

WORLD CLIMATE PROGRAMME
APPLICATIONS



IMPACT POSSIBLE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES A VENIR
SUR LES RESSOURCES EN EAU DES REGIONS ARIDES ET SEMI-ARIDES

Comportement des cours d'eau tropicaux, des rivières et
des lacs en zone sahélienne

par

Jacques Sircoulon
ORSTOM
Paris, France

WCAP - 12

WMO/TD-No. 380

ORGANISATION METEOROLOGIQUE MONDIALE

(Juin 1990)

The World Climate Programme launched by the World Meteorological Organization (WMO) includes four components:

- The World Climate Data Programme
- The World Climate Applications Programme
- The World Climate Impact Studies Programme
- The World Climate Research Programme

The World Climate Research Programme is jointly sponsored by the WMO and the International Council of Scientific Unions.

This report has been produced without editorial revision by the WMO Secretariat. It is not an official WMO publication and its distribution in this form does not imply endorsement by the Organization of the ideas expressed.

SOMMAIRE

Impact possible des changements climatiques à venir sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides.

Comportement des cours d'eau tropicaux, des rivières et des lacs en zone sahélienne

1. Introduction	p 1
2. Cadre sahélien et caractéristiques hydrologiques générales	p 6
2.1. Cadre géographique	
2.2. Cadre climatique	
2.3. Caractéristiques de l'écoulement	
3. Information disponible	p 15
3.1. Contexte paléoclimatique (←→20000 ans BP)	
3.2. Contexte historique et proxy-data (←→1000 ans BP)	
3.3. Contexte données instrumentales (←→100 ans BP)	
4. Evolution des eaux de surface (Passé et Présent)	p 33
4.1. Quelques éléments informatifs sur la pluviométrie	
4.2. Cours d'eau tropicaux	
4.3. Cours d'eau sahéliens	
4.4. Lacs (exemple du lac Tchad)	
5. Evolution des eaux de surface (Présent et Proche Futur)	p 57
5.1. Remarques générales	
5.2. Scénarios envisagés	
A. Stabilisation du climat	
B. Aggravation du déficit actuel	
C. Augmentation des précipitations	
5.2.1. Cours d'eau tropicaux - cas A,B,C	
5.2.2. Cours d'eau sahéliens - cas A,B,C	
5.2.3. Lacs sahéliens - cas A,B,C	
6. Conclusions et recommandations	p 83

1 - INTRODUCTION

Le Sahel subit depuis la fin des années 1960 une sécheresse rendue remarquable par trois caractères majeurs : sévérité, persistance et extension. L'ampleur du phénomène, les ravages causés par la désertification, fruit de la rigueur du climat et de la pression anthropique sont hélas bien connus. Si nombre de régions sont soumises à des fluctuations climatiques spectaculaires et dramatiques, tel le Nordeste du Brésil, le Sahel s'en distingue depuis 20 ans par un déficit pluviométrique prolongé qui déstabilise cette zone sensible /15,16/.

Une opinion couramment répandue est celle d'un dessèchement progressif et irréversible depuis l'époque du "Sahara vert" d'il y a déjà plusieurs milliers d'années qui a laissé ces gravures rupestres à la faune tropicale /5/ et ces réseaux hydrographiques bien marqués mais fossiles /6/. Il est séduisant de considérer le Sahel comme un rivage (le sens arabe) dont la frange nord recule inéluctablement sous les assauts du désert. Mais une telle vision des choses est trop simplificatrice : les limites entre Sahel et Sahara fluctuent largement et fréquemment même à l'échelle humaine /1/ sous l'action de pulsions humides ou sèches sans que l'on puisse leur rattacher un caractère périodique ou cyclique qui pourrait susciter un fallacieux espoir de prévision/7a/. Par ailleurs l'étude historique des climats nous montre qu'il est inutile de remonter très loin dans le passé pour trouver des périodes relativement humides et donc clémentes (au 17ème siècle, l'équivalent du "petit âge glaciaire" en Europe et même plus près de nous dans la seconde moitié du 19ème siècle) ce qui détruit une autre idée qui serait celle de la stabilité d'un climat très aride depuis le début de notre ère /13/.

Ces proches fluctuations climatiques ont ainsi laissé une empreinte profonde sur l'environnement qui peut être décryptée par les spécialistes de nombreuses disciplines.

.../...

La reconstitution des évènements marquants du passé et l'évaluation des conditions climatiques ou d'aridification actuelle font appel à trois sources : l'interprétation paléoclimatique /5/, l'information historique /9,10/, les données chiffrées de la période "instrumentale".

Trois échelles de temps leur correspondent : les 20 derniers millénaires (dernier glaciaire et interglaciaire actuel), le dernier millénaire (période historique), le 20ème siècle (période de la mesure des paramètres hydroclimatiques).

Pouvoir évaluer l'importance des fluctuations climatiques, leur chronologie, leur impact sur la faune, la flore, le milieu aquatique, les peuplements humains au cours d'un proche passé est l'une des clés pour apprécier le comportement du milieu sahélien au cours des décennies à venir suivant divers scénarios climatiques.

Le terme "scénario" prend toute sa justification dans la mesure où les chercheurs ont bien du mal à simuler l'évolution climatique en zone sahélienne dans l'hypothèse d'un doublement du CO_2 d'ici au milieu du siècle prochain. En effet, si les modèles de circulation générale (GCM) concordent assez bien pour indiquer dans ces régions une élévation relativement modérée de la température (1 à 2°C), les conséquences sur les précipitations sont beaucoup moins nettes, les résultats obtenus montrent une très forte variabilité /8,11,14,17/ et une évolution pluviométrique négative n'est d'ailleurs pas à exclure.

A supposer même que l'on soit capable de déterminer de façon significative un accroissement (ou une diminution) des précipitations P, d'autres clés seront nécessaires pour apprécier les variations correspondantes de l'écoulement Q(*).

On sait, en effet /12/, qu'à la grande variabilité spatio-temporelle des précipitations en zone aride correspond des régimes hydrologiques très irréguliers, au ruissellement sou-

.../...

(*) Dans ce qui suit les termes "écoulement" ou "eaux de surface" (cours d'eau et lacs) seront utilisés de préférence à celui de "ressources en eau" qui représente en toute rigueur la partie des eaux de surface disponibles /4/ pour l'humanité.

vent bref et localisé et subissant la dégradation hydrographique. Du seul point de vue pluviométrique, à une augmentation $x\%$ de P correspondra une augmentation $y\%$ de Q très variable car fonction de la structure des averses et de leur répartition au cours de la saison humide, cette répartition conditionnant l'état de saturation des sols. Il est vraisemblable qu'un climat plus chaud aura des répercussions sur les types de pluie, la distribution mensuelle des précipitations et la durée de la saison humide.

Mais et cela est à souligner, les conditions de ruissellement dépendront aussi de l'importance de la végétation et des états de surface des sols. Il est clair que ces paramètres ne restent pas constants lorsque le climat évolue, à une aridification prolongée, par exemple, correspond une raréfaction de la végétation, une dégradation des états de surface (imperméabilisation par formation d'encroûtements, accroissement des zones érodées...). C'est bien ce que l'on observe actuellement au Sahel où des causes naturelles (désertisation) et des actions anthropiques (désertification) se conjuguent pour détériorer sensiblement le milieu. Les relations $P-Q$ établies sur les bassins représentatifs ou expérimentaux étudiées dans les années 1960 ont été nettement modifiées depuis avec une augmentation notable des coefficients de ruissellement sur les petits bassins sahéliens /2,3/.

Indépendamment de la tendance climatique à long terme de cette région du globe et pour laquelle il n'existe pas actuellement de prévision /7/ l'établissement des divers scénarios (stationnarité des pluies, aggravation du déficit, reprise des précipitations) devra tenir compte de nombreux éléments.

Il faudra prendre en considération :

- Les caractéristiques physiques et climatiques propres aux zones arides,
- les informations fournies par les données paléoclimatiques, historiques et instrumentales,
- les connaissances acquises sur l'état des eaux de surface et leur comportement,
- la compréhension des mécanismes hydrologiques en liaison avec l'évolution des états de surface (dégradation ou régénération).

.../...

- REFERENCES DU 1er CHAPITRE

- 1 - ALBERGEL (J.) 1986 - Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne - Exemple du Burkina Faso in, Coll. sur la révision des normes hydrologiques CIEH - OUAGADOUGOU.
- 2 - ALBERGEL (J.) 1987 - Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso - Etudes des paramètres hydrologiques et de leur évolution. In thèse doct. Univ. Paris VI, 336 p.
- 3 - ALBERGEL (J.) 1987 - Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface - In the influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. IAHS, Publ. n°168, pp. 355-365.
- 4 - BERAN (M.A.) 1984 - Climate change : New problems for water resources and hydrology - UNESCO/WMO/IAHS, Sc-84/WS/53.
- 5 - - Changements globaux en Afrique durant le quaternaire Passé-Présent-Futur. Colloque Internat. INQUA-ASEQUA, Dakar, 21-28 avril 86, In Travaux et Documents de l'ORSTOM n°197.
- 6 - DUBIEF (J.) 1953 - Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Dir. Serv. Col. HYdraul. Alger, 457p.
- 7 - FARMER (G.), WIGLEY (T.M.L.) 1985 - Climatic trends for Tropical Africa. University of East Anglia, Norwich, 136p.
- 7 a - FAURE (H.), GAC (J.Y.) 1981 - Will the Sahelian drought end in 1985 ? in Nature, Vol. 291, pp.475-478.
- 8 - MABBUTT (J.A.) 1989 - Impacts of carbon dioxide warming on climate and man in the semi-arid tropics. In climatic change 15 : pp.191-221.
- 9 - MALEY (J.) 1981 - Etudes palynologiques dans le bassin du Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique nord-tropicale de 30 000 ans à l'époque actuelle. In Trav. et Doc. de l'ORSTOM, n°129.
- 10 - NICHOLSON (S.E.) 1976 - A climatic chronology for Africa : Synthesis of geological, historical and meteorological information and data. PHD thesis, Univ. of Wisconsin, Madison (unpublished).

.../...

- 11 - Report to IPCC from Working Group 1 (1990)
- 12 - RODIER (J.A.) 1985 - Aspects of arid zone hydrology, in Facets in hydrology, chapter 8, Vol.II, ed. J.C. RODDA, John WILEY and sons Ltd, pp.205-247.
- 13 - ROGNON (P.) 1989 - Biographie d'un désert, in Collection Scientifique SYNTHÈSE, Editions PLON, Paris.
- 14 SANTER (B.D.), SCHLESINGER (M.E.), WIGLEY (T.M.L.), MITCHELL (J.F.B.) 1990 - Developing climate Scenarios from equilibrium GCM results. In Max Planck, Institute für Meteorologie-Report n°47, Hamburg.
- 15 - SIRCOULON (J.) 1976 - Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale- Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940", in numéro Spécial Sécheresse. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. Vol.XIII, n°2, pp.75 à 174.
- 16 - SIRCOULON (J.) 1986 - La sécheresse en Afrique de l'Ouest Comparaison des années 1982-84 avec les années 1972-1973. In Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. Vol.XX1.
- 17 - WCIP - 1 Developing policies for responding to climatic change - Villach and Bellagio(1987) (WMO/TD n°225.

2 - CADRE SAHELIEEN ET CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES GENERALES.

2.1. Cadre géographique

La notion de Sahel ou de zone sahélienne a étymologiquement un contenu d'interface puisque "Sahil" signifie "bordure, littoral..." en arabe. En Afrique tropicale, ce terme désigne la zone qui longe le Sahara et forme transition entre l'Afrique humide et l'Afrique désertique.

Les limites du Sahel varient suivant les spécialistes, elles sont sensiblement différentes pour les botanistes, les agronomes, les climatologues ou les hydrologues /18,28,34,35/. En se référant à des critères basés sur l'écoulement, les hydrologues font correspondre la zone aride d'Afrique de l'ouest au régime subdésertique limité au nord par l'isohyète 100mm et la zone semi-aride au régime sahélien limité au sud par l'isohyète 750mm (soit entre 12 et 14° de latitude nord). Cette limite correspond approximativement au début de la dégradation hydrographique. (Fig.1)

Les auteurs s'entendent, à l'heure actuelle, pour estimer que la limite entre zone aride et semi-aride correspond à une hauteur annuelle de précipitation comprise entre 400 et 500mm. On peut adopter les définitions utilisées pour l'élaboration de la carte de la répartition mondiale des zones arides établies par l'UNESCO en 1979 /36/. Cette distinction repose sur la valeur du rapport de la hauteur moyenne annuelle des précipitations P à l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle ETP, soit P/ETP . Ce rapport est compris entre 0,03 et 0,20 pour les zones arides, entre 0,20 et 0,50 pour les zones semi-arides (pour les zones hyper-arides, comme le Sahara, P/ETP est inférieur à 0,03).

En définitive le Sahel correspond à une bande d'environ 600 km de large, s'étendant de l'océan Atlantique à la Mer Rouge. Bordant la lisière méridionale du Sahara, elle traverse les 9 pays suivants : Mauritanie, Sénégal, Mali, Burkina Faso, Niger, Nigéria, Cameroun, Tchad et Soudan.

Les exemples fournis dans ce rapport, porteront sur la seule zone francophone soit environ 2,5 millions de km² avec

.../...

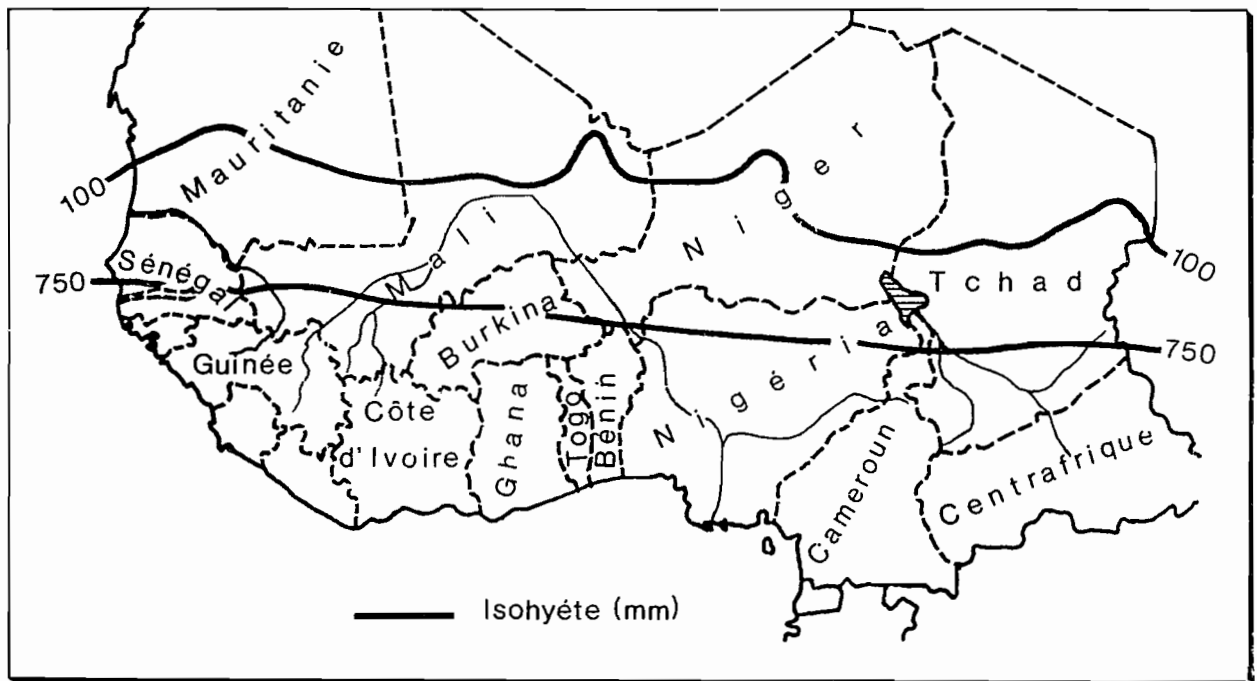


Fig. 1 - Zones arides et semi-arides d'Afrique de l'ouest et centrale

une population qui (pour les 5 premiers pays cités plus le Tchad) est passée de 18 millions en 1958 à 36 millions en 1987 (sans doute 20 millions dans le Sahel sensu stricto).

2.2. Cadre climatique

De nombreuses publications traitent de la climatologie de l'Afrique tropicale et parmi les travaux français on peut consulter ceux de LEROUX /26/, COUREL /20/, DHONNEUR /21/. On ne donnera ci-après que quelques commentaires très généraux /27/.

Le climat au Sahel est sous la dépendance des déplacements méridiens saisonniers des masses d'air boréales et australes, leur zone de contact correspondant à la zone de convergence intertropicale ZCIT.

La ZCIT prend sa position septentrionale extrême en juillet-août vers 20°N et sa position la plus méridionale vers 5°N en janvier-février.

Les types de temps qui en découlent sont ainsi liés à la position de la ZCIT. En simplifiant on peut caractériser les précipitations par :

- répartition sur une période assez courte en été
 - . vers l'isohyète 750mm la saison des pluies dure environ 4 mois et est constituée d'une cinquantaine d'averses.
 - . vers l'isohyète 100mm la saison des pluies se réduit à quelques semaines et est constituée d'une dizaine d'averses.

De façon générale les pluies se produisent sous forme d'averses convectives de courte durée (15 minutes à 2 heures), les intensités les plus fortes du corps de l'averse peuvent atteindre 150 mm/h en 5 minutes (sous 200-300 mm de total annuel).

Ces averses couvrent plusieurs dizaines de km² en général et dépassent rarement 100 à 200 km².

En ce qui concerne les autres paramètres climatiques :

Vents :

Les vents sont faibles en moyenne ; on observe une bonne concordance avec la circulation générale des masses d'air : vents

.../...

de secteur est et nord-est en saison sèche (harmattan) et vent de secteur ouest et sud-ouest en saison des pluies (mousson).

Températures :

La température moyenne annuelle croît du sud au nord (de 27 à 30° environ) avec des amplitudes de l'ordre de 18° en janvier et de 10° en août. On distingue 4 saisons : grande saison fraîche et sèche de décembre à février, grande saison chaude, sèche puis humide de mars à juin, saison fraîche et humide de juillet à septembre, petite saison chaude et humide d'octobre à novembre.

Humidité relative :

Elle est faible en moyenne annuelle et décroît du sud au nord du Sahel. Les moyennes interannuelles des maxima journaliers sont de 75% au sud et moins de 50% au nord. Les minima observés en saison sèche peuvent descendre à moins de 10% plusieurs jours de suite.

Evaporation :

Sur bacs Colorado proches de grandes étendues d'eau (cuvette lacustre du Niger, lac Tchad) on peut noter /19/ des valeurs annuelles de 3200mm en microclimat sec et 2500 mm en microclimat humide.

Pour l'estimation de l'ETP d'un couvert végétal, on peut utiliser la formule de PENMAN avec une valeur d'albedo de 0,15. Les valeurs mesurées s'échelonnent entre 2200 et 2900 mm/27,33/.

2.3. Caractéristiques de l'écoulement

Dans les régimes hydrologiques où l'écoulement est perenne, la ressource en eau (prise ici dans le sens de la totalité des eaux courantes) est représentée par un certain nombre de paramètres hydrologiques classiques comme :

- son abondance (module annuel exprimé en m³/s, ou volume d'eau annuel écoulé en m³, ou lame d'eau écoulée moyenne en mm),
- ses variations saisonnières ou interannuelles,
- ses valeurs extrêmes (crues et étiages).

.../...

En zone aride ou semi-aride, l'écoulement est un phénomène ni régulier, ni permanent ; il est caractérisé /25,28, 30,32,33/ par :

- son intermittence (due à des pluies concentrées sur quelques semaines ou mois),
- sa forte hétérogénéité spatio-temporelle (provoquée par le caractère lui-même très hétérogène des précipitations et des conditions très diversifiées de perméabilité des sols),
- l'influence de la dégradation hydrographique qui se fait sentir très rapidement lorsque la superficie du bassin dépasse quelques dizaines ou quelques centaines de km².

Sous ces régimes, certains paramètres usuels perdent donc de leur signification ou de leur intérêt : que signifie, par exemple, un débit moyen annuel ou un débit minimal d'étiage pour un cours d'eau à sec onze mois par an ? Par contre les notions de volume écoulé, durée de l'écoulement, pointe de crue (maximum, forme et durée) prendront un intérêt tout particulier.

2.3.1. Intermittence

Dans les zones désertiques au nord de l'isohyète 100 mm, les enquêtes par DUBIEF /22/ et les campagnes extensives effectuées (c.f.3.3.) montrent que dans les zones les plus favorables (fort relief montagneux et sols imperméables), il peut se produire une crue par an sur les bassins de quelques km² bien exposés. Cependant dès que la superficie du bassin croît, l'évènement devient beaucoup plus rare, RODIER /28/.

Dans les zones subdésertiques, il peut se produire quelques crues chaque année pendant une courte période de juillet à fin août dans les massifs montagneux et les zones de piémont. Un exemple intéressant est donné par le bassin peu dégradé du Kori Teloua dans l'Aïr (1300 km², 150 mm de hauteur de pluie interannuelle). Les observations qualitatives faites par les soeurs d'Azal depuis 1956, les mesures quantitatives faites en 1959,1960, 1964 et depuis 1975, montrent que le nom-

.../...

bre de jours d'écoulement par an semble osciller autour de 25 dans les années moyennes, atteindre 50 dans les années plus arrosées (1980) et s'abaisser à 5-6 dans les années très déficitaires comme 1972. Toutefois en 1984, année, de loin, la plus sèche (la pluie moyenne sur le bassin est estimée à seulement 15 mm, contre 169 mm en 1980) la durée totale de l'écoulement n'est plus que de 35 heures. Ce qui semble bien indiquer qu'une fois par siècle il n'y ait pas du tout d'écoulement /34/.

Dans les zones sahéliennes, une série de crues s'observe chaque année sur une période pouvant dépasser 3 à 4 mois avec souvent un écoulement continu entre les crues. Sur les petits bassins des réseaux, les conditions de sécheresse ne semblent pas trop influencer sur la durée totale de l'écoulement, ainsi le Gorouol à Koriziena (2500 km² - Burkina) connaît 80 à 100 jours d'écoulement par an, même les années à pluviométrie très médiocre. Par contre sur les grands bassins, la durée est beaucoup plus sensible aux aléas climatiques. Dans le cas du bassin de la Komadougou à Gueskérou (120 000 km²) alors que l'écoulement dure en général de juillet à fin mars (soit 9 mois) grâce à un soutien par les nappes souterraines, en 1984 l'écoulement ne s'observe que seulement 4 mois /34/.

2.3.2. Hétérogénéité spatio-temporelle

Le premier facteur d'hétérogénéité est dû aux précipitations (cf 2.2)

L'irrégularité interannuelle sera d'autant plus forte que la hauteur de précipitations annuelles est plus faible.

Le second facteur d'hétérogénéité est dû aux conditions physiogéographiques (type de sol, nature du sous-sol, végétation, relief). Les averses déjà localisées, donneront des coefficients de ruissellement très variables pouvant, pour une forte pluie, varier de 5% pour des sables granitiques jusqu'à 75% sur les regs argileux (DUBREUIL /24/). De plus, la perméabilité d'un sol pourra évoluer de façon sensible au cours de la saison des pluies en fonction de l'état de saturation du sol, de la pousse de la végétation et de la formation de pel-

.../...

licules de battance, VALENTIN /37/.

La connaissance des parties "actives" des bassins, RODIER /31/ sera essentielle dans l'évaluation des crues. L'exemple le plus connu étant le bassin de type Maggia où un plateau de grès de très faible ruissellement domine les pente de colluvions argileuses très imperméables.

La dégradation hydrographique va encore aggraver cette hétérogénéité provoquant parfois des pertes très rapides d'amont vers l'aval (cas du Kori Teloua) dès que la dégradation se fait sentir.

2.3.3. Dégradation hydrographique

Ce phénomène, généralisé dans toutes les zones arides et qui se produit dès que la pente des cours d'eau diminue et d'autant plus vite que l'on se rapproche des conditions désertiques, a été décrit en détail par RODIER /29/.

Il apparaît en Afrique de l'ouest, comme nous l'avons déjà dit dès que la hauteur de précipitation interannuelle est inférieure à 750 mm. Cette dégradation est causée par plusieurs facteurs.

- Longueur de la saison sèche favorisant la dénudation du sol,
- crues sporadiques incapables d'évacuer tous les matériaux érodés du lit,
- grandes étendues à faible pente aval favorisant l'étalement de l'écoulement et donc sa disparition progressive par évaporation.

Tous les cours d'eau sahéliens contrôlés par les réseaux de mesures connaissent peu ou prou ce phénomène qui va donc se traduire par un affaiblissement des lames écoulées d'amont vers l'aval. Mais pour une même superficie, disons de 25 km², sous 400 mm de pluie par an, l'écoulement annuel peut aller de 105 à 35 mm lorsqu'on passe d'un bassin peu dégradé à un bassin très dégradé et parfois moins encore /23,33/.

- REFERENCES DU 2ème CHAPITRE

- 18 - BRABANT (P.), POUYAUD (B.) 1989 - Eaux et sols dans le Sahel - La contribution de l'ORSTOM depuis 1945. Note interne, ORSTOM
- 19 - BRUNET-MORET (Y.) et al. 1986 - Monographie hydrologique du Fleuve Niger. Col. Monog. ORSTOM. n°8, 902p Paris.
- 20 - COUREL (M.F.) 1984 - Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse d'Etat, Université de Paris 1, 407p.
- 21 - DHONNEUR (G.) 1984 - Traité de météorologie tropicale. 1ère partie, Météorologie Nationale, Paris 151p.
- 22 - DUBIEF (J.) 1953 - Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Dir. Serv. Col. Hydrol. Alger 457p.
- 23 - DUBREUIL (P.), VUILLAUME (G.) 1975 - Influence du milieu physico-climatique sur l'écoulement des petits bassins intertropicaux. Coll. AISH sur les Caractéristiques hydrologiques des bassins fluviaux. Tokyo, Publ. AISH n°117, pp.205-215.
- 24 - DUBREUIL (P.) 1985 - Review of field observations of runoff generation in the Tropics, in Journal of Hydrology, 80, pp.237-264.
- 25 - FAO 1981 - Arid Zone hydrology, FAO irrigation and drainage paper n°37, 271p. + 96p. (annexes) Rome.
- 26 - LEROUX (M.) 1980 - Le climat de l'Afrique tropicale, Thèse d'Etat, Univ. de Dijon, 3 tomes, 1427p.
- 27 - RIBSTEIN (P.) 1990 - Modèles de crues et petits bassins versants au sahel. In Thèse de Doctorat, Montpellier II, 317p.
- 28 - RODIER (J.A.) 1964 - Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'ouest du Congo. Coll. ORSTOM, Mémoire n°6, Paris.
- 29 - RODIER (J.A.) 1975 - Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. In Trav. Doc. ORSTOM, n°46, 121p. Paris.
- 30 - RODIER (J.A.), ROCHE (M.) 1978 - River flow in arid regions, in R.W. Herschy (Ed.) Hydrometry. Principales and pratices, John Wiley and sons (chichester) chapter 13, pp.453-472.

.../...

