



FAO, ROME



UNESCO, PARIS



WMO, GENEVA

---

**FAO/UNESCO/WMO INTERAGENCY PROJECT ON AGROCLIMATOLOGY**

**Technical Report  
on**

**A STUDY OF THE AGROCLIMATOLOGY OF THE SEMIARID AREA  
SOUTH OF THE SAHARA IN WEST AFRICA**

---

**PROJET CONJOINT D'AGROCLIMATOLOGIE FAO/UNESCO/OMM**

**Rapport technique  
sur**

**UNE ÉTUDE D'AGROCLIMATOLOGIE DE L'AFRIQUE SÈCHE  
AU SUD DU SAHARA EN AFRIQUE OCCIDENTALE**

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION  
OF THE UNITED NATIONS  
FAO - R O M E

UNITED NATIONS EDUCATION, SCIENTIFIC  
AND CULTURAL ORGANIZATION  
UNESCO - P A R I S

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION  
WMO - G E N E V A

FAO/UNESCO/WMO INTERAGENCY PROJECT ON AGROCLIMATOLOGY  
TECHNICAL REPORT ON  
A STUDY OF THE AGROCLIMATOLOGY OF THE SEMIARID AREA SOUTH  
OF THE SAHARA IN WEST AFRICA

PROJET CONJOINT D'AGROCLIMATOLOGIE FAO/UNESCO/OMM  
RAPPORT TECHNIQUE SUR  
UNE ETUDE D'AGROCLIMATOLOGIE DE L'AFRIQUE SECHE AU SUD DU SAHARA EN  
AFRIQUE OCCIDENTALE

par : by

J. Cochemé, Meteorologist

P. Franquin, Agronomist

Including a section on vegetation prepared by A. F. Naegelé, FAO botanist; and a section on soils prepared by B. Dabin, R. Fauck and J. Pias, Pedologists, of ORSTOM.

Comprenant une section sur la végétation préparée par A.F. Naegelé, botaniste de la FAO; et une section sur les sols préparée par B. Dabin, R. Fauck and J. Pias, pédologues de l'ORSTOM.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS  
ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE

ROME, 1967

PREFACE

This report is a selection of the detailed studies which were carried out by the co-workers of the survey. It was produced as a collection of sections, arranged in logical sequence, which have been published in the language in which they were originally written. The studies also form the basis of the General Report, published by WMO, which presents the material in a version which is abridged but at the same time more closely co-ordinated, gives more background information, draws a number of conclusions from the work, and makes some recommendations.

The report is subdivided into three parts. Part I is devoted to those texts which are descriptive of the area itself: its meteorology, its vegetation and its soils. Part II first describes in detail the pattern of the rainfall and its variability. Then, in the sections grouped under the heading: "WATER BALANCE" the extent to which this rainfall is available to crops is discussed, availability of water being the fundamental environmental factor controlling crop production in the area. The topic is approached both from agronomic and climatic points of view: indeed it has been attempted to maintain this balance between the two disciplines throughout this report. This is followed by an analysis of the supply of heat and light to the area. Part III, entitled "APPLICATIONS", examines the adaptation of plants and agricultural systems to these conditions, the climatic needs and tolerances of individual crops, and the effects of climate on production. As one of the main difficulties encountered in the preparation of this study was the lack of suitable agronomic information, the report ends with a consideration of the sort of agronomic data required in agroclimatology.

The authors would like to express their thanks to all those whose help enabled this report to be prepared: to the directors and staff of the meteorological and agricultural services of all the countries in the survey area, and of the following organisations and their associated stations which provided data and assistance - Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique (ASECNA), Institute for Agricultural Research and Special Services (IARSS) Northern Nigeria, Institut de Recherches Agronomiques Tropicales (IRAT), Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), Compagnie Française pour le Développement des Textiles (CFDT), Institut de Recherches du Coton et Textiles (IRCT), Compagnie Cotonnière Française (COTONFRAN). Amongst the agricultural stations, particular thanks are due to SAMARU Regional Research Station in Northern Nigeria and to the Centre de Recherches Agronomiques of BAMBEY in Senegal.

Last but not least, thanks are due to those members of the staff at FAO headquarters who did the computation, Mrs. Catarina Pacci and Miss Maria-Vera Cresti; drew the illustrations, Miss Lucinda Rodd and Mr. Jorge Pacheco, and prepared the typescript, Mrs. Laura Gaehele and Miss Anna Killian.

PREFACE

Ce rapport est une sélection des enquêtes détaillées qui ont été faites par les collaborateurs de l'étude. Il est présenté comme un ensemble de sections, arrangées en ordre logique, qui sont publiées dans la langue où elles ont été écrites. Les études forment aussi la base du Rapport Général publié par l'OMM, qui présente le travail en version abrégée mais plus étroitement coordonnée, qui donne plus d'information de base et tire quelques conclusions suivies de recommandations.

Le rapport est subdivisé en trois parties. La première contient les textes qui décrivent l'aire étudiée : sa météorologie, sa végétation et ses sols. La seconde décrit d'abord en détail la pluviométrie de l'aire et sa variabilité. Ensuite, les sections groupées sous le titre "BILAN HYDRIQUE" traitent de la disponibilité de cette eau de pluie aux cultures, la disponibilité en eau étant, dans l'aire, le facteur du milieu fondamental qui contrôle la production agricole. Le sujet est abordé du point de vue de l'agronomie et de la climatologie : on s'est effectivement efforcé tout au long de cette étude de maintenir un équilibre entre les deux disciplines. Ceci est suivi par une analyse de l'apport en chaleur et en lumière. La troisième partie, intitulée "APPLICATIONS", examine l'adaptation des plantes et les systèmes de cultures à ces conditions, les besoins et les tolérances climatiques des différentes cultures, et l'effet du climat sur la production. Vu que l'une des difficultés principales rencontrées durant la préparation de cette étude a été le manque d'information agronomique utilisable, le rapport se termine par une considération des données agronomiques requises en agro-climatologie.

Les auteurs expriment leurs remerciements à tous ceux dont l'aide a permis la préparation de ce rapport : aux directeurs et personnel des services agronomiques et météorologiques de tous les pays de l'aire de l'étude, et aussi des organisations suivantes, y compris celles de leurs stations qui nous ont donné aide et renseignements - Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique (ASECNA), Institute for Agricultural Research and Special Services (IARSS) Northern Nigeria, Institut de Recherches Agronomiques Tropicales (IRAT), Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), Compagnie Française pour le Développement des Textiles (CFDT), Institut de Recherches du Coton et Textiles (IRCT), Compagnie Cotonnière Française (COTONFRAN). Parmi les stations agronomiques des remerciements particuliers sont dus au Regional Research Station de SAMARU en Nigeria du Nord et au Centre de Recherches Agronomiques de BAMBEY au Sénégal.

Enfin, nous remercions spécialement les membres du personnel de l'OAA qui effectuèrent les calculs, Mme Catarina Pacci et Melle Maria-Vera Cresti; ceux qui dessinèrent les figures, Melle Lucinda Rodd et M. Jorge Pacheco; et ceux qui ont tapé le texte, Mme Laura Gaehele et Miss Anna Killian.

TABLE OF CONTENTS : TABLE DES MATIERESP A R T IBACKGROUND - INTRODUCTION

	<u>Page</u>
<u>General Considerations - GC</u>	
<u>Generalites - GC</u>	
1 Origins .....	1
2 Limits of the Area .....	1
3 Aims and methods of the Survey .....	4
<u>Meteorology of the Survey Area - MC</u>	
<u>Meteorologie de l'Aire de L'Etude - MC</u>	
1 General circulation .....	7
2 Summer rainfall .....	10
3 Disturbance lines .....	10
4 Other sources of rainfall .....	11
5 Rainfall regime .....	12
6 Other agroclimatic factors .....	12
<u>Vegetation du Senegal - VG</u>	
<u>Vegetation of Senegal - VG</u>	
Coupe No. 1. Nord-sud .....	15
Coupe No. 2. Est-ouest .....	19
<u>Les Sols de l'Aire de l'Etude - SA</u>	
<u>Soils of the Survey Area - SA</u>	
<u>Facteurs de Formation</u>	
1 Le climat .....	21
2 La végétation .....	21
3 Les actions paléoclimatiques .....	21
3.1 Formations tertiaires .....	21
3.2 Formations quaternaires .....	22
4 L'hydrographie .....	22
4.1 Bassin du Sénégal .....	22
4.2 Bassin du Niger .....	23
4.3 Bassin du Tchad .....	23
5 Le relief .....	24
6 Les matériaux originels .....	25
<u>Les Sols Isohumiques</u>	
1 Classification et description des sols isohumiques .....	26
1.1 Les sols bruns subarides .....	26
1.1.1 Sols bruns steppiques argileux .....	26
1.1.2 Sols bruns steppiques sableux .....	27
1.2 Les sols brun-rouge subarides .....	27
2 Localisation et utilisation .....	28
2.1 Les sols bruns argileux .....	28
2.2 Les sols sableux bruns et brun-rouge .....	28
<u>Les Sols à Sesquioxides</u>	
1 Classification et description .....	29
1.1 Les sols ferrugineux tropicaux .....	29
1.1.1 Sols ferrugineux tropicaux non lessivés .....	29
1.1.2 Sols ferrugineux tropicaux lessivés .....	31
2 Localisation et utilisation .....	33

		<u>Page</u>
2.1	Les sols ferrugineux tropicaux non lessivés .....	33
2.2	Les sols ferrugineux tropicaux lessivés .....	34
2.3	Les sols faiblement ferrallitiques .....	35

Les Affleurements de Cuirasses, les Vertisols,  
les Sols Hydromorphes et les Sols Halomorphes

1	Les affleurements de cuirasses .....	36
2	Les vertisols .....	36
3	Les sols hydromorphes .....	38
3.1	Sols humiques à gley à pédoclimat chaud .....	38
3.2	Sols minéraux .....	38
3.3	Sols calcaires .....	38
4	Les sols halomorphes .....	39
4.1	Sols halomorphes salins à structure non dégradée .....	39
4.2	Sols halomorphes salins à structure dégradée .....	39

P A R T I I

AGROCLIMATIC ANALYSIS - ANALYSE AGROCLIMATIQUE

RAINFALL

PLUVIOMETRIE

Annual Rainfall - PA

1	Annual mean rainfall distribution .....	41
2	Annual rainfall variability .....	44
2.1	General considerations .....	44
2.2	Assessment of variability and probability .....	45
2.3	Empirical method. Quintiles .....	47
2.4	Theoretical method. Normal distribution .....	47
2.5	Distribution of variability .....	49
2.6	Probability diagram .....	50

Monthly Rainfall and Rainfall during shorter periods - PM

1	Monthly mean rainfall .....	55
2	Mean rainfall for periods shorter than a month .....	58
3	Variability of monthly rainfall .....	61
4	Variability of amounts for periods shorter than a month .....	62

Rainfall Intensity - PI

1	Mean amounts in 24 hours .....	65
2	Maximum amounts in 24 hours .....	66
3	Diurnal variation .....	70
4	Mean intensities .....	73
5	Intensity-duration studies .....	74

Spatial Variability and Spells - PS

	Spatial Variability .....	79
1	Mesoscale variation .....	79
2	Large scale variations .....	80
	Spells .....	81
3	Wet spells .....	81
4	Dry spells .....	83
5	Consecutive dry years .....	83

BILAN HYDRIQUE - I. CONSIDERATIONS AGRONOMIQUES

WATER BALANCE - I. AGRONOMIC CONSIDERATIONS

Considerations Agronomiques - BH

1	Généralités .....	85
2	Considérations physio-climatiques .....	86
3	Implications agronomiques .....	89

	<u>Page</u>
WATER BALANCE - II. CLIMATIC CONSIDERATIONS	
BILAN HYDRIQUE - II. CONSIDERATIONS CLIMATIQUES	
<u>Availability of Water - WA</u>	
1 General considerations .....	93
2 Evapotranspiration measurements .....	93
<u>Potential Evapotranspiration Data and Estimates - WB</u>	
1 Method .....	95
2 Data .....	95
3 Distribution of the variables .....	99
4 Results .....	107
5 Variability .....	109
Evapotranspiration Tables .....	111
<u>Water budget - WB</u>	
1 Method .....	117
2 Estimates .....	119
3 Periods .....	122
4 Variability of availability-of-water periods .....	128
5 Potential evapotranspiration during the availability-of-water periods .....	129
Water Budget for the 35 Reference Stations .....	133
COMPLEXE HELIOTHERMIQUE - I. CONSIDERATIONS AGRONOMIQUES	
HEAT AND LIGHT - I. AGRONOMIC CONSIDERATIONS	
<u>Considerations Agronomiques - HT</u>	
1 Considérations physio-climatiques .....	169
1.1 Croissance et développement .....	169
1.1.1 La croissance pondérale .....	170
1.1.2 Le développement .....	170
1.2 Classification photopériodique .....	171
2 Implications agronomiques .....	171
2.1 La productivité .....	171
2.2 Le rendement .....	172
3 Conclusion .....	173
HEAT AND LIGHT - II. CLIMATIC CONSIDERATIONS	
COMPLEXE HELIOTHERMIQUE - II. CONSIDERATIONS CLIMATIQUES	
<u>Radiation - RA</u>	
1 Incoming radiation at the top of the atmosphere .....	175
2 Global radiation .....	176
3 Net radiation .....	180
4 General remarks on radiation .....	182
5 Heliothermic parameters .....	183
6 Maritime influence and continentality .....	185
<u>Temperatures and Daylight - TL</u>	
1 General considerations .....	187
2 Length of day .....	188
3 Temperatures .....	189
4 Sums of temperatures .....	195
5 Variability of temperatures .....	195
6 Temperatures during the growing seasons .....	196

P A R T I I IAPPLICATIONS

	<u>Page</u>
ADAPTATION DES CULTURES ANNUELLES AUX CONDITIONS CLIMATIQUES	
ADAPTATIONS OF ANNUAL CROPS TO CLIMATE	
<u>Nature des cultures - CN</u>	
1 Cultures vivrières et cultures industrielles .....	201
2 Adaptation des cultures .....	202
<u>Les Sorghos - CS</u>	
1 Généralités .....	203
2 Distribution .....	203
2.1 Sorghos de décrue .....	203
2.2 Sorghos de saison pluvieuse .....	204
3 Ajustement aux conditions climatiques .....	205
3.1 Régime héliothermique .....	205
3.1.1 Variétés tardives .....	207
3.1.2 Variétés hâtives .....	217
3.2 Régime hydrique .....	218
<u>Les Pénicillaires - CP</u>	
1 Généralités .....	223
2 Distribution .....	224
3 Ajustement aux conditions climatiques .....	225
3.1 Régime héliothermique .....	225
3.2 Régime hydrique .....	225
4 Conclusion .....	231
<u>Le Cotonnier - CO</u>	
1 Généralités .....	231
2 Localisation et distribution variétale .....	238
3 Ajustement aux conditions climatiques .....	241
3.1 Problèmes majeurs et climat .....	241
3.2 Régime héliothermique .....	242
3.3 Régime hydrique .....	245
3.3.1 Les données et leur conditionnement .....	246
3.3.2 Fluctuation dans le temps .....	247
3.3.2.1 Présentation et conditionnement des données de Fort Arohambault	247
3.3.2.2 Ajustement au découpage phéno-climatique .....	252
3.3.2.3 Ajustement au découpage climatique .....	257
3.3.3 Fluctuation dans l'espace .....	258
3.3.3.1 Facteurs climatiques .....	261
3.3.3.2 Facteurs édaphiques .....	262
3.3.3.3 Facteurs techniques .....	264
3.3.3.4 Conclusion .....	269
3.3.3.5 Vérification .....	269
3.3.3.6 Discussion .....	270
<u>Le Maïs - CM</u>	
1 Généralités .....	275
2 Localisation et distribution variétale .....	276
3 Ajustement aux conditions climatiques .....	277
3.1 Régime héliothermique .....	277
3.2 Régime hydrique .....	277
4 Conclusion .....	278
<u>L'Arachide</u>	
1 Généralités .....	280
2 Distribution variétale et localisation .....	281
3 Ajustement aux conditions climatiques .....	283

	<u>Page</u>
3.1 Régime héliothermique .....	283
3.1.1 Photopériode .....	283
3.1.2 Température .....	283
3.2 Régime hydrique .....	284
4 Conclusion .....	284
<u>Les Légumineuses à graines - CL</u> .....	287
ADAPTATION DES SYSTEMES D'AGRICULTURE AUX CONDITIONS CLIMATIQUES	
ADAPTATION OF AGRICULTURAL SYSTEMS TO CLIMATE	
<u>L'Agriculture Traditionnelle - CT</u>	
1 Généralités .....	289
2 Systèmes d'agriculture .....	290
2.1 L'Exploitation .....	290
2.2 La restitution .....	290
3 Zones agroclimatiques .....	291
<u>L'Agriculture en Développement : La Sole Fourragère - CF</u>	
1 Généralités .....	292
2 La jâchère, ses substituts et leur adaptation .....	294
2.1 La jâchère naturelle protégée .....	294
2.1.1 Restauration de la fertilité .....	294
2.1.2 Régénération du pâturage .....	295
2.2 La jâchère semée avec des espèces locales .....	296
2.3 La jâchère semée avec des espèces non locales .....	298
2.4 La prairie temporaire .....	299
2.5 La sole fourragère annuelle .....	301
3 Discussion .....	301
3.1 Nature de la phase de restitution .....	302
3.2 Intensivité de la phase de restitution .....	302
3.3 La productivité relative .....	303
<u>Synthèses - CY</u>	
1 Les évènements climatiques .....	307
2 Les cultures annuelles .....	307
3 La sole fourragère .....	309
4 Assolement et rotation .....	309
<u>Crop Climatology - CC</u>	
<u>Climatologie des Cultures - CC</u>	
1 General considerations .....	313
2 Sorghum .....	314
3 Millet .....	315
4 Cotton .....	318
5 Maize .....	321
6 Groundnut .....	322
<u>Données Agronomiques Indispensables en Agroclimatologie - DA</u>	
<u>Agronomic Data Essential in Agroclimatology - DA</u>	
1 Les données de rendement .....	323
1.1 Essais réalisés en station .....	323
1.2 Essais réalisés hors station .....	323
1.3 Multiplications de semences effectuées en station .....	324
1.4 Multiplications de semences effectuées chez et par l'Agriculteur .....	324
1.5 Essais de vulgarisation, en ferme expérimentale, des variétés et techniques culturales améliorées .....	324
1.6 Statistiques de rendement .....	324
1.7 Statistiques de production .....	324
2 Les données phénologiques .....	325

P A R T I

BACKGROUND - INTRODUCTION

General Considerations - GC

Généralités - GC

1. Origins

The origins of the FAO/Unesco/WMO Agroclimatology Project emerged from the desire of the three Organisations to make a common effort to investigate the basic climatic conditions of agriculture in parts of the world where an intensification of agricultural practices and an extension of cultivated lands showed most promise of an increase in agricultural production.

In 1959 detailed consideration was given to the establishment of an interagency project in order that the three agencies might study problems of common interest in a concerted and constructive manner. In April 1960, an interagency study group, including representatives of FAO, Unesco and WMO and consultant experts, met in Rome to decide on the region and the scope of the first interagency agroclimatology survey.

Consequently, the semi-arid and arid zones of Jordan, Lebanon, Syria, Iraq and Iran, with a mediterranean climate of winter rains, were investigated (1962) (1963).

At its second meeting (1962) the study group selected for the present survey a tropical area with a semiarid climate of summer rains in Africa, south of the Sahara.

2. Limits of the Area

Situated in a part of Africa where climatic gradients run from north to south, the area investigated is in consequence a strip of territory lying parallel with the equator. It is bounded to the west by the Atlantic Ocean and to the east by the frontier between the Chad and Sudan Republics. Facilities available did not make it possible to work further eastwards across western and central Sudan, although these regions are very similar to those surveyed until uniformity is broken by the influence of the Ethiopian mountains and of the Red Sea.

The northern and southern boundaries of the Area, which are wholly agroclimatic, cannot be defined so sharply. To make them precise would be to make them artificial and misleading. At the meeting of the study group, the northern boundary was described as that "of the arid steppe and desert". It was added that "it would be that of dryland farming, corresponding to the isohyets of 400 to 500 mm of mean annual rainfall". Criteria both of agricultural exploitation and of climate were given since we are here concerned with agroclimatology. It should, however, be borne in mind that climatic characteristics indicate agronomic potentials which are only fulfilled if soils and people concur, which is not always the case. Thus an area defined by the surface distribution of climatic thresholds chosen because of their agronomic possibilities will often be wider in places than that where the possibilities are actualised. The area to be defined first is that where the climatic opportunities are found. The extent to which the second step of the surveying, the definition of the regions where these opportunities are utilised, depends largely on the scale of the work. Here it seems that the best criterion for the northern boundary would be the climatic characteristics corresponding to settled milled cultivation and, as will be seen in Section CP in Part III where this cereal is discussed, 250 mm mean annual rainfall appears to be the most important of these characteristics.

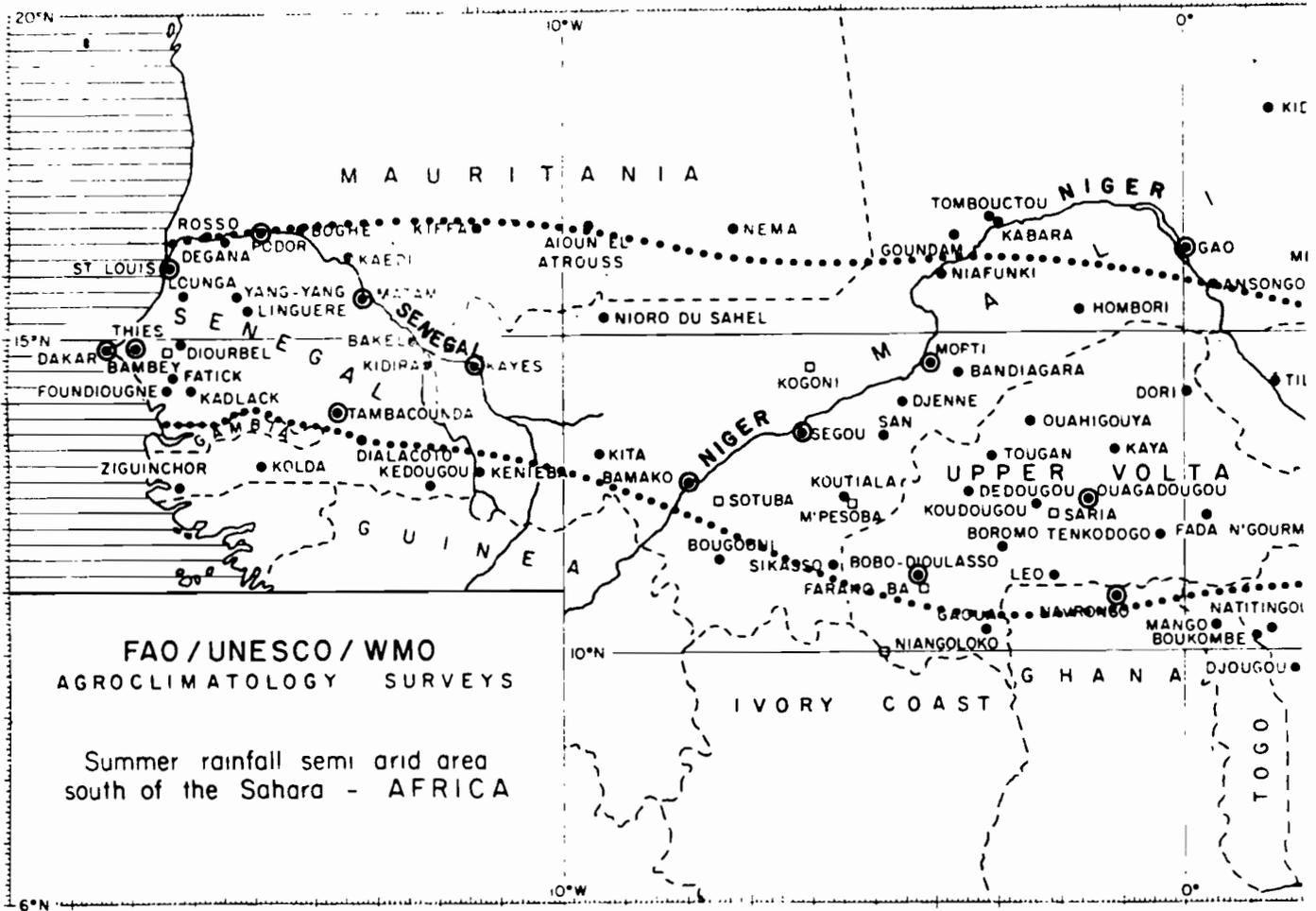
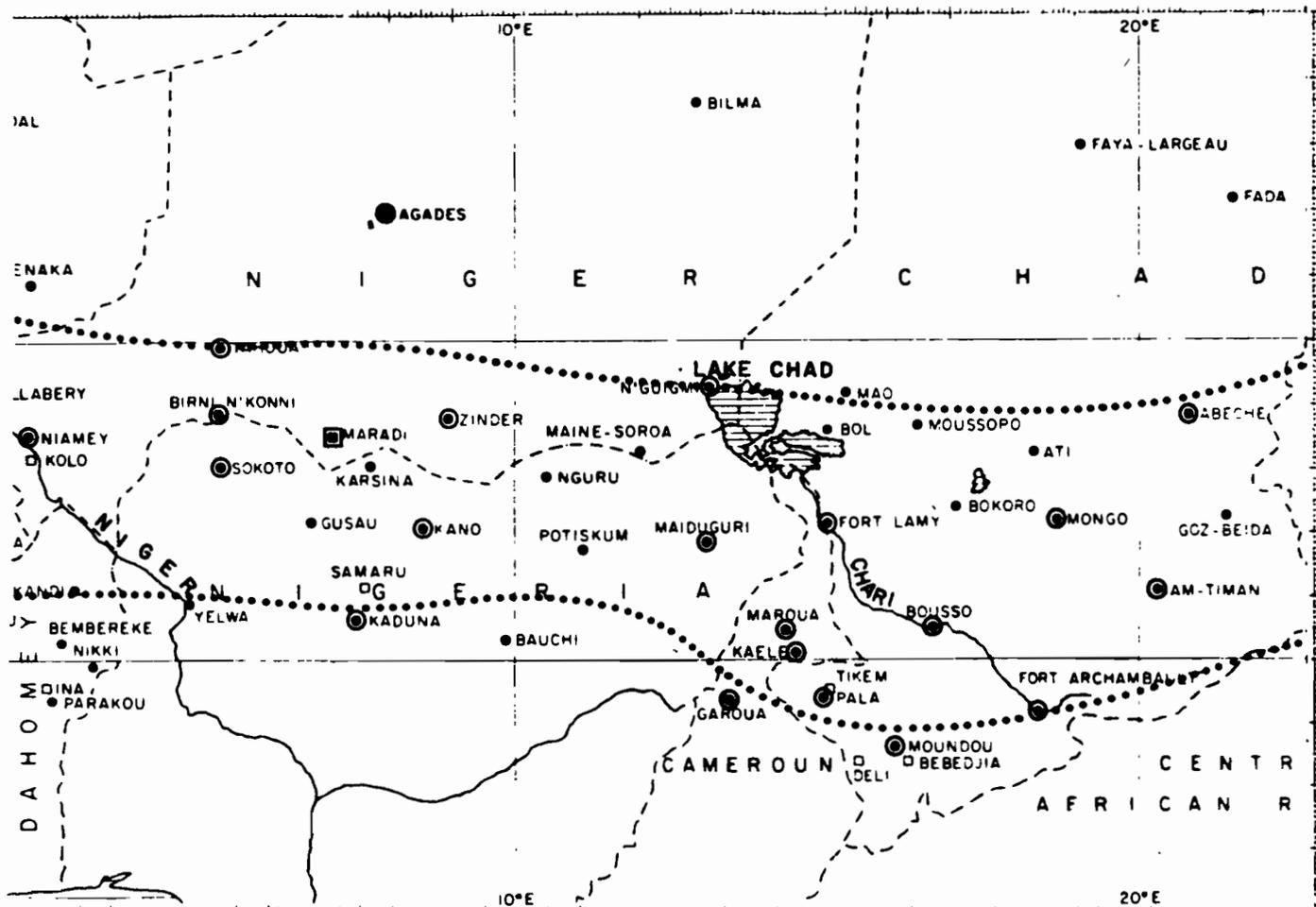


Figure C:C.1. Mercator projection showing the area surveyed surrounded by a dotted line. Black dots show important settlements or towns from which meteorological information was obtained and those from which sufficient was available, and for long enough, for a full analysis, have been surrounded by a circle. Three of those are

However, a more agroclimatic specification of mean annual water availability can be given. In this study, as will be seen at Part II, section WB, using a comparison of mean seasonal rainfall and potential evapotranspiration amounts, parameters were evolved defining the duration of different levels of availability of water to plants. The duration of the growing season appears to be even more important than the actual amount of water supplied, although the two quantities are in fact fairly closely related. The term "moist period" and, where applicable, "moist period plus reserve", describes the season during which it is thought that annual crops can be grown by dry farming. To a mean annual rainfall of 250 mm, a mean moist period of 55 days is therefore added to characterise the northern boundary of the area.

For the southern boundary the study group specified: "the humid savanna and forest" and also "where the length of the wet season exceeds that of the dry season". Expressions like "the humid savanna" and "forest", although they express well the underlying thought, are difficult to translate into boundaries. Like that to the north, the southern boundary of the area surveyed is most appropriately defined in terms of climatic characteristics corresponding to known agricultural features.



actually outside the semiarid area. Agricultural stations are surrounded by a square. Broken lines show the boundaries between countries and continuous lines the courses of the most important rivers: the Senegal, the Niger and the Chari, running into Lake Chad.

The concepts "wet" and "dry" seasons were translated into availability-of-water periods. In all, the following climatic characteristics, which often but not always coincide with each other, were taken to indicate the not very precise position of the southern boundary of the semiarid area: (1) A mean annual rainfall of 1100 mm. (2) A moist period plus reserve of 200 days. (3) A mean annual water surplus of 500 mm. (The term "water surplus" is also defined at WB). (4) Interruption of the moist period in August (by the co-called "little dry season" discussed at section MC). An important change in agricultural practice to which these climatic characteristics give rise is the appearance of consecutive cultivation of main annual crops during the year. To this may be added the beginning of the competition of roots and tubers with cereals as the main staple food.

Figure G.C.1. is a map of the portion of Africa which contains the area surveyed. This area is outlined by a dotted line. It is seen as a zone (the word "zone" here means an elongated surface lying along parallels of latitude) some 4000 kilometers long and of an average width of about 800 km and including portions of the territories of the following countries: Senegal, Mali, Upper Volta, Mauritania, Ghana, Niger, Togo, Dahomey, Nigeria, Cameroon, Chad. The area is remarkable for

its lack of important relief and consequent weather modification. Further geographical details are given in the section on soils SA.

Lastly, it must be realised that, rather than a study of the climate of an area, this is a study of the climate at a number of points in that area widely spaced but sufficiently related to allow a fair amount of interpolation.

### 3. Aims and methods of the survey

This survey is basically an inventory of the climatic resources of an area, these resources being looked upon as potentials for agricultural development.

In order to be able to make such an inventory of resources, it had to be decided which climatic factors were the most relevant; it was then necessary to obtain as detailed a picture as possible of the distribution of these factors over the area, and at all times of the year and, even more important, of the likelihood of a particular pattern of climate being repeated in a particular place in future years. At the same time, the individual climatic needs and tolerances of the main crops of the area had to be studied, in order to decide how they could best fit into this detailed picture, when and where they could most profitably be grown, and what new areas could be exploited.

Any plan for increasing agricultural production can benefit from such a survey; whether the plan involves intensifying existing cultivations, extending them, introducing new crops or techniques (such as mechanisation), or improving protection against pests and parasites - whatever the plan may be, the influence of climate cannot be ignored.

Traditional cultivation has learned by trial and error how to cope with limited materials and existing conditions. It is when some radical step forward is contemplated, when capital is to be invested in new agricultural schemes, that tradition can no longer be relied upon and reliable climatological data can save years of trial and expensive error.

It is not intended, as a result of this study, to evolve a new system of agro-climate classification, nor is it intended to subdivide the survey area into a rigid system of agroclimatic regions within which certain crops should be grown. To push conclusions as far as this would, if anything, reduce the usefulness of this type of survey. (This point will be discussed again at the end of the report.)

The study is not only a survey of an area, but a survey of methods - of the best ways of producing serviceable agroclimatic information. It is therefore to a large extent explorative and tentative in its approach.

The scale of the study must necessarily be broad, since the Area is vast and time limited. However, a number of more detailed studies of various items were carried out, in the hope that they might serve as pilot studies for local investigations on a scale appropriate to direct local application.

The survey is limited to dry farming at the time of the summer rains. Cultivation under irrigation and on flood plains are only discussed incidentally. This is not to say that irrigated and flood-plain cultivation are unimportant - indeed, increased production in the future will partly be dependent on increasing the length of the growing season by methods such as these. But the agroclimatology of flood plain and crops under irrigation is a complete study in itself, and is quite distinct from dry farming, which forms the subject of this survey.

Crop production is affected by soil compositions, and by the presence of other living organisms, as well as by climate. This survey is concerned only with climatic influences. The physical characteristics of soils, however, are also taken into account, in so far as they control the amount of water the soils can store for later use. The amount of available plant nutrients they contain - which of course largely determines the extent to which climate potentials can be realized - is not discussed, though it is mentioned in the pedologists' contribution to the report.

The problems are approached simultaneously from the climatic and agronomic points of view. Subdivisions of the area suggested by these two disciplines have many similarities, without ever being completely the same. Where the differences are pronounced it means that either soils or man and animals have intervened. An example of this intervention will be found later when millet is discussed.

