à un océan Atlantique équatorial anormalement chaud (températures supérieures à la moyenne) répond une moindre migration vers le nord de la ZCIT en été boréal, et donc un déficit de pluies au Sahel, tandis que des précipitations abondantes s'abattent le long du golfe de Guinée en pleine "Petite Saison Sèche" (Janicot & Fontaine, 1997 ; Fontaine *et al.*, 1998). Plus que la variation absolue des températures marines, ce sont en fait les modifications des gradients qui sont à considérer car la pluviométrie dépend ici d'une circulation particulière, la circulation de mousson. C'est ainsi que, pour une part, la fréquence accrue des déficits pluviométriques au Sahel depuis les années 1970 s'explique par un rafraîchissement de l'Atlantique nord, en parallèle avec une tendance au réchauffement de l'Atlantique sud (Folland *et al.*, 1991 ; Servain, 1991, Roucou *et al.*, 1994). Des simulations réalisées à partir du modèle de circulation générale atmosphérique (MCGA) Arpège-Climat, de Météo-France, dans lesquelles ont été reproduits différents types de gradients thermiques atlantiques, ont établi l'influence de ceux-ci sur l'intensité des cellules de Hadley nord et sud, la position latitudinale de la ZCIT, et la répartition des pluies (Trzaska *et al.*, 1996).

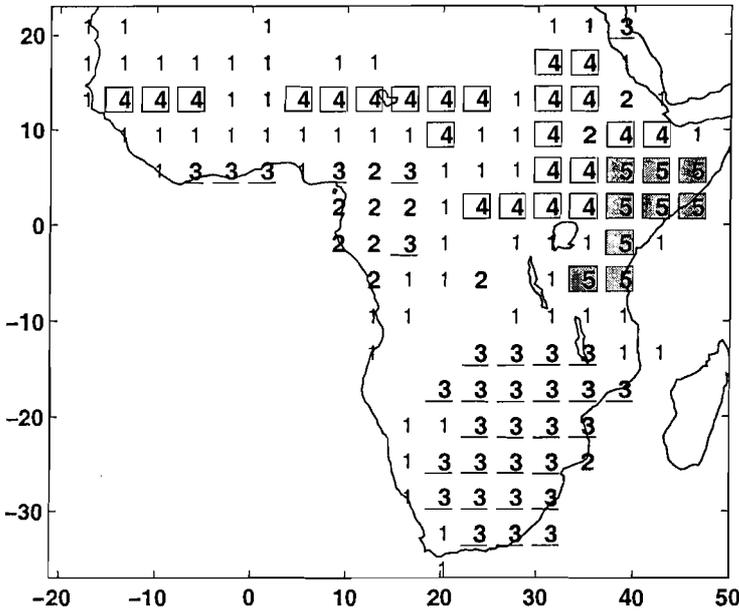
D'autres types d'anomalies dipolaires de températures marines concernent l'océan Indien, cette fois-ci selon un gradient ouest-est et non nord-sud. En automne boréal, l'océan Indien équatorial est habituellement plus chaud à l'est (Indonésie) qu'à l'ouest (côtes est-africaines). Il s'ensuit une activité très modérée de la ZCIT en Afrique de l'Est ("short rains"). Certaines années, on note une atténuation du gradient ouest-est, voire

comme en 1961 ou 1997 son renversement. Dans le même temps, la cellule de Walker habituellement présente le long de l'océan Indien équatorial en cette saison s'affaiblit voire s'inverse : les ascendances se reportent sur l'Afrique de l'Est, les vents d'ouest équatoriaux faiblissent, ou sont remplacés par un flux d'est, une subsidence s'établit sur l'Indonésie. Ce basculement irrégulier des anomalies océano-atmosphériques a été reconnu comme un mode propre de variabilité régional (Saji *et al.*, 1999). Il est à l'origine de l'ample variation interannuelle des précipitations est-africaines d'octobre-décembre, et en même temps de leur cohérence spatiale (Beltrando & Cadet, 1990 ; Beltrando & Camberlin, 1993). L'origine de ce mode de variabilité de l'océan Indien est encore mal connue, mais il apparaît que les modifications des températures de surface de l'ouest du bassin sont pour une part induites ("forcées") par la mousson indienne d'été. Une plus grande tension de vent de mousson au large des côtes est-africaines abaisse la température des eaux de surface (Hastenrath *et al.*, 1993 ; Philippon *et al.*, 2002).

En Afrique australe, l'eau précipitable provenant essentiellement de l'océan Indien, il n'est pas surprenant de constater que la variabilité des pluies est très influencée par sa température de surface. Les anomalies froides des années 1950 et 1960 au sein du courant des Aiguilles et de sa zone de rétroflexion sont associées à des sécheresses (Richard *et al.*, 2001). En Afrique centrale, l'influence des températures marines est faible, sauf sur la zone littorale (Moron *et al.*, 1995). Ceci y explique la faible cohérence spatiale des anomalies pluviométriques.

