

OFFICE DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE  
OUTRE-MER

24, Rue Bayard - 75008 PARIS

OBSERVATIONS IMMÉDIATES DES PHÉNOMÈNES ENGENDRÉS  
PAR LES ALÉAS CLIMATIQUES ACTUELS  
EN ZONE SAHÉLIENNE

R. FAUCK

Compte rendu de fin de contrat  
d'une recherche financée par  
la Délégation Générale  
à la Recherche Scientifique  
et Technique

## PLAN DU RAPPORT

### 1ère partie.

#### COMPTE RENDU SCIENTIFIQUE

- Résumé
- Introduction
- Les opérations de recherche et les conditions de réalisation
- Les principaux résultats des recherches
- Conclusions générales
- Liste des annexes
- Liste des publications prévues

### 2ème partie.

#### ANNEXES SCIENTIFIQUES

## RESUME

\*\*\*\*\*

Les travaux entrepris dans le cadre de la convention d'Action Urgente, signée entre la DGRST et l'ORSTOM et approuvée le 19 décembre 1973, ont eu pour objectif l'inventaire des phénomènes engendrés par la sécheresse exceptionnelle dans le Sahel. Les opérations ont été exécutées durant toute l'année 1974 au Sénégal, en Mauritanie, en Haute-Volta, au Niger, au Tchad, dans le Nord-Cameroun, par des chercheurs appartenant aux disciplines suivantes : Pédologie, Hydrologie, Agroclimatologie, Botanique, Ecologie, Agronomie, Géographie, Démographie, Sociologie.

Trois types d'opérations ont été menées :

- la mise en place de moyens complémentaires pour des programmes en cours ;
- le démarrage de nouveaux programmes ;
- la réalisation de travaux de synthèse sur l'effet de la sécheresse.

Les principaux résultats obtenus sont résumés dans un compte-rendu scientifique, auquel sont annexés douze textes traitant de problèmes particuliers concernant, soit le milieu naturel, soit le milieu humain. Une liste des publications prévues, ou en cours d'édition, complète le dossier.

1ère PARTIE

-:-:-:-:-

COMPTE RENDU SCIENTIFIQUE



## INTRODUCTION

=====

Le Sahel est une unité naturelle située au sud du Sahara, que l'on peut délimiter sur les cartes géographiques par le tracé des isohyettes 100 et 500 mm. Il fait partie des zones écologiques du globe recevant annuellement des précipitations de faible importance, et d'inégale répartition dans le temps et l'espace. Les conditions de semi-aridité y sont la règle et des cas de sécheresse exceptionnelle ont plusieurs fois été enregistrés dans le passé. Pourtant, la dernière période de sécheresse anormale, entre 1970 et 1974, a eu des conséquences exceptionnellement graves, tant dans les domaines du milieu physique que dans celui du milieu humain. Les diverses analyses du phénomène ont montré que les conditions climatiques ont affecté gravement les disponibilités en eau. Mais elles ont également mis en évidence l'existence d'un déséquilibre grave entre les ressources vivrières et les populations humaines et animales.

Il convenait d'approfondir cette première analyse, compte tenu de la nécessité de proposer rapidement aux Etats du Sahel des mesures de lutte contre les conséquences des sécheresses périodiques. Au préalable, un inventaire systématique des phénomènes engendrés par les aléas climatiques s'imposait d'urgence. C'est cet objectif qui a motivé la mise en place, en novembre 1973, d'une Action Urgente de la DGRST.

Avant d'étudier les conditions de réalisation en 1974 de cette Action Urgente, il est utile de rappeler l'importance des connaissances réunies sur les régions sahéliennes d'Afrique par les Organismes de Recherche français. L'ORSTOM, pour sa part, a mené à bien de nombreuses études sur le milieu physique dès 1948, sur le milieu humain, plus récemment. Ces études ont toutes été réalisées à partir de bases situées dans le Sahel et dans ses abords immédiats (Dakar, Richard-Toll, Ouagadougou, Niamey, N'Djamena). Fin 1973, les équipes de chercheurs installées en permanence dans ces bases poursuivaient la réalisation d'une série de programmes axés vers une meilleure connaissance du Sahel.

Dans ces conditions, il était logique de leur confier les opérations particulières de recherche définies dans le cadre du contrat de l'Action Urgente.

Cette dernière donnait la priorité à l'observation des phénomènes engendrés par la sécheresse. En fait, toute observation, pour être utile, doit être suivie d'enregistrement, puis d'analyse critique. C'est donc en s'efforçant de réaliser au mieux ces trois étapes, sans se limiter nécessairement à la première, que les diverses opérations de recherches ont été élaborées.

#### LES OPERATIONS DE RECHERCHE ET LES CONDITIONS DE REALISATION

=====

Compte tenu de ce qui précède, les moyens fournis par l'Action Urgente ont servi à financer trois types d'opérations en 1974 :

- 1 - la mise en place de moyens complémentaires à la disposition de certains des programmes de recherche en cours dans le Sahel ;
- 2 - le démarrage de nouveaux programmes de recherche ;
- 3 - la mise en route de travaux de synthèse utilisant les connaissances résultant d'études antérieures.

#### I - MISE EN PLACE DE MOYENS COMPLEMENTAIRES POUR LES PROGRAMMES EN COURS.

Il a été jugé opportun d'accélérer certains des travaux ou de développer certains aspects des recherches en cours fin 1973, afin de fournir plus rapidement des éléments de réponse aux questions posées dans le thème de l'Action Urgente. Il s'agit des programmes suivants :

- a) étude des mécanismes de l'évaporation en Haute-Volta.

Les observations recueillies en 1974 complètent celles obtenues les années précédentes, et c'est pourquoi leur publication fera l'objet

d'un document commun ; une note technique (cf. annexe) présente les principaux résultats.

b) étude d'écosystèmes représentatifs sahéliens.

Il s'agit du renforcement de recherches interdisciplinaires menées, depuis plusieurs années, dans le Ferlo, au Sénégal. Les travaux complémentaires ont porté en 1974 sur la comparaison des divers milieux avant et pendant la sécheresse. Cependant, cette comparaison ne portera tous ses fruits que dans la mesure où les recherches seront poursuivies jusqu'après le retour des saisons climatiques normales sur le plan de la pluviométrie.

c) étude des systèmes pastoraux des zones sahéliennes et sahélo-soudaniennes de Haute-Volta.

Il s'agit de recherches qui avaient débuté avant la période de sécheresse et qu'il a paru utile d'étendre pour mieux comprendre l'impact des aléas climatiques sur les systèmes pastoraux.

d) occupation des sols et mise en valeur des terres neuves.

Une aide avait été prévue pour intensifier ce programme. En définitive, elle n'a pas été jugée utile, compte tenu de la localisation des études dans une région plus soudanienne que sahélienne. Les moyens ont été transférés à une opération de recherche engagée plus au nord et concernant les relations entre le fleuve Sénégal et l'arrière pays sahélien (programme communautés rurales et vie pastorale).

e) étude des mouvements de migration en Haute-Volta.

La contribution apportée à ce programme concerne seulement l'impact spécifique de la sécheresse sur les migrations. Les résultats obtenus ne peuvent être détachés du contexte général des mouvements de population, et de ce fait, leur diffusion sera retardée pour faire partie d'une étude plus générale. Les principaux résultats sont cependant exposés plus loin.

f) recherches démographiques

Des recherches étaient en cours fin 1973, au Sénégal, en Haute-Volta, au Cameroun. Il a paru plus efficace de ne pas disperser les efforts et de limiter l'apport des moyens complémentaires aux études démographiques dans une région sahélo-soudanienne située juste au sud de la frontière du Tchad, dans le Nord-Cameroun.

II - MISE EN PLACE DE NOUVELLES OPERATIONS DE RECHERCHE.

Cette mise en place représente une augmentation des moyens de recherche dont les effets ne peuvent être effectifs qu'à court ou moyen terme, ce qui explique que dans la plupart des cas, il ne sera pas toujours possible de fournir, fin 1974, des résultats importants, la durée de l'étude ayant été inférieure à une année.

Les opérations nouvelles sont les suivantes :

a) étude de l'influence des conditions climatiques exceptionnelles sur l'évolution des sols dans les régions sahéliennes du Tchad ;

b) étude de l'utilisation des sols salés de la vallée du Sénégal démarrée au début de l'année 1974 avec l'affectation à Dakar d'un pédologue spécialiste des sols halomorphes.

Ces deux programmes de recherches pédologiques, démarrés effectivement courant 1974, devront être poursuivis en 1975 avec d'autres sources de financement avant que des résultats inédits puissent être diffusés.

c) détermination des débits en saison sèche des principaux cours d'eau des régions africaines à longue saison sèche. Les données résultant des observations réalisées durant l'hivernage 1974 sont disponibles.

d) installation au Niger, d'une station permanente de références des régimes hydrologiques subdésertiques. Cette station, qui

commencera à fonctionner à partir de la fin de l'année 1974, complète le dispositif qui a permis de recueillir les données du programme précédent ;

e) Application de méthodes élaborées à la prévision statistique ; analyses fréquentielles de pluviosité avec expression fréquentielle de la période de végétation ; les travaux se poursuivront en 1975, compte tenu de l'intérêt des premiers résultats.

f) Elaboration d'un modèle d'analyse fréquentielle du déficit hydrique (aspect méthodologique). Certains résultats sont disponibles dès à présent.

Par contre, deux opérations envisagées fin 1973 en Mauritanie, n'ont pu être menées à bien pour des raisons indépendantes de la volonté de l'Office. Il s'agit, d'une part, de la caractérisation de sols subarides, d'autre part, de l'étude du bilan de l'eau de diverses sebkas du sud de la Mauritanie. Les moyens ont été reportés sur une opération particulière qui n'avait pas été prévue initialement, intitulée :

"étude de l'impact de la sécheresse sur le lessivage, le ruissellement et l'érosion des sols." Elle est caractérisée par la mise en place, en Haute-Volta, d'une expérimentation avec un simulateur de pluies, dont l'utilisation était en cours en Côte d'Ivoire. Des résultats sont disponibles fin 1974, mais l'expérimentation de ce simulateur de pluies devrait être poursuivie en 1975 pour confirmer les premières données recueillies.

### III. REALISATION DE TRAVAUX DE SYNTHESE

Enfin l'Action Urgente a été l'occasion de mettre en route une série de mises au point et de synthèses, organisées sur le thème général de l'impact de la sécheresse sur les divers milieux du Sahel. La rédaction des synthèses, dans les domaines de recherches où de nombreuses données avaient été accumulées antérieurement, a surtout été possible en hydrologie, en géographie et en sociologie. Ces données avaient toutes été exploitées, mais rarement avec pour objectif primordial la caractérisation des conséquences des aléas climatiques.

Dans ces conditions, les mises au point lancées dans le cadre de l'Action Urgente, sont les suivantes :

a) Etude de la dynamique saisonnière de trois types de sols du Tchad ; déterminisme, effets évolutifs, conséquences pour l'exploitation.

b) synthèse des études sur les écoulements en zone aride ;

c) application de modèles mathématiques à l'étude de l'écoulement en Mauritanie ;

d) conséquences hydrologiques de la sécheresse intertropicale ;

e) mises au point sur la sécheresse et les problèmes humains en Afrique sahélienne.

Toutes ont pu être menées à bien dans les délais impartis, malgré les difficultés de réalisation dans un cadre de temps limité à une seule année budgétaire. Les compte rendus correspondant à tous ces travaux de synthèse, sont fournis en annexe au présent document.

#### LES PRINCIPAUX RESULTATS DES RECHERCHES

=====

Les recherches ont été exécutées dans cinq Etats différents : Sénégal, Haute-Volta, Niger, Tchad et Cameroun, par des chercheurs dont la spécialisation couvrait les domaines de la Pédologie, de l'Hydrologie, de l'Agroclimatologie, de la Botanique, de l'Ecologie, de l'Agronomie, de la Géographie, de la Démographie, de l'Economie et de la Sociologie.

La plus grande partie des résultats disponibles en fin 1974 est exposée dans les compte-rendus placés dans les annexes scientifiques en 2ème partie ; les autres seront diffusés dans des publications prévues en 1975. Leur liste est fournie en fin de document. Le compte-rendu qui suit se limite à un exposé synthétique des résultats les plus marquants. Il n'est pas présenté par Etats, ou par disciplines scientifiques, mais par programmes en suivant les références du VIème Plan.

PROGRAMME I - ETUDE DU CYCLE ET DU BILAN DE L'EAU.

La sécheresse exceptionnelle s'est traduite en premier lieu par une modification du cycle de l'eau, avec pour conséquence pratique une diminution des ressources utilisables. Dans ces dernières on peut distinguer, d'une part la fraction de l'eau, qui ruisselle, emprunte le réseau hydrographique ou s'accumule temporairement dans les lacs et les cuvettes, d'autre part la fraction de l'eau qui pénètre dans les sols et peut s'y trouver mise temporairement en réserve pour une utilisation ultérieure par les plantes.

Dans les deux cas le bilan hydrique global est difficile à évaluer du fait des pertes par évaporation, évapotranspiration, percolation dans les horizons profonds des sols. Un de ces termes de grande importance quantitative est l'évaporation sur masses d'eau libre pour lequel un effort important de recherche a été consenti en Haute-Volta. Une fiche technique en annexe expose les conditions d'exécution du programme et les premiers résultats obtenus. A la succession d'années déficitaires sur le plan de la pluviométrie, est venu s'ajouter l'hivernage de 1974 marqué par des pluies très nombreuses et abondantes. De ce fait, les données recueillies sont suffisantes pour permettre la mise au point d'une synthèse qui sera éditée en 1975. Un premier résultat est à noter : l'évaporation du lac de Bam est supérieure à 2 mètres.

Complémentairement à l'étude de ses différents termes, le bilan hydrique a fait l'objet d'une approche globale. Deux opérations nouvelles ont été menées à bien, toujours dans le cadre de l'Action Urgente, d'une part une synthèse des études antérieures sur les écoulements en zone aride, d'autre part l'application d'un modèle mathématique

au bilan des eaux en Mauritanie. En annexe, figurent les notes techniques relatives à ces opérations. On constate que les connaissances sur les régimes hydrologiques des bassins versants sont nombreuses mais qu'elles sont de valeur inégale selon la taille des unités d'étude. Aussi des recherches complémentaires devraient être engagées sans retard dans les zones sahéliennes. De plus, il serait extrêmement utile que la synthèse en cours de rédaction puisse être imprimée et largement diffusée car elle fournira des données de base essentielles pour l'utilisation des ressources en eau superficielles. Il en est de même de l'étude particulière sur le bilan des eaux en Mauritanie, car la simulation des débits en tous points du bassin de Ghorfa a été très satisfaisante.

La proportion de l'eau qui est soustraite au ruissellement pour transiter dans les sols est relativement importante compte-tenu de la superficie des zones sahéliennes. Les travaux engagés au Tchad ont permis d'obtenir un certain nombre de résultats partiels, sur cette question. Ils sont exposés dans le chapitre suivant compte tenu de l'influence du cycle de l'eau sur la pédogenèse.

#### PROGRAMME II - ETUDE DE LA PEDOGENESE.

Une étude de la dynamique saisonnière de trois types de sols du Tchad est en cours depuis cinq années. Compte tenu des objectifs de l'Action Urgente, le responsable du programme a tenté une première mise au point des résultats en mettant l'accent sur les conséquences de la sécheresse sur le bilan hydrique des sols sous divers couverts végétaux. Ces derniers modifient fortement l'équilibre climat-sol dans les régions soumises à de longues saisons sèches et à de grandes irrégularités des précipitations. Il en résulte des différences notables entre la végétation naturelle et les plantes cultivées, la première utilisant nettement mieux que les secondes les ressources en eaux des profils de sols. L'impact de la sécheresse accentue ces différences et il apparaît que la diminution de la durée de la saison utile a autant d'importance pour le développement de la végétation que la pluviométrie considérée dans sa valeur totale annuelle.

Les premiers résultats succincts (cf. annexe) permettent de définir les grandes règles d'une utilisation optimale des ressources en eau. En premier lieu, il convient d'augmenter autant que possible le profil cultural, c'est-à-dire la profondeur d'enracinement des plantes. Différentes méthodes sont possibles mais leur efficacité dépend étroitement du type de différenciation texturale du sol dont l'importance est d'autant plus grande que l'on se trouve dans des régions de plus en plus sahéliennes et arides. En second lieu, il convient d'effectuer les semis le plus tôt possible pour augmenter la durée de la saison utile des pluies. Cette conclusion pose le problème de la connaissance de la date limite des semis en fonction du facteur météorologique, point qui sera repris plus loin (cf. études agroclimatologiques).

### PROGRAMME III - ETUDE DE L'EROSION, DU TRANSPORT ET DE LA SEDIMENTATION

Des recherches sur le ruissellement, le drainage et l'érosion sont en cours sur divers sols ferrugineux tropicaux du centre de la Haute-Volta, en collaboration avec les Instituts de recherche du GERDAT, en particulier l'IRAT et le CTFT.

Les travaux ont débuté il y a trois ans et les résultats les plus marquants mettent en évidence l'intensité du ruissellement sur les champs de culture, surtout ceux qui, peu couverts, s'encroûtent facilement. Les taux étant de l'ordre de 30 à 40 % du total, il en résulte une érosion en nappe. Cependant celle-ci est relativement réduite (8 tonnes/hectare sur sol nu), ce fait semble en liaison avec la faiblesse des pentes sur le plateau Mossi. En fait l'ablation concerne de façon sélective les éléments les plus fins, c'est-à-dire ceux qui constituent la fertilité des sols (réserve hydrique et minérale) et les dangers d'érosion sont donc importants. De ce fait l'application de techniques anti-érosives s'impose, d'une part pour retenir les eaux de pluie et limiter le ruissellement érosif, d'autre part pour favoriser l'infiltration et ainsi augmenter les réserves en eau des sols, ces deux aspects de la dynamique de l'eau ayant une grande importance agronomique.

Les observations faites en 1974 dans le cadre de l'opération "Action Urgente" ont indiqué qu'en année déficitaire sur le plan pluviométrique l'érosion n'était pas inférieure à la normale. Il s'avère que l'effet érosif est surtout en rapport avec l'intensité et la répartition des pluies plus qu'avec leur total annuel. Les calculs effectués avec la formule de Wischmeier sur l'agressivité des pluies (R. annuel moyen de 450) montre que celle-ci est plus forte qu'en milieu méditerranéen et surtout qu'elle est parfois plus importante lors des saisons peu arrosées.

De l'état d'avancement des connaissances, on peut conclure à ce que les dangers d'érosion par ruissellement restent élevés durant les périodes de sécheresses exceptionnelles. Ils peuvent même être augmentés sensiblement par diminution locale de la protection des sols, du fait de la dégradation du tapis végétal naturel en relation avec l'abaissement des réserves hydriques des sols.

Pour approfondir ces questions, il a été décidé de réaliser près du lac de Bam une campagne d'expérimentation avec un simulateur de pluies ; ce dernier appareil en cours de fonctionnement en Côte d'Ivoire, a pu être amené sur le terrain en Haute-Volta en décembre 1974. La nouvelle phase des travaux qui doit commencer au début de 1975, soit en pleine saison sèche, a pour objet de préciser l'impact de l'intensité des pluies sur le ruissellement et de définir par voie de conséquence les meilleures techniques agricoles à préconiser dans les régions soudanaises et sahélo-soudanaises. Les résultats seront diffusés, comme par le passé, au fur et à mesure de leur obtention.

#### PROGRAMME IV - RECHERCHES SUR LES PROBLEMES DE L'EAU.

Depuis près de trente années, l'Office poursuit des relevés hydrologiques dans les régions sahéliennes et soudanaises, en particulier dans le cadre des réseaux hydrologiques qu'il gère pour des Etats africains. Les données de base recueillies ont été systématiquement publiées dans les Annuaire et Annales hydrologiques. De plus, elles ont fait l'objet d'interprétations et de synthèses mises à la disposition des utilisateurs sous forme de monographies des grands fleuves

(Sénégal, Niger, Chari, Logone, Tchad) ou de publications variées. Cependant, il est apparu que deux questions particulières en rapport avec la sécheresse pourraient être mises à l'étude, celle des débits en saison sèche et celle des conséquences hydrologiques de la sécheresse. En annexe figurent des notes techniques concernant les études réalisées en 1974.

Parmi les résultats obtenus, on note la détermination des débits de basses eaux avec précision pour de nombreuses stations. On constate que le Sénégal s'est complètement asséché à Bakel le 16 juin 1974, et que les deux cuvettes qui subsistent pour le lac Tchad sont devenues pratiquement indépendantes sur le plan hydrologique. La situation en juillet 1974 semblait être comparable à celle qui a été enregistrée lors de la grande sécheresse de 1907. Cependant, il est net que la sévérité de la sécheresse a été très inégale selon les régions du Sahel. Elle a été très marquée, toujours sur le plan de l'hydrologie de surface, en Afrique de l'Ouest et au Tchad et dans le Nord de la Haute-Volta.

Il est également très important de constater que les régions soudaniennes et guinéennes ont été aussi touchées que les régions sahéliennes. Il en est résulté que les fleuves qui sont issus des premières, comme le Sénégal et le Niger, ont pénétré dans le Sahel avec des débits anormalement faibles. Ce fait permet de mieux comprendre la gravité des conséquences de la sécheresse exceptionnelle dans le Sahel, et conduit à souhaiter que sa mise en valeur soit entreprise en étroite harmonie avec celle des régions adjacentes soudano-guinéennes.

#### PROGRAMME V - CARACTERISTIQUES AGRO-ECO-CLIMATIQUES REGIONALES.

La série de déficits pluviométriques annuels a eu pour conséquence un raccourcissement progressivement plus accusé, de 1968 à 1973, de la durée de la période de végétation, affectant le développement et la croissance des cultures comme de la végétation naturelle dévolue au pâturage. Il en est résulté une chute presque totale du rendement des plantes cultivées ainsi que de la productivité primaire

(et secondaire) des écosystèmes naturels, avec rupture d'équilibre dans les répartitions qualitative et quantitative des espèces.

La période de végétation intègre de façon continue, dans son déroulement, les éléments du climat atmosphérique et ceux du climat édaphique (résultante du climat atmosphérique et des caractéristiques physiques du sol) en un système physique auquel doivent s'ajuster les systèmes biologiques constitués par les plantes et leurs interactions. C'est en vue d'étudier la possibilité de tels ajustements, dans le cadre de l'Action Urgente, que les recherches de nature agro-éco-climatique ont été orientées vers la conception d'un modèle de formalisation fréquentielle de la période de végétation. Il est bien évident qu'une modélisation qui ne rendrait pas compte de la récurrence des phénomènes - de ceux, notamment, de probabilité faible mais d'incidence tragique - ne saurait répondre à la nécessité d'une prévision statistique. C'est donc dans la perspective "fréquentielle" qu'a été développé un modèle de la période de végétation généralisable à tous les climats et à tous les problèmes parce que pouvant intégrer données énergétiques et données hydriques, en agriculture comme en écologie (cf. la note en annexe sur la caractérisation du milieu agro-éco-climatique. Propositions méthodologiques).

Pour la mise en oeuvre de cette stratégie, ont été élaboré par ailleurs des outils permettant de passer aux domaines d'application. Ces outils sont de deux sortes selon qu'ils font appel ou non à l'informatique. Au niveau de la planification, ou pour une première approche opérationnelle, une figuration fréquentielle des limites et du contenu de la période de végétation peut être obtenue par la voie de la méthode des intersections, qui ne fait appel à aucun moyen - généralement onéreux - de traitement statistique. Un exemple d'application est donné en annexe, relatif de la productivité climatique relative d'un pâturage de région aride.

Dans le domaine opérationnel, une approche plus fine, et de nombreuses fois répétée pour couvrir tous les besoins découlant de la diversité des conditions de sols et de végétation, exige le recours à l'ordinateur. Ce dernier permet la simulation, dans laquelle la variabilité de l'information climatologique se trouve directement

exploitée. Elle conduit à la mise au point de modèles empiriques de simulation et d'analyse fréquentielle du déficit au niveau de sol et à celui du couvert végétal (cf. note annexe sur les modèles de simulation et d'analyse fréquentielle du bilan hydrique).

L'intérêt de ces recherches qu'il faudrait absolument poursuivre en 1975, devrait apparaître dans l'application qui en sera faite à l'étude du Liptako-Gourma, en Haute-Volta, où des projets de développement sont à l'étude. Elles devraient permettre une définition des potentialités agro-sylvo-pastorale, base de la mise en oeuvre d'une stratégie de lutte contre les conséquences des sécheresses périodiques.

#### PROGRAMME VI - ETUDE D'ECOSYSTEMES REPRESENTATIFS.

Depuis cinq années, une étude pluridisciplinaire visant à caractériser un ensemble d'écosystèmes est en cours dans une région sahélienne du Nord Ferlo au Sénégal. Un effort particulier a été mené / en 1974 pour définir les réponses de la couverture herbacée et de la strate ligneuse à l'alimentation en eau, et aux fluctuations climatiques. Les résultats ne sont pas tous disponibles, concernant le bilan de l'eau à Fete Ole en particulier, mais il est intéressant de noter, dès à présent, l'importance de la production ligneuse dans l'équilibre de l'écosystème, et également l'influence des variations climatiques et surtout de leurs arrières-effets sur la production primaire nette globale. Ces effets se transmettent par l'intermédiaire de l'épuisement progressif des réserves en eau des sols. En pratique, l'influence de la sécheresse se traduit surtout par une amputation progressive d'une partie de la strate ligneuse, et par une modification qualitative de la production herbacée.

Les études vont se poursuivre pour préciser en particulier dans quelles conditions se réalise ou non la régénération de la couverture végétale lorsque les conditions climatiques redeviennent normales.

PROGRAMME VII - LES COMMUNAUTÉS RURALES ET L'ÉVOLUTION DE LA VIE  
PASTORALES.

Dans ce domaine de recherches deux types d'opérations ont été engagées en 1974, complémentaires aux recherches menées dans le cadre des programmes généraux de l'Office. D'une part, le recueil et l'analyse d'observations sur les conséquences des aléas climatiques en 1974, d'autre part, l'analyse critique de divers phénomènes engendrés par des sécheresses enregistrées au cours du temps. Les travaux ont été réalisés dans les Etats suivants : Sénégal, Mauritanie, Haute-Volta, Niger auxquels il faut ajouter le Cameroun pour sa partie la plus septentrionale.

Dans cette dernière région, les conséquences de la sécheresse exceptionnelle ont été relativement peu accusées. Pourtant il y a eu une baisse de 50 % des rendements du coton, qui a compromis l'approvisionnement en graines des huileries de Maroua et de Kaele. D'autre part, le déficit des crues du Logone a eu des effets catastrophiques sur les cultures de riz et également sur les productions de la pêche, car l'assèchement de nombreuses plaines d'inondation a gravement perturbé le cycle de reproduction de certaines espèces de poissons. Enfin le bétail a souffert temporairement d'un manque de nourriture, ce qui s'est traduit par la perte de 15 % du total des troupeaux.

D'autres recherches ont été menées dans les régions sahélo-soudanaises de la Haute-Volta, où l'élevage occupe une place moins importante que dans le Sahel compte tenu de la présence de cultivateurs. Elle a conduit à distinguer un ensemble de pâturages pérennes et non trypanosomés dans le Nord, une zone médiane à pâturages non pérennes, parfois trypanosomés, souvent très cultivés, enfin une zone méridionale à pâturages pérennes mais incluse dans l'aire d'action de la glossine. C'est dans la zone centrale que l'équilibre traditionnel entre espace agricole et espace pastoral a été le plus perturbé par la sécheresse exceptionnelle. La mortalité du bétail s'y explique par un déséquilibre entre la charge par hectare et les ressources disponibles : stock fourrager, possibilités d'abreuvement. La charge a augmenté rapidement durant les dernières décennies du fait de la protection

du bétail contre la trypanosomiase avec, en particulier, immunisation du zébu. Il en est résulté une dégradation des pâturages et une augmentation des circuits de nomadisme et de transhumance ainsi qu'un allongement de leur durée. De ce fait, les conséquences de la sécheresse ont affecté progressivement des secteurs de plus en plus étendus dans les régions soudaniennes, avec pression sur les bourzoutières du Sourou et sur les abords de la Volta Noire, également avec accélération de l'émigration vers le sud-ouest et vers l'étranger.

Toujours dans la zone soudanienne limitrophe du Sahel, une autre étude a été menée en Haute-Volta sur les disettes enregistrées dans le passé, soit dans les documents administratifs, soit dans les souvenirs des populations locales du Yatenga. Il s'agit d'une région peuplée, dont la densité était déjà voisine de 50 hab/km<sup>2</sup> en 1930, et qui atteint le double actuellement. Les derniers grands défrichements ont cessé il y a trente ans et les cultures sont menées sur des sols fragiles et sensibles à l'érosion. Une grande famine a été enregistrée entre 1832 et 1839 et elle s'est traduite par d'importants mouvements de migration, outre un nombre considérable de victimes. Par la suite de nombreuses querelles entre éleveurs et cultivateurs ont surgi du fait de l'assèchement temporaire des puits et des mares. En 1913, une nouvelle période de sécheresse grave a été enregistrée avec famines et aussi exode temporaire du tiers de la population. Des chiffres de 40.000 morts ont été avancés pour l'année 1913. (famine Kobgha) et d'autres de 50.000 pour l'année 1914.