#### References

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. Report of the  
1962 second meeting of the FAO/Unesco/WMO study group on the  
interagency agroclimatology project in arid zones. Rome. 10 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO/Unesco/WMO  
1962 interagency project on agroclimatology technical report on a  
study of agroclimatology in semi-arid and arid zones of the  
Near East, by C.C. Wallen and G. Perrin de Blichambaut.  
In French and English. Rome. 185 p.
- World Meteorological Organization. A study of agroclimatology in semi-  
1963 arid and arid zones of the Near East, by G. Perrin de Blichambaut  
and C.C. Wallén. Technical Note No. 56. Geneva. 64 p.
- Organisation Météorologique Mondiale. Une étude d'agroclimatologie dans les  
1963 zones arides et semi-arides du Proche-Orient, par G. Perrin de  
Blichambaut et C.C. Wallén. Note Technique No. 56.  
Genève. 69 p.



METEOROLOGY OF THE SURVEY AREA - MC  
METEOROLOGIE DE L'AIRES DE L'ETUDE - MC

If the study of climate were to begin with the mere reading of instruments, or recording the local symptoms of the weather, its understanding would be bound to remain incomplete. Climate is accumulated weather, and the actions of the main agents which determine its seasonal unfolding in the Area must be appreciated. They will be briefly recalled here in terms, first, of the general circulation of the atmosphere, viewed three-dimensionally - in the vertical plane, as well as along the surface of the ground.

1. General circulation

1.1. Probably the most permanent and static features in the general circulation affecting our Area, and, for that matter, the whole globe, are the tropical anticyclones which form two belts encircling the earth on either side of the equator. In these anticyclones air is settling down slowly, subsiding, and it arrives at the surface hot and dry. There the atmospheric pressure is relatively high, and the air tends to move outwards to compensate this excess. This movement is deflected to the right in the northern hemisphere, and to the left in the southern, owing to the rotation of the earth, and, in consequence, on the equator side of the high pressure belts the winds they have generated tend to blow from east to west. They are commonly given the name "Trade winds". The belts of high pressure are not continuous; they are broken up into cells or anticyclones round which, in the northern hemisphere, the wind circulates clockwise. These anticyclones have preferred positions: there is an intense and large one commonly centered over the Azores and others in North Africa as shown at Fig MC.1.1. a) and b).

1.2. The Trade Winds issuing from the high pressure zones of the two hemispheres tend to converge towards each other. The intertropical zone where this convergence takes place receives much heat from the sun. Concurrently with this convergence and heating there is ascent of air over the intertropical convergence zone. The air rising through decreasing pressure is cooled by expansion, condensation takes place, clouds are formed and precipitation occurs. Much latent heat of condensation is thus released. This ascending current is eventually deflected polewards and part of it feeds the descending air masses over the anticyclonic belts which are in consequence drier and hotter at low levels than in the ITCZ. Thus we have complete circulation cells in the vertical, resulting in adjacent zones of different weather at the surface - warm and moist ITCZ and hot and dry anticyclones, Fig MC.1.2.

The ITCZ and the tropical anticyclones move north and south with the seasons. The displacement of the ITCZ over the Area tends to follow the zenithal position of the sun with a time lag of four to six weeks.

Polewards, the warm air spilling out of the anticyclonic belts meets cold air from the arctic regions and a new zone of convergence is formed, called the Polar front, along which disturbances travel westwards. At Fig MC.1.2. a diagrammatic vertical cross section of the atmosphere illustrating this is shown.

1.3. In the summer, MC.1.1.a, the intense surface heating of the air covering the land mass of the North African continent tends further to deepen the relatively low pressure of the ITCZ, which at that time is found as far north as  $25^{\circ}$ . Moving towards this low pressure, the air escaping from the anticyclones of the southern hemisphere, notably an important one centred over St. Helena, is deflected from its original south-easterly direction (here meaning the direction from which the wind is coming), crosses the equator at right angles and approaches the ITCZ. By this time its direction has

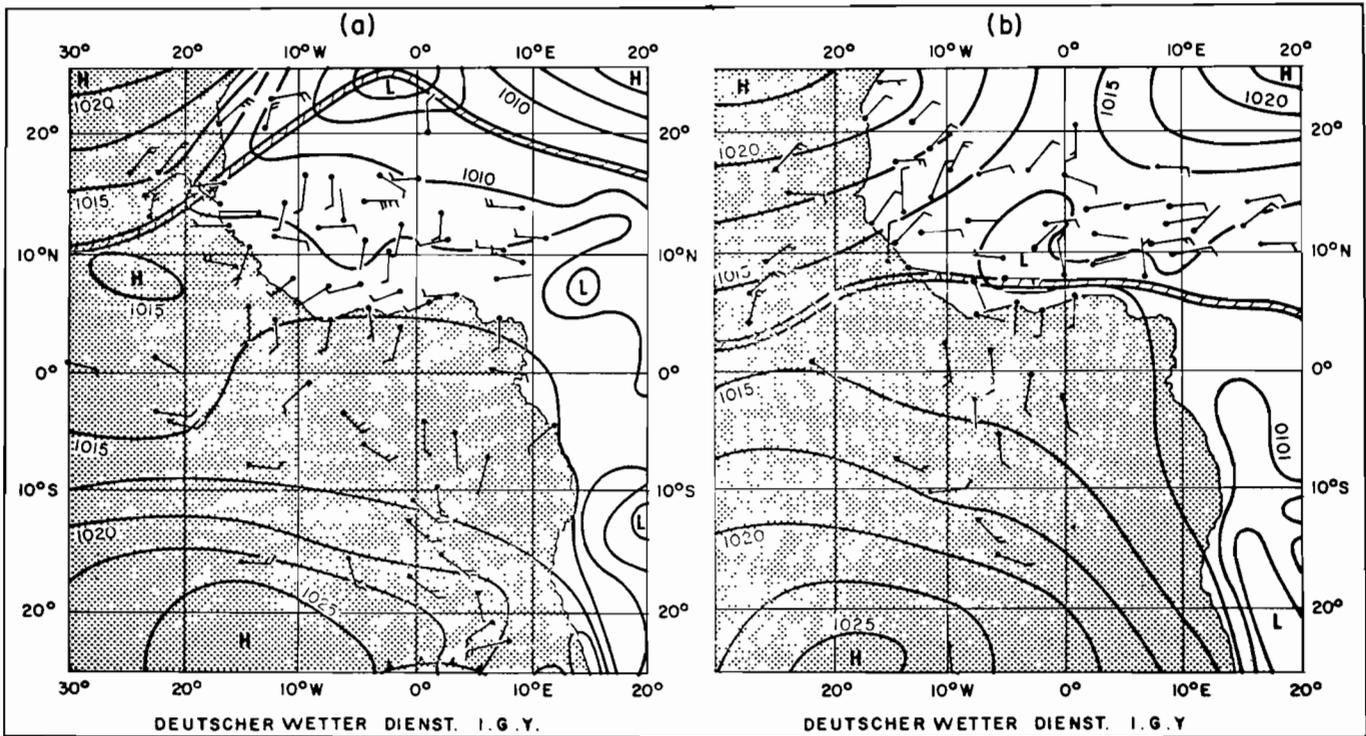


Fig MC.1.1. Surface charts for 1200 GMT showing pressure and winds, the number of barbs of the arrows expressing the strength of the winds and the shafts their direction, the double line shows the position of the Intertropical Front. Anticyclones marked H, in both hemispheres over the Atlantic Ocean and in North Africa, control the original direction of the Trade Winds which move obliquely toward the low pressures of the Intertropical Convergence Zone marked L. The sense of the circulation is reversed as the winds change hemisphere.

- a) August 11, 1958. The ITCZ has moved north of the area of investigation which is covered by the moist monsoon current.
- b) December 11, 1957. The ITCZ is near its southernmost position and the dry NEly Harmattan blows across the Area.

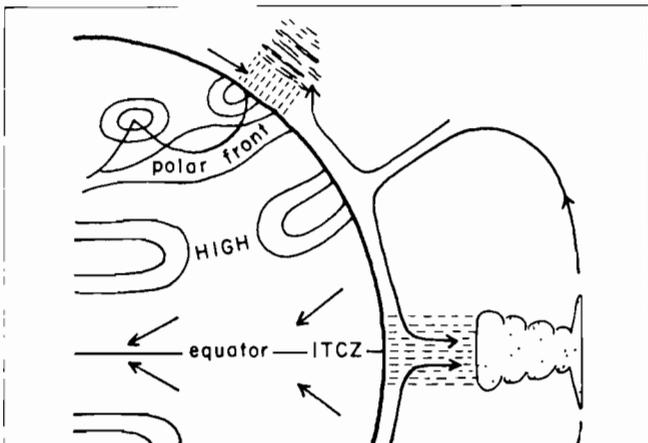


Fig MC.1.2. Diagram of general circulation with, in the vertical, ascent of air with formation of clouds and rain over the inter-tropical convergence zone and at the polar front, and subsidence over the tropical anticyclonic belts. Along the horizontal the trade winds are shown by arrows issuing from the anticyclones and converging at the ITCZ. The area of study is alternatively affected by the winds on either side of the ITCZ there called the harmattan and the monsoon.

become south-westerly since it has joined the anticlockwise circulation associated with low pressure in the northern hemisphere. This stream of air is laden with moisture evaporated from the ocean. It is here known as the "monsoon" (this word has other meanings) and brings much precipitable water to the intertropical convergence. As the forces of suction and push (acting on the air masses) vary, as well as the places of origin and, therefore, their length of travel over the sea, the monsoon current varies in strength and humidity. It is opposed on the north side of the ITCZ by the hot and dry continental north easterly trade winds known there as the "harmattan". These two winds blow alternately over the Area and largely condition its weather.

1.4. In the winter (MC.1.1.5) the ITCZ has retreated southward, sometimes as far as beyond the south coast. The anticyclonic belt is well established over the north of the African continent and the Area is almost continuously swept by the harmattan. The Azores anticyclone is equally well established, and generates a northerly trade wind of maritime origin which affects the western coast of the Area. Inroads of cold air, circulating round the depressions of the polar front, may, at times, ride this current at height, and bring to the coast of Mauritania and Senegal upper instability and cloudy weather and winter rain known as "Heug".

In the summer, on the other hand, this trade wind delays the northerly progress of the ITCZ resulting in a shortened summer rain season.

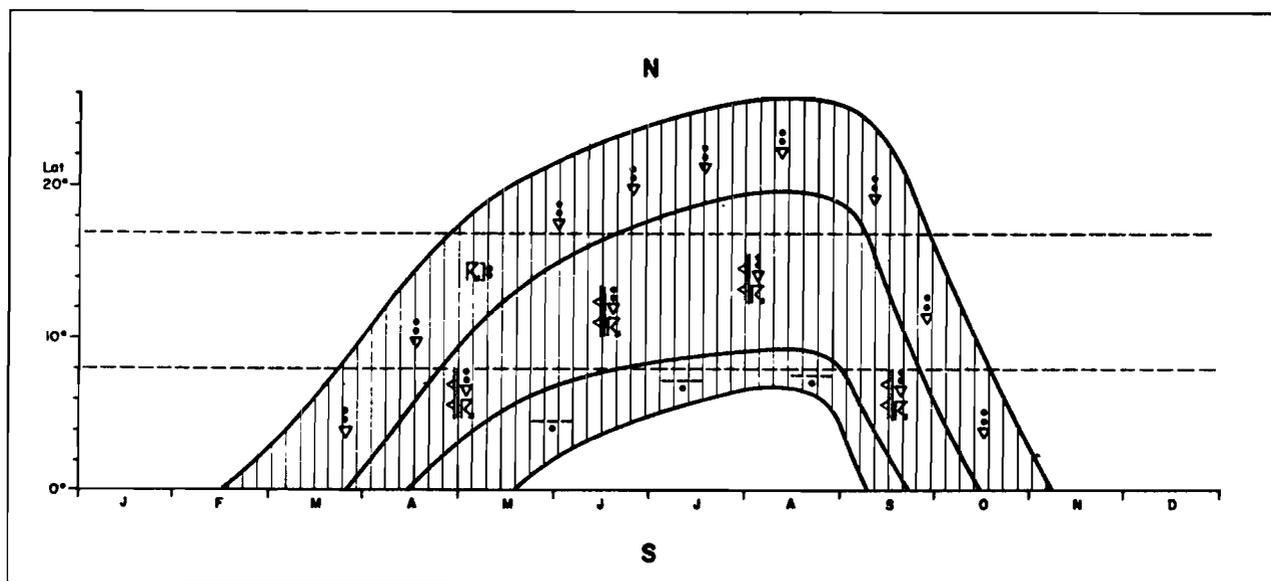
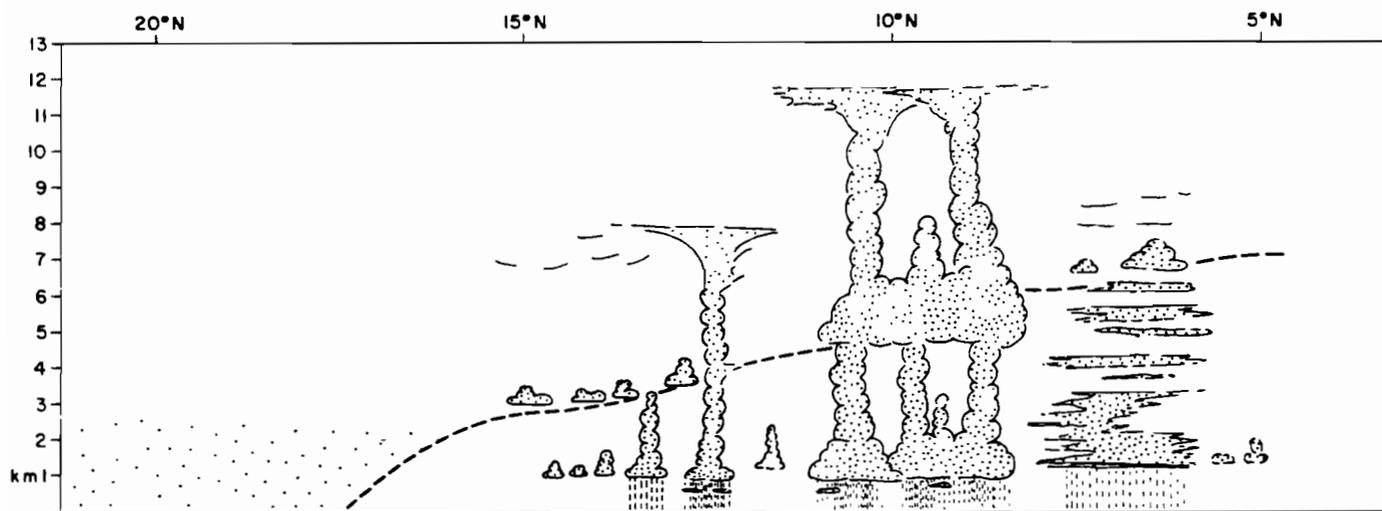


Fig MC.2.1. Diagram showing the seasonal movement of the monsoon weather zones. An arbitrary distinction is made between zones of scattered showers ( $\ddot{\vee}$ ) and thunderstorms, ( $\text{⚡}$ ) of disturbance lines, ( $\text{⊞}$ ) and of more continuous rain with overcast ( $\text{---}$ ). The area of the survey is between the two dotted lines. The time lag relative to the zenithal position of the sun causes maximum northward displacement to occur in August.

## 2. Summer rainfall

2.1. The summer rainfall in our Area is due to the seasonal northward movement of the rain-bearing intertropical convergence zone within which the humidity accumulated in the monsoon stream is precipitated. The length and importance at a given spot of the rainy season will, therefore, depend on its latitude, as shown diagrammatically at Fig. MC.2.1.

2.2. The dry harmattan air tends to override the monsoon current but, at the actual limit of the two air masses or front, little or no weather is found because the lifted air is too dry. The precipitation further south is due to different weather mechanisms which tend to be found in different zones, fig. MC.2.2. The boundaries between these zones are neither sharp nor permanent. In general, going from north to south a zone is first met about 400 km wide where rain falls mainly from localised cumulus clouds as scattered showers of medium intensity. Further south there is a zone of about 1000 km where disturbance lines predominate.



Dhonneur et al.

*Fig MC.2.2. Diagrammatic vertical cross section through Area from north to south in early summer. From left to right: Dry, hazy harmattan; surface boundary between harmattan and monsoon, or ITF which, shown as a dotted line, slopes upwards and southwards; small cumulus; scattered showers; disturbance line shown head on; more continuous cloud layers with lighter rain.*

## 3. Disturbance lines

3.1. These important weather developments are responsible for most of the rain received by the Area. Their origin is not as yet properly understood but seems to be associated with high ground. Variations in the moisture and strength of the monsoon current may play a part in their formation. Structurally they are composed of bands of active cumulonimbus clouds, aligned from north to south, and often more than two

hundred kilometres in length, moving from east to west at the speed of the middle layers of the harmattan, that is about 25 knots. They are self-regenerating and can last for several days, bringing rain to hundreds of thousands of square kilometres. The high intensity downpour which lasts for a few hours, is preceded by a sharp transition from the usual southwesterly monsoon wind to easterly gusts of air cooled by evaporation of the rain. This heavy rain may be followed by several hours of less intense precipitation when an extensive layer of medium clouds juts back from the main body of the storm clouds, MC.3.1. In the section on rainfall intensity, a recording of the rainfall from a disturbance line, PI.5.3., shows the main showers followed by much less intense rain.

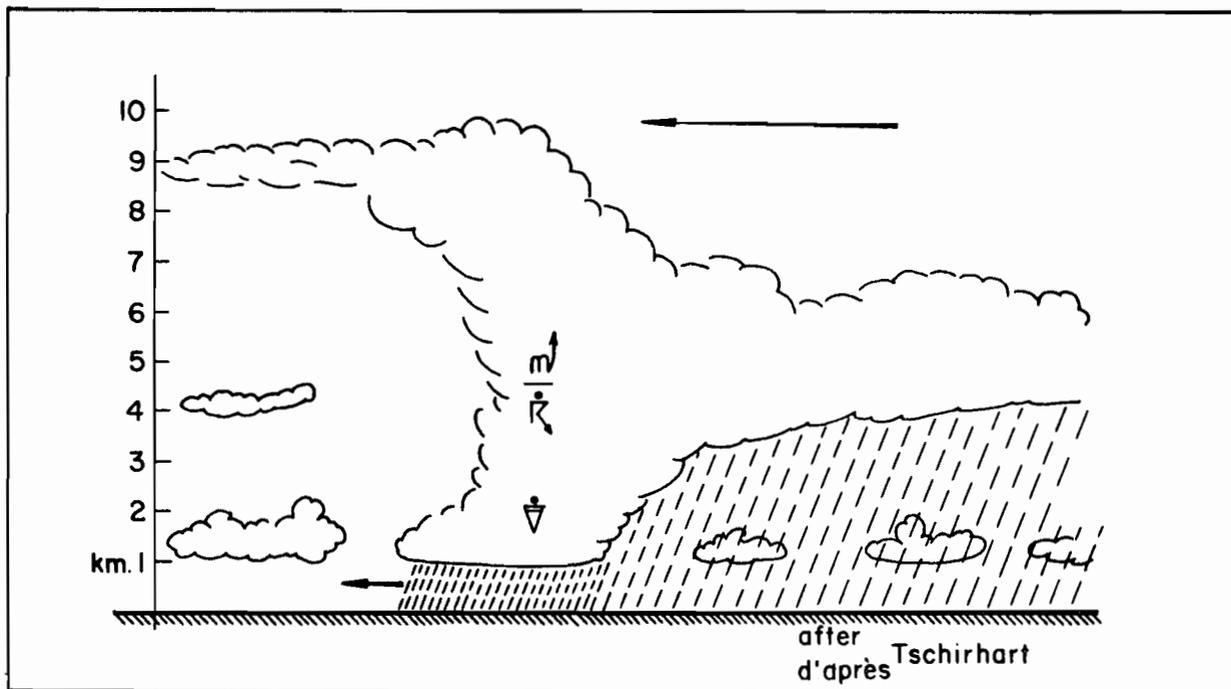


Fig MC.3.1. Diagrammatic vertical section through a disturbance line along its direction of displacement. The shorter arrow near the surface ahead of the rain indicates where gusts of cool easterly winds are felt. These are followed by heavy rain and, later, by lighter rain falling from a sheet of medium cloud trailing behind. Meteorological symbols indicate occurrence of heavy rain, thunder, lightning and turbulence.

#### 4. Other sources of rainfall.

4.1. Further south still a zone is met where the monsoon air can be made to rise simultaneously over larger areas, causing more continuous precipitation of lesser intensity. This type of monsoon rainfall is not characteristic of truly semiarid conditions and is commonly found in the south of the survey area only. After a relatively narrow zone, where the precipitation is more scattered, rainless conditions are again met beyond the southern boundary of the convergence zone. This brings to the regions which it reaches in its northward movement an interruption in the rainy season at the height of the summer. This "little dry period", as it is called, is not truly characteristic

of our Area either, and its occurrence may, in fact, be used as a criterion to delimit its southern boundary.

4.2. Besides scattered showers, disturbance lines, and more continuous monsoon rainfall there are other phenomena of rarer occurrence bringing rain to our Area in summer and also in winter. Some are disturbances which originate in the easterly stream and recurve northwards, crossing the tropics like tropical cyclones, and others reflect the influence of westerly polar front depressions with penetration of cold air towards the equator. This is not the place to discuss these relatively rare and imperfectly known synoptic features.

## 5. Rainfall regime

It is seen that the rains of the Area are mainly due to one general circulation feature, namely, the summer northward movement of the intertropical convergence zone, and that the ultimate mechanism bringing down this rain is largely the disturbance line. As a result of this, and of the lack of geographical diversity, the rainfall regime is one of pronounced uniformity and regularity at the broad scale at which it is being discussed here, especially in a central zone which will be defined later.

## 6. Other agroclimatic factors

The general circulation of the atmosphere has been considered in as far as it brings rain to the area, this being its most important agroclimatic feature. Other factors of which the amounts and variations are better understood in terms of synoptic meteorology will be discussed briefly.

6.1. Temperatures, dependent in the first place on the radiation incident outside the atmosphere, are regulated further by cloud cover and advection, from the north east of air heated by anticyclonic subsidence, and from the south west of air made less warm by cloudiness and evaporation.

6.2. Humidities vary according to the same mechanisms, harmattan air being dry owing to its upper origin and monsoon air relatively humid.

6.3. The wind, of which the direction and the speed are primarily controlled by the harmattan and monsoon regimes, shows regional velocity variations, especially north of the ITF, which affect the rate of evaporation. These variations appear to be due to the mean positions of the anticyclonic cells.

6.4. Such synoptic climatic features as the position of the anticyclonic cells may also cause regional differences in cloudiness which in turn affect temperature and evaporation.

These climatic characteristics will be discussed again at section TL, WE, and RA.

References MC

- Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar.  
(undated 196?) Cours provisoire de météorologie. Livre VI. Dakar. 30p.
- Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar.  
1964 Aperçus de climatologie aéronautique du Sénégal. 154p.
- British West African Meteorological Service. Preliminary note on the climate  
(undated 195?) of Nigeria. Mimeographed typescript. 4p. 2 maps.
- Clackson, J.R. Seasonal Movement of Boundary of Northern Air. British West  
1959 African Met. Services. Tec. Note No. 5.
- Chonneur, M. Etudes climatologiques des routes aériennes aboutissant à Fort  
1957 Lamy. Monographie de la Météorologie Nationale No. 2.
- Dubief, J. Essais sur l'hydrologie superficielle au Shara, Algiers.  
1953 Algerian Government. 457p.
- Dubief, J. Le Climat du Sahara. Algiers, Institut de Recherches Sahariennes.  
1959, 1963. 2 vols.
- Hamilton, R.A. & Archbold, J.W. Quarterly Journal of the Royal Meteorological  
1945 Society. 71, pp 231-262.
- Ireland, H.W. The little dry season of Southern Nigeria. Nigerian Meteorological  
1962 Service. Tec. Note No. 24
- Tschirhart, G. Les perturbations atmosphériques intéressant l'A.E.F.  
1959 Meridionale. Monographie de la Météorologie Nationale  
No. 13
- Walker, H.O. Weather and Climate of Ghana. Accra, Ghana Meteorological  
1957 Department Note No. 5.
- Walker, H.O. in J. Brian Wills (ed.) Agriculture and land use in Ghana  
1962 pp 3-28. London, Oxford University Press. 503 p.



VEGETATION DU SENEGAL - VG  
VEGETATION OF SENEGAL - VG

par  
by A. F. Naegelé (FAO)

Coupe No. 1 Située à 14°56' de Longitude Ouest et Allant de la  
Latitude Nord de 16°38' à celle de 13°50' environ

La vallée du fleuve Sénégal présente incontestablement une très forte individualité physique, biologique, économique et sociale. Du point de vue botanique, divers groupements végétaux sont localisés aux berges du fleuve ainsi qu'aux terrains plus ou moins temporairement inondés par les crues annuelles de ce cours d'eau. Ces groupements, généralement bien délimités, sont liés à un ensemble de conditions écologiques dans lesquelles les facteurs édaphiques (nature du sol) semblent intervenir d'une façon importante.

Dans son ensemble, la large zone d'alluvions fertilisée, pendant la saison humide, par les crues du fleuve Sénégal revêt l'aspect d'un boisement assez dense et d'ailleurs fort complexe.

A la limite de la zone d'inondation du fleuve Sénégal ou "walo", en direction Sud, on rencontre les premières dunes fixées du "diéri", vaste région sablonneuse essentiellement habitée ou parcourue par des éleveurs peul qui y pratiquent surtout l'élevage du boeuf à bosse ou zébu.

La physionomie générale de la végétation est celle d'une savane arbustive claire. Il s'agit plus précisément d'un paysage végétal caractérisé par un tapis herbacé continu avec des arbres généralement de petite taille et assez largement espacés.

Le tapis herbacé est constitué essentiellement par des mésophytes fugaces, c'est à dire d'espèces dont la période de vie active est limitée à la courte saison des pluies. Il comprend en outre quelques plantes pérennantes appartenant à des familles diverses.

Les arbres, dont les uns sont épineux et les autres inermes, sont pour la plupart des espèces caducifoliées et présentent souvent des troncs tortueux. Il y a toujours des peuplements ouverts dans lesquels on peut circuler facilement.

Il faut enfin préciser que cette savane est habituellement chaque année, en saison sèche, la proie de feux dits de brousse.

En ce qui concerne la composition floristique de cette savane, celle-ci est relativement pauvre en espèces, particulièrement dans sa partie septentrionale qui appartient à la moitié méridionale du secteur sahélo-saharien de la zone climatique sahélienne. Parmi les plantes qui paraissent les plus caractéristiques de ce secteur et que l'on rencontre couramment dans la savane arbustive dont il est question, il faut citer :

- AMARANTHACEAE : Aerva javanica (Burm. f.) Juss. ex Schult.  
ANACARDIACEAE : Lanea humilis (Oliv.) Engl.  
APOCYNACEAE : Adenium obesum (Forsk.) Roem. et Schult.  
ASCLEPIADACEAE : Caralluma retrospiciens (Ehrenb.) N.E.Br., Glossonema boveanum (Decne.) Decne., Leptadenia pyrotechnica (Forsk.) Deane.

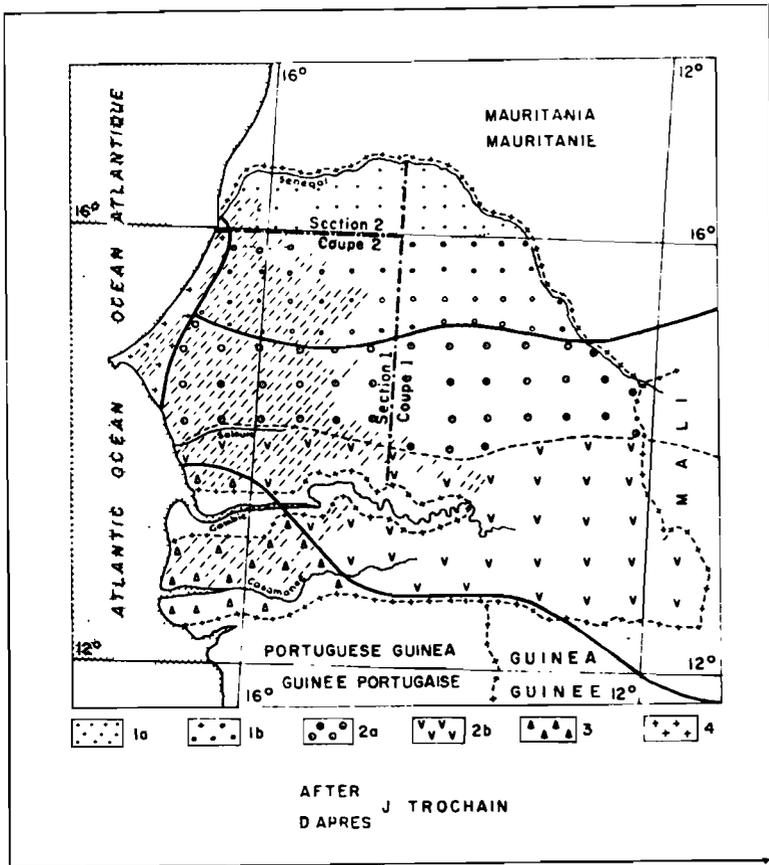
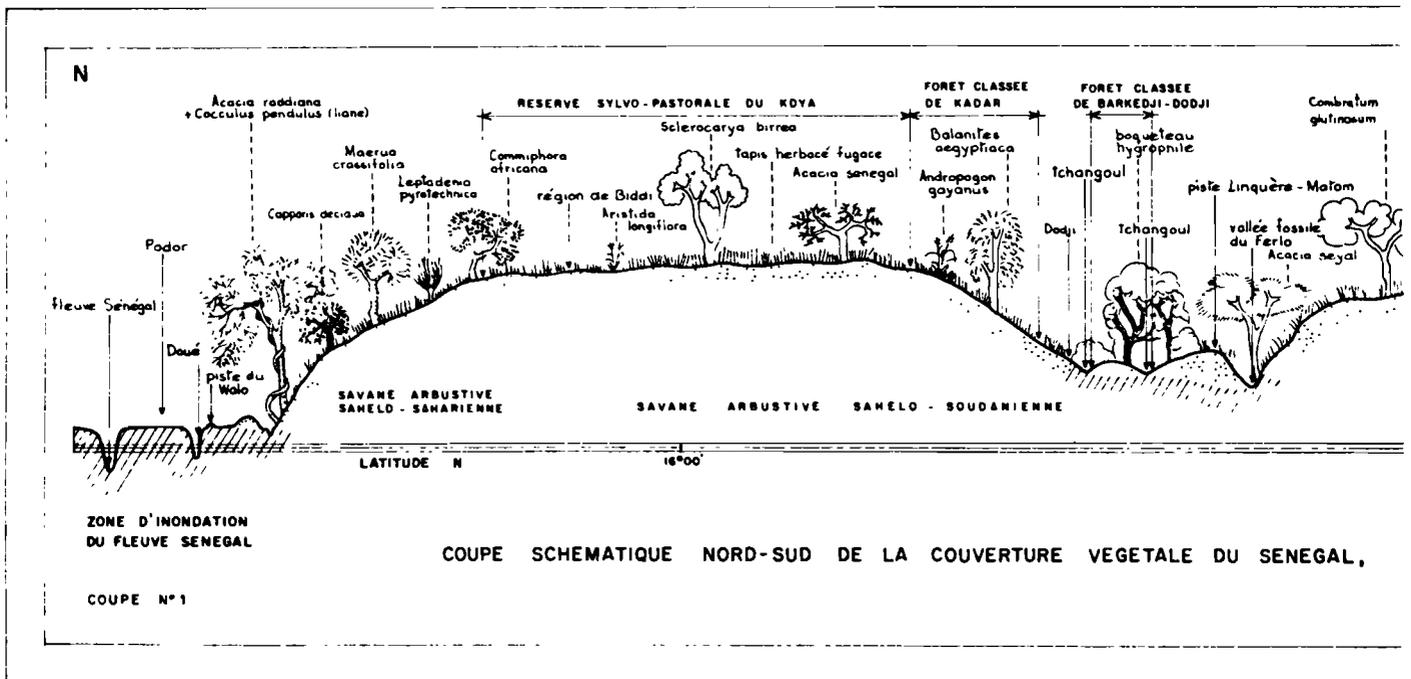


Fig. VG. 1. Carte du Sénégal montrant la position des coupes N° 1 et N° 2. 1a, steppe, 1b, 2a et 2b, savanne arbustive à savanne arborée. 4, zone littorale. D'après Trochain



COUPE SCHEMATIQUE NORD-SUD DE LA COUVERTURE VEGETALE DU SENEGAL,

COUPE N°1

Fig. VG. 2. Coupe N° 1

- BORAGINACEAE : Cordia rothii Roem. et Schult.
- BURSERACEAE : Commiphora africana (A.Rich.) Engl.
- CAESALPINIACEAE : Cassia italica (Mill.) Lam. ex F.W.Andr.
- CAPPARIDACEAE : Boscia senegalensis (Pers.) Lam. ex Poir., Cadaba farinosa Forsk., Capparis corymbosa Lam., Capparis decidua (Forsk) Edgew., Maerua crassifolia Forsk.
- COMBRETACEAE : Guiera senegalensis J.F. Gmel.
- EUPHORBIACEAE : Euphorbia scordifolia Jacq., Jatropha chevalieri Beille, Phyllanthus rotundifolius Klein ex Willd.
- GERANIACEAE : Monsonia senegalensis Guill. et Perr.
- GRAMINEAE : Aristida funiculata Trin. et Rupr., Aristida mutabilis Trin. et Rupr., Aristida stipoides Lam., Cenchrus biflorus Roxb., Cenchrus prieurii (Kunth) Maire, Chloris prieurii Kunth, Cymbopogon schoenanthus (L.) Spreng., Eragrostis tremula Hochst., Latipes senegalensis Kunth, Schoenefeldia gracilis Kunth.
- MALVACEAE : Abutilon fruticosum Guill. et Perr., Cienfuegosia digitata Cav.
- MENISPERMACEAE : Cocculus pendulus (J.R. et G. Forst.) Diels.
- MIMOSACEAE : Acacia nilotica (Linné) Willd. ex Del., Acacia raddiana Savi, Acacia senegal (Linné) Willd., Acacia seyal Del.
- MOLLUGINACEAE : Limeum pterocarpum (Gay) Heimerl.