B. El-Niño : quel impact en Afrique ?

Le terme " El-Niño " désigne un réchauffement occasionnel mais durable des eaux habituellement fraîches du Pacifique-est. Il est associé à une modification profonde de la circulation océano-atmosphérique de cette région, survenant à intervalles irréguliers (3 à 6 ans), et connue sous le nom d'ENOA (El-Niño Oscillation Australe, ENSO en anglais ; Doumenge, 1999). Ces événements modifient les conditions climatiques habituelles de plusieurs régions du monde. Bien qu'éloignée du Pacifique oriental, l'Afrique tropicale ne subit pas moins une modulation de sa pluviométrie par ces derniers. La réponse des variations pluviométriques africaines à ces épisodes est significative dans la plupart des régions d'Afrique tropicale sur la période 1951-1997, mais avec une modulation saisonnière (Camberlin *et al.*, 2001). En années ENOA, les régions tropicales sèches (la bande soudano-sahélienne en été boréal puis l'Afrique australe lors de l'été austral qui suit) enregistrent



Classification automatique des corrélations précipitations mensuelles / températures de surface océan.

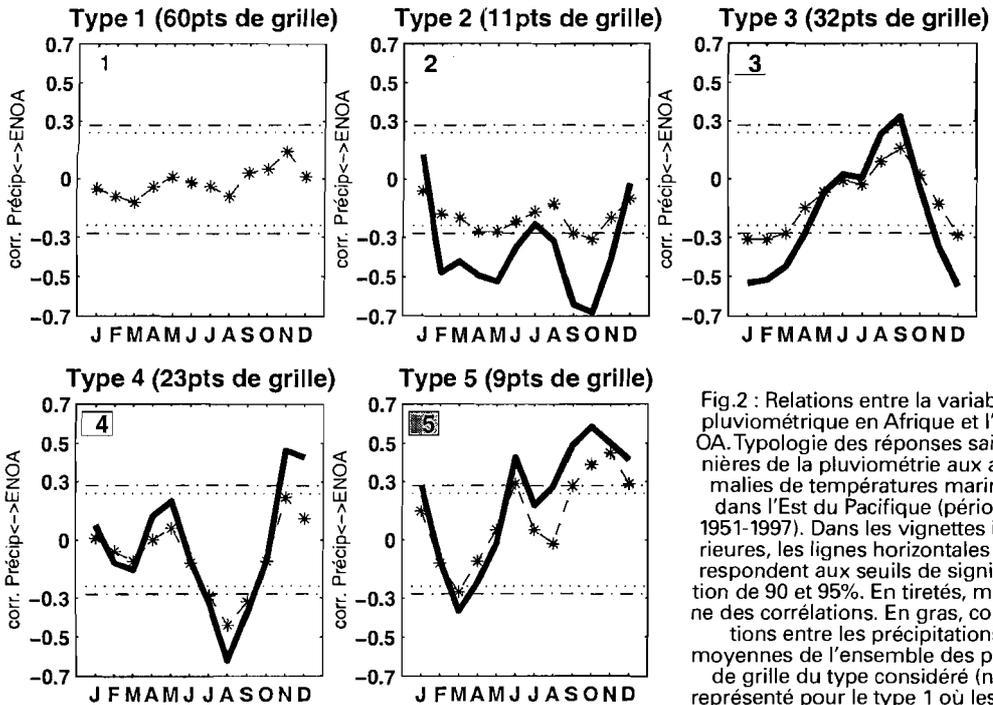


Fig. 2 : Relations entre la variabilité pluviométrique en Afrique et l'ENAO. Typologie des réponses saisonnières de la pluviométrie aux anomalies de températures marines dans l'Est du Pacifique (période 1951-1997). Dans les vignettes inférieures, les lignes horizontales correspondent aux seuils de signification de 90 et 95%. En tiretés, médiane des corrélations. En gras, corrélations moyennes de l'ensemble des points de grille du type considéré (non représenté pour le type 1 où les corrélations ne sont pas significatives)

une saison des pluies médiocre (fig. 2). Inversement, l'Afrique orientale connaît un excédent pluviométrique, mais seulement lors de la 2^e saison des pluies (octobre-décembre ; Ogallo *et al.*, 1988 ; Beltrando & Duchiron, 1996). En dehors des

régions riveraines de l'océan Indien, il apparaît d'autres signaux moins étudiés jusqu'ici, comme par exemple une modulation de l'intensité de la "grande saison sèche" (hiver boréal) le long du golfe de Guinée (Camberlin *et al.*, 2001). Dans le

cas du Sahel, l'existence de nombreuses années de sécheresse en dehors de tout événement El-Niño a fait longtemps douter d'une quelconque relation. Mais les analyses statistiques incluant les décennies 1970 à 1990, comme les simulations numériques réalisées à partir de modèles de circulation générale atmosphérique, établissent la réalité de la téléconnexion (lien à distance) entre événements El-Niño et années sèches (Fontaine *et al.*, 1998 ; Janicot *et al.*, 2001). Elle implique la circulation est-ouest de Walker, avec en année El-Niño une subsidence anormale dans l'espace périatlantique.