En 1925, 1926 et 1929 la répartition des pluies a été mauvaise mais la disette alimentaire qui apparaît en 1929 est due essentiellement aux invasions de sauterelles dont les nuées détruisent toutes les cultures. Des invasions graves sont signalées non seulement de 1928 à 1930, mais également de 1933 à 1934 et de 1940 à 1942. Par contre entre 1948 et 1954, les conditions pluviométriques ont été jugées normales et même très favorables pour les cultures et ce n'est qu'en 1961 qu'elles se sont dégradées. Par la suite, la situation économique s'est aggravée progressivement pour devenir catastrophique à compter de 1970. Actuellement, certains villages sont vidés de 50 % de leurs habitants partis chercher du travail en Côte d'Ivoire.

Non loin du Yatenga, dans l'Oudalan, on a cherché à évaluer l'importance des pertes de bétail subies par les éleveurs. L'auteur a cherché à établir dans quelle mesure divers comportements des populations face à la sécheresse exceptionnelle, avaient pu modifier l'importance de ces pertes. Les résultats (cf. note en annexe) mettent en évidence des différences notables selon la localisation des troupeaux auprès des divers points d'eau, mais également selon certains facteurs humains liés soit à l'ethnie, soit à la date plus ou moins tardive de l'exode.

Il apparaît également que les pertes les plus importantes sont survenues durant la transhumance et le séjour dans les zones soudaniennes. C'est ainsi que les troupeaux de zébus ne semblent pas capables de tirer parti des herbes dures des pâturages de ces dernières zones, et également des possibilités qu'y offrent les bas fonds humides. De plus, le bétail devient très sensible aux épizooties, aux tiques, aux taons. Tous ces faits expliquent en partie la difficulté qu'ont eu les éleveurs du Sahel à s'adapter aux régions situées plus au sud, outre les problèmes humains qui se sont posés à eux lors du contact avec les agriculteurs sédentaires. C'est pourquoi les nomades ont cherché à revenir, dans le Sahel malgré la perte en 1972-1973 de 43 % du total de leurs troupeaux. Cette constatation, jointe aux observations des autres études, indique la complexité des problèmes qui se posent dans les nombreux milieux physiques et humains qui constituent le Sahel.

Dans la vallée du Sénégal, les chercheurs ont retrouvé les traces de périodes difficiles comparables à celles de Haute-Volta : l'année 1914 est Hitande Marodgi, celle des distributions de riz, l'année 1935 Hitande Tioldi, l'année des mange-mils. Cependant les conditions d'utilisation du milieu sont différentes de celles du reste du Sahel. En effet, les habitants de la vallée du Sénégal fondent leur économie sur l'exploitation des terres de la vallée alluviale fécondées par la crue, et sur l'utilisation des bordures sahéliennes sous la dépendance des pluies d'hivernage. De juillet à octobre, la crue du fleuve submerge d'immenses terres alluviales en aval de Bakel. D'octobre à janvier, quand s'opère la décrue, les paysans sèment le sorgho dans les cuvettes libérées par les eaux. Outre ces vastes étendues couvertes

par la culture de décrue, des champs de berge se développent sur les rives les moins abruptes du fleuve et des marigots adjacents. Le sorgho cultivé en décrue demeure la principale ressource des habitants de la vallée.

Les paysans s'accommodent des variations interannuelles de la crue tant qu'elles ne sont pas excessives. En 1974, par exemple, avec une crue faible 80 000 ha ont été semés. Dans ce cas de retrait rapide des eaux, avec mise en culture des terres les plus basses offrant des conditions favorables pour le désherbage les rendements sont plutôt élevés. En 1950 la crue forte s'est traduite par une extension maximale des surfaces (180 000 ha) mais la décrue tardive, un drainage lent et mauvais, ont favorisé le développement des mauvaises herbes et les rendements ont été médiocres.

En 1972, la crue quasiment inexistante, du point de vue de la submersion, n'a laissé au paysan que des terrains d'une extrême étroitesse qu'il a semés même quand les durées de submersion étaient trop brefs. Bien que moins touchées, les cultures de berges n'ont pu se développer normalement en 1972. Les champs de maïs notamment accusent des baisses de surfaces et de rendements. D'après ces indications la production probable pour l'ensemble des cultures de décrue n'atteint pas les 10 % du chiffre normal.

Les habitants riverains du fleuve vivent aussi de la pêche. Cette ressource importante dépend de l'abondance du poisson vivant dans les eaux du fleuve ; or la reproduction a lieu pendant l'hivernage dans les eaux de crue, et cesse à la saison fraîche (novembre-décembre), et la pêche annuelle moyenne qui est estimée à 30 000 tonnes n'aurait atteint en 1969, après la crue très faible de 1968, que 15 000 tonnes. D'après les témoignages recueillis au début de l'année 1973, en l'absence de données chiffrées le volume de la pêche serait plus déficitaire cette année qu'en 1969. Il est significatif, que la ville de Matam, où le fond de la population est constitué de pêcheurs, ne consomme que du poisson de mer de Saint-Louis.

L'utilisation des terrains de parcours et de culture sur les bordures de la vallée a été perturbé par les déficits pluviométriques. Les exigences de la végétation sont forts variables, mais il est tout à fait inhabituel que la sécheresse ne permette aucune reconstitution du pâturage sur les bordures de la vallée de Kaédi jusqu'à Rosso. Il en résulte un afflux excessif de troupeaux à l'Ouest vers Keur-Massène et ce n'est qu'à l'extrême-est, vers Sélibabi que l'on a pu rencontrer des pâturages normalement fournis.

La succession d'années sèches a modifié le couvert arboré lui-même. Les arbres ont crevé en grand nombre, d'autres ont été élagués ou abattus, d'autres enfin n'ont pas porté les fruits habituels. Ainsi en 1972 la production des jujubiers était des plus faibles et la collecte de la gomme très médiocre. Cette mauvaise régénération de la végétation naturelle atteint les hommes directement, dans la mesure où les produits de cueillette constituent une part notable de leur alimentation et de leurs ressources. Mais ce sont les troupeaux qui ont été le plus vivement éprouvés, car le fourrage aérien est une source importante de nourriture. Déjà la sécheresse en 1968 avait provoqué l'élimination de 15 % à 25 % du bétail sénégalais et de 30 % du bétail mauritanien. Pour 1972, les chiffres de 70 à 80 % sont cités le plus couramment. Le bétail le plus éprouvé a été abattu, avec vente à vil prix des animaux. Enfin, les éleveurs véritables ont fait l'impossible pour préserver une partie du troupeau en lui faisant parcourir parfois plusieurs centaines de kilomètres, au prix de grandes souffrances pour les bêtes et les gens, pour atteindre les pâturages des régions de Maghama et Sélibabi, ou ceux, plus soudaniens, du Sénégal oriental.

L'impact des sécheresses a encore été plus grave sur les cultures d'hivernage. Par endroit les cultures les moins exigeantes en eau (haricots niébé, béréfs) ont pu atteindre leur maturité, mais les cultures importantes de mil et d'arachide n'ont pas été semées ou ont avorté. Ce n'est que vers l'extrême-Est dans les fonds de vallée des régions de Sélibabi et Bakel que l'on a observé des récoltes réelles bien que médiocres.

Enfin la sécheresse prolongée a souvent compromis l'alimen-

tation en eau des campements ou des villages ne disposant que de puits insuffisants. Le secteur des gros villages au Sud-Est de Matam, notamment Sintiou-Bamambi, compte parmi les plus éprouvés.

Des conclusions comparables aux précédentes ont été tirées d'une recherche située au Niger mais complétée par l'examen de données acquises dans d'autres pays du Sahel (cf. Note de synthèse en annexe). Il y aurait eu 30 000 morts au Niger en 1931, et un important exode lors des invasions de sauterelles. Cependant, la gravité des conséquences économiques de la sécheresse actuelle semble supérieure à celles qui ont eu lieu dans le passé. L'analyse confirme la destruction de l'équilibre fragile ressources-populations. Elle indique qu'une des causes du déséquilibre réside dans l'application préférentielle du progrès techniques à deux termes seulement de l'équilibre, d'une part la charge en bétail (protection sanitaire), d'autre part les ressources en eau d'abreuvement (forages). Lors de la sécheresse exceptionnelle, les troupeaux sont très souvent morts de faim et non de soif. Cependant, on ne peut pas généraliser car il y a des différences régionales et ensuite il faut séparer les sécheresses zonales comme celle de 1972, et les sécheresses plus localisées auxquelles les populations peuvent parfois s'adapter. L'auteur, conscient des perturbations graves qu'ont subi les relations sociales, propose en fin de compte de gérer la zone pastorale comme un ranch, en créant des réserves pastorales avec l'accord des populations.

En définitive les résultats des études précédentes sont concordants. Ils mettent cependant en évidence la pluralité des milieux qui constituent le Sahel, et la variété des voies possibles de développement.

Programme VIII.

ETUDES DE LA DEMOGRAPHIE ET DES MOUVEMENTS DE MIGRATION

Les effets de la sécheresse exceptionnelle sur les facteurs démographiques sont difficiles à préciser. Le plus souvent ils ne peuvent être séparés de ceux affectant les mouvements migratoires dont une des conséquences est une nouvelle répartition démographique des populations concernées.

Dans le Nord-Cameroun, une tentative a été faite pour préciser l'impact des mauvaises conditions pluviométriques survenues entre 1970 et 1973. La disette semble avoir accru la mortalité infantile, bien que les chiffres ne soient pas pleinement significatifs. Mais ses conséquences les plus nettes concernent le déclenchement de migrations, dont l'ampleur est difficile à cerner dans un laps de temps d'une année car elles sont plus ou moins temporaires et de plus elles débordent largement le cadre géographique de l'étude faite en 1974.

En Haute-Volta, le problème a pu être abordé dans tout son ensemble géographique, le pays Mossi. Ce dernier a moins souffert d'une sécheresse, au sens strict du terme, que d'une série inhabituelle d'années pluviométriques peu satisfaisantes. La quantité insuffisante, et/ou la mauvaise répartition des pluies ont conduit à la répétition de saisons agricoles plus ou moins déficitaires, et à une disette quasi-chronique. Cette dernière est d'autant plus accentuée que l'on remonte vers le Nord, où les conditions de la production agricole sont toujours les moins favorables. Elle a surtout affecté le Yatenga, à la fois très peuplé et septentrional.

Concrètement la disette s'est traduite par l'insuffisance du mil pour la consommation familiale, tandis que la médiocrité des revenus agricoles monétaires (récoltes de coton et arachide elles aussi médiocres et mauvaises) interdisait l'achat de céréales pour combler le déficit de la production familiale et créait des difficultés pour la satisfaction des besoins non-vivriers.

Cette insuffisance en mil et la médiocrité des revenus monétaires ont eu des répercussions importantes sur l'évolution de l'émigration à partir du pays Mossi, dont deux formes peuvent être distinguées.

a) On observe à partir de 1969-70, un accroissement sensible des flux annuels de migrants vers l'étranger, essentiellement la Côte d'Ivoire. On ne saura qu'ultérieurement si le supplément de départs annuels disparaîtra avec le retour de conditions climatiques normales ou si la "sécheresse" aura été le facteur ou le prétexte d'une amplification durable de l'émigration vers l'étranger. Les flux de retour de migrants suivent une évolution parallèle, mais l'accroissement est nettement plus modeste : soit des migrants installés depuis plusieurs années à l'étranger ont décidé de surseoir à leur retour en Haute-Volta, soit des migrants partis depuis 1969-70, ont choisi de séjourner à l'étranger pendant des périodes plus longues que leurs prédécesseurs. En définitive par rapport aux conditions anciennes de l'émigration, il y a un déficit des flux de retour.

b) Le pays Mossi est affecté depuis quelques années par un nouveau type de mouvement d'émigration conduisant à l'installation de familles d'agriculteurs mossi dans le sud et surtout l'ouest de la Haute-Volta, en particulier dans la vallée de la Volta noire et ses principaux affluents. Ce mouvement spontané s'est développé progressivement, puis brutalement il s'est accéléré à partir de 1968-70. Il affecte presque exclusivement l'Ouest du pays Mossi pour s'installer dans d'autres régions voltaïques.

Enfin la sécheresse exceptionnelle est directement à l'origine d'un véritable exode qui s'est manifesté depuis 1968-69, à partir des établissements Mossi, qui, s'étaient constitués tout au long de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, sur les marges sahéliennes du pays Mossi, dans les régions de Djibo et Aribinda. Toutes originaires du Nord du pays (de Ouahigouya à Pissila), ces familles retournent dans leur village natal ou, ce sont les plus nombreuses, se dirigent soit vers la Côte d'Ivoire, soit vers les aires d'immigration de l'Ouest de la Haute-Volta. Il s'agit vraisemblablement d'un véritable abandon par les Mossi des aires d'immigration ancienne pré-sahéliennes.

Des observations complémentaires sont nécessaires pour pouvoir tirer des conclusions définitives sur l'impact des aléas climatiques sur les migrations, mais dès à présent il est certain que cet impact est notable, et que ses conséquences économiques sont importantes.

#### CONCLUSIONS GENERALES

Le sujet traité est vaste puisqu'il recouvre différents aspects des milieux naturels et humains, dans une région s'étendant de l'Océan Atlantique à la frontière du Soudan, soit sur une distance de plus de 3 000 km. Sur ce sujet les travaux n'ont duré qu'une année, ce qui est peu pour mener à bien des recherches approfondies.

Pourtant, de l'ensemble des résultats obtenus, il se dégage un certain nombre de conclusions centrées autour d'une idée commune, celle que les conséquences de la sécheresse exceptionnelle résultent essentiellement d'un déséquilibre entre les ressources et les populations.

Avant que les récents aléas climatiques n'interviennent dans le Sahel, la croissance démographique, naturelle pour les hommes, exceptionnelle pour le bétail en particulier du fait de l'impact de la protection sanitaire, avait déjà conduit à une surcharge relative de certains des écosystèmes pâturés. Lorsque la sécheresse anormale est intervenue les ressources en eau de surface et de nappe ont diminué fortement. Cette diminution s'est réalisée dans des conditions fort variables selon les régions compte tenu de la variabilité de la pluviométrie et en fonction de l'existence ou non de forages profonds, de l'ampleur variable des crues des grands fleuves. Les ressources alimentaires quant à elles ont été affectées d'une manière plus homogène, par diminution des productions agricoles, par épuisement des réserves en mil, par dessèchement prématuré des pâturages. Il en est résulté un déséquilibre ressources-populations brutal provoquant des disettes, une mortalité spectaculaire du bétail, des exodes des populations

soit vers des régions plus favorables sur le plan climatique, soit vers des villes. Cette analyse conduit à souhaiter que toute lutte contre les conséquences de la sécheresse soit précédée d'une définition des conditions de réalisation d'équilibres stables entre les populations et les ressources renouvelables. Ces dernières sont variées bien que limitées et il faut donc s'efforcer de trouver les moyens de les augmenter (barrages, forages par exemple), pour faire face aux croûts démographique prévisibles dans l'avenir;

Il convient alors de ne pas considérer le Sahel comme une seule région naturelle, mais comme une mosaïque d'écosystèmes, suffisamment différents entre eux pour que leurs possibilités de développement soient très variées. Ainsi le Ferlo au Sénégal avec des sols sur sables, des nappes profondes et abondantes et la présence de la vallée du Sénégal, et le Yatenga en Haute-Volta, avec des sols sur granites, peu de nappes phréatiques et une forte densité de population, n'ont pas les mêmes potentialités agrosylvo-pastorales bien que les conditions pluviométriques soient souvent comparables.

D'autre part, les mesures à prendre pour le développement doivent tenir compte de la complémentarité qui existe entre le Sahel et les régions soudaniennes, autre notion qui se dégage nettement des travaux menés dans le cadre de l'Action Urgente. Les régions ont elles-aussi été affectées, par les aléas climatiques: leur production agricole a été perturbée, les crues des grands fleuves qui se dirigent vers le Sahel ont été fortement diminuées et des migrations de populations venant du Nord ont provoqué des troubles économiques graves. Il en résulte que tout ce qui se passe, sur les plans humains et économiques dans le Sahel se répercute dans les régions soudaniennes, et même guinéennes. Il est d'autre part évident que ces dernières régions plus favorisées par les conditions climatiques et édaphiques représentent des possibilités de mise en valeur agricole moins aléatoires que les pays situés à la limite sud du Sahara. On peut donc conclure à la nécessité de ne pas séparer arbitrairement le développement du Sahel de celui des zones qui lui sont adjacentes,

ce qui revient à prévoir toutes les recherches et les projets d'aménagement dans l'ensemble des régions à longue saison sèche d'Afrique.

En ce qui concerne précisément les recherches, l'effort actuel doit être poursuivi et intensifié en particulier dans les domaines suivants :

a) Inventaire des ressources en sols et définition de leurs possibilités d'utilisation, compte tenu de la dynamique de l'eau dans les profils :

b) Détermination des potentialités agro-sylvo-pastorales des différents écosystèmes, avec l'étude fréquentielle des périodes de végétation ;

c) Détermination des régimes hydrologiques dans les différentes unités naturelles du milieu ;

d) Caractérisation de la dynamique du développement dans les diverses communautés rurales et pastorales du Sahel et également des régions avoisinantes.

La liste n'est pas exhaustive, mais elle indique déjà en elle-même l'ampleur des recherches à réaliser.

Ce qui précède nous amène à penser qu'il est possible sur le plan technique de trouver des solutions aux problèmes d'aménagement du Sahel, à condition de ne pas perdre de vue la fragilité de l'équilibre des écosystèmes qui le constituent. C'est donc une conclusion relativement optimiste.

LISTE DES DOCUMENTS ANNEXES

Etude du cycle et du bilan de l'eau (J. RODIER)

- I Mécanismes de l'évaporation en Haute-Volta
- II Synthèse des études sur les écoulements en zone aride
- III Application du modèle mathématique au bilan des eaux en Mauritanie.

Etude de la pédogénèse (P. AUDRY)

Etude de la dynamique saisonnière de trois types de sols du Tchad : déterminisme, effets évolutifs, conséquences pour l'exploitation.

Recherches sur les problèmes de l'eau (J. RODIER)

- I Détermination en saison sèche des débits des principaux cours d'eau
- II Conséquences hydrologiques de la sécheresse intertropicale.

Caractéristiques agroclimatiques (P. FRANQUIN)

- I La caractérisation du milieu agroclimatique. Propositions méthodologiques
- II Modèles de simulation et d'analyse fréquentielle du bilan hydrique
- III Evapotranspirations potentielles PENMAN pour les stations météorologiques des zones sahéliennes et soudaniennes.

...

Etude du milieu rural et de la dynamique du développement

I Mise au point sur la sécheresse et les problèmes humains  
en Afrique Sahélienne

par E. BERNUS

II La sécheresse dans l'extrême Nord du Cameroun

par J. BOULET

III Enquêtes sur les pertes de bétail dans le Nord de la Haute-Volta

par H. BARRAL.

LISTE DES PUBLICATIONS PREVUES EN 1975

Il s'agit des publications soit en cours d'édition, soit en cours de rédaction, réalisées suite aux travaux de l'action urgente.

MECANISMES DE L'EVAPORATION AU LAC DE BAM

- note technique sur les installations
- recueil des résultats bruts d'évaporation
- étude de l'évaporation des nappes d'eau libre

ETUDE SUR LES ECOULEMENTS EN ZONE ARIDE

- mémoire de synthèse
- rapport technique sur un modèle simplifié de ruissellement pour zone aride

RECHERCHES SUR LES PROBLEMES DE L'EAU

- synthèse sur les débits en saison sèche des principaux cours d'eau du Sahel
- étude des conséquences hydrologiques de la sécheresse intertropicale

ETUDE DE LA PEDOGENESE

- étude comparée du bilan et du régime hydriques de trois types de sols du Tchad sous différents couverts végétaux, par P. AUDRY.

ETUDE DE L'EROSION, DU TRANSPORT ET DE LA SEDIMENTATION

- bilan de trois années d'observation à la station de SARIA (Haute-Volta) par ROOSE (A.J.), ARRIVETS (J.) et POULAIN (J.F.).

ETUDE DU MILIEU RURAL ET DE LA DYNAMIQUE DU DEVELOPPEMENT

- introduction à la géographie des aires pastorales soudaniennes  
de Haute-Volta

par M. BENOIT

- Chronique des saisons agricoles au Yatenga (Haute-Volta) -  
1907- 1973.

par J.F. MARCHAL.

2ème PARTIE

-:-:-:-:-

ANNEXES SCIENTIFIQUES



ETUDE DU CYCLE ET DU

BILAN DE L'EAU

-:-:-:-:-

I - MECANISME DE L'EVAPORATION EN HAUTE-VOLTA

II - SYNTHESE DES ETUDES SUR LES ECOULEMENTS EN ZONE ARIDE

III - APPLICATION DU MODELE MATHEMATIQUE AU BILAN DES EAUX EN MAURITANIE

par J. RODIER



## ETUDE DU CYCLE ET DU BILAN DE L'EAU

--:--:--:--:--

### I - MECANISME DE L'EVAPORATION EN HAUTE-VOLTA

#### a) Conditions de l'opération

Les conditions générales de l'évaporation sur nappes d'eau libres ont déjà fait l'objet de recherches approfondies sur le Lac TCHAD et aux stations principales de FORT-LAMY, BANGUI et BRAZZAVILLE. Mais le Lac TCHAD, sous l'isohyète 300 mm, est situé un peu trop au Nord par rapport à la partie du SAHEL où on réalise généralement les aménagements d'hydraulique agricole. La station de FORT-LAMY (précipitation annuelle moyenne voisine de 600 mm) serait mieux située, mais, pour différentes raisons, le site présente certaines conditions défavorables et on ne dispose pas d'un grand réservoir permettant de procéder à toutes les opérations de contrôle. C'est pourquoi il avait été décidé d'implanter une station ORSTOM où seraient observés de façon très fine les différents facteurs de l'évaporation, au voisinage du Lac de BAM (Haute-Volta), (précipitation annuelle moyenne voisine de 650 mm). En même temps, devaient être étudiées les conditions de l'évaporation sur le lac et le bilan de celui-ci.

Les observations, commencées au 1er janvier 1973, ont été intensifiées à partir de décembre 1973, à la suite de la passation du Contrat DGRST.

#### b) Moyens mis en oeuvre

On peut donner les indications schématiques suivantes concernant les installations en service au 1er novembre 1974.

Un ensemble de trois stations a pour objet de déterminer les conditions de l'évaporation sur la terre ferme : sous l'influence du lac ou en dehors de l'influence du lac.

La station la plus complète, SAINT-PAUL, est située en dehors de l'influence du lac : on y mesure le rayonnement global, la durée d'insolation, l'humidité de l'air, la température de l'air, la vitesse du vent, les précipitations et d'autres facteurs secondaires.

Un bac ORSTOM et un bac de classe A du WEATHER BUREAU fournissent les indications-repères classiques de l'évaporation sur nappe d'eau libre.

Au cours du premier semestre 1974, dans le cadre de l'Action Urgente, a été aménagé un bac à évapotranspiration potentielle, entouré de son anneau de garde.

Une station beaucoup plus sommaire, sous le vent du lac, station de KONGOUSSI, est pourvue d'un bac ORSTOM. On y mesure l'humidité de l'air, la température de l'air, la vitesse du vent et les précipitations.

Une autre station du même type est située sous l'influence du lac, mais au vent, c'est-à-dire à l'Est.

Un autre ensemble d'appareils de mesure est monté sur le lac lui-même, il permet de suivre en continu le mécanisme de l'évaporation in situ.

Les enregistrements portent sur :

- . le rayonnement net à 3 m au-dessus de l'eau ;
- . le rayonnement global ;
- . le rayonnement réfléchi ;
- . les températures sèches et humides de l'air à 2,50 m ;
- . les gradients de ces températures sèches et humides de l'air, entre les niveaux 0,3 m et 2,5 m ;
- . les vitesses moyennes du vent aux niveaux 0,3 m et 2,5 m sur des pas de temps de 5, 15, 30, 60 ou 120-minutes ;
- . la température de l'eau en surface et à 8 niveaux différents.

Des profils de températures sèches et humides de la couche d'air au-dessus du lac sont déterminés à intervalle régulier en un certain nombre de points.

A heure fixe, un bilan thermique énergétique de l'eau du lac est fait sur un parcours de référence.

Ceci en vue de s'affranchir de l'aspect ponctuel des mesures.

On peut ainsi contrôler la méthode dite du bilan énergétique et celles qui en dérivent.

D'autre part, un troisième ensemble de mesures concerne le bilan hydrologique du lac de BAM. Il comprend :

- . l'enregistrement des niveaux du lac ;
- . la détermination ou l'évaluation des différents apports de ruissellement superficiel au lac ;
- . la mesure et l'enregistrement des précipitations au voisinage du lac et sur le bassin qui l'alimente ;
- . la détermination des débits sortant du lac par l'exutoire. Il n'y a écoulement à celui-ci qu'une fois tous les 15 ou 20 ans.

On précise que la saison sèche dure 9 mois, ce qui simplifie l'étude du bilan.

#### c) Déroulement des études et travaux

Le troisième ensemble est en service depuis 1966, mais ce n'est qu'avec les deux premiers ensembles qu'il est possible de saisir le mécanisme de l'évaporation et de fournir aux ingénieurs travaillant dans le SAHEL les éléments pour le calcul de l'évaporation à la surface des réservoirs.

Les enregistrements ont commencé sous une forme sommaire le 1er janvier 1973. En décembre 1973, les dispositifs de mesure des éléments du bilan radiatif sur le lac et la station principale de SAINT-PAUL ont été complétés et renforcés, de sorte que les observations et mesures seront complètes pour l'année 1974 malgré de gros dégâts occasionnés par une crue exceptionnelle du lac de BAM au début du mois d'Août, un coup de foudre sur la station de contrôle du lac de BAM dans la nuit du 2 au 3 septembre et de nombreux incidents techniques.

La continuité du service des dispositifs expérimentaux installés en brousse et notamment celle de l'alimentation en énergie électrique pose de grosses difficultés. Deux techniciens spécialistes se relaient au lac de BAM et les séjours des deux chercheurs hydrologues de OUAGADOUGOU y sont très fréquents.

L'hivernage 1974 ayant été marqué par des pluies très nombreuses et abondantes, la mesure des débits aux stations de jaugeages au Nord du lac et la collecte des données des pluviomètres et pluviographes ont donné lieu à de grosses difficultés, l'accès à certaines stations étant resté impossible, même pour des techniciens bien habitués à l'Afrique, pendant plusieurs jours. Mais, heureusement, les déversements du lac ont pu faire l'objet de détermination précise, ce qui ne paraissait pas évident à priori.

Les dépouillements primaires sont effectués régulièrement grâce à l'ordinateur du Centre National de Calcul de HAUTE-VOLTA.

#### d) Résultats

L'intensification des observations en 1974 a permis de rassembler tous les éléments du bilan radiatif et du bilan hydrologique, ce qui permettra de revaloriser les éléments recueillis pendant toute l'année 1973. De la sorte, il va être possible d'ajuster les formules usuelles de calculs par le bilan énergétique, de donner les facteurs de correction entre évaporation sur bac et évaporation sur réservoir, de mettre au point des formules simples d'application locale à partir des éléments météorologiques faisant l'objet de mesures courantes et de fournir une première analyse du mécanisme de l'évaporation à la surface des réservoirs pour cette région du SAHEL. On pourra obtenir les mêmes éléments pour l'évapotranspiration potentielle.

L'évaporation sur le lac de BAM, peu profond et assez étroit, est comprise entre 2,10 m et 2,30 m.

#### e) Publications

Une note technique décrivant les installations sera publiée dans le premier ou le second Cahier d'Hydrologie de l'ORSTOM pour l'année 1975.

Un recueil des résultats bruts d'évaporation sera diffusé au début de 1975.

Les publications principales ne pourront être rédigées qu'après achèvement de l'analyse qui ne pourra commencer qu'au 1er janvier 1975, après l'achèvement d'une année complète d'observations et de mesures avec le dispositif définitif.

## II - SYNTHÈSE DES ÉTUDES SUR LES ÉCOULEMENTS EN ZONE ARIDE..

### a) Conditions de l'opération

Pour l'utilisation des ressources en eau superficielle, deux ensembles de données sont particulièrement importants : celles qui sont liées à l'écoulement annuel (valeur moyenne ou médiane du volume annuel et sa distribution statistique), et celles qui sont liées aux crues exceptionnelles (débit maximal, volume).

Les crues ont provoqué dans les régions sahéliennes des dégâts très importants aux barrages et aux ouvrages routiers dès 1950, c'est pourquoi un effort très important a été consacré à leur analyse : réalisation d'études régionales, aménagements de bassins représentatifs. En 1965, une note de synthèse était mise au point par l'ORSTOM, à la demande du Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques, sur l'estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km<sup>2</sup>. Dans cette note, le SAHEL avait été étudié de façon assez approfondie depuis la MAURITANIE jusqu'au TCHAD. Parallèlement à cette étude sur l'écoulement, l'ORSTOM, toujours à la demande du CIEH, procédait à l'étude des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale. Ceci supposait l'étude critique de toutes les précipitations journalières jusqu'en 1965, laquelle a donné suite à une série de publications financées par le Ministère de la Coopération.

Mais il reste le problème du volume annuel pouvant alimenter un réservoir pour lequel seules quelques études isolées ont été effectuées jusqu'ici. Son étude en zone sahélienne pose des problèmes complexes et la masse d'informations brutes rassemblées par l'ORSTOM depuis 1955 sur l'écoulement dans ces régions n'avait pas été analysée de façon systématique en vue de fournir des éléments pour l'évaluation de ce volume annuel.