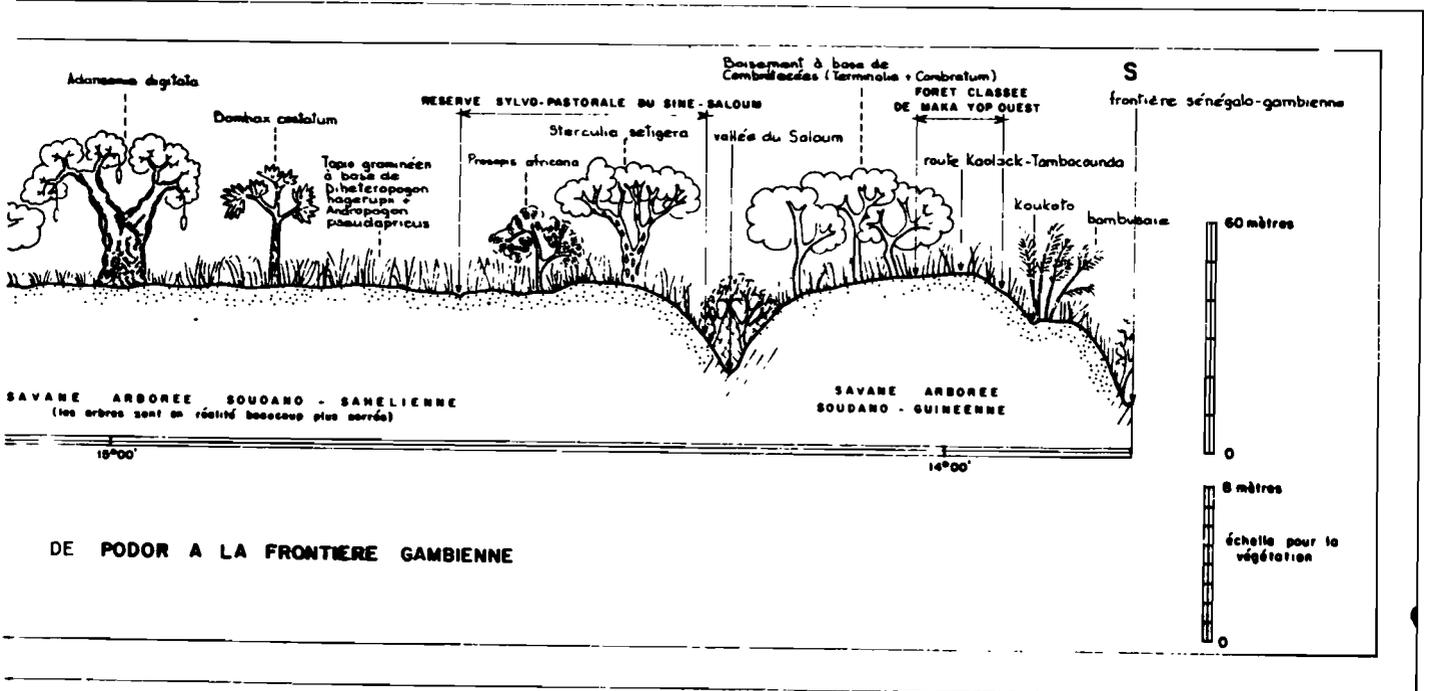


Fig. VG. 2. Coupe N° 1

- PAPILIONACEAE : Indigofera aspera Perr. ex DC., Indigofera oclutea (Burm. f.) Merrill, Indigofera oblongifolia Forsk., Indigofera senegalensis Lam., Indigofera sessiliflora DC., Tephrosia obcordata (Lam. ex Poir.) Bak.
- PEDALIACEAE : Rogeria adenophylla J. Gay ex Delile
- POLYGALACEAE : Polygala erioptera DC., Polygala irregularis Boiss.
- SALVADORACEAE : Salvadora persica L.
- TILIACEAE : Grewia tenax (Forsk.) Fiori

Plus au Sud, dans la Réserve Sylvo-Pastorale du Koya par exemple, la composition floristique de la savane arbustive indique que l'on se trouve ici dans le secteur Sud de la zone climatique sahélienne, secteur qualifié de sahélo-soudanien car on y note une prédominance très nette des espèces végétales sahéliennes sur les soudaniennes. De ce secteur on passe ensuite, au Sud de la vallée fossile du Ferlo, à un autre, caractérisé, à l'inverse du précédent, par une nette prédominance des espèces soudaniennes sur les sahéliennes et nommé de ce fait soudano-sahélien. Il s'agit, dans ce cas, du secteur Nord de la zone climatique soudanienne et la végétation que l'on y observe a la physionomie d'une savane arborée.

D'une manière générale, le passage de la zone climatique sahélienne, au Nord, à celle soudanienne, au Sud, se fait insensiblement. L'apparition d'espèces, d'abord isolées, puis devenant de plus en plus communes, ou la disparition progressive de certaines autres espèces, indiquent ce changement.

En somme, lorsqu'on part de la zone d'inondation du fleuve Sénégal en direction Sud, soit depuis Podor, ville située à 16°38' de latitude au Nord de l'équateur et 14°56' de longitude à l'Ouest du méridien de Greenwich, jusqu'à la frontière de la Gambie, approximativement à la latitude 13°40', on traverse successivement :

- |                        |                    |   |
|------------------------|--------------------|---|
| - une savane arbustive | sahélo-saharienne  | { partie Nord de la zone climatique sahélienne) |
| - " " "                | sahélo-soudanienne | { " Sud " " " " " " }                           |
| - " " arborée          | soudano-sahélienne | { " Nord " " " " soudanienne)                   |
| - " " "                | soudano-guinéenne  | { " Sud " " " " " " }                           |

En ce qui concerne l'utilisation des terres par l'homme, les savanes arbustives sahéliennes (sahélo-saharienne et sahélo-soudanienne) sont presque exclusivement exploitées du point de vue pastoral. On y élève principalement des bovins (zébus), ovins et caprins, ainsi que des ânes, dormadaires et chevaux.

Les surfaces cultivées sont peu importantes. Il s'agit essentiellement de cultures vivrières : Pennisetum typhoides (Burm.) Stapf et Hubbard (:petit mil, pearl millet) sur les sols sablonneux et Sorghum vulgare Pers. (:gros mil ou sorgho, sorghum) sur les terres plus ou moins argileuses. Sont en outre cultivées, toujours en mélange avec ces céréales, les espèces suivantes : Vigna sinensis (Linné) Savi ex Hassk., Papilionacée alimentaire voisine du haricot (:dolique de Chine, Cowpea); Colocynthis citrullus (Linné) O.Ktze. appartenant à la famille des Cucurbitacées (:pastèque ou melon d'eau, water melon); Hibiscus sabdariffa Linné, de la famille des Malvacées (:oseille de Guinée, red sorrel); Arachis hypogaea Linné, de la famille des Papilionacées (:arachide, ground nut).

Les savanes soudaniennes (soudano-sahélienne et soudano-guinéenne) sont exploitées à peu près de la même manière que les précédentes. Toutefois, dans la zone d'habitat des glossines (mouches tsé-tsé), les zébus sont remplacés par un type de bovins sans bosse (taurins) appartenant à la race n'dama qui est trypanorésistante.

Coupe No. 2 Située approximativement à 15°35' de Latitude Nord  
et allant de la Longitude Ouest 16°40' à celle de 15°20'.

En partant de la côte atlantique en direction Est jusqu'à la vallée fossile du Ferlo (région de Yang-yang), en passant à proximité de l'agglomération de Louga, on traverse successivement plusieurs grands types de végétation reliés entre eux par des peuplements de transition.

On observe ainsi :

- 1\* la steppe littorale
- 2\* la savane arbustive paralittorale
- 3\* la savane arbustive des dunes continentales.

La savane arbustive qui succède à celle occupant les sables paralittoraux est profondément modifiée par suite de l'installation de cultures et particulièrement de la culture arachidière. Sur d'immenses étendues on ne voit guère qu'une succession de jâchères et de lougans (1) d'arachide, de petit mil, de niébé (Vigna sinensis), de manioc (Manihot esculenta Grantz, EUPHORBIACEAE), etc.

Dans cette savane dégradée par l'action de l'homme, de nombreuses plantes messicoles et post-culturelles ont trouvé des conditions écologiques particulièrement favorables à leur développement. La flore ligneuse a été presque totalement détruite. Seuls quelques grands arbres ont été respectés et parmi ceux-ci c'est l'Acacia raddiana Savi (MIMOSACEAE) qui constitue souvent l'élément physiognomique dominant. Les jâchères vieilles de quelques années sont souvent envahies par des buissons de Quiera senegalensis J.F.Gmel. (COMBRETACEAE) qui tiennent un rôle non négligeable dans l'alimentation des zébus durant la longue saison sèche.

Plus à l'Est, les surfaces consacrées aux cultures diminuent sensiblement par suite de l'augmentation des conditions d'aridité. Les influences marines ne sont d'ailleurs plus que très faiblement sensibles dans la région de Louga.

Lorsqu'on quitte la région arachidière pour se diriger, encore plus à l'Est, vers la vallée fossile du Ferlo, le paysage devient beaucoup plus boisé. On pénètre ainsi insensiblement dans la zone marginale Ouest d'une autre région très vaste sur laquelle s'exerce une activité pastorale tout à fait prédominante parce que seul l'élevage y est rentable.

Cette zone marginale, à relief dunaire amolli mais cependant encore nettement perceptible, est occupée par une savane arbustive claire du même type que celle décrite dans la coupe numéro 1.

---

(1) Nom donné au Sénégal aux terrains cultivés.

En ce qui concerne la strate ligneuse, on est frappé par la dominance, sur des surfaces parfois considérables, d'une essence épineuse : Balanites aegyptiaca (Linné) Del., appartenant à la famille des ZYGOPHYLLACEAE. C'est un petit arbre fourrager, souvent mutilé par les bergers qui, habituellement vers la fin de la saison sèche l'ébranchent inconsidérément, et parfois à mort, pour permettre la survie de leurs troupeaux devenus faméliques à cette époque de l'année. Ces faciès à Balanites sont vraisemblablement dûs aux feux de brousse périodiques auxquels ce petit arbre résiste admirablement.

Comme dans la coupe numéro 1, on rencontre également ici des mares temporaires qui, au sein de la savane, occupent les dépressions à fond imperméable et qui se remplissent uniquement par drainage superficiel des eaux de pluie. Ces mares, de dimensions variées, sont entourées d'une végétation ligneuse particulière, plus hygrophile que celle d'alentour, et confèrent de ce fait un aspect particulier au paysage. Ce sont des sortes de boqueteaux ou de halliers avec un sous-bois formé de plantes banales recherchant les lieux humides.

Vers le village de Yang-yang et jusqu'à la vallée fossile du Ferlo on rentre dans une zone argilo-sableuse et argileuse où se trouvent des cultures et jâchères.

La végétation naturelle est nettement moins variée et bien moins vigoureuse sur ces terres plus ou moins lourdes que sur les sols sablonneux aérés.

Les terres à argile compacte sont surtout affectionnées par Acacia seyal Del. (MIMOSACEAE) qui y forme souvent des peuplements plus ou moins purs mais dont les individus ne sont généralement pas au contact l'un de l'autre.

Le fond de la vallée fossile du Ferlo, constitué d'une argile grise compacte, est pratiquement sans végétation.

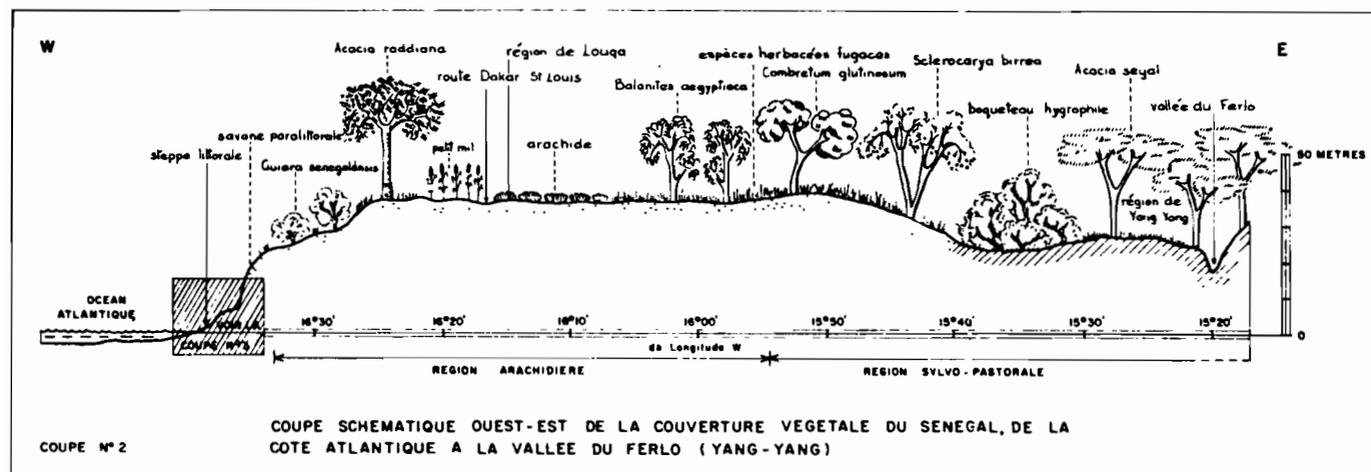


Fig. VG. 3. Coupe N° 2

LES SOLS DE L'AIRE DE L'ETUDE - SA  
SOILS OF THE SURVEY AREA - SA

par B. Dabin, R. Fauck, J. Pias (ORSTOM)  
by

Facteurs de Formation

1. Le Climat.

Parmi les facteurs de formation, le climat est des plus importants. Son étude étant cependant longuement développée par ailleurs, son action ne sera évoquée ici qu'en cas de nécessité en cours de description des sols. Il y a lieu pourtant de préciser que l'évolution des sols, dans l'ensemble de l'aire d'investigation, se fait suivant des processus comparables, qui varient surtout dans leur intensité.

2. La végétation.

Les grandes zones de végétation correspondent aux grandes unités climatiques. Cette question, traitée plus loin, ne le sera pas dans l'étude des sols, mais on aura l'occasion de parler des formations végétales qui peuvent se développer en fonction des propriétés physiques ou chimiques des grands types de sols.

3. Les actions paléoclimatiques.

Dans toute l'aire située au sud du Sahara, un certain nombre de faits à caractère géomorphologique ou pédologique ne peuvent s'expliquer que par l'action de climats anciens ou d'une hydrographie ancienne. Ces variations de climat sont d'ailleurs prouvées par d'autres sciences (géologie, archéologie,...). Elles se sont situées essentiellement à l'ère tertiaire et à l'ère quaternaire.

Lorsque les climats ont évolué vers une plus grande sécheresse, les formations anciennes se sont maintenues et certains caractères (durcissement de cuirasse) se sont même accrus. Lorsque les climats ont au contraire évolué vers une plus grande humidité, les formations anciennes ont disparu sous l'action des agents climatiques ou elles ont servi de roche-mère à une nouvelle pédogénèse.

3.1. Formations tertiaires. L'hypothèse la plus répandue est celle d'un climat tropical humide qui a régné, sur toute la zone au sud du Sahara dès la fin du Crétacé et qui a provoqué une forte évolution ferralitique des sols. Les vestiges les plus importants sont les matériaux remaniés du Continental terminal d'âge miopliocène qui contiennent tous des éléments ferralitisés, et qui s'étendent sur une grande partie de la zone étudiée; mais les autres roches en place, granites, schistes, grès, ont également subi des phénomènes de ferralitisation durant les mêmes périodes.

Les travaux des géomorphologues ont montré que de nombreuses buttes ou plateaux recouverts d'une épaisse cuirasse ferralitique ou ferrugineuse se trouvaient à des côtes correspondantes; il y a eu plusieurs surfaces d'aplanissement d'âges différents,

les plus élevées présentant les formations ferralitiques les plus évoluées. L'action de nappes phréatiques anciennes, suivie du creusement des vallées, puis d'un intense phénomène d'érosion, a joué également un grand rôle dans la formation des cuirasses. On observe d'autre part des sols rouges profonds qui ont conservé des caractères faiblement ferralitiques dus à une évolution ancienne. Ces paléosols peuvent s'observer jusqu'à l'isohyète 600 mm et les cuirasses, dans des zones encore plus sèches (300 mm et moins).

Les épandages de gravillons provenant d'érosion antérieure servent actuellement de roche mère à de nombreux sols qui ont une grande importance culturale; en outre des nappes de gravillons s'observent dans des terrasses alluviales anciennes (Niger). Enfin il est important de constater que les niveaux cuirassés anciens servent de sources d'hydroxydes et, par lessivage oblique, enrichissent en fer les sols situés en contrebas, cette migration accélérant la formation de nouvelles cuirasses actuelles.

Lorsque la pluviométrie présente dépasse 1200 mm, les cuirasses tabulaires deviennent de plus en plus rares.

3.2. Formations quaternaires. A la fin de l'ère tertiaire et au quaternaire, l'Afrique au sud du Sahara a subi des changements climatiques très importants en liaison probable avec les glaciations observées en Europe. Il y a eu alternance de phases pluviales et arides, amenant des reprises d'érosion plus ou moins violentes, avec des transports ou des dépôts de sédiments provenant soit de massifs soit de vieux sols. Au Sénégal, au Mali, au Niger, de vastes réseaux hydrographiques anciens ont donné naissance à des vallées fossiles (exemple : les Maggias du Niger), au Tchad et au Mali les lacs ont occupé des étendues considérables. Dans l'actuelle boucle du Niger, un important delta central s'est constitué, qui est en partie asséché aujourd'hui. Au Tchad, un cordon sableux long de plus de 1000 km, se prolongeant au Cameroun et en Nigeria, marque le contour d'un ancien lac qui s'étendait jusqu'à la côte 320, le lac actuel étant à la côte 282.

Dans toute la partie nord du Sénégal, du Mali, du Niger, du Tchad, les séries fluviales déposées au cours des périodes humides ont subi, au cours des phases arides suivantes, des remaniements éoliens intenses qui ont amené la formation de systèmes dunaires très étendus : l'un d'entre eux, au Tchad, descend jusqu'à 10° N de latitude.

Inversement, le domaine des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés semble être remonté jusqu'aux confins de l'Ennedi et du Tibesti. Ces observations pédologiques concordent avec des données historiques qui prouvent qu'à une époque qui peut remonter au néolithique et s'est poursuivie jusqu'à une période beaucoup plus récente, le Sahara ainsi que la partie nord du Tchad, du Niger, du Mali, n'étaient pas le désert que nous connaissons, mais un pays de culture et d'élevage. Les dépôts éoliens ou fluviaux postérieurs aux périodes humides dont nous avons parlé ne portent au contraire que des sols très peu évolués.

#### 4. L'Hydrographie.

L'hydrographie est dominée par trois grands bassins fluviaux : d'Ouest en Est ce sont les bassins du Sénégal, du Niger et des grands fleuves, Logone et Chari, qui aboutissent au Lac Tchad.

4.1. Bassin du Sénégal. Le Sénégal, comme le Niger, provient du massif guinéen du Fouta-Djallon. Dans la partie antérieure de son cours, en amont de Bakel, il est formé par la réunion de trois grands affluents : le Bafing, le Bakoï, la Falémé. Puis

la pente du fleuve devient très faible, de nombreux bras secondaires coulent parallèlement et, en aval de Podor, jusqu'à Saint Louis, s'étend le delta du Sénégal.

La crue s'étend de juillet à octobre et la décrue en saison sèche. Cette crue libère des terrains cultivables. Actuellement, l'endiguement du Sénégal et la réserve du lac de Guiers permettent un aménagement rationnel du delta pour la production rizicole.

4.2. Bassin du Niger. Tout le centre de la zone subsaharienne est dominé par l'immense bassin du Niger. De nombreux cours d'eau en provenance du Fouta-Djallon et de Haute Guinée (Milo), ainsi que des rivières de la Côte d'Ivoire (Bagoué), alimentent son cours ou se jettent dans un grand affluent, le Bani. Tout ce réseau coule en direction Nord-Est.

En aval de Sansanding, le Niger se sépare en de nombreux défluent qui traversent une immense plaine alluviale appelée Delta Central Nigérien. Certains défluent sont encore en activité, formant le delta vif, et d'autres asséchés forment le delta mort. Au nord du Delta s'étend une vaste zone lacustre avec de grands lacs tels que le Faguibine, le lac Horo,...

En aval de Tombouctou, le Niger prend une direction Ouest-Est, puis après le seuil de Tosaye il est capté par une vallée coulant en direction Sud-Est, l'ensemble formant une immense boucle, la Boucle du Niger. Entre Gao et Gaya, le Niger a un lit fortement rétréci par rapport à la zone deltaïque précédemment décrite.

La crue du Niger se situe de juillet à octobre dans la partie supérieure de son cours, et de septembre à février dans la partie inférieure, à l'est de la boucle.

L'aménagement du Delta Central Nigérien a été réalisé par la construction d'un barrage à Sansanding et l'endiguement des défluent dont certains, comme le mangot de Molodi entièrement asséché, ont été remis en eau, permettant l'irrigation de près de 200.000 hectares, soit au total 500.000 hectares de terres irrigables en comptant le delta vif (mais la surface réellement aménagée à l'heure actuelle est beaucoup plus faible).

Dans la partie Est, les cuvettes alluviales sont également endiguées, la crue tardive permettant une culture de pluie (juillet à septembre) et une irrigation d'arrière-saison (octobre à février). Dans la partie centrale du territoire du Niger, les rivières sont appelées goulbi. Certaines appartiennent à un ancien réseau que l'on peut rattacher au bassin du Niger. D'autres, plus à l'Est, se jettent dans le lac Tchad (exemple : la Komadugu).

4.3. Bassin du Tchad. Le réseau hydrographique est constitué dans la partie Sud-Ouest du pays par deux grands fleuves, le Logone et le Chari, tributaires du lac Tchad. Tous deux traversent tout d'abord des formations granito-gneissiques, puis le Continental terminal avant de couler dans leur cours moyen et inférieur dans des formations quaternaires qu'ils inondent de leurs débordements en saison des pluies.

Les deux fleuves, qui ont un écoulement permanent, ont leur étiage en avril-mai et leur crue en septembre-octobre. De part et d'autre des bourrelets de berge, d'immenses étendues sont inondées d'août à décembre-janvier. De premiers essais de mise en valeur par la création de casiers ou par endiguement du fleuve ont été effectués au cours de ces dix dernières années. L'orientation primitive donnée aux essais avait pour but de connaître les possibilités cotonnières des sols ainsi récupérés. Les cultures de cette plante ont été progressivement abandonnées et la riziculture se développe actuellement sur les deux rives du Logone.

Le lac Tchad, qui reçoit les eaux de ces deux fleuves, couvre 25.000 km<sup>2</sup>. C'est plus un immense marécage d'eau douce qu'un lac. La profondeur moyenne varie de 3 à 5 mètres avec quelques bas-fonds d'une dizaine de mètres. Il atteint sa cote maximale en janvier tandis que la cote minimale plus basse de 70 cm à 1 m est observée en juillet. Les rives nord et est sont jalonnées de chapelets d'îles orientées N.O.-S.E., vestiges d'un ancien système dunaire. Elles ont permis la création de polders particulièrement riches et fertiles où se cultivent blé et maïs.

## 5. Le relief.

En passant du Nord au Sud, on distingue différents types de relief :

a) - Le modelé dunaire. Il prend une grande extension au nord de l'isohyète 500 mm et en dehors des vastes zones alluviales. Il s'agit souvent d'ergs fossiles aujourd'hui fixés par la pseudo-steppe ou même la savane arbustive. Ce relief est très variable, les dénivellations entre dunes et interdunes pouvant aller de quelques mètres à une vingtaine de mètres.

b) - Le modelé subhorizontal. C'est celui des vastes bassins alluviaux, qu'il s'agisse du delta du Sénégal, du Delta Central Nigérien ou des plaines alluviales du Niger, des bassins du Logone et du Chari, des anciens dallets, ou des bahrs Acuk et Salamat.

Le relief est relativement plat, seules émergent des plaines inondables (argileuses), des buttes sableuses (Toguérés du Mali), qui sont isolées ou constituent des massifs ou des alignements orientés qui surplombent la plaine de quelques mètres. Les fleuves ont des pentes faibles et se ramifient souvent en systèmes complexes de défluents. Les alluvions quaternaires qu'ils entraînent présentent des bourrelets de berge et des thalwegs, mais avec des dénivellations très faibles, de l'ordre de quelques mètres. De vastes étendues sont souvent inondées plusieurs mois de l'année.

c) - Le modelé des plateaux soudaniens et soudano-guinéens. Dans les régions centrales du Sénégal, du Mali, de Haute Volta, etc... et dans le nord de la Côte d'Ivoire, du Togo, du Dahomey, dans la partie sud du Tchad, etc..., un réseau hydrographique très lâche individualise une série de plateaux à topographie plane. Les pentes sont en rapport avec les axes d'écoulement, elles sont longues et généralement inférieures à 2%. Le centre des plateaux souvent très large est plan, parfois déprimé et mal drainé. Une ligne de crêtes se dégage parfois du paysage surmonté d'une cuirasse en voie de démantèlement. Dans les zones granitiques ou gneissiques, le modelé est moins accentué et on observe des inselbergs.

d) - Le modelé des massifs. Il s'agit soit de buttes témoins de roches basiques surmontées de cuirasses anciennes et qui peuvent dominer la plaine environnante de quelques centaines de mètres, soit de véritables chaînes de montagne anciennes. Au Tchad on peut citer les massifs du Ouaddaï et du Guera. Autour d'un pointement rocheux, le glacis débute par une zone d'arène peu épaisse en pente douce, plus ou moins vallonnée, au-delà de laquelle s'observent des colluvions argilo-sableuses qui font la jonction avec les zones alluviales.

6. Les matériaux originels:

Du Nord au Sud, on observe :

a) - Les sables et les dunes de la zone saharienne, qui s'étendent au nord de la boucle du Niger et du lac Tchad.

b) - Des formations "quaternaire indifférencié", dans la boucle du Niger et sur une grande partie de la cuvette Tchadienne. Ces alluvions ne dépassent pas 5 à 6 mètres au nord de Sansanding et peuvent atteindre 20 mètres dans la partie septentrionale du Delta Central Nigérien (province du Ména). Ils sont très hétérogènes granulométriquement, passant de formations très sableuses à des dépôts très argileux, avec tous les intermédiaires.

c) - A l'ouest, au sud-ouest et à l'est de la boucle du Niger, en Haute Volta ainsi qu'au Sénégal où elles couvrent les 2/3 du pays, et au Tchad où on les retrouve dans le Sud, les formations du Continental Terminal présentent une relative homogénéité. Il s'agit de matériaux ruisselés formant une immense nappe de recouvrement; les produits ont généralement subi une forte altération ferrallitique. Des variations climatiques et les abaissements du niveau de base ont permis le développement de plusieurs étages cuirassés ou, dans certains cas, simplement carapacés.

d) - Au Tchad (région de Lamé) s'observent, ainsi qu'au Cameroun (Figuil), des dépôts secondaires, vestiges d'une transgression crétacée (conglomérats grossiers, arkoses, grès, calcaires).

e) - Dans la partie sud de la boucle du Niger (axe Bamako-Koutiala) ainsi que sur le Soudan central (Mali) et l'Ouest de la Haute Volta, se situe la vaste région des grès Cambro-ordoviciens; ils sont surmontés d'une cuirasse "latéritique" ancienne qui constitue l'armature du relief.

f) - Au sud du Mali, en Haute Volta, au Cameroun, dans l'Est et la partie centrale du Tchad, s'étend le socle cristallin, constitué de formations d'origine plutonique (granite calco-alkalin, granitegneiss, granodiorites, charnockite), métamorphique (schistes, amphibolite, quartzites, micaschistes), volcanique (dolérite). Ces formations font partie du bouclier précambrien.

L'interférence de ces facteurs a déterminé la formation de sols variés, qui seront essentiellement considérés ici sous l'aspect de leurs caractéristiques physiques (texture principalement) dont dépendent étroitement les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques. Leurs propriétés chimiques générales seront néanmoins citées en rapport avec leur utilisation en agriculture.

On rappellera enfin que la classification des sols est fondée sur le développement du profil : profil de type AC ou A(B)C ou ABC, suivant l'individualisation plus ou moins grande des horizons, et sur les caractères de ces horizons :

- A : horizons humifères et horizons lessivés
- B : horizons d'accumulation
- C : matériau originel

### Les Sols Isohumiques

Les sols de l'Afrique sèche au sud du Sahara appartiennent aux grandes classes suivantes : Sols isohumiques - Sols à sesquioxydes - Vertisols - Sols hydromorphes - Sols halomorphes. Les sols minéraux bruts et les sols peu évolués occupent aussi de vastes superficies. Les 4 premières classes de sols sont les plus importantes au point de vue de l'utilisation.

Il faut faire une mention particulière pour les deux premières classes de sol qui représentent les plus vastes superficies et se répartissent en fonction des grandes zones climatiques. Ce sont :

- celle des sols isohumiques (sols Bruns et Brun-Rouge)

- celle des sols à sesquioxydes et à matière organique rapidement décomposée (sols ferrugineux et sols ferralitiques)

Dans ces deux classes, les grands groupes de sols correspondent aux domaines climatiques définis suivant Aubreville :

- Dans la zone Sahelo-Saharienne (200 à 500 mm), on rencontre essentiellement les sols Brun et Brun-Rouge subarides.

- Dans la zone Sahelo-Soudanaise (500 à 900 mm), on observe principalement les sols Ferrugineux tropicaux peu lessivés et lessivés.

- Dans la zone Soudano-Guinéenne (900 à 1200 mm), on observe uniquement des sols Ferrugineux tropicaux lessivés, puis des sols faiblement Ferralitiques.

#### 1. Classification et description des sols isohumiques

1.1. Les sols Bruns subarides. C'est l'ensemble des sols qui se développent en position de drainage normal, dans les régions sèches à conditions d'aridité marquées, sous l'action principale de peuplements herbacés de type steppique,

Leur morphologie, de type AC, est dominée par une pénétration homogène et profonde de matière organique à travers le profil dont l'épaisseur est généralement réduite (moins de 100 cm).

Il y a présence fréquente de  $\text{CaCO}_3$  en quantité variable. La fraction argileuse est constituée en majeure partie de minéraux du type 2 : 1, montmorillonite ou micas hydratés. La matière organique est faible. L'individualisation du fer est importante. Les conditions climatiques et le milieu saturé sont vraisemblablement les principaux facteurs de polymérisation de l'humus, qui est caractérisé par une très grande proportion d'acides humiques gris.

On distingue des sols Bruns sur argile et des sols Bruns sur matériau sableux.

1.1.1. Sols Bruns steppiques argileux. Le profil de ces sols, qui se développent sous une pseudo-steppe à Schoenefeldia gracilis accompagnée de rares arbres (Acacia), est homogène sur environ 1 mètre. Ils sont moyennement argileux (20 à 30% d'argile en surface) avec légère augmentation en profondeur. Mais la principale caracté-

ristique est la pauvreté en sable grossier et la grande richesse en sable fin qui joue un rôle analogue au limon. On peut observer parfois en profondeur un horizon sableux. La teneur en matière organique est voisine de 1%.

La structure, polyédrique en surface avec fentes de retrait, est médiocrement stable. Les sols sont mal agrégés, leur dispersion est élevée, ce qui leur confère leur grande compacité. La perméabilité est assez faible, homogène sur tout le profil. L'eau utilisable est de 10% environ. La résistance à l'engorgement est moyenne, parfois médiocre. L'aération et le drainage sont corrects sous un climat assez sec; sous irrigation, il faudrait prendre de grandes précautions pour éviter l'excès d'eau, nuisible au cotonnier particulièrement.

Exemple, à Kouara, au Niger (Région de Birni N'Koni) :

- Profondeur en cm	0 - 15	20 - 60
- Argile %	30	35
- Limon %	13	14
- Sable fin %	53	47
- Sable grossier %	4	2
- Matière organique %	1.4	
- pF 3, % du volume	21.4	21.2
- pF 4.2, % du volume	12.4	12.7
- Porosité, % du volume	56	57
- Porosité utile	44	44
- Capacité pour l'air %	35	36
- Perméabilité, cm/h	1.6	1.3
- Stabilité structurale	50	53

1.1.2. Sols Bruns steppiques sableux. Ces sols formés sur matériau sédimentaire, sous végétation de pseudo-steppe à strate arbustive ou arborée très clairsemée, contiennent en moyenne 90% de sable et des taux de limon assez constants, quelle que soit leur position topographique. Ils ont généralement une bonne structure dans leur horizon supérieur, moyenne à mauvaise dans les horizons inférieurs. La compacité est faible. Les taux de matière organique sont souvent inférieurs à 0.5%.

Exemple, au Tchad :

- Profondeur en cm	0 - 20	40 - 60	110 - 130
- Argile %	1	4	6
- Limon %	2	2	1
- Sable fin %	34	36	34
- Sable grossier %	63	58	58
- Mat. organique %	0.1		

1.2. Les sols Brun-rouge subarides. Ces sols se rencontrent dans la même zone climatique que les sols Bruns (200 à 500 mm), ils font partie du même groupe, mais les horizons humifères sont moins épais, à matière organique plus rapidement minéralisée et, en profondeur, la diminution de matière organique laisse apparaître une coloration due à l'individualisation des oxydes de fer. L'épaisseur du profil est généralement plus grande que dans les sols Bruns (parfois 2 mètres). On observe deux horizons distincts :

- un horizon A d'au moins 50 cm, de couleur gris-brun, de texture généralement sableuse à limoneuse, avec une structure le plus souvent mal développée et instable.