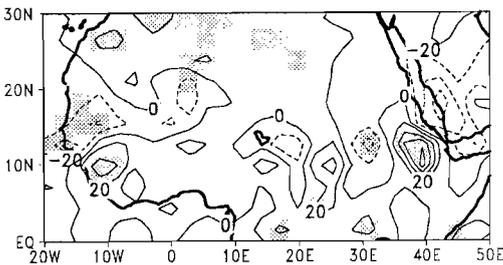
En fait, dans bien des cas apparaissent des changements interdécennaux dans la relation entre ENOA et pluviométrie. Le lien entre sécheresses éthiopiennes et occurrence d'événements El-Niño, assez similaire à celui qui s'établit avec les pluies sahéliennes (type 4, **fig. 2**), était beaucoup moins étroit au cours des années 1920-1930 que depuis 50 ans (Camberlin & Philippon, 2001). En Afrique australe, en même temps que l'amplitude des variations interannuelles des précipitations s'accroissait après 1970, leur réponse aux événements El-Niño devenait plus franche, tant du point de vue de l'intensité de la sécheresse que de son extension spatiale (Richard *et al.*, 2001). Des simulations utilisant le modèle de circulation générale de l'atmosphère de Météo France ont

mis en relief le rôle de l'océan Indien austral (Richard *et al.*, 2000). Lorsque ce dernier est relativement frais, cas avant 1970, l'impact négatif des ENOA sur les pluies n'est pas net. En contrepartie, depuis 1970, les ENOA s'accompagnent d'eaux plus chaudes au sud de Madagascar. La convection engendrant les pluies est déportée depuis le continent vers le proche océan. La sécheresse sévit en Afrique australe (1972-1973, 1982-1983, 1986-1987, 1992-1993). Elle persiste de décembre à avril (Richard *et al.*, 2002). De même au Soudan-Sahel, c'est à partir des années 1970, dans le contexte de détérioration du climat de cette région, que l'impact des épisodes El-Niño sur la pluviométrie s'est affirmé (Trzaska *et al.*, 1996 ; Janicot *et al.*, 2001).

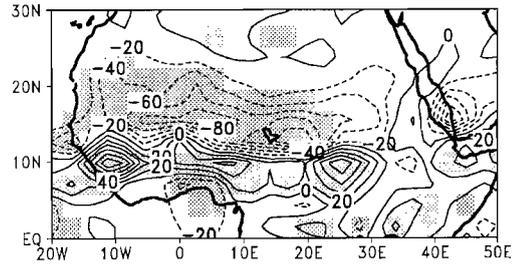
C. Les variations lentes de l'océan mondial

L'origine des modulations de la relation ENOA / pluviométrie est encore mal comprise. Une moindre amplitude du signal ENOA lui-même (comme dans les décennies 1920 à 1950) peut en être une raison. Pour ce qui concerne les modifications survenues vers les années 1970, l'hypothèse serait celle de changements intervenus à très large échelle dans les températures marines. On observe en effet un réchauffement des océans de l'hémisphère sud, océan Indien compris, et un

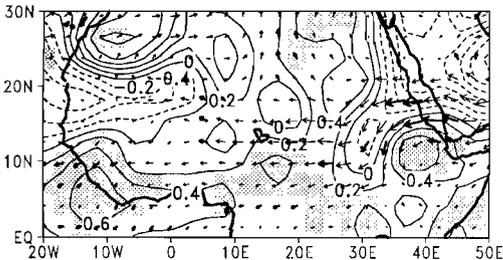
a) Précipitations, ENOA avant 1970



b) Précipitations, ENOA après 1970



c) Vent et humidité spécifique, ENOA avant 1970



d) Vent et humidité spécifique, ENOA après 1970

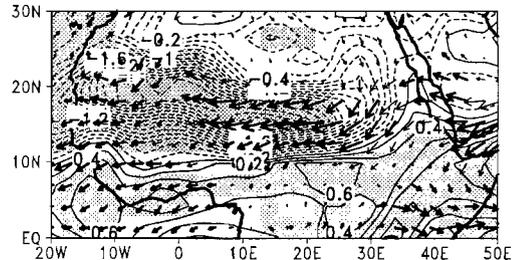


Fig.3 : anomalies des précipitations, du vent et de l'humidité de basses couches (850 hPa) en août en Afrique de l'ouest, pour deux simulations réalisées avec le modèle Arpège-Climat, et reproduisant les conditions ENOA d'avant 1970 (3a et 3c) et d'après 1970 (3b et 3d). Ecarts à la moyenne en mm/mois (précipitations), en g/kg (humidité) et en m/s (vent). En grisé, valeurs significatives au seuil de 5% pour les précipitations et l'humidité (Trzaska *et al.*, 1996).

refroidissement relatif de ceux de l'hémisphère nord, tout particulièrement aux latitudes extratropicales. La simultanéité avec le déclenchement de la phase sèche sahélienne a été notée, et les simulations confirment un impact de ces anomalies globales de températures océaniques sur la dynamique de mousson ouest-africaine (Folland *et al.*, 1991). Il apparaît en fait que la modification de ce contexte planétaire a contribué au renforcement de l'impact de l'ENOA sur les pluies ouest-africaines (Trzaska *et al.*, 1996 ; Fontaine *et al.*, 1998). C'est ce que montrent les simulations numériques réalisées à l'aide du modèle Arpège-Climat (fig. 3), où une réduction des pluies sur le Sahel, doublée de vents de mousson moins forts que la normale (anomalies de nord-est) accompagne les événements ENOA récents (fig. 3b). Par contre les événements ENOA survenus auparavant ne modifiaient pas significativement le climat sahélien (fig. 3a). De même, pour l'Afrique australe, en surimposant ce contexte récent aux anomalies chaudes pacifiques on obtient une augmentation de la réponse des précipitations, c'est-à-dire une sécheresse accentuée et plus étendue (Richard *et al.*, 2000).