C'est pourquoi il a été décidé, dans le cadre de l'action urgente, de reprendre l'ensemble des matériaux bruts disponibles, de les analyser, de les critiquer et d'en dégager des règles simples pour la détermination sommaire du volume annuel d'écoulement dans les cas rencontrés le plus fréquemment et des traits essentiels de sa distribution temporelle depuis le SAHARA jusqu'à l'isohyète 750 mm.

b) Moyens mis en oeuvre

On disposait des données suivantes :

1 - les fichiers des précipitations en l'état pour toutes les stations pluviométriques du SAHEL jusqu'à la fin de l'année 1972, et la fin de l'année 1973 pour un bon nombre d'entre elles ;

2 - les rapports et les données brutes des bassins représentatifs de l'ORSTOM. On compte trente deux ensembles de bassins représentatifs ou bassins isolés dans la zone sahélienne de l'isohyète 800 mm au SAHARA. Les données fournies par bassins situés au-delà de l'isohyète 800 mm qui peuvent fournir des résultats utilisables pour des régions légèrement moins arrosées ;

3 - les rapports des études régionales effectuées depuis 1957, en saison des pluies, dans les régions sahéliennes, subdésertiques et désertiques (missions dans le TIBESTI, l'AÏR, le TAGANT, le BRAKNA, l'IRHAZER, le Nord DORI, l'ADER DOUTCHI, le OUADDAÏ, le GUERA, etc) par l'ORSTOM et divers Services Techniques (MAS, Génie Rural) ;

4 - les résultats des réseaux permanents du NIGER, de la HAUTE-VOLTA et du TCHAD dont les stations sont en petit nombre et observées depuis trop peu de temps malheureusement.

A ce travail ont été affectés deux chercheurs et occasionnellement les spécialistes des études pluviométriques, des bassins représentatifs, des phénomènes d'écoulement en zone aride travaillant actuellement au Bureau Central.

c) Déroulement des études et travaux

Après quelques études préparatoires, la synthèse a été entreprise au début de l'été 1974. On voulait savoir, en effet, si la sécheresse se prolongerait ou non au-delà de 1973, la campagne d'hivernage de 1974 pouvant apporter des compléments de dernière minute aux études. Dès juillet 1974, il était très probable que l'année 1974 ne serait pas une année sèche.

La zone sahélienne a été divisée en trois parties :

- zone désertique avec précipitations annuelles inférieures à 100 mm/an en moyenne ;

- zone subdésertique avec précipitations annuelles comprises entre 100 et 300 mm/an ;
- zone sahélienne proprement dite avec précipitations annuelles comprises entre 300 et 750 mm/an.

Les études ont été orientées en vue de donner aux ingénieurs des résultats pratiques sur les problèmes concernant :

- 1 - les impluviums de quelques hectares au maximum pour alimentation des citernes ;
- 2 - les réservoirs sur des cours d'eau dont le bassin versant est compris entre 2 et 40 km<sup>2</sup> (avec une subdivision spéciale pour bassin versant de quelques km<sup>2</sup>) ;
- 3 - les réservoirs ou prises d'eau sur cours d'eau dont le bassin versant est compris entre 40 et 300 km<sup>2</sup> (peut aller jusqu'à 800 km<sup>2</sup>) ;
- 4 - les réservoirs ou prises d'eau sur cours d'eau dont le bassin versant dépasse 1 000 km<sup>2</sup>.

Le régime hydrologique variant beaucoup avec la superficie du bassin versant, il a été nécessaire d'étudier séparément ces quatre cas.

On a procédé d'abord à l'étude statistique des valeurs extrêmes sèches des précipitations annuelles, compte tenu des années 1970 à 1973. On en a déduit le réseau des courbes de distribution statistique des précipitations annuelles pour une situation voisine de la moyenne, au point de vue exposition, pour toutes les valeurs moyennes de précipitation comprises entre 0 et 750 mm/an.

A l'aide de ces données, on a cherché à mettre au point les courbes de distribution de l'écoulement annuel en mm/an, car, en région semi-aride, la connaissance de la moyenne interannuelle de l'écoulement est insuffisante, il faut avoir une idée de la distribution temporelle. Cette étude est surtout valable pour les petits bassins, grâce aux recherches effectuées sur bassins représentatifs.

Pour la zone sahélienne proprement dite, les recherches effectuées dans le cadre de l'opération précédente "Application de modèles mathématiques à l'étude de l'écoulement en MAURITANIE", ont permis d'établir directement la distribution de l'écoulement pour deux cas types.

Enfin, dans la partie méridionale de la zone étudiée, les données des réseaux ont permis, avec l'appui des données pluviométriques, d'esquisser des représentations de la distribution temporelle des écoulements pour des bassins versants de moyenne et de grande surface.

#### d) Résultats

Des éléments de calcul ont été établis pour tous les cas des impluviums.

Pour les petits bassins, on a pu dégager des éléments de calcul pour les bassins à ruissellement, fort ou moyen, en zone subdésertique, et pour de nombreux cas classiques en régions sahéliennes. Il reste des types de sols pour lesquels il n'a pas été possible de fournir de directives concernant la détermination de l'écoulement.

Pour les bassins de plus de 40 km<sup>2</sup>, quelques indications seulement sont données pour les zones subdésertiques et désertiques. Pour la zone sahélienne, un certain nombre d'exemples sont établis, mais pour certaines zones du SAHEL, telles que le Nord du bassin du fleuve, SENEGAL, KOROKORO, KOLIMBINE, il n'a été possible que de donner des indications qualitatives.

En plus des courbes de distribution temporelle de l'écoulement, on a pu donner, à la fin de l'étude, quelques exemples de séquences de cet écoulement en vue de permettre des simulations.

#### e) Publications

Un Mémoire, présentant cette synthèse, sera achevé à la fin de l'année.

### III - APPLICATION DU MODELE MATHEMATIQUE AU BILAN DES EAUX EN MAURITANIE

#### a) Conditions de l'opération

Les caractéristiques générales du bilan des eaux des grands bassins versants font l'objet de remises à jour périodiques grâce à la maintenance et l'exploitation des réseaux hydrométriques relativement anciens. Les premiers bilans d'eau sur des bassins de moyennes et faibles superficies débutèrent au SAHEL en 1955 par l'exploitation hydrométéorologique intensive des bassins versants représentatifs dont le nombre a atteint un maximum au cours de la décennie 1960-1970. Les caractéristiques hydrologiques de petits bassins étant essentielles pour tout aménagement hydroagricole et les résultats de ces bassins étudiés sur de courtes périodes pour des zones physico-climatiques variées étant disponibles, il convenait de procéder à l'extension temporelle et spatiale de ces résultats en fonction des conditions climatiques et physiographiques. C'est ainsi que l'utilisation d'un modèle mathématique a été retenue pour réaliser ces extensions dès que toutes les incidences hydrologiques des facteurs physico-climatiques seraient quantifiées et il a été prévu que ce modèle serait ajusté sur un exemple précis bien connu pour utilisation ultérieure à d'autres bassins après adaptation du modèle à chaque cas particulier.

Les essais de calage d'un modèle à discrétisation spatiale qui avait déjà fait ses preuves pour quelques bassins non sahéliens, ont commencé en Février 1974 sur le bassin versant de l'Oued GHORFA (Mauritanie) de superficie 1 200 km<sup>2</sup> incluant 5 sous-bassins de 39 à 550 km<sup>2</sup>.

#### b) Moyens mis en oeuvre

L'ensemble des observations hydropluviométriques effectuées lors de la campagne de mesures sur le terrain en 1967 a été mis sur support informatique (carte des précipitations journalières, des pluies horaires, des débits limnigraphiques intégraux, des débits moyens journaliers).

Le modèle établi à l'origine pour un pas de temps journalier fut modifié afin de fonctionner au pas de temps horaire. La fonction de transfert a été modifiée pour prendre en compte la dégradation du réseau

hydrographique, les conditions de pertes et de stockage dans les plaines d'inondations bien typiques des régions sahéliennes.

Les moyens mis en oeuvre sont essentiellement d'ordre informatique. Nous devons disposer, d'une part, de l'information hydrométéorologique complète récoltée au cours des campagnes hydrologiques de terrain sur les bassins versants représentatifs afin d'extraire l'influence quantifiée des facteurs physico-climatiques, et, d'autre part, de toutes les études permettant d'orienter la direction dans laquelle la représentativité physique des phénomènes hydrologiques est la plus réelle.

Les moyens informatiques du CIRCE assurent le passage des programmes de simulation mis au point par l'ORSTOM en utilisant, comme données d'entrée, celles mises sur cartes perforées par le Service.

Parallèlement, un modèle simplifié pour simuler la lame écoulée journalièrement a été élaboré pour générer les lames d'eau annuelles sur des petits bassins versants à partir des séries pluviométriques longue durée d'un ou plusieurs postes du réseau météorologique.

Ce modèle de conception relativement simple exploite directement les résultats de synthèse et des rapports exécutés à la suite des campagnes de mesures par les hydrologues du Service. Il présente actuellement l'avantage de pouvoir procéder à une extrapolation dans le temps des séries chronologiques hydrologiques à partir des données de précipitation bassin par bassin.

Précisons que la mise sur support informatique de toutes les données anciennes obtenues, lors des campagnes hydrologiques sur les bassins représentatifs a présenté une charge très importante en personnel technique qualifié : centralisation de toutes les données de base, préparation des tableaux pour la perforation, préparation des diagrammes pour le lecteur BENSON, contrôle et critique après coup des valeurs mises sur support informatique.

Rappelons que, par ordre d'urgence, ce sont les données recueillies actuellement sur les bassins expérimentaux qui sont mises sur cartes. Le contrôle et la critique des données demandent une observation toute particulière.

Au total, ont été affectés, à cette opération, un Directeur de Recherches et un chercheur à temps partiel et le personnel perforateur et les agents techniques nécessaires.

c) Déroulement des études et travaux

Les premiers travaux d'adaptation du modèle ont été effectués en Février 1974.

A ce jour, la simulation des débits horaires, simultanément aux six stations du bassin de l'Oued GHORFA est effective avec le modèle à discrétisation spatiale adapté à ce pas de temps. Elle est réalisée à partir des données de 1967 fournies par 10 pluviographes journaliers et 32 pluviomètres journaliers. Pour les bassins de DJAJIBINE (150 km<sup>2</sup>) et BOITIEK (250 km<sup>2</sup>), les débits maximaux horaires sont évalués à moins de 20 % tandis que les lames mensuelles et annuelles d'écoulement le sont à 10 %. Pour les bassins de BOUDAME (512 km<sup>2</sup>) et OULED-ADDET (1 120 km<sup>2</sup>), les débits maximaux horaires ne sont pas en synchronisation avec les débits maximaux observés, mais en valeur, ils présentent les mêmes erreurs.

Des essais pour ce bassin, avec le modèle comparable, mais au pas de temps journalier, sont en cours pour les années 1966 et 1967.

La fonction de production des apports, à partir des précipitations et de l'évaporation, avait subi de nombreuses modifications lors des essais antérieurs sur les bassins de l'AGNEBY (Côte d'Ivoire), du VAR (France) et de la CRIQUE GREGOIRE (Guyane). Pour le bassin du GHORFA, la conception de cette fonction est à nouveau modifiée afin de mieux tenir compte de la réponse de chaque partie du bassin.

Avec le modèle simplifié de ruissellement par zone aride, fonctionnant au pas de temps journalier, les réglages n'ont posé aucun problème pour le bassin versant de KADIEL (39 km<sup>2</sup>, sous bassin du GHORFA).

Pour le proche avenir, l'effort devra porter sur l'accroissement de la mise sur support informatique des données acquises lors des campagnes antérieures d'études sur bassins représentatifs et sur la manière de réaliser l'adaptabilité du modèle aux bassins non exploités, uniquement à l'aide des conditions physiographiques déduites des cartes topographiques, des photos aériennes et de la connaissance du milieu naturel.

d) Résultats et perspectives

L'application du modèle à discrétisation spatiale au pas de temps horaire au bassin de GHORFA s'est traduite, après de nombreux essais et divers réglages, par une simulation satisfaisante des débits en tous points du bassin, malgré la dégradation du réseau hydrographique. Notons que cette dégradation du réseau reste particulièrement délicate à préciser à partir des cartes topographiques existantes.

Par contre, l'application du modèle simplifié destiné à la génération des lames écoulées journalièrement apporte, pour le bassin versant de KADIEL, les éléments suivants, à partir des précipitations observées aux postes relativement voisins de KANKOSSI et de MBOUT :

- lame écoulee en année moyenne.....	80,00 mm
- lame écoulee en année décennale humide.....	140,00 mm
- lame écoulee en année décennale sèche.....	25,00 mm
- coefficient de variation des lames écoulées.....	0,51
- coefficient de variation des pluies annuelles	
. à KANKOSSI.....	0,21
. à MBOUT.....	0,30
- pluie annuelle à KANKOSSI.....	428,00 mm
- pluie annuelle à MBOUT.....	415,00 mm

Par ailleurs, les limitations dues à la méconnaissance de la répartition des précipitations dans le temps et dans l'espace font que ce modèle à discrétisation spatiale, fonctionnant au pas de temps horaire est un outil qui n'est pas utilisé au maximum de sa puissance. Il serait souhaitable de prévoir, pour une meilleure connaissance des phénomènes pluviométriques, l'installation et l'exploitation d'un réseau de pluviographes à raison d'une densité voisine de un appareil journalier par 10 000 km<sup>2</sup>.

e) Publications

Sont prévues pour être diffusés en 1975 :

- un rapport technique décrivant le modèle simplifié de ruissellement pour zone aride ;

- un rapport présentant les modifications apportées au modèle à discrétisation spatiale précédemment publié dans les Cahiers Hydrologie ORSTOM, en vue de son application au bassin du GHORFA.

ETUDE DE LA PEDOGENESE

---

Etude de la dynamique saisonnière de trois types de sol du Tchad.  
Effets évolutifs. Conséquences pour l'exploitation.  
Effets de la sécheresse climatique.

P. AUDRY



Thème

Etude de la dynamique saisonnière de trois types de sols du Tchad : déterminisme, effets évolutifs, conséquences pour l'exploitation. Effets de la sécheresse climatique

Etude comparative

- Trois types de sols bien drainés représentatifs de grandes zones écologiques : sol ferrugineux tropical peu lessivé (P = 60 mm). Sol ferrugineux Tropical lessivé (P = 900 mm). Sol faiblement ferrallitique (P. 1200 mm).

600  $\frac{m}{m}$

-Trois types de couverts végétaux : couvert naturel protégé, exploitation agricole (étude d'une rotation complète), dénudation provoquée et maintenue.

Etude comprenant trois volets interdépendants :

- Régime et bilan hydriques ; recherche des conditions de la circulation de l'eau.

- Etude de l'évolution des sols recherchée par les variations saisonnières et pluriannuelles de leurs caractères physico-chimiques (prélèvements systématiques sur 5 ans).

- Evolution des sols en fonction de leur régime hydrique et de leurs caractères intrinsèques, recherchée par les techniques de lysimétrie verticale (3 années de mesures systématiques).

## EXPOSE DES PRINCIPAUX RESULTATS

S'il est banal de souligner qu'en zone sahélienne un facteur limitant essentiel de la production végétale est l'eau, on connaît cependant assez mal comment est répercutée au niveau du matériel végétal cette contrainte climatique. Le problème n'est pas simple puisqu'elle la transmet par l'intermédiaire du sol et que sa compréhension découle des interrelations mutuelles entre climat, sol et végétal.

Dans la présente mise au point, seules seront considérées quelques unes des relations déterminant le régime et le bilan hydriques des sols en fonction de leur différenciation et du couvert végétal. Leur examen conduira à préciser diverses conséquences ou orientations pratiques.

Dans le cadre de l'action urgente, les travaux ont eu pour objectif de faire le point de l'effet des conditions climatiques sur la dynamique de l'eau, et les résultats et réflexions ci-après, sont basés sur de précédentes interprétations partielles. De ce fait, les confirmations, et compléments qui se dégageront d'une interprétation complète, en cours, ne seront disponibles qu'en 1975, compte tenu de l'abondance des données récoltées et des techniques de traitements que suppose cette abondance, exploitation mathématique, recours aux méthodes informatiques en particulier.

### I. Régime et bilan hydriques des sols

Les relations actuelles entre le climat et la couverture pédologique apparaissent comme un instantané dans une suite évolutive au cours de laquelle elles conditionnent tous les mécanismes essentiels de la pédogénèse exprimée dans l'organisation de ces sols. Ceci se traduit en particulier par le fait que les horizons différenciés présentent des régimes hydriques propres, comme il a été en particulier décrit à BILBINI (Audry 1967), où les horizons lessivés des sols ferrugineux tropicaux ont un régime caractérisé par des variations rapides et importantes d'humidité, mais avec toujours une bonne aération, tandis que les horizons d'accumulation ont un régime amorti, moins aéré. Ce schéma très général apparaît modulé en fonction de la

pluviométrie annuelle et du couvert végétal. Ces résultats amènent à privilégier les concepts de régimes et profils hydriques liés au profil pédologique (avec de possibles déphasages), par rapport à la seule caractérisation du sol par des paramètres physiques par trop indépendants de la réelle présence d'eau in situ.

L'équilibre climat-sol, est déplacé par toute modification du couvert végétal naturel, dont l'exploitation agricole est un cas particulièrement important. Il semble se confirmer que, comme il a été observé à BILRINI, dans cette zone sèche où l'ETP est très supérieure à la pluviosité annuelle, les grands ensembles de sols à bon drainage interne et à dynamique verticale présentent un bilan hydrique nul sous végétation naturelle, la pluie étant totalement recyclée annuellement. Au contraire, sous culture, le bilan devient excédentaire. Il y a à cela une double cause : en début de cycle, il faut attendre des précipitations suffisamment importantes et fréquentes pour réaliser le semis sans risquer une levée vouée à un échec plus ou moins total ; en fin de cycle, le dessèchement ultime du sol sous culture n'atteint qu'une profondeur limitée : soit que l'arrière-saison étant bien arrosée l'évaporation directe ait relayé la plante après la récolte ; soit que la fin de la saison ayant été normale ou déficitaire, le dessèchement ait été essentiellement réalisé par la culture, mais sur une épaisseur toujours limitée du fait d'une profondeur d'enracinement toujours modeste.

## 2. Conséquences et orientations pratiques

Ces simples données générales permettent déjà de raisonner sur les mesures les plus efficaces pour pallier les conséquences graves de la sécheresse, que celle-ci se présente comme un déficit global affectant le total pluviométrique et/ou la durée de la saison ou comme des épisodes secs accidentels pendant une saison alors mal répartie ou comme une combinaison des deux.

Le problème est de rechercher les mesures susceptibles de permettre une utilisation optimale de la pluie apportée. Il serait évidemment illusoire de penser arriver à une utilisation totale avec des plantes annuelles comme le réalise une végétation naturelle grâce à

une strate vivace et un enracinement profond.

La première constatation est cependant qu'un système racinaire profond utiliserait les réserves d'horizons du sol généralement inexploitées. Il faut chercher à en situer au moins un ordre de grandeur : à BILRINI, sur sol ferrugineux tropical et dans la zone critique des 40-80 cm de profondeur, il faut un supplément de profondeur exploitée de 15 cm environ pour disposer d'une réserve supplémentaire correspondant à 10 mm de pluie, soit 3 jours de consommation à peu près. Ceci apparaît faible en regard d'un cycle cultural en valeur absolue. Ceci n'est cependant nullement dérisoire et négligeable pour faire face à des épisodes secs survenant en pleine saison végétative, ou pour permettre d'utiliser des pluies ultimes en fin d'une saison sèche déficitaire ; bref, c'est seulement dans un contexte séquentiel et statistique qu'un tel gain peut être réellement estimé.

Ceci dit, l'approfondissement de la zone exploitée par les racines suppose le recours à des interventions diverses, relevant d'abord des techniques culturales *sensu lato*. Il s'agit d'approfondir le profil cultural et on sait que ceci ne peut être obtenu par un approfondissement brutal de la profondeur de labour qui s'accompagne très généralement de déboires graves. Cet approfondissement doit éviter de créer toute discontinuité comme les semelles de labour : il est très net en effet que les plantes à pivot comme le cotonnier y sont en particulier très sensibles (Audry, 1965). De même, on a observé sur cette plante (*id*), que certaines fumures, identiques, dans leurs effets sur le rendement en conditions de bonne alimentation hydrique, agissaient de façon sensiblement différente sur le développement du système racinaire. Enfin, en sols lessivés, l'approfondissement des couches exploitées correspond généralement au sommet des horizons d'accumulation, dont le régime est moins aéré...

Une fois exprimées toutes les contraintes issues du profil pédologique, du profil hydrique et du profil cultural, le sélectionneur pourrait sans doute retenir utilement ces conditions et prendre en compte le caractère profondeur d'enracinement comme composante du facteur résistance à la sécheresse des végétaux.

La seconde possibilité d'intervention pour une utilisation optimale d'une quantité de pluie limitée concerne la date de semis. C'est presque trivial : c'est autant d'avance prise en cas de sécheresse survenant en fin de saison, tandis qu'on sait tout l'intérêt du semis précoce tant pour la protection du sol que de l'eau (ruissellement, érosion). Encore faut-il examiner de près la possibilité d'avancer le semis et définir des critères pour en fixer la date sans courir les risques déjà évoqués.

La notion empirique de pluie utile autorisant le semis recouvre de façon complexe la conjonction de diverses conditions : Une pluie ou une séquence de pluie suffisante pour mouiller le sol jusqu'à une profondeur suffisante pour attendre les pluies suivantes ; une probabilité d'occurrence de pluies prochaines pour relayer l'effet de cette pluie utile ; enfin une vitesse de germination de la graine puis de développement en longueur de ses racines aux premiers stades de la végétation qui permette à la plante, dans la séquence de pluies utiles attendues, de partir gagnante dans la course de vitesse qu'elle mène alors en concurrence avec l'évaporation directe.

Ce dernier aspect biologique, est en rapport avec l'espèce végétale et on ignore encore s'il est illusoire ou non d'envisager d'intervenir là encore sur le matériel végétal, en plus des techniques culturales. Pour le reste il s'agit d'un problème physique d'humectation et d'évaporation directe sur lequel nous possédons des données qui devraient permettre de cerner d'assez près la dynamique des premières pluies pour servir de base à la détermination approchée de la limite de précocité du semis, compte tenu d'une plante de comportement défini et d'un risque défini. Le recours à une analyse fréquentielle des données climatiques locales ou régionales est à prévoir.

En définitive quel que soit l'impact de la sécheresse climatique, sur les réserves en eau du sol, les méthodes de lutte contre leurs effets, sont les mêmes ; approfondissement du profil cultural, semis précoces, adaptations variétales aux conditions des saisons "utiles" des pluies.

Publications citées

AUDRY (P). 1965.

Résultats agronomiques relatifs à la campagne de coton 1964 sur les sols rouges faiblement ferrallitiques de Déli.

Colloque OUA/STRC sur la conservation et l'amélioration de la fertilité des sols, Khartoum 8-12 nov., publ. n° 98, Londres, P. 96-112.

AUDRY (P). 1967

Observations sur le régime hydrique comparé d'un sol ferrugineux tropical faiblement lessivé sous savane et sous culture (arachide et pénicillaire).

Colloque OCAM sur la fertilité des sols tropicaux, Tananarive, p. 1591-1614.

RECHERCHES SUR LES PROBLEMES

DE L'EAU

--:--:--:--

I - DETERMINATION EN SAISON SECHE DES DEBITS DES PRINCIPAUX COURS D'EAU

II - CONSEQUENCES HYDROLOGIQUES DE LA SECHERESSE INTERTROPICALE

par J. RODIER



## RECHERCHES SUR LES PROBLEMES DE L'EAU

--:--:--:--

### I - DETERMINATION EN SAISON SECHE DES DEBITS DES PRINCIPAUX COURS D'EAU

#### a) Conditions de l'opération

Il s'agissait de fournir des bases statistiques aussi sûres que possible pour l'estimation de l'occurrence de la sécheresse 1971-1973, du point de vue du régime des cours d'eau. A priori, seuls les sites hydrologiques observés depuis longtemps étaient susceptibles de fournir des séries de longue durée qui puissent permettre des analyses statistiques dignes de ce nom, ces séries devant englober si possible les sécheresses 1913 - 1914 et 1941 - 1945.

Les sites choisis correspondaient à des stations de base sur les grands fleuves, telles que BAKEL et MATAM sur le SENEGAL, KOULIKORO, MOPTI et NIAMEY sur le NIGER, NDJAMENA et SAHR sur le CHARI et enfin le Lac TCHAD qui fournit d'excellents points de repères.

En outre, en vue d'obtenir des données utiles pour l'avenir, l'ORSTOM a considéré d'autres stations observées depuis moins longtemps mais qui, dans les réseaux actuels de ces grands fleuves, sont considérées comme stations principales, telles que SALDE sur le SENEGAL, MALANVILLE sur le NIGER, BOUSSO, MAILAO, CHAGOUA sur le CHARI, BAÏBOKOUM, MOUNDOU, LAÏ, BONGOR, LOGONE GANA, LOGONE BIRNI sur le LOGONE.

Il s'agissait, à la fin de l'année 1973 et au cours de l'année 1974, de veiller à ce que les observations de hauteur d'eau soient régulières et continues, soit directement pour le réseau hydrométrique du TCHAD géré par l'ORSTOM, soit en apportant le concours de l'ORSTOM aux Services nationaux pour les réseaux du SENEGAL, du MALI et du NIGER. Il fallait également assurer une traduction précise des hauteurs en débits, ce qui ne nécessitait que des mesures de contrôle pour les moyennes et hautes eaux, des mesures plus nombreuses et surtout délicates pour les

...

basses eaux qui, étant donné leur caractère inusité, s'écartaient beaucoup des basses eaux connues et, pour cette raison, n'avaient jamais fait l'objet de mesures pour des débits aussi faibles. Le lac TCHAD posait des problèmes particuliers, toutes les stations habituelles étant à sec ou isolées du lac.

b) Moyens mis en oeuvre

Au TCHAD, la Section hydrologique disposait d'une Brigade de mesures, une seconde Brigade a été constituée pour l'étude du lac TCHAD.

Au NIGER, une Brigade de mesures supplémentaire a été affectée à temps partiel au fleuve.

Au MALI, l'ingénieur hydrologue de l'ORSTOM a dirigé les mesures de basses eaux.

Au SENEGAL, la Section hydrologique de l'ORSTOM a envoyé, à plusieurs reprises, sur le fleuve une brigade hydrologique, tant pour contribuer à l'entretien des stations que pour exécuter les mesures.

Sur les fleuves, il n'a pas été nécessaire de créer de nouvelles stations, ni d'installer d'enregistreurs, mais sur le lac TCHAD, on a dû installer, dans les eaux restées libres, deux limnigraphes, un à KALOUM (eaux libres du Sud), l'autre à KINDJERIA. Sur le pourtour du lac, on a continué à suivre le limnigraphe de BOL, on en a installé deux nouveaux (l'un à HAYKOULOU, l'autre à BAGA KAWA au NIGERIA) et des échelles à MALAM, FATORI et BAGA KISKRA, le limnigraphe de NGUIGMI (NIGER) a dû être déplacé.

c) Dérpoulement des études

La partie la plus importante des mesures a été effectuée de décembre 1973 à mai 1974 (elle avait été précédée d'une campagne moins systématique que l'ORSTOM avait organisée par ses propres moyens pendant la saison sèche 1972-1973).

Les hydrologues de l'ORSTOM ont pu suivre les débits de basses eaux sur 51 stations du TCHAD (lac non compris).

En général, ces stations ont fait l'objet de 4 mesures au cours de la saison sèche, ceci afin de serrer le minimum de très près.

Les stations de référence du NIGER et du SENEGAL ont fait l'objet de jaugeages aussi fréquents pour la même raison. Au total, environ 120 mesures de débit de basses eaux ont été effectuées par le personnel ORSTOM.

Sur le lac TCHAD, les opérations de terrain ont été menées conjointement entre hydrobiologistes et hydrologues. Un technicien supérieur hydrologue a été envoyé en renfort de PARIS pendant deux mois 1/2. Il est à noter que la circulation sur le lac a présenté de très sérieuses difficultés qui ont pu être surmontées grâce aux embarcations en plastique réalisées par les hydrobiologistes de l'ORSTOM. Les forces françaises de l'Escale d'Afrique Centrale ont apporté un concours des plus précieux par le moyen de nombreux survols, ainsi que la Mission protestante de HAGKOULOU qui disposait d'un petit appareil.

#### d) Résultats

Les débits de basses eaux ont été déterminés avec précision pour les basses eaux de 1974 aux stations principales ou de référence de SAHR, BOUSSO, MAILAO, CHAGOUA, NDJAMENA, BAÏBOKOUM sur le CHARI ; MOUNDOU, LAÏ, BONGOR, LOGONE GANA, LOGONE BIRNI sur le LOGONE ; BAKEL, MATAM, SALDE sur le SENEGAL ; KOULIKORO, MOPTI, NIAMEY et MALANVILLE sur le NIGER.

Le SENEGAL s'est complètement asséché à BAKEL le 16 juin 1974. A NIAMEY, le débit naturel minimal est descendu à 600 l/s, dont il convient de retrancher 250 l/s prélevés pour l'alimentation en eau de la ville.