- un horizon nettement distinct pouvant atteindre plus de 100 cm, de couleur ocre-rouge. Sa structure est à tendance polyédrique émoussé (nuciforme) et il peut être légèrement durci.

Les colloïdes minéraux contiennent une certaine proportion de kaolinite à côté des minéraux de type 2 : 1. La matière organique est souvent plus faible que dans les sols Bruns sableux. Les autres caractéristiques sont les mêmes que pour ces sols. Le profil se développe sous une végétation de pseudo-steppe sensiblement analogue.

Exemple, au Tchad :

- Profondeur en cm :	0 - 20	40 - 60	100 - 120	200 - 220
- Argile %	3	7	8	3
- Limon %	1	2	1	1
- Sable fin %	42	39	38	42
- Sable grossier %	53	51	52	54
- Mat. organique %	0.2			

2. Localisation et Utilisation.

2.1. Les sols Bruns argileux s'observent principalement au Niger ainsi qu'au Mali dans le Delta central Nigérien où ils portent le nom de Dian. Mais ceux du Niger, en particulier ceux de l'Ader Deutchi, sont incomparablement plus riches en phosphore, ce qui apporte un surcroît de fertilité par ailleurs déjà non négligeable.

La teneur en matière organique est voisine de 1%, rarement supérieure, avec un rapport C/N voisin de 10. La teneur en azote reste médiocre. Les réserves en bases échangeables sont excellentes. Le rapport Ca/Mg est parfois assez élevé. Les teneurs en K sont moyennes à bonnes. Sauf quelques cas particuliers, le pH est voisin de la neutralité. Avec des teneurs en phosphate total élevées, la fertilité générale de ces sols est bonne. La fumure peut se réduire pendant un certain nombre d'années aux seuls engrais azotés.

Sur de tels sols, les rendements du cotonnier atteignent 1000 à 1500 K/ha sans engrais. Sous une pluviométrie inférieure à 500 mm, ces sols doivent être irrigués.

2.2. Les sols sableux Bruns et Brun-Rouge se localisent dans le nord de l'aire considérée. Ils occupent une bande de 200 à 400 km de largeur, tant en Afrique de l'Ouest (Sénégal, Mali, Niger) qu'au Tchad.

Les taux de matière organique sont faibles, souvent inférieurs à 0.5%, avec des rapports C/N compris entre 8 et 10, parfois 12. Les taux d'azote sont également peu élevés (0.2 à 0.5 pour mille). Les teneurs en bases échangeables sont aussi faibles. Leur somme dépasse rarement 2 à 3 meq %. Les taux de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total sont très bas, de l'ordre de 0.1 à 0.3 pour mille.

Ces sols très sableux sont d'une fertilité médiocre. Une érosion éolienne intense s'y développe fréquemment lorsqu'ils sont soumis à la culture. Ils sont principalement cultivés en petit mil et arachide avec des rendements identiques à ceux des sols "Diors": voir Les Sols à Sesquioxydes 1.1.1.(i).

### Les Sols à Sesquioxydes

1. Classification et Description. Cette classe de sols à matière organique rapidement décomposée comprend les Sols Ferrugineux Tropicaux et les Sols faiblement Ferralitique.

1.1. Les Sols Ferrugineux Tropicaux. Ces sols correspondent au climat des régions soudanaises de 500 à 1200 mm de pluie environ. Le régime des précipitations du milieu tropical provoque des variations brutales du profil hydrique en cours d'année. Il y a excès d'humidité en saison des pluies allant jusqu'à provoquer des phénomènes de réduction en certaines périodes et surtout dans le cas des surfaces pratiquement planes des grands plateaux et des longues pénélaines.

En saison sèche, il y a déficit d'eau avec prédominance des phénomènes d'oxydation. Ces variations brutales de l'humidité favorisent le lessivage de l'argile et les variations du potentiel d'oxyde-réduction provoquent la redistribution des sesquioxydes.

Le principal critère des sols ferrugineux tropicaux est la tendance prononcée à l'individualisation du fer et du manganèse. Ce phénomène est lié à l'évolution et à la décomposition rapide de la matière organique et à l'accumulation de l'argile dans un horizon B favorisant les phénomènes d'hydromorphie temporaire.

Les sols ferrugineux tropicaux se différencient par le degré de lessivage des colloïdes minéraux. On distingue : les sols ferrugineux tropicaux non lessivés, où l'argile ne migre pratiquement pas et les sols ferrugineux tropicaux lessivés qui possèdent un horizon d'accumulation argileuse en profondeur.

1.1.1. Sols Ferrugineux Tropicaux non lessivés. Ils s'étendent approximativement jusqu'à l'isohyète 800-900 mm et ont un profil assez profond, de 2 mètres en général, du type A-B-C. Les horizons A (40 cm environ) sont sableux, faiblement structurés. L'horizon B, plus épais, est sableux à sable-argileux, fréquemment durci à l'état sec. On passe, vers 1.50 à 2 mètres, en C, au matériau originel qui est en général du sable. La teneur en matière organique totale est très faible : 0.35% en surface, à 0.20% dans l'horizon B.

On peut distinguer deux sous-groupes : les sols Beiges ou "Diors" et les sols Ocres.

(1) Sols Beiges ou "Diors". "Dior" est le nom vernaculaire donné au Sénégal au plus typique des sols ferrugineux tropicaux non lessivés. Le profil est de 1.50 mètre en moyenne, avec les caractéristiques suivantes :

- un horizon de surface de moins de 20 cm, grisâtre, légèrement humifère, de texture sableuse.

- un horizon plus épais, légèrement rougi par une accumulation diffuse de fer, de texture sableuse, très peu argileuse, de structure faiblement développée.

- un passage progressif aux matériaux originels, sables quartzeux d'origine complexe.

L'horizon de surface a moins de 5% d'argile et de limon, tandis qu'en profondeur les teneurs sont toujours inférieures à 10%.

Les caractéristiques hydriques sont très importantes. La capacité de rétention du sol pour l'eau est de 6% en surface et de 10% en profondeur, correspondant à un pF de

2 à 2.5. Le point de flétrissement est très bas, de l'ordre de 1.5% en surface et de 4% en profondeur. Les quantités d'eau utile sont, de ce fait, non négligeables et il n'y a pratiquement pas d'eau retenue à l'état non utilisable comme dans le cas des sols argileux, ce qui est très important en pays sec.

La perméabilité est élevée dans les sols secs :  $3.10^{-4}$  m/sec (méthode de Porchet). Elle diminue très fortement dans les sols humides  $1.10^{-4}$  m/sec. Le sol absorbe bien les premières pluies, puis l'eau ne s'écoule que lentement, ce qui peut amener de l'érosion ou des engorgements temporaires après les fortes précipitations. Il y a dessiccation rapide des horizons de surface mais les horizons de profondeur peuvent rester longtemps légèrement humides.

Les sols Diors sont très sensibles à l'érosion éolienne. La végétation naturelle est constituée par : Quiera senegalensis, Combretum micranthum, Acacia tortilis (Rad-diana).

Exemple : (Niger)

- Profondeur en cm.	0 - 15	40 - 50
- Argile %	4	10
- Limon %	2	2
- Sable fin %	63	53
- Sable grossier %	32	37
- Mat. organique %	0.24	
- pF 3, % du volume (la capacité au champ qui correspond à pF 2.2 est plus élevée : 8 à 10%)	3.2	5.4
- pF 4.2, % du volume	2.0	4.0
- Porosité %	37	36
- Porosité utile %	35	32
- Capacité pour l'air	34	31
- Perméabilité (sol saturé), cm/h	1.2	1.0

(ii). Sols Ocres. Les sols Ocres constituent un sous-groupe moins homogène que celui des sols Beiges sableux. Ils se caractérisent essentiellement par leur couleur ocre-rouge plus ou moins foncée dès la surface. La couleur est d'autant plus accentuée que la teneur en argile est plus élevée. La texture, encore assez pulvérulente en surface, est sablo-argileuse avec un accroissement rapide de teneur en argile et de compacité en profondeur. Cette teneur en argile va de 6-7% au minimum à 25-30% au maximum en surface. Elle est en moyenne plus élevée en profondeur mais dépasse rarement 30%. La teneur en limon est faible, celle en sable fin élevée. Suivant les cas, il peut ou non y avoir des gravillons ferrugineux en profondeur; après érosion les gravillons ferrugineux peuvent être amenés en surface.

La porosité, supérieure à celle des sols Beiges sableux, dépend de la teneur en argile, de même que l'humidité équivalente et le point de flétrissement. La teneur en eau utilisable, à pF 3, est deux à trois fois plus élevée. La capacité au champ (pF 2.2 à 2.5) est aussi plus forte. La perméabilité du sol saturé est trop faible, de même ordre que dans les sols Beiges. La structure est médiocre.

Exemple : (Niger)

- Profondeur en cm	0 - 20	40 - 50
- Argile %	20	27
- Limon %	7	8
- Sable fin %	51	48
- Sable grossier %	21	16
- Mat. organique %	0.7	
- pF 3, % du volume	16	20
- pF 4.2, % du volume	11	14
- Porosité, % du volume	40	48
- Perméabilité, cm/h	0.8	1.5

1.1.2. Sols Ferrugineux tropicaux lessivés. On les rencontre sous des pluviométries beaucoup plus élevées que dans le cas des sols non lessivés : 800 à 1200 mm, parfois 1400 mm et plus.

Le plus souvent ces sols se trouvent sur roches acides, sables plus ou moins argileux, grès, granites gneiss, schistes quartzeux. Exceptionnellement, dans la partie la plus méridionale mais qui se situe au-delà de la limite sud de l'aire considérée, on peut en observer sur roches basiques.

Ils montrent une illuviation argileuse marquée en surface, avec accumulation en profondeur. L'accumulation de l'argile provoque la formation d'un horizon plus ou moins colmaté qui influe profondément sur l'immobilisation du fer et du manganèse.

L'horizon A se différencie en : A<sub>1</sub>, humifère, d'une vingtaine de cm, de structure moyennement développée à tendance grumelo-particulaire; et en A<sub>2</sub>, encore un peu humifère, lessivé en argile, de structure faiblement développée. Dans l'horizon B on peut distinguer de même : un horizon B<sub>1</sub> vers 1 mètre, d'accumulation argileuse; un horizon B<sub>2</sub>, d'accumulation ferrugineuse avec apparition de concrétions; un horizon B<sub>3</sub>, à concrétions très nombreuses, où se produit souvent un net engorgement dû à une nappe temporaire. On passe ensuite brusquement, à une profondeur rarement supérieure à 1.50 m, à l'horizon C qui est un matériau plus ou moins arénacé.

La teneur en argile, qui peut être inférieure à 10% dans l'horizon de surface, atteint jusqu'à 25-35% dans l'horizon B et parfois plus. Le taux de matière organique est nettement plus élevé dans l'horizon A<sub>1</sub> que pour les sols ferrugineux non lessivés : il peut varier de 1.5 à 2, mais ce taux diminue nettement dans l'horizon A<sub>2</sub>. L'horizon humifère est donc nettement tranché. Le rapport C/N peut être assez élevé en surface : 14. Ceci est dû à un apport très important de matières végétales ligneuses (graminées) et à certaines conditions d'hydromorphie en saison des pluies.

Ces sols ferrugineux tropicaux lessivés sont divisés en trois sous-groupes principaux suivant le stade d'évolution :

- sols sans concrétions
- sols avec concrétions
- sols à cuirasse

Ces derniers représentent l'évolution ultime du groupe. Ils se situent sur les formes les plus anciennes du modelé, en position de cuvette mal drainée, en bordure des axes de collature et des plateaux enrichis en sesquioxydes par lessivage oblique.

On peut donner différents exemples de ces sols ferrugineux tropicaux lessivés, en fonction des différents matériaux originels.

(i) Sur Continental terminal.

Exemple : Sol sans concrétions, à Kaolack, Sénégal (sols beiges du Sine)

Modelé très plat, végétation dégradée (*Calotropis prooera*) par la culture arachide-mil.

- Profondeur en cm	0 - 17	17 - 85	85 - 120	120 - 150
- Argile %	3	8	12	12
- Limon %	4	4	3	3
- Sable fin %	62	56	49	57
- Sable grossier %	29	32	34	27
- Mat. organique %	0.5	0.3	0.1	

Ces résultats analytiques indiquent une texture extrêmement sableuse en surface. Le lessivage de l'argile est prononcé. Les sables fins sont plus abondants que les sables grossiers. La matière organique est faible. La structure, nuciforme fine, moyennement développée en surface, devient peu développée en profondeur.

Exemple : Sol à cuirasse, à Darou, Station de l'I.R.H.O.

Sous savane arborée à grandes *Andropogonées*.

- Profondeur en cm	0 - 20	60 - 80	100 - 120	160
- Argile %	10	31	25	16
- Limon %	8	3	2	7
- Sable fin %	62	50	54	57
- Sable grossier %	21	15	18	21
- Mat. organique %	1.3	0.4	0.2	

Le cuirassement est peu marqué dans cet exemple, mais il peut être beaucoup plus intense. La structure, nuciforme bien développée, à gros agrégats, entre 0 et 50 cm, devient prismatique grossière entre 50 et 90 cm. Puis apparaissent de nombreuses concrétions partiellement cimentées en cuirasse entre 90 et 160 et au-delà.

(ii) Sur grès Cambrien.

Exemple : Sol à M'Pesoba (Sud Mali)

Ce profil se trouve à mi-chemin entre la falaise recouverte de sols cuirassés et la zone des bas-fonds où les sols subissent une hydromorphie permanente de profondeur.

- Profondeur cm	10 - 20	30	50	80 - 90	130	150
- Refus 2 mm %	-	-	21	4	0.5	0.9
- Argile %	9	13	34	34	39	43
- Limon %	6	4	4	4	8	5
- Sable fin %	50	41	26	28	26	23
- Sable grossier %	35	41	35	31	27	26
- Mat. organique %	0.3					
- pF 3, % du volume	9.1	10.4	17.9	17.3	20.0	22.4
- pF 4.2	3.6	5.3	12.1	12.0	14.0	16.3
- Porosité maximum %	44	38	51	57	54	51
- Capacité pour l'air %	35	27	34	39	34	28
- Perméabilité cm/h	1.3	0.7	2.3	3.1	2.8	3.3
- Stab. structurale	47	39	64	60	39	59

(iii) Sur sédiments meubles.

Exemple : Sol sans gravillons, à Koumra (Tchad)

Sous jâchère de 4 à 6 ans, avec quelques grands arbres.

- Profondeur	0 - 15	40 - 60	110 - 130	170 - 185
- Argile %	3	12	27	29
- Limon %	4	3	2	1
- Sable fin %	36	30	19	21
- Sable grossier %	56	54	47	44
- Mat. organique %	2.1	0.7		

Exemple : Sol à gravillons, à Moundou (Tchad)

Modelé presque plan, jâchère récente à Hymenocardia et Detarium

- Profondeur	0 - 35	70	190
- Terre fine %	99	49	38
- Argile %	6	26	26
- Limon %	7	8	7
- Sable fin %	53	25	25
- Sable grossier %	32	42	42
- Mat. organique %	0.2		

(iv) Sur roches cristallines en place. Ces sols qui se situent à la lisière sud de l'aire concernée présentent les mêmes caractéristiques générales que précédemment, le modelé étant légèrement plus accusé. Le profil caractéristique étant le même, avec quelques variantes suivant les roche-mères, ils ne seront pas décrits.

2. Localisation et Utilisation.

2.1. Les sols Ferrugineux tropicaux non lessivés ont une teneur en matière organique très faible : 0,35% en surface à 0.20% dans l'horizon B. Le rapport C/N est égal ou inférieur à 10. Le taux d'humification est relativement élevé, de 50% en surface. La répartition de l'ensemble des fractions humiques est différente de celle des sols subarides.

(i) Sols Beiges ou "Diors". Le sol "Dior" est le plus typique. Il représente au Sénégal la plus grande partie des terres cultivées en arachide. Il se rencontre également dans le nord du Mali ("Seno" en Bambara) et dans une grande partie du Niger et du Tchad. Les anciennes zones dunaires fixées (ergs fossiles) portent fréquemment des sols "Diors" lorsqu'elles se trouvent sous le climat des sols ferrugineux.

Les éléments chimiques sont en très faible quantité. Ces sols sont adaptés à la culture de l'arachide en raison de leur texture sableuse qui favorise le développement et l'arrachage des gousses. La présence de colloïdes humiques explique leur relative fertilité mais il faut tenir compte du fait que l'arachide vit en partie de l'azote atmosphérique fixé par les nodosités. Le mil qui vient en assolement profite dans une certaine mesure du précédent arachide.

Une sole de régénération est constituée par des jâchères arbustives claires. Dans la moyenne des cas, les rendements d'arachide sont de 500 à 600 K/ha, mais en culture rationnelle ils atteignent 1000 K. Avec toutes les améliorations agronomiques (engrais minéraux, engrais verts ...) ils peuvent dépasser 1500 K. Un des facteurs limitatifs du rendement est la fourniture d'eau à la plante, qui dépend de la pluviométrie très variable mais aussi des caractéristiques physiques des sols.

(ii) Sols Ogres. Les teneurs en matière organique et azote sont faibles, mais deux à trois fois plus élevées que dans les sols Beiges. Les taux de bases échangeables et de potassium sont moyens à assez bons. Le pH est plus acide. Le phosphore total est assez élevé, mais sous une forme peu assimilable (phosphate de fer). La fertilité générale est assez médiocre.

Ces sols sont bien adaptés à la culture du sorgho. Celle du cotonnier y est possible sous irrigation avec des amendements organiques et des engrais azotés et phosphatés, mais cependant peu recommandée. Dans les Vallées alluviales, la culture du riz est possible avec engrais azotés.

2.2. Les sols Ferrugineux tropicaux lessivés. Ces sols s'étendent dans toute la partie sud du Sénégal et en bordure de la Gambie et de la Casamance où ils voisinent avec les sols rouges faiblement ferrallitiques. On les rencontre également dans la partie sud du Mali, le nord de la Côte d'Ivoire, le Nord Cameroun, la Haute Volta et une partie importante du Tchad. C'est un des groupes de sols les plus importants et couvrant de très vastes surfaces en Afrique au sud du Sahara.

Leurs propriétés varient avec le type de roche mère. Le taux d'argile agit favorablement sur la fertilité, mais jusqu'à un certain optimum, au-delà duquel le point de flétrissement devient trop élevé. Le taux de matière organique est toujours assez bas (sauf dans les sols sur roches basiques), mais en saison des pluies l'activité biologique peut être intense et sous la dépendance étroite du pH. Dans les sols dont le taux d'azote varie de 0.03% à 0.045% la fertilité est mauvaise lorsque le pH descend au-dessous de 6, elle est médiocre à pH 6, moyenne à pH 6.5 et bonne à pH 7. Le taux de bases dépend de la teneur en colloïdes. Néanmoins la fertilité est généralement médiocre quand la somme des bases est inférieure à 3 meq %. Le rapport  $N/P_2O_5$  ne doit pas être inférieur à 2, c'est à dire que  $P_2O_5$  ne doit pas descendre au-dessous de 0.15 ou 0.22 pour mille suivant la teneur en N.

Pendant la période de culture, la minéralisation biologique et l'érosion détruisent la réserve en humus évolué, ne laissant subsister que la matière organique brute avec accroissement du rapport C/N. Le petit stock de  $P_2O_5$  assimilable disparaît, on note un abaissement sensible du pH (jusqu'à 5.5 en surface) et la fertilité devient presque nulle. Après l'abandon du champ, le sol reste soumis à l'érosion, la jâchère arbustive ne se reconstitue que lentement et est parcourue chaque année par les feux

de brousse. Le système d'exploitation traditionnel est la culture itinérante avec, quand possible, 3 à 4 années de culture pour 12 à 15 de jâchère, suivant l'état de dégradation du sol. L'association agriculture-élevage serait un moyen de rendre la culture permanente. La pluviosité, de 900 à 1200 mm, permet la culture du sorgho, du cotonnier, de l'arachide, du maïs, de l'igname, dans certaines conditions de longueur de cycle cependant.

2.3. Les Sols faiblement Ferralitiques. Ils se forment ou ils se sont formés à la limite des zones tropicales sèches et humides, sous pluviosité moyenne de 1200 mm, mais avec une saison sèche supérieure à 4 mois. Ils sont caractérisés par :

- la grande épaisseur du profil, de 3 à 7 m., plus grande dans le cas de sols formés sur sédiments du Continental Terminal ("terre de barre"), plus faible dans les sols formés sur roches en place, schistes, granites, roches basiques (type "ferrisols").

- des profils de type  $A_1-A_2-B_1-B_2$  ou  $A_1-A_2-(B_1)-B_2$ . A l'horizon humifère A, de faible épaisseur, succède un horizon de transition  $A_2-B_1$ , l'ensemble représentant 30 à 80 cm. Puis se développe un horizon  $B_2$  de plusieurs mètres, rouge, et homogène morphologiquement et analytiquement.

- la couleur rouge des horizons non humifères.

- la faible teneur en limon des horizons B, sauf dans les sols formés sur roches en place où elle est souvent importante.

- des pH compris entre 6 et 7 en surface et qui diminuent nettement en profondeur.

- un rapport  $SiO_2/Al_2O_3$  voisin de 2 (terres de barre) mais plus élevé (2.3 à 2.5) pour les ferrisols.

- une fraction argileuse constituée par de la kaolinite en mélange avec des sesquioxides de fer et parfois d'alumine, auxquels s'ajoutent un peu d'illite et d'interstratifiés dans le cas des ferrisols. Les hydroxides sont bien individualisés mais sans redistribution locale comme dans les sols ferrugineux tropicaux. Une grande partie du fer libre est liée à l'argile à l'argile, liaison qui explique la présence fréquente de pseudo-sables.

- une teneur en matière organique très variable en surface : 1 à 4%.

Dans le type "terre de barre" qui s'observe au Sénégal (en Casamance), dans l'Ouest de la Haute Volta, le Nord de la Nigeria et le Sud du Tchad, les textures sont très variables, de sablo-argileux à argileuse, avec une faiblesse générale en limon, mais jusqu'à 30 à 40% d'argile dans l'horizon B. La structure des horizons non humifères est faiblement à moyennement développée. Les perméabilités sont bonnes et stables. En Haute Volta, ces sols qui présentent des possibilités agricoles intéressantes malgré des déficiences en potassium et en acide phosphorique, sont cultivés principalement en manioc et maïs. Au Tchad ils sont utilisés pour les cultures vivrières (sorgho, petit mil, manioc) et cotonnière.

Le type "ferrisol" formé sur roches en place, de profil moins profond, et plus riche en limon, s'observe surtout en Côte d'Ivoire, Togo et Dahomey, hors de l'aire d'investigation.

Les Affleurements de Cuirasses, les Vertisols,  
les Sols Hydromorphes et les Sols Halomorphes.

1. Les affleurements de cuirasses.

Les affleurements de cuirasse appelés généralement "latérite" sont très nombreux en Afrique au sud du Sahara. Ils s'y présentent sous plusieurs faciès que l'on peut schématiser ainsi :

a) Affleurements horizontaux sur de grandes surfaces, véritables plateaux dans l'Est du Sénégal. Sur cette cuirasse, qui peut être épaisse de plusieurs mètres, on trouve des sols squelettiques, c'est à dire de très faible épaisseur, parfois assez riches en matière organique non décomposée et soumis à une érosion en nappe intense. La végétation y est très pauvre.

b) Buttes témoins cuirassées, généralement de 10 à 30 mètres de hauteur, de superficie restreinte, recouvertes d'une cuirasse de cohésion forte. Elles sont nombreuses au sud du Mali et de la Haute Volta, dans le Nord Dahomey, le Nord Nigeria, sur tout le Continental terminal du Niger et du Tchad.

c) Démantèlements, rebords d'un affleurement horizontal ou d'une butte cuirassée en voie de désagrégation par l'érosion. Cette destruction explique les épandages de gravillons à des profondeurs variées dans des sols colluvionnaires.

d) Affleurements sur pente, constituant des escaliers à divers niveaux et provenant généralement de l'érosion de sols ferrugineux tropicaux concrétionnés. Le lessivage oblique enrichit les bas de pentes en hydroxydes de fer qui se concrétionnent puis se durcissent par dessèchement.

Ces cuirasses sont toutes formées de niveaux indurés formés d'accumulation de différents oxydes de fer, d'alumine et parfois de manganèse. Elles se sont individualisées à l'intérieur des sols, intimement liées au dynamisme des solutions. On ne peut les relier à aucun type de sol. Cependant les sols ferrugineux tropicaux et les sols hydromorphes sont ceux qui se cuirassent le plus facilement.

Les différences dans la composition des cuirasses peuvent amener des différences dans leurs possibilités d'utilisation : une cuirasse peu évoluée et encore riche en silice peut être plus aisément démantelée par une végétation arbustive et donner naissance à un nouveau sol comme on le constate en de nombreux points. Lorsque la cuirasse est très ancienne et très dure, son utilisation est pratiquement impossible.

2. Les vertisols.

La classe des vertisols est caractérisée par des propriétés à la fois calcoimorphes et hydromorphes. Ils se forment surtout dans les régions subtropicales, et tropicales sèches, des sols ferralitiques aux sols méditerranéens, en passant par tous les intermédiaires.

Leur profondeur est faible, de 0.50 à 1.50 cm. La caractéristique la plus générale est la couleur foncée du profil sur presque toute la profondeur. La texture est toujours argileuse, les minéraux argileux étant de type montmorillonitique dominant. La structure est grumeleuse à polyédrique en surface, donnant un horizon superficiel assez meuble, de 10 à 30 cm. Dans d'autres cas la structure est large dès la surface et l'horizon superficiel compact devient même prismatique avec fentes de dessiccation. Les mouvements internes du sol dus aux alternances de gonflement et de retrait et à la circulation des eaux en début de saison des pluies provoquent le micro-relief "gilgai".

Dans les régions sèches on peut observer de nombreux nodules calcaires sur toute l'épaisseur du profil, et très abondamment en surface. Au fur et à mesure que la pluviosité augmente, les nodules sont plus rares et à la limite (1200 mm) ces nodules sont localisés au-dessus de l'horizon d'altération de la roche.

La teneur en matière organique est aussi très variable. Inférieure à 1% dans la zone des sols subarides, elle peut passer à 2-3% dans les zones plus humides. Elle n'est pas la cause principale de la couleur noire des profils. Elle est à dominance d'acides humiques gris très stables. Le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  est généralement supérieur à 3. La saturation du complexe absorbant est élevée, la capacité d'échange de bases varie de 30 à 60 meq, le pH est égal ou supérieur à 7.

Les vertisols se rencontrent dans toutes les régions où le matériau originel est riche en calcium et magnésium et permet le développement d'un sol dans des conditions de mauvais drainage interne ou externe. Les alluvions du Delta Central Nigérien, les marnes calcaires du Sénégal et de Mauritanie, les schistes birrimiens de Haute Volta et de Côte d'Ivoire, les diorites et gabbros du Dahomey et du Togo les sédiments fluviolacustres des grandes dépressions lacustres au Tchad portent des vertisols dont les propriétés générales sont celles décrites ci-dessus.

Exemple : Alluvions du Delta Central Nigérien au Mali.

Dans le Delta les vertisols portent le nom vernaculaire de "Moursi" et représentent environ 10% de la surface totale, occupant de petites dépressions. Leur végétation est claire et composée d'épineux. Ils ont un micro-relief "gilgai" caractéristique, sont de couleur noire sur plus d'un mètre et montrent de larges fentes de retrait. Leur structure est polyédrique en surface sur 10 cm et très compacte en profondeur, avec de nombreux nodules calcaires en surface.

Profondeur en cm :	0 - 25	25 - 50	50 - 75
- Argile %	48	50	54
- Limon %	14	12	14
- Sable fin %	23	21	17
- Sable grossier %	10	11	8
- Mat. organique %	1.0	0.6	0.6
- pF 3, % du volume	30	31	32
- Porosité %	58	62	65
- Perméabilité en cm/h	4.0	0.4	0.4

Ces sols sont assez représentatifs des vertisols des régions sèches. Bien que la teneur en phosphore soit faible, ce sont de bonnes terres à cotonnier, qui conviennent mal au riz. Il faut éviter l'excès d'eau pour la culture cotonnière. Les engrais azotés et phosphatés sont nécessaires.

Les vertisols sur alluvions du Tchad, sur marnes et calcaires du Sénégal, de Haute Volta et de Mauritanie sont traditionnellement cultivés en sorgho en fin de saison des pluies, leur nitrification et leur ammonisation étant excellentes. Ils ont l'inconvénient d'être difficiles à travailler, leur utilisation dépendant essentiellement de la structure fine ou non de l'horizon supérieur.

Les vertisols sur matériaux argileux provenant de schistes birrimiens, en Haute Volta surtout, présentent fréquemment des phénomènes de recouvrement superficiels par des apports récents sableux ou gravillonnaires. La structure fine en surface rend les travaux culturels relativement aisés, sauf en hivernage où les phénomènes de plasticité limitent les labours. Ce sont de bonnes terres de culture.

### 3. Les sols hydromorphes.

Ces sols sont caractérisés par un excès d'eau dû à un engorgement plus ou moins profond ou d'ensemble, consécutivement à une inondation temporaire, semi-permanente ou permanente.

On distinguera, dans la bande climatique qui nous intéresse :

- des sols humiques à gley
- des sols minéraux
- des sols calcaires

3. 1. Sols humiques à gley à pédoclimat chaud. Leur teneur en matière organique est supérieure à 8% et évoluée, de type Anmoor. Ils présentent un horizon de gley en profondeur. Ces sols s'observent dans les Niayes (Sénégal) ainsi que sur la bordure du Lac Tohad dans des polders créés par l'homme. Il s'agit dans les deux cas de dépressions interdunaires inondées par les pluies et la remontée de la nappe ou par les eaux du Lac. La végétation qui se développe est composée de hautes herbes : *Phragmites vulgaris* ....

Ces sols ont des textures variables : l'horizon superficiel est souvent limoneux, limono-argileux; l'horizon profond est argileux et contient de 50 à 70% d'argile et parfois des quantités non négligeables de limon (15 à 20%). Ils sont très riches en matière organique et azote. De pH neutre ou légèrement alcalin, très riches en bases, et généralement en  $P_2O_5$ , ces terres parmi les plus riches d'Afrique portent au Tohad 3 cultures irriguées par an (1 blé, 2 maïs).

3. 2. Sols minéraux. La teneur en matière organique est inférieure à 8%. On distingue :

a) des sols à pseudo-gley, caractérisés par un horizon subissant un engorgement périodique où alternent des tâches fortement colorées en fer ou au contraire appauvries en cet élément. Cet horizon subit des phénomènes d'oxydation et de réduction annuels, et remonte jusqu'à l'horizon humifère. On distingue ainsi des sols à pseudo-gley :

- à tâches et concrétions
- à cuirasse

b) des sols à gley, caractérisés par un horizon de faible profondeur, à engorgement prolongé, où les phénomènes de réduction l'emportent sur l'oxydation. Le fer est réduit à l'état ferreux, s'accumule ou est éliminé, ce qui procure la couleur gris-vertâtre ou bleutée.

Ces sols sont de textures les plus diverses : sableux, sablo-argileux, argilo-sableux, argileux, ... limono-argileux, argilo-limoneux et de structure le plus souvent grossière.

Ils sont fréquemment incultes, les autochtones ayant des difficultés soit à en assurer le drainage soit à en contrôler l'irrigation. Ils portent cependant, suivant leur texture et leur position topographique : riz principalement; mil de décrue, mil de saison pluvieuse; parfois cotonnier mais avec des rendements dérisoires.

3. 3. Sols calcaires. Ils sont caractérisés par l'apparition dans les profils de nodules d'encroûtement ou de croûte calcaire qui s'ajoutent par tâches ou en niveaux

bien tranchés aux horizons à pseudo-gley ou gley. Ces sols fréquents en Afrique du Nord sont plus rares dans la bande climatique considérée ici et localisés, semble-t-il, dans sa partie la plus aride. Il en a été ainsi observé au Tchad sur la bordure du Lac ou bien dans des sols où les phénomènes d'alcalinisation commencent à se produire mais sont non encore dominants. Assez fréquemment atteints par des caractères d'halomorphie, ces sols sont, suivant les endroits, ou incultes ou bien portents, lorsque la nappe peu profonde facilite l'irrigation, des cultures de blé, de maïs, de mil pénicillaire.

#### 4. Les sols halomorphes.

Les sols halomorphes sont dominés dans leur évolution par la présence de sels solubles ou d'ions qui en proviennent. Les uns vont donc posséder des teneurs élevées en sels solubles (chlorures, sulfates, carbonates de sodium, potassium, magnésium), les autres vont présenter une structure massive dans certains horizons due à la présence d'ions sodium ou potassium et parfois magnésium fixés sur le complexe absorbant du sol. Les premiers sont appelés sols salés lorsqu'ils présentent une conductivité au moins égale à 4 millimhos par cm à 25. Les seconds, les sols à alcalis sont ainsi nommés lorsque le rapport Na/capacité d'échange atteint 12%.

On peut distinguer : des sols halomorphes salins à structure dégradée ou non dégradée et des sols à alcalis lessivés ou non lessivés.

4. 1. Sols halomorphes salins à structure non dégradée. Développés sur des matériaux très variés, les textures sont diverses. Les taux de matière organique sont élevés, de 2 à 3%, avec des taux d'azote de 1 à 1.5 pour mille. La réaction est fortement alcaline quand les sels sont à dominance de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$ , neutre à très acide dans le cas de NaCl. Ces sols s'observent au Sénégal, dans le delta de ce fleuve. On les trouve également dans les dépressions intérieures (Niger et Tchad). Les teneurs trop élevées sont incompatibles avec la croissance des plantes les plus tolérantes. Le dessalement des terres à nappe phréatique proche de la surface est souvent difficile sinon impossible.