L'origine des variations lentes de l'océan mondial reste une question ouverte. S'agit-il d'un mécanisme purement océanique, lié à la circulation profonde ou thermohaline, ou bien est-ce une manifestation du réchauffement global dû à l'augmentation des gaz à effet de serre, un temps masqué dans l'hémisphère nord par les aérosols soufrés (Boucher, 1997) ? Les climatologues n'ont ni les éléments ni le recul temporel pour trancher. Néanmoins, force est de constater qu'à la fin des années 1990, alors que le différentiel entre réchauffements sud et nord hémisphériques s'atténue, les traits caractérisant la variabilité des précipitations entre 1970 et 1995 s'estompent : sécheresse moindre en Afrique de l'Ouest et déconnexion avec l'ENOA en Afrique australe (1998 et 1999).

D. Le rôle des états de surface continentaux africains sur les gradients énergétiques et la mousson

Les caractères de la surface continentale asiatique, comme l'enneigement printanier, ont depuis longtemps été proposés comme facteurs de variabilité de la mousson indienne d'été. Au sein d'un autre domaine de mousson qu'est l'Afrique de l'Ouest, Charney (1975) a suggéré que la sécheresse sahélienne pouvait être induite par une augmentation de l'albédo local, et donc un moindre excédent énergétique, en relation avec une dégradation de la végétation sous l'effet du surpâturage. Si depuis le rôle clé des tempé-

ratures océaniques globales a été établi, l'intensité de la mousson n'en reste pas moins dépendante avant tout des gradients méridiens d'énergie qui s'établissent entre l'Atlantique équatorial et le continent africain. Or les propriétés de la surface continentale elles-aussi varient d'une année sur l'autre, via notamment l'humidité du sol ou l'état de la végétation. Plusieurs expériences numériques ou travaux diagnostiques récents montrent leur rôle significatif sur la variabilité interannuelle des pluies ouest-africaines (Zheng & Eitahir, 1998 ; Philippon & Fontaine, 2002). Plus généralement, le gradient méridien d'énergie statique humide (ESH), qui intègre énergie potentielle (gz), énergie thermique (enthalpie) et énergie latente (fonction de l'humidité spécifique) contrôle la dynamique de mousson. Il apparaît ainsi que les années les plus arrosées au Soudan-Sahel ont été précédées, en avril-mai, par des anomalies positives d'ESH au sud près de l'équateur, et négatives au nord dans la région sahélienne, le gradient s'inversant brutalement en début de saison pluvieuse (Fontaine & Philippon, 2000). En Afrique australe, hors du domaine de mousson et en l'absence de forêt en amont des flux, les conditions de surface continentales semblent plus contrôlées par les pluies que facteurs de modulation via l'évapotranspiration (Richard & Pocard, 1998).

F. Perspectives

La persistance sur plusieurs mois de certains indicateurs associés à la variabilité interannuelle des pluies permet leur utilisation comme prédicteurs. À l'échelle de grandes régions dont la variabilité pluviométrique est spatialement cohérente, comme le Sahel, l'Afrique orientale ou australe, des modèles statistiques de prévision des cumuls saisonniers de précipitations ont été proposés (par ex., Folland *et al.*, 1991 ; Mutai *et al.*, 1998 ; Fontaine *et al.*, 1999 ; Duchiron & Beltrando, 2002). Ces modèles utilisent le plus souvent comme prédicteurs l'ENOA et les températures de surface marine. Pour l'Afrique de l'Ouest, il a été montré que l'inclusion de variables décrivant les gradients énergétiques océan-continent, et donc indirectement les états de surface continentaux, améliorerait nettement les prévisions, en particulier à l'intérieur de la période (sèche) 1968-1997 (Fontaine *et al.*, 1999). À l'aide de modèles statistiques ou de simulations numériques, des prévisions opérationnelles sont faites avant chaque saison par différents centres de recherche et par les centres régionaux de suivi climatique (ACMAD à Niamey, DMC à Nairobi et Harare) épaulés par les services météorologiques nationaux. Une synthèse est délivrée lors de forums régionaux (PRESAO pour l'Afrique de l'Ouest ,

GHACOF pour l'Afrique de l'Est, SARCOF pour l'Afrique australe). Des efforts supplémentaires sont nécessaires pour améliorer encore la fiabilité des prévisions ainsi que leur résolution spatiale, mais les résultats sont très encourageants, confirmant en cela que la variabilité interannuelle du climat tropical est avant tout liée aux circulations cellulaires (Hadley et Walker), par l'intermédiaire des états de surface, qu'ils soient continentaux ou océaniques.