Bien entendu, les valeurs maximales de la crue 1973 qui a précédé sont également déterminées de façon très précise ainsi que le volume total annuel pour toutes les stations principales ou de référence. Les mesures faites permettent de revaloriser les observations faites au cours de la saison sèche 1973.

La situation du lac TCHAD est bien connue aux époques cruciales des années 1973 et 1974, en particulier à la fin du remplissage et au moment de l'année où les eaux sont les plus basses. Le lac a été séparé en

deux poches, la cuvette Sud et la cuvette Nord, par la grande barrière, les débits transitant à travers la végétation qui le recouvre ont été faibles en Décembre 1972 et presque nuls en Décembre 1973.

La cuvette Nord, très peu alimentée par le CHARI fin 1972 et pas du tout fin 1973, a vu son niveau baisser considérablement (1,90 m entre les basses eaux 1973 et les basses eaux 1974). Les eaux libres de cette cuvette en 1973 devenaient un archipel en 1974, comme les bords des côtes Nord et Est du lac.

La superficie du lac TCHAD en juillet 1973 était de 8 940 km<sup>2</sup>, dont 40 % d'eaux libres : on a rassemblé les éléments pour évaluer la superficie du lac en Décembre 1973 et Juillet 1974.

L'extension prise par la végétation sur les hauts fonds exondés est considérable. La situation au minimum de 1973 était comparable à celle de 1905, un peu plus favorable que lors de l'année 1907 qui marque le point le plus bas observé. Pour estimer la situation en Juillet 1974, un certain nombre d'analyses sont en cours, il est possible que la situation soit assez comparable à celle de 1907.

#### e) Publications

En ce qui concerne les mesures sur les fleuves, les données de 1974 seront intégrées dans les Annuaire hydrologiques locaux, notamment pour la République du NIGER, le TCHAD et le SENEGAL. Ils sont repris dans les publications rédigées : Conséquences hydrologiques de la sécheresse intertropicale, en particulier.

En ce qui concerne le lac TCHAD, une première série de résultats avait été publiée dans une série de notes dont les deux plus importantes sont :

- . Evolution hydrologique du lac TCHAD de Juillet à Décembre 1973, par A. CHOURET, J. FRANC et J. LEMOALLE (Centre ORSTOM de NDJAMENA) ;
- . Les effets de la sécheresse actuelle en Afrique sur le niveau du lac TCHAD et al. Cahiers ORSTOM Hydrologie Vol. XI n° 1. 1974.

Suite à l'intensification des travaux dans le cadre de l'Action Urgent, une publication de synthèse est prévue en 1975.

## II - CONSEQUENCES HYDROLOGIQUES DE LA SECHERESSE INTERTROPICALE

### a) Conditions de l'opération

Les sécheresses précédentes en zone tropicale ou équatoriale (1913-1914 en zone tropicale, 1958 en zone équatoriale) ont présenté une très large extension débordant très largement de l'Afrique Occidentale et de l'Afrique Centrale.

Une des opérations de recherche déclenchée dans le cadre de l'Action Urgente a eu pour objet de procéder à une évaluation des conséquences de la sécheresse actuelle sur l'écoulement des cours d'eau, du point de vue de l'importance du déficit et surtout de la fréquence d'occurrence, et ceci dans un cadre aussi large que possible, peut-être à l'échelle du globe. Les hydrologues de l'ORSTOM, très dispersés sous la ceinture tropicale, sont bien placés pour participer à une telle étude.

Mais, on comprendra aisément que, par son caractère international, elle s'effectue obligatoirement en liaison avec les Organisations internationales les plus intéressées à ce genre d'études : l'Organisation Météorologique Mondiale et l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques.

Les chercheurs de l'ORSTOM, dont au moins une partie de l'activité a été consacrée à l'opération, ont procédé, en premier lieu, à une étude sur les fleuves auxquels s'intéresse la Section hydrologique de l'Office, puis ils ont tenté d'entreprendre diverses comparaisons dans une zone beaucoup plus large. Pour cela, ils ont utilisé largement, d'une part, les données analysées et interprétées dans les grandes Monographies du SENEGAL et du NIGER, du CHARI, du LOGONE, du lac TCHAD, et les annuaires hydrologiques du TCHAD, du NIGER et de la HAUTE-VOLTA ; d'autre part, les données rassemblées au cours de l'opération (de l'Action Urgente) ; Détermination des débits en saison sèche des principaux cours d'eau.

### b) Moyens mis en oeuvre

Il a été procédé à une première mise au point des données et à une analyse statistique préliminaire concernant trois éléments hydrolo-

giques principaux : le débit moyen annuel, le débit maximal annuel et le débit minimal annuel des cours d'eau les plus intéressants pour l'étude de synthèse envisagée et, de toutes façons, pour tous les grands fleuves dans les pays où ils étaient affectés. Cette étude a été limitée à ces trois paramètres simples afin de permettre des comparaisons sur un plan largement international.

Le Bureau Central de PARIS dispose des banques de données pluviométriques et hydrométriques et d'un terminal. En outre, dans toute la mesure du possible, des contacts ont été pris avec des hydrologues de pays non francophones affectés par la sécheresse.

Enfin, un expert ORSTOM a collaboré à l'enquête générale menée conjointement par l'AISH et l'OMM. Il a apporté un concours très important à la note technique préliminaire présentée à la Conférence de la fin de la Décennie hydrologique internationale.

#### c) Déroulement des opérations

La synthèse a nécessité la comparaison avec les sécheresses 1913-1914 et 1940-1945 qui ne pouvait se faire sans l'analyse des données pluviométriques. Celle-ci a présenté certaines difficultés du fait de la mauvaise qualité des observations au cours de ces dernières années. Pour certains pays, plus de 50 % des données étaient inutilisables. Il a donc été nécessaire de procéder à une sélection assez délicate.

#### d) Résultats

Sur toute la bande sahélienne et sahélo-soudanienne, la sévérité de la sécheresse a été très inégale. En général, elle a été très marquée à l'Ouest de l'Afrique et au TCHAD, moins dans la partie sahélienne du MALI et du NIGER et dans certaines parties de la HAUTE-VOLTA. Les régions soudaniennes et guinéennes n'ont pas été épargnées, au point de vue statistique, la sécheresse y est souvent aussi exceptionnelle que dans les parties les plus touchées du SAHEL, et c'est pourquoi des cours d'eau qui en sont issus, comme le SENEGAL et le NIGER, sont arrivés au SAHEL avec des débits exceptionnellement faibles. Dans bien des cas, ils n'ont pas apporté dans les régions du Nord, des ressources en eau qui auraient permis, au moins dans les vallées des grands fleuves, une production normale.

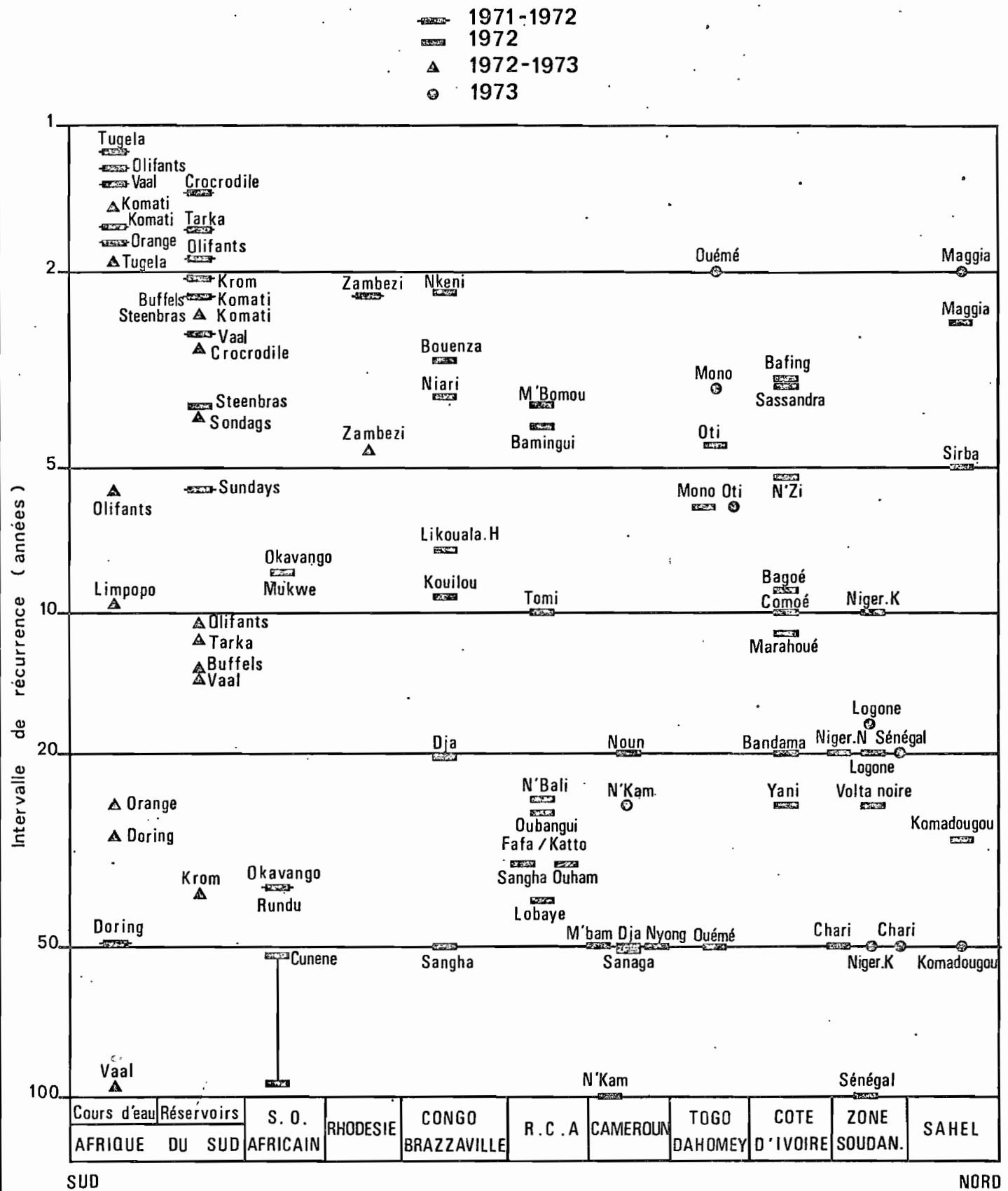
On retrouve une sécheresse aussi sévère au Nord-Est du BRESIL, aux ANTILLES, au Sud du ZAÏRE et dans certaines parties de l'INDE. D'un fleuve à l'autre, l'année la plus sèche, au point de vue hydrologique, n'est pas obligatoirement la même, c'est parfois 1972, parfois 1973 et parfois même 1971. Si on considère le débit moyen annuel ou l'écoulement total annuel, sur le SENEGAL, l'année 1972 est centennale, l'année 1973 vicennale, sur le NIGER à KOULIKORO, l'année 1972 est décennale et l'année 1973 cinquantenale.

Le tableau ci-joint situe les écoulements de l'Afrique Occidentale et de l'Afrique Centrale par rapport aux autres régions de l'Afrique.

e) Publications

Parmi les nombreuses notes publiées sur la question précédente, on peut citer :

- Quatre années de sécheresse dans le SAHEL. P. CHAPERON - Rapport du Centre ORSTOM de DAKAR ;
- La sécheresse actuelle en Afrique Tropicale. J. A. RODIER, M. ROCHE - Bulletin AISH ;
- Sécheresse en Afrique. M. ROCHE - Communication présentée au Symposium On Drought in Africa ;
- Les données climatiques et hydrologiques de la sécheresse en Afrique de l'Ouest sahélienne. J. SIRCOULON ;
- Les incidences climatiques et hydrologiques de la sécheresse. M. ROCHE - Article publié dans Sciences et Techniques ;
- Une publication d'ensemble définitive sera mise au point en 1975.



Fig\_5 Tableau comparatif des sécheresses d'écoulement

CARACTERISTIQUES AGROCLIMATIQUES

---

- I - La caractérisation du milieu agroclimatique  
Propositions méthodologiques
  
- II - Modèles de simulation et d'analyse fréquentielle du bilan hydrique
  
- III - Evapotranspiration potentielle PENMAN pour les stations météorologiques des zones sahéliennes et soudaniennes.

par P. FRANQUIN



RECHERCHE AGRO-ECO-CLIMATOLOGIQUE

---

Exécutée dans le cadre de l'action urgente DGRST

P. FRANQUIN

PRESENTATION

Dans divers domaines de la recherche et du développement, les méthodes se montrent insuffisamment efficaces si l'on en juge par les questions sans réponse sûre que l'on se pose face à l'ampleur et à la complexité des problèmes qu'a soulevés la sécheresse au Sahel. Les circonstances dramatiques qu'a vécu, que vit encore et que peut revivre l'Afrique sub-saharienne imposent donc de pousser les recherches méthodologiques. Celles-ci d'ailleurs sont bien dans la vocation de l'ORSTOM et leur impact est particulièrement important de par la généralité des applications qu'elles permettent et la notoriété qu'elles confèrent.

L'aménagement intégré des milieux physique et humain suppose que l'on dispose déjà de procédés rationnels, aussi objectifs que possible, d'évaluation des potentialités agro-sylvo-pastorales, dont le climat constitue sans doute la composante principale. C'est donc à perfectionner et à élaborer des outils méthodologiques propres à faire progresser la modélisation des conditions agro-éco-climatiques que visait essentiellement la présente étude à court terme, préalable à une action à plus longue échéance.

Leur emploi tactique rendait nécessaire une approche théorique de la notion de "période de végétation", laquelle constitue le cadre dans lequel ces outils sont opérationnels, ainsi qu'il apparaîtra dans les pages qui suivent et qui proposent une stratégie générale.

Selon qu'ils font appel ou non à l'Informatique, les outils en question sont de deux sortes. Il est possible de parvenir à une figuration fréquentielle des limites et du contenu de la période de végétation sans moyens matériels de traitement statistique. Un exemple sera donné en annexe, relatif à la productivité climatique d'un pâturage en région sèche. L'interprétation ne vaudra guère cependant qu'au niveau de la planification ou à celui d'un premier abord.

Le domaine opérationnel exige une approche plus fine et des moyens plus performants. Un premier pas dans cette voie était réalisé, il y a déjà plusieurs années, avec l'élaboration d'un modèle programmé d'analyse fréquentielle des pluies, lesquelles constituent le terme "apports" du bilan hydrique. La nécessité de compter avec l'autre terme, les "pertes" par évapotranspiration, ruissellement, drainage ..., qui tiennent à la demande climatique et, pour beaucoup, aux caractéristiques du sol et à celles de la végétation, a conduit, à l'occasion de l'action présente, à élaborer des modèles programmés de simulation et d'analyse fréquentielle du bilan, ou encore du déficit au niveau du sol et à celui de la plante. Ces modèles sont décrits en annexe, avec exemples d'application.

Leurs données d'entrée sont les pluies et les évapotranspirations potentielles (ETP), des coefficients de réglage permettant l'adaptation aux conditions observées de sol et de végétation. On sait déjà que les relevés pluviométriques journaliers de tous les postes de tous les Etats africains francophones sont critiqués puis stockés sur cartes par le Service Hydrologique de l'ORSTOM et se trouvent de ce fait disponibles à des fins multiples. Pour les ETP, qui seront données en annexe, elles ont été ici-même calculées selon Penman pour toutes les stations de météorologie synoptique des zones sahélienne et soudanienne, stations qui mesurent la durée d'insolation, la température, l'humidité atmosphérique et la vitesse du vent. L'estimation de cette dernière à partir des fréquences observées a constitué un long et fastidieux travail de calcul. Les ETP peuvent aussi être interpolées pour tous postes climatologiques et pluviométriques favorablement situés par rapport aux stations synoptiques.

## I - LA CARACTERISATION DU MILIEU AGROCLIMATIQUE

---

### PROPOSITIONS METHODOLOGIQUES

L'insuffisance et l'irrégularité des pluies font de la prévision un des problèmes majeurs des régions à tendance aride, même peu accusée, quand il n'est pas possible - soit actuellement dans la presque totalité de l'Afrique sub-saharienne - de compter sur des compléments d'irrigation. Même alors d'ailleurs la meilleure efficacité de l'eau ne saurait être assurée en l'absence de prévision.

La prévision doit s'entendre aux deux sens, météorologique et climatologique :

- au sens météorologique, c'est la prévision synoptique ou prévision en temps réel à plus ou moins long terme, dont l'intérêt est considérable mais qui est l'affaire des météorologistes. Il n'en sera pas question ici, sinon pour montrer comment elle peut être associée à la prévision statistique.

- au sens climatologique, c'est la prévision statistique, fondée sur l'analyse fréquentielle de séries d'observations aussi longues que possible. C'est elle, exclusivement mais nécessairement, que l'on considèrera ici.

Une description du milieu agroclimatique, pour être efficace et opérationnelle, doit en effet rendre compte de la variabilité de ce milieu, que ce soit en pratique agricole, en recherche ou en planification. Mieux même, les méthodes dites "de simulation" permettent aujourd'hui d'incorporer étroitement cette variabilité à l'exploitation de l'information climatologique, par le moyen de calculs de prévision qui peuvent prendre la forme extrême d'une expérimentation théorique.

C'est donc toujours en termes fréquentiels que seront opérées la description du milieu agroclimatique et sa modélisation, ainsi que l'on se propose de le faire ici pour l'exemple.

Le "milieu" agroclimatique est le complexe "climat atmosphérique-climat édaphique"; ce dernier étant déterminé par le climat atmosphérique, ou climat proprement dit, par les caractéristiques physico-chimiques du sol et par la formation végétale qui l'occupe.

Description et modélisation de ce milieu ne sauraient d'ailleurs concerner isolément tel ou tel élément du climat, cette approche, si elle n'est pas inutile, étant du moins insuffisante. La végétation réalise en effet son développement et sa croissance au cours d'une période, la "période de végétation", qui intègre tous les éléments climatiques impliqués dans ces deux processus dont résulte la production végétale.

Description et modélisation du milieu agroclimatique seront donc avant tout celles de la période de végétation, qui intègre de façon continue les éléments climatiques en question.

#### LA PERIODE DE VEGETATION

Une difficulté est alors que, tandis que cette intégration procède de façon continue, la caractérisation fréquentielle ne peut s'opérer qu'en se donnant un pas de temps (pendantaire, hebdomadaire, décadaire ...) ou en considérant des événements remarquables. Cette dernière formule se prête mieux que la première à l'expression fréquentielle mais les deux procédés gagnent à être associés, les délimitations (en position et durée) de la période et dessous-périodes usant de la notion d'évènement remarquable tandis que leur contenu est décrit suivant un pas de temps. Cette combinaison aboutit au modèle statistique général présenté ci-après, valable en toutes conditions climatiques.

## Modèle statistique général

### Limites et durée

Est un évènement remarquable pour le découpage, dans le cycle annuel, de la période de végétation, tout évènement de nature climatique ou phénologique (critère de développement du végétal en relation avec un fait climatique) dont l'intérêt répond à un objectif scientifique, technologique, économique ....

Il y aura ainsi en un même lieu autant de "périodes de végétation" que de projets spécifiques. Pourtant, selon le domaine opérationnel en particulier (planification, recherche, pratique agricole ...), cette entité rationnelle se caractérisera par un plus ou moins grand degré de généralité.

L'expression de la période de végétation, dont le déterminisme est à la fois physique et biologique, sera finalement de nature plus ou moins climatologique ou phénologique, un évènement phénologique pouvant d'ailleurs avoir pour figuration l'évènement climatique correspondant. Cette expression sera d'autant plus climatologique que les critères seront plus généralisables. A la limite, on pourra parler de période physique de végétation, tous les intermédiaires étant imaginables entre cette limite et le cas de spécificité absolue de période strictement phénologique.

La période sera donc jalonnée d'autant d'évènements, climatiques et phénologiques en mélange, que nécessaire pour atteindre l'objectif, l'important étant surtout le degré de dépendance entre leurs instants d'occurrence.

Etant donné enfin l'incertitude qui entâche la notation de l'instant de réalisation de l'évènement, il convient d'insister sur son caractère relatif, surtout s'agissant d'évènement climatique, ce qui déjà serait une raison suffisante de le traiter statistiquement. Une autre raison, impérative, est que le temps (climatique) est extrêmement variable. Il convient donc de donner de chacun des évènements qui définissent la période de végétation une expression fréquentielle.

Pour ce faire, un modèle fréquentiel de la période de végétation devra s'inscrire dans un système de coordonnées dont l'axe des abscisses sera celui des temps, l'axe des ordonnées étant une échelle de fréquences relatives (de probabilités pour un échantillon suffisamment grand). Ainsi la variabilité d'occurrence de tout événement pourra-t-elle être figurée par un histogramme de densité et un polygone intégral de fréquences relatives.

La distribution, dans la saison, des positions que prend, lors des années successives, un événement définissant soit l'ouverture, soit la fermeture, soit un état intermédiaire de la période peut en effet être figurée par un histogramme de fréquences construit sur un intervalle de classes égal à la pentade, la semaine, la décade ..., la variable "temps", bien que notée en valeurs discrètes (nombre entier de jours), étant considérée comme continue. Le choix d'un effectif de classes approprié (à l'effectif de l'échantillon et à l'ordre d'incertitude affectant la notation) permettra d'obtenir une certaine régularisation de la distribution, dont l'étendue constituera déjà une caractéristique très importante.

Les distributions empiriques d'événements, qui peuvent être très diverses, rappelleront ou non - sur tests - des lois de distribution théoriques, qu'elles soient ou non dissymétriques, à dissymétrie modérée ou forte, unimodales ou plurimodales. Eventuellement, un changement de variable permettra de passer à la normalité.

Bien que pour leur exploitation il ne soit pas indispensable que les distributions répondent à une loi théorique, un ajustement significatif de l'une de ces lois sera une circonstance favorable. Dans ce cas, la date d'occurrence de l'événement, sa date moyenne, la médiane et tous autres quantiles seront affectés d'une erreur liée à un niveau de probabilité.

La période de végétation sera ainsi jalonnée (fig. 1) de distributions de fréquences d'événements qui, prises deux à deux, successivement ou non, délimiteront fréquemment des périodes ou sous-périodes. La durée d'une période ou sous-période aura pour variance, d'après le théorème d'additivité, la somme des variances  $s_d^2$  et  $s_f^2$  des événements "début" et "fin" considérés, si du moins ceux-ci sont indépendants :

$$s_p^2 = s_d^2 + s_f^2$$

Si les évènements "début" et "fin" ne sont pas indépendants,  $r$  étant leur coefficient de corrélation linéaire (ou  $i$  leur indice de corrélation curvilinéaire), la variance de la durée sera donnée par la relation :

$$s_p^2 = s_d^2 + s_f^2 - 2rs_d s_f$$

Une corrélation négative a pour effet d'augmenter la variance. Les deux évènements auront généralement d'autant plus de chances d'être indépendants qu'ils seront plus distants dans le temps. On pourra enfin étudier directement la distribution des durées.

Mais une représentation fréquentielle plus efficace est donnée par les courbes intégrales des distributions. Il sera en effet toujours possible, quel que soit l'histogramme de densité, de passer au polygone intégral des fréquences relatives. Supposant que l'intervalle de classes tend vers zéro, on pourra même passer, si l'on dispose d'un échantillon suffisant, à la courbe des fréquences relatives cumulées, analogue à la courbe représentant une fonction de répartition (fig. 2).

Ce sont donc les courbes de répartition des fréquences relatives, sigmoïdes obtenues par ajustement d'une loi de répartition théorique ou par simple lissage des irrégularités mineures (en cas d'ajustement impossible), qui vont permettre de modéliser fréquentiellement la période de végétation dans ses limites extrêmes, ses limites internes et sa durée.

Les sigmoïdes de répartition ayant été construites comme en figure 3, on lira en ordonnées, pour chaque évènement, la probabilité que cet évènement soit déjà réalisé à une date donnée en abscisses. Inversement, de ces sigmoïdes on tirera les dates-limites attachées à toutes probabilités données.

Ainsi la sigmoïde de l'évènement D donnera les probabilités que la période de végétation soit déjà ouverte et la sigmoïde F les probabilités qu'elle soit déjà fermée. Dans ce dernier cas, cependant, on s'intéressera plutôt aux probabilités complémentaires ( $q = 1 - p$ ), c'est à dire aux probabilités que la période soit encore ouverte. Elles seront données par la sigmoïde symétrique par rapport à l'horizontale.

De même, on construira les symétriques (fig. 2) des sigmoïdes des événements intermédiaires, qui délimitent des sous-périodes. Ainsi on aura par exemple en I la sigmoïde d'ouverture de la sous-période IF et la sigmoïde de fermeture de la sous-période DI.

Enfin, de ces diagrammes à échelles métriques on pourra passer, si possible et utile, à des diagrammes construits sur des échelles fonctionnelles : gaussienne, exponentielle, logarithmique ... C'est ainsi que, les distributions de la figure 1 pouvant être considérées comme normales, on passera du diagramme de la figure 2 à celui de la figure 3 en substituant à l'échelle de probabilité métrique l'échelle gaussienne : les sigmoïdes se trouvent de ce fait transformées en droite de Henri dont les pentes sont, comme des écarts-types, des mesures de la dispersion des événements.

Ce modèle fréquentiel de la période de végétation est d'abord une source d'informations usuelles telles que :

- Probabilités d'une période (ou sous-période) déjà ouverte à telle date et toujours ouverte à telle autre : si les deux événements sont indépendants ou peuvent être considérés comme tels (corrélation notable non significative), cette probabilité composée sera le produit des probabilités totales (lues en ordonnées des figures 2 ou 3) relatives à ces deux dates ; inversement, on déduira les dates-limites attachées à telle probabilité composée donnée. La période la plus longue correspondant à une probabilité composée P sera délimitée par les dates liées à la même probabilité  $p = \sqrt{P}$ . Il apparaît bien ici, en contradiction d'une erreur fréquente, que si pour une végétation permanente la probabilité de rencontrer une période de végétation de durée au moins médiane est bien 0,50, il n'en va plus de même dès lors que le départ en végétation dépend d'une décision, celle de semer une culture annuelle dans un intervalle de temps par exemple ; en particulier, la durée médiane de la période de végétation considérée "en position" ne correspond qu'à une probabilité de  $0,50 \times 0,50 = 0,25$ .

- Probabilité d'une période d'au moins ou d'au plus telle durée donnée, indépendamment de sa position dans la saison : si les événements sont indépendants, elle sera lue en ordonnées au niveau correspondant à cette durée. Si les événements ne sont pas indépendants, on pourra étudier la distribution des durées elles-mêmes.

- Définition de variables aléatoires tirées du découpage de la saison par les évènements considérés, en vue de l'analyse du rendement, de l'étude de l'adaptation des espèces et variétés, du calage de leurs cycles par rapport aux conditions énergétiques et/ou hydriques, etc....

Un autre intérêt du modèle réside dans l'intégration de la variabilité d'une période que réalise la surface comprise entre deux sigmoïdes. Cette surface, mieux que l'intervalle entre les positions moyennes des deux évènements concernés, a valeur d'indice de productivité climatique relative (toutes autres choses égales) puisqu'elle prend en compte la variabilité. Cet indice pourra même être décomposé en deux indices se rapportant, l'un à la fraction stable (correspondant à la période de durée minimale), l'autre à la fraction variable de la période.