#### 4. 2. Sols halomorphes salins à structure dégradée.

(i) Sols à alcalis non lessivés. Ces sols qui s'observent au Sénégal, au Tchad et au Niger dans la bande climatique considérée sont peu utilisés par suite de leur très mauvaise structure et de leur imperméabilité. A un stade relativement peu évolué, les autochtones construisent des diguettes autour des champs permettant ainsi aux eaux de précipitation de s'y infiltrer. Ils sont alors plantés en sorgho repiqué de décrue.

(ii) Sols à alcalis lessivés. On distingue entre Solonetz et Solonetz solodisés. Ces sols ont été reconnus au Tchad dans la partie Est du territoire ainsi que sur les bourrelets de différents fleuves. Hormis leur faible intérêt pastoral, ils sont totalement inutilisés.



P A R T I I

AGROCLIMATIC ANALYSIS - ANALYSE AGROCLIMATIQUE

RAINFALL  
PLUVIOMETRIE

Annual Rainfall - PA

Annual rainfall is probably the climatic characteristic most commonly used by people concerned with agriculture, and this is particularly applicable to the Area of the survey. With the development of agroclimatology, the value of this criterion is nowadays sometimes challenged; it is pointed out that London receives, on the average, 570 mm of rain a year and is called humid, whilst Sokoto, in Northern Nigeria, receives 650 and is semiarid. The total amount of rain they receive in a year may not provide a good way of comparing the agricultural possibilities of different parts of the world, since the seasons during which this rain falls and its intensities, as well as the external factors which control the rate at which it is used by plants, vary greatly and determine its effectiveness. In our Area, however, the seasonal patterns of the rain and the external factors controlling its use, such as incoming solar energy, are so uniform that the annual mean amount provides a very useful way of comparing one place with another. It is not only a good agroclimatic measure but also a good index to most of the other factors which are of importance. We are therefore interested in annual rainfall, first by itself, its mean amounts and variability, and also as part of more complex parameters.

1. Annual mean rainfall distribution

There is no shortage of published maps of isohyets (lines of equal amounts of rain) representing the distribution of the mean annual quantities falling on our Area. We have maps produced by national services, regional organisations, and even continental studies, such as the recently published climatic atlas of Africa, sponsored by CCTA and edited by Professor Jackson of Witwaterstrand University, (1963).

1.1. A map summarising the information available from these various sources is shown at Fig. PA.1.1. It is seen that, very broadly, the isohyets run parallel with the equator, thus dividing the area into bands or zones receiving more rain the further south they are. There is everywhere a pluviometric gradient crossing these bands from the Sahara to the Intertropical Convergence Zone. Explanations for this overall pattern in terms of general circulation and synoptic developments have been given in the section on the meteorology of the survey area, MC.

1.2. There are, however, two main distortions to this broad picture which are thought to be of agroclimatic significance and are illustrated at PA.1.2. First, in the extreme west of the Area, on the coast of Senegal, the pluviometric gradient is relatively steep, being on the average more than 300 mm/100 km from Gambia to Mauritania. It then relaxes gradually eastwards, so that along the Greenwich meridian, 900 nautical miles further east, it has decreased by about one half. Where rainfall zones are more tightly packed they offer opportunities for a greater diversity of cultures within a given area. In Senegal, which is thus favoured, additional climatic variation is caused by maritime influence in the coastal regions.

1.3. Secondly, there is a general tendency for the isohyets to dip southwards as they extend eastwards. On the dry north side of the Area this decrease of rainfall with longitude is most pronounced in Niger, whilst in the south it is more gradual. In Niger the 200 mm isohyet dips from about  $16\frac{1}{2}^{\circ}$  N in the west to  $14\frac{1}{2}^{\circ}$  N by the north of lake

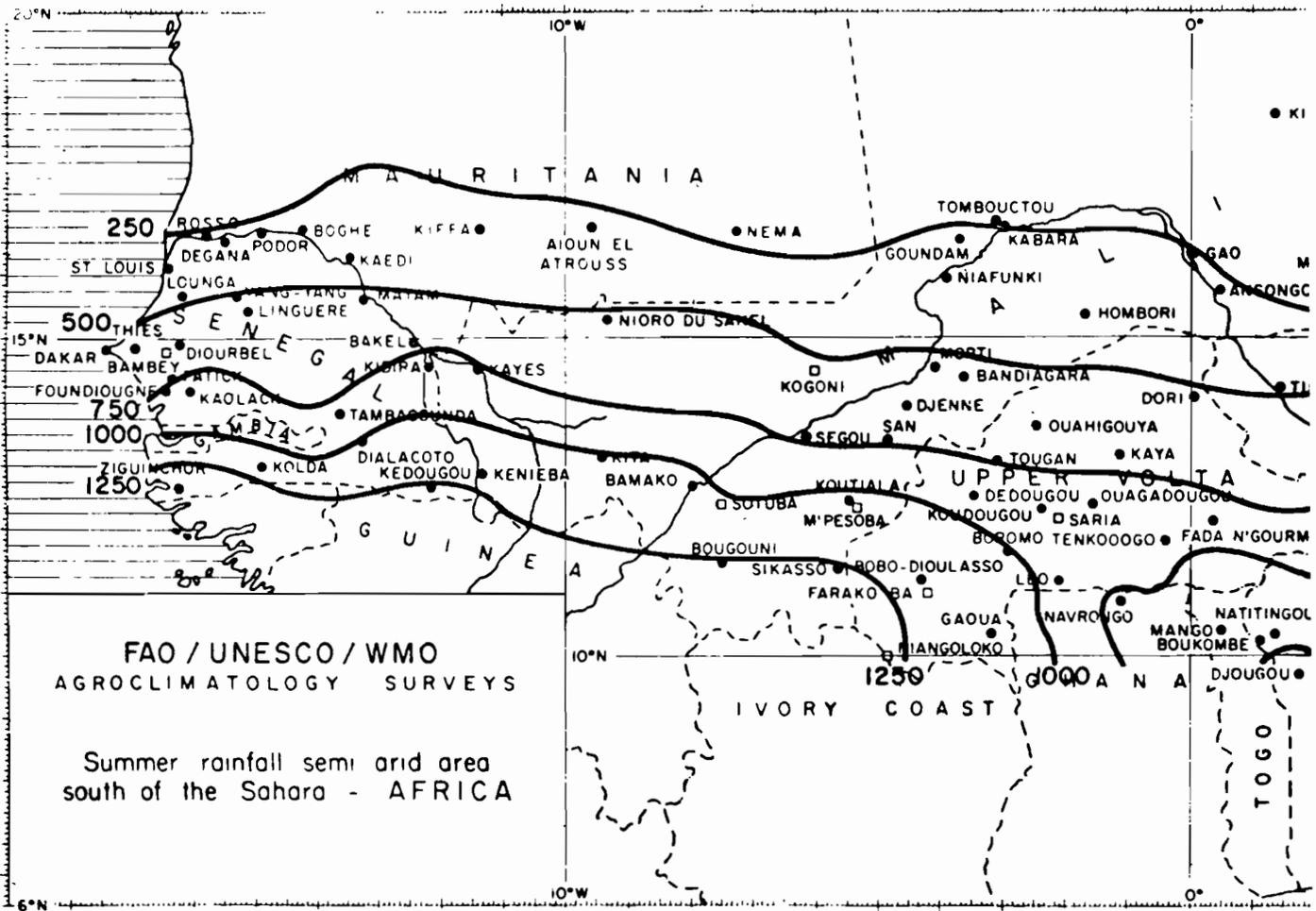
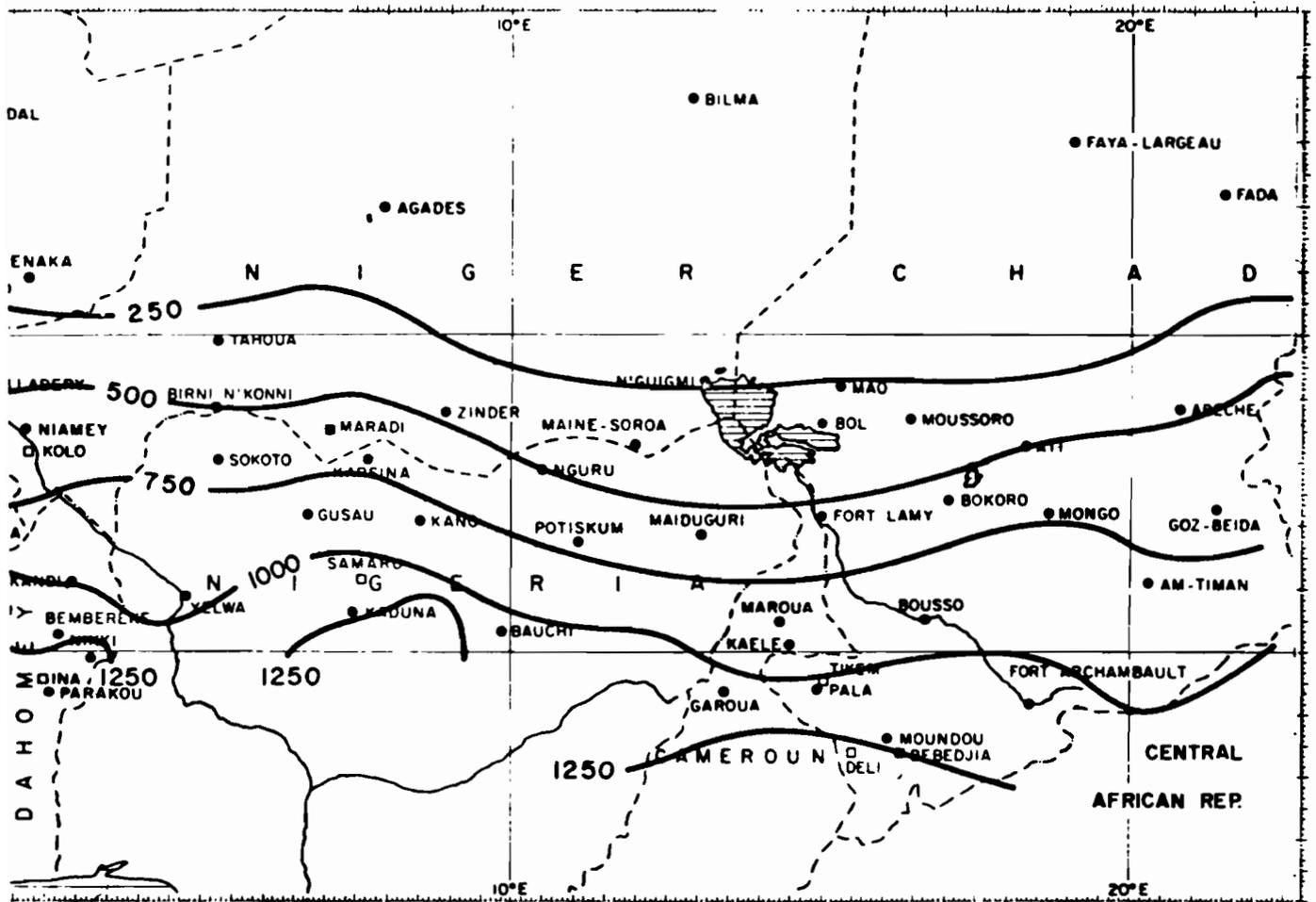


Fig PA.1.1. Mean annual rainfall in mm. After Météorologie Nationale (1953) and national sources. Showing north-to-south general gradient from the Sahara desert to areas affected by the intertropical convergence zone for increasingly

Chad, which is the driest region for its latitude in our Area, in spite of the presence of a large surface of evaporating water. Further east the tilting of the isohyet is reversed and it moves northeastwards as far as the Sudan border. The 1200 mm isohyet, on the other hand, on the south side of the Area, dips from 13° N on the Atlantic coast to 08° N in Chad.

This means that the same rainfall and approximately the same length of humid season are associated with different variations of length of day during the year, since those depend on latitude only. These differences, though small, may have important effects on plant growth and development considered together with the length of the



longer intervals of time. Also general dipping southwards of the isohyets with increasing easterly distance as far as Lake Chad, and close spacing of isohyets on the coast of Senegal.

various climatic and phenological periods. Photoperiodism will be discussed further in subsequent sections. In west Senegal, for instance, the 600 mm isohyet corresponds to a yearly variation in the length of day of 100 min whilst by lake Chad, two degrees further south, it is 70 min only. The general pattern of daylight variation within our Area is given at Table TL.2.1. in the section on heat and light.

1.4. The isohyets in the area of the survey also show here and there departures from the general zonal pattern of a size such that they can be significant for agriculture, and yet can only be the object of more detailed local studies.

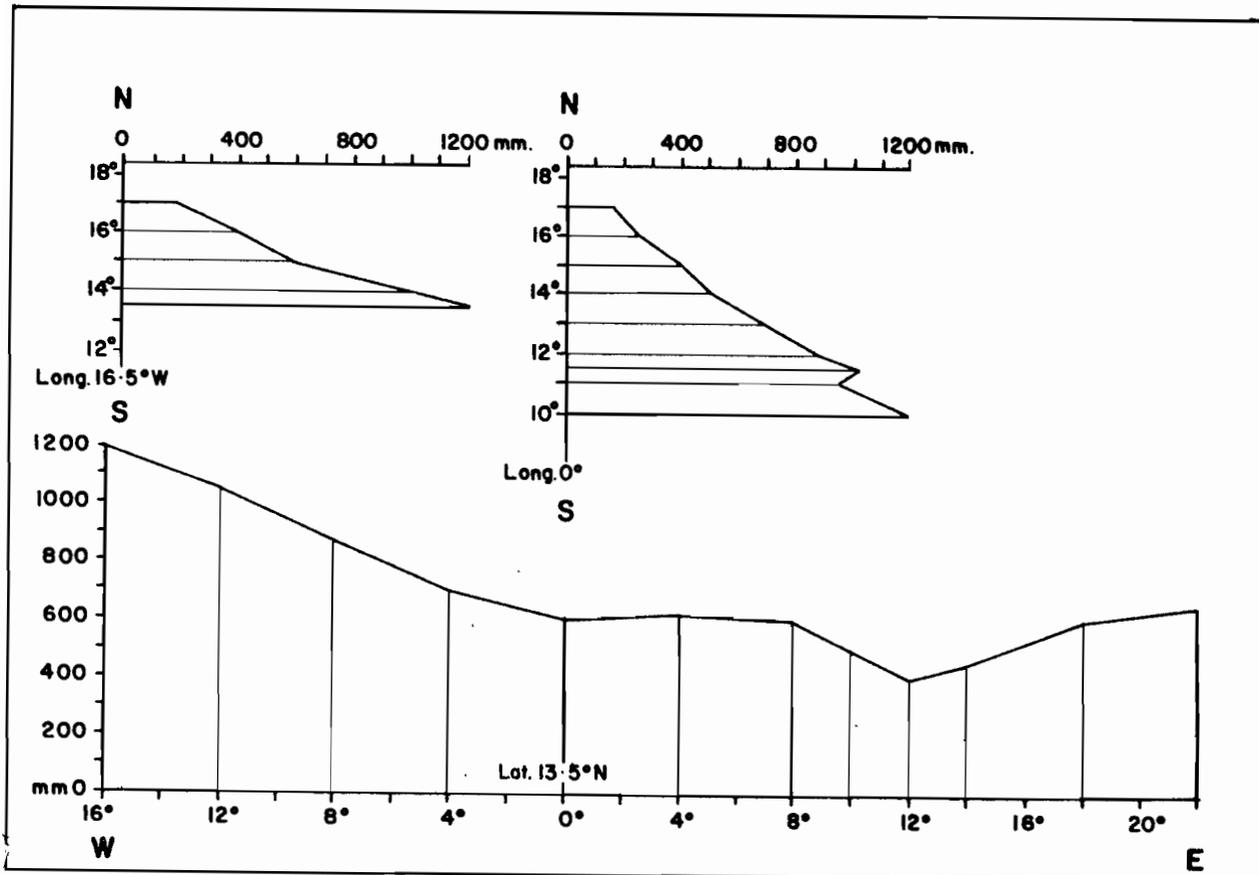


Figure PA.1.2. Rainfall gradients: Above, from north to south, near the coast of Senegal and through Mali and Upper Volta some 1600 km inland. Below, from West to East through a latitude which is in the middle of the Area in the west but in the north of it in the east, especially in the Lake Chad area.

## 2. Annual Rainfall Variability.

### 2.1. General considerations.

2.1.1. No consideration of annual rainfall can be complete without taking into account the variation from year to year. This subject is sufficiently important to warrant recalling the notions involved and explaining in some detail the methods used in the analysis.

2.1.2. Variability - an expression of the extent of this variation - defines, for a given mean, the relative number of years where rainfall was more or less than specified amounts.

2.1.3. Past variability is used to assess future probability. This probability can be used, for instance, in choosing a region for an agricultural operation, for which the minimum annual rainfall requirements and maximum acceptable frequency of failure, say, one year in four, are known. The greater the variability, the higher will the mean annual rainfall need to be to satisfy these conditions.

2.1.4. In traditional agriculture, acceptable drought risks become established by trial and error. It is, however, especially important to try to assess these risks, other than by long and costly experience, in all cases where changes in the exploitation of an area, such as introduction of new crops and important capital expenditure, are contemplated.

## 2.2. Assessment of variability and probability.

2.2.1. It is recalled that variability is related with the size of the differences from the mean, compounded and expressed in one way or the other. This expression divided by the mean itself will give comparable values for different stations.

2.2.2. It is also recalled that in estimating variability for defining probability two methods can be used : either past frequencies are directly taken to delimit future expectations during a period not exceeding that of the record, or an attempt is made at fitting available data, looked upon as a sample, to a theoretical distribution of an infinite number of occasions of which the frequencies can thus be determined in detail.

2.2.3. Both these approaches, the empirical and the theoretical, have been found useful in this survey. For places from which sufficiently long series of annual rainfall were available the past distribution was established and then the fit of a theoretical function was tested. This was all the more appropriate since the data indicated sufficient uniformity in our Area and its regions to permit generalisation of rainfall probabilities to adjacent places.

## 2.3 Empirical Method. Quintiles.

2.3.1. Some frequency classification of annual rainfall in the Area was already available. The Climatological Normals (Clino) published by the World Meteorological Organisation for the period 1931-1960 gives, for all the stations which broadcast CLIMAT reports, six representative annual values. The thirty years are arrayed in increasing order of magnitude and separated into five groups. The four values separating these groups are known as quintiles and in this case are represented by the upper value of the first four groups. The quintiles represent those quantities which were exceeded: 1, 2, 3 and 4 years out of 5 during the thirty years. They are given in Clino together with the highest and lowest values. Projecting these quintiles on to the future yields probabilities of 20%, 40%, 60% and 80%. These methods are described by Grisolle et al (1962) and Brooks and Carruthers (1953).

2.3.2. In the standard form used for the analysis of annual rainfall variability in this survey, Fig PA.2.1 (right of form), arraying, grouping and quintile determination are done. The relative merits of this method and of the more mathematical approach about to be described are discussed at paragraph 2.4.8.

$(r-r)^2$	$r-\bar{r}$	$r$	$r_n - r_{n+1}$	year
45796	-214	468.0	770	1931
18769	-137	54.50	171.2	32
1156	34	716.2	1744	33
19600	-140	541.8	4149	34
75625	245	956.7	774	35
39204	198	880.2	3021	36
10816	-104	578.1	1734	37
4900	70	751.5	1868	38
13689	-117	564.7	32.8	39
22500	-150	531.9	39.3	40
35721	-189	492.6	36.4	41
51076	-226	456.2	327.3	42
10404	102	783.5	575	43
1936	44	726.0	316.0	44
73984	-272	410.0	90.8	45
32761	-181	500.8	42.5	46
19321	-139	543.3	118.4	47
400	20	661.7	1918	48
44944	212	469.9	7966	49
342225	585	1266.5	2880	50
88209	297	978.5	58.1	51
56644	238	920.4	176.9	52
3844	62	743.5	368	53
9604	98	780.3	0.5	54
9801	99	780.8	136.2	55
1369	-37	644.8	31.4	56
36	-6	670.2	144.0	57
19044	138	820.2	344.8	58
42849	-207	475.4	304.2	59
9604	98	779.6	57473	60
1105831	4689	20444.3		

Median .....	$m$	669	1267
Mean .....	$\bar{r}$	682	979
Mean deviation .....	$\bar{d}$	156	952
Variance .....		36861	920
Standard deviation .....	$\sigma$	192	880 <sup>874</sup>
Mean sequential variation .....	$\frac{\sum(r_n - r_{n+1})}{n-1}$	177	820
Relative variability .....	$\frac{\bar{d}}{\bar{r}}$	22.9	784
Coefficient of variability .....	$\frac{\sigma}{\bar{r}}$	28.2	781
Relative sequential variability .....	$\frac{msv}{\bar{r}}$	26%	780
	$\frac{m-\bar{r}}{\bar{r}}$	1.9	752
	$\bar{r} + \sigma$	874	744
	$\bar{r} - \sigma$	490	726

PLACE BAMBEY  
Country Senegal

1267
979
952
920
880 <sup>874</sup>
820
784
781
780
780
752
744
726
716
676
662 <sup>669</sup>
645
578
565
545
543
542
532
501
493 <sup>490</sup>
475
470
468
456
410

TOTALS

Table PA.2.1. Standard form for analysis of 30-year annual rainfall series. On the right arraying in quintiles with median and two third values. On the left variability and sequential variability calculation.

#### 2.4. Theoretical Method. Normal Distribution.

2.4.1. The theoretical function most commonly used in the analysis of annual rainfall data is the normal or Gaussian distribution which is defined by two parameters : the mean and the standard deviation, the latter being a measure of the variation or spread related in a known way to the amounts for all frequencies.

2.4.2. G.De Blichambaut (1956) has demonstrated that the annual rainfall of a number of stations in Equatorial Africa, including some in Chad, is normally distributed, within errors to be expected from the samples available. For the province of Rajasthan in India which has a summer rainfall regime similar to that of our Area K.N. Rao (1958) also came to the conclusion that rainfall was normally distributed. The literature on the subject for areas outside our survey is abundant. Griffiths (1960), having examined the rainfall at 300 stations in East Africa which he compares with a sample of 500 stations for the rest of the world, finds that in both cases 75% of the stations had a normal distribution.

2.4.3. He also found that the rainfall data of the remaining stations could in most cases be transformed by a simple operation into a sample which did obey a normal distribution law. Such a transformation was also resorted to by Dubief (1953) in his analysis of the very low rainfall of the Sahara when he showed that the logarithms of the data plus a constant were distributed normally. The constant involved could be determined graphically by successive approximation on log normal paper until the points, having as coordinates  $\log + \text{constant}$  and normal frequency due to rank, fell into line.

2.4.4. With this more theoretical approach the size and probability of occurrence of rare extreme values not necessarily found in the sample can also be predicted. (It is, however, at these extremes that estimates derived from theoretical functions are least reliable, and it does not appear safe with rainfall to go beyond 5% probability, or once in 20 years). Furthermore, it is also possible theoretically to assess the limitations of the information which a given sample can yield and, consequently, the confidence which can be put into the forecasts so obtained.

2.4.5. In the standard form shown at Fig. PA.2.1. the standard deviation is therefore calculated. With it and the mean and a table of probabilities or "t" table the value of any probable percentage frequency can be calculated assuming a normal distribution. The fit to a normal distribution is simply tested by comparing the values, mean plus and minus standard deviations with the values in the array corresponding to their theoretical position at 26 and 84 per cent approximately.

2.4.6. The lack of symmetry about the mean, or skewness, is also evaluated. Skewness is found when a number of years slightly drier than average are compensated by a smaller number of years of heavy rainfall. This type of skewness, which is reckoned positive, often occurs in arid countries, and reduces the accuracy of normal probabilities, especially in the central portion of the array. Skewness was evaluated by subtracting the median from the mean, dividing by the mean to make data comparable, and multiplying by 100 to express the result as a percentage.

2.4.7. Another standard form shown at PA.2.2. was also prepared to estimate the normal distribution parameters and test for fit graphically. The 30 annual values, again put in order of magnitude, are plotted on normal paper specially drawn with position lines 3.3% distant from each other. A straight line is drawn through the points with special attention to the central values. The position of the 50% line will give the theoretical mean, and those of the .10, .20, .40, .60, .80, .90 dotted lines values to be probably exceeded nine, eight, six, four, two and one year out of 10. The posi-

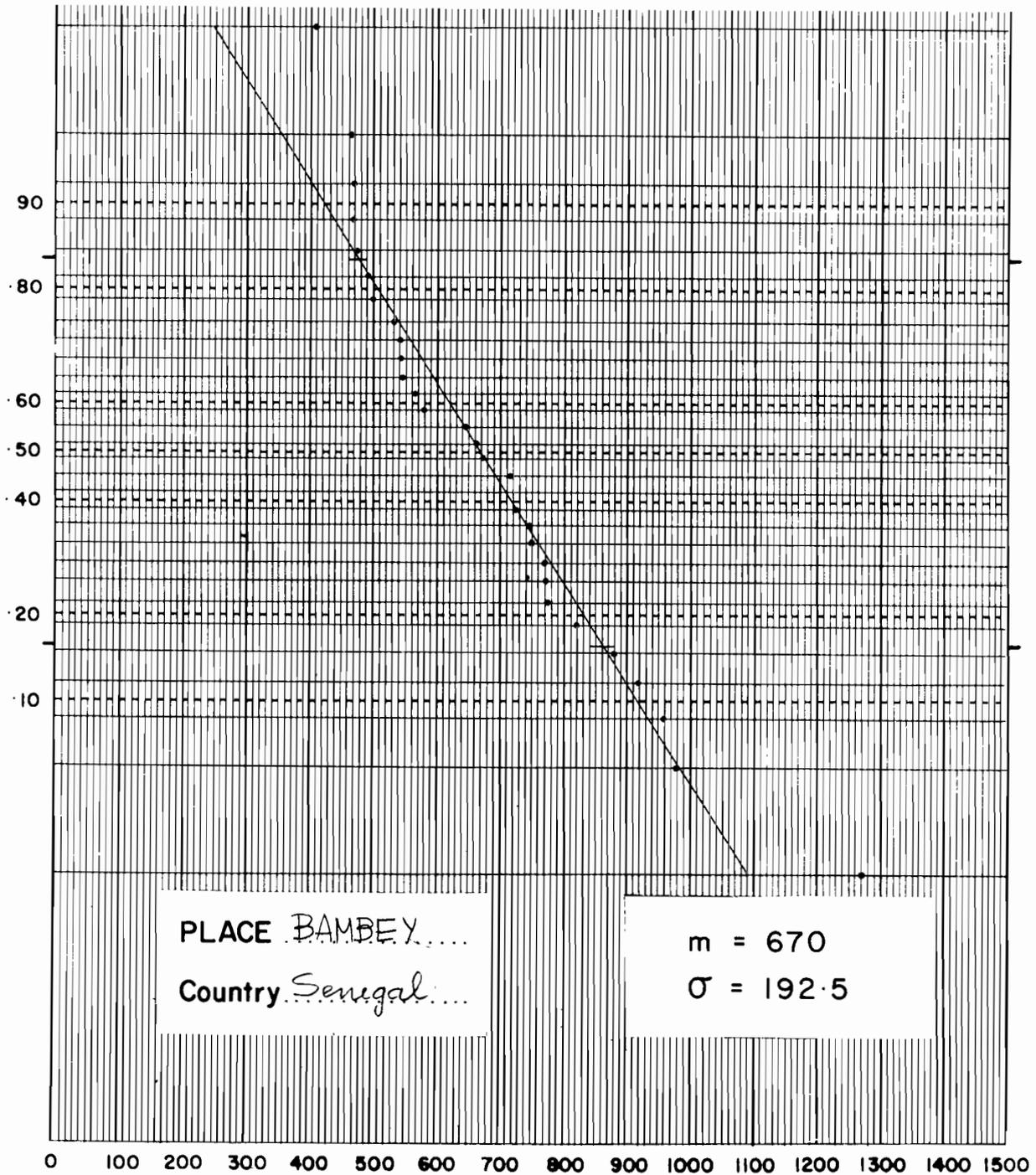


Fig PA.2.2. Standard form for graphical analysis of 30-year rainfall series. Arrayed amounts are plotted on the 30 lines of the vertical normal distribution scale and a line drawn through them, paying special attention to the central values. The crossings of this line with the dotted line give the mean and other theoretical values, whilst the median and quintile limits can be obtained from point position.

tion of the values mean plus and minus one standard deviation have also been marked, making it possible to estimate the standard deviation. In the example given, the rainfall at Bambej, results obtained on both forms are close to each other.

This is not exceptional, as can be seen from Table PA.2.3., where two sets of values for a few stations are compared. Although it was not used exclusively here, the graphical method might be thought sufficiently accurate for such a study.

	Mean		Stand. Dev.	
	Calc.	Graph.	Calc.	Graph.
BAMBEY	682	670	192	193
BAMAKO	1104	1110	181	190
KAYES	777	770	155	148
NIAMEY	564	560	115	103
ZINDER	541	550	118	120
FORT LAMY	649	650	152	150

Fig PA.2.3. Variability parameters obtained numerically and graphically.

2.4.8. With a 30-year sample, the information derived from the standard deviation is more reliable than that obtained empirically, simply by arranging data in order of magnitude, because irregularities in the sample are smoothed out. Calculation of the standard deviation through that of the variance may be thought laborious. The work is greatly reduced by using the graphical method which appears to yield sufficiently accurate results.

2.5. Distribution of Variability.

2.5.1. The Coefficients of variability which could be calculated from 1931-1960 normal series have been plotted on a map of the Area at Fig. PA.2.4., and against rainfall at Fig. PA.2.5.

It is seen that, as is usual, variability increases with aridity from south to north. The increase gradually accelerates beyond 500 mm until the highest variability is found, north of the actual limit of the semiarid Area in the very low rainfalls of the subarid and arid zones.

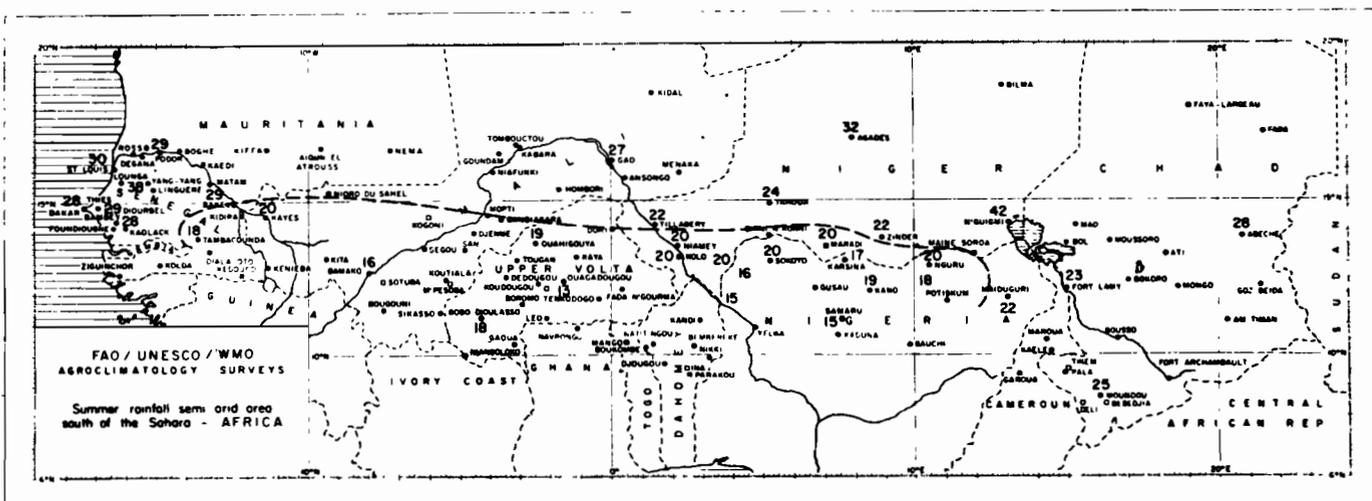


Fig PA.2.4. Surface distribution of coefficient of variability. The broken line indicates the part of the Area where the coefficient is less than 20.

2.5.2. There are two regions where variability of annual rainfall seems abnormally high. The first is in West Senegal, where it is attributable to the greater diversity of the meteorological mechanisms which bring rain. The second is to the north of lake Chad where, unfortunately, only one complete series from N'Guigmi was available for analysis. That region is one of abnormally low rainfall for its latitude and of abnormally high relative amount of rain falling in August. These two characteristics and the higher variability may be due to the pattern of low level circulation most commonly affecting the Area.

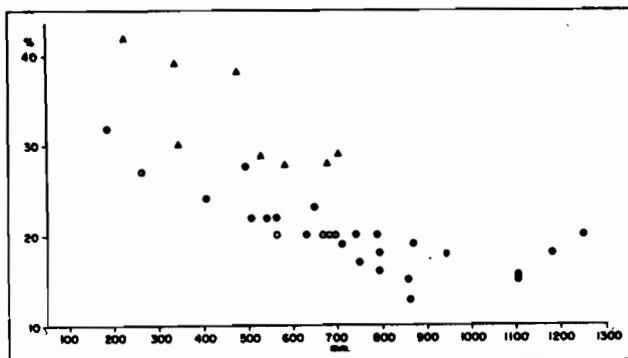


Fig PA.2.5. Mean annual rainfall vs. coefficient of variability. Triangles represent places in west Senegal and N'Guigmi.

2.5.3. By contrast there is a zone, central both with respect to latitude and longitude, say between 900 and 500 mm, away from the coast of Senegal, from the lake Chad area and from the relatively high ground of the border with the Sudan, where there is a remarkably low and uniform variability regime for such a large area. This was commented on by Dubief (1963) in his work on the climate of the Sahara.

2.5.4. The Area as a whole shows very little skewness evaluated as described in subsection 2.4.6. Values for the rainfall series analysed will be found at Annex I. It is seen that a quarter of them are negative and that skewness does not markedly increase with aridity.