CONCLUSION

L'évolution de la pluviométrie de l'Afrique subsaharienne au cours des 50 dernières années a été contrastée. En Afrique de l'Ouest, la diminution durable des précipitations à partir de la fin des années 1960 semble témoigner d'une transition climatique, mais les autres régions ne montrent en général aucune dégradation sensible des conditions climatiques. En Afrique de l'Est par exemple, sécheresses et épisodes pluvieux abondants alternent sans qu'il soit possible de distinguer de tendance particulière. Il apparaît cependant dans certaines régions des modifications lentes (échelle interdécennale) dans l'amplitude de la variabilité interannuelle (Afrique australe) ou dans les relations entre pluies et températures de surface marine.

Dans cette variabilité interannuelle ou interdécennale, les états de surface au sein de la zone intertropicale jouent un rôle capital. Le réchauffement des eaux du Pacifique Est associé au phénomène ENOA a une incidence marquée sur les précipitations, qui tendent à être inférieures à la normale dans une majorité de régions d'Afrique (Afrique de l'Ouest, Éthiopie, Afrique australe, notamment), mais excédentaires en automne boréal en Afrique de l'Est. La température des océans bordiers, de façon combinée à l'ENOA ou indépendamment, module aussi la pluviométrie à l'échelle interannuelle (gradients nord-sud dans l'Atlantique, mais aussi est-ouest dans l'océan Indien). Les états de surface continentale, via la végétation et l'humidité du sol, qui influencent le contenu en vapeur d'eau atmosphérique et les bilans d'énergie, ont un rôle actif dans des régions où la disposition climatique est simple, comme l'Afrique de l'Ouest. Le recyclage local de l'eau semble même primer sur les forçages externes au sein de la cuvette congolaise. Le domaine extratropical exerce surtout une modulation aux échelles longues (pluridécennale, à travers les gradients énergétiques méridiens) ou très fines (épisodes pluvieux intrasaisonniers, dans des régions comme l'Afrique australe, ou l'Éthiopie au printemps boréal).

ORIENTATION BIBLIOGRAPHIQUE

- BELTRANDO, G. (1990).- Space-time variability of rainfall in April and October-November over East Africa during the period 1932-83. *Int. J. Climato*, n° 10, pp. 691-702.
- BELTRANDO, G. (2000).- La climatologie : une science géographique. *L'information géographique*, 64(3), pp. 241-261.
- BELTRANDO, G. ; CADET, D.L. (1990).- Variabilité interannuelle de la petite saison des pluies en Afrique Orientale : relations avec la circulation atmosphérique générale. *Veille Climatologique Satellitaire*, n° 33, pp. 19-36.
- BELTRANDO, G. ; CAMBERLIN, P. (1993).- Interannual variability of rainfall in the Eastern Horn of Africa and indicators of atmospheric circulation. *Int. J. Climato*, n° 13, pp. 533-546.
- BELTRANDO, G. ; DUCHIRON, B. (1996).- Relations entre la pluviométrie mensuelle d'octobre à décembre en Afrique de l'Est et un indice d'oscillation australe. *Veille Climatologique Satellitaire*, n° 58-59, pp. 97-110.
- BERGONZINI, L. ; CAMBERLIN, P. ; RICHARD, Y. (2001).- Variations interannuelles du bilan hydrologique du lac Tanganyika : les précipitations dans l'Afrique des Hautes-Terres sont-elles seules en cause ? In : BART, F. et al. (Éd.).- *Les montagnes tropicales : identités, mutations, développement*. DYMSET / CRET, Univ. Bordeaux 3, pp. 145-160 (Espaces Tropicaux, n°16).
- BIGOT, S. ; CAMBERLIN, P. ; MORON, V. ; RICHARD, Y. (1997).- Structures spatiales de la variabilité des précipitations en Afrique : une transition climatique à la fin des années 1960 ? *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, série IIa, t. 324, pp. 181-188.
- BIGOT, S. ; MORON, V. ; MELICE, J.L. ; SERVAT, E. ; PATUREL, J.E. (1998).- Fluctuations pluviométriques et analyse fréquentielle de la pluviosité en Afrique centrale. In : *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*, IAHS Publ. n° 252, pp. 71-78.
- BOUCHER, O. (1997).- L'influence climatique des aérosols. *La Météorologie*, n° 17, pp. 11-22.
- CAMBERLIN, P. ; JANICOT, S. ; POCCARD, I. (2001).- Seasonality and atmospheric dynamics of the Teleconnection between African Rainfall and Tropical Ocean surface temperature : Atlantic vs. ENSO. *Int. J. Climatology*, n° 21, pp. 973-1005.
- CAMBERLIN, P. ; PHILIPPON, N. (2001) - The stationarity of lead-lag teleconnections with East Africa rainfall and its incidence on seasonal pre-

dictability. In : BRUNET-INDIA, M. ; LOPEZ-BONILLO, D. (Eds.).- *Detecting and modelling Regional Climate Change*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 291-308.