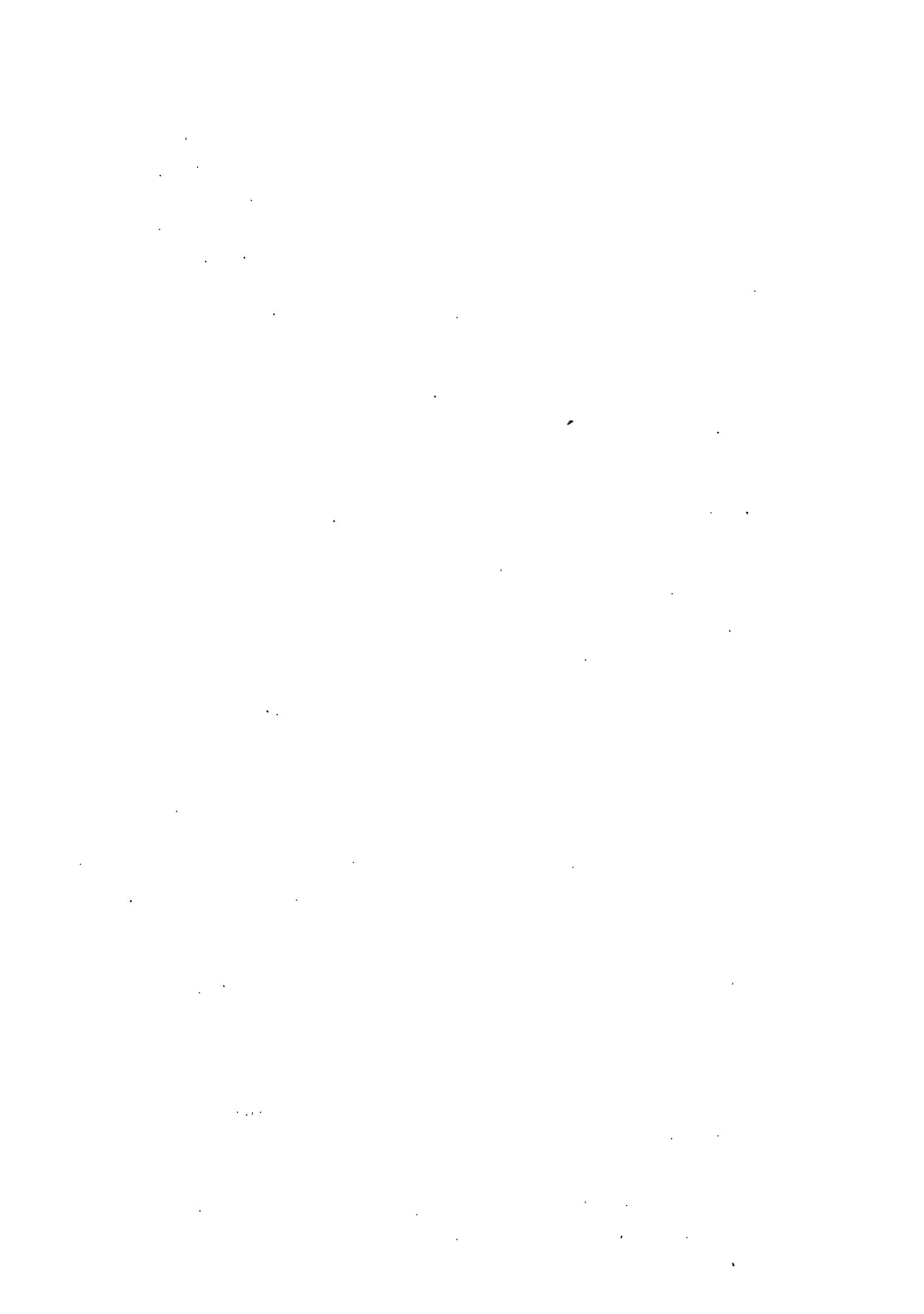
### Contenu

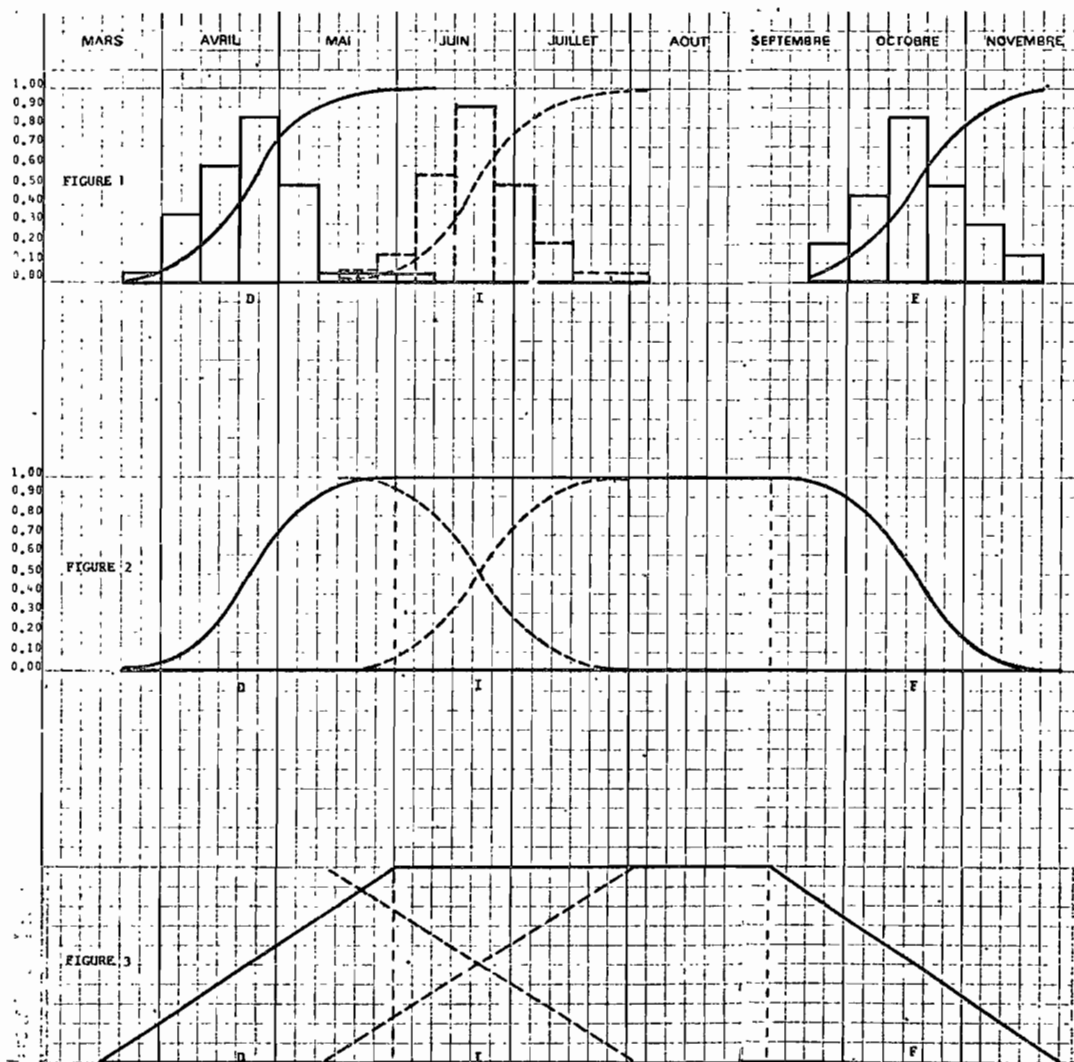
Ces mêmes indices pourront être pondérés par des caractéristiques énergétiques et/ou hydriques du climat local : températures, indices actinothermiques, rayonnements (global, lumineux, net ..), ETP, ETR, ETR/ETP, ETP-ETR ... Il suffira pour cela de sommer les produits de la surface sus-jacente à chaque intervalle du pas de temps par la valeur moyenne de la caractéristique en question dans cet intervalle. En rapportant à 100 ces indices, on obtiendra les valeurs moyennes relatives à ces caractéristiques, différentes de celles que l'on aurait calculées en pondérant la période de position moyenne.

Le rapport à la surface totale (pondérée ou non) de la surface (pondérée ou non) sus-jacente à un intervalle quelconque du pas de temps sera une mesure de l'importance relative de cet intervalle de temps dans la période considérée fréquemment, importance pour la production de l'herbe par exemple.

Enfin, dans chaque intervalle du pas de temps il pourra être intéressant de traiter statistiquement caractéristiques énergétiques ou hydriques, ce qui sera obtenu par le moyen de modèles programmés d'analyse fréquentielle dont deux ont été conçus à l'ORSTOM pour les conditions hydriques :

- un modèle d'analyse fréquentielle des pluies complexe mais particulièrement flexible parce que à pas de temps variable de n jours pouvant glisser de n-1 en n-1 jours jusqu'à 1 en 1 jour.
- un modèle de simulation et d'analyse fréquentielle du bilan hydrique, conçu dans le cadre de l'action de l'action urgente, décrit plus loin.







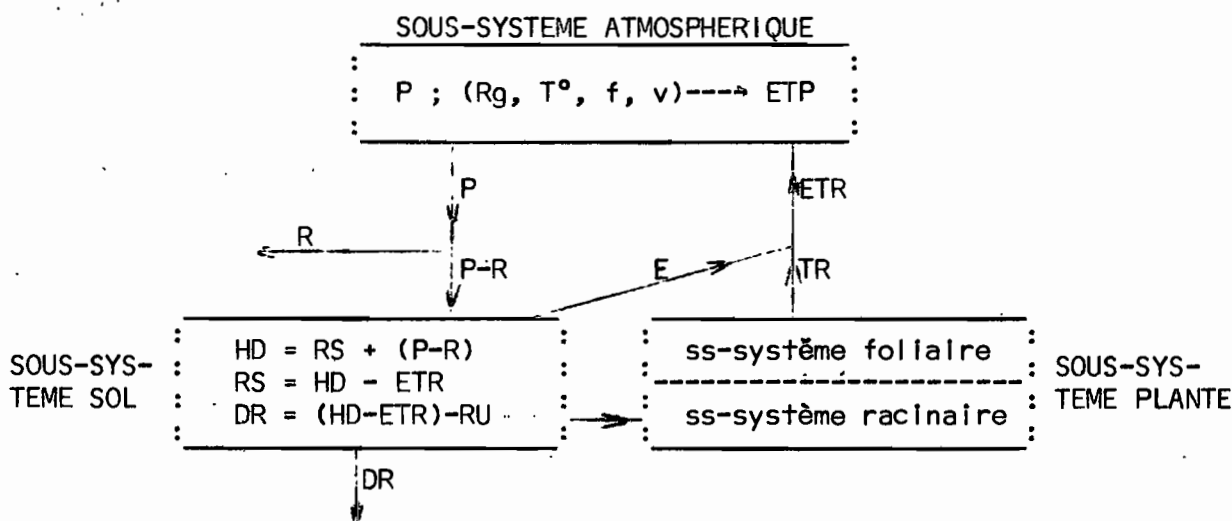
II - MODELES DE SIMULATION ET D'ANALYSE FREQUENTIELLE

DU BILAN HYDRIQUE

1 - LA SIMULATION

Un même système - tel celui des relations hydriques de la couverture végétale, du sol et de l'atmosphère, représenté ci-dessous - donnera lieu à la conception de modèles divers selon le ou les objectifs visés. Pour un même objectif, on élaborera encore des modèles différents selon les besoins et les moyens : empiriques (mettant en jeu des relations tirées de l'observation par ajustements statistiques), analytiques (fondés sur des relations traduisant les processus réels), plus ou moins dynamiques (relatant les vitesses de certains de ces processus). Certaines fonctions, celle des pluies par exemple, pourront aussi être de nature stochastique. Tout cela explique le nombre et la variété des modèles existants.

D'un modèle empirique au départ, on pourra d'ailleurs passer à des modèles progressivement plus analytiques. C'est la démarche que l'on se fixe ici, avec l'objectif principal de développer des modèles adaptés aux régions arides, dont la collection est très pauvre. En même temps seront produits pour les régions humides des modèles ne différant des précédents que par la caractéristique d'adaptation à l'aridité. Nos premiers termes seront donc empiriques.



### Coefficient de réglage

Par rapport aux modèles comparables connus de l'auteur, ceux-ci se distinguent notamment par l'introduction de coefficients de réglage permettant de les ajuster, si nécessaire et possible, à des conditions spécifiques de sol et de végétation, en vue d'améliorer la simulation.

L'un de ces coefficients, le coefficient additif A, opère au niveau du sol par modification de la valeur de l'humidité relative HR ( $HR = HD/RU$ , avec HD : eau disponible en-deçà du point de flétrissement ; RU : réserve utilisable maximale entre point de flétrissement et capacité au champ, pour une profondeur d'exploitation racinaire donnée). On aura donc :

$$HR_{\text{ajustée}} = HD/RU + A \quad (0 \leq A \leq 0,5)$$

Comme  $0 \leq HR \leq 1$ , lorsque  $HR_{\text{ajustée}}$  se présente, par le jeu du calcul, supérieure à 1, on l'égalise à cette limite ; lorsqu'elle se montre négative, on l'égalise à 0.

Comme déjà l'importance de la RU, qui se trouve déterminée, à profondeur d'exploitation racinaire égale, par les caractéristiques physiques du sol, ce coefficient A rend compte des effets de la texture sur le potentiel hydrique. Il pourra être nécessaire de l'ajouter si le sol est très sableux et de le retrancher s'il est très argileux.

L'autre coefficient, K, opère aux niveaux de la végétation et de l'atmosphère. Ce coefficient multiplicatif de l'ETP permet en effet de moduler l'ETM relativement à cette dernière. L'ETM, qui a pour limite ETP en principe, est elle-même la limite de l'ETR. En cas de végétation non couvrante, par exemple, K prendra des valeurs inférieures à 1. S'il y a effet d'ocasis, K sera choisi supérieur à 1 : alors ETM se substituera automatiquement à ETP dans la fonction de calcul d'ETR.

Dans l'état actuel des modèles, A est choisi une fois pour toutes dans le temps, concernant un même sol. Mais on aurait des raisons théoriques de lui donner des valeurs différentes selon que la variation d'humidité du sol se fait dans le sens d'un dessèchement ou d'une réhumectation puisqu'alors à une même humidité correspondent des potentiels différents. De même, on pourra envisager de le faire varier, selon un gradient décroissant par exemple, au fur et à mesure de la progression du front de réhumectation puisque le sol s'enrichit généralement en éléments fins avec la profondeur.

Cela dans le cas du modèle ORU variable adapté aux régions arides.

Quant au coefficient K, il sera modulé, si nécessaire, à chaque étape du pas de temps : pour simuler, par exemple, l'évapotranspiration croissante d'une culture avec l'accroissement de son indice de surface foliaire, ou son évapotranspiration décroissante en fin de végétation ; ou encore pour rendre compte des effets d'oasis.

#### La réserve utilisable (RU)

Communément, il s'agit de la capacité volumique maximale (exprimée en mm d'eau équivalents) du réservoir constitué par une tranche de sol d'épaisseur donnée, entre point de flétrissement et capacité de rétention. Or, si le point de flétrissement correspond assez bien à un pF fixe (4,2), il n'en va pas de même pour la capacité de rétention vraie, ou "capacité au champ", dont le pF varie en gros de 2 à 3 selon la nature du sol. Cette capacité au champ ne peut pour l'instant être mesurée sûrement au laboratoire mais seulement sur le sol en place conservant sa structure. Certaines plantes ayant d'ailleurs la faculté d'absorber de l'eau au-delà du point de flétrissement, la notion de RU reste encore assez imprécise. Lors du réglage d'un modèle, pour simulation, sur les variations d'humidité d'un sol, la valeur de la RU pourra être prise égale à la quantité maximale observée dans la tranche de sol considérée à une époque où elle est supposée drainer. Dans un but d'expérimentation théorique, enfin, on pourra se donner des valeurs de RU répondant à des considérations abstraites.

C'est par le comportement de la RU au cours de bilan que se distinguent les modèles relatifs respectivement aux régions humides et aux régions arides.

Dans le premier cas, s'il s'agit du moins d'une végétation permanente puisant l'eau dans une tranche de sol d'épaisseur peu variable, le modèle opère "RU constante", fixée une fois pour toutes comme donnée d'entrée.

Dans le deuxième, le modèle opère au contraire "à RU variable". Qu'il s'agisse de couvert permanent (survivant en équilibre avec l'eau résiduelle en saison sèche) ou de couvert annuel, le départ en végétation se fait, en régions arides, à partir d'un profil de sol desséché jusqu'au voisinage du point de flétrissement (et au-delà pour l'horizon supérieur).

Il est donc indispensable de simuler l'accroissement de la RU au fur et à mesure de la progression, sous l'effet des pluies, du front de réhumectation.

Pour ce faire, un procédé simple a été imaginé, qui ne sera pas décrit pour l'instant, faute d'avoir pu le contrôler sur la base de données d'observation. Ce contrôle suppose que l'on dispose de mesures effectuées sous végétation parfaitement couvrante et en l'absence de tout ruissellement, conditions que ne remplissent pas sûrement les données rencontrées jusqu'ici.

### L'évapotranspiration réelle (ETR)

La fonction d'évaluation de l'ETR constitue, dans le programme pour ordinateur, un bloc interchangeable. La quasi-totalité des modèles empiriques usent d'une fonction :

$$\text{ETR/ETP} = f(\text{HR}) \quad \text{HR} = \text{HD/RU} \quad 0 = \text{HR} = 1$$

Dans la plupart on a même tout simplement :  $\text{ETR/ETP} = \text{HR}$ , avec cette restriction que si l'humidité relative HR est supérieure à une certaine limite (0,50 - 0,60 - 0,70 ...), variable avec la nature du sol,  $\text{ETR} = \text{ETP}$ .

Dans des modèles plus perfectionnés,  $f(\text{HR})$  est une fonction curvilinéaire. Dans celui d'EAGLEMAN (1971), en particulier, ETR est une fonction cubique de HR dont les quatre paramètres sont eux-mêmes des fonctions d'ETP. C'est cette relation qui constitue pour l'instant notre bloc "ETR". Une amélioration que l'on s'efforcera de réaliser serait de substituer à cette fonction cubique une exponentielle décroissante.

### Le pas de temps

Le pas de temps devrait pouvoir être choisi quelconque, ce qui compliquerait cependant beaucoup la programmation. Aussi s'est-on limité à procéder par pentades (5 jours), décades (10 jours) ou semaines.

Pentades et décades peuvent être prises sous deux acceptations : naturelle (normale) ou calendaire. Les pentades et décades naturelles sont celles qui se suivent rigoureusement de 5 en 5 et de 10 en 10 jours depuis le premier jour de l'année. Il y a ainsi exactement 73 pentades ( $73 \times 5 = 365$ , sauf année bisextile) mais 36,5 décades naturelles.

de

Les pentades et décades calendaires sont au nombre respectif de 6 et 3 par mois, certaines pentades ayant 6 jours (3 jours même du 26 au 28 février) et certaines décades ayant 11 jours (8 jours du 21 au 28 février).

#### Les conditions Initiales et finales

En pas de temps naturel ou calendaire, le bilan peut débuter et se terminer en n'importe quelle pentade, semaine ou décade de l'année. En pentades naturelles et en pentades et décades calendaires, il est possible d'enchaîner le bilan sur deux années successives, ce qui s'impose pour opérer dans les régions à pluies d'hiver (où la saison débute en automne pour s'achever au printemps) ou pour faire du bilan continu sur plusieurs années.

Le bilan peut encore débuter avec la 1ère pentade, semaine ou décade totalisant une hauteur donnée de pluie ; ou avec la pentade, semaine ou décade suivant immédiatement cette 1ère. Dans le cas de modulation périodique de l'ETM par le coefficient K, le bilan s'arrêtera dès la première période pour laquelle  $K = 0$ .

Un volume d'eau au plus égal à la RU peut être initialisé en HD afin de tenir compte de la charge du sol au départ. Ce volume peut même prendre une valeur négative pour tenir compte du dessèchement du sol au-delà du point de flétrissement en fin de saison sèche.

#### Ruissellement et drainage

L'excès d'eau infiltrée, par rapport à l'évapotranspiration réelle (ETR) et à la RU, constitue le drainage, qui s'élimine en fin de période du pas de temps :

$$DR = HD - (RU + ETR)$$

Pour le ruissellement, on le supposera nul dans l'état actuel des modèles. Si cependant il apparaît indispensable de la mettre en œuvre, on pourra éliminer l'excès d'eau par rapport à la RU en début de période, avant d'estimer puis de soustraire d'ETR :

$$R = HD - RU$$

Alors il n'y aura pas drainage. Ultérieurement sera introduite une fonction d'estimation du ruissellement qui laissera sa part au drainage. Cela sera réalisé pour le mieux lorsque l'on opérera le bilan par tranches successives de sol ou de RU et non globalement comme actuellement.

## 2 - L'ANALYSE FREQUENTIELLE

Outre l'intérêt de simuler après réglage, sur une ou plusieurs années d'observations, les phases successives d'un bilan hydrique périodique, le modèle permet d'extrapoler aux années pour lesquelles on dispose de données relatives aux pluies, et aux ETP, c'est à dire de faire de la simulation au deuxième degré. Quand on aura suffisamment d'expérience, il est même vraisemblable que l'on pratiquera cette simulation au second degré directement, sans réglage préalable sur données d'observation.

Dans tous les cas l'on disposera, pour chacune des phases successives du pas de temps, d'autant de résultats que d'années dans l'échantillon des pluies et celui des ETP, pour telle ou telle variable d'entrée, intermédiaire ou de sortie : P, ETP, HR, ETR, RS, D(RS), D(RS)/RU, DR, ETR/ETM, ETM-ETR.

Actuellement l'analyse fréquentielle ne procède pas par ajustement d'une loi de distribution théorique aux séries statistiques relatives à l'une ou l'autre de ces variables, dont les distributions observées peuvent être très diverses. C'est ainsi que les pluies sont distribuées en loi gamma incomplète et les ETR/ETM en loi bêta. Bien qu'il soit faisable d'écrire un programme comportant un type d'analyse statistique spécifique de chaque variable, cette démarche n'était pas réalisable dans le temps dévolu à ce travail. Aussi s'est-on contenté, dans un premier temps, d'opérer un simple découpage des séries au moyen de quantiles correspondant aux fréquences cumulées : 0,05 - 0,10 - 0,20 - 0,25 - 0,30 - 0,40 - 0,50 - 0,60 - 0,70 - 0,75 - 0,80 - 0,90 - 0,95.

Un exemple d'application de ce procédé de répartition est donné en tableau III.

### 3 - LA PROGRAMMATION

#### Les Entrées

Les entrées sont d'abord les apports d'eau et les ETP. Les programmes utilisent les fichiers de cartes sur lesquelles ont été perforées par le Service Hydrologique de l'ORSTOM les pluies journalières relevées par les postes et stations des Etats d'Afrique francophone. A raison de 15 jours par carte, il y en a 24 par année/station. Le programme totalise en colonne (P) les hauteurs de pluies journalières pour les semaines, pentades ou décades naturelles ou calendaires inscrites en colonne (1). En colonne (1) s'inscrivent les quantités d'eau d'irrigation éventuelles, soit que l'on veuille simuler un bilan ayant comporté les irrigations; en totalité ou en complément, soit que l'on veuille expérimenter de façon théorique sur l'irrigation.

Les ETP (colonne ETP) ne sont pas calculées par le programme. Elles sont introduites directement, comme les pluies, mais en valeurs décadales pour un pas de temps de 10 ou 5 jours et en valeurs hebdomadaires pour un pas de temps de 7 jours. Cette introduction peut s'effectuer année par année si l'on veut rendre compte de la variabilité interannuelle, soit une seule fois pour toutes les années si l'on considère que l'approximation par moyennes est suffisante. Ces ETP auront été mesurées en lysimètres ou en bacs ou bien calculées par une formule ou même choisies théoriquement pour expérimenter dans l'abstrait.

Comme autres entrées, reste la RU et les coefficients de réglage dont il a été discuté. Le coefficient A s'inscrit une fois pour toutes au-dessous du tableau des notations tandis qu'une colonne est réservée aux valeurs périodiques du coefficient K dans le tableau des résultats. La RU est entrée une fois pour toutes dans les modèles à RU constante (régions humides). Dans les modèles à RU variable, elle est égale à l'eau du sol au départ puis elle se calcule ensuite automatiquement au fur et à mesure de la progression du front de réhumectation.

### Les Intermédiaires

Les résultats Intermédiaires sont l'eau disponible (colonne HD), l'humidité relative (HR) et l'évapotranspiration maximale (colonne ETM).

$HD = RS$  (eau du sol en fin de période précédente) +  $P + I$  (éventuellement). Si le bilan nulsselle, HD ne peut dépasser la valeur de la RU.

$HR = HD/RU + A$  (éventuellement), avec  $0 \leq HR \leq 1$ .

$ETM = K.ETP$ . Si ETM est supérieure à ETP (parce que K est supérieur à 1), elle se substitue à ETP dans la fonction de calcul d'ETR.

### Les sorties

Ce sont tous les résultats qui présentent un intérêt opérationnel. La plus importante, dont dépendent toutes les autres variables, est l'ETR (colonne ETR) dont on a vu qu'elle est calculée en fonction d'ETP et de HR par une équation cubique. L'ETR est alors soustraite de HD pour donner la réserve du sol en fin de période (colonne RS). Cette soustraction faite, l'excès d'eau éventuel par rapport à la valeur de la RU alimente le drainage (colonne DR) qui sera cumulé de période en période (colonne DRC). Le déficit du sol par rapport à la RU s'inscrit en colonne D(RS) et le déficit relatif en colonne D(RS)/RU avec  $0 \leq D(RS)/RU \leq 1$ .

Les deux dernières colonnes, enfin, présentent les valeurs de deux variables remarquables pour l'agronome, le physiologiste, l'écologiste :

- ETR/ETM ( $0 \leq ETR/ETM \leq 1$ ) qui est le facteur déterminant de la productivité climatique de la matière sèche. Toutes autres choses égales, on peut considérer que la relation est linéaire.

- ETM - ETR ou déficit hydrique au niveau de la plante, que l'irrigation complémentaire a pour fin de combler.

A ces quatre programmes s'ajoute le programme STATIS d'analyse statistique des séries de valeurs interannuelles prises par telle ou telle variable considérée dans une phase donnée du pas de temps. Dans le programme, ces variables ont été numérotées :

- |           |             |                |
|-----------|-------------|----------------|
| - 1 : P   | - 4 : ETR   | - 7 : D(RS)/RU |
| - 2 : ETP | - 5 : RS    | - 8 : DR       |
| - 3 : HR  | - 6 : D(RS) | - 9 : ETR/ETM  |
|           |             | -10 : ETM-ETR  |

Cette numérotation permet de choisir à volonté les variables pour lesquelles on désire avoir une analyse fréquentielle.

Pour ce faire, on sort sur cartes, perforées à la demande, les séries de valeurs relatives aux variables auxquelles on s'intéresse puis on les réintroduit comme données du programme STATIS.

#### 4 - LES APPLICATIONS

Les applications intéressent avant tout l'agronomie - plus spécialement l'agroclimatologie - et l'écologie, mais aussi la pédologie. L'hydrologie, l'hydrogéologie, la bioclimatologie.

Pour le bioclimatologiste, un tel modèle empirique est déjà un modèle des relations hydriques dans le continuum "sol-plante-atmosphère", qu'il conviendrait de développer dans un sens plus analytique aux trois niveaux en question pour aboutir à "produire" de la matière sèche.

Pour le pédologue, ce serait une possibilité, par exemple, d'estimer les durées-fréquences suivant lesquelles les horizons successifs du sol se trouvent humectés. Un modèle opérant le bilan par tranches de sol ou de RU ouvrirait la possibilité d'estimer les intensités-durées-fréquences d'humectation. Cet outil devrait servir aussi à étudier rationnellement le lessivage.

L'hydrologue trouverait là un moyen de tester des hypothèses concernant le ruissellement et l'hydrogéologue, le drainage au-delà de la zone non saturée. Une spécialisation vers ces objectifs pourrait donc être envisagée.

L'écologiste, concerné par ces différents aspects du fonctionnement des écosystèmes, devrait y voir une modélisation d'un sous-système du système général de la production primaire.

Pour l'agronome, enfin, les applications sont multiples, dans les domaines de la culture sèche, de l'irrigation de complément et de l'irrigation totale, avec les possibilités de simuler, d'interpréter l'expérimentation, d'expérimenter dans l'abstrait, etc....

Le tableau 1 et la figure consécutive représentent la simulation, comparée au témoin (en trait épais) réellement observé durant une année entière, des variations hebdomadaires du stock d'eau du sol dans une tranche de 170 cm sous une culture de *Panicum maximum* à Adiopodoumé (ABIDJAN, Côte d'Ivoire).

Le tableau II est un des bilans à RU variable simulés pour une culture de riz pluvial à KENIEBA (Mali).

0 - 170 cm

ADIOPODOUME - Bilan hydrique moyen des profils 6 (fumé), 7 (semi-fumé) et 8 (non-fumé) sous Panicum maximum.