## 2.6. Probability Diagram.

2.6.1. Because of its uniformity and smoothness of transitions, it is possible to describe annual rainfall variability and probability, for at least part of the Area, with the help of diagrams rather similar to those found in the first study (Wallen, 1964), but based on normal distribution parameters.

2.6.2. A diagram was constructed to describe probabilities in the central region (surrounded by a dotted line at Fig PA.2.4. and represented by dots and circles at Fig PA.2.5.) corresponding to mean annual rainfall between 1000 and 500 mm Fig PA.2.6. It is based on the assumptions that the coefficient of variability is 15% at 1000 mm and 22.5% at 500 mm and that there is no skewness. Standard deviations corresponding to these assumptions were calculated and then multiplied by the factors appropriate to the required percentage frequencies. It is thought that this diagram can be used with confidence to evaluate probabilities for places within the region of which the mean annual rainfall is known, or can be estimated from a few years' rainfall only by comparing with adjacent places.

2.6.3. The utility of a further diagram between the limits of 700 and 300 mm of rain and 27.5% and 40% coefficient of variability to describe the conditions in west Senegal and north of lake Chad is more problematical. The values involved are tabulated at Fig PA.2.7.

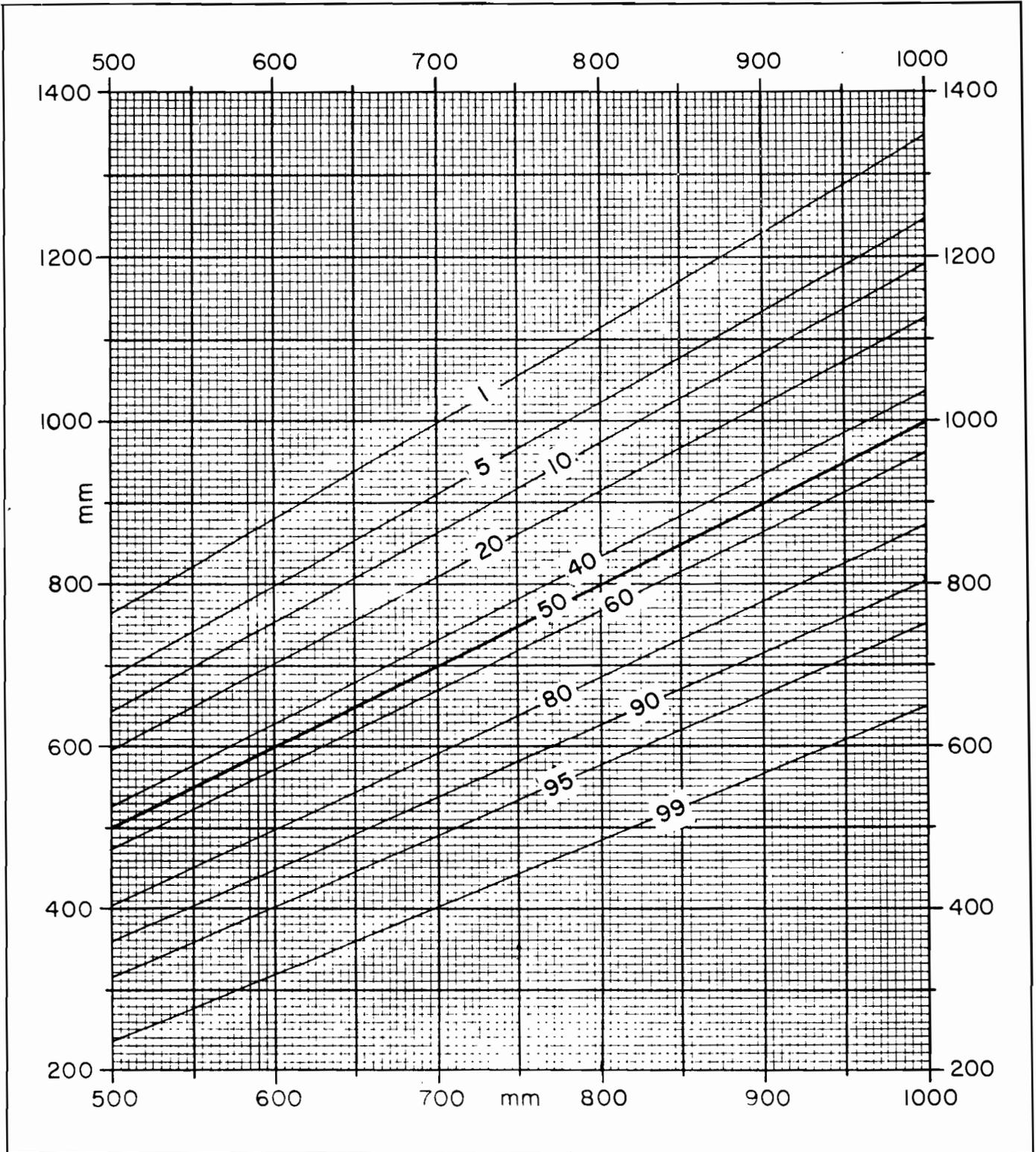


Fig PA.2.6. Probability diagram. Annual mean rainfall along base and amounts corresponding to the probability lines on the sides. Lines indicate the number of years in 100 when rainfall is equal or less than the amounts corresponding to annual mean rainfall.

% occasions when exceeded	700 mm $\sigma = 157.5$		300 mm $\sigma = 120$	
	Departure	Amount	Departure	Amount
1	367	1067	280	580
5	260	960	198	498
10	201	901	154	454
20	132	832	101	401
40	39	739	30	330
50	0	700	0	300
60	-39	661	30	270
80	-132	568	101	199
90	-201	499	154	146
95	-260	440	198	102
99	-367	333	280	20

*Table PA.2.7. Values for constructing probability diagram from 700 to 300 mm with coefficient of variability increasing from 27.5% to 40% which could be applicable to west Senegal and Tchad area.*

References (PA)

- Brooks, C.E.P. & Carruthers, N. Handbook of statistical methods in meteorology.  
1953 London HMSO 412 p MO 538.
- Dubief, J. Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Algiers, Algerian  
1953 Government. 457p.
- Dubief, J. Le climat du Sahara. II (1) Algiers, University of  
1963 Algiers. 275p
- Griffiths, J.F. Bioclimatology and the meteorological services.  
1960 In D.J. Bargman ed. Tropical Meteorology in Africa.  
Nairobi, Munitalp Foundation p 283-301.
- Grisollet, H., Guilmet, B., & Arléry, R. Climatologie, méthodes et  
1962 pratiques. Paris, Gauthier-Villars. 40lp.
- Jackson, S.P. Atlas climatologique de l'Afrique. Lagos, Commission de  
1959 Coopération Technique in Afrique au sud du Sahara.
- France. Météorologie Nationale. Cartes normales de pluie de l'Afrique  
1958 Occidentale (1921-1950). Paris. 29p.
- Perrin de Brichambaut, C. Notes sur les pluies en A.E.F. La Météorologie  
1956 IV, 43 : 215-241.
- Rao, K.N. Some studies on rainfall of Rajasthan with particular reference  
1958 to trends. Ind. J. Met. and Geophys. 9 (2) : 97-116.
- Wallen, C.C. In World Meteorological Organisation of the United Nations.  
1964 Note Technique No. 56. Une étude d'agroclimatologie  
dans les zones arides et semi-arides du Proche-Orient.  
Geneva OMM 141 TP. 66.



Monthly Rainfall and Rainfall during Shorter Periods - PM

Mean amounts and variability of rain falling during intervals shorter than a year have also been analysed, subject to some limitations which will be discussed later in this section.

Since it is one of the characteristics of the survey area that there is only one rainy season, a summer one, seasonal rainfall in this case is also annual rainfall, for all practical purposes.

1. Monthly mean rainfall.

1.1. Published monthly rainfall data are almost as abundant as those for a year and it is therefore possible to obtain mean amounts for normal periods for a number of

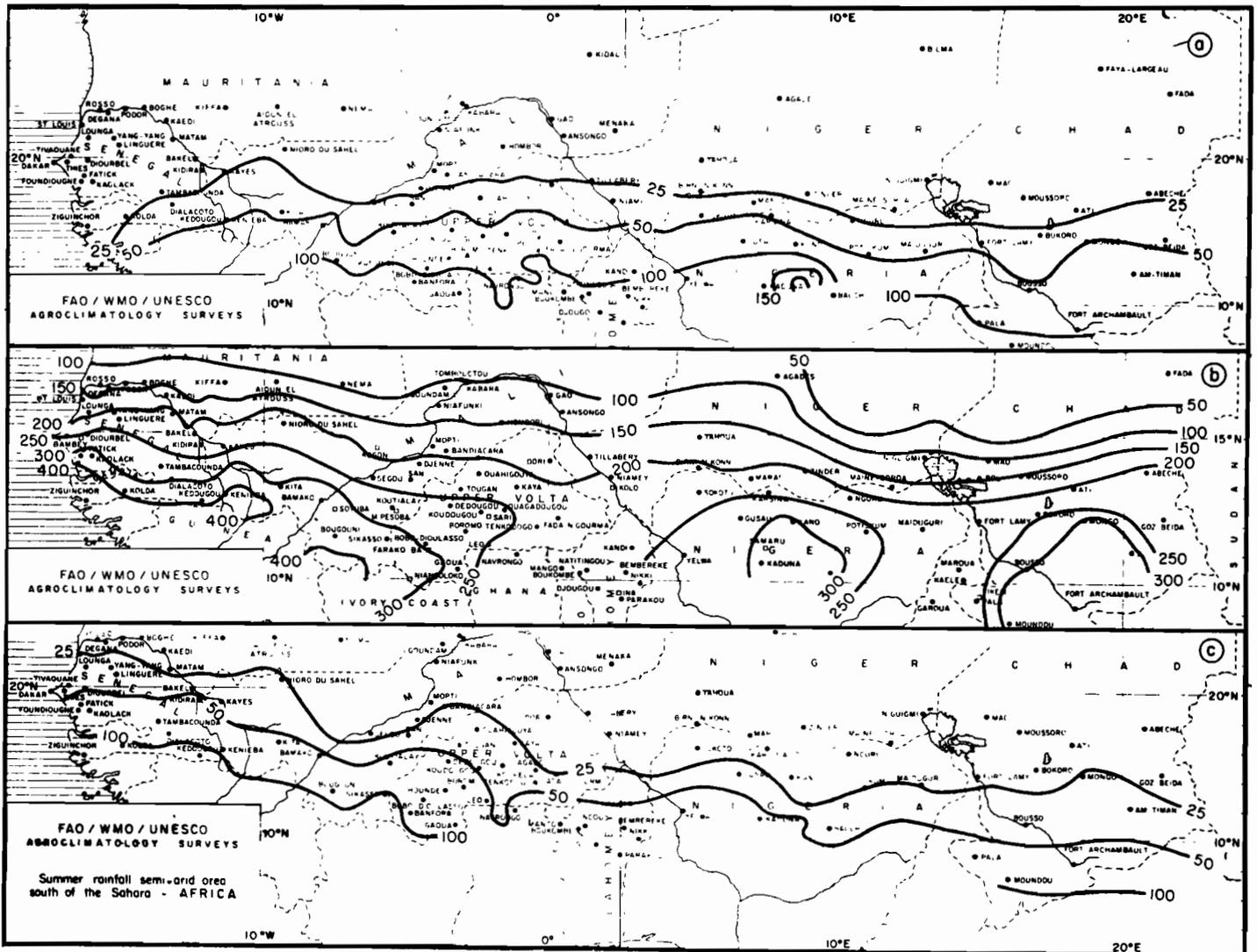


Fig PM.1.1. Monthly mean isohyets, 1931-1960, for (a) May, (b) August, (c) October. Late onset of rains in north-west Senegal. (Taken in part from France, Météorologie Nationale, 1958.)

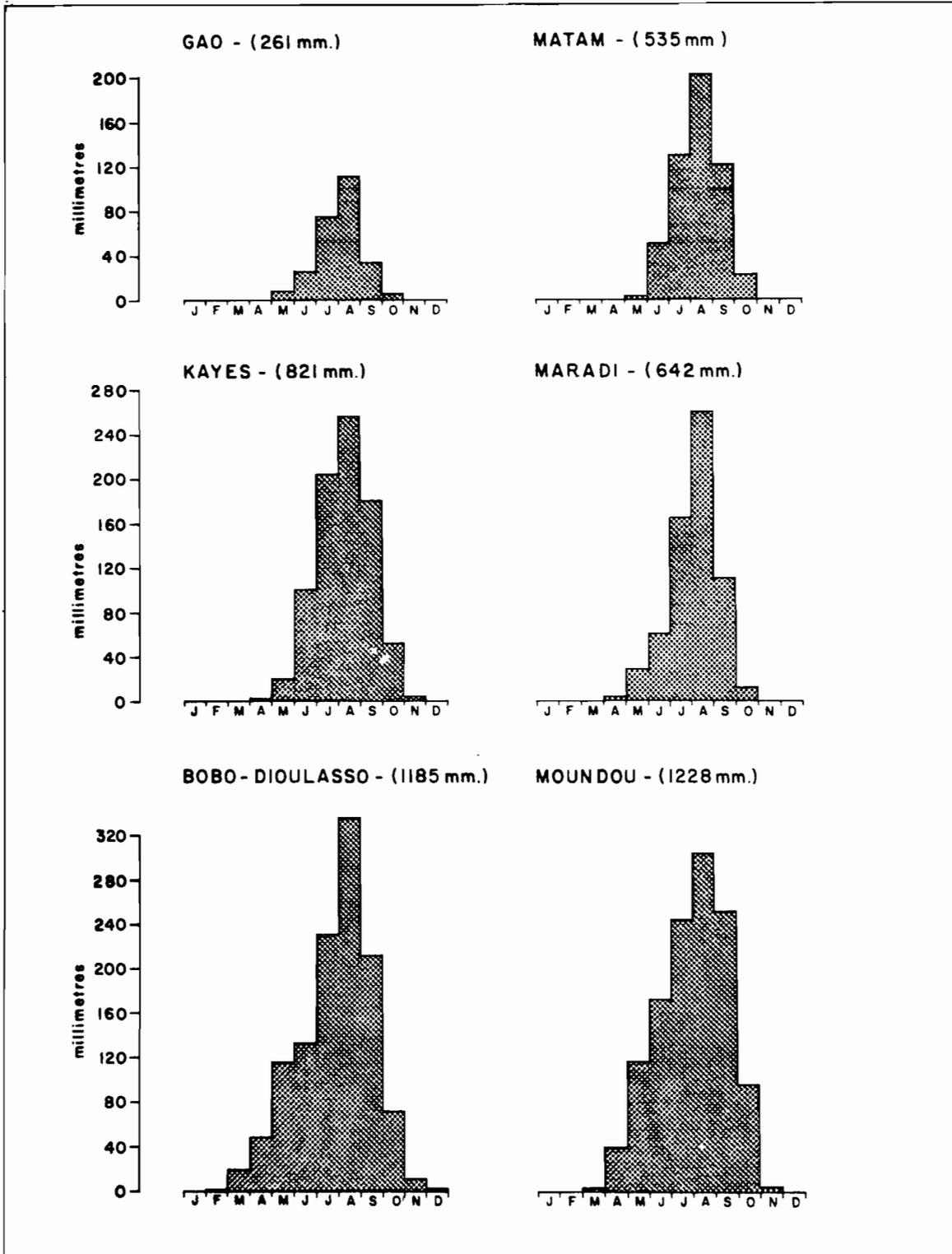


Fig PM.1.2. Histograms of monthly mean rainfall within annual rainfall range of Area.

stations. For those stations in the Area sending out CLIMAT reports the monthly mean amounts are to be found in WMO's Clino. Other available sources are detailed in Appendix II.

1.2. At Figs PM.1.1. (a) to (c) are shown monthly isohyets at the beginning, at the height, and at the end of the rainy season and at PM.1.2. histograms of monthly mean amounts for a selection of stations. In all cases it is seen that monthly mean rainfall increases gradually from the beginning of the rainy season in late spring or early summer, to a maximum in August, when the full effect of intertropical convergence is felt. The duration of the rainy season varies with mean annual rainfall and will be discussed in greater detail in the section dealing with water availability.

1.3. Here, however, it is recalled that once the ground has reached field capacity any rainfall in excess of potential evaporation would tend to run off. In August this occurs at the monthly scale everywhere in the survey area. For equal annual rainfall, a sharing of the rain more equally between the summer months and an avoidance of a very high August amount would appear to be desirable characteristics, from the point of view of utilisation of water by dry farming crops. The relation August to annual rainfall gives an idea of the degree of concentration of the rain received in the middle of the season. At Fig PM.1.3. August and annual rainfall have been plotted and it is seen that, as annual mean rainfall increases, there is a gradual falling off in the relative importance of August rainfall which implies better spreading of rain generally in the south of the Area, August rainfall tending to a maximum whilst rainfall for other months is still increasing.

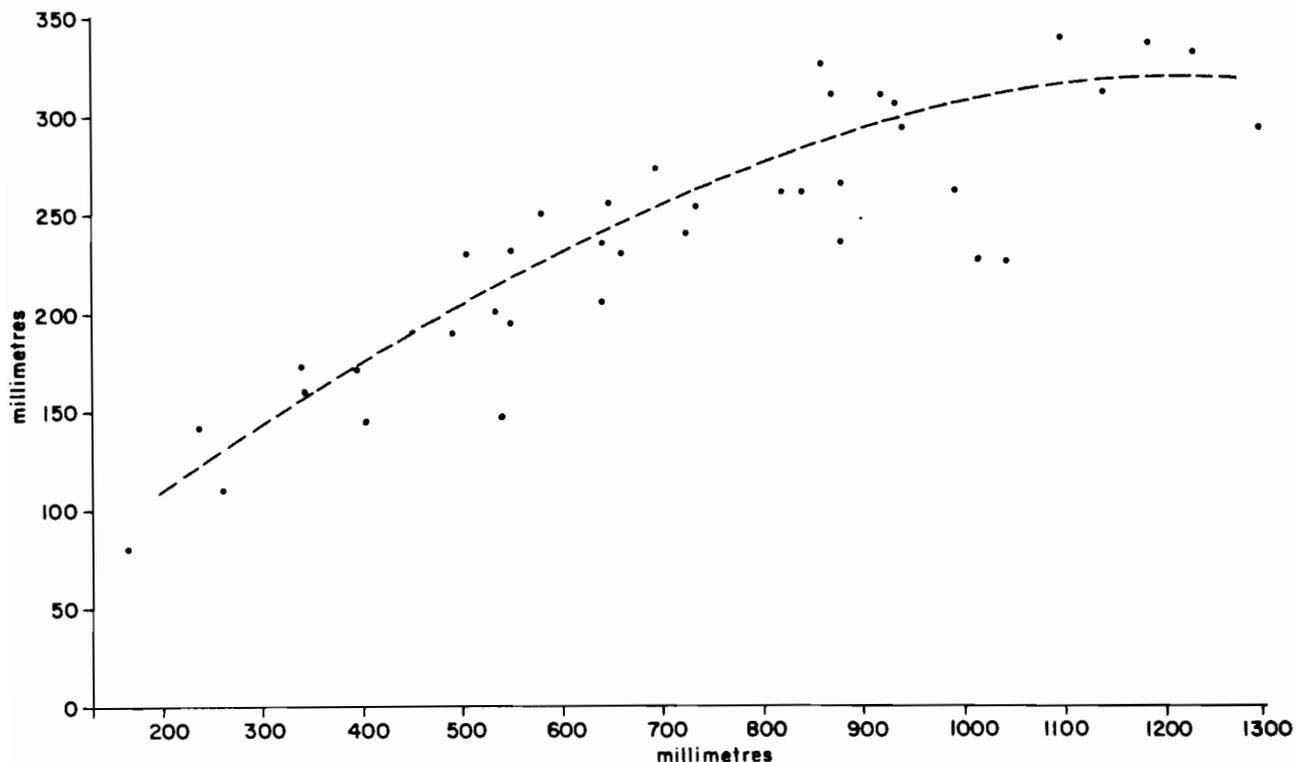


Fig PM.1.3. August vs. annual rainfall.

1.4. Regional differences are discernible north of lake Chad and in Western Senegal. At PM.1.4. the distribution of the ratio August to annual rainfall has been plotted showing, as well as a gradual decrease southwards, these two maxima. They appear to be related with preferred positions of high pressure cells : the Azores vast anticyclone, in the case of Senegal, and another north west of Chad which, providing these two areas with a high proportion of northerly winds and also exerting some blocking action of the ITF, would shorten their rainy seasons and not only make them dry for their latitude but also give them an unduly sharp rainy season.

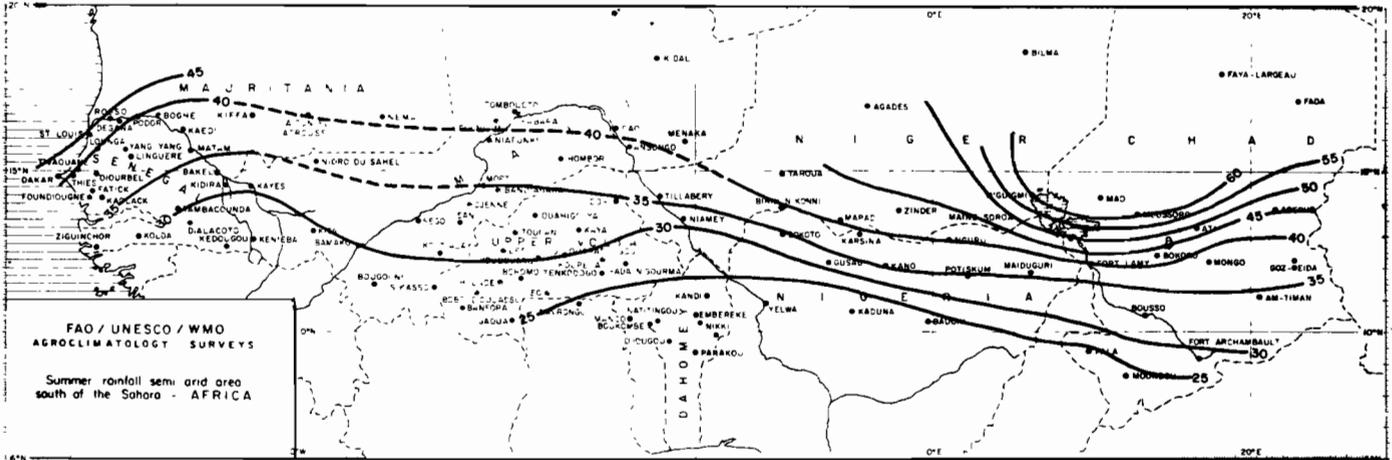


Fig PM.1.4. Percentage August/annual rainfall.

2. Mean rainfall for periods shorter than a month.

2.1. A month is too long for the analysis of rainfall for the planning of agricultural operations when the growing season can be as short as 80 days, and, consequently, the rainfall during decades, weeks, or even pentades should also be analysed.

2.2. At the same time, as one deals with periods approaching more and more to the duration of one rainstorm (which are relatively very short in our zone, commonly a few hours), an increasingly large number of years are needed to yield an average which settles down to a truly representative value. This is shown at Fig PM.2.1. where cumulative means have been plotted for a period of 36 years at Samaru in Northern Nigeria.

2.3. At Fig PM.2.2. a) monthly mean rainfall amounts for the same place and period show a typical pattern for a station with a rainfall of some 1100 mm in the south of our area, a gradual increase from March onwards culminating in a maximum in August and then decreasing more rapidly to practically no rain in November. Average decade amounts for the same place and period, b), show irregularities which may not be climatically significant such as, for instance, the dip of the first decade in June which occurs rather too early to represent the little dry season found south of the ITCZ. Daily mean amounts, c), present an irregular pattern and there, clearly, some heavy falls have upset the averages. Falls of up to 15 times the mean daily amounts have been recorded and would push up the average for the date on which they fell for many years to come. At section PI the probabilities of such falls are assessed.

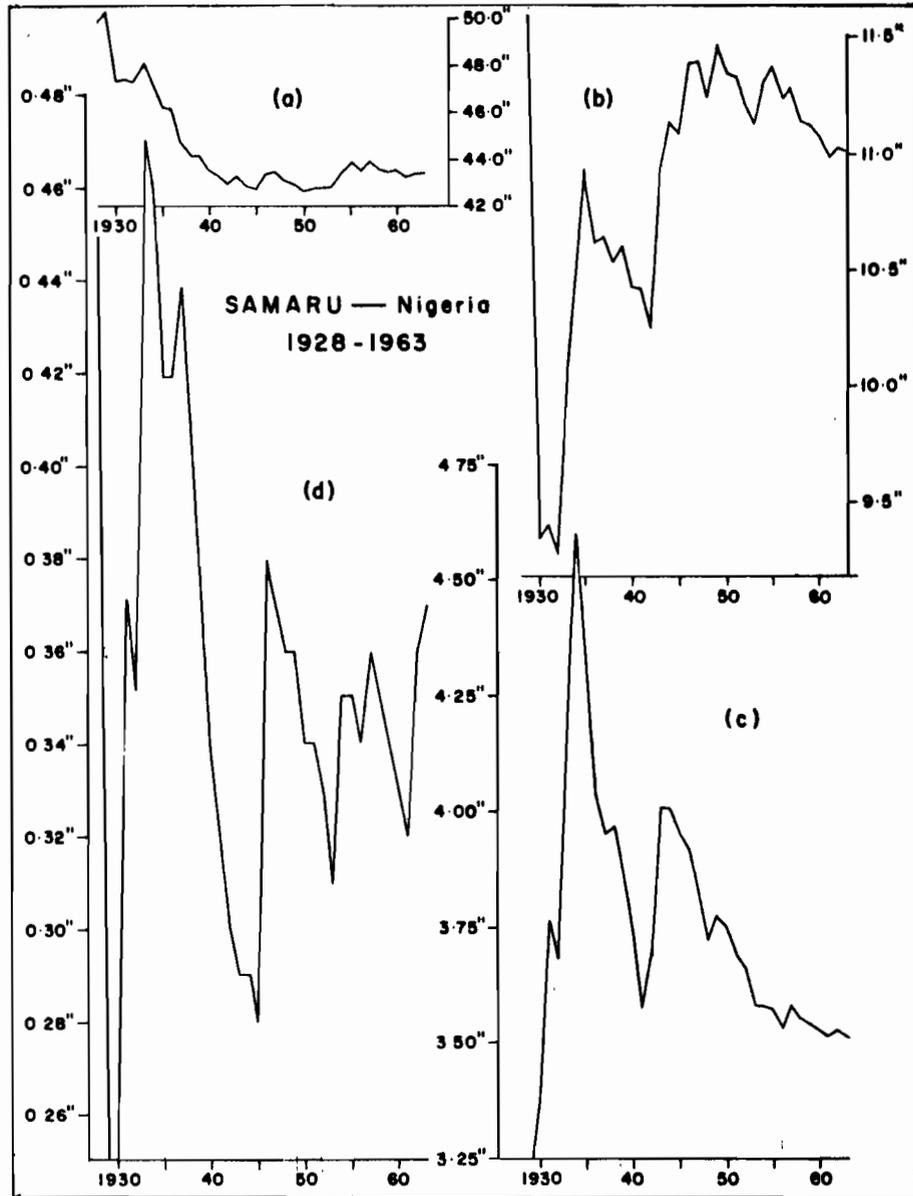


Fig PM.2.1. Cumulative means. a) year, b) month of August, c) decade in August, d) day in August.

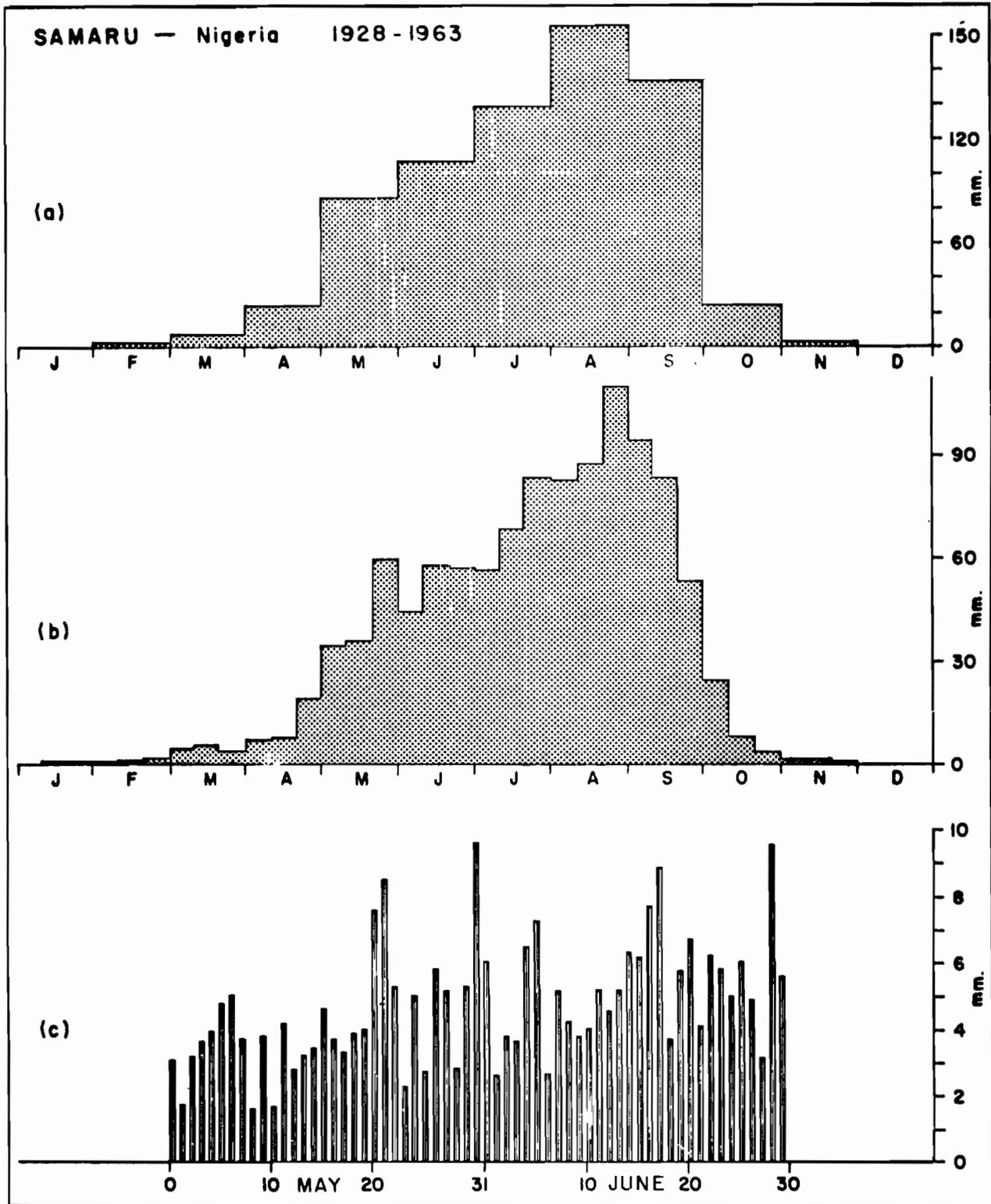


Fig PM.2.2. 36-year mean values a) months, b) 10-day periods, c) days. Some irregularities appear at b) and many at c) as the size of the period decreases.

2.4. As the variability increases with the shortness of the interval the means become less informative. Averages for shorter periods than a month not only become less and less valuable, but their calculation involves an increasing amount of work which puts them outside the scope of our study.

Comparisons of decade or even pentade and sometimes daily amounts year after year at the local scale of a station or agricultural enterprise with growth and development data are, of course, extremely valuable and should be undertaken, but only samples of such local studies can be given in a survey of such a large area.

3. Variability of monthly rainfall.

3.1. The empirical and theoretical methods for calculating variability and deriving probabilities of yearly rainfall are generally applicable to monthly amounts, again, subject to some reservations. The volume of work involved tends to make a systematic approach prohibitive for the Area, and only a few examples can be given, hoping they will be useful in further studies.

3.2. WMO's "Clino" publish monthly quintile data for a number of stations in the Area.

From the examples given at Fig PM.3.1. it is seen that a month in the middle of the rainy season at a station with fairly abundant rainfall will show grouping rather similar to that of a comparable year, though with greater variation. A month in the north of the area and at the beginning or end of the rainy season will contain null values because there will have been years when no rain was received during that month. Such a series can still be arrayed in quintiles but the meaning of the derived probability within the zero range is less clear. If there are four zeros, for instance, it can be taken as meaning in succession that zero will be exceeded once in 30 years, once in 15 years, once in 10 years, etc.

	a	b	I	II	III	IV	V	VI	c	d	e
Niamey August	195	201	75	136	170	210	247	434	73	36%	3%
640 mm May	30	37.7	0	12	21	34	57	114	29.4	78%	26%
N'Guigmi August	130	141	35	71	99	166	191	318	72	51%	8%
235 mm May	0.3	6.5	0	0	0	2	6	90	-	-	-

Fig PM.3.1. Monthly rainfall characteristics at two stations in Niger at the beginning and for the wettest month of the summer rain. a) median; b) mean; II to V quintiles; I and VI extremes; c) standard deviation; d) coefficient of variability:  $\sigma / \bar{r}$ ; e) skewness index:  $m - \bar{r} / \bar{r}$ .

3.3. Concerning the theoretical approach the position is similar. Months in the middle of the rainy season at stations where rainfall is fairly abundant will show a normal distribution, though with greater variability, as shown at Fig PM.3.1. Data for drier months showing some null values can no longer be made to fit a simple normal curve, since their distribution is truncated. Other functions are available to analyse such data. At subsection PI.2 the use of a truncated log normal distribution is illustrated. Another theoretical distribution used successfully for such analysis is an incomplete gamma function, about which more will be said at para: 4.2.

4. Variability of amounts for periods shorter than a month

4.1. With decades weeks and pentads, the interval is increasingly commensurate with the length of dry spells as shown at subsection PS.4. The occurrence of zeros increases accordingly.