CARBONNEL, J.P. ; HUBERT, P. (1992).- Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. In : *L'aridité, une contrainte au développement*, ORSTOM. pp. 37-51.

CHARNEY, J.G. (1975).- Dynamics of desert and drought in Sahel. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, n° 101, pp. 193-202.

DIOP, M. ; HOUNDENOU, C. ; RICHARD, Y. (1996).- Variabilité des dates de début et de fin de l'hivernage au Sénégal (1950-1991). *Publ. Assoc. Intern. Climat.*, n° 9, pp. 430-436.

DOUGUEDROIT, A. ; BART, F. (1989).- Les variations saisonnières des régions pluviométriques du Rwanda. *Publ. de l'Assoc. Intern. de Climat.*, n° 2, pp. 133-141.

DOUMENGE, F. (1999).- L'oscillation australe El Niño (ENSO) : anomalies de l'hydroclimat et conséquences. *Biologia Marine Mediterranea*, 6(1), pp. 1-51.

DUCHIRON, B. ; BELTRANDO, G. (2002).- Régionalisation de la pluviométrie sur l'espace riverain de l'océan Indien et prévision statistique à moyen terme. In : *Regional hydrology : bridging the gap between research and practice*. FRIEND / UNESCO, IAHS Publ. n° 274, sous presse.

FOLLAND, C.K. ; OWEN, J. ; WARD, N. ; COLMAN, A. (1991).- Prediction of seasonal rainfall in the Sahel region using empirical and dynamical methods. *J. of Forecasting*, n° 10, pp. 21-56.

FONTAINE, B. ; JANICOT, S. ; MORON, V. ; ROUCOU, P. ; TRZASKA, S. (1998).- Anomalies de température de surface de la mer et précipitations tropicales : synthèse de quelques de travaux récents portant sur les précipitations au Sahel et dans le Nordeste. *La Météorologie*, 8e série, n° 23, pp. 14-35.

FONTAINE, B. ; PHILIPPON, N. ; CAMBERLIN, P. (1999).- An improvement of June-September rainfall forecasting in the Sahel based upon region April-May moist static energy content (1968-1997). *Geophys. Research Letter*, 26(14), pp. 2041-2044.

FONTAINE, B. ; PHILIPPON, N. (2000).- Seasonal evolution of boundary layer heat content in the West African Monsoon from the NCEP/NCAR reanalysis (1968-1998). *Int. J. Climat.*, n° 20, pp. 1777-1790.

HASTENRATH, S. ; NICKLIS, A. ; GREISCHAR, L. (1993).- Atmospheric-hydrospheric mechanisms

of climate anomalies in the western equatorial Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, n° 98, pp. 20219-20235.

HOUNDENOU, C. ; HERNANDEZ, K. (1998).- Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin. *Sécheresse*, 9 (1), pp. 23-34.

JANICOT, S. ; FONTAINE, B. (1997).- Évolution saisonnière des corrélations entre précipitations en Afrique guinéenne et températures de surface de la mer (1945-1994). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, série IIa, t. 324, pp. 785-792.

JANICOT, S. ; TRZASKA, S. ; POCCARD, I. (2001).- Summer Sahel-ENSO teleconnection and decadal time scale SST variations. *Climate Dynamics*, n° 18, pp. 303-320.

LE BARBE, L. ; LABEL, T. (1997).- Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. *J. of Hydrology*, n° 188-189(1-4), pp. 43-73.

MALOBA MAKANGA, J.D. ; SAMBA, G. (1997).- Organisation pluviométrique de l'espace Congo-Gabon (1951-1990). *Sécheresse*, n° 8, pp. 39-45.

MERCIER, F. ; CAZENAVE, A. ; MAHEU, C. (2001).- Interannual lake level fluctuations (1993-1999) in Africa from Topex/Poseidon : connections with ocean-atmosphere interactions over the Indian Ocean. *Global and Planet. Changes*, n° 661, sous presse.

MORON, V. (1994).- Guinean and sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). *Int.J.Climato.*, n° 14, pp. 325-341.

MORON, V. ; BIGOT, S. ; ROUCOU, P. (1995).- Rainfall variability in subequatorial America and Africa and relationships with the main sea-surface temperature modes (1951-1990). *Int. J. Climat.*, n° 15, pp. 1297-1322.

MORON, V. (1997).- Trend, decadal and interannual variability in annual rainfall of subequatorial and tropical north Africa (1900-1994). *Int.J.Climato.*, 17, pp. 785-805.

MUTAI, C.C. ; WARD, M.N. ; COLMAN, A.W. (1998).- Towards the prediction of the East Africa short rains based on sea-surface temperature-atmosphere coupling. *Int.J.Climato.*, n° 18, pp. 975-997.

OGALLO, L.J. ; JANOWIAK, J.E. ; HALPERT, M.S. (1988).- Teleconnection between seasonal rainfall over East Africa and global sea-surface temperature anomalies. *J. Meteor. Soc. Japan*, 66(6), Ser. II, pp. 807-822.