SIMULATION SANS REGLAGE

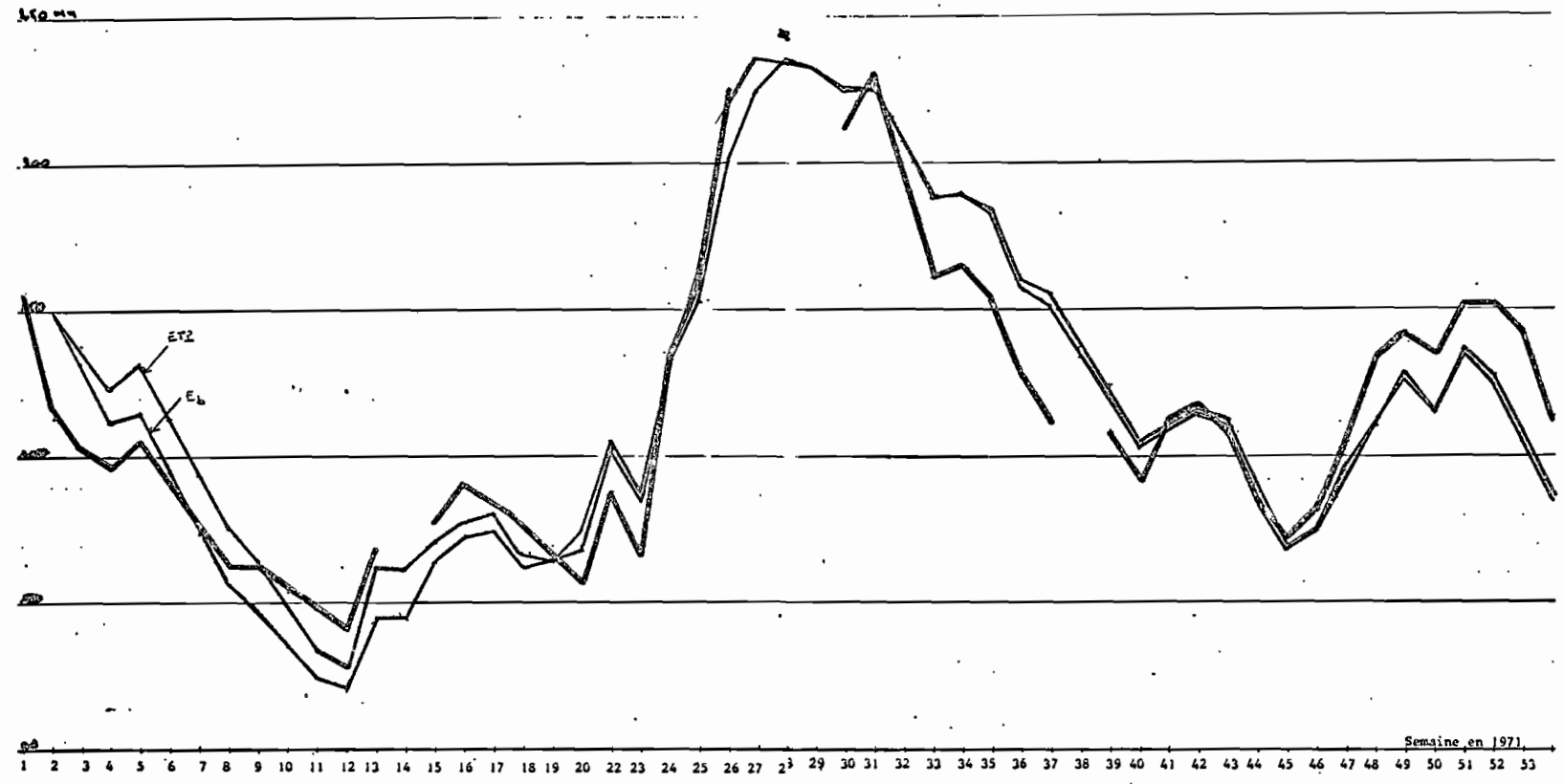


TABLEAU I

RESULTATS :	P	I	HD	HR	ETP	K	ETM	ETR	RS	DR	DRC	D(RS)	D(RS)/RU	ETR/ETM	ETM-ETP
2	.0	.0	155.0	.62	17.0	1.00	17.0	17.0	138.0	.0	.0	112.0	.45	1.00	.0
3	.0	.0	138.0	.55	15.0	1.00	15.0	15.0	123.0	.0	.0	127.0	.51	1.00	.0
4	24.0	.0	147.0	.59	16.0	1.00	16.0	16.0	131.0	.0	.0	119.0	.48	1.00	.0
5	.0	.0	131.0	.52	19.0	1.00	19.0	18.5	112.5	.0	.0	137.5	.55	.98	.5
6	.0	.0	112.5	.45	20.0	1.00	20.0	18.6	93.9	.0	.0	156.1	.62	.93	1.4
7	.4	.0	94.3	.38	26.0	1.00	26.0	19.8	74.5	.0	.0	175.5	.70	.76	6.2
8	8.0	.0	87.5	.33	26.0	1.00	26.0	18.6	64.0	.0	.0	186.0	.74	.71	7.4
9	2.0	.0	66.0	.26	30.0	1.00	30.0	16.9	49.0	.0	.0	201.0	.80	.56	17.1
10	.0	.0	49.0	.20	28.0	1.00	28.0	14.2	34.9	.0	.0	215.1	.86	.51	13.8
11	6.8	.0	41.7	.17	32.0	1.00	32.0	12.7	29.0	.0	.0	221.0	.88	.40	19.3
12	52.2	.0	81.2	.32	24.0	1.00	24.0	17.9	63.2	.0	.0	186.8	.75	.75	6.1
13	18.0	.0	81.2	.32	31.0	1.00	31.0	19.2	62.0	.0	.0	188.0	.75	.62	11.8
14	29.0	.0	91.0	.36	29.0	1.00	29.0	20.1	70.8	.0	.0	179.2	.72	.69	8.9
15	29.2	.0	100.0	.40	32.0	1.00	32.0	21.8	78.7	.0	.0	171.8	.69	.68	10.2
16	26.0	.0	104.2	.42	34.0	1.00	34.0	22.7	81.5	.0	.0	168.5	.67	.67	11.3
17	5.5	.0	87.0	.35	29.0	1.00	29.0	19.7	67.3	.0	.0	182.7	.73	.68	9.3
18	73.4	.0	90.7	.36	29.0	1.00	29.0	20.1	70.6	.0	.0	179.4	.72	.69	8.9
19	24.3	.0	94.9	.38	27.0	1.00	27.0	20.1	74.8	.0	.0	175.2	.70	.74	6.9
20	55.6	.0	130.4	.52	34.0	1.00	34.0	25.9	104.5	.0	.0	145.5	.58	.76	8.1
21	8.6	.0	113.1	.45	35.0	1.00	35.0	24.1	89.0	.0	.0	161.0	.64	.69	10.9
22	69.1	.0	158.1	.63	27.0	1.00	27.0	24.1	134.0	.0	.0	116.0	.46	.89	2.9
23	47.3	.0	181.3	.73	30.0	1.00	30.0	27.1	154.2	.0	.0	95.8	.38	.90	2.9
24	74.9	.0	229.1	.92	30.0	1.00	30.0	28.4	200.7	.0	.0	49.3	.20	.95	1.6
25	217.5	.0	250.0	1.00	25.0	1.00	25.0	24.4	225.6	168.2	168.2	24.4	.10	.98	.6
26	322.3	.0	250.0	1.00	14.0	1.00	14.0	14.0	236.0	297.9	466.1	14.0	.06	1.00	.0
27	132.1	.0	250.0	1.00	18.0	1.00	18.0	18.0	232.0	118.1	584.2	18.0	.07	1.00	.0
28	71.6	.0	250.0	1.00	26.0	1.00	26.0	25.2	224.8	53.6	637.8	25.2	.10	.97	.8
29	28.8	.0	250.0	1.00	24.0	1.00	24.0	23.6	226.4	3.6	641.4	23.6	.09	.98	.4
30	2.5	.0	228.9	.92	22.0	1.00	22.0	21.5	207.5	.0	641.4	42.5	.17	.98	.5
31	.0	.0	207.5	.83	20.0	1.00	20.0	19.6	187.9	.0	641.4	62.1	.25	.98	.4
32	20.4	.0	208.3	.83	18.0	1.00	18.0	18.0	190.3	.0	641.4	59.7	.24	1.00	.0
33	5.5	.0	195.8	.78	14.0	1.00	14.0	14.0	181.8	.0	641.4	68.2	.27	1.00	.0
34	.7	.0	182.5	.73	25.0	1.00	25.0	23.3	159.1	.0	641.4	90.9	.36	.93	1.7
35	10.5	.0	169.6	.68	18.0	1.00	18.0	18.0	151.6	.0	641.4	98.4	.39	1.00	.0
36	2.3	.0	153.9	.62	20.0	1.00	20.0	19.5	134.4	.0	641.4	115.6	.46	.97	.5
37	5.1	.0	139.5	.56	19.0	1.00	19.0	18.7	120.9	.0	641.4	129.1	.52	.98	.3
38	3.5	.0	124.4	.50	26.0	1.00	26.0	22.0	102.4	.0	641.4	147.6	.59	.85	4.0
39	31.2	.0	133.6	.53	29.0	1.00	29.0	24.0	109.6	.0	641.4	140.4	.56	.83	5.0
40	26.0	.0	135.6	.54	20.0	1.00	20.0	19.2	116.4	.0	641.4	133.6	.53	.96	.8
41	22.5	.0	138.9	.56	33.0	1.00	33.0	26.3	112.6	.0	641.4	137.4	.55	.80	6.7
42	.0	.0	112.6	.45	38.0	1.00	38.0	24.7	87.9	.0	641.4	162.1	.65	.65	13.3
43	2.4	.0	90.3	.36	28.0	1.00	28.0	19.9	70.4	.0	641.4	179.6	.72	.71	8.1
44	27.1	.0	97.5	.39	29.0	1.00	29.0	20.9	76.7	.0	641.4	173.3	.69	.72	8.1
45	42.7	.0	119.4	.48	27.0	1.00	27.0	22.1	97.3	.0	641.4	152.7	.61	.82	4.9
46	36.3	.0	133.6	.53	27.0	1.00	27.0	23.0	110.6	.0	641.4	139.4	.56	.85	4.0
47	41.0	.0	151.6	.61	26.0	1.00	26.0	23.2	128.3	.0	641.4	121.7	.49	.89	2.8
48	16.5	.0	144.8	.58	38.0	1.00	38.0	29.3	115.5	.0	641.4	134.5	.54	.77	8.7
49	37.5	.0	153.0	.61	16.0	1.00	16.0	16.0	137.0	.0	641.4	113.0	.45	1.00	.0
50	8.6	.0	145.6	.58	18.0	1.00	18.0	18.0	127.6	.0	641.4	122.4	.49	1.00	.0
51	.0	.0	127.6	.51	21.0	1.00	21.0	19.6	108.0	.0	641.4	142.0	.57	.93	1.4
52	.0	.0	108.0	.43	24.0	1.00	24.0	20.1	87.9	.0	641.4	162.1	.65	.84	3.9
TOTAUX	1618.9	.0			1283.0		1283.0	1044.6						238.4	

ANNEE 1 1962

RU MAXIMALE 1 100.

TABLEAU II

RESULTATS :	P	I	HD	HR	ETP	K	ETM	ETR	RS	DR	DRC	D(RS)	D(RS)/RU	ETR/ETM	ETM-ETR	RU
*MAI ** 2EME	17.1	.0	17.1	1.00	36.5	.50	18.2	17.1	.0	.0	.0	17.1	1.00	.94	1.1	17.1
*MAI ** 3EME	19.5	.0	19.5	1.00	33.0	.50	16.5	16.5	3.0	.0	.0	16.5	.85	1.00	.0	19.5
*MAI ** 4EME	29.4	.0	32.4	1.00	33.0	.60	19.8	19.8	12.6	.0	.0	19.8	.61	1.00	.0	32.4
*MAI ** 5EME	22.4	.0	35.0	1.00	36.0	.60	21.6	21.6	13.4	.0	.0	21.6	.62	1.00	.0	35.0
*MAI ** 6EME	20.7	.0	34.1	.97	43.2	.70	30.2	30.2	3.9	.0	.0	31.1	.89	1.00	.0	35.0
*JUIN ** 1ERE	.0	.0	3.9	.11	33.0	.70	23.1	3.9	.0	.0	.0	35.0	1.00	.17	19.2	35.0
*JUIN ** 2EME	42.0	.0	42.0	1.00	33.0	.80	26.4	26.4	15.6	.0	.0	26.4	.63	1.00	.0	42.0
*JUIN ** 3EME	25.8	.0	41.4	.99	26.5	.90	23.8	23.8	17.6	.0	.0	24.4	.58	1.80	.0	42.0
*JUIN ** 4EME	48.7	.0	66.2	1.00	26.5	1.00	26.5	26.5	39.8	.0	.0	26.5	.40	1.00	.0	66.2
*JUIN ** 5EME	13.8	.0	83.6	.81	31.3	1.10	31.3	30.2	23.3	.0	.0	42.9	.65	.96	1.1	66.2
*JUIN ** 6EME	67.2	.0	90.5	1.00	31.3	1.10	31.3	31.2	59.3	.0	.0	31.2	.34	1.00	.1	90.5
*JUIL ** 1ERE	73.2	.0	132.5	1.00	33.0	1.10	33.0	32.6	99.9	.0	.0	.1	.00	.99	.4	100.0
*JUIL ** 2EME	14.2	.0	114.1	1.00	33.0	1.10	33.0	32.6	81.6	.0	.0	18.4	.14	.99	.4	100.0
*JUIL ** 3EME	54.4	.0	136.0	1.00	28.6	1.10	28.6	28.6	100.0	7.4	7.4	.0	.00	1.00	.0	100.0
*JUIL ** 4EME	22.9	.0	122.9	1.00	28.6	1.10	28.6	28.6	94.3	.0	7.4	5.7	.00	1.00	.0	100.0
*JUIL ** 5EME	61.8	.0	156.1	1.00	24.7	1.10	24.7	24.7	100.0	31.4	38.7	.0	.00	1.00	.0	100.0
*JUIL ** 6EME	36.1	.0	136.1	1.00	29.7	1.10	29.7	29.7	100.0	6.4	45.1	.0	.00	1.00	.0	100.0
*AOUT ** 1ERE	179.6	.0	275.6	1.00	27.5	1.10	27.5	27.5	100.0	148.1	193.2	.0	.00	1.00	.0	100.0
*AOUT ** 2EME	49.0	.0	149.0	1.00	25.0	1.00	25.0	25.0	100.0	24.0	217.2	.0	.00	1.00	.0	100.0
*AOUT ** 3EME	169.4	.0	269.4	1.00	25.8	1.10	25.8	25.8	100.0	143.5	368.8	.0	.00	1.00	.0	100.0
*AOUT ** 4EME	122.2	.0	222.2	1.00	23.5	.90	21.1	21.1	100.0	101.1	461.8	.0	.00	1.00	.0	100.0
*AOUT ** 5EME	169.5	.0	269.5	1.00	23.5	.80	18.8	18.8	100.0	150.7	612.5	.0	.00	1.00	.0	100.0

LA VARIABLE EST 1 PLUIES

LE NOMBRE DE DONNEES EST 1 46

TABLEAU III

PERIODE	MEDIANE	DEC 1	DEC 2	DEC 3	DEC 4	DEC 5	DEC 6	DEC 7	DEC 8	DEC 9	QUA 1	QUA 2	QUA 3	VIN 1	VIN 19
*12	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
*13	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
*14	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
*15	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
*16	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
*17	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00
*18	9.75	.00	.00	.00	1.50	9.75	16.00	26.95	38.30	49.30	.00	9.75	35.75	.00	60.30
*19	30.80	.00	4.35	13.15	17.80	30.80	34.30	47.00	48.60	59.00	9.50	30.80	48.00	.00	74.10
*20	44.10	1.95	16.10	27.20	36.00	44.10	46.55	51.85	60.25	75.85	23.20	44.10	55.60	.00	100.20
*21	44.00	16.40	24.50	33.85	40.25	44.00	51.3								

### III - ETP-PENMAN POUR LES STATIONS METEOROLOGIQUES

#### DES ZONES SAHELIENNE ET SOUDANIENNE

La formule de Penman étant valable en toute saison (bien que surestimant légèrement en saison humide et sous-estimant de même en saison sèche) et à toutes les échelles, il a paru bon de la préférer aux autres formules courantes même si elle exige la connaissance de quatre variables : la fraction d'insolation ( $n/N$ , à défaut de la radiation globale  $R_g$ ), la température moyenne (du maximum et du minimum), la tension de vapeur ( $e_d$  millibars) et la vitesse du vent (m/sec à 2 mètres), que seules relèvent, en Afrique francophone, les stations de météorologie synoptique.

Sans doute serait-il possible, en interpolant les durées d'insolation, d'augmenter leur nombre de celui des postes climatologiques (qui mesurent la température et l'humidité relative) en utilisant au contraire la formule de Turc, par exemple, qui n'exige pas la connaissance du vent. Mais on sera finalement amené, à partir des points calculés, à interpoler l'ETP pour tout poste pluviométrique assez bien placé pour cela. Or mieux vaut, nous semble-t-il, devoir interpoler à partir de points moins nombreux mais de valeur plus sûre.

Les données de base sont donc celles qui sont produites dans les stations météorologiques des services météorologiques nationaux. Les vitesses du vent ont été reconstituées à partir des fréquences observées à 10 mètres puis ramenées à 2 mètres par un coefficient 0,78.

Les tableaux qui suivent donnent ainsi pour six Etats les ETP mensuelles, précédées de l'algorithme de calcul.

EVAPORATION et EVAPOTRANSPIRATION PENMAN

PAYS HAUTE VOLTA

Latitude 11°

LIEU

Longitude

PERIODE Mois de JANVIER

BOBO-DIOULASSO

Altitude

$$E_T = \frac{\Delta/\gamma \left[ (1-\alpha) R_A (0,18 + 0,62 n/N) - \sigma T^4 (0,56 - 0,092 \sqrt{e_d}) (0,10 + 0,90 n/N) \right] + 0,35 (e_a - e_d) (1 + u/100) \text{ ou } (0,5 + u/100)}{\Delta/\gamma + 1}$$

$R_A$ , mm	12,7	$n$ , heures et dixièmes	289
$R_g = R_A \times f_1$	8,64	$N$ , heures et dixièmes	358
$(1-\alpha) R_g$	6,91	$n/N$	0,81
$\sigma T^4$ mm	15,66	$0,62 n/N$	0,50
$R_B = \sigma T^4 \times f_2 \times f_e$	4,68		0,18
$R_{nT} = (1-\alpha) R_g - R_B$	2,23	$f_1$	0,68
$\Delta/\gamma R_{nT}$	6,38	$0,90 n/N$	0,73
$\Delta/\gamma R_{nT} (\Delta/\gamma + 1)^{-1}$	1,65	$E_{HT}$	0,10
$E_{aT} = (e_a - e_d) f_{uT}$	14,33	$f_2$	0,83
$E_{aT} (\Delta/\gamma + 1)^{-1}$	3,71	$f_e$	0,36
$E_T$ jour	5,36	$T, ^\circ C$	25,0
$E_T$ mois	166,	$\Delta/\gamma$	2,86
$(0,95) R_g$	,	$F = e_{p, mb}$	31,7
$R_B$	,	$f = e_{d, mb}$	6,1
$R_{no} = (0,95) R_g - R_B$	,	$e_a - e_d$	25,6
$\Delta/\gamma R_{no}$	,	$v$	2,7
$\Delta/\gamma R_{no} (\Delta/\gamma + 1)^{-1}$	,	$a$	0,11
$E_{a0} = (e_a - e_d) f_{u0}$	,	$f_v$	0,30
$E_{a0} (\Delta/\gamma + 1)^{-1}$	,	$b_T$	0,26
$E_0$ jour	,	$b_0$	0,13
$E_0$ mois	,	$f_{u0}$	0,
		$f_{uT}$	0,56

En altitude, multiplier  $\Delta/\gamma$  par  $P_0/P_h$

H A U T E V O L T A - E T P Penman

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE
BOBO- DIOULASSO:	166	175	212	197	197	166	147	140	135	171	167	171
BOROMO	151	155	188	182	182	155	144	127	132	162	149	139
DORI	135	150	190	197	228	209	183	159	162	175	142	130
FADA N'GOURMA	167	172	206	196	211	175	154	134	141	173	162	160
GAOUA	171	164	197	183	178	146	145	125	126	157	156	153
OUAGA- DOUGOU	166	173	206	214	210	183	167	141	144	175	166	159
OUAHIGOUYA:	167	175	221	225	240	207	183	163	165	185	165	162

M A L I - E T P Penman

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOÛT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE
BAMAKO	171	188	221	222	222	183	153	137	142	159	162	162
BOUGOUNI	154	158	203	198	196	169	148	132	137	155	148	141
GAO	208	229	271	279	305	290	272	218	221	232	196	177
HOMBORI	143	159	196	207	253	239	208	175	189	195	151	133
KAYES	153	166	218	227	258	204	170	150	153	166	150	149
KENIEBA	154	210	194	198	207	165	129	119	142	146	134	134
KIDAL	134	156	187	221	247	241	244	217	208	186	153	120
KITA	161	176	208	211	210	171	148	127	132	153	146	142
KOUTIALA	146	151	188	189	189	178	155	138	147	163	140	133
MENAKA	149	166	202	206	243	249	238	198	195	188	157	164
MOPTI	171	195	236	263	262	220	188	157	160	182	173	179
NIORO DU SAHEL	145	165	210	227	266	248	126	170	171	172	150	156
SAN	173	183	220	214	240	201	169	148	153	166	154	136
SEGOU	158	167	204	199	228	195	166	146	150	164	158	150
SIKASSO	142	154	182	178	181	155	142	128	128	153	141	134
TESSALIT	188	215	260	276	343	312	317	293	255	263	195	169
TOMBOUCTOU	144	150	194	208	239	222	210	191	189	193	158	126

M A U R I T A N I E - E T P Penman

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE
AIOUN EL ATROUSS	232	236	304	323	310	306	262	208	207	226	210	229
AKJOUJT	161	173	230	251	283	282	262	249	234	218	178	158
ATAR	160	167	225	246	289	306	308	283	246	210	172	164
BOUTILIMIT	223	225	302	313	321	315	276	237	229	246	232	218
KANKOSSA	146	155	223	233	254	247	217	185	173	173	158	133
KIFFA	231	237	298	317	308	303	265	215	205	219	205	228
NOUAKCHOTT	142	149	201	214	234	213	189	184	180	184	149	133
NEMA	259	284	305	298	296	269	248	208	203	250	231	234
ROSSO	184	190	270	279	297	268	230	199	188	206	181	188
TIDJIKJA	147	151	205	213	244	251	248	224	204	189	150	138

N I G E R - E T P Penman

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE
BIRNI N'KONNI	177	188	221	223	233	213	173	145	161	183	168	165
GAYA	170	182	215	218	204	183	154	125	145	176	164	157
MAINE SOROA	160	174	219	211	234	216	190	154	176	199	170	152
MARADI	155	167	199	202	222	204	175	157	155	170	148	140
N'GUIGMI	143	147	186	190	213	204	198	172	170	174	142	133
NIAMEY	174	187	224	228	241	209	176	148	157	190	174	163
TAHOUA	188	196	227	230	255	235	209	174	180	206	184	165
TILLABERY	179	185	225	223	239	216	192	170	174	200	178	168
ZINDER	157	169	202	217	229	201	175	146	168	190	164	148
AGADES	175	190	213	227	259	229	241	215	203	199	164	150
BILMA	139	151	207	224	244	225	241	238	216	194	143	137

S E N E G A L - E T P Penman

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE
DAKAR	154	147	181	189	191	187	188	169	163	170	169	174
DIOURBEL	145	157	208	214	219	193	165	143	143	158	140	129
KAOLACK	166	174	226	225	242	209	180	153	153	167	158	157
LINGUERE	149	175	201	204	216	203	184	150	149	167	151	146
MATAM	125	149	176	186	240	216	197	169	156	164	128	115
PODOR	138	162	203	203	242	238	217	189	173	176	144	133
St LOUIS	151	154	198	183	181	175	185	172	164	167	152	145
TAMBA-COUNDA	148	156	203	200	211	162	138	122	128	144	144	136
ZIGUINCHOR	140	145	191	208	210	162	136	122	125	139	141	135
KOLDA	130	141	182	182	190	156	137	123	125	133	128	122

T C H A D - E T P Penman

	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE
ABECHER	178	178	231	244	255	229	193	157	182	212	196	179
AM-TIMAN	151	158	195	201	209	169	136	127	141	160	150	144
ATI	165	163	201	206	222	212	181	150	163	186	157	141
BOUSSO	112	150	192	201	200	163	139	131	142	167	156	141
FAYA-LARGEAU	231	240	292	307	326	320	283	272	289	299	240	227
FORT LAMY	175	191	237	241	247	211	176	142	157	193	187	179
FORT AR-CHAMBAULT	158	158	198	196	183	148	125	123	125	149	148	144
MONGO	161	163	202	200	207	180	145	121	142	162	152	154
MOUNDOU	158	165	195	182	177	146	129	122	121	149	158	156
PALA												

ETUDE DU MILIEU RURAL  
ET DE LA DYNAMIQUE DU DEVELOPPEMENT.

---

I - Mise au point sur la sécheresse et les problèmes humains en  
Afrique Sahélienne.

par E. BERNUS

II - La sécheresse dans l'extrême Nord du Cameroun.

par J. BOULET

III - Enquêtes sur les pertes de bétail dans le Nord de la Haute-Volta.

par H. BARRAL



MISE AU POINT SUR LA SECHERESSE  
ET LES PROBLEMES HUMAINS EN AFRIQUE SAHELIEENNE  
-----

par Edmond BERNUS - nov. 1974

1) La notion de sécheresse :  
-----

La sécheresse qui sévit depuis plusieurs années invite à s'interroger sur la notion même de sécheresse. Dans la zone sahélo-soudanienne, qui connaît une saison des pluies estivale régulière, mais qui diminue en quantité et en durée, au fur et à mesure que l'on monte en latitude, la sécheresse est-elle seulement un déficit global de la pluviométrie annuelle par rapport à une moyenne calculée sur un certain nombre d'années d'observations ? Une sécheresse exceptionnelle se manifeste avant tout par le fait que la végétation, cultivée ou spontanée, n'a pu arriver normalement à maturité ; or un total annuel des précipitations déficitaire ne suffit souvent pas à expliquer de mauvaises récoltes ou l'absence des pâturages. Il faut alors faire intervenir la notion de "pluies utiles", c'est-à-dire la portion des pluies qui a eu un effet sur le développement de la végétation. En zone soudanienne, les pluies précoces, trop espacées, obligent souvent les paysans à procéder à plusieurs semis successifs. Pour la végétation sahélienne, il en est de même : si des pluies sont venues trop tôt sans être suivies par d'autres, la végétation démarre et arrive mal à maturité. Si elles arrivent trop tard, après une longue interruption, elles ne jouent que peu de rôle dans le développement végétal. Les pluies utiles peuvent être définies comme les premières précipitations qui permettent une rétention en eau du sol suffisante pour rendre possible le développement des plantes sans hiatus jusqu'à maturité. Beaucoup d'auteurs ont cherché à cerner cette notion, variable selon les zones concernées et une définition relativement simple a été établie par le géographe J.GALLAIS (1967) "Une chute supérieure à 3 mm, suivie d'une pluie semblable dans un délai maximum d'une semaine".

Avec une telle définition, on s'aperçoit que la saison des pluies utiles est relativement brève. Dans une même zone, cette période peut se décaler d'une année à l'autre, mais on considère que dans la zone sahélienne avec élevage nomade, elle se situe en général du 15 juillet au 31 août, et se prolonge parfois jusqu'au 15 septembre. Cette notion per-

met d'expliquer bien des sécheresses qui provoquèrent de graves pertes en bétail par manque de pâturage, alors que le total des précipitations avait été normal, voire même supérieur à la moyenne. Ce fut le cas des années 1967 et 1968 où le total des pluies à Agadez fut respectivement de 155, 3 et 165, 1 mm (moyenne 1921-1954 : 164,2). Or 1967 fut une bonne année, alors que 1968 fut une année de sécheresse où des animaux moururent en grand nombre. Alors qu'en 1967 les pluies s'étaient bien réparties, en 1968, si le total des précipitations fut supérieur, la part des pluies utiles fut très faible : 50,2 mm tombèrent fin avril, en six jours seulement. Le mois de mai suivant ne reçut que 0,5 mm en un seul jour ; c'est dire que non seulement les 50,2 mm ne servirent à rien, mais encore provoquèrent une reprise trop précoce de la végétation, (germination et bourgeonnement), qui ne put arriver normalement à maturité, faute de pluies au mois de mai. Par conséquent, on peut dire que la sécheresse correspond à un déficit de pluies utiles qui ne permet pas à la végétation de se développer normalement (Bernus, 1974).

## 2) Les sécheresses passées :

---

L'évolution du climat à l'époque protohistorique a souvent été évoquée en se référant aux vestiges archéologiques et aux gravures et peintures rupestres que l'on trouve dans tout le Sahara. "Au cours du quaternaire", écrit le professeur Capot-Rey (1953), "l'aridité qui avait régné dans le Sahara pendant la plus grande partie des périodes géologiques antérieures a été interrompue par des crises de pluviosité relative dont l'une se place au Paléolithique ancien, et l'autre, moins marquée, au Néolithique". De l'Antiquité à la phase historique récente, c'est-à-dire celle pour laquelle il existe des sources écrites ou des traditions orales, beaucoup d'auteurs (Hubert, 1920) admettent un dessèchement progressif de l'Afrique. D'autres, en se référant aux observations des premiers explorateurs, à propos du lac Tchad ou aux variations de débit du Niger depuis le début du siècle, comme à la profondeur des nappes à différentes périodes, pensent qu'on assiste à des successions périodiques de sécheresses. Aubréville (1938) a pu dire en effet que "le climat de l'Afrique occidentale est soumis à des oscillations à périodicité de 20 à 50 ans à l'intérieur desquelles le climat subirait d'autres variations de moindre durée".

Les données pluviométriques sont trop récentes pour donner une idée précise de l'évolution précise du climat. Les villes sahéliennes

de la Côte, les premières touchées par le colonisateur, bénéficient seules de relevés datant de la fin du siècle dernier : Saint-Louis depuis 1855, Dakar depuis 1887 ; les stations de l'intérieur, Niamey, Zinder depuis 1905 et 1907 ; Mopti, Tombouctou, Agadès, Tahoua, depuis 1922 pour les deux premières, 1921 pour les dernières ; enfin à partir de 1930 le réseau a été progressivement complété. Les observations sont donc insuffisantes pour faire un bilan précis des tendances générales du climat, comme des oscillations interannuelles.

Depuis le début du siècle, cependant, on peut faire état de plusieurs périodes sèches, attestées par les données pluviométriques et confirmées par les traditions orales. Les peuples pasteurs ont l'habitude de donner à chaque année un nom, qui fait référence à l'évènement majeur inscrit dans les mémoires. Ces calendriers historiques font apparaître plusieurs périodes sèches.

1900-1903 : fut une période de sécheresse dans certaines régions de la zone sahélo-saharienne. Elle est attestée dans l'Anzourou et le Zermaganda, c'est-à-dire dans l'Ouest du Niger (Sidikou, 1973).

Elle se manifeste dans l'Ahaggar, où l'on note une migration vers le Tassili des Ajjer, comme le signale le calendrier historique.

1900 : année en laquelle beaucoup de Kel Ahaggar allèrent dans l'Ajjer où il y avait du pâturage, à cause de la sécheresse qui régnait dans l'Ahaggar.