An example of pentad arraying is shown at Table PM.4.1. for two stations in Niger for which daily data were available from an ORSTOM publication (Niger 196?). Zeros appear even during the month of August and the spread of pentad values is very extensive. Furthermore, with such short intervals, 30 years will not always yield settled means.

NIAMEY 640 mm						N'GUIGMI 235 mm							
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
VI	110.8	130.7	85.7	130.2	102.4	210.9	VI	96.1	120.3	143.6	117.9	81.6	60.2
V	54.0	63.7	54.5	52.8	52.6	38.7	V	39.2	33.7	68.1	39.1	25.1	34.0
IV	29.1	24.0	33.5	31.0	28.9	30.1	IV	8.3	23.5	38.0	22.3	6.4	15.4
III	20.0	16.9	19.8	19.8	20.0	22.0	III	4.5	14.4	29.2	5.7	1.5	3.0
II	7.8	11.8	10.9	8.1	17.4	10.1	II	0	1.8	11.0	0	0	0.7
I	1.8	0	1.4	0	0	1.5	I	0	0	0.6	0	0	0

Table PM.4.1. Pentad rainfall quintiles and extremes at the same two stations as Fig PM.3.1. during August. 1 to 6, number of pentad. II to V, quintiles. I and VI, extremes.

4.2. It is in such cases that the smoothing action of a theoretical function is most useful. The incomplete gamma function, which is like a Pearson type III distribution, is laborious to employ as it involves approximation methods. However, an electronic computer can be used to do this. A sample analysis of weekly and monthly probabilities was done for this Survey by the Climatology Department of the Weather Bureau using 36 years daily rainfall data from Samaru, Nigeria. A photograph of a page of the tabulated results is shown at PM.4.2.

STATION	I	J	NX	NNX	XBAR	GAMMA	BETA	PCP LVL	PROB
555555	06	01	13	034	.44769	1.24500	.35959	0 OR T	.61765
								00.20	.26116
								00.40	.16367
								00.60	.09998
								00.80	.06024
								01.00	.03599
								01.20	.02137
								01.40	.01265
								01.60	.00747
								01.80	.00437
								02.00	.00257
								02.20	.00155
								02.40	.00090
								02.60	.00059
								02.80	.00000
								03.00	.00000
								03.20	.00000
								03.40	.00000
								03.60	.00000
								03.80	.00000
								04.00	.00000

Fig PM.4.2. Sample of weekly precipitation probabilities for Samaru, Zaria, Northern Nigeria, worked out with an electronic computer by the US Weather Bureau at their National Weather Records Center, Ashville, N.C. I, climatological week number beginning 1 January. J, number of weeks in the period considered. NX, number of years with 0.01 inch or more during the period. NNX, total number of years. XBAR, Gamma distribution mean. PCP LVL, specified precipitation level in inches and hundredths for which probabilities were requested. PROB, probability of specified level being equalled or exceeded. GAMMA and BETA, parameters of the function.

References (PM)

- Barger, Gerald L. and Thom, H.C.S. Evaluation of drought hazard. Agron. Jour. 1949 41:519-526.
- France. Météorologie Nationale. Cartes normales de pluie de l'Afrique Occidentale 1958 (1921-1950). Paris, 29p.
- République du Niger. Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique (Undated. et à Madagascar. Service Météorologique. Relevés pluviométriques 196?) journaliers jusqu'au 31 Décembre 1960. Paris, ORSTOM. 2 vols.
- Thom, H.C.S. A note on the Gamma distribution. Month. Weath. Rev. 86:117-122 1958



Rainfall Intensity - PI

The main use of measurements and studies of rainfall intensity is for hydrology, but they are also of interest in this survey as they have a bearing on crop production. For instance, intensity affects absorption and run-off and, consequently, the amount of water made available to plants in different positions relative to the spot where the rain fell; it is also the most important factor in soil erosion.

Since intensity means amount per unit time, annual and monthly rainfall are intensities. Here, however, we are concerned first with amounts falling in 24 hours, and then with time intervals shorter and thus even more comparable with the mean duration of one fall of rain or rainstorm.

1. Mean amounts in 24 hours.

1.1. At Table PI.1.1. average amounts falling per rainy day are given for a selected number of stations. Disregarding Agades which is in the arid zone, it is seen that there is hardly any increase with mean annual rainfall. At places with larger mean annual rainfall it rains on more days rather than more per day.

1.2. This can be seen from Fig PI.1.2 where the increase of number of days of 0.1 mm or more with mean annual rainfall appears as regular, though with some scatter throughout the rainfall range of the Area. This is in agreement with the view that most of the rain is due to disturbance lines of approximately equal intensity everywhere.

1.3. Variation in daily mean rainfall from month to month at the same station is greater than that from station to station, as could be inferred from synoptic considerations. At Fig PI.1.3. monthly values from some selected stations are given.

1.4. This uniformity should facilitate exchange of plant material.

	(a)	(b)	(c)
	mm	d	mm
AGADES	158	22	7.2
PODOR	336	28	12.0
ZINDER	531	40	13.6
TAMBACOUNDA	873	61	14.2
GAROUA	985	74	13.3
MOUNDOU	1210	79	15.3

Table PI.1.1. Annual mean a) rainfall, b) number of days of rain, c) rainfall per rainy day.

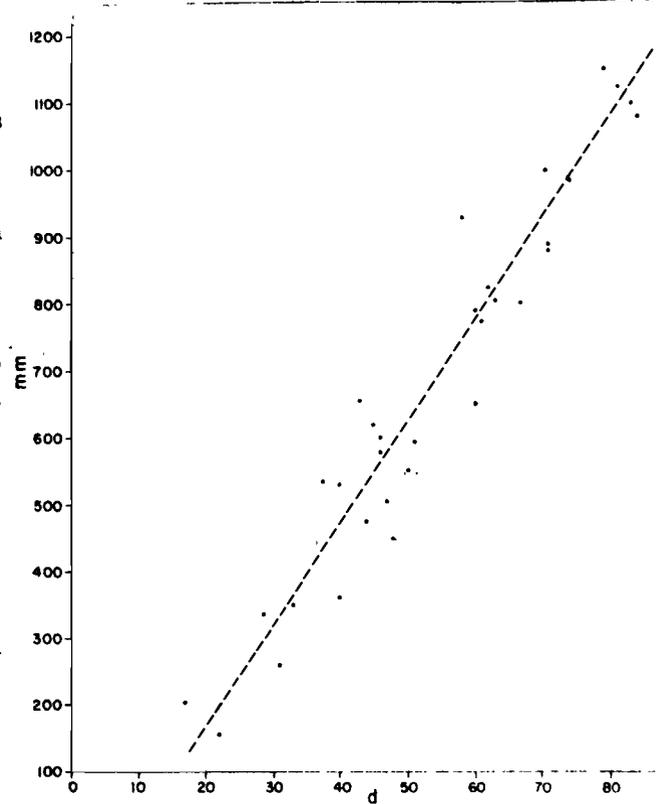


Fig PI.1.2. Number of days of 0.1 mm of rain or more vs. annual mean rainfall.

	Ann.	M	J	J	A	S	O
AGADES	60	4.4	3.8	6.9	8.6	5.9	0.2
ZINDER	530	8.5	8.6	15.2	16.4	10.2	6.8
TAMBACOUNDA	875	10.4	14.0	14.8	15.5	14.6	11.3
BAMAKO	1100	8.6	13.8	14.8	16.0	13.7	8.7

Table PI.1.3. Daily mean rainfall per rainy day month by month during summer rains.

2. Maximum amounts in 24 hours

2.1. Some specific works of analysis are available for the Area concerning the maximum amounts likely to fall in 24 hours. Delaunay (1952), analysing the data for 42 stations in Senegal for which records began to be available before 1941, lists the frequency of occurrence of specified amounts in 24 hours during five-day periods. A publication of the Service Météorologique Fédéral (1956) gives the mean frequency of 20 mm, 50 mm and 100 mm daily heights for the period 1920-1949 and its results were used to draw lines of number of days per year when 50 mm were recorded, Fig PI.2.1. Such falls occur throughout the area and their frequency is closely allied to annual rainfall. A publication from Nigeria (1960) lists the ten highest 24 hour falls for each available station. In the semiarid part of Nigeria as much as 350 mm has been recorded.

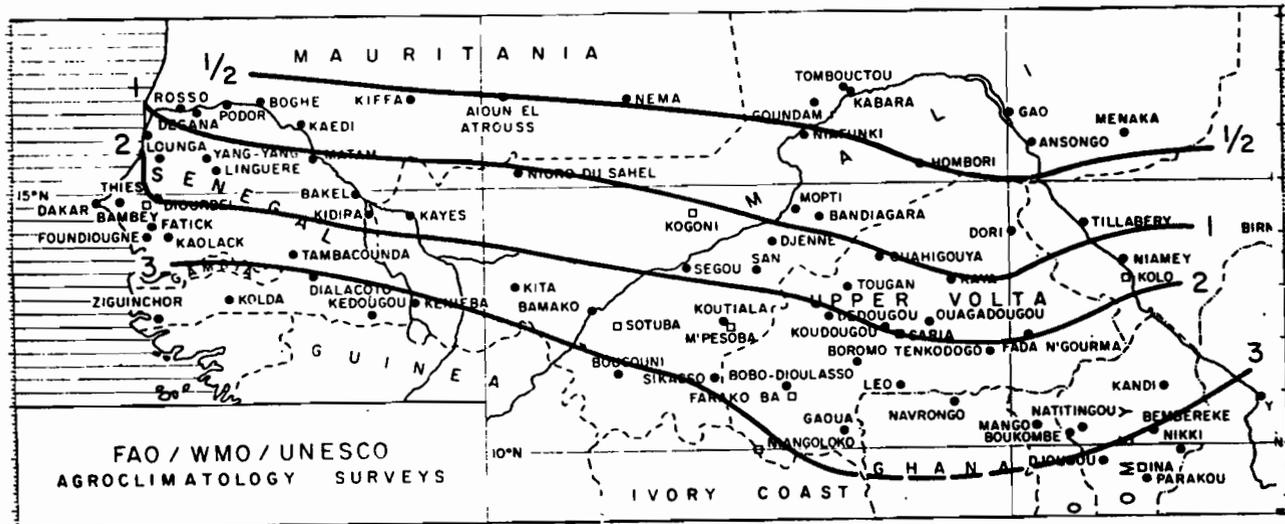


Fig PI.2.1. Mean annual number of days with 50 mm of rain.

2.2. Recently, Brunet Moret of ORSTOM (1964), has made a thorough attempt at fitting the empirical distribution of daily rainfall to a mathematical function, thus enlarging the scope of defining the probabilities of occurrence of specified amounts. Using the data from 71 stations in Senegal, Mali, Upper Volta, Niger and Chad, altogether 982 complete years, he showed that for all stations these daily amounts, put in ranks according to size, obeyed a unique relation and, therefore, that it should be possible to adjust their ranking to a theoretical curve.

2.3. He used a truncated log normal relation, also advocated by Roche (1963) in his text book on hydrology, of which the parameters are the mean and standard deviation of the logs of the daily amounts and, thirdly, the probability of occurrence of a rainy day. These parameters can be estimated graphically on log normal paper by trying successive values of the third, until the points representing the daily heights on the log scale and their frequency divided by the third parameter on the normal scale fall into line, Fig PI.2.2.

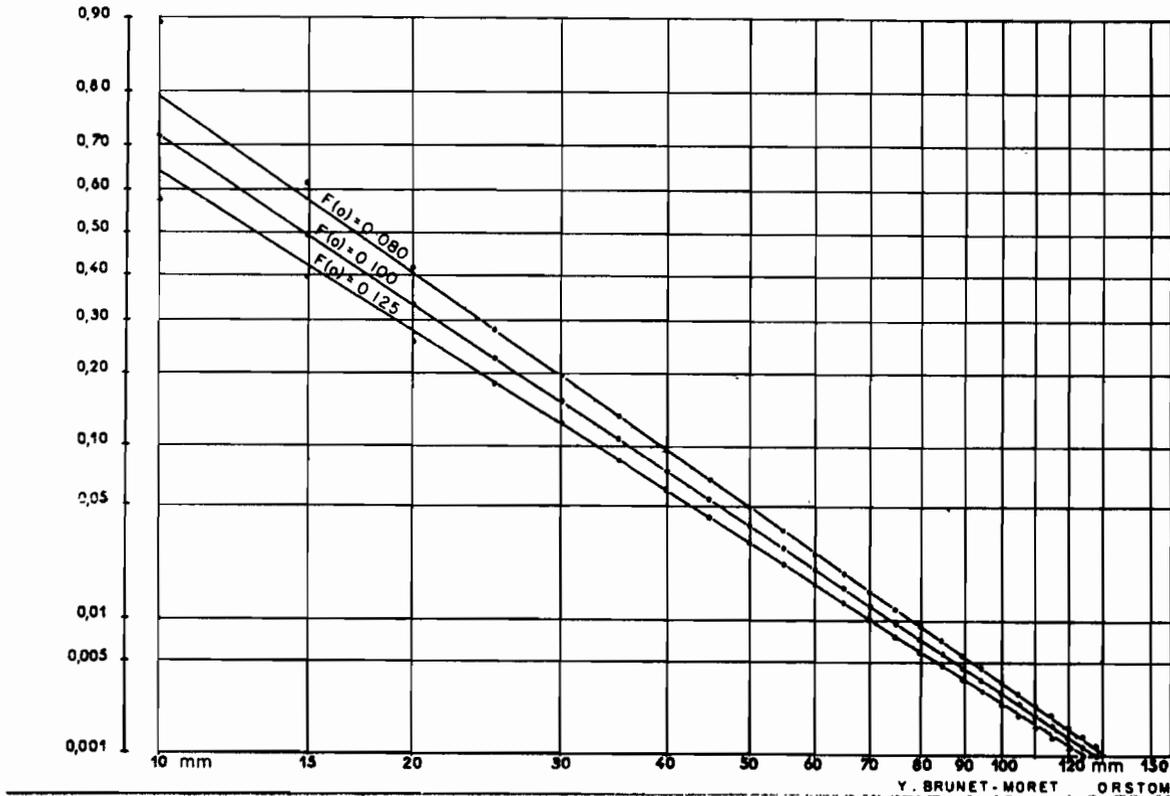


Fig PI.2.2. Adjusting of 24-hour rainfall frequencies on log normal paper. Three values of  $F(o)$ , the frequency of days of rain, have been tried and 0.1 yields a straight line.

2.4. The value for the third parameter, or frequency of days with rain, which yields a straight line, is invariably less than that obtained from the data available. It is suggested that the disparity between the observed and theoretical values is due to the difficulty in recognizing the occurrence of very small amounts of precipitation. Fortunately, within the range through which it is made to vary, the effect of the third parameter on the theoretical frequencies of practical importance, that is, those in the middle portion of the curve, is small.

2.5. A comparison of observed frequencies with those derived from the theoretical function shows good agreement between the highest amounts expected during a period of one year. The agreement decreases as the number of years in the period considered increases (as can be expected in view of the relatively small number of years represented by the sample). Table PI.2.3.

<u>Senegal</u>	a	millimetres					
		b	c		d		e
			(i)	(ii)	(i)	(ii)	
ST. LOUIS	34	359	52	51	86	76	173
MATAM	42	522	60	59	95	97	184
DAKAR-YOFF	15	591	64	67	107	94	225
BAMBEY	32	693	70	69	118	120	254
TABACOUNDA	37	918	70	70	109	111	209
<u>Mali</u>							
GAO	39	276	37	37	61	67	121
MOPTI	37	543	51	51	81	78	152
KAYES	35	754	63	64	97	95	180
BAMAKO	39	1080	69	69	108	106	207
<u>Upper Volta</u>							
DORI	25	546	50	50	72	71	123
OUAHIGOUYA	25	725	57	54	86	83	159
OUGADOUGOU	10	901	64	57	100	110	189
BOBO-DIOULASSO	27	1169	69	69	102	102	180
<u>Niger</u>							
AGADES	38	173	30	30	49	43	95
N'GUIGMI	39	222	41	43	69	70	137
TAHOUA	38	396	41	41	67	62	131
ZINDER	51	501	52	51	81	76	150
NIAMEY	20	600	54	53	82	82	151

Fig PI.2.3. Comparison between observed frequency of large amounts in 24 hours and probabilities obtained by truncated log normal distribution. a) number of years, b) annual rainfall, c) maximum in one year (i) actual (ii) computed, d) maximum in five years (i) actual (ii) computed, e) theoretical probability once in a 100 years.

2.6. In the central region of the Area, there is good agreement between isohyets and lines of equal rainfall heights in 24 hours expected once a year, as shown at Fig PI.2.4. In eastern Niger where rainfall decreases eastwards along the parallels of latitude, there is a tendency for the 24 hours maximum not to decrease as rapidly. This is in agreement with our observation that in the lake Chad area the rainy season is shortened and, therefore, appears more intense.

In the west the agreement breaks down in southern Senegal and western Mali, where the rapid increase in mean annual rainfall westwards is not matched by the 24-hour expectations. An additional rainfall regime which puts the region outside the Semi-arid Area is intervening.

2.7. Brunet-Moret also published graphs showing the relation between annual expectations and those for a specified number of years, in terms of mean annual rainfall, Fig PI.2.5., which make it possible to obtain spot values of maximum expectations for any specified number of years up to 20, and can also be used in conjunction with intensity duration studies, as will be seen in the next section.

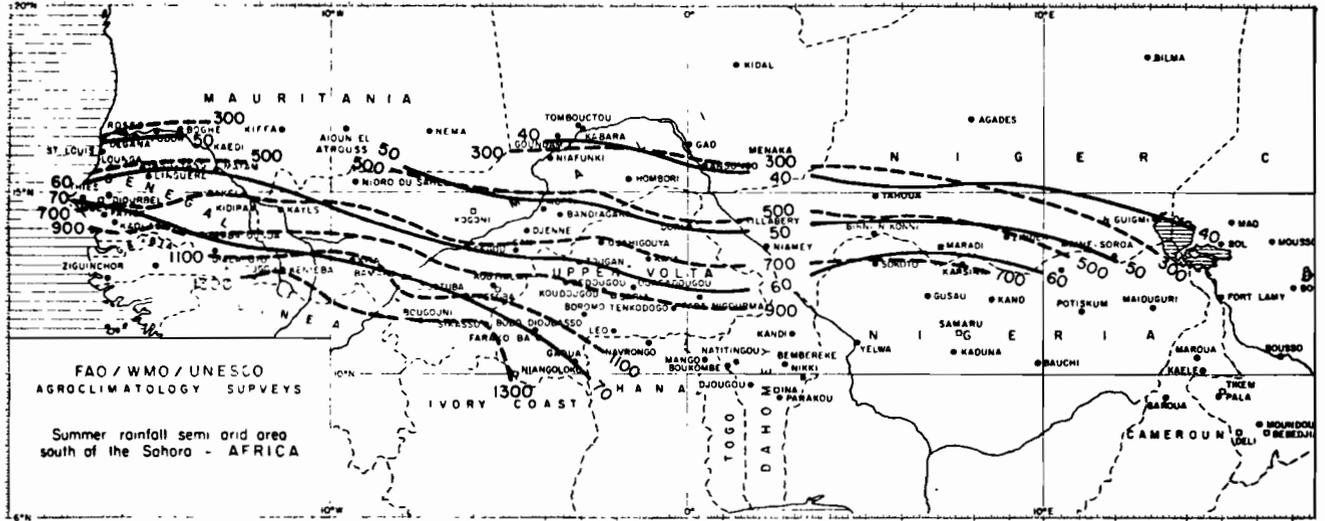


Fig PI.2.4. Comparison between annual isohyets, dotted lines, and lines of equal 24 hour rainfall probability once a year drawn by Brunet-Moret using a truncated log normal distribution. A range of 40-70 mm in 24 hours corresponds to a range in mean annual rainfall of 300-1200 mm.

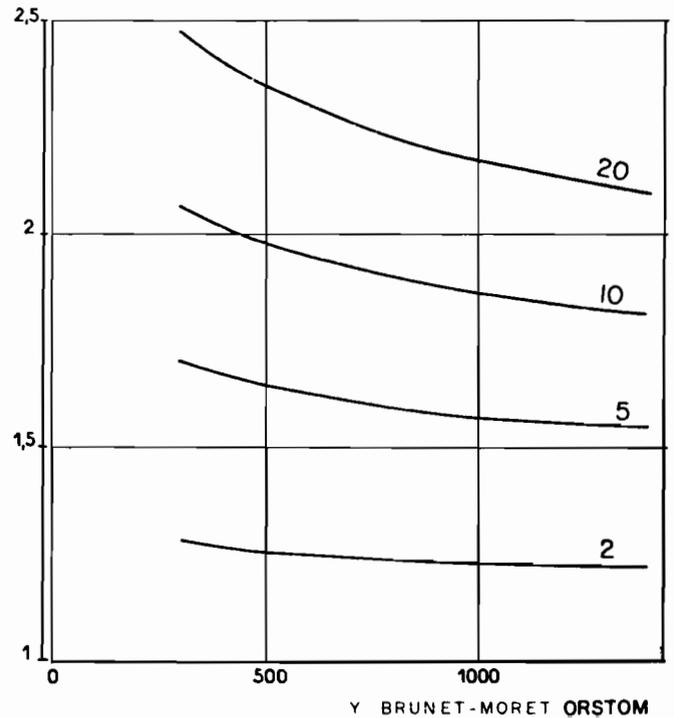


Fig PI.2.5. Coefficient applicable to annual probability of rainfall in 24 hours to obtain probability once in 2, 5, 10 and 20 years in terms of mean annual rainfall.

3. Diurnal variation

3.1. The times at which rain falls during the 24 hours must affect the amount of water made available to plants. Less evaporation will occur at night; not only of water lying on the surface, in the absence of incoming radiation, but also of water falling on dry ground, initially at a much lower temperature than during the day. On the other hand, the drop in temperature and the increase in humidity and cloudiness accompanying rain falling during the middle of the day might prevent wilting, which would otherwise occur in hot and dry air and bright sunshine.

3.2. An analysis by Delorme (1963) of the occurrence of rainfall during the day at 20 stations in West Africa, of which eleven are in our area, provides some information about the times at which rain most commonly falls. For the period 1951-1955, he gives for each station the monthly mean frequency of rainfall occurrence at three hourly intervals, together with additional information on rainfall duration, intensity and types of precipitation. An example of his analysis is given at Table PI.3.1.

N I A M E Y 1951-1955

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ann
00h. n	.	.	.	.	0.6	1.0	2.0	2.4	2.0	0.2	.	.	8.2
f	.	.	.	.	2	3	6	8	6	1	.	.	2
03h. n	.	.	.	0.4	1.0	2.4	3.0	2.6	3.0	.	0.2	.	12.6
f	.	.	.	1	3	7	9	8	9	.	1	.	3
06h. n	0.2	.	0.2	0.4	0.6	1.0	2.0	3.6	1.6	0.4	.	.	10.0
f	1	.	1	1	2	3	6	12	5	1	.	.	3
09h. n	.	.	.	.	0.6	1.2	1.2	3.6	1.0	0.2	.	.	7.8
f	.	.	.	.	2	4	4	12	3	1	.	.	2
12h. n	.	.	.	.	0.4	0.2	1.0	2.6	1.4	.	.	.	5.6
f	.	.	.	.	1	1	3	8	5	.	.	.	2
15h. n	.	.	0.2	0.2	0.4	0.2	2.0	2.2	1.6	0.4	.	.	7.2
f	.	.	1	1	1	1	6	7	5	1	.	.	2
18h. n	.	.	0.2	0.6	1.0	0.4	0.6	2.4	1.4	0.6	.	.	7.2
f	.	.	1	2	3	1	2	8	5	?	.	.	2
21h. n	.	.	0.2	0.4	1.4	0.2	1.8	1.0	0.4	0.4	.	.	5.8
f	.	.	1	1	5	1	6	3	1	1	.	.	2
o	0.1	0.0	0.3	0.8	2.4	2.8	5.5	8.2	5.2	0.9	0.1	0.0	2.2
h	1	.	2	6	18	20	41	61	37	7	1	.	193
i	x	x	x	x	3.2	4.0	4.0	3.8	3.1	x	x	x	3.5
☉	.	x	75	70	67	76	72	56	66	82	.	x	66
☉, ∇	100	x	25	30	33	21	23	44	34	18	100	x	28
☉	.	x	.	.	.	3	5	.	.	.	.	x	6

Table PI.3.1. Analysis of monthly rainfall occurrence at 3-hour intervals. n is mean number of occurrences and f mean percentage frequency. o is mean percentage frequency for any of these hours, h mean duration of precipitation in hours, and i mean intensity in mm/h. Percentage of precipitation types: ☉ thundery showers; ☉, ∇ rain or showers; ☉ drizzle.

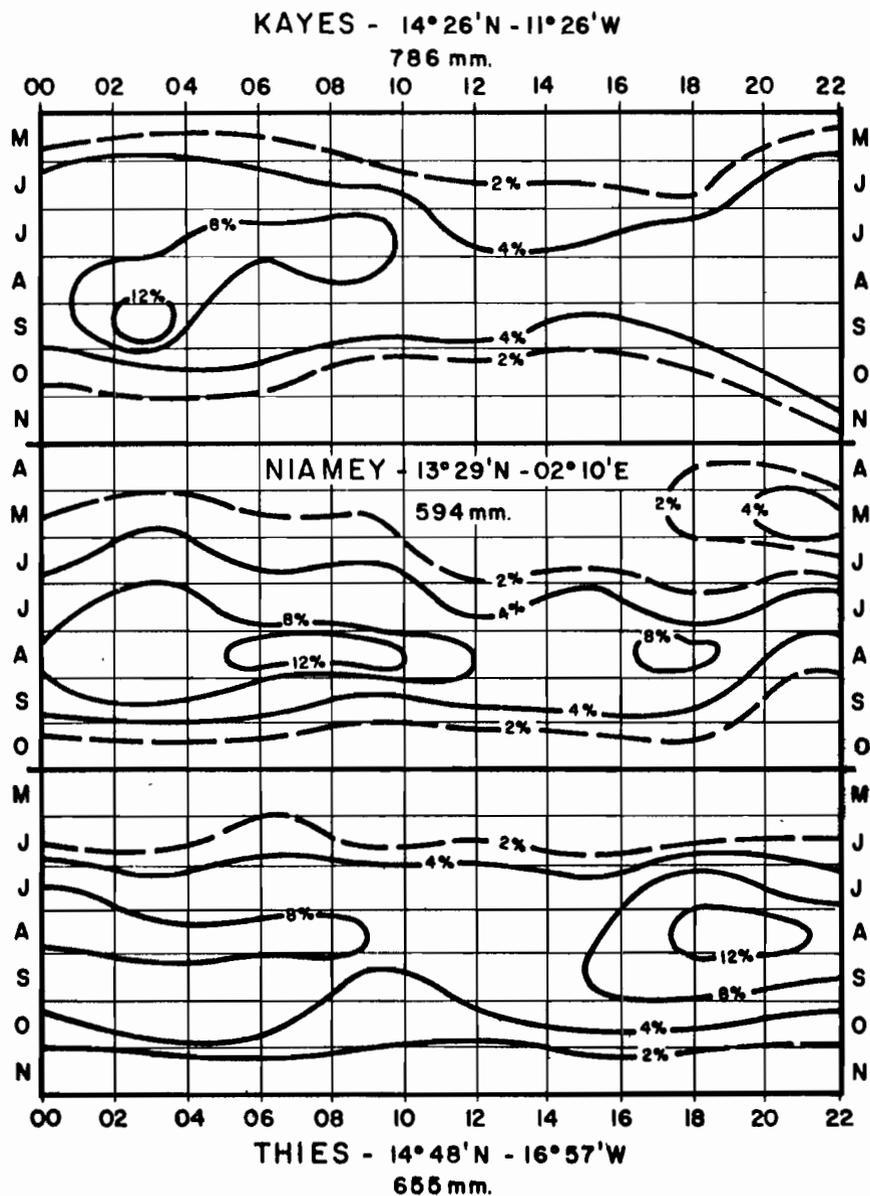


Fig PI.3.2. Lines of equal monthly mean percentage occurrence of rainfall plotted at different times of the day for three places of approximately the same mean annual rainfall and latitude. Maximums occur at 03, 08 and 19 hours respectively.

3.3. A comparison of the results shows that maximum intensity occurs at different times of the day at different places. This disparity is illustrated at Fig PI.3.2. where three stations of approximately the same annual rainfall are compared. It rules out the possibility of the precipitation being mainly due to diurnal heating, although it is showery in nature. It agrees with the suggestion found in a publication of the British West African Meteorological Services (1960) that, as rainfall is mainly due to

disturbance lines moving across the Area and of an average life of several days, the time of maximum diurnal occurrence at a given place would depend on its distance from source areas of these disturbance lines; where, presumably, they would originate at a certain time of the day controlled by diurnal heating.

Further supporting evidence is provided by Kano and Zinder which, situated approximately on the same meridian across the path of disturbance lines, show similarly timed maximums in diurnal rainfall intensity, Fig PI.3.3, although the actual amounts involved are appreciably higher at Kano.

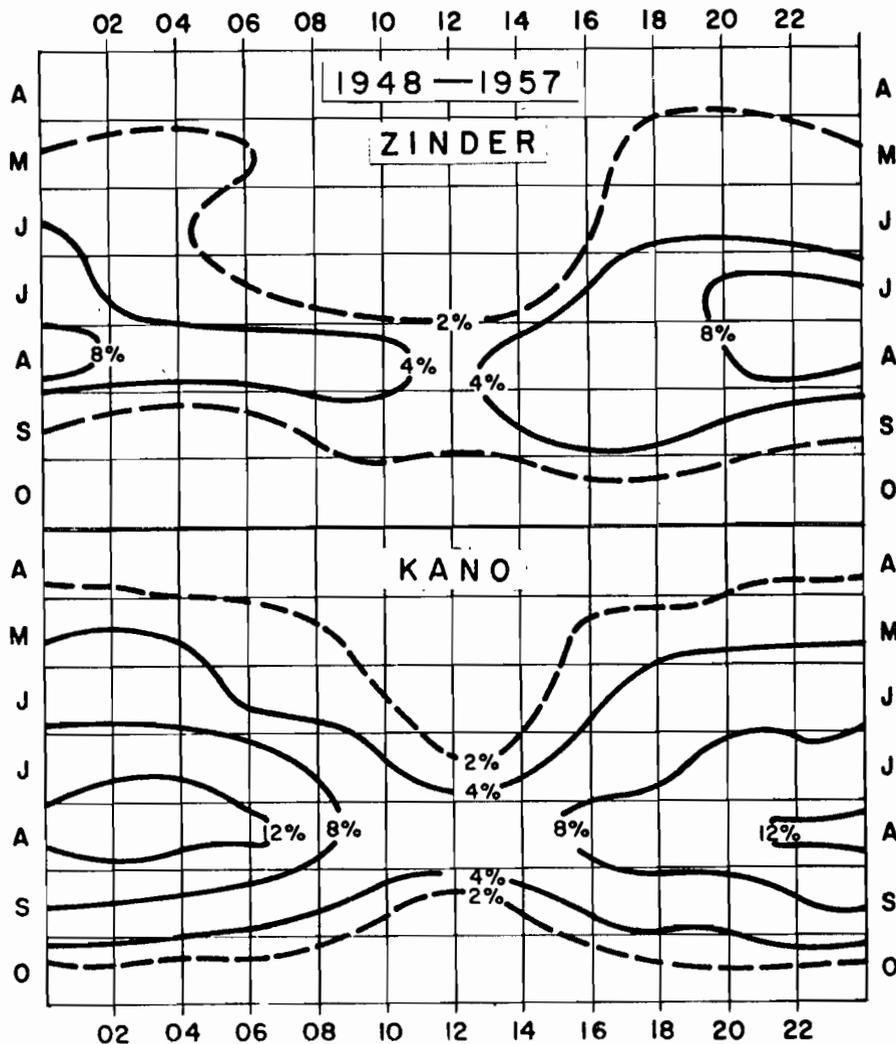


Fig PI.3.3. Diurnal variation of mean intensity. Lines of equal monthly mean percentage frequency of rainfall. Both places lying on the same meridian 200 km apart show maximums around 2400.

3.4. This occurrence of different diurnal maximums of precipitation may have significant agricultural effects, and merits further study.

4. Mean Intensities

4.1. It may be recalled that in order to measure rainfall intensity over short periods, otherwise than by reading rain gauges at regular intervals, rainfall recorders are necessary. Apart from instruments measuring intensity directly, which are difficult to maintain and from which practically no records are available, rainfall recorders in our area are of two main types : those which use a siphoning mechanism, which appears subject to errors and easily gets out of order in tropical countries, and those which are based on tilting buckets, which have been found far more reliable.

4.2. There are relatively few of these recorders in the Area and furthermore only a small proportion of the available records have been published. Published information available mostly takes the form, as part of the description of the weather at a station, of the greatest amount observed to have fallen during periods such as 15 min, 30 min, and 1 hour, annually or during a specified number of years; see for example ASECNA (1964). This will be discussed under Intensity-Duration Studies below.

4.3. Concerning mean intensity in mm/hour Delorme (1963), in his analysis of diurnal variation of rainfall occurrence, which has already been mentioned (see section 1), having subdivided precipitation into rain, hail and drizzle and pointed out that hail is very rare and that drizzle mainly occurs south of our area, finds that the rain which, as already explained, falls almost exclusively as showers, often thundery, does so at a mean intensity of 4 mm/hour.