- PATUREL, J.E. ; SERVAT, E. ; LUBES, H. ; DELATTRE, M.O. (1998).- Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences Journal*, 43 (6), pp. 937-946.
- PHILIPPON, N. ; CAMBERLIN, P. ; FAUCHEREAU, N. (2002).- Predictability study of the October-December East Africa rainy season using atmospheric and oceanic dynamic indicators. *Quart. J. Royal Met. Soc.* sous presse.
- PHILIPPON, N. ; FONTAINE, B. (2002) – The relationship between the Sahelian and previous second Guinean rainy seasons : a monsoon regulation by soil wetness ? *Annales Geophysicae*, sous presse.
- RICHARD, Y. ; CAMBERLIN, P. ; BELTRANDO, G. (1998).- Recherche de structures spatio-temporelles en climatologie: l'exemple de la variabilité interannuelle des précipitations en Afrique orientale. *L'espace Géographique*, 27(1), pp. 31-40.
- RICHARD, Y. ; CAMBERLIN, P. ; FAUCHEREAU, N. ; MULENGA H. (2002).- Cohérence intrasaisonnière de la variabilité pluviométrique interannuelle en Afrique du Sud. *L'Espace Géographique*, sous presse.
- RICHARD, Y. ; FAUCHEREAU, N. ; POCCARD, I. ; ROUAULT, M. ; TRZASKA, S. (2001).- XXth Century Droughts in Southern Africa Spatial and temporal variability, teleconnections with oceanic and atmospheric conditions. *Inter. J. of Climatology*, n° 21, pp. 873-885.
- RICHARD, Y. ; POCCARD, I. (1998).- A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *Int. J. Remote Sensing*, n° 19, pp. 2907-2920.
- RICHARD, Y. ; TRZASKA, S. ; ROUCOU, P. ; ROUAULT, M. (2000).- Modification of the Southern African rainfall variability /El Niño Southern Oscillation relationship. *Climate Dynamics*, n° 16, pp. 886-895.
- ROUCOU, P. ; MORON, V. ; FONTAINE, B. (1994).- Évolution des relations entre les températures de surface océanique et la pluviométrie saisonnière au Nordeste et au Sahel (1950-1989). *Pub. de l'Association Internationale de Climatologie*, n° 7, pp. 305-310.
- SAJI, N.H. ; GOSWAMI, B.N. ; VINAYACHANDRAN, P.N. ; YAMAGATA, T. (1999).- A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, n° 401, pp. 360-363.
- SERVAIN, J. (1991).- Simple climatic indices for the tropical Atlantic ocean and some applications. *J. Geophysical Research*, n° 96, C8, pp. 15137-15146.
- TRZASKA, S. ; MORON, V. ; FONTAINE, B. (1996).- Global atmospheric response to specific linear combinations of the main SST modes. Part I : numerical experiments and preliminary results. *Ann. Geophysicae*, n° 14, pp. 1066-1077.
- ZHENG, X. ; ELTAHIR, E.A.B. (1998).- The role of vegetation in the dynamics of West African monsoons. *J. Climate*, n° 11, pp. 2078-2096.

Pierre CAMBERLIN : Maître de Conférences de Géographie Physique (climatologie) à l'Université de Bourgogne, membre de l'UMR 5080 CNRS "Centre de recherches de climatologie", coordonne la participation de l'UMR au programme LOTI (*Rôle de l'Océan Indien sur la variabilité climatique tropicale*), soutenu par le Programme National d'Étude de la Dynamique du Climat (PNEDC). Il est auteur ou co-auteur d'une douzaine d'articles sur la climatologie de la Corne orientale de l'Afrique (variabilité interannuelle et intra-saisonnière). Il a également publié sur les relations entre températures de surface océanique et la pluviométrie africaine.

Gérard BELTRANDO : Professeur de géographie à l'Université Denis Diderot, Responsable de l'axe modélisation climatique aux échelles fines dans l'équipe Dynamique des Milieux et Risques de l'UMR 8586 PRODIG. En une quinzaine d'années, ses recherches principales ont porté sur :

- 1) La variabilité pluviométrique en Afrique orientale
- 2) La prévision du gel aux échelles fines dans le vignoble de Champagne
- 3) Les impacts des remblais d'ouvrages linéaires sur le climat local

Auteur ou co-auteur d'environ 25 articles dans revues à comité de lecture, il a participé à une vingtaine de colloques internationaux. Il est co-auteur du *Dictionnaire du climat* (Larousse Références, 1995).

Bernard FONTAINE : Directeur de recherche au CNRS, responsable de l'UMR 5080 CNRS "Centre de Recherches de Climatologie", a conduit de nombreuses recherches sur la dynamique de la mousson ouest-africaine. Il coordonne les travaux de l'UMR 5080 sur cette thématique, en particulier la prise en compte des états de surface océaniques et continentaux pour expliquer et prévoir la variabilité interannuelle des précipitations, en Afrique de l'Ouest sahélienne et guinéenne. Outre de très nombreux articles dans des revues internationales spécialisées (*Climate Dynamics*, *Int. Journal of Climatology*, *Annales Geophysicae*, *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, *Geophysical Research Letters*, *Journal of Climate*...), il a publié plusieurs synthèses sur ces questions dans la revue *La Météorologie*.