- 31 - RODIER (J.A.) 1985 - Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. In Cah. ORSTOM, Ser. Hydrol. Vol. XXI, n°2, 1984-85. 65p.
- 32 - RODIER (J.A.) 1985 - Aspects of arid Zone hydrology. In Facets of hydrology, chapter 8, Vol. II, ed. J.C. RODDA, John Wiley and sons ltd, pp.205-247.
- 33 - RODIER (J.A.) 1989 - Caractères généraux de l'hydrologie superficielle des zones arides et semi-arides en Afrique. Leurs conséquences sur les études des ingénieurs. In the Sahel Forum on the state-of-the-art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa. UNESCO, Ouagadougou, pp.19-37.
- 34 - SIRCOULON (J.) 1990 - Caractéristiques des ressources en eau de surface en zones arides de l'Afrique de l'ouest. Variabilité et évolution actuelle. In ouvrage collectif RZA "l'Aridité : une contrainte au développement" In coll. IDT, ORSTOM (à paraître).
- 35 - Sud Sahara - Nord Sahel (1989) Centre Culturel Français d'Abidjan. Editions SEPIA.
- 36 UNESCO (1979) Note Technique MAB n°7.
- 37 - VALENTIN (C.) 1985 - Organisation pelliculaire superficielle de quelques sols de régions subdésertiques (Agadez-Rep. du Niger). Coll. Etudes et Thèses. Ed. de l'ORSTOM, 260p, 11 pl. photos.

3 - INFORMATION DISPONIBLE

3.1. Contexte paléoclimatique (→20 000 ans BP)

Les nombreuses études faites sur le quaternaire récent dans la zone de contact sahara-sahélienne montrent amplement que les changements dans l'environnement sont fréquents et sont la preuve de variations climatiques sensibles.

On peut illustrer ces changements par un aperçu rapide des fluctuations majeures survenues dans la tranche de temps relative aux 20 derniers millénaires ; cette période correspond en effet au dernier maximum glaciaire (Würm) et à l'interglaciaire actuel.

Les études sur les paléoenvironnements associent différentes approches : pollens /49/, ostracodes, diatomées /63/, restes végétaux, la paléohydrologie (reconstitution des oscillations lacustres /51,61/62/66/, du régime des écoulements avec l'étude des réseaux hydrographiques aujourd'hui fossiles /41, 42/), la géomorphologie et, depuis peu, la géochimie isotopique. Par ailleurs, les recherches archéologiques /39,58/ ont montré l'existence de peuplements préhistoriques nombreux qui s'adaptent aux modifications climatiques en colonisant les zones où l'eau est en abondance (rivages des lacs par exemple) ou en abandonnant complètement les régions qui s'assèchent lorsque les conditions de vie devenaient trop dures.

On peut ainsi schématiquement retenir les périodes suivantes :

- . De 20 000 à 12 000 ans BP - période d'aridité très marquée, liée sans doute au forcing glaciaire /56/ avec la présence de l'inlandsis sur l'Europe. Les températures devaient être inférieures de 3 à 4° aux valeurs actuelles et les vents violents. La progression des sables obstrue les grands fleuves tels le Sénégal ou le Niger et les lacs s'assèchent rapidement /56/.
- . De 12 000 à 7500 ans BP - Reprise des précipitations avec un maximum humide vers 9000 ans BP (Pluvial Holocène) Fig.2 qui est déterminant dans la mise en place du néolithique Sahelo-saharien /58/. A cette époque les lacs atteignent leurs plus hauts niveaux, les pluies semblent être assez bien réparties sur toute l'année (sans doute supérieures de 30% à celles de la normale 1931-60) et les températures

.../...

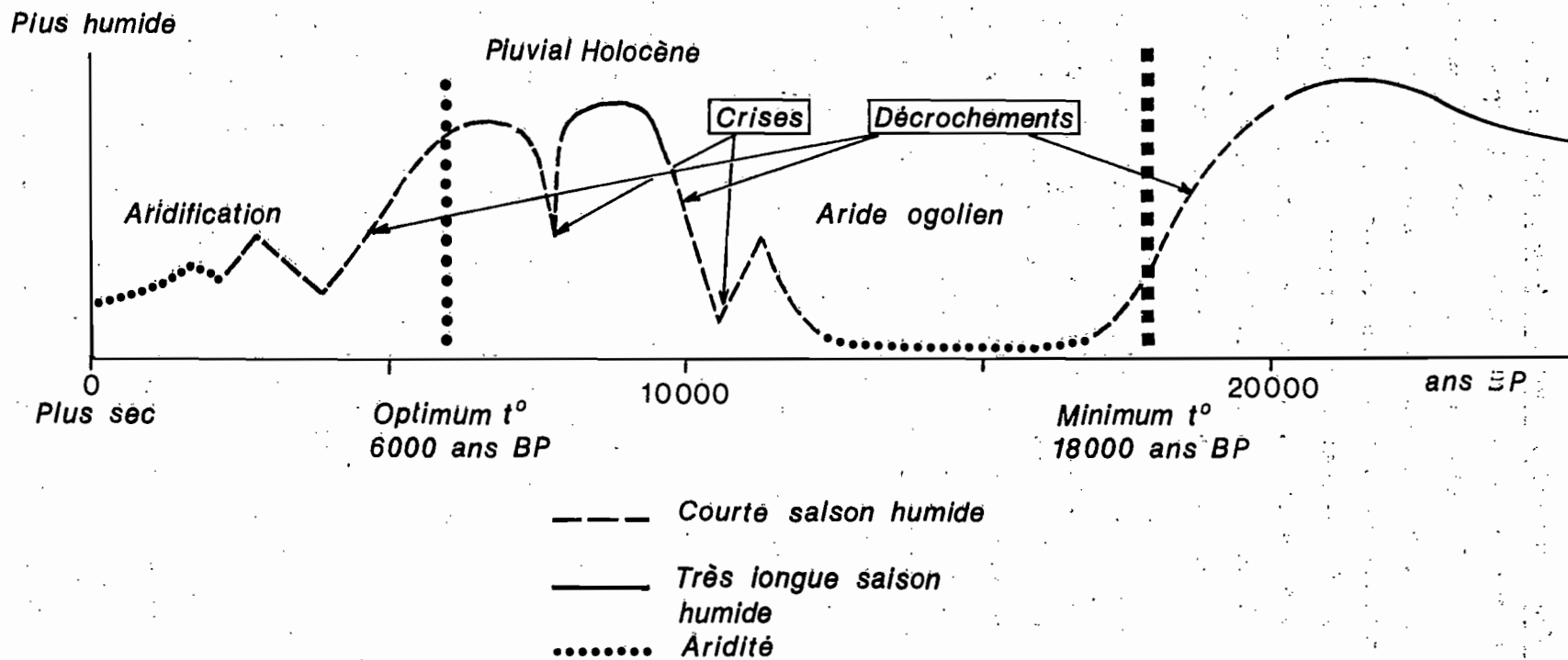


Fig. 2 - Changements climatiques depuis 20000 ans BP au Sud-Sahara (d'après ROGNON)

plus fraîches que maintenant (-2°) les nombreux vestiges de faune tropicale indiquent un biotope particulièrement favorable avec une végétation abondante.

- . De 6000 à 2500 ans BP - Après une période sèche (de 7500 à 6000 ans BP) qui voit la régression des lacs sahariens, une nouvelle phase humide, mais moins prononcée que la précédente, s'installe. Elle semble présenter une répartition modifiée des pluies (longue saison sèche) avec des intensités fortes et des températures supérieures à l'actuel.
- . Après 2500 ans BP - Aridification du climat, diminution de la longueur de la saison des pluies, évaporation plus élevée.
- . Les travaux sur l'interglaciaire actuel prouvent que le Sahara méridional et le Sahel ont connu des variations climatiques très contrastées dans le passé. Cependant un des enseignements majeurs fourni, grâce à la finesse des datations actuelles, est que des changements très rapides (en seulement quelques siècles) se sont produits, soit vers l'humide vers 9000 ans BP avec une remontée spectaculaire de la végétation tropicale vers le nord, soit au contraire vers l'aride aux environs de 2500 ans BP.

3.2. Contexte historique (→1000 ans BP)

L'appréciation des modifications climatiques /49,52/ au cours de cette période sur les régions sahéliennes peut être faite à partir d'un certain nombre d'approches qui doivent toutefois être recoupées avec soin afin d'éviter des résultats pouvant être contradictoires.* :

- Les données tirées de l'histoire (documents écrits et traditions orales sur les grands empires africains depuis le 7ème siècle de notre ère); de nombreux bouleversements sociaux étant souvent provoqués par des crises climatiques,
- Les Tarikhs de Tombouctou pour les crues du fleuve Niger au 16ème et 17ème siècle en particulier /68/ et les chroniques arabes en général,
- Les récits des explorateurs du siècle dernier (pour le lac Tchad notamment),
- Les datations au radiocarbone des carottages, /67/,

.../...

* Une famine catastrophique peut être due à une sécheresse sévère ou à des pluies prolongées qui noient les récoltes.

- L'étude du comportement du Nil au cours des siècles passés/46a/.
- Les enquêtes historiques basées sur les récoltes ou les pratiques culturelles /53/, etc...

L'ensemble des renseignements obtenus permet d'établir grossièrement le canevas suivant :

- . Du 7ème au 12ème siècle : conditions climatiques favorables, c'est à dire plus humides qu'actuellement.
- . Au 13ème siècle : Aridité et reprise de l'activité éolienne au Sahara.
- . Du 14ème à la fin du 16ème siècle : Amélioration climatique sensible mais avec quelques périodes de famine et sécheresses accentuées vers 1420-1460 et 1550 /49,60/.
- . Au 17ème et 18ème siècle : Aridification de la zone saharienne mais les pluies semblent être au 17ème siècle très abondantes dans les régions tropicales comme l'atteste les fortes crues des fleuves tropicaux parvenant au Sahel et les hauts niveaux du lac Tchad. De graves sécheresses semblent s'être produites vers 1680 et 1750 /51,52/.
- . Au 19ème siècle : optimum humide dans la seconde moitié du siècle /53/ corroboré par les récits des voyageurs et des militaires.

Les principales fluctuations du lac Tchad /49,59/ au cours du dernier millénaire Fig.3 ont pu être mises en évidence grâce à l'utilisation des méthodes énumérées ci-dessus. Les récits des explorateurs européens (le lac Tchad fut découvert en 1823 par DENHAM /40/) et les enquêtes menées localement permettent la reconstitution suivante pour les 18 et 19ème siècles :

- Bas niveaux lacustres vers le milieu du 18ème siècle /45/
- Bas niveaux lacustres vers 1830-1840 /45/
- Hauts niveaux dans la seconde moitié du 19ème siècle /38, 50,51,57/.

Faute de mesures quantitatives suivies, la période de hautes eaux de la fin du siècle dernier est considérée, à l'époque,/64/ comme le reflet d'une situation climatique normale. Les grands fleuves tropicaux paraissent ainsi être des voies de pénétration privilégiées vers l'intérieur du continent pour la colonisation européenne /46,47/. Mais très vite au début du 20ème

.../...

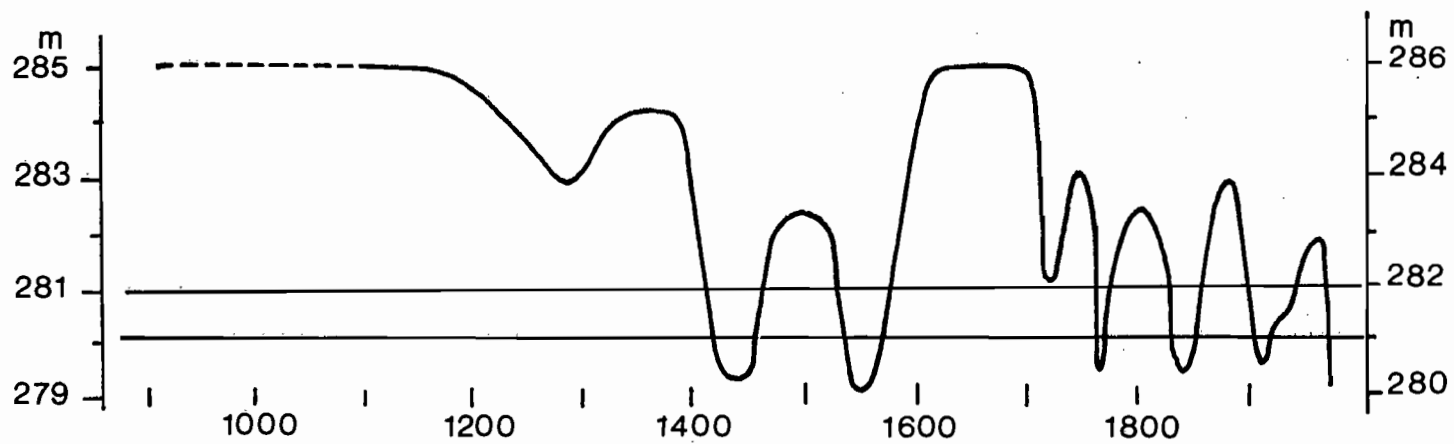


Fig. 3 - Reconstitution des variations de niveau du lac Tchad pour le dernier millénaire (d'après J. MALEY, 1981)

siècle, il faudra déchanter : Le capitaine FOURNEAU /44/ après sa remontée du fleuve Niger en 1903-1904 écrit : "le niveau du fleuve baisse de plus en plus, certaines îles recouvertes à certaines époques entièrement par les eaux, il y a moins de 40 ans, n'ont plus à redouter des inondations aujourd'hui...". Le commandant LENFANT /48/ parle du retrait progressif du lac Tchad et dans les documents scientifiques de la mission TILHO /69/ on peut lire page 104 ce titre accrocheur : "Le (lac) Tchad n'est-il pas en voie de disparition"? Ainsi dès le début de notre siècle était posée la question des aléas climatiques dans ces vastes régions.

3.3. Contexte données instrumentales (→ 100 ans BP)

Il n'existe avant les années quarante, dans l'ensemble des zones sahéliennes et sahariennes aucune donnée d'ordre quantitatif sur l'écoulement, si l'on fait abstraction des fleuves tropicaux parvenant aux régions arides pour lesquels existent quelques stations anciennes bien connues (cf 4.1.).

Des renseignements d'ordre qualitatif sur les écoulements ayant pu se produire depuis le début du 20ème siècle sur les oueds sahariens ont été publiés par DUBIEF /41/. Cet important inventaire est constitué des informations obtenues auprès des populations nomades et des militaires. Il s'agit d'indications sommaires et fragmentaires sur le nombre de crues, leur durée, et les points extrêmes atteints en aval par celle-ci pour un certain nombre de cours d'eau (empruntant en général des lits fossiles) des principaux massifs montagneux du Maroc et de l'Algérie au Mali actuel. Les éléments recueillis montrent que même en zone désertique des écoulements très localisés peuvent se produire chaque année.

Dès 1951, avec d'ailleurs le début d'une phase climatique plus humide, la connaissance correcte du régime des petits cours d'eau devenait cruciale, de nombreux ouvrages ou aménagements (ponts, barrages réservoirs) étant détruits par les crues.

Cette période allait voir le démarrage des mesures indispensables de terrain ; le Service Hydrologique de l'ORSTOM, récemment créé, allait jouer, associé à l'Electricité de France, un rôle majeur, aidé progressivement dans sa tâche par un certain

nombre d'organismes (Service de l'Hydraulique ou du Génie Rural, Missions d'Aménagement des Grands Fleuves, Office du Niger, Mission des Vallées Sèches du Niger, etc...).

* Les missions à assumer étaient les suivantes :

- La mise au point de méthodes d'observations et de mesures,
- l'organisation de la gestion des stations permanentes (adaptées aux conditions locales),
- la détermination des grands traits des régimes hydrologiques et des caractéristiques hydrologiques, l'assistance au développement devant intervenir dans les nombreux domaines concernés par les ressources en eau (hydroélectricité, navigation, transports routiers et ferroviaires, aide à l'agriculture etc...).

* La connaissance des crues (pointes de crue et volume) était le premier objectif hydrologique à réaliser. Des campagnes extensives de mesure dans les régions les plus arides allaient être lancées à partir de 1956 et 1957 alors que l'installation de bassins représentatifs, où l'on recueillait en plus de données sur l'écoulement une information précieuse sur les précipitations, commençait dès 1953-54 et devait se multiplier considérablement à partir de 1956 avec l'appui des administrations et des bureaux d'étude.

Nous allons brièvement évoquer ces actions dans les diverses zones climatiques.

3.3.1. Bassins d'études et campagne extensive (Fig.4).

3.3.1.1. Les grands massifs en zone désertique (moins de 100mm annuels de pluie) ont fait l'objet de campagnes de mesures à caractère extensif dans des conditions souvent difficiles. Il s'agissait de véritables expéditions, commencées en véhicules tous terrains et souvent terminées à dos de dromadaire ou à pied. Nous pouvons citer les campagnes de l'Ennedi (1957-59), dans l'Aïr (1959-60 puis 1964), dans le Tibesti (1962). Trois bassins représentatifs étaient aménagés dans l'Ennedi en 1958-59 et dans l'Aïr (1959-60). Dans ce dernier massif, les études sur le Teloua ont repris en 1975 et se poursuivent actuellement.

3.3.1.2. En zone subdésertique, les études ont également commencé à la même époque et sont déjà plus nombreuses. Outre les campagnes déjà mentionnées, on doit citer les missions ORSTOM dans le Brakna et le Tagant (1958-59), celles du nord de l'Ouaddaï (1961) et de l'Affolé en Mauritanie (1960). D'autres études ont été conduites par les services du Génie Rural de Mauritanie (Oued Ketchi, lac Aleg) et du Niger en 1966 et 67 notamment.

Les bassins représentatifs sont au nombre d'une dizaine et couvrent en général le centre de la zone subdésertique depuis la Mauritanie (Dionaba, 1958-59) jusqu'au Tchad (Kadjemeur, 1965-66, Razelmamoulni, 1959-60). Ces bassins n'ont fonctionné que 2 ou 3 ans et ont été installés pour la plupart à la fin des années 50 dans une période climatique plus favorable. Le seul bassin récent est celui de l'Oued Kidal dans l'Adrar des Iforas suivi en 1984 et surtout 86 /54/. Comme pour le régime désertique il n'existe pas dans ces régions de stations permanentes de réseau.

3.3.1.3. Dans la zone sahélienne au sens strict (400 à 750 mm), les données recueillies depuis une trentaine d'années sont plus abondantes, mais restent très insuffisantes dans certaines régions. Des études régionales faites sur des périodes de 2 à 4 ans couvrent, avec des lacunes, toute la zone sahélienne. Des séries d'observations nettement plus longues concernent le seul Burkina Faso (lac de Bam, 1966-74 et mare d'Oursi, 1976-81).

35 ensembles de bassins représentatifs ont été étudiés pour des conditions très variées (perméabilité des divers types de sol, pente et réseau hydrographique, couverture végétale).

3.3.2. Réseaux sahéliens (Fig.5)

Les stations permanentes des réseaux de mesure nationaux concernent uniquement des cours d'eau situés au sud de l'isohyète 400mm et couvrent jusqu'au milieu des années 70 une zone à l'est du méridien de Greenwich depuis le Burkina Faso jusqu'au Tchad :

.../...

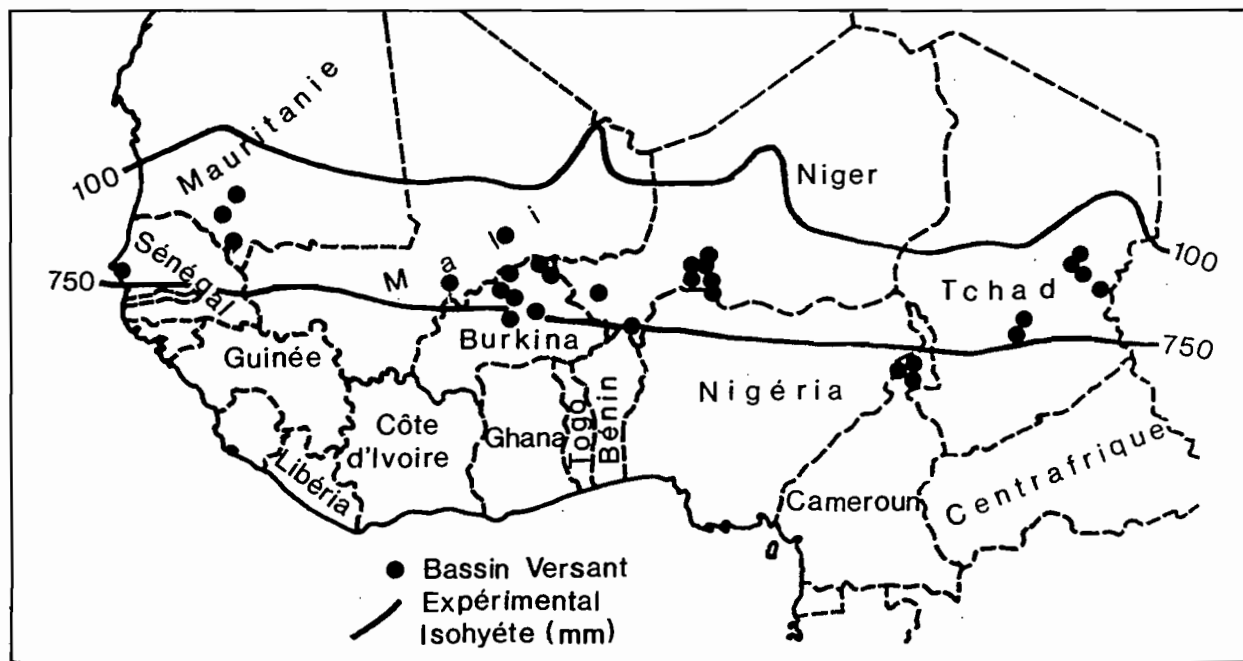


Fig. 4 - Carte de situation des bassins versants de recherche au Sahel (d'après RIBSTEIN)

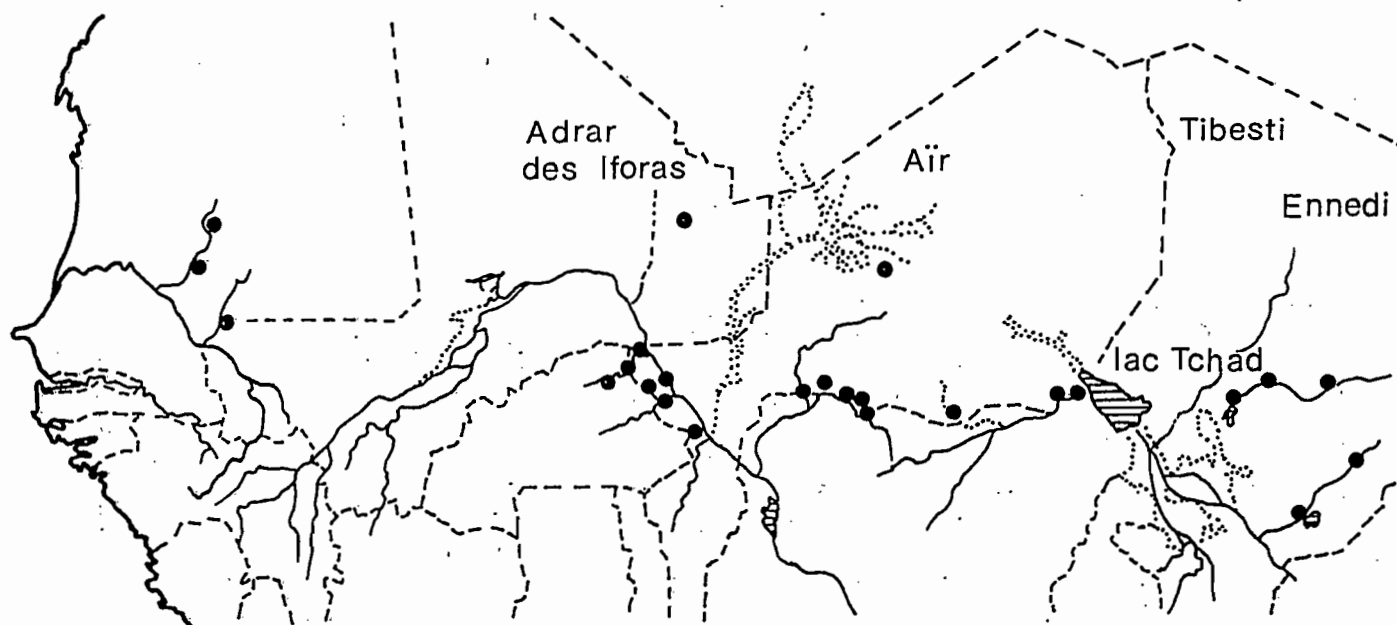


Fig. 5 - Carte de situation des cours d'eau sahéliens étudiés.

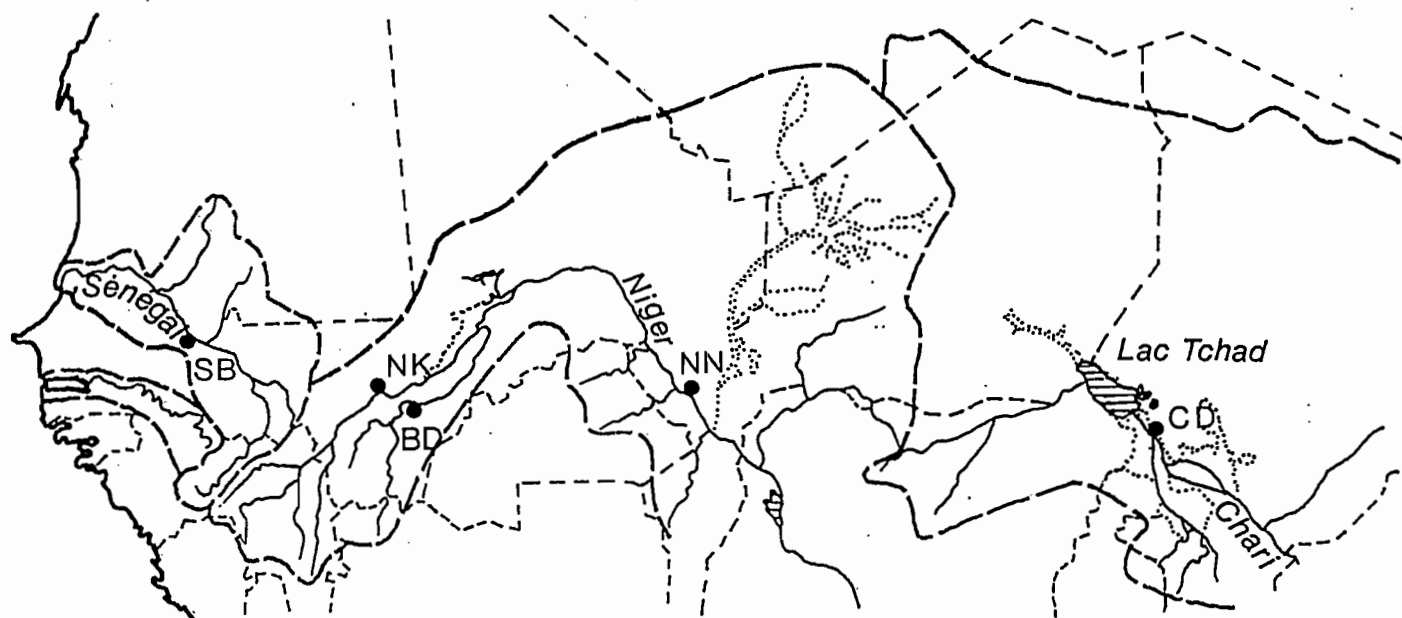


Fig. 6 - Implantation de quelques stations de base sur les fleuves tropicaux

- ce sont les stations sur les affluents rive droite du fleuve Niger comme le Gorouol (station d'Alcongui ouverte en 57, de Dolbel ouverte en 1961 et de Koriziena suivie de 1955 à 1965 puis reprise en 1970).