1902 : année en laquelle beaucoup de Kel Ahaggar allèrent dans l'Ajjer, où il y avait du pâturage... (Foucauld, 1952, III, 1544-55)

1911-1914 : nouvelle période de sécheresse attestée par les calendriers historiques des Touaregs Iullemmeden :

1911 : "l'année du manque de pâturage"

1912 : "l'année du Datsena" (référence à la migration en Nord Nigeria pour trouver du mil)

1914 : "l'année de la famine".

1930-1931 : nouvelle période de sécheresse :

1930 : "l'année des sauterelles"

1931 : "l'année de l'agerof (Tribulus terrestris, car il fallut manger cette graine de cueillette pour compenser l'absence de mil (cf. NICOLAS, 1950, p. 81)

...

1940-1943 : encore une période de sécheresse attestée dans plusieurs régions.

Mais ces témoignages ne peuvent attester une sécheresse générale et zonale que s'ils sont recoupés par plusieurs autres. Les pluies de la zone sahélienne, variables dans le temps comme dans l'espace, peuvent faire défaut dans une région, alors que l'ensemble de la zone a connu des précipitations normales. Ces traditions, confrontées entre elles et avec les relevés pluviométriques (Boudet, 1972), font apparaître des sécheresses zonales et des sécheresses locales, souvent dues à la seule mauvaise répartition des pluies.

La sécheresse de 1910-1914 a frappé l'ensemble de la zone sahélienne. Les chiffres et les témoignages concordent : par comparaison avec la sécheresse présente, tous les Touaregs âgés se rapportent à cette période qui connut également des migrations vers le Sud et des hécatombes de bétail.

La sécheresse de 1930-1932, par contre n'apparaît pas dans les données pluviométriques. A Tillabery, épicode du phénomène, on note seulement en 1929, une distribution irrégulière des pluies : sur un total de 374,9 mm, 108 mm tombèrent en mai et ces pluies ne furent suivies d'aucune autre jusqu'au mois de juillet. Or les rapports administratifs signalent que dans l'Ouest du Niger la famine causa en 1931, 30.000 morts et l'exode vers le Sud (Gold-Coast, Nigéria) d'un nombre de personnes équivalent. Ce désastre provoqua une enquête administrative et une mission <sup>en</sup> ~~est~~ de France s'enquérir des responsabilités. Il semble que la famine fut avant tout due à une invasion de sauterelles (criquet pèlerin-Schistocerca gregaria), comme en fait foi le calendrier historique. Toutes les récoltes furent ainsi dévastées.

La sécheresse de 1940-1943 apparaît à nouveau comme une sécheresse zonale dans les statistiques pluviométriques qui sont alors nombreuses.

Enfin, de 1969 à 1973, la sécheresse touche également l'ensemble de la zone sahélienne.

Ces oscillations climatiques ne sont pas décelables dans les moyennes pluviométriques calculées sur 20, 30 ou 40 ans, ni dans les isohyètes (lignes joignant les stations d'égale pluviométrie) qui en sont l'illustration cartographique. Si, par contre on trace les isohyètes établies au cours

d'années sèches, on arrive à des écarts considérables. Toupet a pu ainsi calculer qu'en Mauritanie centrale, entre les années 1941-42 et 1951-52, l'isohyète 100 mm avait remonté vers le nord de 650 km (de Boutilimit à Fdèrik) : "le secteur ainsi délimité entre l'isohyète 100 mm 1941-42 et l'isohyète 100 mm 1951-52, qui peut donc alternativement être un désert que fuient les pasteurs et une zone de pâturages attirant les troupeaux, couvre 340.000 km<sup>2</sup>, soit 31,5 % de la superficie totale de la Mauritanie". (Toupet, 1972)

Une période sèche de plusieurs années qui s'étend sur toute une zone climatique se traduit donc par une avancée du Sahara et un recul parallèle du domaine sahélien. Qu'une période humide lui fasse suite et la limite du Sahara est reportée vers le Nord et le Sahel regagne une frange un moment abandonnée. Les isohyètes tracées d'après les normales correspondent donc à un compromis entre deux fronts maxima et minima. Cependant seules les périodes de sécheresse généralisée permettent de constater le recul vers le Sud de telle isohyète, car bien souvent les successions d'années sèches ou humides ne sont pas identiques d'une station à l'autre : on peut cependant constater que depuis 1969, nous sommes entrés dans une phase sèche qui atteint en 1972-73 le point critique que l'on sait.

Les exemples précis témoignent que ces sécheresses renouvelées ne participent pas à des cycles réguliers : relativement brèves, elles sont encadrées par des phases humides et parfois par quelques années de forte pluviosité. On peut alors se demander si la sécheresse actuelle possède des caractéristiques différentes de celles du passé et si elle participe à une tendance générale à la péjoration des conditions climatiques en particulier pluviométriques.

### 3) La sécheresse présente :

---

La sécheresse actuelle au Niger n'est pas apparue brutalement à la saison des pluies 1972 (Bernus, Savonnet, 1973). Elle a été précédée par plusieurs années défavorables dont la première se situe en 1968. Auparavant on avait pu constater une série d'années relativement bien arrosées, qui avaient permis la remontée des nappes phréatiques, le développement des mares, dont certaines étaient devenues perennes (telle celle de Tabalak au nord de Tahoua, depuis 1953), et par voie de conséquence, la progression vers le nord, d'un front pionnier agricole. Puis vint l'année 1968,

où les pluies, bien que normales en quantité, vinrent trop tôt, s'interrompirent pour ne reprendre qu'un mois et demi plus tard. Les années suivantes furent en général déficitaires, pour arriver à l'année 1972.

Si l'on considère cette série, on constate qu'elle est formée de totaux pluviométriques inférieurs à la normale, avec à Agadez un chiffre pour 1970 de 39,7 mm qui constitue le minimum absolu relevé depuis 1921, début des observations.

Dans d'autres postes, on peut faire les mêmes remarques, mais on note que l'exceptionnel déficit de 1970 à Agadez ne se reproduit qu'à Iférouane, beaucoup plus au Nord, et touche par conséquent le massif de l'Aïr. Même In Gall, à une latitude voisine d'Agadez (120 km au sud ouest), a reçu un total presque normal en 1970.

	Iférouane	Agadez	In Gall	Tahoua
1968	51,5 mm	165,1	203,0	408
1969	97	81,1	110,5	317
1970	1,5	39,7	202,2	421,7
1971	pas de relevé	92,6	30 mm (10 jours)	267,2 (38 jours)
1972		73,7	55,9	266,2
Normale	64,5 (sur 20 ans)	158,7 (sur 50 ans)	238,3 (sur 10 ans)	385,2 (sur 33 ans)

Par contre le déficit très important d'In Gall en 1971 existe partout cette année là, mais dans de moindres proportions.

On constate donc des moyennes en général inférieures à la normale avec certaines années (1970 à Iférouane et Agadez, 1971 à In Gall et encore Agadez) des déficits spectaculaires qui sont les minima connus jamais atteints dans chacune de ces stations.

Dans la plupart des stations de Mauritanie, on constate des relevés pluviométriques qui constituent des records de sécheresse depuis 1920, date des premières observations. "Si on veut bien admettre que l'isohyète 100 mm correspond à la limite méridionale du Sahara et que l'isohyète 450 mm correspond à la limite septentrionale de la culture sous pluie, on constate qu'en 1972, 90 % du pays étaient désertiques et que, bien entendu, aucune culture de plein champ n'y était envisageable". (Toupet, 1972)

Au Niger on peut faire les mêmes constatations pour les années 1969 à 1972 : l'isohyète 100 mm calculée sur une moyenne de 15 ans qui passe dans l'Aïr entre Iférouane et Agadez est reportée pour ces quatre années à environ 200 km au Sud : celle de 350 mm qui, au Niger, constitue la limite nord de l'agriculture pluviale, est également reportée à plus de 150 km au Sud.

En conséquence, la zone de nomadisme pastoral est amputée de sa frange septentrionale et la zone d'agriculture pluviale recule également vers le sud, c'est dire que le Niger utile est provisoirement amputé d'une vaste zone, indispensable à son élevage et que son domaine agricole est également réduit. En quelque sorte, la partie méridionale du pays doit s'efforcer de nourrir les habitants qui vivent plus au nord, soit que ces derniers aient amorcé un exode vers le sud, soit qu'il faille prévoir de réserver une partie des récoltes pour les régions pastorales sinistrées.

Les relevés pluviométriques, qui pour ces dernières années attestent des déficits importants dans la zone nord-sahélienne, ne peuvent malheureusement pas être comparés à ceux de la période 1910-1916, puisqu'on ne possède aucun relevé pour ces années là.

C'est pourquoi, malgré les déficits remarquables enregistrés de 1969 à 1972, on ne peut démontrer que la période présente participe à une tendance générale à la sécheresse. Si les chiffres pluviométriques, qui manquent avant 1920, ne permettent pas de comparaisons, les relevés hydrologiques existent : "les grands fleuves tropicaux, Niger supérieur à Koulikoro, Niger moyen à Niamey, Chari à Fort-Lamy, accusent tous une hydraulicité extrêmement faible en 1972, comparable à celle de la période 1910-1915" ; ce qui fait conclure à l'hydrologue ROCHE, qu'on ne peut parler "d'aucune tendance générale actuelle au dessèchement des zones tropicales et sahéliennes". (Roche, 1973)

...

Or, on peut affirmer que les conséquences de la sécheresse présente sont beaucoup plus graves que celles du passé. S'il n'y a pas tendance au dessèchement, tous les botanistes, écologistes, agrostologues, signalent une dégradation du couvert végétal, une modification qualitative des pâturages, et au total, la progression apparente de la désertification.

4) Les conséquences de la sécheresse actuelle sur la zone sahélienne :

---

Elle a eu des effets particulièrement graves du fait qu'elle est générale. Dans une zone pastorale donnée, les éleveurs ne peuvent plus jouer sur l'inégale répartition des pluies et se reporter sur des pâturages plus favorables. De plus, la zone méridionale sahélo-soudanienne productrice de mil est également touchée, et les récoltes y ont été insuffisantes. Or les éleveurs sont d'importants consommateurs de mil, qu'ils acquièrent en vendant des animaux sur les marchés. Dès qu'il est apparu que les pâturages ne pourraient subvenir à la nourriture des troupeaux, beaucoup d'éleveurs ont commencé à vendre leurs animaux, dont les cours se sont effondrés. Le prix du mil a commencé à s'élever dès le mois de novembre, peu après la récolte. Enfin, cette sécheresse n'est pas limitée à un seul Etat, mais elle concerne toute la zone sahélienne ; c'est dire que les secours sont d'autant plus difficiles à acheminer qu'il s'agit de pasteurs éparpillés dans une zone immense, difficile d'accès. La sécheresse de 1972, nous l'avons vu, n'est pas un phénomène nouveau ; mais aujourd'hui, elle est mieux connue, du fait de la diffusion des nouvelles. De plus, elle touche des populations d'éleveurs dont les troupeaux se sont considérablement développés ces dernières années, du fait de la lutte contre les épizooties et des réalisations d'hydraulique pastorale. Les bovins, en particulier en constant accroissement, sont les plus touchés par le manque de pâturage. La zone pastorale a également accueilli ces dernières années de nombreux Peuls, éleveurs de bovins, refoulés des régions plus méridionales par l'extension des surfaces cultivées.

Les progrès techniques ont permis aux éleveurs, pendant les années normales, de développer au maximum le nombre de leurs animaux. Cette tactique, conforme à leur idéal, a été favorisée par les réalisations modernes, vaccinations ou forages de puits profonds.

Dès lors, l'équilibre entre l'homme, ses animaux et les ressources naturelles tend à être d'autant plus instable que la charge des troupeaux augmente. Dans la mesure où l'un des termes de l'élevage nomade,

le pâturage, reste lié aux caprices des pluies, le nombre des animaux accru par les efforts de l'administration, subira des hécatombes périodiques. L'eau, les soins vétérinaires permettent un développement rapide des troupeaux, qui n'est interrompu que par les sécheresses, imprévisibles dans le temps, mais toujours à craindre après des années de pluies excédentaires ou très favorables.

Que faire pour qu'une telle situation ne se renouvelle pas ? Dans la zone pastorale, la seule réponse rationnelle serait de limiter l'accroissement des troupeaux ; de tenter d'attribuer des points d'eau à certains pasteurs avec les pâturages qui en dépendent. En quelque sorte, gérer la zone pastorale comme un ranch, en réservant des pâturages pour la saison sèche de soudure, en créant des réserves pastorales. Mais on peut alors se demander si les éleveurs sont prêts à accepter une telle politique de contrainte et d'atteinte à leur liberté de mouvements, et si d'autre part les Etats africains ont les moyens pratiques d'appliquer une telle politique (délimitation annuelle des zones de parcours, et coût d'une "police des pâturages").

Le nomadisme pastoral, souvent considéré comme un mode de vie anarchique et anachronique, est en fait la réponse des éleveurs pour l'exploitation d'une zone marginale où la végétation est inégalement répartie : c'est une exploitation rationnelle lorsqu'elle se base sur un équilibre entre les animaux et le couvert végétal, qui se règle de lui-même et se corrige en fonction des années sèches et des années humides. Lorsque de nouvelles techniques permettent une multiplication des troupeaux, sans pour autant assurer des ressources nouvelles en pâturages, le déséquilibre devient permanent, masqué en période humide, et dramatiquement visible en période de sécheresse.

Le problème est donc de contrôler le développement des troupeaux, ce qui va toujours à contre-courant de la stratégie des éleveurs, qui consiste à accroître au maximum le nombre d'animaux. On en revient en définitive à un problème de surpopulation humaine et animale, dans une zone faiblement peuplée, mais qui ne peut porter qu'une charge limitée de troupeaux, et partant de groupes humains qui en vivent. Dans le contexte actuel, on ne voit guère de solution-miracle. La sécheresse provoque un recul provisoire de la végétation, mais elle crée une dégradation beaucoup plus grave du

couvert végétal lorsqu'elle s'accompagne d'un surpâturage permanent qui modifie les espèces végétales et crée souvent des zones dénudées, où les effets du ruissellement en nappe et de l'érosion éolienne se combinent. (Boudet, 1972)

Or l'élevage sahélien, dans le contexte économique et social actuel, ne peut être qu'un élevage extensif amélioré. La nourriture du bétail ne peut être importée, les pâturages irrigués développés pour de simples raisons de coût de transport ou de l'eau. On voit donc que la marge d'action des gouvernements est étroite, et en définitive plus limitée que celle des Etats qui implantent un élevage "ex nihilo" dans des régions guinéennes, jusque là exclues de la zone pastorale. Ici élevage et écologie sont étroitement associés.

#### 5) Les conséquences psychologiques :

---

Éleveurs et paysans sahéliens, qui ne peuvent plus assurer leur propre survie, deviennent dès lors entièrement dépendants. Ils sont, par tous les moyens, à la recherche de l'argent ou du travail salarié, qui leur permettent de se procurer les vivres qu'ils ne produisent plus. Ils se trouvent à la merci des commerçants qui constituent des stocks de céréales pour les revendre au prix fort sur les marchés, au moment de la plus grande pénurie. Ils sont entre les mains des bouchers qui viennent acheter pour un prix dérisoire leurs animaux mourants et incapables de se déplacer, pour les transformer sur place en viande séchée ou bouillie destinée aux régions méridionales. Ils sont livrés à l'administration, parfois aux chefferies intermédiaires, qui organisent les distributions gratuites. Les paysans et les éleveurs illettrés sont sans défense contre certains "agents de l'Administration", chargés des distributions et qui acquièrent un pouvoir hors de proportion avec leur qualification, ce qui dans bien des cas détermine des abus regrettables.

De toutes ces dépendances, les paysans ou éleveurs sahéliens ont conscience et ils se sentent désormais liés à des organismes et des structures incontrôlables. Cela provoque chez certains d'entre eux une mentalité d'assistés attendant les distributions comme un don qui leur est dû.

La sécheresse et la perte du bétail, qui en est la conséquence, perturbent toutes les relations sociales : les échanges traditionnels (céréales/bétail ou céréales/lait) sont abolis ; les sacrifices d'animaux, qui rythment la vie (baptêmes, fêtes religieuses, honneur dû à un hôte de passage) sont impossibles ; la fabrication de la bière de mil, indispensable à la célébration de fêtes communautaires des paysans animistes (Bwaba, Dogons) est arrêtée ; la circulation des biens (héritages, compensation matrimoniale, dons entre vifs) est bloquée et met en péril la survie de la société ; le système des prêts (animaux pour le lait ou pour l'attribution du croît en vue de se constituer un troupeau) ne peut plus avoir cours puisqu'il ne peut fonctionner qu'entre des hommes inégalement riches. C'est donc l'effondrement du système qui fait fonctionner toute la société, c'est l'abolition des rapports sociaux. Pour les éleveurs, la sécheresse représente la disparition du bétail, c'est-à-dire de toutes leurs valeurs essentielles.

En définitive, la sécheresse anormale est conçue comme une rupture d'équilibre. Elle est attribuée à des causes variées : faute individuelle ou collective. Si la sécheresse se prolonge, elle peut être attribuée à une faute commise par le chef ou plus globalement par l'administration et le gouvernement. Pour essayer de rétablir l'équilibre, on fera des prières (islam) ou des cérémonies pour invoquer les dieux (cultes à Dongo, Dieu de la foudre chez les Songhay animistes par exemple).

Pour les pasteurs, la sécheresse a des conséquences plus graves que pour les agriculteurs : les troupeaux disparus ne peuvent être reconstitués avant plusieurs années, alors qu'une bonne saison pluvieuse permet théoriquement une récolte égale à celle d'avant la sécheresse. Plus important encore, la disparition du bétail est beaucoup plus que la perte d'un capital : c'est la rupture de liens affectifs entre l'homme et l'animal et c'est peut-être l'abandon d'un mode de vie et la fuite d'une région où l'on ne peut plus vivre.

- AUBREVILLE (A.) - La forêt coloniale - Les forêts de l'Afrique occidentale française. Annales de l'Académie des Sciences coloniales. 9. Paris - Soc. edit géogr. marit. colon. 1938
- BERNUS (E.) - Les Illabakan - (Niger) Une tribu touarègue sahélienne et son aire de nomadisation.  
Atlas des structures agraires au sud du Sahara. 10  
1974. ORSTOM-MOUTON-Paris  
cf. p. 15-16
- BERNUS (E.) et SAVONNET (G.) - Les problèmes de la sécheresse dans l'Afrique de l'Ouest.  
Présence Africaine. Paris - n° 88-1973. p.  
p. 113-138.
- BOUDET (G.) Désertification de l'Afrique Tropicale - ADANSONIA, ser. 2, XII, n° 4, 1972, p. 505 524.
- CAPOT-REY (R.) Le Sahara français Paris P.U.F. 1953 p. 100
- FOUCAULD (Ch. de) Dictionnaire touareg français - Imprimerie Nationale Paris 1951 - 52 t. III p. 1544 1545
- GALLAIS (J.) Le delta intérieur du Niger - Mémoire IFAN n° 79 Dakar 1967 TI p. 220
- HUBERT (H.) Le dessèchement progressif en Afrique occidentale - Bulletin Com Etu Hist et Scient AOF oct-déc 1920 p. 401 467.
- NICOLAS (F.) Tamesna. Les iullemmeden de l'est ou Touareg Kel Dinnik - Paris, Imprimerie Nationale, 1950.
- ROCHE (M.) Note sur la sécheresse actuelle en Afrique de l'ouest  
Report of the 1973 Symposium. Drought in Africa  
ed. by. D.DALBY et R.J.HARRISON CHURCH. - center of African studies. SOAS - LONDON. 1973 - p. 53-61
- SIDIKOU (Arouna Hamidou) Sédentarité et mobilité entre Niger et Zgaret - Thèse 3ème cycle - Université de Rouen, 1973.
- TOUPET (Ch.) Les variations interannuelles des précipitations en Mauritanie centrale. C.R. Séances Soc. Biogéogr. n° 416-421  
avril 1972. p. 39.47.

LA SECHERESSE DANS L'EXTREME NORD  
DU CAMEROUN

Jean BOULET  
Géographe

-:-:-:-:-

AVANT-PROPOS

Compte tenu de la faible partie du Nord-Cameroun connaissant un climat de type sahélien, ce pays a été relativement épargné par la sécheresse de ces quatre dernières années, ce qui ne veut pas dire que celle-ci n'ait eu aucun effet. Grave parfois, la situation n'a, nulle part, été tragique comme ce fut le cas pour d'autres états plus sahéliens.

Plus que des indications précises, on se contentera de donner ici un reflet des conséquences de la sécheresse sur divers secteurs de l'économie et surtout sur la façon dont a été ressenti le phénomène.

On essaiera enfin de dégager les leçons de cette fluctuation climatique que l'on n'ose même pas qualifier d'accidentelle puisqu'elle semble s'inscrire dans un cycle autant qu'on puisse en juger par les relevés pluviométriques de ces quarante dernières années.

## LA SECHERESSE DANS LE NORD-CAMEROUN

La sécheresse qui sévit depuis quatre ans a eu une importance plus ou moins grande, mais a été ressentie, dans l'ensemble de l'extrême Nord-Cameroun, comme un phénomène inquiétant aux effets plus ou moins néfastes.

C'est essentiellement au nord de l'axe Kéhi-Bénoué que cette diminution générale de la pluviométrie a eu de l'importance. L'incidence du phénomène n'a atteint un réel degré de gravité qu'au nord du 11° parallèle où le caractère plus sahélien du climat rendait critique toute perturbation de la pluviométrie.

Plus d'un million de personnes ont été plus ou moins touchées par les effets de la sécheresse mais deux cent mille furent particulièrement concernées, les populations de pêcheurs Kotoko et d'éleveurs arabes Choa notamment.

On peut proposer les chiffres suivants pour les zones les plus gravement déficitaires :

- 100 000 personnes dans le Logone et Chari
- 75 000 personnes dans le Mayo-Danaï
- 6 000 personnes dans le nord du Margui-Wandala
- 12 000 personnes dans le nord du Diamaré.

Il faut préciser que les 65 000 habitants du Serbewel connaissent les situations les plus critiques.

### Les effets de la sécheresse dans l'ensemble de l'extrême Nord-Cameroun

Entre le 10° et le 11° parallèle, c'est-à-dire dans la zone la moins touchée, c'est plus l'irrégularité des pluies et leur retard qui ont été préjudiciables aux cultures que la sécheresse elle-même. Dans cet ensemble, ce sont les régions de Maroua, Kaélé et Mora qui furent les plus touchées. La culture du coton y a particulièrement souffert et les rendements ont baissé de plus de moitié dans l'ensemble. Des zones réputées pour leur production cotonnière comme la vallée du Nguetchéwé dans l'arrondissement de Mora, la région de Kaélé et celle de Maroua ont vu leur production chuter brutalement. Par contre, des zones où la culture

du coton se fait intensivement depuis moins longtemps et qui, justement, étaient défavorisées par leur pluviométrie de l'ordre du mètre, pluviométrie jugée propice au développement du parasitisme, se sont mises en tête de la production ; c'est le cas de la région du Kébi et, beaucoup plus au sud, de la région de Touboro dans l'arrondissement de Tcholliré.

Cette baisse considérable des rendements qui rend peu payant les efforts des paysans les incita à y consacrer des superficies moindres, accélérant d'autant la chute de la production, contraignant aux fermetures des usines d'égrenage de Kourgui-Mora et de Guider en même temps qu'elle rendait de plus en plus difficile l'approvisionnement en graines des huileries de coton de Maroua et Kaélé.

La responsabilité de ces difficultés est uniquement attribuée à la sécheresse, encore convient-il d'examiner attentivement de quoi on parle.

Le niveau le plus bas dans la région de Maroua a été atteint en 1973-1974, avec un peu plus de 600 mm, l'année précédente 730 mm étaient tombés. Il ne faut donc pas trop se hâter de parler de sécheresse. Le Margui-Wandala est, dans l'ensemble, mieux arrosé et ne connaît pas de difficultés graves sur le plan des cultures vivrières, le nord de Mora excepté.

La récolte de sorgho sous pluie a été bonne, et celle de mouskouari excellente l'année dernière sur Maroua, et cela, avec 600 mm d'eau. La saison précédente, la récolte de sorgho sous pluie restait à un niveau honorable (600 kg à l'ha) et la récolte de mouskouari inférieure à la moyenne habituelle. La cause en était une vague de chaleur survenue inopportunément fin décembre, début janvier, et ayant fait mûrir trop vite ce sorgho. La récolte se fit avec un bon mois d'avance (dès le 15 janvier), naturellement le grain fut maigre et les rendements s'en ressentirent.

Dans l'ensemble, les cultures vivrières traditionnelles, sorgho et arachide, n'ont pas trop souffert et on ne peut noter de déficit exceptionnel entre les 10° et 11° parallèle.

### Le problème du coton

L'ensemble du Nord-Cameroun produisait avant ces quatre dernières années, à la pluviométrie déficiente, 50 à 60 000 tonnes de coton en moyenne ; vint une année exceptionnelle à 90 000 t, puis ces quatre dernières années où la production évolua entre 25 000 et 35 000 t. La sécheresse fut invoquée et chargée de tous les péchés. Son incidence ne fut pas nulle, c'est certain, mais fut-elle la seule responsable et sa responsabilité fut-elle aussi décisive qu'on a voulu le faire croire ? La question vaut d'être posée et son examen met en évidence les points suivants :

- La variété nouvelle de coton à fibres plus longues semble moins bien adaptée aux conditions du pays que la précédente.

- Les prix pratiqués sont trop bas (34 F CFA le kilo de coton trié) et les conditions dans lesquelles se font les achats peu encourageantes. Les revenus tirés du coton ont tendance à diminuer alors que les dépenses se font de plus en plus lourdes, les prix du mil et de l'arachide augmentant.

- Enfin, il convient de noter qu'avec six à sept cents mm on faisait auparavant de bonnes récoltes dans la région de Mora par exemple, on se félicitait même de cette faible pluviométrie qui empêchait le développement du parasitisme. Il est curieux que cette pluviométrie jugée satisfaisante pendant près de vingt ans deviennent brutalement très insuffisante.

C'est que tout le problème n'est pas là. Vingt ans de monoculture du coton (les rotations sont très mal suivies) ont épuisé les meilleures terres et la sécheresse n'a fait qu'accélérer l'apparition d'un phénomène inéluctable : la baisse progressive des rendements de coton sur des sols de plus en plus épuisés. La preuve en est qu'en même temps les rendements de sorgho restaient satisfaisants, et qu'en 73-74, le mouskouari fut particulièrement beau dans le coeur du Diamaré avec la pluviométrie la plus faible enregistrée depuis l'apparition de la "sécheresse".

### Les difficultés des Pays du Logone

Le Mayo-Danaï et surtout le Logone et Chari ont connu de par leur dépendance du fleuve d'une part, et leur situation plus sahélienne d'autre part, des difficultés nettement plus sérieuses que celles des régions dont nous venons de parler.

Ces problèmes intéressent la culture du riz, la pêche, l'élevage et le parc national de Waza.

### La Riziculture

Née de la proximité du Logone, de la présence de zones périodiquement inondées, la culture du riz n'a pas connu le succès qu'on aurait pu en attendre, et ce pour diverses raisons.

- Les paysans riverains Massa et Mousgoum sont peu intéressés par cette culture, leur préférence alimentaire allant au sorgho.

- La maîtrise de l'eau est très imparfaite, les coûts d'exploitation élevés, le prix d'achat du paddy au paysan dérisoire (17 F CFA le kilo alors que le labour d'un demi-hectare par la Semry coûte 2 500 F CFA auxquels s'ajoutent 1 120 F CFA pour les semences). Le paradoxe est, qu'avec des prix d'achat aussi bas, on parvienne à produire un riz de qualité très "moyenne" pour un prix exorbitant.

- Depuis cette année, de nouvelles installations très coûteuses assurent sur certains périmètres une parfaite maîtrise de l'eau et devraient permettre de faire plusieurs récoltes chaque année. Mais l'endettement de la Semry est considérable, les oiseaux font des dégâts énormes sur les cultures hors saison, et la rentabilité de l'organisme semble moins assuré que jamais. Le déficit des crues du Logone a eu des effets catastrophiques, les débordements dans les effluents du fleuve n'eurent pas lieu et la récolte de riz fut insignifiante.

Par contre, l'existence en pays Mousgoum d'un sorgho "flottant" à un cycle très long, abandonné dans beaucoup de cas à la suite de la culture de riz, est intéressante et pourrait apporter dans ces périodes difficiles un appoint estimable. Des champs de ce sorgho particulier, dit localement "Oulaga", sont suivis attentivement au village de Dougui, au sud de Pouss.

### La pêche

Longtemps considéré comme l'un des fleuves les plus poissonneux du monde, le Logone ne donne plus les pêches miraculeuses auxquelles il avait habitué les pêcheurs riverains (Kotoko) et étrangers (Haoussa).

Le 'salanga', l'un des poissons les plus courants pendant les basses eaux, s'est raréfié jusqu'à devenir exceptionnel au niveau du confluent du Logone et du Chari.

Là aussi, la sécheresse entraînant un niveau particulièrement bas des eaux, a été rendue responsable. C'est vrai pour une bonne part. Le salanga (pour prendre cet exemple assez frappant) se reproduit dans les plaines inondées, les yaérés. Le niveau très bas des eaux n'a pas permis une bonne inondation et contrarie la reproduction du poisson. Ceci n'est cependant qu'une des causes, importante certes, mais qui n'est peut-être pas déterminante.