Yves RICHARD : Maître de Conférences de Géographie Physique (climatologie) à l'Université de Bourgogne, membre de l'UMR 5080 CNRS "Centre de Recherches de Climatologie". Coordinateur pour l'UMR de deux programmes de recherche France-Afrique du Sud : 1) "Variabilité pluviométrique en Afrique du Sud", Action Concertée Incitative (ACI) jeunes Chercheurs 2000, 2) "South African Summer Rainfall", avec l'Université du Cap (Afrique du Sud) et le Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS, Paris. Il a publié (*International Journal of Remote Sensing, Climate Dynamics, Intern. Journal of Climatology, L'Espace Géographique...*), de nombreux articles relatifs à l'Afrique australe, autour des axes suivants : structures spatiales de la variabilité pluviométrique interannuelle et décennale, téléconnexions avec la circulation océano-atmosphérique et impact sur la végétation.

RÉSUMÉ / ABSTRACT

PLUVIOMÉTRIE ET CRISES CLIMATIQUES EN AFRIQUE TROPICALE : CHANGEMENTS DURABLES OU FLUCTUATIONS INTERANNUELLES ?

par Pierre CAMBERLIN, Gérard BELTRANDO, Bernard FONTAINE, Yves RICHARD

Dans l'explication des difficultés endurées par les sociétés africaines contemporaines, sécheresses et autres accidents climatiques se voient attribuer un rôle significatif. Quelle est la réalité de l'évolution du climat africain au cours des 50 dernières années ? En Afrique subsaharienne, 3 grandes régions se distinguent par la nature de leurs variations pluviométriques. Parmi elles, l'Afrique de l'Ouest (tant la zone soudano-sahélienne que la zone guinéenne) présente depuis le début des années 1970 une récurrence d'années sèches, à mettre en relation avec des modifications lentes des températures de surface océanique (TSO) à l'échelle globale. L'Afrique équatoriale orientale, où de telles tendances sont absentes, enregistre sporadiquement des épisodes pluvieux extrêmement abondants, comme en 1961 ou 1997, centrés sur la saison des pluies d'automne boréal. Une relation s'établit avec le phénomène " El Niño Oscillation Australe " (ENOA), mais plus spécifiquement avec un dipôle thermique ouest-est dans l'océan Indien équatorial. L'Afrique australe ne connaît pas non plus de péjoration climatique, par contre, depuis le début des années 1970, l'amplitude des variations interannuelles a augmenté, et les écarts pluviométriques à la normale semblent plus liés à l'ENOA qu'auparavant. Dans l'ensemble, les anomalies de TSO globales ou régionales jouent un rôle majeur dans la variabilité des pluies en Afrique, à l'exception de quelques régions comme la cuvette congolaise. Toutefois, les états de surface continentaux, modifiés naturellement ou par l'homme, y contribuent eux aussi, notamment par le biais des gradients d'énergie qui s'établissent avec les bassins océaniques. La relative inertie des anomalies affectant ces états de surface océaniques et continentaux permet d'envisager pour certaines régions une prévision saisonnière des pluies, avec quelques résultats déjà probants pour l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique orientale.

Mots-clés : Afrique subsaharienne, Précipitations, Variabilité interannuelle, Structures spatiales, Sécheresses, El-Niño, Températures de surface océanique.

RAINFALL AND CLIMATE CRISES IN TROPICAL AFRICA: LASTING CHANGE OR YEARLY FLUCTUATIONS?

by Pierre CAMBERLIN, Gérard BELTRANDO, Bernard FONTAINE, Yves RICHARD

Droughts and climate fluctuations are often considered as playing a key role in the difficulties encountered by modern African societies. What has really been the evolution of sub-Saharan African climate in the passed 50 years ? 3 major regions can be delineated based on their interannual rainfall variations. West Africa (both the sudano-sahelian and the guinean zones) has been experiencing recurring deficits, since the beginning of the 1970s, that can be associated with slowly varying global-scale sea-surface temperature (SST) anomalies. Equatorial Eastern Africa, where such trends are lacking, episodically records episodes of very heavy rainfall, concentrated during the northern autumn rainy season, as in 1961 and 1997. There are linked to El-Niño Southern Oscillation (ENSO), and more significantly to a west-east thermal dipole in the equatorial Indian Ocean. Whereas Southern Africa does not experience any clear climatic deterioration, there has been an increase in interannual variability and a stronger response to ENSO. On the whole, global or regional SST anomalies play a major role in rainfall variability in Africa, except for some areas like the Congo Basin. Changes in continental surface conditions (either natural or man-made) also contribute, especially through land-sea energy gradients. The relative inertia of these land and sea surface anomalies makes seasonal rainfall prediction a realistic target, with already promising results.

Keywords : Sub Saharan Africa, Rainfall, Interannual variability, Spatial structures, Droughts, El-Niño, Sea-surface temperatures