- les rivières, des vallées sèches le long de la frontière Niger-Nigéria (comme la Maggia suivie depuis 1954), ou se jetant dans le lac Tchad (Komadougou dès 1957).

- les rivières de l'est du Tchad (Bahr Azoum, à partir de 1953) ou le Ba Tha (à partir de 1955).

A la fin des années 70, le programme AGRHYMET permet la réouverture de quelques stations en Mauritanie, suivies avec des fortunes diverses (Gorgol Blanc et Noir, Oued Ghorfa, ...) mais par contre les stations de l'est du Tchad ne sont plus lues.

Ces stations contrôlent des superficies variant de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres carrés où la dégradation hydrographique est très variable. Les observations présentent souvent des lacunes et l'on dispose dans le meilleur des cas de 30 années d'observations.

3.3.3. Les fleuves tropicaux parvenant au Sahel (Fig.6)

Les fleuves tropicaux parvenant au Sahel (Sénégal, Logone-Chari) ou le traversant (Niger) représentent des conditions d'écoulement exogènes puisque les têtes de bassins se trouvent dans des régions beaucoup plus arrosées (Fouta Djallon notamment). Néanmoins il est utile de les prendre en compte, non seulement parce que leurs apports conditionnent la survie de vastes régions, mais aussi parce qu'ils représentent des indicateurs précieux des variations climatiques. Les plus longues séries d'observations qui dépassent 80 ans montrent des fluctuations interannuelles de l'écoulement très sensibles aux variations spatio-temporelles des régimes pluviométriques.

Les stations de Bakel sur le Sénégal et de Koulikoro sur le Niger, suivies depuis le début du siècle pour des raisons de navigation fluviale fournissent des données chiffrées largement exploitées dans les études portant sur la sécheresse (cf Chapitre suivant).

3.3.4. Les Lacs (Fig.7 et 8)

Les grands ensembles lacustres de la zone sahélienne sont principalement ceux :

3.3.4.1. De la cuvette lacustrè au Mali, alimentée par le haut Niger et le Bani qui s'étend sur 60000 km² environ. Il s'agit d'une vaste zone d'épandage, fond d'un immense delta qui à son apogée à l'Holocène couvrait une étendue bien plus considérable/55/.

L'alimentation en eau des nombreux lacs de la cuvette (Fig. 7) est tributaire de l'inondation annuelle par le fleuve. Les observations chiffrées des niveaux lacustres sont très fragmentaires. Quelques stations ont été installées en 1955, un réseau plus dense mis en place en 1975 avec des tournées régulières en 1983-84.

On peut rajouter à cet ensemble, le lac Faguibine, en rive gauche, qui est le plus grand lac après le lac Tchad et peut couvrir 600 km². Découvert par les militaires français fin 1894, il bénéficie d'observations de 1937 à 1941 de 1958 à 1967 et au cours de ces dernières années (avec en plus un suivi satellitaire de son évolution).

3.3.4.2. Du lac Tchad lui-même qui a connu de très hauts niveaux à l'Holocène /49,59/ et dont les fluctuations ont été estimées pour le dernier millénaire /49/. Il sera décrit de façon détaillée par les missions Tilho /69/.

A l'époque contemporaine la surface du lac oscille entre 10000 et 25000 km² suivant l'importance des crues du Chari qui représentent 80% des apports annuels au lac (la surface des eaux libres peut même s'abaisser à moins de 2000 km² ces dernières années en fin de cycle annuel comme nous le verrons plus loin). Le lac est composé de trois entités : les eaux libres, les îlots-bancs et ce qu'on appelle l'archipel constitué d'une myriade d'îles (Fig. 8a). Il est formé de deux cuvettes qui communiquent suivant le niveau du lac à travers ce que l'on nomme "la Grande Barrière" suivant l'axe Baga Kawa-Baga Sola.

On peut distinguer trois stades en fonction de la superficie et de l'aspect morphologique du lac, en reprenant la classification proposée par Tilho /70/

- Le "Grand Tchad" avec une côte du plan d'eau à une altitude de 284 m, la surface en eau estimée approche 25000 km² et la navigation est possible partout.
- Le "Moyen Tchad" avec une côte du plan d'eau à 282 m environ et une superficie de l'ordre de 15 à 20000 km² (Fig.8a).
- Le "Petit Tchad", c'est le stade atteint lorsque le plan d'eau s'abaisse à 280 m et en dessous (Fig.8b). La cuvette sud est séparée de la cuvette nord par l'exondation de la "Grande Barrière". Ce sont ces conditions, observées par Freydenberg en 1905 /45/, Tilho en 1905, 1907 et 1914 qui sont de nouveau apparues à partir de mai 1973.

Des observations seront faites de 1904 à 1908, après un épisode d'assèchement qui avait dû commencer vers 1896, puis ensuite de 1913 à 1919, pendant une phase de remplissage. Des observations suivies des niveaux lacustres ne seront assurées qu'à partir de 1953.

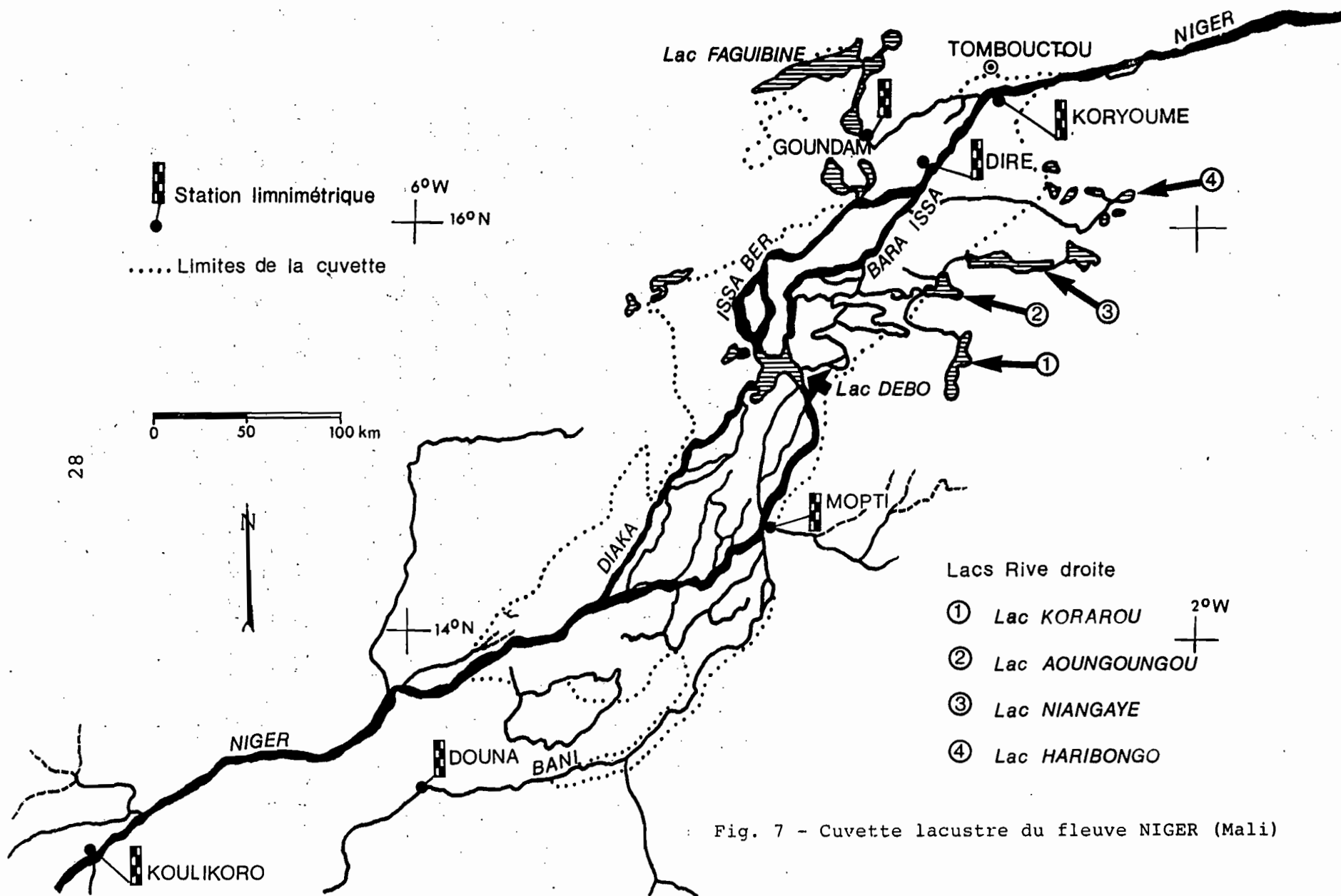


Fig. 7 - Cuvette lacustre du fleuve NIGER (Mali)

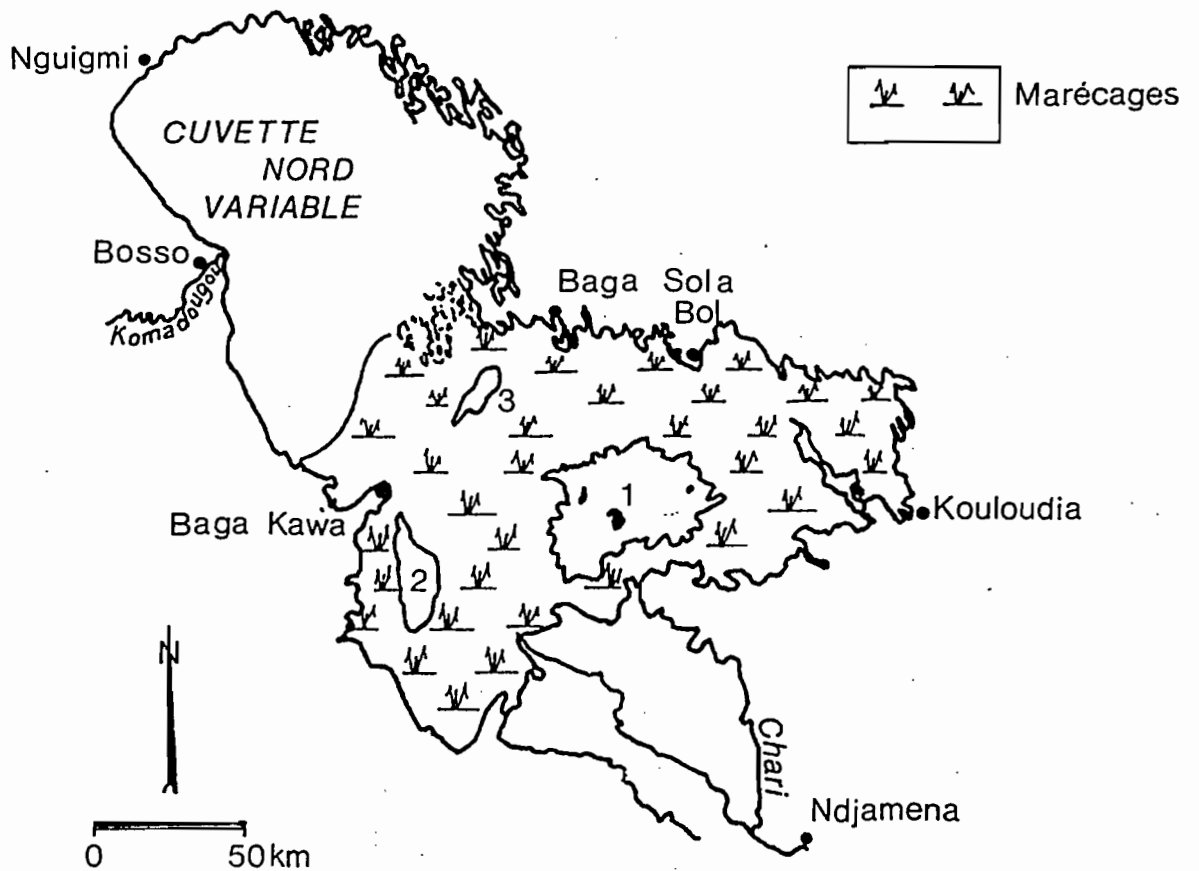
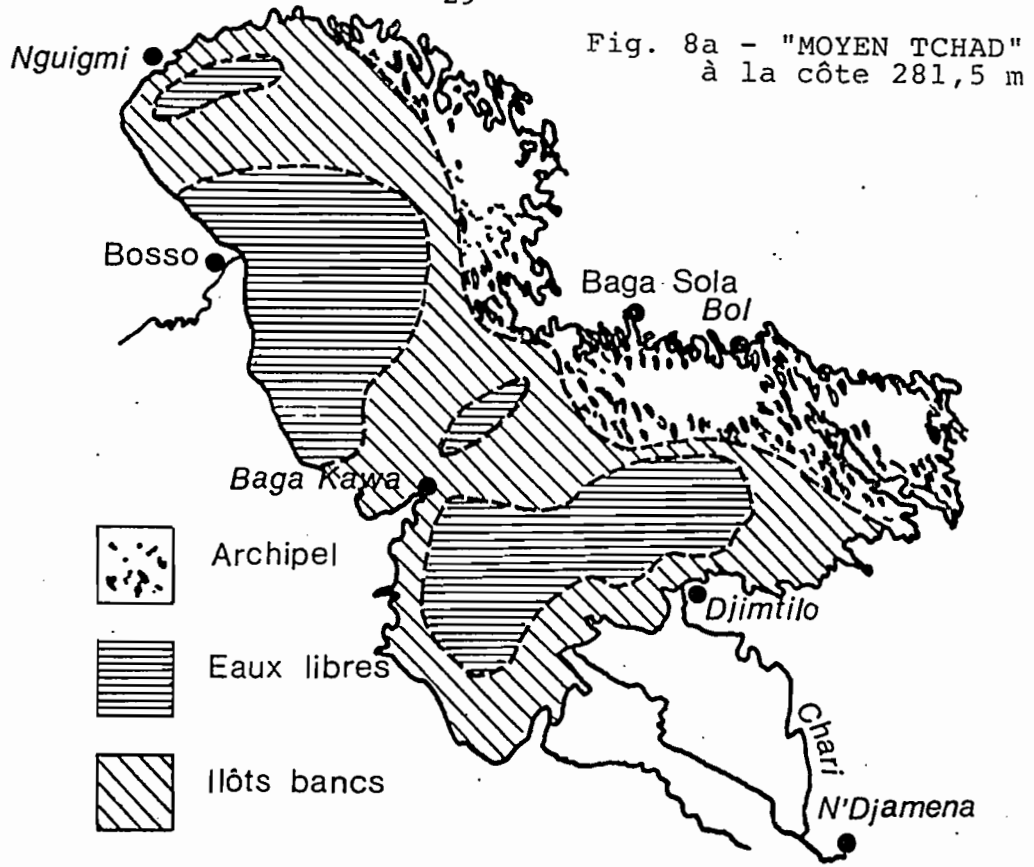


Fig. 8b - "Petit Tchad" (1 : Eaux libres du Sud-Est
 2 : " " " Sud
 3 : " " " Sud-Ouest)

- REFERENCES du 3ème CHAPITRE

- 38 - BARTH (H.) 1860-61 - Voyages et découvertes dans l'Afrique septentrionale, et centrale pendant les années 1849 à 1855. 4 tomes, A.Bohné Lib. Paris.
- 39 - - Changements globaux en Afrique durant le quaternaire - Passé-Présent-Futur. Colloque international. INQUA-ASEQUA, Dakar 21-28 avril 86, in Trav. et Doc. ORSTOM, n°197.
- 40 - DENHAM (Major) 1826 - Voyages et découvertes dans le nord et dans les parties centrales de l'Afrique.
- 41 - DUBIEF (J.) 1953 - Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara, in Dir. Serv. Col. Hydraul. Alger, 457p.
- 42 - DUBIEF (J.) 1963 - Le climat au Sahara. Mem. Univ. Alger, Institut recherches Sahariennes. Tome I et II.
- 43 - FARMER (G.), WIGLEY (T.M.L.) 1985 - Climatic trends for Tropical Africa. University for East Anglia, Norwich, 136p.
- 44 - FOURNEAU (Cap.) 1906 - Navigation sur le Niger entre forcados et Tombouctou. Henri Charles Lavaurelle, Ed. Militaire, Paris.
- 45 - FREYDENBERG (H.) 1907 - Exploration dans le bassin du Tchad. In la géographie, pp.161-170.
- 46 - JAIME (G.) 1894 - De Koulikoro à Tombouctou. Les Libraires Associés, Paris, 456p., 4 cartes.
- 46a - JARVIS (C.S.) 1936 - Flood-stage records of the River Nile in transactions of the American Society of Civil Engineers. Paper n°1944, Vol 101, pp. 1012, 1030 + discussions pp.1031,1071.
- 47 - LENFANT (E.) 1903 - Le Niger - Paris, Hachette, 252p.
- 48 - LENFANT (E.) 1905 - La grande route du tchad. Paris, Hachette, 288p.
- 49 - MALEY (J.) 1981 - Etudes palynologiques dans le bassin du Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique nord-tropicale de 30000ans à l'époque actuelle. In Trav. et Doc. ORSTOM, n°129.

- 50 - NACHTIGALL (G.) 1881 - Sahara et Soudan, Libr. Hachette, Paris, 552P.
- 51 - NICHOLSON (S.E.) 1980 - Saharan Climates in historic times. In the Sahara and the Nile (Ed. Williams et Faure) 173-200, Balkema, Rotterdam.
- 52 - NICHOLSON (S.E.) 1981 - The historical climatology of Africa, in Climate and history (Wigley, Ingram and Farmer ed.) Cambridge University Press, Cambridge, pp.249-270.
- 53 - OLIVRY (J.C.), CHASTANET (M.) 1986 - Evolution du climat dans le bassin du fleuve Sénégal (Bakel) depuis le milieu du 19ème siècle. in changements globaux en Afrique durant le quaternaire. pp337-343, Coll. Trav. et Doc. ORSTOM, N°197.
- 54 - PEPIN (Y.), BERTHAULT (C.), KONE (B.) 1986 - Bassin versant de l'oued Kidal (Adrar des iforas) - Campagne 1986 - Direction de l'Hydraulique et de l'Energie, ORSTOM, 71p. Bamako.
- 55 - PETIT-MAIRE (N.) 1986 - Paléoclimatologie du Sahara Occidental et Central pendant les deux derniers optima climatiques, aux latitudes paratropicales in changements globaux en Afrique durant le quaternaire. pp 371-380, Coll. Trav. et Doc. ORSTOM, n°197.
- 56 - ROGNON (P.) 1989 - Biographie d'un désert, in coll. scientifique SYNTHÈSE, Edit. PLON, Paris.
- 57 - ROHLFS (G.) 1874-75 - Quer durch Africa ; Reise vom Mittelmeer nach dem Tschad-see und zum golf von Guinea. Leipzig, 2 vol.
- 58 - ROSET (J.P.) 1987 - Neolithisation, Neolithique et post-neolithique au Niger-oriental in congrès de l'INQUA à Ottawa, pp 203-214.
- 59 - SCHNEIDER (J.L.) 1989 - Géologie et hydrogéologie de la rep. du Tchad. Thèse, Univ. d'Avignon.
- 60 - SEIGNOBOS (C.) 1983 - Des traditions Fellata et de l'assèchement du lac Tchad au XVè siècle. document interne 13p.

- 61 - SERVANT (M.) 1973 - Séquences continentales et variations climatiques. Evolution du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur in Trav. et Doc. ORSTOM, Paris, 368p.
- 62 - SERVANT (M.) 1974 - Les variations climatiques des régions intertropicales du continent africain depuis la fin du Pleistocène in SHF, 13è mes journées de l'Hydraulique, question I, rapport 8.
- 63 - SERVANT-VILDARY (S.) 1978 - Etude des diatomées et Paléolimnologie du bassin du Tchad au Cénozoïque supérieur in trav. et Doc. ORSTOM, n°84.
- 64 - SIRCOULON (J.) 1989 - Impact des changements climatiques sur les ressources en eau de surface en Afrique de l'ouest et centrale. L'expérience de l'ORSTOM in Séminaire International. Ouagadougou, UNESCO/IWRA/CIEH.
- 65 - SIRCOULON (J.) 1987 - Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le début du 20ème siècle in, Public AISH n°168, Vancouver, pp.13,25.
- 66 - STREET (F.A.), GROVE (A.T.) 1979 - Global maps of lake-level fluctuations since 30000 BP, in quaternary, Research 12, pp.83-118.
- 67 - - Sud Sahara - Nord Sahel (1989) Centre Culturel Français d'Abidjan, Editions SEPIA.
- 68 - - Tarikh es-Soudan 1900 - Traduction de O. Houdos, Tarikh el-Fettâch 1913 - Traduction de O. Houdos et M. Delafosse, Paris, Leroux. - Tedzkiret en Nisian Fi Akhbar Molouk es Soudan 1901, Paris, Leroux.
- 69 - TILHO (J.) 1910-1911 - Documents scientifiques de la mission Tilho 1906-1909. Imp. Nat. Paris, 2 vol., 2038 p. Photos, Graph.
- 70 - TILHO (J.) 1928 - Variations et disparition possible du lac Tchad. In Ann. Geogr. Fr. 37 : pp.238-260.

4 - EVOLUTION DES EAUX DE SURFACE

Bien qu'il ne soit pas dans le propos de ce présent rapport de traiter de la pluviométrie, il est néanmoins nécessaire de donner un court rappel des données disponibles en zone sahélienne, avant de traiter de l'écoulement.

4.1. Quelques éléments informatifs sur la pluviométrie

Comme pour les autres parties du monde, il est classique de constater que les observations pluviométriques précèdent toujours très largement les observations sur les cours d'eau. L'implantation des postes en zone sahélienne commence par la côte du Sénégal ; Saint-Louis est équipé dès 1851, Dakar-Gorée en 1855, d'autres postes suivront, SIRCOULON /98/ mais les mesures ne seront faites que de façon épisodique jusqu'à la fin du siècle sauf à Saint-Louis (présentant la plus longue série d'Afrique de l'Ouest cette station est souvent citée bien que peu représentative car soumise aux influences côtières). Avec la fin du siècle apparaît une nouvelle série d'implantations : Kayes et Tombouctou en 1896, Ouagadougou mission en 1902, Niamey ville et Zinder en 1905 etc...

Ces stations sont connues de tous les climatologues, car leurs résultats sont très souvent exploités.

Les étapes importantes des réseaux pluviométriques sahéliens seront :

- Les années 1921-22 qui voient la création d'un service météorologique fédéral pour l'Afrique occidentale et le lancement véritable des réseaux de base.
- Les années 1958-1960 qui voient la dissolution des services fédéraux et la création de l'ASECNA à Dakar.

En définitive, si la plupart des stations synoptiques ont maintenant une soixantaine d'années d'existence, il n'existe qu'une vingtaine de stations pour tout le Sahel pour apprécier la pluviométrie du début du siècle et en particulier la sécheresse des années "13", considérée jusqu'au début des années 1980 comme l'épisode le plus déficitaire du siècle.

Les nombreux travaux développés par NICHOLSON sur la plu-

.../...

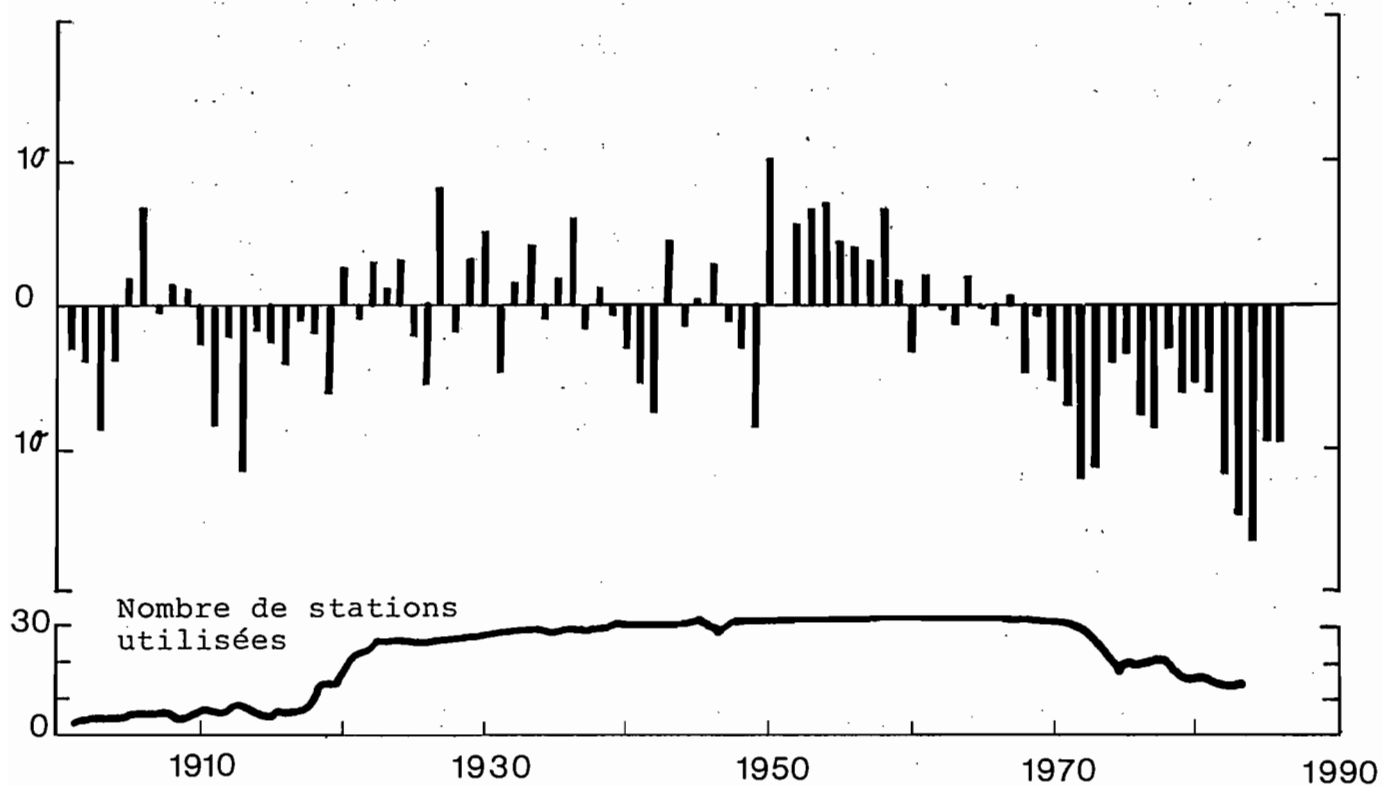


Fig. 9 - Ecartés pluviométriques annuels standardisés au Sahel pour la période 1906-86 (valeurs NICHOLSON complétées en 85 et 86).

viométrie du continent africain permettent d'apprécier commodément les variations pluviométriques (sous formes d'écart annuels ou de pourcentages) depuis le début du siècle en zone sahélienne (cf en particulier l'Atlas établi par cet auteur /86/en 1988). On relève ainsi au cours du 20ème siècle trois périodes sèches (les fameuses périodes "des années 13", des années "40" et depuis 1968/98,) et deux périodes humides entre 1925 et 1935 puis entre 1950 et 1965 environ. Il est malheureusement notoire que la période de sécheresse actuelle est la plus sèche des trois, consulter par exemple /83,86, 87,100/ et se reporter à la Fig.9 de Nicholson.