- La surpêche sur le Logone et ses affluents et effluents joue un rôle considérable.

- La multiplication du nombre des pêcheurs, l'implantation saisonnière de véritables colonies de pêcheurs haoussa venus principalement de Nigéria, accélèrent le processus d'appauvrissement.

Plus encore, il y a les moyens modernes et les nouvelles techniques de pêche.

- Multiplication des filets de nylon à mailles trop fines et d'une grande solidité, multiplication des filets de fond. On parle même maintenant de pêches au poison qui déciment des portions entières du Logone.

- Sur les effluents, la multiplication à la décrue des barrages à poissons interdit pratiquement aux poissons nés dans les yaérés de pouvoir regagner le Logone.

Si l'ensemble contribue à compromettre gravement le patrimoine piscicole, le processus était en cours, la sécheresse n'a fait que l'accélérer et l'aggraver. Il fait apparaître l'urgence des mesures à prendre : contrôle de la pêche, surtout interdiction des filets à mailles trop fines, des poisons et des barrages sur les effluents.

### L'élevage

L'élevage de type nomadisant est l'activité principale des trois quarts de la population du Logone et Chari, les Arabes Choa, le reste de la population, les Kotoko, étant traditionnellement pêcheurs.

Le troupeau s'élève à environ 130 000 têtes auxquelles s'ajoutent les troupeaux migrants venant du Nigéria voisin ou du Tchad dont le nombre est considérable et encore augmenté avec la sécheresse.

On estime entre 15 000 et 20 000 le nombre de bêtes perdues à cause de la sécheresse, soit environ 15 %. C'est sérieux, c'est même

grave, cependant pas tragique. L'ampleur relativement limitée de la catastrophe s'explique par la présence sur cette bande de terre relativement étroite de nombreux cours d'eau saisonniers importants (Serbewel et El Bied) et surtout sur les marges septentrionales et orientales du lac Tchad, du Logone et du Chari. L'eau n'est jamais très loin. Par contre, la surcharge pastorale, eu égard à la capacité des pâturages dans le système pastoral pratiqué, est rapidement apparue et plus que de soif, c'est de faim que meurent les bêtes. Très vite, l'herbe des yaérés, devenue très haute et très dure, est impropre à la nourriture du bétail. Là aussi, on peut accuser la sécheresse, et dans certains cas, comme dans certaines limites, à juste titre.

Mais, la sécheresse a surtout fait apparaître la fragilité de ce système pastoral de "ueillette". Quelques bonnes années, et le troupeau croît trop vite, dépassant la capacité normale des pâturages. Une variation climatique et cette surcharge devient évidente et propice aux hécatombes.

A la lumière de cette période de pluviométrie déficiente, on peut tirer quelques enseignements pour l'avenir.

- L'équilibre économique de l'activité pastorale dans les zones sahéliennes est fragile.

Dans le système actuel, la charge en troupeau doit être calculée de façon à pouvoir faire face à des variations climatiques qui ne sont pas des catastrophes exceptionnelles, mais des phénomènes cycliques déjà enregistrés au cours des décennies précédentes.

- Un véritable élevage doit progressivement se substituer à l'élevage traditionnel grâce, notamment, à une meilleure utilisation des pâturages par le fauchage et la rotation des troupeaux sur les périmètres fauchés. D'après des informations communiquées par M. FOTIUS, botaniste de l'ORSTOM, 40 % au maximum de la matière sèche des pâturages est utilisée par les troupeaux dans le système actuel.

- Pour promouvoir une telle politique, il est non seulement nécessaire d'étoffer en nombre le corps de l'élevage, mais aussi de le compléter en dépassant le stade actuel où n'existe qu'un personnel médical. Un corps chargé de l'éducation des éleveurs, de la promotion et de l'utilisation de l'élevage s'avère indispensable.

### La faune

Le parc national de Waza, orgueil et tête d'affiche du tourisme camerounais, se trouve dans la zone la plus touchée par la sécheresse. Mares asséchées, animaux mourant de soif, ont été le triste spectacle qu'il a été donné de voir au cours de ces dernières années. Pourtant, là aussi, si les dégâts ne sont pas négligeables, le bilan n'est pas aussi lourd qu'on aurait pu le craindre.

Les mesures d'urgence prises par les services compétents et la proximité relative du Logone ont empêché la catastrophe.

- Les animaux, les antilopes surtout, ont migré vers l'est en direction du Logone. Beaucoup furent ainsi sauvés.

- Un certain nombre de mares du parc furent approvisionnées par une rotation continue de camions-citerne.

- La chasse fut interdite dans toute la région pour empêcher le massacre.

- Un certain nombre d'éléphants furent abattus pour aider à la survie du reste de la faune : ces animaux ayant l'habitude de se baigner, ils transformaient les maigres points d'eau subsistant en bourbiers inutilisables par les autres animaux.

Un fléau s'est cependant développé en dépit d'une surveillance renforcée, le braconnage. On parle d'un trafic de viande de chasse d'une certaine ampleur vers le Tchad voisin.

Là aussi, la sécheresse a mis en lumière la fragilité d'un parc d'une aussi grande richesse en animaux dans une zone à tendance sahélienne. L'extension de la réserve à travers les yaérés jusqu'au Logone pourrait pallier, en partie, à ces inconvénients en période de pluviométrie défectueuse.

### L'agriculture dans le Logone et Chari

Le secteur le plus touché du Logone et Chari est l'un de ceux où la marge de manoeuvre, les possibilités de contrer la fatalité sont les plus réduites.

Peu ou pas de pluie, peu ou pas de culture, le mouskouari, cultivé sur de grandes superficies dans la région de Waza, n'a rien donné

et le plus souvent, n'a même pas pu être planté sur des vertisols desséchés.

Les cultures de décrue sur les berges du Logone et des autres cours d'eau sont insuffisantes, et de loin, pour nourrir la population.

Dès la fin de décembre dernier, nous avons vu des femmes arabes Choa fouiller des fourmillières pour y récupérer les grains de mil emmagasinés. Cette technique est, certes, traditionnelle, mais utilisée habituellement en période de soudure et non pas un mois à peine après les récoltes de sorgho sous pluie. Il est certain que, dans ce domaine, le Logone et Chari ne peut faire face seul aux besoins alimentaires de sa population.

Sur ce point, la sécheresse a vraiment été ici une calamité, et la responsabilité des hommes n'est pas engagée comme c'est le cas dans d'autres domaines, ainsi que nous avons essayé de le montrer dans ce rapport. Fort heureusement, le reste du pays n'a pas connu une situation aussi catastrophique, et peut venir en aide à cette région durement touchée. Si, comme il est souhaitable, la solidarité internationale doit jouer, c'est là d'abord qu'elle doit s'exercer.



ENQUETE SUR LES PERTES DE BETAIL DANS LE NORD DE LA HAUTE VOLTA  
=====

par H. BARRAL

L'enquête sur les pertes de bétail menée en 1974 dans le cadre de l'Action Urgente DGRST, dans le Nord de la Haute-Volta, avait pour objet de cerner d'aussi près que possible, les pertes effectivement subies par une population connue d'éleveurs dont le cheptel avait été dénombré environ une année avant la sécheresse de 1972/1973, mais plus encore, d'analyser les causes directes des pertes enregistrées, compte tenu des différences importantes très vite apparues selon les points d'eau enquêtés et selon les groupes humains considérés.

Le problème en effet qui se posait était celui de la réponse spontanée des éleveurs du Sahel voltaïque, confrontés au phénomène de la sécheresse catastrophique de 1972 en abordant les points suivants :

- amplitude de la transhumance exceptionnelle (s'apparentant à un exode) pendant la saison sèche 1972-1973.
- durée de cette transhumance (saison de départ et saison de retour).
- mode d'exploitation des parcours dans les zones refuges où les éleveurs du Sahel et leur bétail cherchaient à survivre.

Il s'agissait donc d'établir dans quelle mesure ces différents facteurs avaient induit des pertes de bétail plus ou moins lourdes selon les différences de comportement des éleveurs.

La zone d'étude a été la partie Nord-Ouest du Cercle de l'Oudalan, Circonscription Administrative la plus au Nord de Haute-Volta, d'une superficie d'environ 10.000 km<sup>2</sup>, comprise entre le 14<sup>e</sup> et le 15<sup>e</sup> parallèles et dont la population en majorité nomade est d'environ 60.000 personnes.

L'enquête a porté, au cours de la saison sèche 1973-1974, sur la population et le cheptel des points d'eau suivants :

Mares de Fadar Fadar, Eraf n'Aman, In Amaoual, puits de Gandéfabou-Foulbé, Gandéfabou-Kel Ewel, Saba Kolangal, Tin Ghassan, In Guitane, mares de Dibissi, Gargassa et Tin Adjar, soit 11 points d'eau pèrennes ou sub pèrennes, dans une région où la pluviométrie annuelle moyenne est de l'ordre de 350 à 400 mm, mais où l'on a enregistré moins de 200 mm en 1972.

D'autre part la toponymie, successivement Tamachek (Fadar Fadar, Eraf n'Aman, In Amaoual, In Guitane, Tin Adjar) et Peul (Gandéfabou, Saba Kolangal, Gargassa etc...) est révélatrice du caractère composite de la population de cette zone, dont la répartition par catégories socio-ethniques est approximativement la suivante :

Mares de Fadar Fadar et d'Eraf n'Aman

Touareg	: 300
Bella	: 1200
Peul nomades	: 650

In Amaoual

Touareg	: 75
---------	------

Gandèfabou Foulbé

Peul	: 200
------	-------

Gandèfabou Kel Ewel

Touareg	: 340
---------	-------

Saba Kolangal et Tin Ghassan

Bella	: 125
Peul	: 110

In Guitane

Peul	: 300
Touareg	: 85
Bella	: 40

Dibissi

Bella	: 260
Peul	: 25

Gargassa

Peul	: 144
Bella	: 112
Maures	: 20

Tin Adjar

Bella	: 600
Touareg	: 160

---

Population totale étudiée      4 750 personnes

Cette population en totalité nomade, détenait, début 1972 un cheptel bovin pouvant être évalué à 22.700 têtes, soit près de 5 bovins par individu, ce qui représentait un troupeau familial moyen de l'ordre de 20 têtes, comportant en moyenne 4 à 5 vaches laitières lesquelles pouvaient théoriquement assurer la subsistance d'une famille pendant la période de nomadisation qui s'étend en gros du mois d'août au mois de Mars dans cette région.

Or, à l'heure actuelle, le cheptel bovin de la population considérée ne s'élève plus qu'à 13 200 têtes; le taux global d'animaux disparus à la suite de la sécheresse 1972-1973 est donc de 43 %.

Cependant les pertes apparaissent très inégalement réparties et varient considérablement d'un point d'eau à un autre comme il ressort du tableau ci-joint.

Il importe par ailleurs de souligner que la disparition de ces animaux, morts pour la plupart de malnutrition, ou des suites de . misère physiologique (qui constituait un facteur favorisant pour les épizooties, notamment le charbon symptomatique), ne s'est pas produite autour des points d'eau faisant l'objet de cette enquête.

La majorité de la population de la zone d'étude en effet, a effectué une nomadisation de caractère tout à fait exceptionnel vers le sud, au cours de la saison sèche 1972-1973. ainsi que nous l'avons indiqué au début de ce rapport, chassée de l'Oudalan par l'absence de pâturage, c'est au cours de cette transhumance et du séjour dans la zone soudanienne que la quasi totalité des pertes a été enregistrée.

L'enquête a donc touché la population après son retour sur ses points d'eau de départ.

Un certain nombre de conclusions peuvent déjà être dégagées qui vont quelquefois à l'encontre d'idées préconçues relatives au comportement des éleveurs sahéliens dans cette conjoncture :

1°) On constate la répugnance certaine des éleveurs du Sahel à pénétrer dans la zone soudanienne pour des raisons à la fois logistiques (éloignement de leur région d'origine), écologiques (ce point sera examiné un peu plus loin), et psychologiques (relations parfois difficiles avec les populations sédentaires, morcellement de l'espace par les champs et les jachères ressenti comme un faisceau de contraintes malgré l'usage de la vaine pâture en saison sèche, etc...)

	:Cheptel bovin :antérieure à la :sècheresse 1971-1972	:Cheptel bovin :postérieur à la :sècheresse 1973-1974	: % : d'animaux : disparus
Fadar Fadar Eraf	: 9 000	: 5 000	: - 48 %
In Amaoual	: 500	: 300	: - 48 %
Gandéfabou-Foulbé	: 2 800	: 1 400	: - 50 %
Gandéfabou-Kel Ewel )	: 3 200	: 2 250	: - 30 %
Saba Kolangal )	:	:	:
Tin Ghassan )	:	:	:
In Guitane	: 3 000	: 3 500	: + 17 % ?
Dibissi	: 168	: 88	: - 48 %
Gargassa	: 1 500	: 350	: - 76,7 %
Tin Adjiar	: 2 500	: 300	: - 88 %
<b>Total</b>	<b>: 22 700</b>	<b>: 13 200</b>	<b>: 43 %</b>

TABLEAU DES PERTES DE BETAAIL CONSECUTIVES  
A LA SECHERESSE (OUDALAN - HAUTE-VOLTA).

Cette répugnance est attestée par le fait que les éleveurs du Cercle de l'Oudalan ne se sont généralement pas aventurés à plus de 100 km au Sud de leur point de départ (régions de Boukouma, Djika, Pélouté dans le sud de la subdivision d'Aribinda et le nord du Cercle de Barsalogo, entre le 13<sup>e</sup> et le 14<sup>e</sup> parallèle et sous 650 à 700 mm de pluviométrie moyenne annuelle). En outre, la totalité de la population de la zone d'étude a regagné celle-ci, dès le début de la saison des pluies 1973.

Ce fait mérite d'être souligné car 2 opinions contraires sont fréquemment avancées :

a) Au cours de leur exode les populations du Sahel auraient pénétré loin à l'intérieur de la zone soudanienne "jusqu'au Nord-Dahomey et la Côte d'Ivoire" !

Il y a là en réalité une confusion entre la transhumance exceptionnelle de la saison sèche 1972/1973 et le lent et déjà ancien mouvement de glissement vers le Sud de certains groupements Peul, d'origine plus souvent nord-soudanienne que véritablement sahélienne (Peuls de Nouna et de Barani vers la Côte d'Ivoire, Peuls du Sud du Cercle de Djibo vers Fada N'Gourma, Diapaga et le Nord Dahomey) qui n'est pas lié au phénomène de la sécheresse.

b) L'angoissant problème de la survie des populations du Sahel, dans une hypothèse catastrophiste "d'avancée du désert", pourrait être résolu par leur transfert et leur installation en zone soudanienne, (ce qui reviendrait à faire précéder le désert climatique par un désert humain en vidant le Sahel de sa population!). Cette politique serait de surcroît conforme aux vœux des populations de la zone sahélienne dont on ne saurait concevoir comment elles pourraient souhaiter continuer à vivre dans un environnement aussi hostile.

Le retour de la totalité des éleveurs du Sahel dans leur région d'origine dès le début de l'hivernage 1973 démontre l'inconsistance de cette opinion. Quelques unes des appréciations portées par les intéressés sur la zone soudanienne méritent d'ailleurs d'être

relevées : "L'air et la terre de ces régions ne nous conviennent pas ; la peau de nos femmes y devient terne", "nous sommes partis vers le Sud avec nos animaux et nous en sommes revenus avec nos bâtons de bergers pour toute richesse". etc...

2) Les zébus sahéliens rencontrent de très graves difficultés d'adaptation aux pâturages de la zone nord-soudanienne.

(Cf. les conclusions du document intitulé "Mobilité et cloisonnement chez les éleveurs du Nord de la Haute-Volta = les zones dites d'endodromie pastorale", communication pour le Séminaire International sur le Pastoralisme d'Alger - 22-28 Avril 1974). Il apparaît que le zébu sahélien ne sait pas reconnaître en zone soudanienne, les graminées appétibles et que c'est en cela qu'a résidé le principal facteur de mortalité.

Dans ces conditions il est extrêmement hasardeux d'envisager comme on le fait à l'heure actuelle, l'aménagement de "zones de délestage" en encourageant des transhumances prolongées voire même une stabulation permanente du cheptel sahélien dans les régions plus méridionales.

Outre la répugnance des éleveurs déjà évoquée, il paraît certain que le zébu sahélien adulte, habitué à consommer un fourrage sec composé de graminées peu ligneuses, ne parvient pas à assimiler les herbes dures de la savane soudanienne et refuse le pâturage de bas-fonds humides normalement exploité dans ces régions en saison sèche.

Notons enfin que dans les régions où les éleveurs du Sahel voltaïque ont cherché refuge pendant la sécheresse 1972-1973, le problème de la trypanosomose bovine ne se pose pas, celles-ci étant indemmes de glossines.

3) La saison de départ pour le sud et de retour vers le Nord au cours de la sécheresse 1972-1973 a eu une incidence importante sur les taux de pertes subies par les éleveurs.

En règle générale, ce sont les points d'eau d'où la popu-

lation et le cheptel sont partis pour le Sud dès la saison froide 1972 (à partir de la mi-novembre), et sont retournés dans le Sahel dès les premières pluies, (fin Juin, début Juillet 1973) où l'on enregistre les pertes les plus faibles.

Cela s'explique par le fait que les animaux ont été moins éprouvés par la marche vers le sud en saison fraîche et à un moment où ils étaient encore en assez bonne condition physique, qu'ils ont pu consommer au début de leur séjour en zone soudanienne un pâturage encore relativement frais, et que revenus dans le Sahel au début de l'hivernage, ils y ont trouvé, à défaut d'herbe, du pâturage arbustif frais, la pousse des feuilles précédant de plusieurs semaines celle de l'herbe.

En outre, ils ont ainsi échappé plus tôt aux invasions de tiques et taons propres à la zone soudanienne en début de saison des pluies, et aux épizooties qui s'y sont déclarées à cette époque.

En revanche, et pour les raisons inverses, les points d'eau du Sahel que les troupeaux n'ont quittés que tard dans la saison sèche, c'est à dire vers Mars ou Avril 1973, pour ne regagner le Sahel qu'au milieu de l'hivernage 1973, sont ceux où l'on enregistre les pertes les plus élevées.

Deux exemples sont significatifs : le point d'eau de Gandéfabou Kel Ewel où les pertes sont de 30 % et celui de Tin Aïdjiar où elles atteignent 88 %.

Dans le premier cas sur 23 chefs de familles interrogés, tous ont déclaré s'être rendus dans le Sud dès la saison fraîche et avoir regagné Gandéfabou-Kel Ewel au commencement de l'hivernage 1973.

Dans le second au contraire, sur 36 chefs de familles interrogés, 7 seulement sont partis pour le Sud dès la saison fraîche qui a succédé à l'hivernage 1972. Les 29 autres ont attendu le milieu de la saison sèche (Mars-Avril 1973) s'efforçant d'entretenir leur bétail le plus longtemps possible aux environs de la mare de Tin Aïdjiar où le pâturage était misérable.

Ils ne sont revenus ensuite dans le Sahel qu'au milieu de la saison des pluies, ayant perdu la quasi totalité de leurs animaux.

Un cas cependant mérite d'être souligné ici, c'est celui du point d'eau d'In Guitane, qui est le seul où les pertes aient été pratiquement nulles et où l'on enregistre même une augmentation apparente par rapport aux effectifs bovins de 1971-1972.

Il se trouve que les environs de ce point d'eau situé par 14°40 de latitude Nord (à la même latitude que celui de Tin Aïdjiar où l'on enregistre 88 % de pertes) ont été l'un des rares points du Sahel à bénéficier de quelques pluies heureusement réparties en 1972, ayant permis la pousse d'un maigre pâturage à quelques kilomètres au Nord-Ouest, et demeurés miraculeusement ignorés des autres fractions d'éleveurs de la région, en sorte que les Peul nomades et les quelques Touareg fréquentant ce point d'eau, ont pu y entretenir leur cheptel bovin pendant toute la saison sèche 1972-1973 sans être contraints à l'exode vers le Sud.

Il est particulièrement significatif qu'un maigre pâturage sahélien ait été en l'occurrence infiniment plus bénéfique au bétail que la relative abondance du pâturage soudanien plus au sud.

Quant à l'augmentation apparente du cheptel de ce point d'eau, elle est due probablement au fait qu'un certain nombre d'animaux ont été confiés à la garde des Peul d'In Guitane par d'autres groupes d'éleveurs n'en possédant plus une quantité suffisante pour constituer des troupeaux.

#### 4°) L'efficacité du gardiennage a été un facteur déterminant de limitation des pertes

En effet ainsi que nous l'avons déjà souligné, les zébus du Sahel ne parvenant pas à se nourrir convenablement sur les pâturages secs de la zone soudanienne à graminées peu appétibles (andropogon pseudapricus, loudetia togoensis), et n'étant pas habitués aux pâturages de bas-fonds de ces zones, pourtant relativement riches,

(comportant notamment andropogon gayanus), il était nécessaire de les y amener et de les y maintenir de force, ce à quoi s'employaient les bergers Peul.

En revanche, les populations "Kel Tamachek" (Touareg et Bella) ayant coutume d'emmener les animaux la première fois sur un pâturage, pour le leur "montrer", et de les laisser ensuite pâturer seuls, sans berger, ce qui est de peu de conséquences dans la zone sahélienne à laquelle ces animaux sont parfaitement adaptés, ne crurent pas devoir changer leur façon de faire, et laissèrent leurs animaux désemparés dans un milieu dont ils étaient incapables de tirer parti. De plus, de nombreux animaux laissés ainsi sans surveillance, poussés par leur instinct, s'en retournèrent vers le Nord et furent perdus, ou moururent d'épuisement en cours de route.

Les difficultés d'adaptation des éleveurs Kel Tamachek transportés dans un milieu étranger apparaissent par conséquent beaucoup plus grandes que celles des éleveurs Peul du Sahel, et les taux de pertes enregistrés par les uns et par les autres diffèrent considérablement. C'est ainsi qu'aux mares de Fadar et d'Eraf n'Aman, nous avons dénombré pour 156 chefs de familles Peul nomades, 3065 bovins soit une moyenne de 19,6 par chef de famille contre 30 avant la sécheresse, et calculé un taux de pertes de 34,5 % pour les Peul nomades.

Pour 409 chefs de familles Touareg et Bella en revanche, nous avons dénombré 1 402 bovins soit une moyenne de 3,45 par chef de famille contre 11 avant la sécheresse, et calculé un taux de pertes de 68 %. (Rappelons que le taux global de pertes pour ces 2 mares est de 48 %).

D'une façon générale, et à l'exception de la tribu des Kel Ewel fréquentant le point d'eau de Gandéfabou-kel Ewel et qui sont des Touareg vivant depuis fort longtemps en symbiose avec les Peul - ce sont aussi les Touareg et les Bella qui ont attendu le cœur de la saison sèche pour se mettre en route vers le sud avec leurs animaux, et ont ainsi cumulé les causes de pertes de bétail.

5°) La commercialisation accrue des animaux avant que ne s'installe l'état de misère physiologique n'a généralement pas été perçue comme une nécessité.

Il était évident en effet, dès le mois d'Octobre 1972, en raison de l'absence de pâturage dans les régions situées au Nord du 14<sup>e</sup> parallèle, que la mortalité du bétail en fin de saison sèche allait prendre des proportions catastrophiques. Une "réponse" des éleveurs du Sahel aurait pu être d'accroître considérablement leurs ventes d'animaux manifestement condamnés à disparaître à court terme.

En fait, notre enquête ne nous a rien révélé de tel. Encore qu'il s'agisse là d'un sujet que les éleveurs se montrent toujours réticents à aborder, nous avons néanmoins, dans nos questionnaires inclus la question suivante :

"Nombre d'animaux vendus en début de saison sèche et à quels prix "?

Les réponses que nous avons obtenues portent sur un échantillon de bovins, antérieur à la sécheresse, de 6 600 têtes.

Sur ces 6 600 animaux, dont il ne subsiste plus aujourd'hui qu'environ la moitié, soit 3 400 têtes, seuls 427 auraient été vendus au début de la saison sèche 1972-1973, soit 6,4 % de ventes seulement, alors que l'on considère généralement que le taux moyen de commercialisation du bétail dans cette région est d'environ 12 %.

Il est évident que nous ne faisons pas entrer ici dans la catégorie, des "ventes d'animaux", celles d'animaux en état de misère physiologique, vendus parfois à des bouchers de brousse ou à des villageois au prix de 500 Frs CFA !

D'autre part, dans ce domaine, il ne nous a pas été possible de recouper nos informations et il se peut que ce taux ait été plus élevé en réalité. Toutefois, il est certain que les nomades sont généralement incapables de gérer des sommes importantes et que la notion d'épargne de l'argent est tout à fait étrangère à leur

psychologie.

Habituellement, le produit de la vente d'un boeuf d'exportation par exemple est immédiatement reconverti en génisses et en biens de consommation divers (tissus etc...)

L'impossibilité de ré-investir en animaux, précisément en raison de l'imminence du désastre, a donc, semble-t-il, paradoxalement freiné les ventes, du moins chez la population étudiée ; enfin l'espoir subsistait de trouver du bon pâturage dans le Sud, et aucun éleveur du Sahel n'imaginait en ce début de saison sèche 1972-1973 que les pertes atteindraient un tel niveau.

Et ceci nous amène à aborder la dernière des conclusions provisoires que nous tirions de cette enquête.

6°) Le manque d'informations des éleveurs du Sahel sur les régions où ils ont effectué leur transhumance exceptionnelle, a constitué un facteur aggravant

L'immense majorité des éleveurs de l'Oudalan se rendant en effet pour la première fois dans les régions situées au Sud du 14<sup>e</sup> parallèle, s'en allaient au hasard de point d'eau en point d'eau, ou se déplaçaient sur de simples rumeurs, toujours en quête de pâturages. Des concentrations d'animaux énormes ont été observées dans des zones n'ayant qu'une médiocre vocation pastorale comme la région du Sud d'Aribinda, tandis que la province du Yagha, au Sud-Est de Dori qui présentait un potentiel fourrager manifestement supérieur, n'a été que relativement peu mise à contribution, bien que les distances à parcourir soient du même ordre pour se rendre dans l'une ou dans l'autre.

### Conclusion

Pour prendre sa pleine signification, cette enquête doit être étendue aux zones limitrophes de celle qui fait l'objet de ce rapport ; d'une part à la zone dite "Amont de la mare d'Oursi" (à

laquelle appartient seulement le point d'eau de Tin Aïdjiar), d'autre part à une zone située plus au nord sur le territoire du Mali (régions d'In Tillit, Tin Téhégrin et Gossi).

En effet, la zone que nous venons d'étudier apparaît comme une zone de relatif équilibre écologique qui s'explique par le maintien des transhumances traditionnelles. La zone "Amont de la mare d'Oursi" en revanche a été considérablement dégradée par le surpâturage et une mauvaise gestion des parcours, exploités par des éleveurs témoignant d'une quasi sédentarité dans le nomadisme. Il nous paraît souhaitable d'y évaluer également les pertes de bétail qui sont vraisemblablement beaucoup plus lourdes que dans la zone en question dans le présent document, la finalité de la démarche étant toujours de déterminer l'incidence du genre de vie de la population sur les pertes de bétail en année de sécheresse exceptionnelle.

En revanche, la zone située sur le territoire du Mali apparaît très semblable à celle que nous venons d'étudier (maintien des transhumances traditionnelles, population en majorité Kel Tamachek etc...), mais le facteur de différenciation avec les deux zones précédentes est la disparition de la culture du petit mil coïncidant approximativement avec l'isohyète des 300 mm, et qui induit des comportements différents chez les éleveurs (nomadisation d'hivernage plus précoce, caractère impératif des ventes de bétail pour se procurer des céréales etc...)

Or, il semble que malgré leur mobilité et leur sens du négoce plus développé, ces populations aient subi des pertes de bétail encore plus lourdes que celles de l'Oudalan, bien qu'elles aient cherché refuge dans les mêmes zones.

C'est un point que nous nous proposons également d'élucider, de façon à pouvoir déboucher sur des recommandations pratiques en matière d'encadrement des éleveurs du Sahel en cas de sécheresse exceptionnelle.



PUBLICATIONS DE M. H. BARRAL  
RELATIVES AUX PROBLEMES PASTORAUX  
EN ZONE SAHELIENNE.

---

PUBLICATIONS UTILISEES OU CITEES.

- BARRAL H. - 1967 - Les populations d'éleveurs et les problèmes pastoraux dans le Nord-Est de la Haute-Volta.  
ORSTOM- Paris - Cahiers Sciences Humaines  
Vol. IV n° 1 pp. 3-30
- BARRAL H. - 1970 - Etude socio-géographique pour un programme d'aménagement pastoral dans le Nord-Ouest de l'OUDALAN -  
ORSTOM-Ouagadougou - 92 p. multigr.
- BARRAL H. - 1970 - Utilisation de l'espace et peuplement autour de la mare de BANGAO in Etudes Rurales n° 37 pp. 65 - 84.
- BARRAL H. - 1973 - Les zones d'endodromie pastorale au Sahel Voltaïque  
33 p. 3 cartes h.t. ; in programme d'hydraulique au Sahel Voltaïque SCET/International - ORSTOM-BRCM
- BARRAL H. - 1974 - Mobilité et cloisonnement chez les éleveurs du Nord de la Haute-Volta ; les zones dites d'endodromie pastorale - Communication au Séminaire International sur le Pastoralisme d'Alger - 22-28 avril 1974 -  
17 pages - 2 cartes multigr.