4.2. Cours d'eau tropicaux

Les quelques longues séries existantes d'observations de hauteurs d'eau et de débits d'Afrique de l'ouest présentent des fluctuations interannuelles bien marquées qui reflètent bien les variations climatiques que connaît cette vaste région.

Les stations hydrologiques citées dans ce rapport ^{/87,107,103/} sont très connues, car souvent utilisées, pour servir de base de référence :

- Sur le fleuve Sénégal, il s'agit de la station de Bakel (SB) qui contrôle l'ensemble des apports provenant à la basse vallée du fleuve (21800 km²). Installée dès 1901, ses relevés sont utilisables depuis 1903 mais ne sont complets en basses eaux que depuis 1951 /94/.
- Sur le fleuve Niger, il s'agit de la station de Koulikoro (NK) qui contrôle l'écoulement du Haut Niger (120000 km²) et est ouverte en 1907, sans aucune lacune jusqu'à présent. La station de Douna sur le fleuve Bani (BD) (101600 km²), ouverte en 1922, est plus récente et de moins bonne qualité mais très utile pour quantifier avec Koulikoro la totalité des apports fluviaux parvenant à la cuvette lacustre /75/.
- Sur le bassin du Logone Chari, la station de Ndjamena (NJ) contrôle 600000 km². Elle est installée en 1903, mais seules les crues de 1906 et 1908 seront suivies, par la suite les observations capitales pour la connaissance de l'alimentation

.../...

du lac Tchad (assurée à 80% par le fleuve) ne reprendront malheureusement qu'en 1932/72/.

- Ainsi seules les deux stations de Bakel et de Koulikoro permettent d'apprécier les effets des sécheresses des périodes "13" et "40" et l'actuelle.

- La figure 10 montre ainsi, sur un même graphique, les variations d'hydraulicité annuelle H_i (avec $H_i = (\bar{x}_i - \bar{x})/\bar{y}$).

- Les fig. 11 et 12 indiquent les variations des apports annuels x_i exprimés en écart type réduit ξ_i (avec $\xi_i = (\text{module } x_i - \text{moyenne } \bar{x}) / \text{écart type } S$).

- L'examen de ces figures montrent bien 5 périodes à l'écoulement alternativement rare et abondant ; toutefois quoique ces deux bassins fluviaux soient alimentés par un même "château d'eau" qui est le Fouta Djallon les hydraulicités de certaines années peuvent être très différentes (c'est le cas, par exemple, des années 1920, 26, 53...).

En utilisant une procédure de segmentation /83/ on trouve plusieurs ruptures de stationnarité et l'on peut établir approximativement les périodes suivantes :

- a) jusqu'en 1921 inclus : période sèche culminant en 1913 ; certains records pluviométriques minimaux n'ont jamais été battus (Ouagadougou, Zinder) et les records déficitaires de crues maximales pour le Sénégal et le Niger de 1913 n'ont été dépassés qu'en 1984 seulement /101/.
- b) 1922 à 1936 inclus : Période humide, les plus forts débits moyens annuels sont relevés à SB en 1924 (1250 m³/s) et en 1925 à NK avec 2300 m³/s de même que les plus fortes crues maximales des chroniques (9070 m³/s en 1922 à SB et 9670 m³/s en 1925 à NK) / 101 /.
- c) 1937 à 1950 inclus : période sèche, la moins rigoureuse des trois /98/.
- d) 1951 à 1969 inclus : période humide, plus accentuée sur le bassin du Sénégal où elle dépasse en intensité celle de 1922-1936.
- e) 1970 à maintenant : période sèche, la plus intense des trois / 71,99,100,102/.

.../...

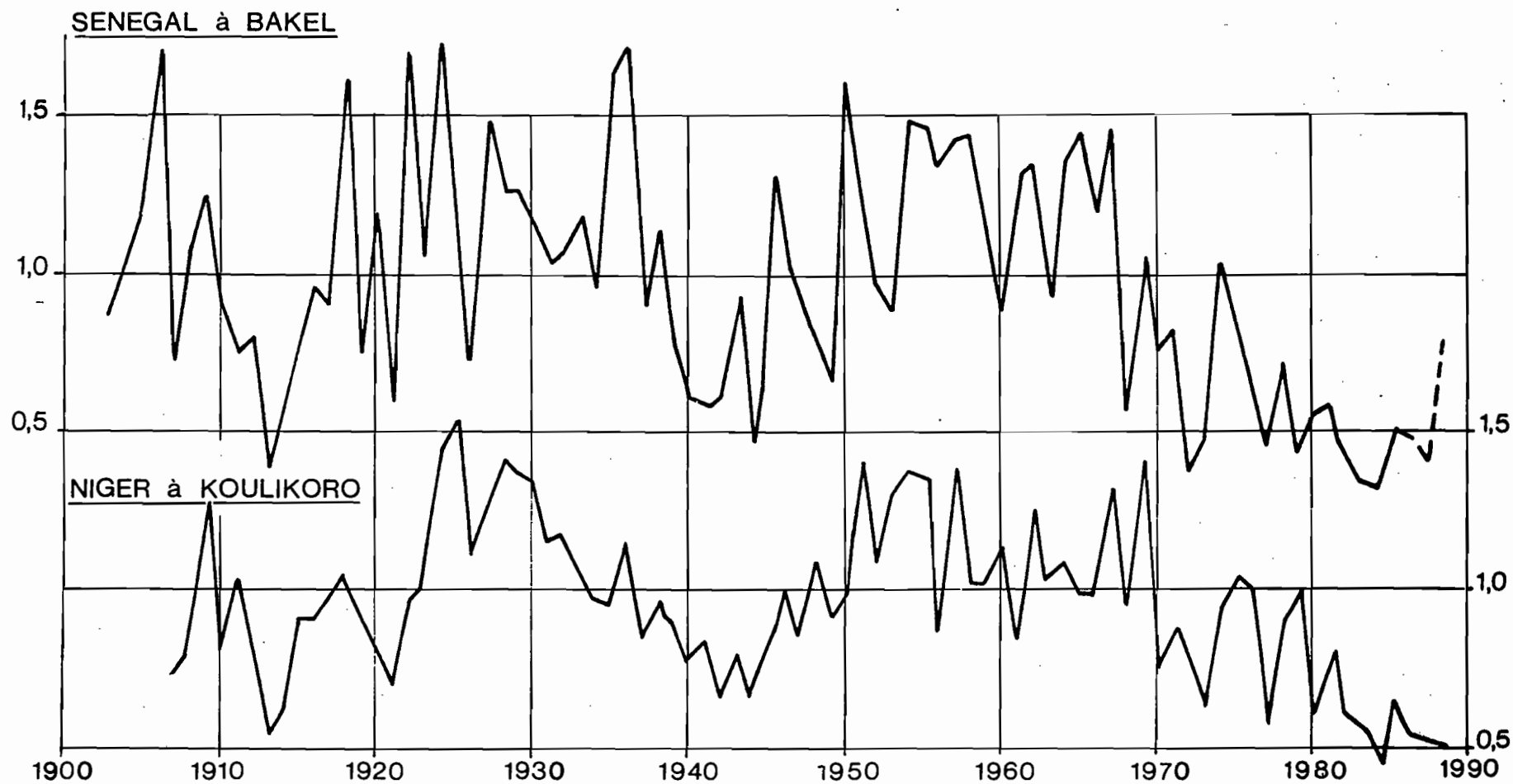


Fig. 10 - Variations de l'hydraulicité annuelle H_i ($H_i = (\alpha_i - \bar{\alpha}) / \bar{\alpha}$)

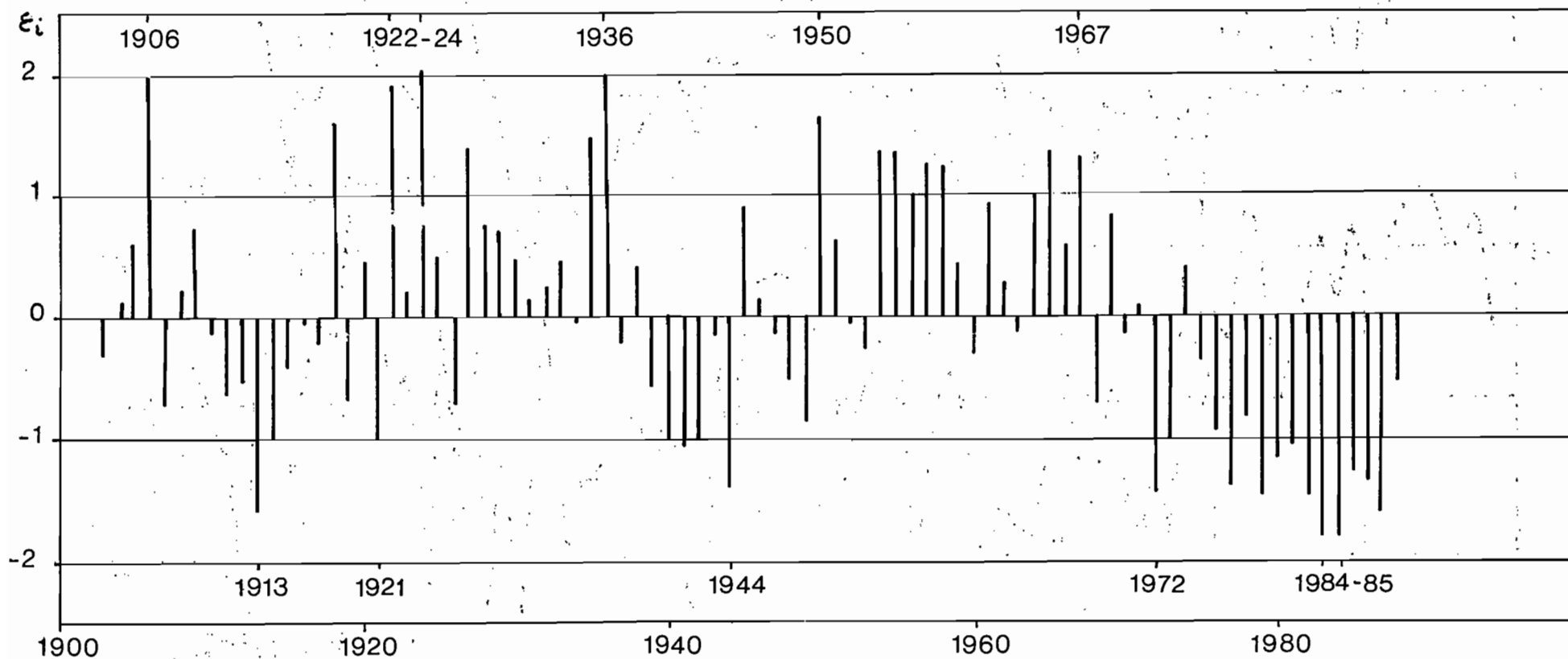


Fig. 11 - Le SENEGAL à BAKEL - Variation des apports annuels x_i (1903 à 1988) exprimée en écart type réduit ϵ_i ($\epsilon_i = (x_i - \bar{x})/s$ avec $\bar{x} = 705$ et $S = 270$)

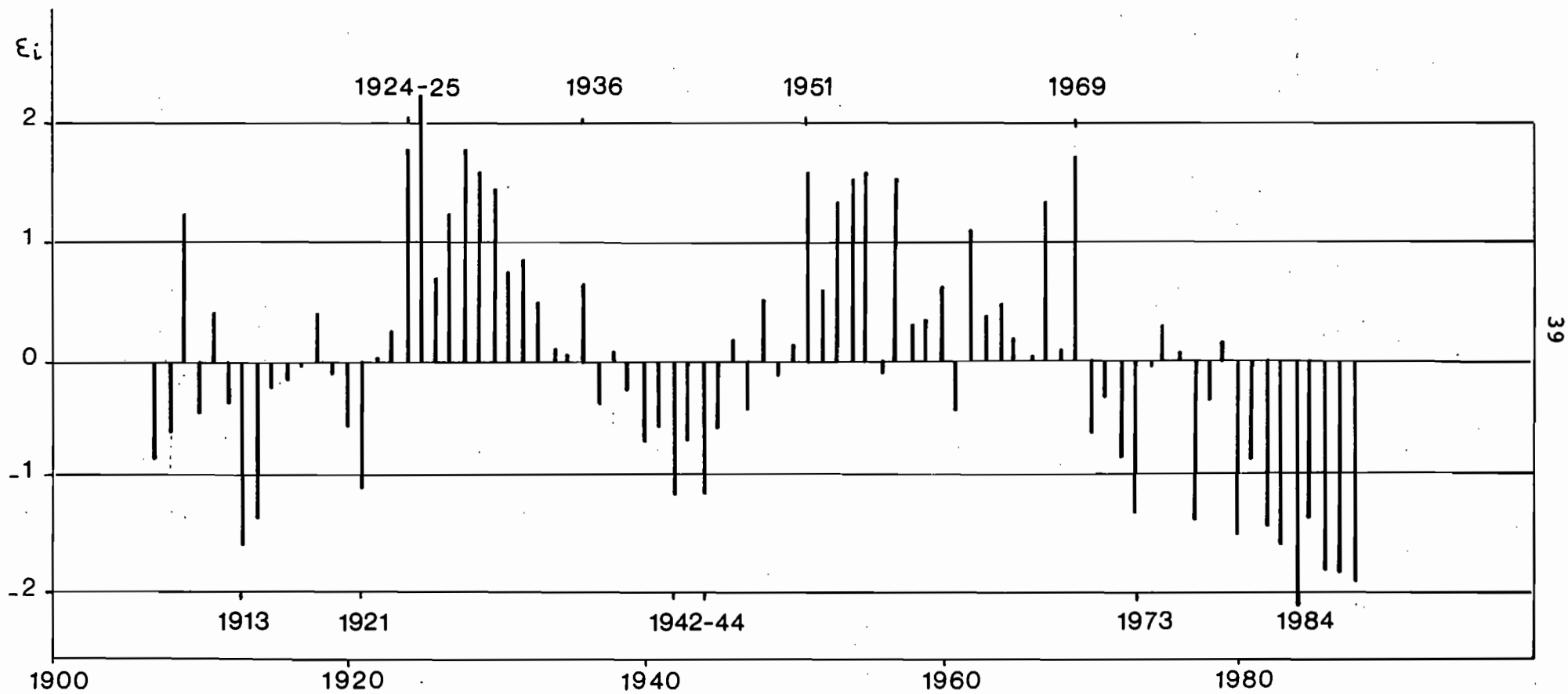


Fig. 12 - Le NIGER à KOULIKORO - Variation des apports annuels (1907 à 1988) exprimée en écart type réduit ϵ_i ($\epsilon_i = (x_i - \bar{x})/S$ avec $\bar{x} = 1430$ et $S = 387$).

Depuis 1970 les déficits annuels sont pratiquement systématiques et l'on observe deux paroxysmes de sécheresse/59/ l'un en 1972 et 73 (Fig.13) l'autre en 1983 et 84 (Fig.14). L'année 1984 est l'année des records absolus de déficit.

4.2.1. Variation de l'écoulement annuel

Les tableaux ci-dessous résument quelques caractéristiques hydrologiques de ces cours d'eau :

Tableau 4.2.1 a) - Modules annuels (1988 inclus)

Station	Moy (\bar{x})	Maxi.	Mini.	Ecart Type (S)	CV=S/x	Moy./mini.
SB	705	1250	215	270	0,38	3,3
NK	1430	2300	636	387	0,27	2,2
BD	485	906	70	267	0,55	6,9
CD	1084	1675	213	360	0,33	5,1

Tableau 4.2.1 b) - Modules moyens extrêmes en m³/s sur 5 années consécutives pour les différentes périodes (a à e)

Station	Période Humide		Période sèche	
SB	1027	54-58	281	83-87
	941	32-36	455	40-44
	917	24-28	486	10-14
NK	2024	24-64	753	84-88
	1942	51-55	1120	40-44
			1150	11-15
CD	1500	60-64	408	83-87
	1450	52-56		

Tableau 4.2.1 c) - Evolution des modules interannuels (en m³/s)

Station	Début à 69 (1)	N	Début à 88 (2)	N	(2)-(1) %	1970-88 (3)	(3)-(1) %
SB	781	67	705	86	-10	411	-47
NK	1543	63	1430	82	-7	1057	-32
BD	686	25	485	44	-29	221	-68
CD	1269	38	1084	57	-15	713	-44

.../...

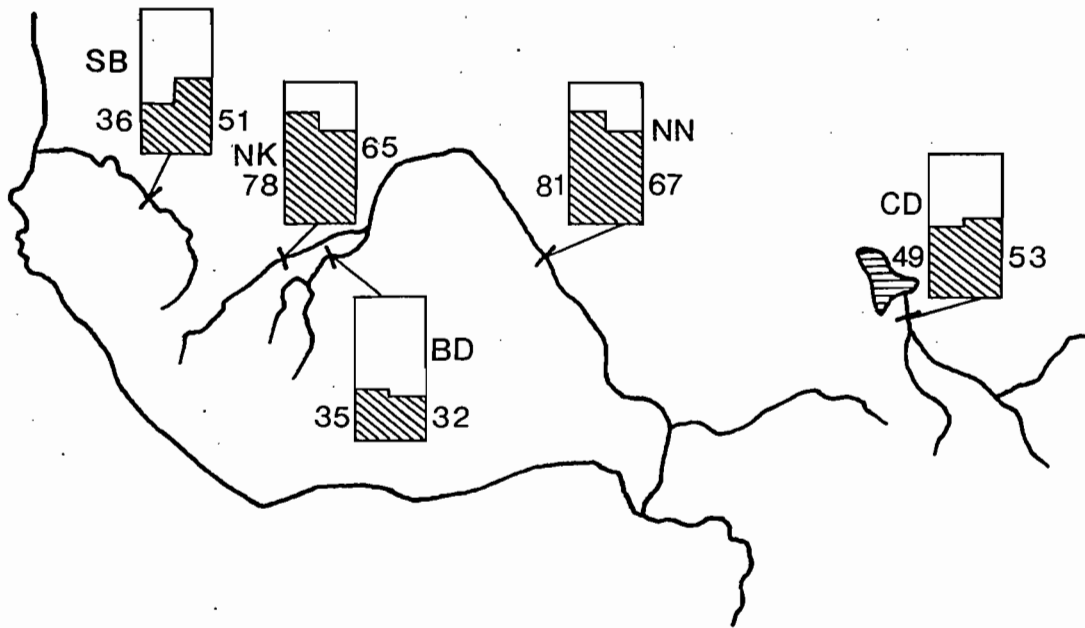


Fig. 13 - Pourcentage d'écoulement en 1972 et 1973 par rapport à la moyenne interannuelle (SB = Sénégal à Bakel, NK = Niger à Koulikoro, BD = Bani à Douna, NN = Niger à Niamey et CD = Chari à Ndjamena)

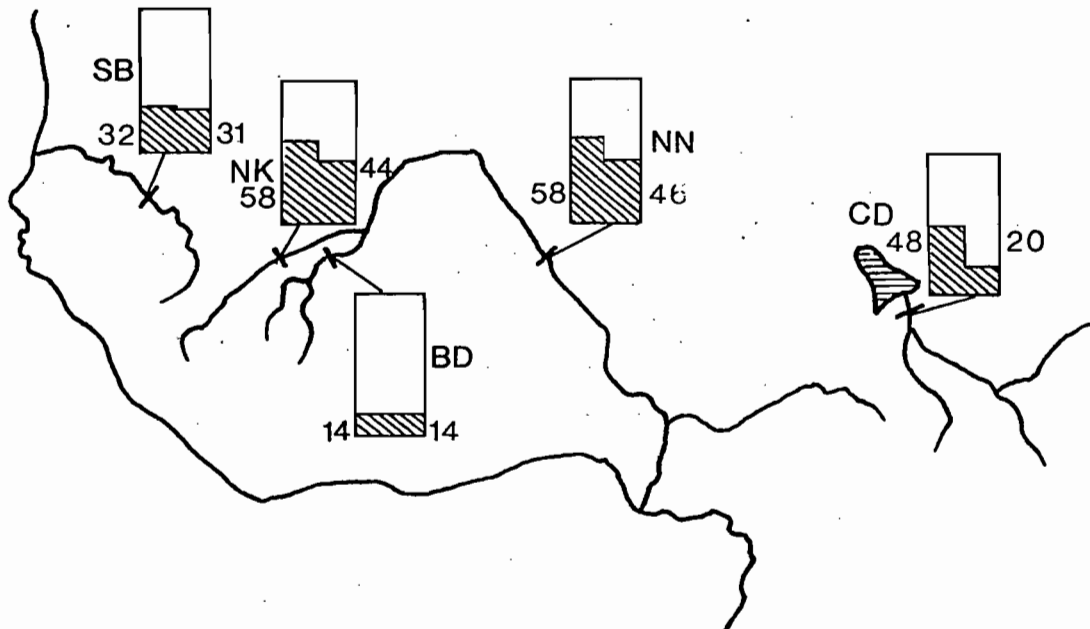


Fig. 14 - Pourcentage d'écoulement en 1983 et 1984 par rapport à la moyenne interannuelle (SB = Sénégal à Bakel, NK = Niger à Koulikoro, BD = Bani à Douna, NN = Niger à Niamey et CD = Chari à Ndjamena)

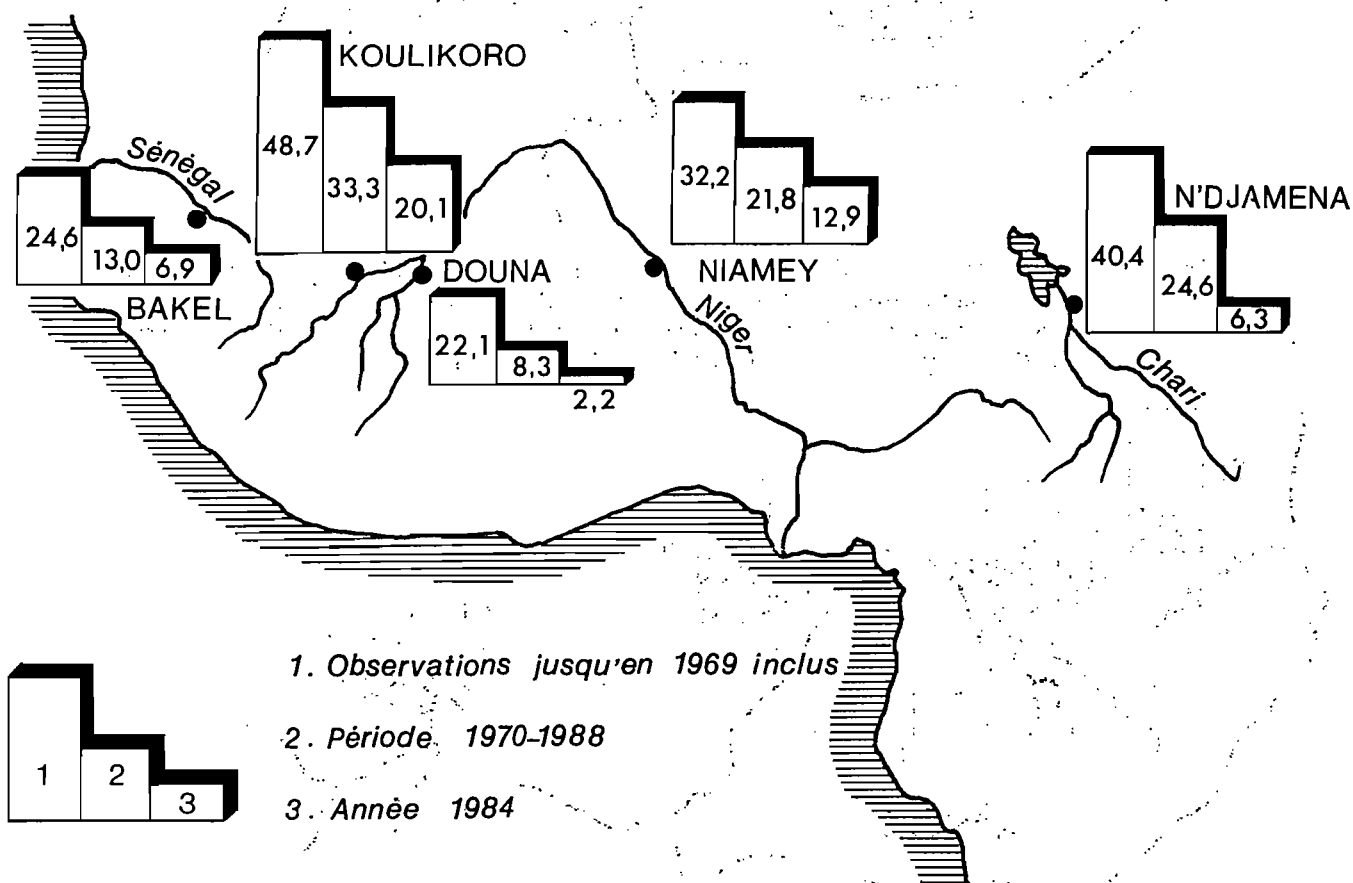


Fig. 15 - Variations des écoulements annuels en 10^9 m^3

La figure 15 qui reprend sous une autre forme les éléments chiffrés du tableau 4.2.1 c) illustre la diminution spectaculaire des apports annuels de l'ensemble des fleuves tropicaux parvenant à la zone sahélienne (somme des débits SB+NK+BD+CD).

On retiendra trois valeurs :

- La moyenne interannuelle à fin 1969 inclus est de 136 milliards de m³,
- la moyenne de la période 1970-88 est de 79 milliards de m³ (déficit de 43%),
- les apports de 1984 sont de seulement 35,5 milliards de m³ soit un déficit de 74%.

A la sortie de la cuvette lacustre les apports NK+BD sont réduits de 40 à 45% par évaporation et remplissage des lacs, ce qui explique que les débits à Niamey (NN) soient sensiblement réduits.

4.2.2. Hydrogrammes annuels et crues maximales

La figure 16 montre la déformation de l'hydrogramme annuel lorsqu'on passe, disons d'un hydrogramme en année médiane, à celui d'une des années les plus faibles observées. En général, la pointe unique de l'année humide est remplacée par plusieurs maximums peu marqués. dans le cas du Bani à Douna la diminution est tout à fait exceptionnelle. D'autres exemples seront fournis au chapitre suivant.

La figure 17 présente le cas particulier de la station du Niger à Niamey (NN). En année moyenne (1963-64) le maximum de la crue se produit en février (déformation de l'onde de crue avec amortissement dans la cuvette lacustre) avec une "bosse" en septembre-octobre due aux affluents rive droite en amont de Niamey.

En année sèche le maximum "amont" est dès novembre ou décembre mais la part de l'écoulement due aux affluents (Gorouol, Sirba etc...) peut donner une forme tout à fait inhabituelle (cas des crues exceptionnelles sur les cours sahéliens en août 1988 et dans une moindre mesure en 1984-85, année du minimum).

.../...

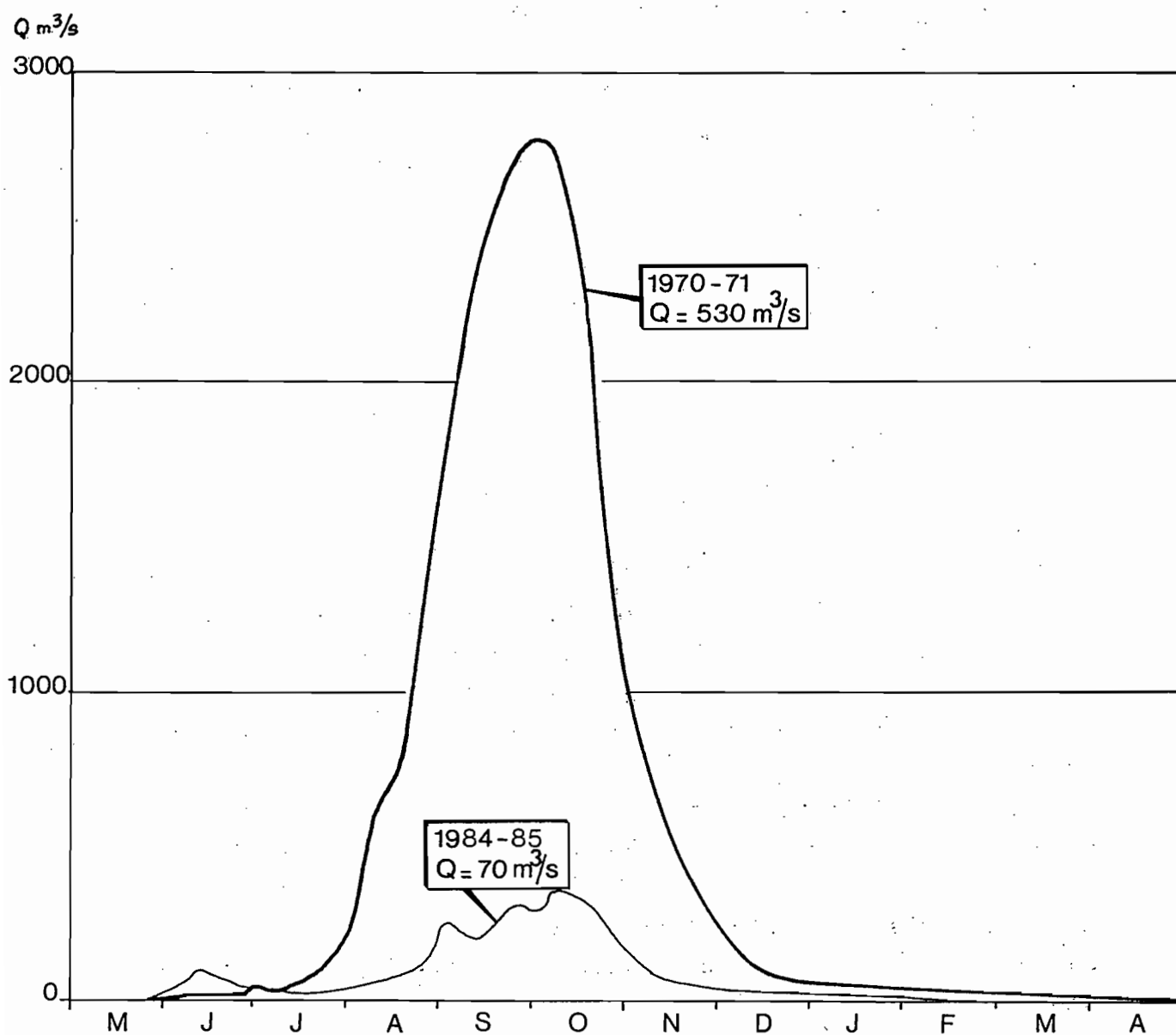


Fig. 16 - Hydrogrammes annuels du BANI à DOUNA (année proche de la médiane et année minimum).

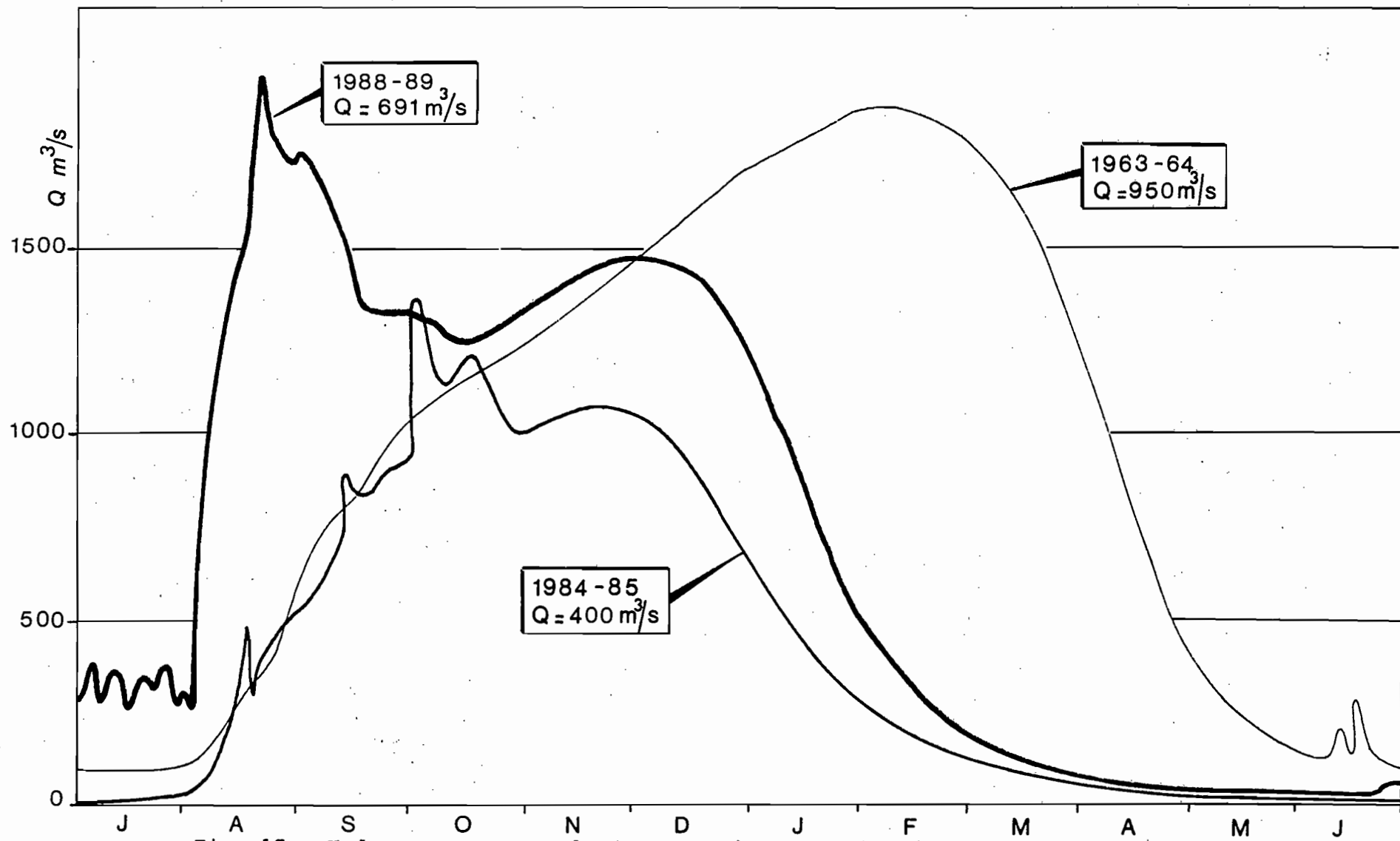


Fig. 17 - Hydrogrammes annuels du NIGER à NIAMEY (année proche de la médiane-1963-64, année minimum - 1984-85 et année particulière 1988-89).

Tableau 4.2.2 - Quelques valeurs (m^3/s) de crues maximales
(1988 inclus, sauf SB (86))

Station	Maxi.	Médian	Moyenne	Ecart-Type	Mini. et An.	Moy/Mini.
SB	9070	4250	4420	1820	917(84)	4,8
NK	9670	5880	5870	1420	(2700)-(84)	2,2
BD	3580	2600	2210	985	370-(83)	6,0
CD	5160	3500	3250	965	785-(84)	4,1

4.2.3. Basses eaux

Le soutien de plus en plus amoindri des nappes souterraines en période de tarissement /89/ provoque des basses eaux prolongées et très précoces pouvant conduire à l'arrêt de l'écoulement pendant quelques jours sur des fleuves où ce phénomène était jusque là inconnu. Ceci s'est produit à Bakel sur le Sénégal à la mi-74 puis à nouveau en 1984 et 1985. La mise en activité récente du barrage de Manantali a stoppé ce phénomène.

Sur le fleuve Niger les étiages à Koulikoro ne sont plus significatifs depuis 1981 (fonctionnement du barrage de Selingue). Toutefois, malgré les lachûres de saison sèche de l'ordre de $100 m^3/s$, le Niger s'est arrêté quelques jours de couler en juin 1985 à Niamey /73/. Une étude statistique des étiages faite au début des années 70 indiquait alors une période de retour de 500 ans pour un tel évènement. De même, l'étiage absolu décennal était alors évalué à $15m^3/s$, or depuis 1972, quinze années ont connu des étiages plus faibles /92/.

Sur le Bani à Douna dont l'écoulement était réputé perenne, les étiages sont maintenant nuls plusieurs semaines chaque année.

Quant au fleuve Chari dont l'étiage absolu médian était de $125m^3/s$ sur la période 1938-1967, le débit est tombé à seulement $7m^3/s$ en avril 85 /91,100/.

4.3. Les cours d'eau sahéliens

L'absence d'observations chiffrées sur les cours d'eau sahéliens avant 1954-55 (pour les premières stations) ne permet pas de connaître le comportement des écoulements durant les sécheresses de périodes "13" et "40" /95,98/.

Même pour la courte période instrumentale dont on dispose, le faible nombre de stations, la qualité médiocre des mesures, la forte variabilité spatiale d'un écoulement intermittent rendent impossible un bilan d'ensemble. Par ailleurs la multiplication des petits aménagements dûs à la croissance démographique font que les écoulements mesurés ne sont plus parfois vraiment "naturels" ; il faut donc être prudent dans l'interprétation des séries de relevés /76/.

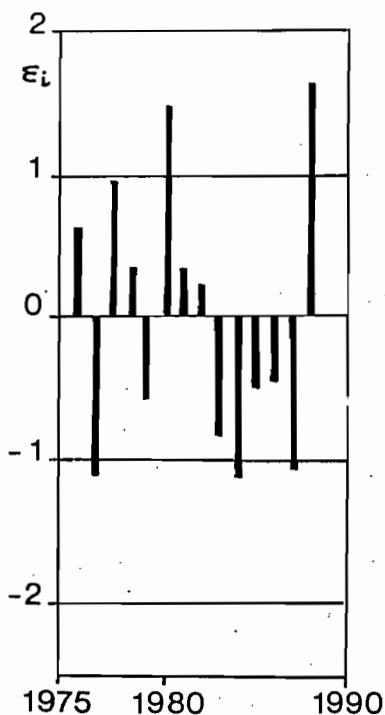
Néanmoins il semble que les années les plus sévères soient 1968 (année à pluies normales en zone tropicale et très déficitaires au Sahel), 1972 (au Tchad notamment), puis 1983 et 84.

Evidemment, la forte irrégularité spatio-temporelle des pluies fait que l'on peut observer une même année, et pour des bassins sahéliens à peu de distance les uns des autres, des écoulements très diversifiés (c'est le cas du lac de Bam au Burkina en 1974 qui déverse sous l'effet d'une très forte crue)

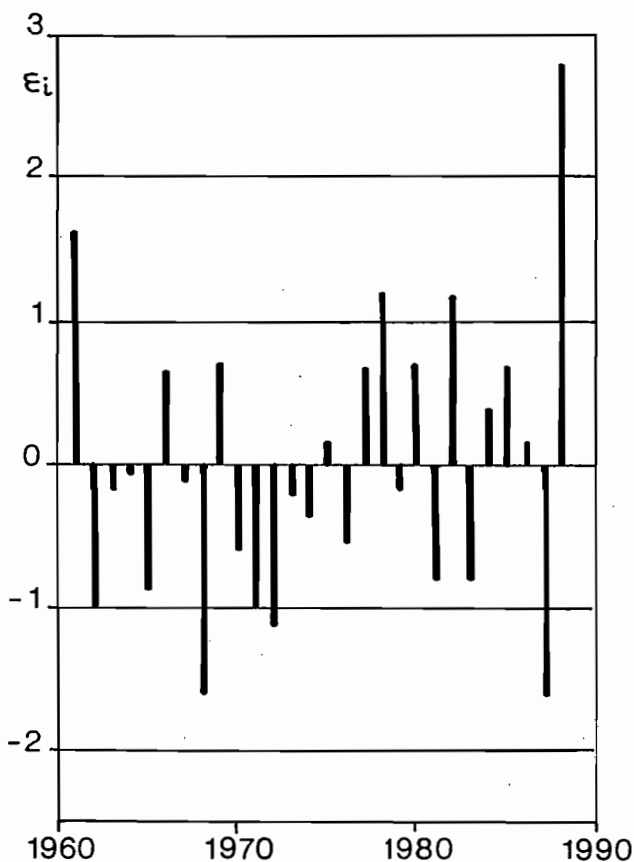
La Figure 18 montre les variations des apports annuels sous forme d'écart-type réduit pour des situations pluviométriques différentes ; on peut remarquer la situation contrastée d'une année à l'autre et la distinction entre période humide et période sèche est beaucoup moins évidente que dans le cas des cours d'eau tropicaux. De plus, l'année 1988 apparaît ici comme tout à fait exceptionnelle, avec des crues très violentes (appareils détruits) ayant affecté de nombreux pays sahéliens. Il faudrait toutefois se garder d'un trop grand optimisme quant à la fin de la longue période de sécheresse actuelle, ce phénomène restant bien typique de l'irrégularité inter-annuelle des zones arides.

En terme de variation de l'écoulement annuel si l'on veut établir une comparaison telle que celle donnée par le tableau 4.2.1c précédent, seule la série d'observations du Gorouol à

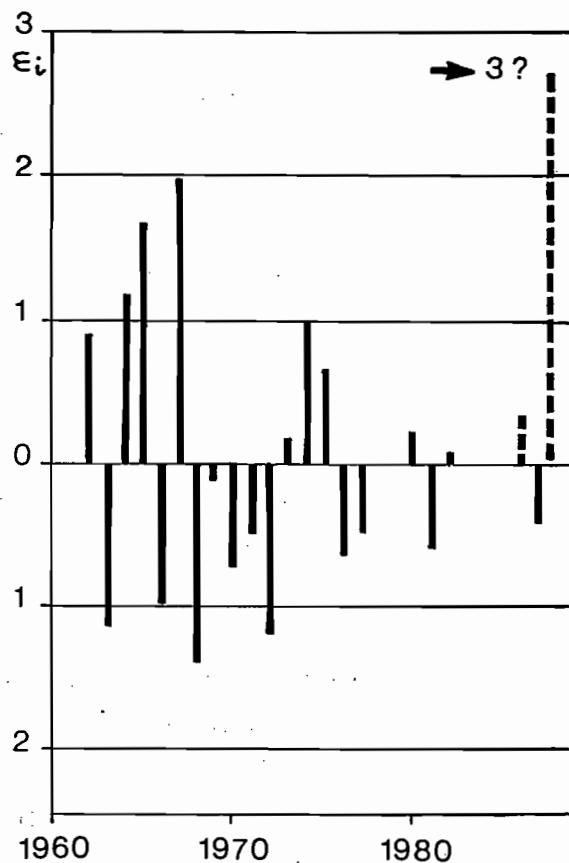
.../...



Le TELOUA à AZEL
 (AIR-NIGER) - 1360 km²
 1975 à 1988
 P = 100mm/an
 = 0,62 m³/s
 S = 0,50
 CV = 0,81



Le GOROUOL à DOLBEL - Niger - 7500km².
 (1961 à 1988) P = 500mm/an
 = 8,90m³/s
 S = 2,66
 CV = 0,30



Le SIRBA à GARBE-KOUROU
 Niger - 38750km² (1962 à 1982)
 P = 650mm
 = 20,5m³/s
 S = 12,2
 CV = 0,60

Fig. 18 - Variation des apports annuels exprimée en écart type réduit ϵ_i avec $\epsilon_i = (\alpha_i - \bar{\alpha}) / S$.

Dolbel (7500 km²) qui couvre la période 1961 à 1988 est utilisable /102/.

Tableau 4.3a

Station	Début à 69 (1)	N	Début à 88 (2)	N	(2)-(1) %	1970-88 (3)	(3)-(1) %
GD	8.43	9	8.90	28	+6	9.02	+7

Il est étonnant de constater, à la lecture de ces chiffres, que la période récente ne montre pas d'affaiblissement du module mais au contraire une légère augmentation. Afin de contrôler ce comportement sur d'autres bassins sahéliens, Pouyaud /90/en 1987 a procédé au calcul des bilans hydriques d'un certain nombre d'entre eux en séparant les périodes avant et après 1969.

Tableau 4.3.b

Bassin	Station	Période	Superficie km ²	P. Moy. mm	Pms/PmH %	Res/ReH %	Ke s/KeH %
GOROUOL	Dolbel	1961-78	7500	483	73	92	127
GOROUOL	Alcongui	1961-77	44850	486	70	71	102
DARGOL	Tera	1961-78	2750	495	71	83	119
DARGOL	Kakassi	1963-78	6940	484	83	112	130
Lac	Bam	1966-76	2600	576	101	316	287
SIRBA	Garbé- Kourou	1962-77	38750	658	83	76	91
VOLTA NOIRE	Dapola	1951-83	94000	898	83	59	71
VOLTA BLANCHE	Yakala	1956-83	32000	733	88	70	79

Il a ainsi comparé le pluviométrie sur les bassins avant 1969 (PmH) puis après (Pms), de même que les lames d'eau écoulées (ReH, Res) et les coefficients d'écoulement (KeH, Kes).

Le rapport Pms/PmH montre que la période de sécheresse est relativement plus sévère au nord de la zone sahélienne qu'au sud à pluviométrie plus abondante.

Le rapport Res/ReH est nettement inférieur à 100% pour les grands bassins alors qu'il se rapproche de cette valeur ou même la dépasse pour les bassins tels que la Gorouol à Dolbel ou le Dargol à Tera (la prise en compte des années les plus récentes montre que ce phénomène s'amplifie - cf tableau 4.3a et chapitre suivant).

.../...

L'interprétation des variations des coefficients d'écoulement est encore plus évidente puisque le rapport K_{es}/K_{em} n'est inférieur à 100% que pour les seuls très grands bassins. Il est ainsi souligné que la sécheresse actuelle a réduit les écoulements et les coefficients d'écoulement des bassins de superficie supérieure à 10 ou 20000 km² et agit de façon inverse pour les bassins de superficie inférieure.

4.4. Lacs (exemple du lac Tchad)

Le lac Tchad représente un excellent témoin des variations climatiques. Les variations de son niveau, qui connaît un minimum en juillet et un maximum en décembre-janvier résultent de l'équilibre entre les apports et les pertes par évaporation et infiltration /106,107/.

A la côte 281,5 m (Moyen Tchad) OLIVRY/88/ aboutit à un bilan hydrologique où les 46 milliards de m³ évaporés ou infiltrés (évaporation sur le lac de l'ordre de 2200 mm/an) sont équilibrés en année moyenne par 40 milliards de m³ d'apports superficiels et 6 milliards de m³ dus aux pluies.

La Fig. 19 donne les variations interannuelles de 1900 à 1978 observées ou reconstituées à la station de Bol. Malgré le peu de régularité des observations depuis le début du siècle (cf 3.3.4.2.) les niveaux manquants du lac ont pu être reconstitués assez correctement grâce à une corrélation significative /72,74/ entre les apports du Nil à Assouan et les débits maximums du Chari à Ndjamena à partir desquels on peut prévoir les variations annuelles de niveau. Diverses publications permettent depuis 72-73 de connaître régulièrement l'évolution du lac /77 à 80,85,91/ mais depuis 1980 ces variations sont principalement connues par suivi satellitaire /81,84,93, 96/.

Ces variations sont les suivantes depuis le début du siècle :

- De 1900 à 1950 - Après les hauts niveaux de la fin du siècle dernier /82/ (entre 283 et 284 m), le niveau du lac redescend pour osciller entre 281 et 282 m avec un minimum proche de 280 m en 1908 et 1914 /104,105/. Au cours de cette période, toute la partie nord du lac a été asséchée au début 1908, en juillet 1914 il est coupé en deux parties /97/. Cette dernière situation se serait à nouveau produi-

.../...

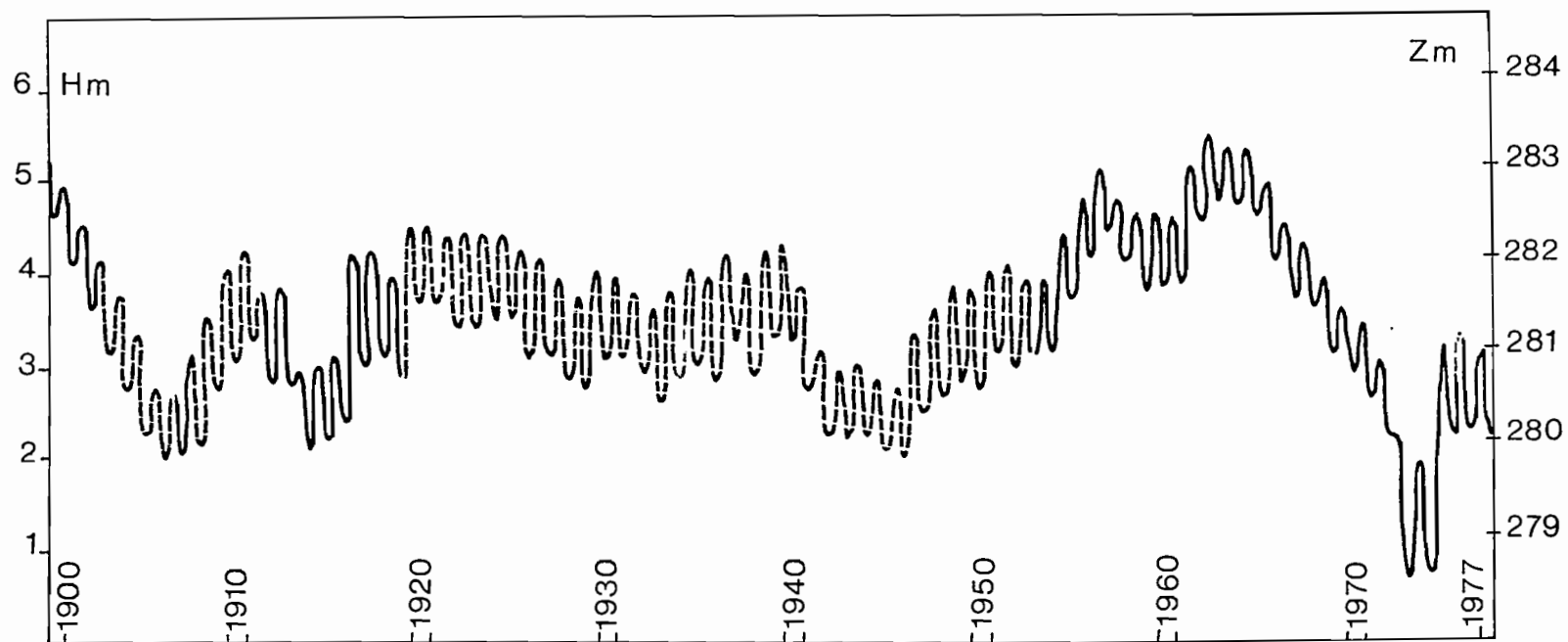


Fig. 19 - Variations interannuelles du niveau du lac Tchad de 1900 à 1978
 (station de Bol, à partir de 1973 les hauteurs ne sont plus représentatives
 de l'ensemble du lac)

te en 1940 mais on ne dispose pas d'observations.

- De 1953 à 1964 - Les niveaux du lac remontent vers 283 m en 56-57 (les apports du Chari dépassant 150 milliards de m³ en trois ans consécutifs) puis dépassent 283 m en janvier 63, niveau record du 20ème siècle, grâce aux années 61 et 62 très abondantes (totalisant 105 milliards de m³ en 2 ans). La surface du lac est alors évaluée à 23500 km² et le volume d'eau stocké à 105 milliards de m³.
- A partir de 1965 - Baisse progressive du lac, les apports de l'ensemble du Logone-Chari étant systématiquement déficitaires chaque année/101/ ces déficits sont de l'ordre de 40% pour la période 1968 à 1988 et atteignent 83% pour la seule année 1984.

En avril-mai 1973 la faiblesse de remplissage aboutit à la coupure de celui-ci en deux cuvettes avec exondation de la Grande Barrière.

Fin 1975 la cuvette nord s'assèche complètement et ce phénomène se renouvellera chaque année en saison sèche. Pis encore en 1985, 87 et 88 la cuvette nord ne sera même plus réalimentée au maximum de l'inondation annuelle. Ces dernières années, vers mai-juin, il ne subsiste plus que les eaux libres de la cuvette sud à l'embouchure du Chari, sur une surface de l'ordre de 1700 km²/85/. Voir aussi les Fig. 28 et 30.

- REFERENCES DU 4ème CHAPITRE

- 71 - BERAN (M.A.), RODIER (J.A.) 1985 - Hydrological aspects of drought. UNESCO/WMO, Studies and reports in Hydrology, n°39.
- 72 - BILLON (B.) et al. (1968-69) Monographie Hydrologique du Chari. In Coll. Monogr. ORSTOM, n°2, 610p. Paris.
- 73 - BILLON (B.) 1985 - Le Niger à Niamey - Décru et étiage 1985. in Cah. ORSTOM, Ser. Hydrol. Vol.XXI, n°4, 1984-85.
- 74 - BOUCHARDEAU (A.), LEFEVRE (R.) 1957 - Monographie du lac Tchad, ORSTOM, Paris, 112p., 24 pl.
- 75 - BRUNET-MORET (Y.) et al. 1986 - Monographie hydrologique du fleuve Niger. in Coll. Monogr. ORSTOM, n°8, 902 p. Paris.
- 76 - CHEVALLIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.), BERNARD (A.) 1985 - Pluies et crues au Sahel - Hydrologie de la mare d'Oursi (1976-81). ORSTOM, Col. Trav. et Doc. n°190, Paris, 251 p.
- 77 - CHOURET (A.), LEMOALLE (J.) 1974 - Evolution hydrologique du lac Tchad durant la sécheresse 1972-74. ORSTOM, Centre de Ndjamena, 12 p.
- 78 - CHOURET (A.), FRANC (J.), LEMOALLE (J.) 1974 - Evolution hydrologique du lac Tchad de juillet à décembre 1973. ORSTOM, Centre de Ndjamena, 9 p.
- 79 - CHOURET (A.), LEMOALLE (J.) 1975 - Evolution hydrologique du lac Tchad (juillet 1974-octobre 1975). ORSTOM, Centre de ndjamena, 11 p.
- 80 CHOURET (A.) 1977 - La persistance des effets de la sécheresse sur le lac Tchad. ORSTOM, Centre de Ndjamena, 10 p.
- 81 - CITEAU (J.), DEMARCQ (H.), MAHE (G.) et FRANC (J.) 1988 - Une nouvelle station est née. Veille climatique satellitaire (ORSTOM ed.) 25 : 23-30.
- 82 - FREYDENBERG (H.) 1907 - Exploration dans le bassin du Tchad. in La Géographie, pp.161-170.

- 83 - HUBERT (P.), CARBONNEL (J.P.), CHAUCHE (A.) 1989 -
Segmentation des séries hydrométéorologiques -
Application à des séries de précipitations
et de débits de l'Afrique de l'Ouest. in Jour-
nal of Hydrology, 110, pp. 349-367.
- 84 - LEMOALLE (J.), TROUBAT (J.J.) 1989 - Application des don-
nées satellitaires à l'hydrologie du lac
Tchad : année 1988-89. Rapports ORSTOM, Mont-
pellier 89-02, XX p., multigr.
- 85 - LEMOALLE (J.) 1989 - Le fonctionnement hydrologique du lac
Tchad au cours d'une période de sécheresse
(1973-1989) in Rapport ORSTOM, Montpellier, 89-
03, 27p., multigr.
- 86 - NICHOLSON (S.E.) et al. 1988 - Atlas of african rainfall
and its interannual variability. Depart. of
météorology, the Florida State University,
237 p.
- 87 - OLIVRY (J.C.) 1983 - Le point en 1982 sur la sécheresse
en Sénégambie et aux Iles du Cap-Vert-Examen
de quelques séries de longue durée (débits et
précipitations). in Cah. ORSTOM, Ser. Hydrol.
Vol.XX, n°1, pp.47-69.
- 88 - OLIVRY (J.C.) 1986 - Fleuves et rivières du Cameroun -
in Coll. Monogr. Hydrol. ORSTOM, n°9, 593 p.
244 fig. Paris.
- 89 - OLIVRY (J.C.) 1987 - Les conséquences durables de la sé-
cheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve
Sénégal et l'hypersalinisation de la Basse-
Casamance in Colloque AISH, n°168, Vancouver,
pp. 501-512.
- 90 - POUYAUD (B.) 1987 - Variabilité spatiale et temporelle des
bilans hydriques de quelques bassins versants
d'Afrique de l'Ouest en liaison avec les chan-
gements climatiques. in Colloque AISH, n°168,
Vancouver, pp. 447-461.
- 91 - POUYAUD (B.), COLOMBANI (J.) 1989 - Les variations extrê-
mes du lac Tchad. L'assèchement est-il possi-
ble ? in Annales de géographie, n°545, 98è an.
p. 1-23.

.../...

- 92 - PUECH (C.) 1983 - Persistance de la sécheresse au Sahel - Conséquences sur les normes hydrologiques et pluviométriques. CIEH, ser. Hydrol. 24, p. 12 fig.
- 93 - RIGAL (D.) 1989 - Crue et décrue du lac Tchad. in Veille climatique satellitaire Bull. n°28, pp.71-76, juillet.
- 94 - ROCHETTE (C.) 1974 - Le bassin du fleuve Sénégal. in Monographies hydrologiques ORSTOM, n°1, Paris, 323 p.+annexes.
- 95 - RODIER (J.) 1964 - Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo. in Mémoire ORSTOM, n°6, 138p. Paris.
- 96 - SCHNEIDER (S.R.), Mc GINNIS (D.F.), STEPHENS (G.) 1985 - Monitoring Africa's Lake Chad basin with LANDSAT and NOAA satellite data. in Int.J. Remote Sensing, vol.6, n°1, 59-73.
- 97 - SCHNEIDER (J.L.) 1989 - Géologie et hydrogéologie de la Répu. du Tchad. Thèse présentée à l'Univ. d'Avignon, le 28/4/89.
- 98 - SIRCOULON (J.) 1976 - Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique Intertropicale - Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". In Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. Vol. XIII, n°2, pp.75-174.
- 99 - SIRCOULON (J.) 1986a - La sécheresse en Afrique de l'Ouest. Comparaison des années 1982-84 avec les années 1972-73. In Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol. Vol. XXI, n°4, 1984-85, pp.75-86.
- 100 - SIRCOULON (J.), OLIVRY (J.C.) 1986b - Caractéristiques de la sécheresse actuelle en Afrique de l'Ouest et Centrale. Coll. CIEH sur les normes hydrologiques. Ouagadougou, mai 86.
- 101 - SIRCOULON (J.) 1987 - Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du 20è siècle. In Proceedings of the Vancouver Symposium, IAHS Publ.n°168, pp. 13-25.

.../...

- 102 - SIRCOULON (J.) 1990 - Aspects hydrologiques des fluctuations climatiques en Afrique de l'Ouest et Centrale. In Third WMO Symposium on Meteorological aspects of tropical droughts. Report n°36, WMO/TD n°353, pp.205-212.
- 103 - SUTCLIFFE (J.V.), KNOTT (D.G.) 1987 - Historical variations in African water resources. In Proceedings of the Vancouver Symposium, IAHS, Publ. n°168, pp.463-475.
- 104 - TILHO (J.) 1910 - Documents scientifiques de la mission Tilho (1906-1909). Imprimerie Nationale, Paris, Tome I : 412p. Tome II : 598 p.
- 105 - TILHO (J.) 1928 - Variations et disparition possible du lac Tchad. Ann. Géogr. Fr. 37 : 238-260.
- 106 - TOUCHEBEUF de LUSSIGNY (P.) 1969 - Monographie hydrologique du lac Tchad. ORSTOM, Paris, 169 p.
- 107 - VUILLAUME (G.) 1981 - Bilan hydrologique mensuel et modélisation sommaire du régime hydrologique du lac Tchad in Cah. ORSTOM. Ser. Hydrol. Vol. XVIII, n°1, pp.23-72. Paris.

5 - EVOLUTION DES EAUX DE SURFACE (Présent et proche futur)

5.1. Remarques générales

Comme déjà souligné dans l'introduction, les modèles utilisés pour simuler l'effet d'un doublement du taux en gaz carbonique sur la température et le cycle de l'eau donnent des résultats assez mitigés en ce qui concerne la zone sahélienne. Les divers modèles de circulation générale (GCM) donnent des résultats comparables en ce qui concerne l'élévation de la température /112,127,134/ de l'ordre de 1 à 2°C, mais les conséquences sur les précipitations et a fortiori sur l'écoulement sont très diversement évaluées /117,127,130/ en fonction de l'appréciation d'évolution de la couverture nuageuse et du type de nuages, de l'humidité du sol, du couvert végétal, de l'évapotranspiration. Le réchauffement semblerait plus marqué en saison sèche et la saison humide se raccourcirait. Pour certains, il y aurait une augmentation sensible des précipitations /130/ ou au contraire une diminution /122/ et un déplacement des ceintures tropicales est également possible /121/.

Des résultats récents /135/ confirment cette imprécision actuelle. Il n'est pas de notre propos d'aller plus loin dans cette voie mais, comme nous l'avons déjà vu, les effets de la désertisation et de la désertification /115/ sur les états de surface /111/, l'évolution des conditions de ruissellements que ceux-ci entraînent /108,109,110,133/ et le comportement général des diverses entités (d'eaux de surface) vis à vis du climat et de son action sur le milieu /113,114,116,123,124,125,128,129/ sont des sources d'information utiles pour monter des scénarios plausibles. (Nous ne récapitulerons pas ici toute la bibliographie qui a été fournie dans les chapitres précédents).

5.2. Scénarios envisagés

Pour les trois catégories retenues :

- Cours d'eau tropicaux parvenant au Sahel ou le traversant,
- cours d'eau sahéliens,
- lacs sahéliens, en particulier le lac Tchad.

.../...

On envisagera 3 scénarios climatiques suivants :

- Scénario A

Situation climatique actuelle stationnaire, c'est à dire persistance des conditions actuelles de sécheresse. Ceci correspond à une pluviométrie moyenne annuelle en zone sahélienne inférieure d'environ 20% à la normale 1931-1960

- Scénario B

Nouvelle aggravation de la sécheresse, c'est à dire diminution des précipitations par rapport à la situation observée de 1970 à 1990. Soit une pluviométrie moyenne annuelle en zone sahélienne inférieure d'environ 40% à la normale 1931-1960.

- Scénario C

Retour à des conditions climatiques plus humides, donc reprise des précipitations à un niveau proche des périodes 1921 à 1936 ou 1951 à 1967. Soit une pluviométrie moyenne annuelle en zone sahélienne voisine de la normale 1931-1960.

Les chiffres fournis sont des ordres de grandeur basés sur l'ensemble de l'information acquise et présentée dans les chapitres précédents.

5.2.1. Situation des cours d'eau tropicaux

- Cas A - Maintien des conditions actuelles -

Dans cette hypothèse :

Poursuite de l'affaiblissement des nappes souterraines qui contribuent au soutien de l'écoulement en basses eaux (réalimentation des nappes très faibles). Ceci conduit à une accentuation de la période de basses eaux, à des étiages absolus nuls sur la quasi totalité des grands cours d'eau, les débits à Bakel sur le Sénégal seraient nuls sans la régularisation apportée par le barrage de Manantali ; par contre pour le Niger à Niamey, les débits risquent à nouveau de s'annuler malgré les lâchures du barrage de Selingue et la présence d'un batardeau permanent est indispensable à Niamey pour stocker quelques millions de m³.

Le volume moyen annuel écoulé serait caractérisé par un déficit de 50% en moyenne pour les fleuves Sénégal et Chari et de 30% pour le Niger par rapport aux moyennes interannuelles des modules établis jusqu'à 1969 inclus.

.../...

En terme d'apports totaux à la zone sahélienne, le déficit global serait en année moyenne de 40 à 45% soit un apport de 80 milliards de m³/an (moyenne arrondie de la période 1970 à 1988) contre 135 milliards de m³/an. La retenue de Manantali ne recevrait sans doute que 7 milliards de m³/an.

L'hydrogramme annuel de ces grands fleuves s'aplatit considérablement avec l'effondrement du maximum annuel de crue (le rapport crue maximale annuelle/crue maximale moyenne interannuelle tomberait à 0,50 pour le Niger à Koulikoro et à 0,25 pour le Chari à Ndjamena). La période de très hautes eaux (telle qu'observée jusqu'en 1969) serait remplacée par un "plateau" de moyennes eaux pendant trois mois.

- Cas B - Diminution des précipitations -

Cette situation a déjà prévalu en 1972 et 1973 puis en 1983 et 1984 et se généraliserait.

Ceci se traduirait par :

Effondrement des nappes souterraines renouvelables, tarissement accentué et brutal amenant à un étiage absolu nul chaque année sur tous les cours d'eau non régularisés (il n'est même pas sûr que les grandes retenues existantes puissent enrayer ce phénomène de par leur faible remplissage). Compte tenu des aménagements se développant sur le Logone-Chari, le Chari à Djamaena pourrait tarir complètement et sur des cours d'eau comme le Bani, autrefois toujours perennes, l'arrêt de l'écoulement durerait plusieurs mois.

Le volume moyen annuel écoulé devrait représenter les valeurs observées déjà en 1984 (déficit de 60% pour le Niger, 75% pour le Sénégal, 80% pour le Chari) ce qui signifie que certaines années les records observés actuellement seraient largement dépassés.

Le total des apports à la zone sahélienne tomberait en année moyenne à moins de 35 milliards de m³ (soit 75% de déficit). Les apports au barrage de Manantali tomberaient peut être à 3 milliards de m³/an.

.../...

L'hydrogramme annuel de ces grands fleuves aurait un caractère très aplati avec de nombreuses indentations correspondant à une succession de faibles crues et le maximum annuel pourrait être dû à la crue localisée d'un tributaire sahélien. Les maximums annuels de crues pourraient être divisés par 2,5 à 5 fois par rapport à la situation d'avant 1969 (Fig.20,21,22).

- Cas C - Retour à des conditions plus humide -

Ceci pourrait correspondre à une reprise des pluies ramenant aux valeurs de la normale 1931-1960.

Dans cette hypothèse :

L'inertie des grands bassins fluviaux augmentée par la succession de déficits annuels consécutifs très prononcés est telle qu'un retour à des écoulements voisins de ceux des périodes 1922 à 1936 ou 1951 à 1967 ne pourra être que progressif et variable d'un bassin fluvial à l'autre.

Après le paroxysme de sécheresse de 1972 à 1973, la reprise d'écoulement en 1974 et 1975 a été synchrone de celle des pluies (comme on avait pu le constater après la sécheresse des années 40) l'épuisement des nappes souterraines n'étant pas trop marqué. Actuellement après un déficit prolongé la situation est beaucoup plus défavorable comme le montre l'exemple des années 1988 et 89 où l'écoulement reste médiocre alors que les précipitations ont été nettement plus fortes.

On constate en effet la situation suivante :

Comportement assez dissemblable des grands bassins fluviaux même pour ceux connaissant le même château d'eau (Fouta Djallon).

En 1988, le déficit d'écoulement annuel du fleuve Sénégal n'est que de 20% contre 50% pour le Bani (toutefois en forte reprise) et 50% pour le Niger à Koulikoro (déficit quand même élevé compte tenu de son coefficient de variation modéré). Des précipitations locales très violentes donnent lieu à des crues brèves et pointues (rappel du cas du Niger à Niamey, cf fig.17). Cette même année des pluies exceptionnelles affectent une partie du Tchad, après le Soudan, causant des inondations locales importantes mais en terme de volume écoulé annuel, le dé-

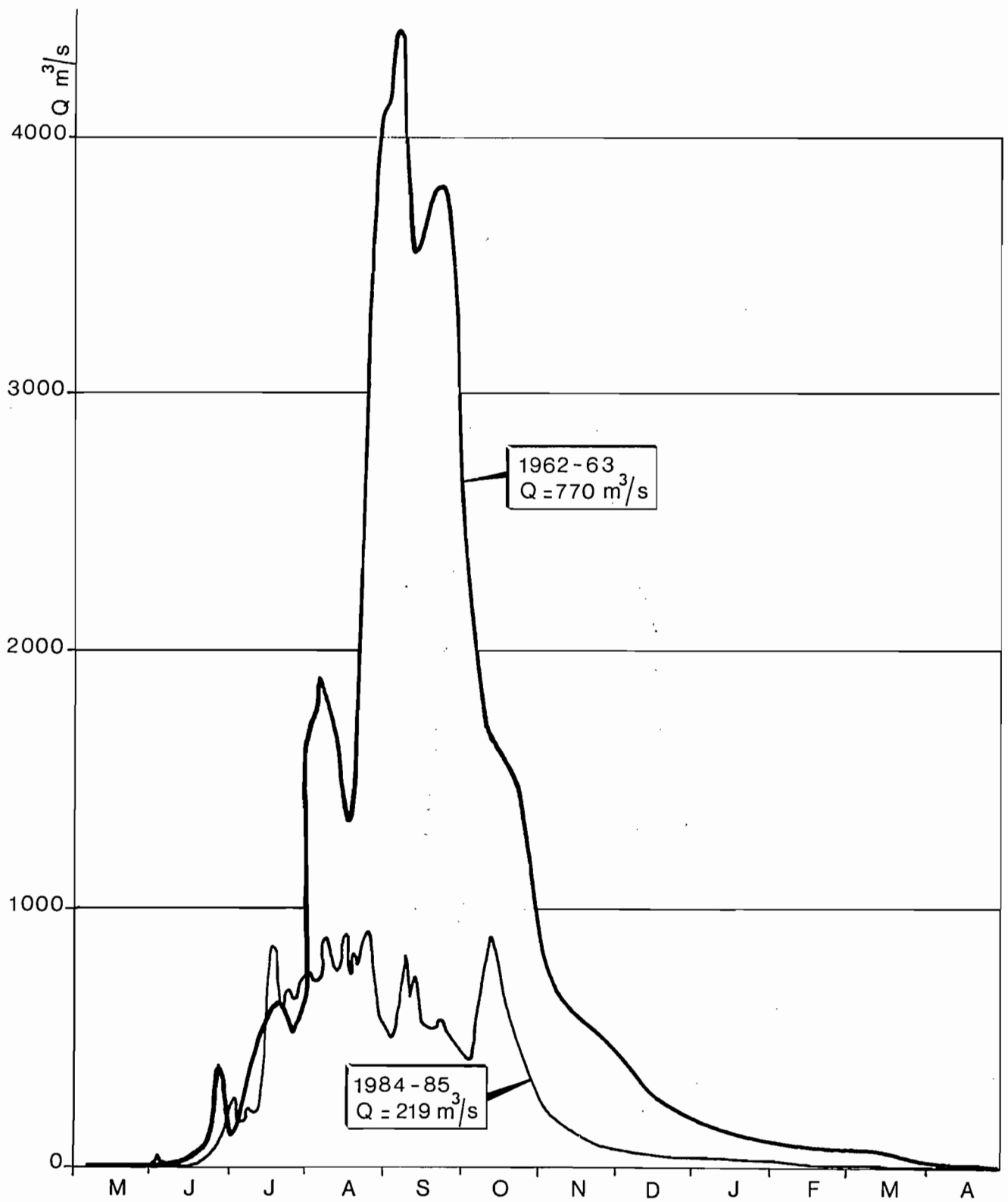


Fig. 20 - Hydrogrammes annuels du Sénégal à Bakel (année proche de la médiane et année du minimum)

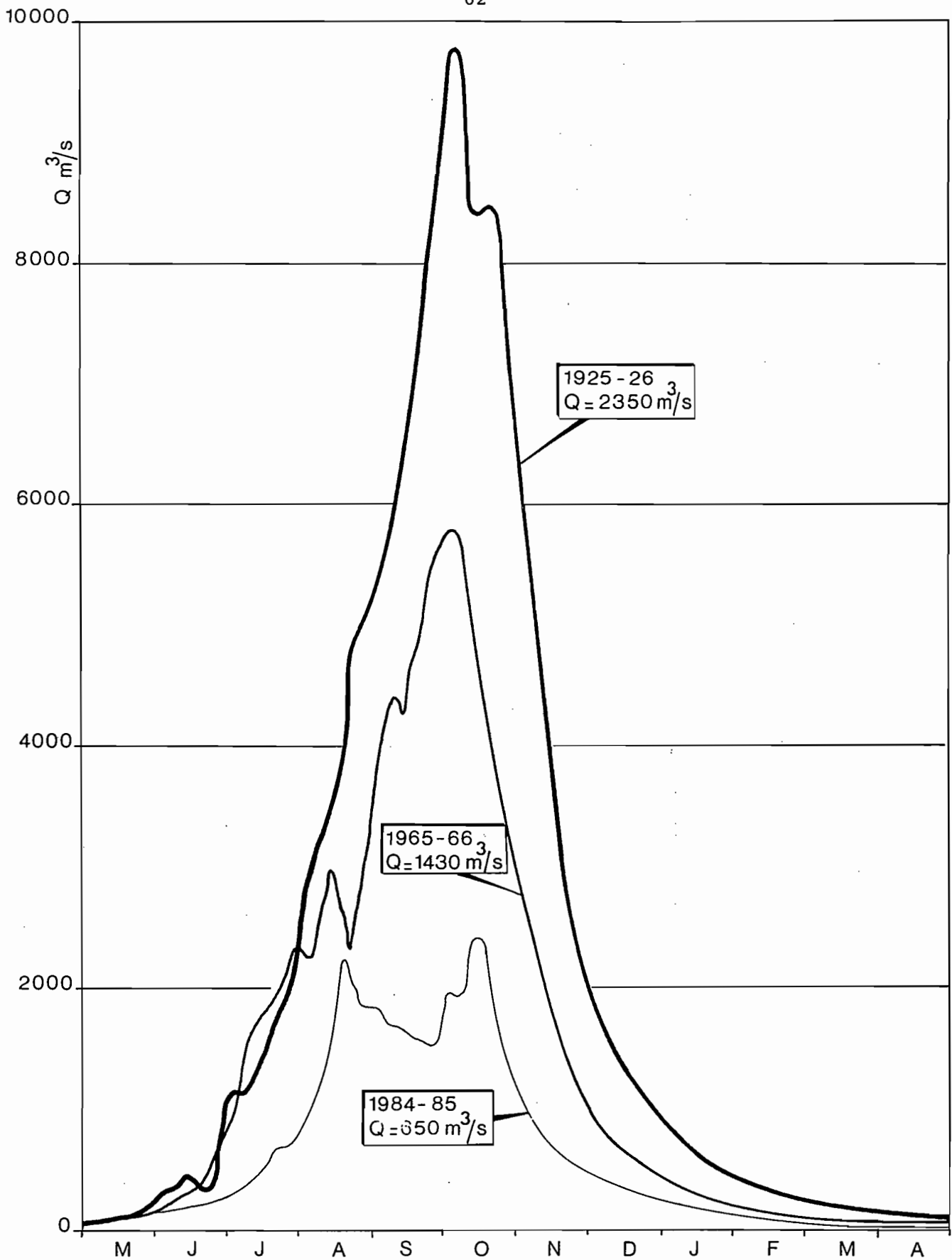


Fig. 21 - Hydrogrammes annuels du NIGER à KOULIKORO (années maximum, médiane et minimum).

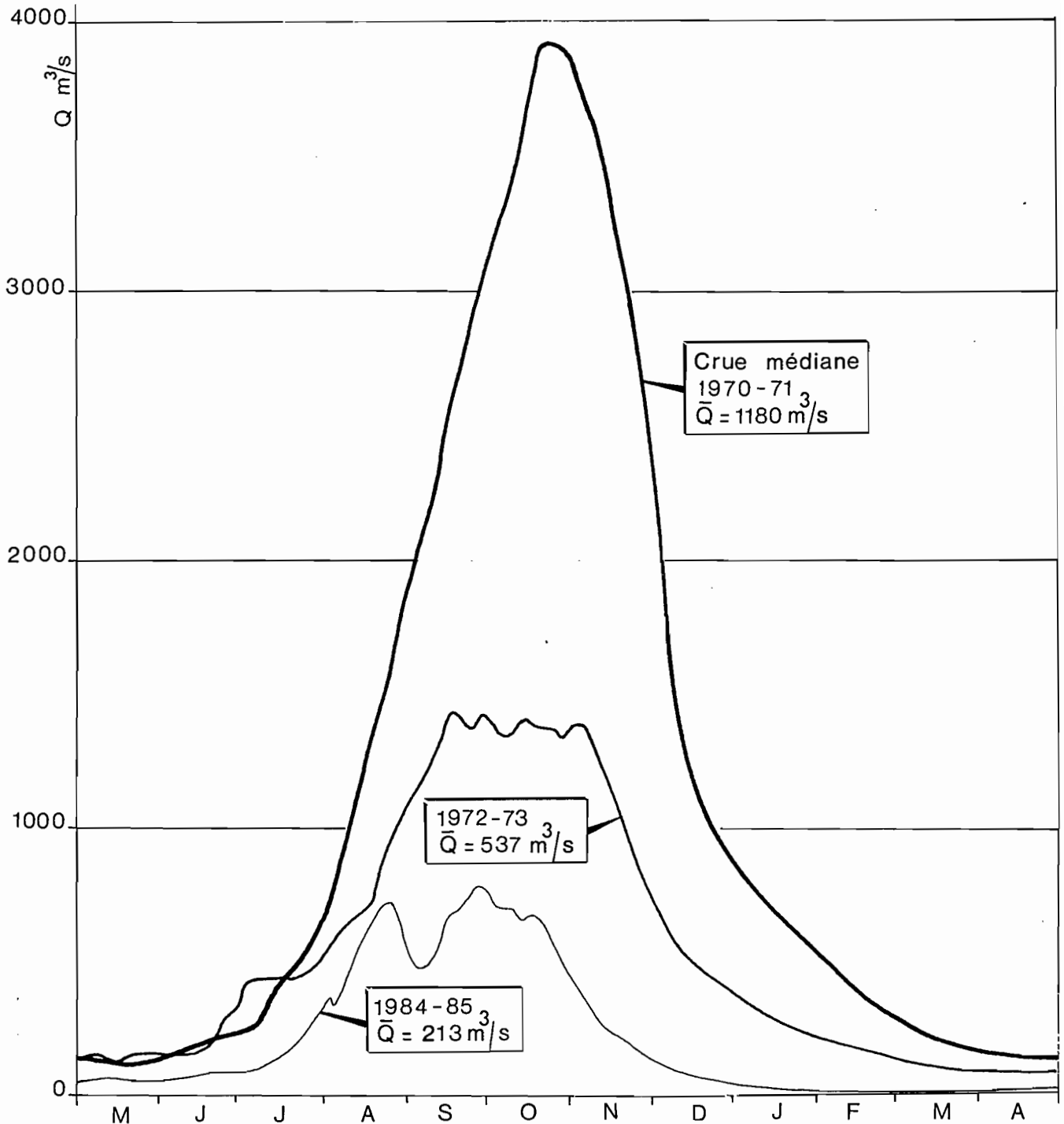


Fig. 22 - Hydrogrammes annuels du CHARI à NDJAMENA (année proche de la médiane, année 72-73 et année minimum).

ficit du Chari à Ndjamena atteint encore 22%.

En 1989, sur le bassin du Niger supérieur, alors que les pluies se rapprochent des normales (?) le module annuel à Koulikoro est équivalent au minimum connu de 1984 (environ 630 m³/s, soit un déficit de 52%...). Ainsi même si les années à venir étaient plus humides, les écoulements des fleuves tropicaux risquent d'être encore déficitaires pendant plusieurs années mais avec de grandes disparités locales en fonction de la localisation des épisodes pluvieux les plus intenses. Le risque d'observer des pointes de crues brèves mais très accentuées est évidemment très important si ce sont les bassins sahéliens qui sont les plus arrosés.

5.2.2. Cours d'eau sahéliens

Il est très important de différencier les bassins sahéliens en deux catégories en fonction de leur superficie.

Les observations réalisées sur les réseaux sahéliens du Niger et du Burkina ont montré, en effet, qu'au cours de ces dernières années le comportement des bassins était radicalement différent suivant que ceux-ci couvraient disons moins de 20000 km² ou bien dépassaient nettement cette limite. Il s'agit là d'un ordre de grandeur, l'augmentation de surface des bassins favorisant le développement de la dégradation hydrographique et les pertes par évaporation sur de grandes surfaces d'épandage /125/.

On constate ainsi que les grands bassins sahéliens présentent, comme les fleuves tropicaux, une diminution très nette de leurs apports (bien qu'avec une irrégularité interannuelle plus forte) au cours de la période actuelle de sécheresse alors que les petits bassins sahéliens voient en moyenne le maintien de leurs apports superficiels, voire même un accroissement de la ressource, la diminution des pluies étant compensée par une augmentation très sensible des coefficients de ruissellement.

La compréhension du fonctionnement des petits bassins a été facilitée par la reprise des études de terrain parfois

à plus de 20 ans de distance, de bassins d'investigation suivis par l'ORSTOM. Ces études ont mis en évidence que l'hydrodynamique de surface était contrôlée essentiellement par le couvert végétal et les organisations pédologiques de surface.

L'effet conjugué des actions anthropiques (développement démographique) et des conditions climatiques actuelles entraîne la diminution du couvert herbacé, l'extension de zones cultivées favorisant le tassement de la surface du sol et le développement de pellicules imperméables ainsi que les zones érodées. Ceci est quantifié par l'emploi de simulateur de pluies et de modèles simples de constitution de lames ruisselées à partir de la cartographie des états de surface (télé-détection + vérité sol).

5.2.2.1. Bassins sahéliens de superficie <20000 km²

- Cas A - Maintien des conditions climatiques actuelles

Parmi les bassins sahéliens observés entrant dans cette catégorie, on prendra comme exemple celui du Gorouol à Dolbel (Niger) ayant une superficie de 7500 km².

Les séries de modules annuels et de pluies moyennes annuelles établies sur le bassin pour la période 1961 à 1987 sont réparties en trois périodes de 9 ans chacune, la première période correspondant à une phase nettement plus humide.

	Pluie an. P (MM)	Module an. (m ³ /s)	Lame écoulée LE(mm)	Coefficient d'écoulement Ke %
Période 1961-69	558	8,65	36,4	6,5
Période 1970-78	407	8,39	35,3	8,7
Période 1979-87	338	8,85	37,2	11,0

L'examen de la variation pour chaque année des lames d'eau écoulées et des coefficients d'écoulement en fonction de la pluie moyenne (Fig.23 et 24) et les résultats du tableau ci-dessus, indiquent que :

On assiste à une augmentation progressive des coefficients d'écoulement annuels permettant aux lames écoulées de se maintenir au niveau de la période humide (avant 1970) voire même de progresser malgré la diminution très prononcée du total pluviométrique annuel (Fig.25).

.../...

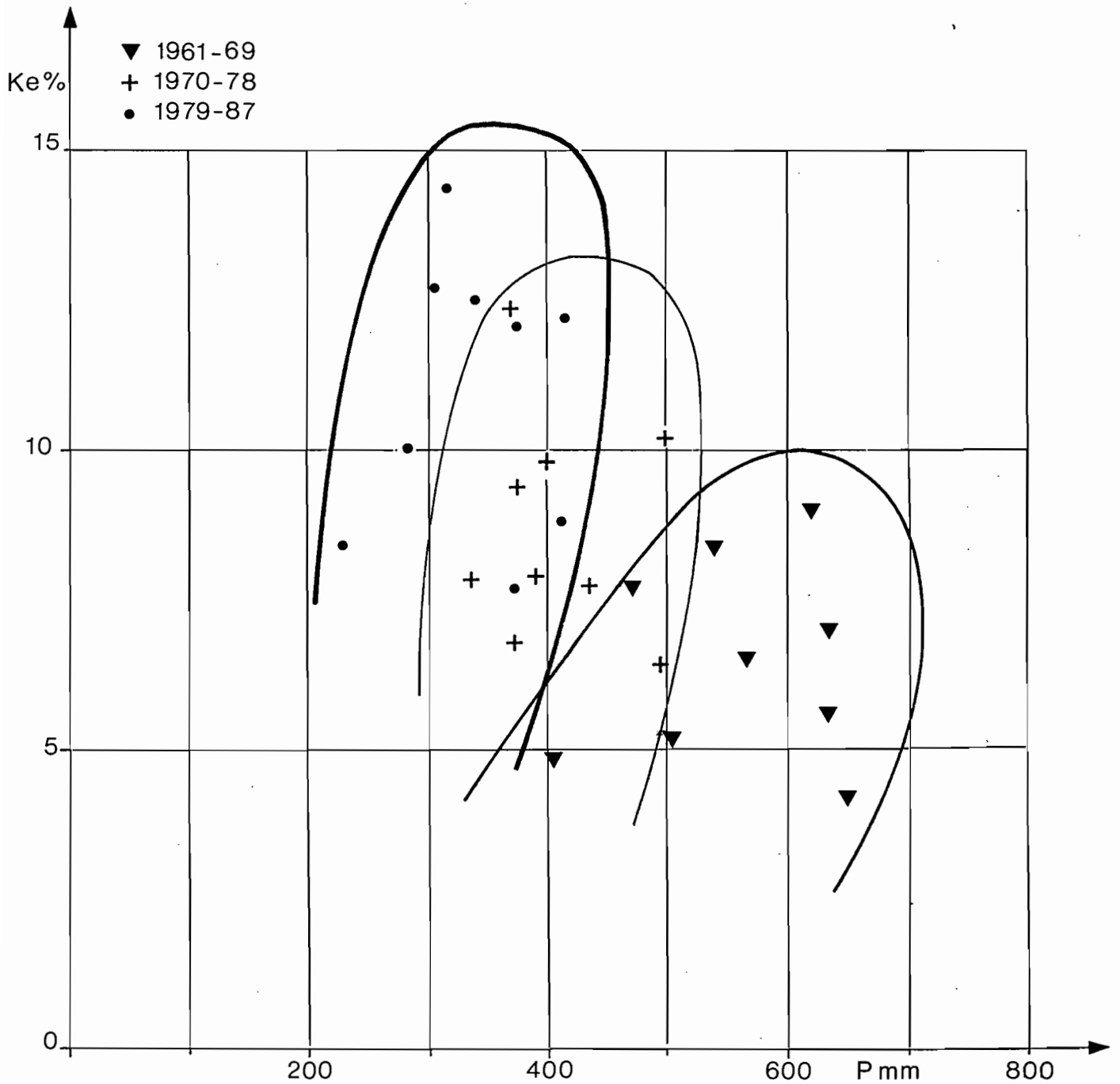


Fig. 23 - Evolution des coefficients d'écoulement annuels de 1961 à 1987 sur un bassin versant sahélien (le GOROUOL à DOLBEL). D'après POUYAUD, complété.

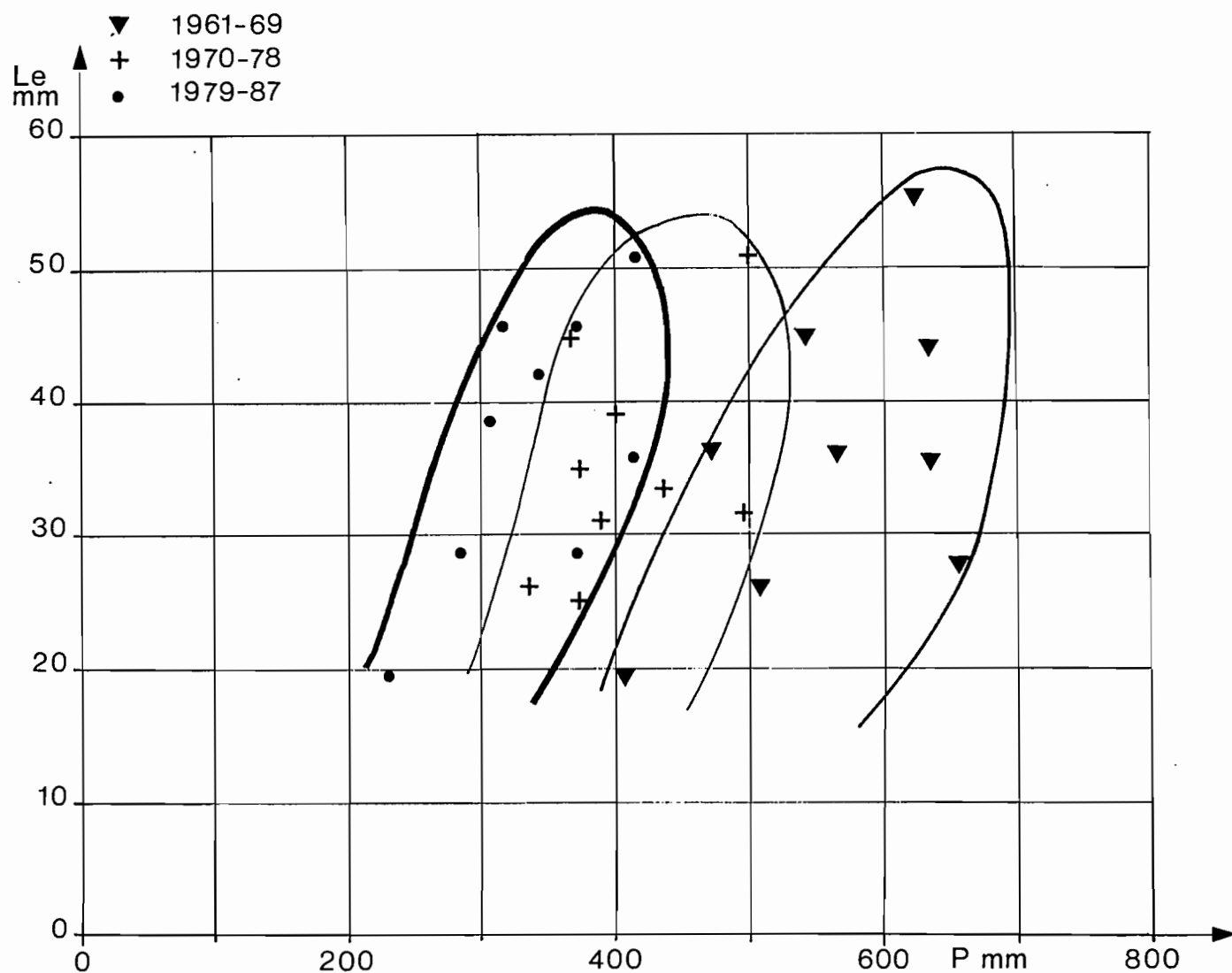


Fig. 24 - Evolution des lames d'eau écoulées annuelles de 1961 à 1987 sur un bassin versant sahélien (le Gorouol à Dolbel = 7500km²) D'après POUYAUD, complété.

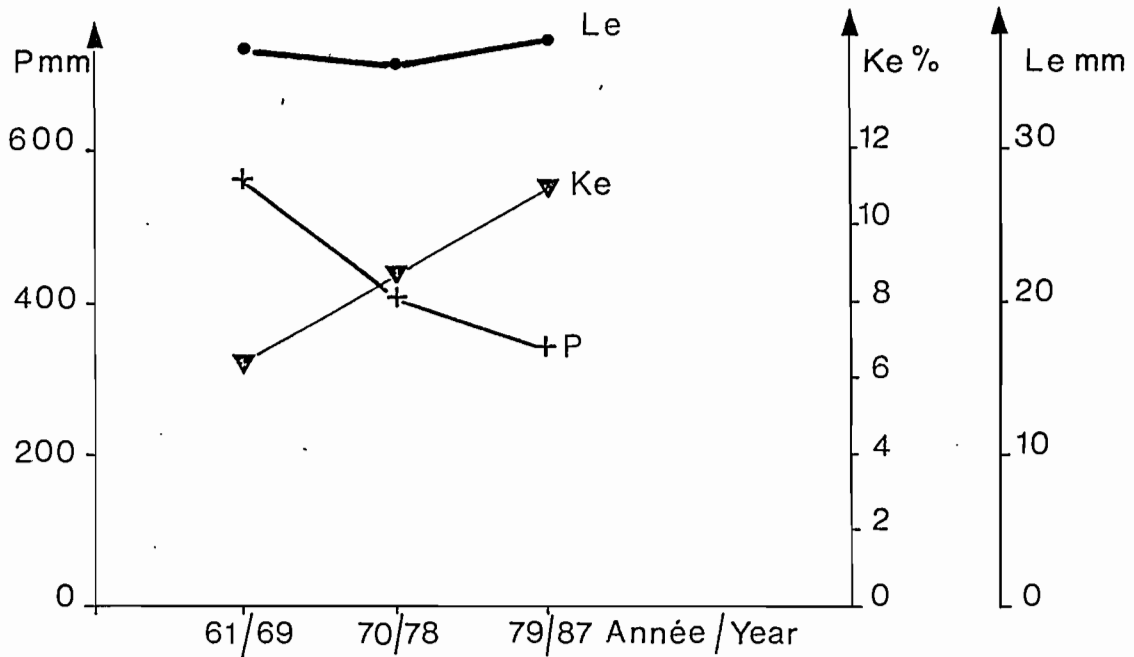


Fig. 25 - Evolution comparée des précipitations annuelles P, des coefficients d'écoulement Ke et des lames écoulées Le pour le GOROUOL à DOLBEL.

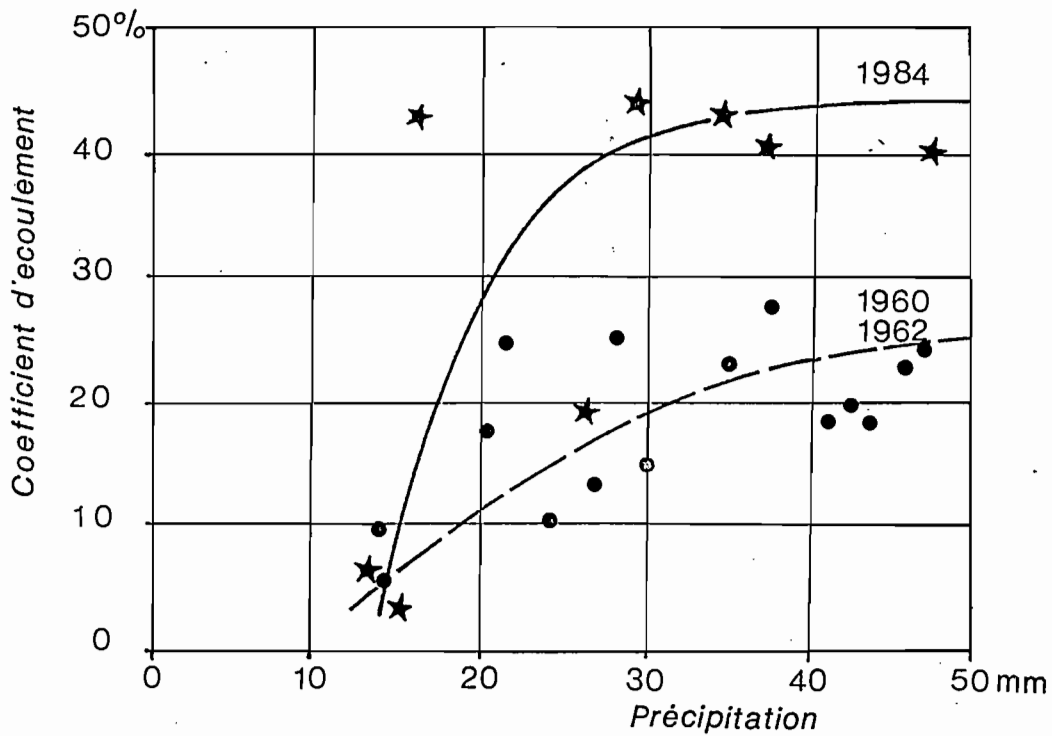


Fig. 26 - Variation des coefficients d'écoulement en fonction de l'extension des zones cultivées (Kognere-Boulsa au Burkina-Faso, d'après ALBERGEL et GIODA).

La dernière période de 9 ans, bien qu'étant la plus sèche des trois, est ainsi celle qui fournit les écoulements les plus importants. On a déjà constaté (Cf 4.3) qu'au cours de ces vingt dernières années le Gorouol présentait une alternance régulière d'années à écoulement excédentaire ou déficitaire alors que les grands bassins tropicaux connaissent dans le même temps une succession d'années toutes déficitaires.

L'écoulement de l'année 1988, observé à Dolbel, non pris en compte dans les calculs précédents est le plus abondant de toute la série de relevés (module de $16,3 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $\xi_i = 2,8$).

En ce qui concerne les crues maximales annuelles, une étude statistique portant sur l'échantillon des crues du Gorouol à Dolbel donne, suivant une loi de Goodrich les indications suivantes :

- avec les données de la période supposée "humide" et se terminant en 1969, la crue médiane est de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ et la crue décennale de $160 \text{ m}^3/\text{s}$.
- avec l'échantillon des crues de la période actuelle "sèche" on obtient une crue médiane de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ et une crue décennale de $200 \text{ m}^3/\text{s}$.

La modification des états de surface et l'évolution de la pression anthropique sur l'environnement est illustré par les études faites sur le bassin de Kognere-Boulsa (Burkina) de 1960 à 1962 puis en 1984/109/pour lequel on dispose d'une cartographie des états de surface en 1956 puis en 1980. Entre ces deux dates les surface cultivées sont multipliées par 2, les jachères récentes divisées par 2 et les surfaces érodées, impropres à l'agriculture, sont presque multipliées par 20 ! La Fig. 26 indique clairement que les coefficients de ruissellement sur le bassin (ramenés à un même indice d'humidité) passent de 20 à 40% entre les années 60-62 et 84 /108/.

En fonction des remarques précédentes, il importe d'être très vigilant quant au calcul des normes hydrologiques de sécurité des ouvrages à construire actuellement. Une révision à la baisse serait certainement catastrophique.

.../...

- Cas B - Aggravation de la sécheresse

Une nouvelle diminution des précipitations en zone sahélienne ne ferait qu'accroître l'irrégularité spatiotemporelle des averses et donc des écoulements. En fonction des conditions locales des états de surface du sol, il serait encore possible de rencontrer localement, même avec une diminution très sensible des précipitations, des crues brutales et des barrages qui débordent. La disparition de végétation, la multiplication des zones érodées ou à encroûtement conduiraient à des coefficients de ruissellement encore plus élevés que maintenant.

En zone aride, disons entre les isohyètes 100 et 400, l'irrégularité interannuelle pourrait conduire à des années sans aucun écoulement alternant avec des années à écoulement se produisant sur un nombre de jours beaucoup plus réduit que maintenant. La disparité de fonctionnement entre bassins peut être très forte, la dégradation hydrographique jouant un rôle aggravant.

Il est clair que le type de pluie (et sa structure) prédominant pour cette nouvelle situation climatique jouerait un rôle non négligeable (les études actuelles semblent montrer un renforcement des lignes de grain, à caractère plus érosif, au détriment des pluies à caractère plus continu, de type mousson).

Il n'est pas possible de savoir, pour le moment, à partir de quelle combinaison seuil pluviométrique et maximum de coefficient de ruissellement se produirait une diminution sensible des lames d'eau écoulées.

L'aggravation de la sécheresse et une pression anthropique mal maîtrisées aboutiraient à une dégradation des sols de plus en plus marquée et étendue vers le sud. D'après des études récentes du PNUE (Brabant, communication orale) il ressort que la vitesse de dégradation des sols, lente entre 1945 et 1965, s'est brutalement accélérée en 1970 et continue de nos jours, le front de dégradation des sols a progressé de 100 à 150 km

.../...

vers le sud par érosion hydrique et vers le nord par érosion éolienne.

- Cas C - Retour à des conditions plus humides

A partir d'un modèle simple, Àlbergel /108,109/ a procédé à la reconstitution des lames ruisselées sur le bassin de Kognéré pour 34 années d'observations suivant la carte des sols de 1956 (période humide, sols peu dégradés, faiblesse des zones érodées) et suivant celle de 1980 (période sèche, sols très dégradés, zones érodées importantes). La Fig. 27 montre les 2 courbes correspondantes. La courbe 1 (carte 1956) donne les lames ruisselées pour les pluies survenues avant 1969 et après 1969 pour un état des sols n'ayant pas évolué. La courbe 2 (carte 1980) donne les lames ruisselées pour les pluies survenues après 1969 et avant 1969 après la dégradation de l'état des sols.

Avec la situation "1980", la hauteur totale annuelle ruisselée de la période humide (avant 1969) aurait été en augmentation de 38%.

Avec la situation "1956", la hauteur totale annuelle ruisselée de la période sèche (après 1969) aurait été en diminution de 32%.

Ainsi, le retour à une période plus humide se traduirait dans les premières années par une augmentation très sensible de l'écoulement de par la dégradation actuelle des états de surface jusqu'à ce que la "régénération" des sols favorisant à nouveau l'infiltration diminue sensiblement les coefficients de ruissellement. On doit toutefois se poser deux questions :

- a) Est-ce que l'action conjuguée de la sécheresse et du mode de culture aboutit systématiquement à ce comportement hydrologique ?
- b) Quelle est la vitesse de réorganisation ou de régénération des sols ?

Il semble que le mode de culture et naturellement son extension joue un rôle sensible dans le comportement hydrologique des bassins car une autre reconstitution d'écoulement faite sur le bassin de Kountkouzout (au Niger) où les surfaces

.../...

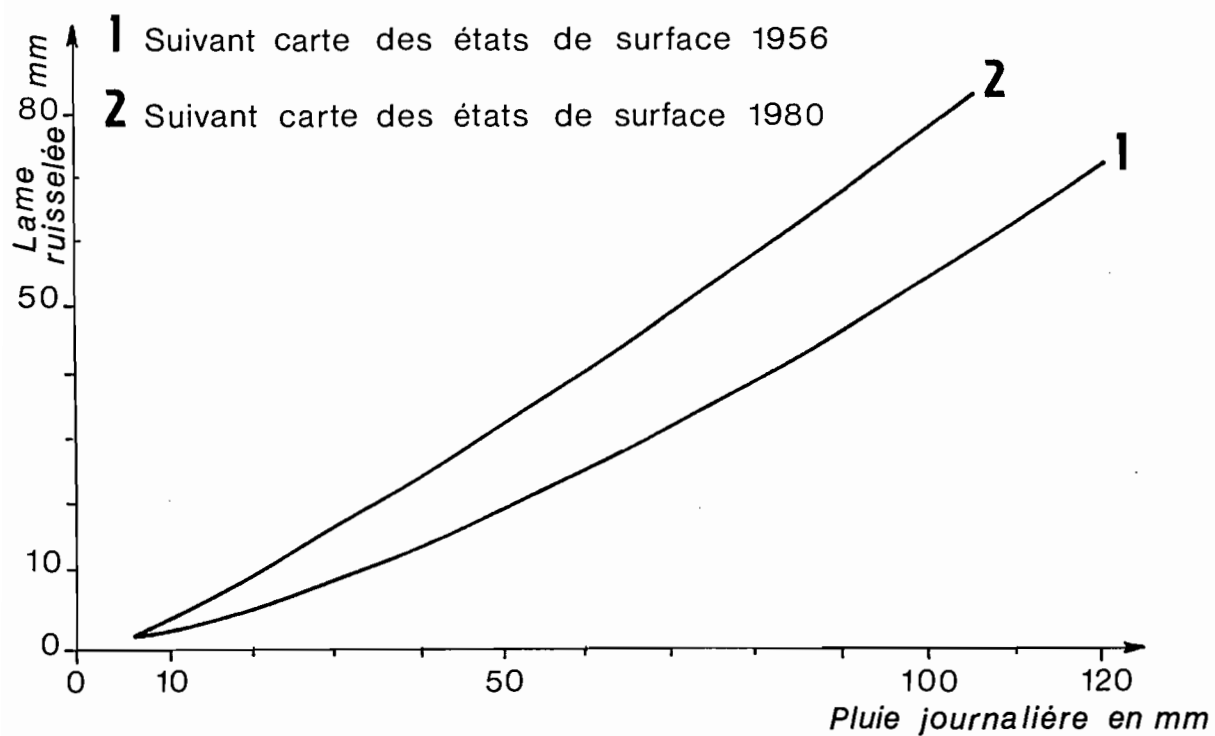


Fig. 27 - Lames ruisselées reconstituées sur le bassin de Kognere (Burkina) d'après ALBERGEL.

cultivées sont passées de 18 à 43% en trente ans ne montre pas un tel phénomène d'augmentation du ruissellement (culture en billons favorisant l'infiltration).

Pour la régénération des état de surface il faut distinguer entre zones cultivées et non cultivées ; la pression démographique a pour conséquence une extension des surfaces cultivées, une disparition des temps de jachère et un appauvrissement des champs ; la reconstitution du milieu sera donc lente. Par contre pour les zones non cultivées, la réversibilité doit être plus rapide, les sols sableux comme on a pu l'observer au Sénégal ou en Mauritanie ces dernières années, se régénérant beaucoup plus facilement que les sols argileux et naturellement les zones cuirassées.

5.2.2.2. Bassins sahéliens de superficie $>20000 \text{ km}^2$

Pouyaud/125/ en prenant des exemples de bilans hydriques de cours d'eau du Burkina et du Niger a montré que dans cette catégorie on assistait de nos jours à une décroissance de l'écoulement, très nette. La différence de comportement avec les bassins plus petits s'explique par les fortes pertes par évaporation dans les grandes zones d'épandage, l'infiltration n'ayant pas le temps d'alimenter les nappes. Ce comportement est donc identique à celui que l'on constate sur les grands bassins tropicaux mais avec une irrégularité spatiotemporelle beaucoup plus marquée.

On dispose naturellement de peu de stations sur ces grands bassins sahéliens où la dégradation hydrographique prédomine. D'une façon générale les bassins de cette catégorie ont des réactions très diverses, ils sont souvent en partie endoreïque, à faible pente et à perméabilité variée. Ainsi la Komadougou qui se jette dans le lac Tchad a un bassin plat et perméable présentant des pertes énormes. Sur ces types de bassins les pertes en années humides sont telles que les écoulements sont plus faibles qu'en année moyenne et les courbes de distribution prennent une allure gausso-logarithmique, ce qui veut dire que dans le cas d'années très humides (Cas C) l'augmentation de l'écoulement tendrait vers une limite supérieure asym-

ptotique (cas de la Komadougou, du Bahr Azoum au Tchad, etc./128/. D'autres bassins au contraire, comme la Sirba (Niger) ou le Ba Tha (au Tchad) ne présentent pas à l'aval de pertes énormes et régulatrices et possèdent une partie de leurs sols pouvant se saturer facilement en année humide, les écoulements peuvent être alors dévastateurs (ce fut le cas de la Sirba en 1987 rappelons le).

Une étude d'ensemble de l'impact et des variations climatiques sur cette catégorie de bassins est donc difficile, toute modélisation exigeant au préalable de nombreuses reconnaissances de terrain et l'imagerie satellitaire.

5.2.3. Lacs sahéliens

Il a été exposé précédemment que la cuvette intérieure du fleuve Niger et le lac Tchad constituaient les deux ensembles les plus importants de la zone sahélienne. Néanmoins la complexité hydrographique de la cuvette du Niger et le peu de données chiffrées sur ces lacs/131/ font qu'il est préférable de se référer au seul comportement du lac Tchad. Celui-ci est d'ailleurs à la fois le plus grand lac, le plus représentatif des variations climatiques et présente un fonctionnement bien connu/116,126,119/.

- Cas A - Maintien des conditions actuelles

Nous avons vu que le remplissage du lac était fonction de l'importance des apports du fleuve Chari (80 à 85% du total des apports).

On a constaté la forte diminution de ceux-ci (40 milliards de m³ en moyenne sur la période de mesure allant jusqu'en 1969 inclus, 22,5 milliards de m³ pour la période 1970 à 1988 et seulement 6,5 milliards de m³ en 1984) et la séparation du lac en deux cuvettes (cuvette nord plus ou moins bien réalimentée chaque année) depuis 1973.

Les études récentes faites par LEMOALLE/116/ sur l'inondation de la cuvette nord indiquent que dans l'état actuel du lac (état "Petit Tchad"), si les apports annuels du Chari sont inférieurs à 15 milliards de m³ il n'y a aucune inondation

.../...

de la cuvette nord ; à 18 milliards de m³ l'inondation progresse timidement jusqu'à la latitude de Bosso ; à plus de 28 milliards de m³ toute la cuvette nord peut-être provisoirement remise en eau cf Fig. 28 (en ordonnée 1 signifie inondation peu importante, 2 jusqu'à Bosso, 3 inondation importante) et Fig. 29.

- Cas B - Diminution des précipitations

Le cas précédent a montré la fragilité actuelle du lac qui ne subsiste en fin de saison sèche que dans la seule cuvette sud en se limitant en général aux seules nappes d'eaux libres du sud-est (Fig. 30).

Avec des apports encore plus faibles, seule la cuvette sud fonctionnerait encore au maximum de la crue du Chari et dans le cas où cette situation climatique se prolongerait la survie du lac dépendrait finalement des prélèvements anthropiques et aménagements construits sur le Logone et le Chari.

- Cas C - Augmentation des précipitations

L'observation ou la reconstitution des niveaux du lac depuis le début du 20ème siècle (Fig.19) montrent qu'une amélioration du remplissage peut être rapide (après les années 13 par exemple).

Le retour à un état "Moyen Tchad" demande une année très humide avec force crue et pluies importantes sur le lac lui-même. D'après/116/pour obtenir un plan d'eau unique en janvier (maximum de la crue lacustre) il faudrait une crue du Chari de l'ordre de 52 milliards de m³ équivalente à celle des années 55-56, 61-62 ou 62-63 mais ce plan d'eau unique ne serait que de courte durée. Pour obtenir une telle situation persistant toute l'année, deux crues importantes successives seraient nécessaires. Une telle remise en eau s'est déjà produite à deux reprises depuis le début du siècle.

Nous avons reporté sur un tableau récapitulatif les indications les plus significatives des scénarios choisis.

.../...

Tableau 5.2. - Récapitulation des scénarios -

Catégorie		Maintien situation actuelle	Diminution de la pluviométrie	Augmentation de la pluviométrie
		$P = P(1931-1960) - 20\%$	$P = P(1931-1960) - 40\%$	$P = P(1931-1960)$
Cours d'eau tropicaux		Déficit de 50% pour le { SENEGAL CHARI NIGER Déficit de 30% pour le NIGER Crues annuelles divisées par 2 à 3 Débits minimaux (naturels) nuls Apports totaux au Sahel = $80.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$	Déficit de 80% pour le { SENEGAL CHARI NIGER Déficit de 60% pour le NIGER Crues annuelles divisées par 2,5 à 5 Débits minimaux naturels nuls Apports totaux au Sahel = $35.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$	Retour très progressif à la normale interannuelle de l'écoulement Différence de comportement suivant les bassins fluviaux Apports totaux au Sahel = 120 à $135.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$
Cours sahéliens	+ 20 000 km ²	Déficit de l'écoulement avec forte irrégularité interannuelle	Aggravation du déficit de l'écoulement et de l'irrégularité spatio-temporelle	Suivant les caractéristiques des bassins - Très forte augmentation de l'écoulement ou forte augmentation avec limite supérieure due aux pertes
	- 20 000 km ²	Écoulement annuel voisin ou un peu supérieur à celui de la période 1961-1969 Crues maximales identiques ou plus fortes	Écoulement annuel voisin ou un peu inférieur à celui de la période 1961-1969 Crues maximales rares voisines mais forte irrégularité spatiale	Volumes écoulés annuels en augmentation de 20 à 40% puis lente diminution Crues maximales plus fortes puis lente diminution
Lacs sahéliens (lac Tchad)		Remplissage du lac TCHAD en fonction du volume annuel (Q) du CHARI si $Q < 15.10^9 \text{ m}^3$ pas d'inondation cuvette Nord si $Q > 28.10^9 \text{ m}^3$ inondation de toute la cuvette Nord	Cuvette Nord non alimentée Cuvette Sud en eaux libres en équilibre avec $S = 1700 \text{ km}^2$	Cuvette Nord alimentée chaque année si $Q > 52.10^9 \text{ m}^3$ tout le lac est rempli en janvier Remise en eau complète et permanente pour 2 années consécutives abondantes ($Q > 100.10^9 \text{ m}^3$)

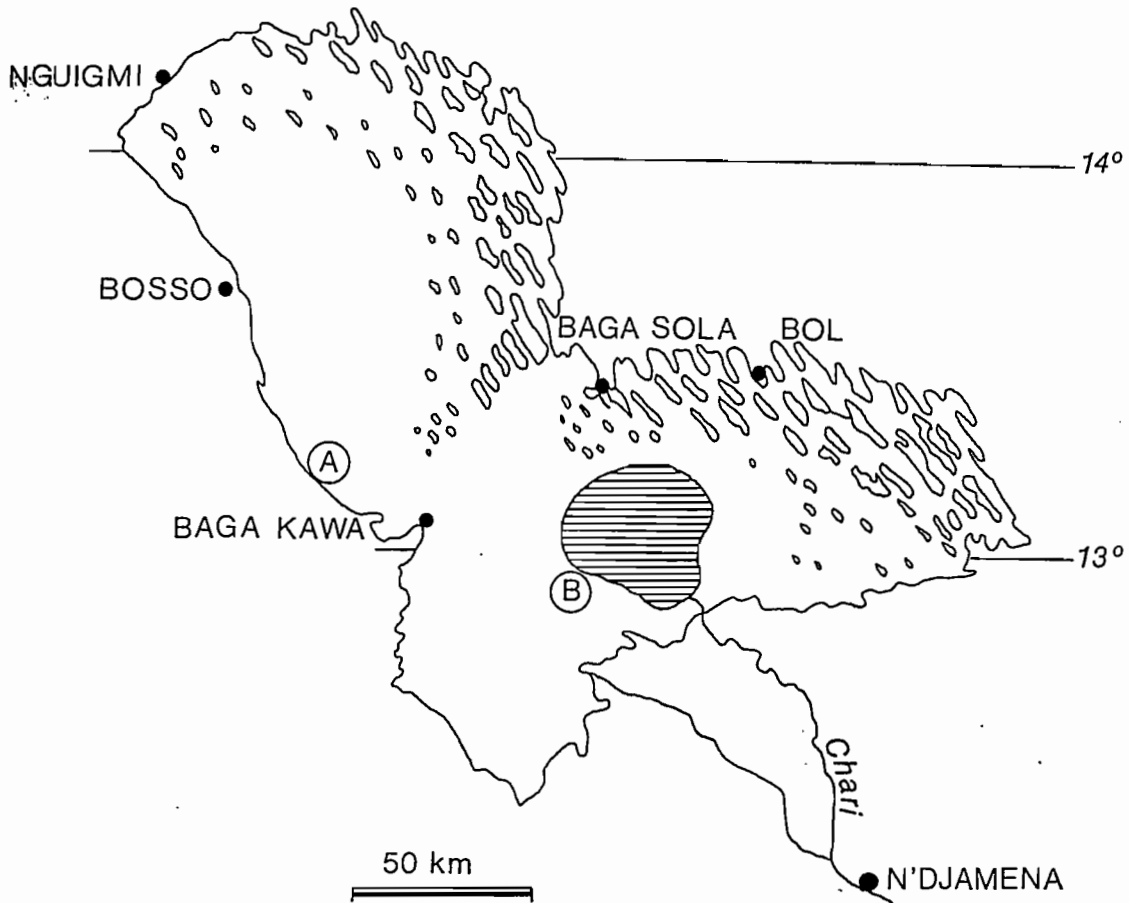


Fig. 28 - le Lac TCHAD (A) Situation au début des années 1960 (ZM = +282)
 (B) Situation de ces dernières années en fin de saison sèche

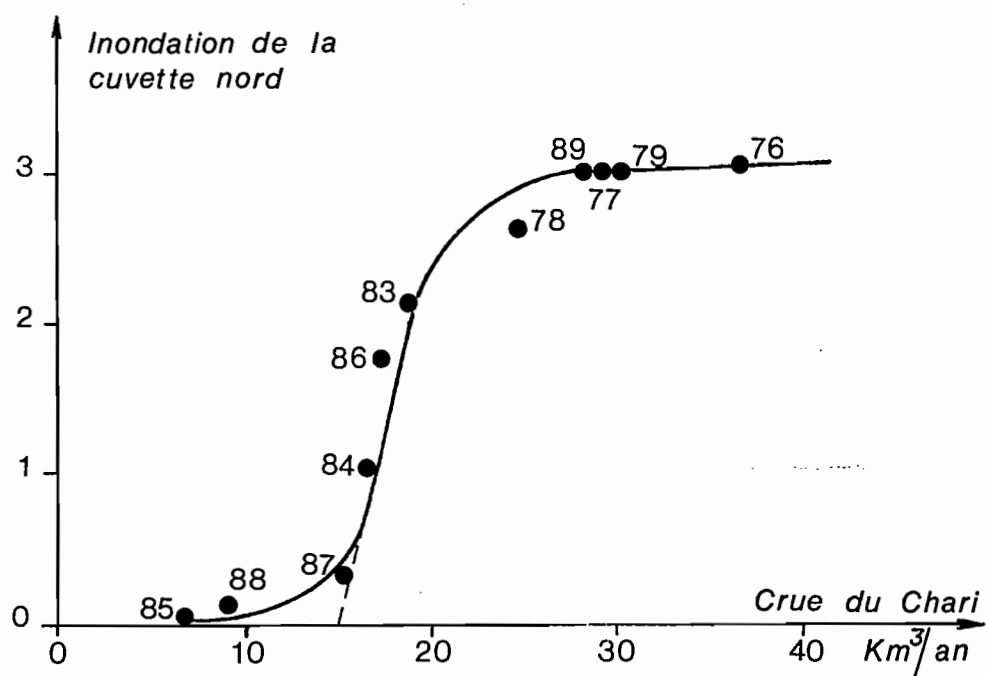


Fig. 29 - Importance de l'inondation dans la cuvette nord (unités arbitraires) en fonction du module annuel du Chari au cours de la période récente. D'après LEMOALLE.

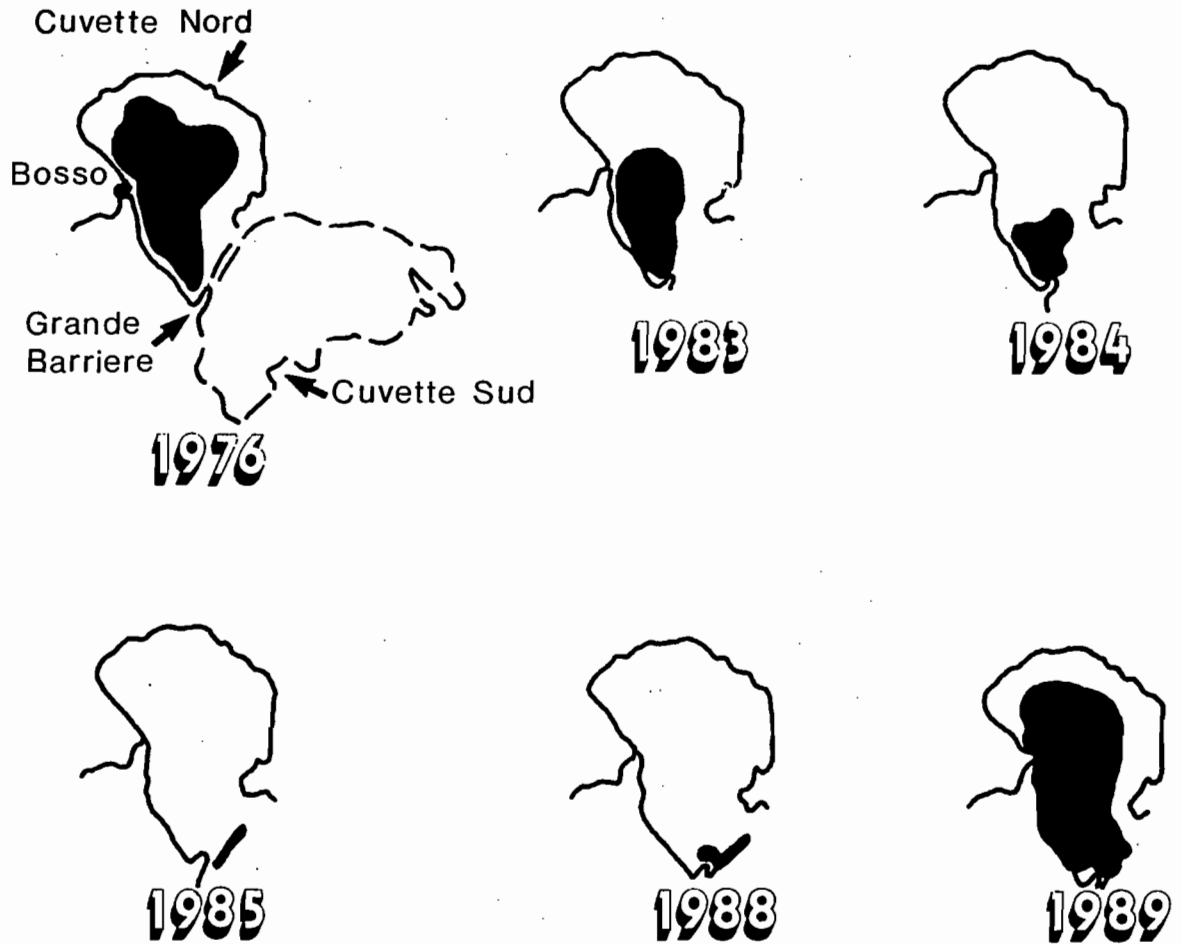


Fig. 30 - Surfaces inondées de la cuvette nord à la fin janvier pour quelques années récentes (maximum approximatif de l'inondation) D'après LEMOALLE.

- REFERENCES DU 5ème CHAPITRE -

- 108 - ALBERGEL (J.), GIODA (A.) 1986 - Extensions des surfaces agricoles et modification de l'écoulement - Analyse sur deux bassins de la savane africaine In 10èmes journées de l'Hydraulique, SHF, Paris, question n°1, rapport n°9, I-9-1 à I-9-6.
- 109 - ALBERGEL (J.) 1987 - Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface - Application aux petits bassins du Burkina Faso. In IAHS Publ. n°168, 1987 p.355-365.
- 110 - ALBERGEL (J.) 1987 - Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso du m² au km² - Etudes des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse doct. Univ. Paris VII, 336p.
- 111 - CASENAVE (A.), VALENTIN (C.) 1990 - Les états de surface de la zone sahélienne - Influence sur l'infiltration . In collection didactiques de l'ORSTOM. Paris, 229p., 196 pl. couleur.
- 112 - DICKINSON (R.E.) 1986 - How will climate change ? The climate system and modelling of future climate in Bolin B... (eds) the greenhouse effect, climate change and ecosystems SCOPE 29, John Wiley, Chichester pp.207-270.
- 113 - GIRARD (G.) 1975 - Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leur contrainte. In cah. ORSTOM, Ser.Hydr. Vol.XII, n°3, pp.189-221.
- 114 - GIRARD (G.) RODIER (J.) 1979 - Application de modèles mathématiques déterministes à l'étude des crues et de l'écoulement annuel en zone sahélienne. Pub. n°128, AISH, Canberra, pp.65-78.
- 115 - HARE (F.K.) 1983 - Climate and Desertification. A revised analysis in WCP-44, WMO, 149 p.
- 116 - LEMOALLE (J.) 1989 - Le fonctionnement hydrologique du lac Tchad au cours d'une période de sécheresse (1973-1989). Rapport ORSTOM, Montpellier 89-03, 27p.

- 117 - MABBUTT (J.A.) 1989 - Impacts of carbon dioxide warming on climate and man in the semi-arid tropics, in climatic change 15 ; pp.191-221.
- 118 - MALEY (J.) 1973 - Mécanisme des changements climatiques aux basses latitudes in Palaeogeogr., Palaeoclim. Palaeoecol., 14 : pp.193-227;
- 119 - MALEY (J.) 1981 - Etudes palynologiques dans le bassin du lac Tchad et paleoclimatologie de l'Afrique nord tropicale de 30000 ans à l'époque actuelle in Trav. et Doc. ORSTOM, n°129, 586p.
- 120 - MANABE (S.), STOUFFER (R.J.) 1980 - Sensitivity of a global climate model to an increase of CO₂ concentration in the atmosphere, in Journal of Geoph. Research, 85, C10, pp.5529-5554.
- 121 - MANABE (S.), WETHERALD (R.T.) STOUFFER (R.J.) 1981 - Summer dryness due to an increase of atmospheric CO₂ concentration , in climatic change 3, pp. 347-386.
- 122 - MANABE (S.), WETHERALD (R.T.) 1986 - Réduction in summer soil wetness induced by an increase in carbon dioxide in Science 232, pp.626-628.
- 123 - OLIVRY (J.C.) 1987 - Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la Basse-Casamance. In IAHS, Publ. n°168, pp. 501-512.
- 124 - POUYAUD (B.) 1986 - Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. In Coll. Etudes et Thèses, ORSTOM, 254p., Paris.
- 125 - POUYAUD (B.) 1987 - Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'Ouest en liaison avec les changements climatiques, in IAHS, Publ. n°168, 1987, p.447-461.
- 126 - POUYAUD (B.), COLOMBANI (J.) 1989 - Les variations extrêmes du lac Tchad : l'assèchement est-il possible ? in Annales de géographie, n°545, 98ème année p.1-23.
- 127 - Report to IPCC from Working Group 1 (1990).

- 128 - RODIER (J.) 1975 - Evaluation de l'écoulement annuel dans le sahel tropical africain. In Trav. et Doc. ORSTOM, n°46, 121p., Paris.
- 129 - RODIER (J.) 1989 - Caractères généraux de l'hydrologie superficielle des zones arides et semi arides en Afrique - Leurs conséquences sur les études des ingénieurs. in Proceedings of the Sahel Forum "Etat de l'Art en hydrologie et en hydrogéologie UNESCO/CIEH/AIRE - Ouagadougou, 13-18 février 89 pp.19-37.
- 130 - SCHLESINGER (M.E.), MITCHELL (J.F.) 1987 - Climate model simulation of the equilibrium climatic response to increased carbon dioxide. In revue geophys., 25, pp.760-798.
- 131 - SIRCOULON (J.) 1987 - Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le début du 20ème siècle in pub. AISH, n°168, Vancouver, pp.13-25.
- 132 - SIRCOULON (J.) 1989 - Impact des changements climatiques sur les ressources en eau de surface en Afrique de l'ouest et centrale - L'expérience de l'ORSTOM in the Sahel Forum. UNESCO, Ouagadougou, Feb.89, p.691-701.
- 133 - VALENTIN (C.), CASENAVE (A.) 1989 - The impact of soil surface deterioration on runoff production in the arid and semi-arid zones of west Africa in the sahel Forum on the state of the art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa, UNESCO, Ouagadougou, feb. 89., p.53-60.
- 134 - WCIP 1.1987 - Developing policies for responding to climatic change. Villach and Bellagio (WMO/TD n°225).
- 135 - WIGLEY (T.M.C.), SANTER (B.D.) SCHLESINGER (M.E.), MITCHELL (J.F.B.) 1989 - Developing climate scenarios from equilibrium GCM results (submitted to CLIMATIC CHANGE) - see also Ref.14 of the introduction.

6 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1. Conclusions

Les simulations effectuées par les modèles de circulation donnent encore à l'heure actuelle des résultats très divergents quant à l'effet d'une augmentation du taux en CO_2 sur l'écoulement des zones arides et semi-arides.

Il a donc semblé utile d'analyser directement la situation passée des eaux de surface en zone sahélienne et le comportement actuel de celles-ci sous l'effet conjugué d'une modification climatique sévère (sécheresse prolongée) et d'une action anthropique croissante.

Il a été procédé ensuite à des scénarios simples répondant aux trois hypothèses d'une stationnarité climatique, d'une nouvelle aggravation du déficit des précipitations ou au contraire d'une reprise généralisée des pluies.

La connaissance quantitative des eaux de surface se heurte à la faible densité des réseaux de mesure et à la relative brièveté des chroniques d'observation. Néanmoins, les plus longues séries disponibles, les informations paléoclimatiques, le comportement hydrologique des bassins de recherche et l'évaluation des effets de la pression anthropique sur l'environnement représentent un faisceau précieux d'informations à exploiter.

Il est notoire que l'on assiste depuis le Pluvial Holocène (9000 ans BP) à une aridification de la zone saharo-sahélienne, mais ce phénomène n'a pas le caractère lent et progressif que l'on imagine en général. Les datations récentes ont montré que des conditions durables très arides ou très humides pouvaient s'installer en seulement quelques décennies. Par ailleurs les reconstitutions historiques du dernier millénaire montrent des oscillations de forte amplitude et des conditions très humides il y a seulement plusieurs siècles. Pour le seul 20ème on relève 5 périodes à l'écoulement alternativement rare et abondant.

La persistance de la sécheresse actuelle, tout à fait unique de nos jours en zone semi-aride, est riche d'enseignement

.../...

quant au comportement des trois entités caractérisant les eaux de surface (grands fleuves tropicaux, cours d'eau sahéliens et lacs) dans des conditions prolongées de déficit pluviométrique.

L'écoulement de la zone sahélienne présente une dualité due à des apports endogènes (cours sahéliens proprement dits) et des apports exogènes (fleuves tropicaux parvenant au Sahel ou le traversant ou alimentant les grands systèmes lacustres de la région). Ces diverses entités peuvent avoir des fonctionnements différents certaines années (1968 par exemple) de par leur zone d'alimentation en pluie ou pendant certaines périodes (cas du petit âge glaciaire) ; mais dans le cas où les sécheresses s'étendent vers le sud (période actuelle) le comportement déficitaire de l'écoulement est généralisé avec simplement quelques variations zonales.

Les grands fleuves tropicaux présentent une certaine inertie vis à vis des pluies (sauf influence locale des tributaires sahéliens) et sont finalement les meilleurs indicateurs des variations climatiques de grande amplitude.

Les cours sahéliens quant à l'écoulement, apparaissent très dépendants de la variation spatio-temporelle des pluies mais l'abondance des apports est fonction de la superficie. Les grands bassins, c'est à dire ceux ayant une superficie dépassant les 20000 km², voient de nos jours une diminution prononcée de l'écoulement par évaporation et dégradation hydrographique. L'autre catégorie, celles des petits bassins, ne connaît de diminution ni de l'écoulement annuel ni de l'importance des crues. Cette constatation est capitale pour les normes hydrologiques à prendre en compte dans les aménagements. Le phénomène, dû à l'extension des zones érodées et à l'imperméabilisation des états de surface est la conséquence conjointe de l'aridité climatique et de la pression anthropique.

.../...

Cette action anthropique sur le milieu naturel et par les zones mises en culture ne peut que croître puisque la population des six pays sahéliens francophones devrait passer de 38 millions maintenant à 54 millions en l'an 2000 et à 100 millions en l'an 2025 (d'après Nations-Unis-ST/ESA/SER-A/106/Add1).

Ceci signifie que d'ici 40 ans, le "stock" d'eaux de surface disponible peut varier de plus ou moins 30 à 40%, la demande en eau augmentera de 250 à 500% en fonction de l'accroissement démographique et de l'augmentation souhaitée du niveau de vie...

Quant aux grands systèmes lacustres, leur degré de remplissage dépend étroitement des apports des zones méridionales. Dans le cas du lac Tchad, il faut une succession de plusieurs années très déficitaires pour qu'il atteigne le stade du "Petit Tchad" où il prend alors un nouvel équilibre ; deux années consécutives très abondantes suffisent pour le "remettre en eau". Le passé a montré que le lac pouvait pratiquement s'assécher (15ème siècle) puis se remplir très rapidement en chassant les populations... Un assèchement total du lac sur plusieurs années est improbable à moins que l'homme modifie durablement les apports de l'ensemble Logone-Chari par d'importants aménagements.

6.2. Recommandations

Une meilleure connaissance de l'évolution possible de l'écoulement en zone aride et semi-aride d'Afrique de l'Ouest demanderait,

6.2.1. sur les grands bassins fluviaux :

- une meilleure estimation des précipitations sur le Fouta Djallon (château d'eau des hauts bassins du Sénégal et du Niger),
- une meilleure appréciation de l'évolution des nappes aquifères et de l'évapotranspiration à macro-échelle,

.../...

- la prise en compte et la modélisation de tous les aménagements notables.

6.2.2. Sur les bassins sahéliens, au sens large :

- Une meilleure connaissance hydrologique de la région (mesures couvrant des zones peu connues de la Mauritanie, du Mali et reprise des études au Tchad, renforcement des réseaux de mesures existant avec meilleur suivi des basses eaux et des crues),
- une meilleure connaissance du comportement actuel des bassins sahéliens par suivi de l'évolution des états de surface, sur le terrain et par imagerie satellitaire, puis en procédant à la reconstitution de lames ruisselées (par simulateur de pluie et modèles mathématiques) sur les bassins représentatifs des divers états de surface, de sous-sol (schiste, granite, grès, marne, etc...), de relief et de végétation ; ces bassins ayant déjà été étudiés dans le passé mais sous des conditions plus humides.

Ceci demande en particulier d'assurer un suivi de la végétation et de la dégradation des sols en intégrant les données socio-économiques et voir dans quelles conditions peut être faite la régénération des sols.

Il faudrait ainsi :

- Voir si le degré d'irréversibilité de l'état de surface a été atteint (reg),
- apprécier les possibilités de retour de la vie biologique en fonction des pluies,
- acquérir l'adhésion des populations à une meilleure gestion du couvert arboré-herbacé,
- faire l'inventaire critique des techniques de prévention et de restauration des sols,
- une évaluation approfondie des effets de la pression démographique croissante sur l'occupation des sols (mise en culture et types de culture).

6.2.3. En ce qui concerne le lac Tchad

- Un suivi rigoureux des interventions humaines sur les cours d'eau (évaluation des effets des aménagements de régularisation du Logone ou prélèvement artificiel d'une partie des eaux du Logone pour déverser dans le Mayo

Kebi, etc...).

- une modélisation du fonctionnement du lac en fonction des apports influencés par les aménagements existants ou projetés.

REPORTS PUBLISHED IN THE WORLD CLIMATE APPLICATIONS PROGRAMME SERIES

- WCAP - 1 CLIMATE AND HUMAN HEALTH. Proceedings of the Symposium in Leningrad, 22-26 September 1986, Volume I
- WCAP - 2 CLIMATE AND HUMAN HEALTH. Proceedings of the Symposium in Leningrad, 22-26 September 1986, Volume II
- WCAP - 3 ANALYZING LONG TIME SERIES OF HYDROLOGICAL DATA WITH RESPECT TO CLIMATE VARIABILITY - Project Description
- WCAP - 4 WATER RESOURCES AND CLIMATIC CHANGE: SENSITIVITY OF WATER-RESOURCE SYSTEMS TO CLIMATE CHANGE AND VARIABILITY. Norwich, U.K., November 1987
- WCAP - 5 FOURTH PLANNING MEETING ON WORLD CLIMATE PROGRAMME - WATER. Paris, 12-16 September 1988
- WCAP - 6 CLIMATE APPLICATIONS: ON USER REQUIREMENTS AND NEED FOR DEVELOPMENT [Reports of the CCI rapporteurs on Users' Requirements and Publicity (F. Singleton) and New Approaches in Applications (D.W. Philips) to the tenth session of the Commission for Climatology, Lisbon, April 1989]
- WCAP - 7 DROUGHT AND DESERTIFICATION. [Report of the CCI Rapporteur on Drought and Desertification in Warm Climates to the tenth session of the Commission for Climatology (Lisbon, April 1989) (L.J. Ogallo) and lectures presented at the training seminar in Muñoz, Philippines (14-24 November 1988) by N. Gbeckor-Kove]
- WCAP - 8 REPORT OF THE FIRST SESSION OF THE CCI WORKING GROUP ON CLIMATE AND URBAN AREAS INCLUDING BUILDING AND OTHER ASPECTS AND SOME RELATED PAPERS by Professors E. Jauregui and Shen Jianzhu, Members of the Working Group
- WCAP - 9 REPORT OF THE EXPERT MEETING ON CLICOM CLIMATE APPLICATIONS (INCLUDING CARS), Geneva, 6-10 November 1989
- WCAP - 10 URBAN DESIGN IN DIFFERENT CLIMATES by B. Givoni, University of California, U.S.A.
- WCAP - 11 FIFTH PLANNING MEETING ON WORLD CLIMATE PROGRAMME - WATER, Laxenburg, Austria, 30 April - 4 May 1990
- WCAP - 12 IMPACT POSSIBLE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES A VENIR SUR LES RESSOURCES EN EAU DES REGIONS ARIDES ET SEMI-ARIDES, par Jacques Sircoulon, ORSTOM, Paris, France, June 1990