OUAGADOUGOU	1.6	5.1	5.1	3.5	3.4	4.6	4.1	3.9
BOBO-DIOULASSO	4.2	6.2	6.0	4.4	5.4	5.4	3.0	4.9
BAMAKO	—	3.1	4.7	4.1	4.6	5.0	3.9	4.2
GAO	—	—	3.3	4.4	5.5	3.2	—	4.1
KAYES	—	—	4.0	4.2	4.8	4.1	3.2	4.1
NIAMEY	—	3.2	4.0	4.0	3.8	3.1	—	3.6
ZINDER	—	4.1	3.9	4.4	5.2	4.3	—	4.4
DAKAR	—	—	—	3.1	3.2	5.2	3.4	3.7
THIES	—	—	2.0	3.7	4.3	4.6	3.2	3.5
	2.9	4.3	4.1	4.0	4.5	4.4	3.5	4.04

Table PI.4.1. Mean intensities in mm/hour during months when it rains for more than 10 hours.

This is shown at Table PI.4.1. giving mean intensities extracted from his paper for some stations in our Area.

4.4. These intensities are two to four times greater than in Western Europe or the Mediterranean basin. This is not the result of exceptionally heavy rains, but of the preponderance of medium to high rainfall intensity and the rare occurrence of low rainfall intensity. It may be construed as meaning that, on the average, as long as field capacity has not been reached, rain mostly falls at a rate within the absorbing powers of the soil.

Furthermore, most rainstorms being of medium to high intensity would not be expected to cause cataclysmic erosion. On the other hand, the relatively high mean intensity implies that for an equal amount of rainfall there might be more sunshine during the rainy season than in temperate countries.

## 5. Intensity-Duration Studies

Intensity-duration measurements record the amounts of rain falling during various specified and relatively short intervals.

5.1. Local studies by Delorme, notably one at Ziguinchor (1962), of data obtained with tilting recorders are for stations with too high a rainfall to be considered as forming part of our Area. Some of his conclusions, however, are worth noting in as far as they might apply to it as well. He finds that high rainfall intensities are likely to occur at any time during the rainfall season and adds that they appear to be the result of exceptional conditions of which the occurrence varies greatly from year to year. This points out to their being due to special synoptic situations, a question which deserves systematic study.

5.2. A note of the British West African Meteorological Services (195?) discusses intensity-duration obtained from autographic records for three stations of which one, Kano, is in our Area. An eight-year series was available and was fitted to a logarithmic function involving four constants specific to the station. Using this theoretical relation, curves were calculated for intensity-duration expectations for periods up to 10 years and plotted using logarithmic coordinates, Fig PI.5.1.

5.3. The subject of intensity duration is also treated by Brunet-Moret of ORSTOM (1964) in the second part of his analysis (see subsection PI.2). After a critical examination of available data, from tilting bucket pluviographs, 145 station years derived from 58 stations from Senegal to Chad between the 200 and 1200 mm isohyets were retained for analysis. This was not thought sufficient to allow attempts at fitting distribution laws to the sample and limited analysis to a consideration of empirical distribution. Intensities at various durations were measured graphically on the recordings and separated into classes according to daily rainfall. Mean intensity durations of these classes were plotted on double logarithmic paper, thus assuming a type of relation similar to that used for the analysis of the Kano data. Fig PI.5.2.

5.4. It can be seen that the graphs of different classes show good parallelism. In all cases, however, there is a definite break in the alignment of the points. This is caused by rainfall being mainly due to disturbance lines, most of which have a maximum followed by rainfall of far less intensity, as can be seen from the hystogram shown at Fig PI.5.3. and from diagram MC.3.1.

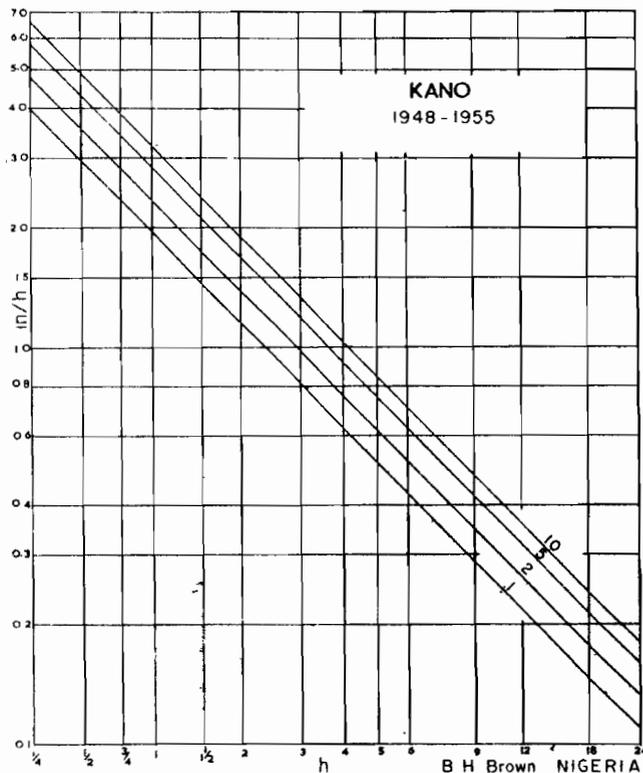


Fig PI.5.1. Intensity durations to be expected once in a given number of years.

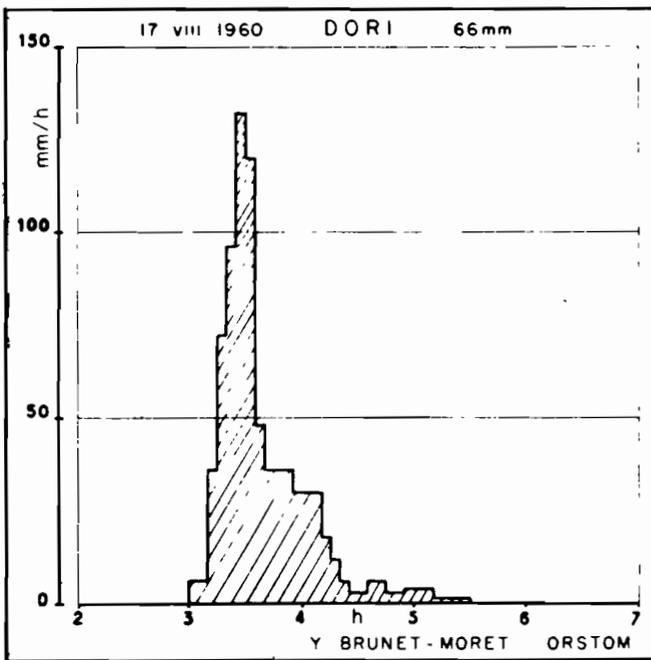
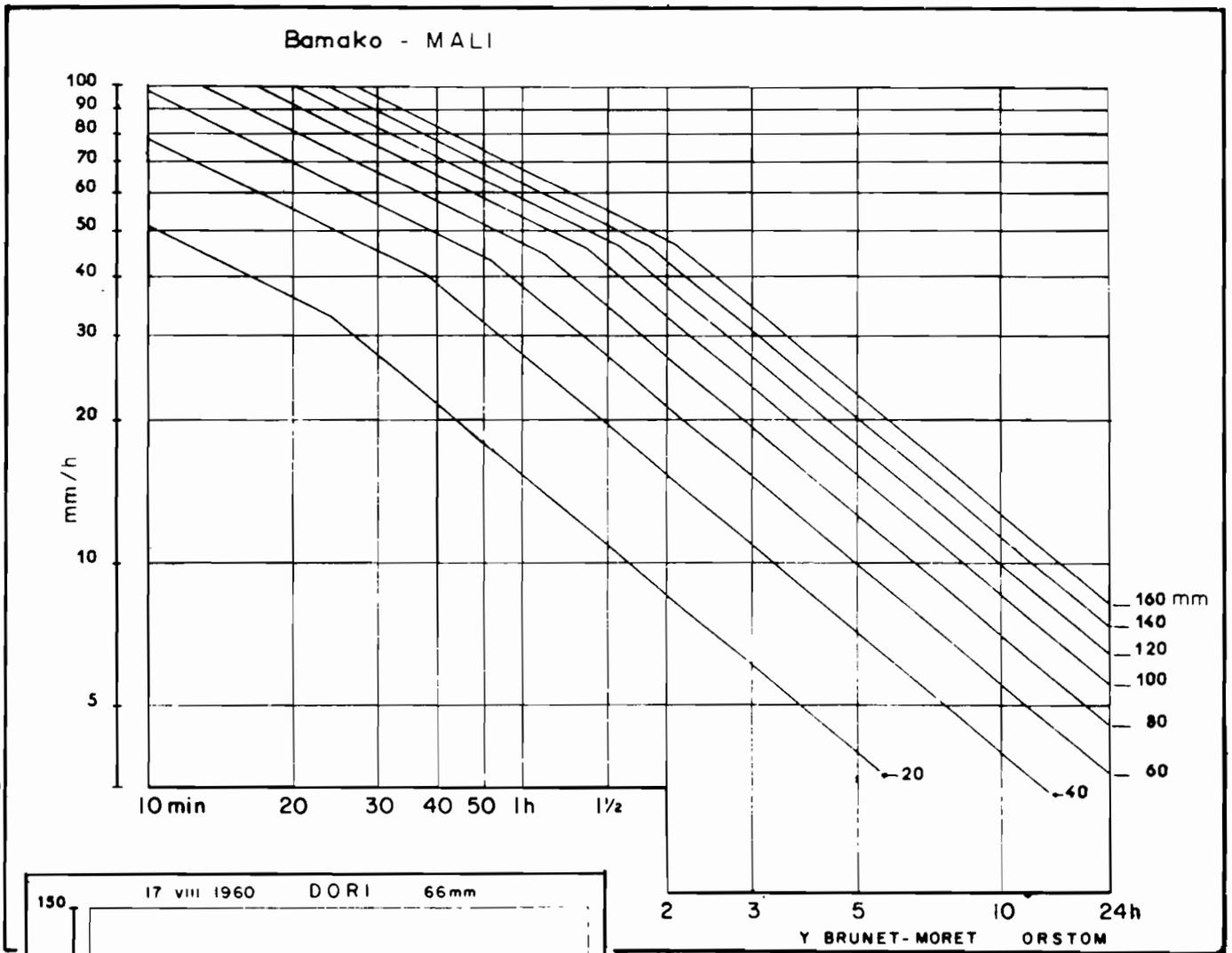


Fig PI.5.2. (Above) Mean intensity durations corresponding to given daily rainfalls, indicated by diagonal lines. (Plotted on double logarithmic paper.) The breaks in the lines separate main showers from trailing precipitation.

Fig PI.5.3. (Left) Histogram of disturbance line, showing main shower and trailing precipitation. See also diagram MC.3.1, which gives a cross section.

200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	Annual mm.
1.19	1.18	1.16	1.14	1.12	1.10	1.08	1.05	1.02	0.99	0.95	0.91	Coefficient

Fig PI.5.4. Correction coefficient for values obtained from graphs PI.5.2., in terms of mean annual rainfall.

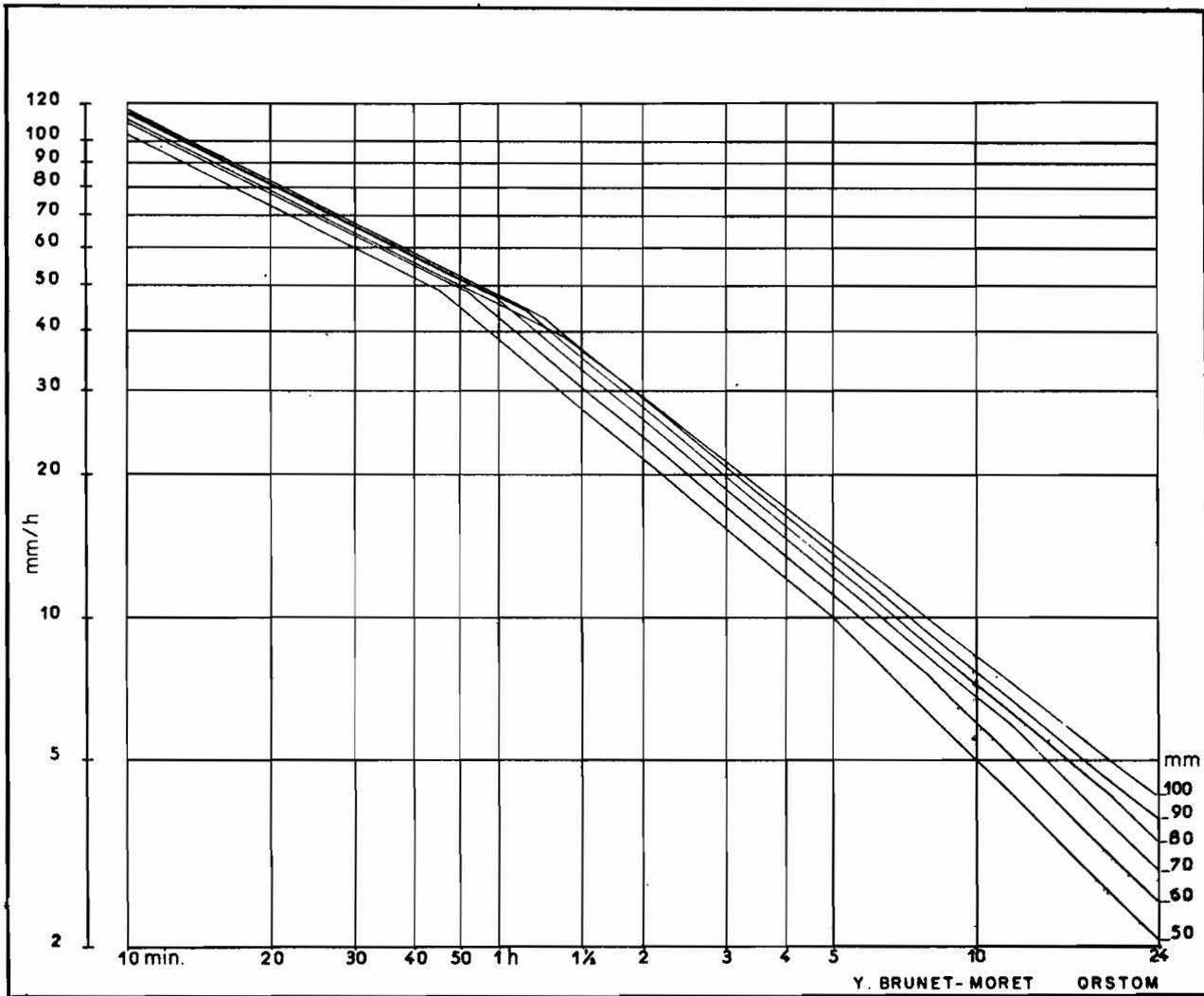


Fig PI.5.5. Intensity-duration probabilities once a year in terms of daily rainfall.

5.5. The intensity-duration characteristics so obtained were subdivided into zones of mean annual precipitation, increasing by steps of 100 mm. It was found that, for equal daily heights, the intensities, especially the high ones, increase with decreasing mean annual rainfall. This may be taken to mean that, in the north, where mean annual rainfall is less, duration of similar individual spells of precipitation is also proportionately less, but mainly at the expense of the preliminary and trailing rains, and thus that the same durations would correspond to more powerful disturbances consequently yielding higher intensities. Thus the values of Fig PI.5.2. need to be multiplied by an annual rainfall factor given at Table PI.5.4. to obtain expected intensities. This is only valid for the zone between  $0^{\circ}$  and  $12^{\circ}$  West. Outside this zone data are insufficient to determine annual rainfall factors accurately.

5.6. Taking into account the results of the analysis of 24 hours amounts (subsection PI.2) we now have enough data for mean intensity-duration information at any point : the 24 hours maximum height during a chosen period (one year, two years, etc.) at the specified point having been obtained from charts such as PI.2.4. which gives probabilities once a year, this height is taken to graphs PI.5.2. and the intensities obtained multiplied by a coefficient taken from table PI.5.4.

At Segou, for instance, according to chart PI.2.4. about 60 mm in a day is expected once a year and annual rainfall is 725 mm. For a period of 20 min mean intensity will be 70 mm/h. This must be further corrected by a factor appropriate to 725 from Table PI.5.4., say 1.1, yielding an answer of 77 mm/h during 20 min once a year.

Using these relations, it is possible to draw diagrams corresponding to the maximum intensity-duration expectations during a specified number of years and that for probabilities once a year is shown at Fig PI.5.5.

There again, it must be pointed out that these estimates can at best be looked upon as approximations.

References PI

- Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar.  
1964                   Aperçus sur le temps en Afrique Centrale et Occidentale.  
                          154 p.
- British West African Meteorological Services.    Meteorological Notes No. 2:  
(Undated.            Preliminary note on the rainfall of Nigeria.    Lagos,  
195?)                   Survey Department.    68 p.
- British West African Meteorological Services, Nigeria.    Meteorological Note  
1960                   No. 9:    Diurnal Variation of Rainfall.    Lagos, 6p  
                          + charts.    See also Nigerian Meteorological Service  
                          (Note 10).
- Brunet-Moret, Y.    Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique  
1964                   Occidentale.    Paris, ORSTOM, 5 vols.
- Delaunay.    Pluviométrie du Sénégal: statistiques mensuelles et quinzaires  
1952                   (moyennes et extrêmes).    Saint Louis, Meteorological  
                          Service of Government of French West Africa.
- Delorme, G.A.    Intensité des précipitations à Ziguinchor.    Dakar, ASECNA,  
1962                   13 p.
- Delorme, G.A.    Repartition et durée des précipitations en Afrique Occidentale.  
1963                   Monographies de la Météorologie Nationale No. 28.  
                          Paris, Ministère des Travaux Publics et des Transports.  
                          26 p.
- Nigeria.    Meteorological Service.    Meteorological Note No.10:    Heaviest daily  
1960                   rainfall.    Lagos, 3 p + charts.    See also British  
                          West African Meteorological Services. and British West  
                          African Meteorological Services, Nigeria.    (Notes 2 and 9)
- Roche, M.    Hydrologie de surface.    Paris,    Gauthier-Villars:  
1963                   ORSTOM.    430p.
- Service Météorologique Fédéral de l'Afrique Occidentale Française.  
1956                   Fréquence moyenne des fortes pluies.    Dakar.    17p.

Spatial Variability and Spells. PS

Spatial Variability

The variation in the differences in rainfall falling on stations in the Area also deserves attention and will be discussed at two scales of distances.

1. Mesoscale variation

May to September 1953 NIAMEY

1.1. First, at the local or mesoscale, we have to consider the differences in the amounts which may fall on spots not very far from each other within a given region and under the same general weather conditions. These differences are due to the fact that rain often falls in scattered separate packets. Variations of this kind would be more considerable with scattered showers than with the more continuous bands of precipitation associated with disturbance lines. These local differences would be expected to be more pronounced during short periods like days and to cancel out to a large extent when added up over periods like years.

Mean difference in daily rainfall	7.27
Mean daily rainfall Niamey Ville	11.67
Mean daily rainfall Niamey Aero	11.99
Mean daily difference expressed as percentage of mean daily rainfall at two places	61%
Annual rainfall Niamey Ville	688.6
Annual rainfall Niamey Aero	767.2
Annual difference expressed as percentage of mean of two annual rainfalls	11%
Days of rain at Niamey Ville	59
Days of rain at Niamey Aero	64
Days when it rained at either place	78
Days when it rained at only one	32

1.2. An analysis of their importance will define the extent to which extrapolation can be carried out. For instance, at Niamey Ville and Niamey Aero, which are 5 km apart, the mean daily difference between the rainfall at the two stations during the year 1953 was 62% of their average daily rainfall. Table PS.1.1. During the same year, however, the difference between the annual rainfalls was only 11% of their mean. This same proportion averaged over a series of 10 years was 12%. PS.1.2. It is felt that more complicated or extensive analysis is not needed to make this point. An important conclusion which can be derived is that for short periods like days the amount of rain at an observation station cannot be assumed to be the same as that which has fallen at another place a few kilometres away for which interesting phenological or yield data are available but not rainfall. For periods of a year and for mean annual rainfall on the other hand it is safe to extrapolate for places close to each other when there are not marked topographical differences.

Table PS.1.1. Comparison between daily rainfall at Niamey Aero and Niamey Ville, mm.

Year	Aero	Ville	Diff.	Diff. % Mean
1943	860	662.6	197.4	26
1944	369	308.8	60.2	18
1945	557.1	571.5	14.4	03
1946	725.2	645.8	79.4	12
1947	431.7	499.8	68.1	15
1948	591.6	657.5	65.9	11
1949	429.4	357.5	71.9	18
1950	609.3	596.5	12.8	02
1951	541.5	566	24.5	04
1952	980	900.5	79.5	08
				11.5

Table PS.1.2. Comparison on between annual rainfalls at Niamey Aero and Niamey Ville. Amounts in mm.

2. Large scale variations.

2.1. Secondly, at a broad geographical scale, spatial variability may have interesting economic implications. For instance, comparing annual rainfall averaged at two groups of three stations each in Senegal and Chad a negative correlation coefficient of -0.51 was obtained. Table PS.2.1. This means that there is a tendency for drought or excessive rainfall not to occur in those two countries during the same years.

Year	CHAD Group Fort Lamy, Abéché, Am-Timan	SENEGAL Group Matam, Dakar Tabacounda
1952	2060	2205
1953	2237	1714
1954	2516	2166
1955	2060	2108
1956	2060	2283
1957	2085	2041
1958	1779	2266
1959	2399	1682
1960	1810	1877
1961	2226	1942
1962	2009	1982
Means	2113	2024

2.2. Within each group the rainfall of one station was tested against the total. Table PS.2.2. In both cases there was a positive correlation, but in the case of Dakar, which has a regime of its own on the coast, it was much weaker than in that of Fort Lamy.

2.3. At the scale of an area covering several countries this type of localised drought would be economically less serious than if all the countries were affected the same year. The actual meteorological features involved deserve further consideration. Unevenness of rainfall may be due to an oblique average position of the rain-bearing convergence zone or to centralisation of its activity in different sectors.

Correlation Coefficient  $r = -0.52$   
Significance  $t = 1.83$

Table PS.2.1. Correlation between annual rainfalls of two groups of stations at west and east of Area.

1952 - 1962	
Comparison Dakar vs. Senegal Group	Comparison Fort-Lamy vs. Chad Group
Correlation coefficient $r = +0.48$	Correlation coefficient $r = +0.75$
Significance $t = 1.7$	Significance $t = 3.4$

Table PS.2.2. Comparison of rainfall at Dakar and Fort Lamy with the regional group within which they are situated.

Spells

It is useful to know how days of rain are grouped during the moist season and a sample study of the rainfall at Zinder was carried out.

3. Wet Spells.

3.1. For the normal period 1931-1960 the average position is as follows :

	May	June	July	Aug	Sept	Oct
Days of rain	3.5	6.3	11.3	14.0	7.9	0.9
Daily mean amount(mm)	7.7	8.7	13.5	16.6	9.0	7.8

Table PS.3.1. Daily mean rainfall per day of rain.

The mean number of spells of different duration was estimated and is shown at Table PS.3.2. as well as the proportion of the monthly mean days of rainfall due to each class of spell.

It is seen that a large proportion of the rain falls as spells of one and, to a lesser extent, two days, reflecting the disturbance lines type of rainfall regime.

3.2. These frequencies are expressed as percentage probabilities at Table PS.3.3. in terms of wet days. Thus in June the chances that a dry day will be succeeded by a day of rain are 21.1%, the chances that a day of rain will be succeeded by another, 7.0%, and so on. This is worth considering when planning agricultural operations. The top rows therefore give the probability of a day of rain belonging to a spell of a given length whilst below are quoted the chances of a day of rain following the conditions on the column to the left.

ZINDER 1931-1960

	Length of spell - days					
	1	2	3	4-5	6-8	8
May	2.5 70%	0.5 24%	0.1 6%			
June	4.2 68%	0.7 21%	0.2 11%			
July	5.5 50%	1.1 20%	0.6 15%	0.2 8%	0.1 7%	
Aug	4.6 33%	1.4 21%	0.8 17%	0.7 21%	0.1 6%	0.03 2%
Sept	4.2 58%	1.1 28%	0.3 11%	0.1 .8%		
Oct	0.5 70%	0.1 17%	0.03 13%			

Table PS.3.2. Monthly mean number of wet spells of different lengths and percentage of rainy days they contained during the months of the rainy season.

Z I N D E R 1931-1960

Length of spell	1	2	3	4 to 5	6 to 8	More than 8
Probability of a rainy day due to above spells						
May	8.0%	2.9%	1.0%			
June	14.1%	4.7%	2.3%			
July	16.9%	7.1%	4.2%	3.1%	1.9%	
August	14.8%	9.2%	7.9%	9.4%	1.9%	0.1%
September	14.0%	7.4%	2.8%	2.0%		
October	1.7%	0.4%	0.3%			
Previous spell	0	1	2	3	5	8
Total probability of another rainy day after above spells						
May	11.9%	3.9%	1.0%			
June	21.1%	7.0%	2.3%			
July	33.2%	16.3%	9.2%	5.0%	1.9%	
August	43.3%	28.5%	19.3%	11.4%	2.0%	0.1%
September	26.2%	12.2%	4.8%	2.0%		
October	2.4%	0.7%	0.3%			

Table PS. 3.3. Above, percentage probability of occurrence of a wet day due to a spell of a specified length. Below, total probability of a day of rain due to a spell of any length after a specified number of days. The values in the lower half of the Table are the sums, starting from the same column, of those to be found in the upper half. (Lengths of spells are given in days.)

3.3. Some of the variation in the annual occurrence of these spells during the thirty-year series was also determined. For the month of May, the occurrence of spells of different length was classified as shown in Table PS.3.4. (During two of the years, May was completely dry.)

Z I N D E R 1931-1960

Number of spells	Spells of one day							Mean	Spells of three days			Mean
	0	1	2	3	4	5	6		0	$\frac{1}{2}$	1	
Number of years	3	6	9	5	3	2	2	2.5	28	0	2	0.1
Number of spells	Spells of two days							0.5	Spells of four days			
	0	$\frac{1}{2}$	1	2					0	$\frac{1}{2}$	1	
Number of years	19	1	9	1				29	1	0		

Table PS.3.4. Occurrence of wet spells in May at Zinder (1931-1960).  $\frac{1}{2}$  means a spell shared with an adjacent month.

3.4. Thus, projecting the past on to the future, rather than saying that the average probability of occurrence of one-day spells in May is 2.47, it is more accurate to quote three chances out of thirty of their being no spells of one day at all, six of only one such spell, nine of two, five of three, and so on. For the longer spells, as the number of classes decreases, it is seen that the thirty-year average expectations become more representative, and may be taken as sufficient for the purpose.

#### 4. Dry spells

4.1. The same technique has been used to analyse the occurrence of dry spells. Results are shown in Table PS.4.1 below.

Z I N D E R 1931-1960

Month	Length of spell in days						
	1	2 to 3	4 to 6	7 to 10	11 to 15	16 to 30	More than 30
May	0.6	0.6	0.7	0.4	0.1	0.2	0.5
June	1.2	1.8	0.9	1.1	0.6	0.2	0.06
July	3.2	2.3	1.4	0.4	0.07	0	0
August	3.1	3.1	1.0	0.3	0	0	0
September	2.7	1.7	1.2	0.01	0.1	0.05	0.3
October	0.1	0	0.07	0	0.03	0	0

Table PS.4.1. Monthly mean occurrence of dry spells of specified lengths during the summer, at Zinder.

Dry spells are, on the average, much longer than wet spells - as could be expected, since on the average it only rains one day in three during the rainy season, while even at the height of the rainy season half the days are dry, and in May and October there is no rain four-fifths of the time. It will be seen that very long spells occur. Their importance must be assessed in terms of the availability of water, which is most critical at the beginning of the moist season. This topic will be discussed again in another section.

#### 5. Consecutive dry years

5.1. The extent to which dry years have followed each other in the past is also important. It has a bearing on food reserves. The alternation of dry and wet years may follow short or long cycles, or may be entirely random.

5.2. A sample empirical analysis was done for Bambey in Senegal, which has an annual mean of 680 mm. At Table PS.5.1. sliding two-year means for 31 years have been arrayed. The limits of their quintiles show a distribution which is very similar to that of annual rainfall, suggesting a random distribution at that biennial scale.

It is seen that two consecutive years having a mean of about 550 mm or less, which is about two-thirds of the mean annual rainfall, have occurred one-fifth of the time, and two consecutive years having a mean below the 30-year mean occur practically half of the time.

5.3. At Table PS.5.2. the occurrence of consecutive years with less than 500 and 600 mm have been tabulated. It is seen that during the 30 years analysed there were two occasions when less than 500 mm fell on two consecutive years, this presumably constituting a serious drought. The tabulation for less than 600 mm shows two spells of four years, at the end of which the boundaries of critical crops would be altered to a marked extent.

BAMBEY Senegal 1931-1960

Quin.	Sliding Means 2 Year	Years
I	1123	1267
II	762	784
III	713	726
IV	629	565
V	548	493
VI	455	410

Table PS.5.1. Quintiles and extremes of annual rainfall and sliding two-year means.

BAMBEY Senegal 1931-1960

500 mm		600 mm			Upper Limits
2	3	2	3	4	Number of years in group
2	0	1	1	2	Occurrence

Table PS.5.2 Occurrence of groups of consecutive years below selected annual rainfall.

BILAN HYDRIQUE - I.    CONSIDERATIONS AGRONOMIQUES  
WATER BALANCE - I.    AGRONOMIC CONSIDERATIONS

Considerations Agronomiques - BH

1. Généralités.

1.1. L'Agroclimatologie peut être définie comme "l'étude des réactions des cultures aux conditions du milieu climatique, en vue notamment de délimiter leurs aires d'adaptation et d'évaluer cette adaptation en termes de productivité relative".

Le milieu climatique a deux composantes :

- le climat atmosphérique, ou climat proprement dit.
- le climat édaphique, ou climat du sol.

Le climat édaphique dépend lui-même :

- d'une part du climat atmosphérique
- d'autre part des caractéristiques physiques du sol, relief y compris, dont le rôle est considérable dans la réalisation du bilan hydrique réel.

Mais on se heurte encore aujourd'hui, dans l'évaluation de ce bilan hydrique réel, à de telles difficultés, si on ne procède pas à des mesures directes de l'humidité du sol, qu'on s'est fixé ici de définir le climat de la Région agroclimatique en général, non par rapport au milieu climatique intégral, mais à partir du climat atmosphérique, c'est à dire en fonction du bilan hydrique théorique.

Par ailleurs, plus on s'élève dans l'atmosphère, au-dessus de la couche au contact du sol où se détermine le micro-climat, plus les valeurs des éléments climatiques ont tendance à être homogènes pour des points de plus en plus éloignés, concernant des surfaces de sol de plus en plus étendues et donc de plus en plus hétérogènes. A l'homogénéité du climat correspond donc généralement l'hétérogénéité du sol.

On peut donc définir la région naturelle en agriculture, ou "Région agroclimatique" comme celle qui correspond à une certaine "unité de climat" pouvant recouvrir une "diversité de sols" physiquement distincts. Chacun de ces sols délimite alors ce qu'on appellera un "district agroclimatique", qu'on pourra caractériser expérimentalement par un bilan hydrique réel.

Suivant cette conception, un même climat atmosphérique régional ou sous-régional, indivisible à ce niveau, se scinde en milieux climatiques distincts selon la nature physique des sols qu'il recouvre.

C'est en rapport avec le bilan hydrique qu'on examinera succinctement ci-après les besoins et tolérances des cultures en milieu tropical.

## 2. Considérations Physio-Climatiques.

2.1. On se placera exclusivement ici dans le cas de la culture sèche. Les besoins en eau ne seront donc pas évalués en vue de leur satisfaction totale ou partielle, comme c'est le cas en culture irriguée, mais dans le but de tirer le meilleur parti des disponibilités.

Ces besoins sont fixés par le rayonnement net et le pouvoir évaporant de l'air dont les valeurs instantanées ont sur le rendement une incidence qui peut être considérable. Cependant la consommation d'eau globale d'une culture est avant tout déterminée par le temps durant lequel elle occupe le sol : ce temps est fonction, d'une part de l'espèce et de la variété, d'autre part de la date du semis, de la photopériode quand la variété est photopériodique, et de la somme de température.

En fait la durée de la saison humide et sa position dans le temps ont généralement plus d'importance que la répartition des disponibilités vis à vis des besoins instantanés des cultures au cours de cette saison humide, et surtout que la lame d'eau totale de la saison pluvieuse. Le problème est alors essentiellement d'ajuster les cycles de végétation (croissance et développement), caractérisés par leurs événements phénologiques, aux longueurs et limites probables de la saison humide et à ses événements climatiques remarquables.

2.2. Les termes de cet ajustement seront cependant considérés à une échelle plus ou moins fine suivant l'objectif :

a) Dans les limites de la "Région agroclimatique", l'échelle sera évidemment celle du bilan hydrique réel. On a en effet défini la région agroclimatique comme correspondant à une unité de climat atmosphérique recouvrant une diversité possible de sols, donc de milieux olimatiques distincts caractérisés par un bilan hydrique réel.

Ces mêmes limites devraient être celles de l'aire d'action de la station élémentaire de recherche agronomique contrôlant, en principe, autant de stations expérimentales ou points d'essai qu'il y a de grands "types texturaux" de sols.

Le bilan hydrique réel tient compte :

- des caractéristiques locales (ou mésoclimatiques)\* de pluviosité et d'évapotranspiration pour des périodes de l'ordre de la semaine ou de la décade : ce sont les caractéristiques qui composent le climat de l'exploitation agricole.

- des caractéristiques hydriques des sols, profondeur et relief compris : le bilan sera, dans toute la mesure du possible, modulé en fonction du potentiel efficace\*\* de l'eau du sol, lui-même sous la dépendance non seulement du taux d'humidité mais aussi de l'intensité de l'évapotranspiration, du volume du sol et de sa conductibilité pour l'eau.

- du cycle de végétation de la culture pour toutes ses phases reconnues. Le découpage de la saison humide se fera non seulement en fonction de ses événements climatiques mais aussi des événements phénologiques de la plante cultivée.

---

\* L'échelle microclimatique d'espace et de temps étant celle de la recherche au champ.

\*\* M. Hallaire : "Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement", dans "L'Eau et la Production Végétale". INRA 1964.

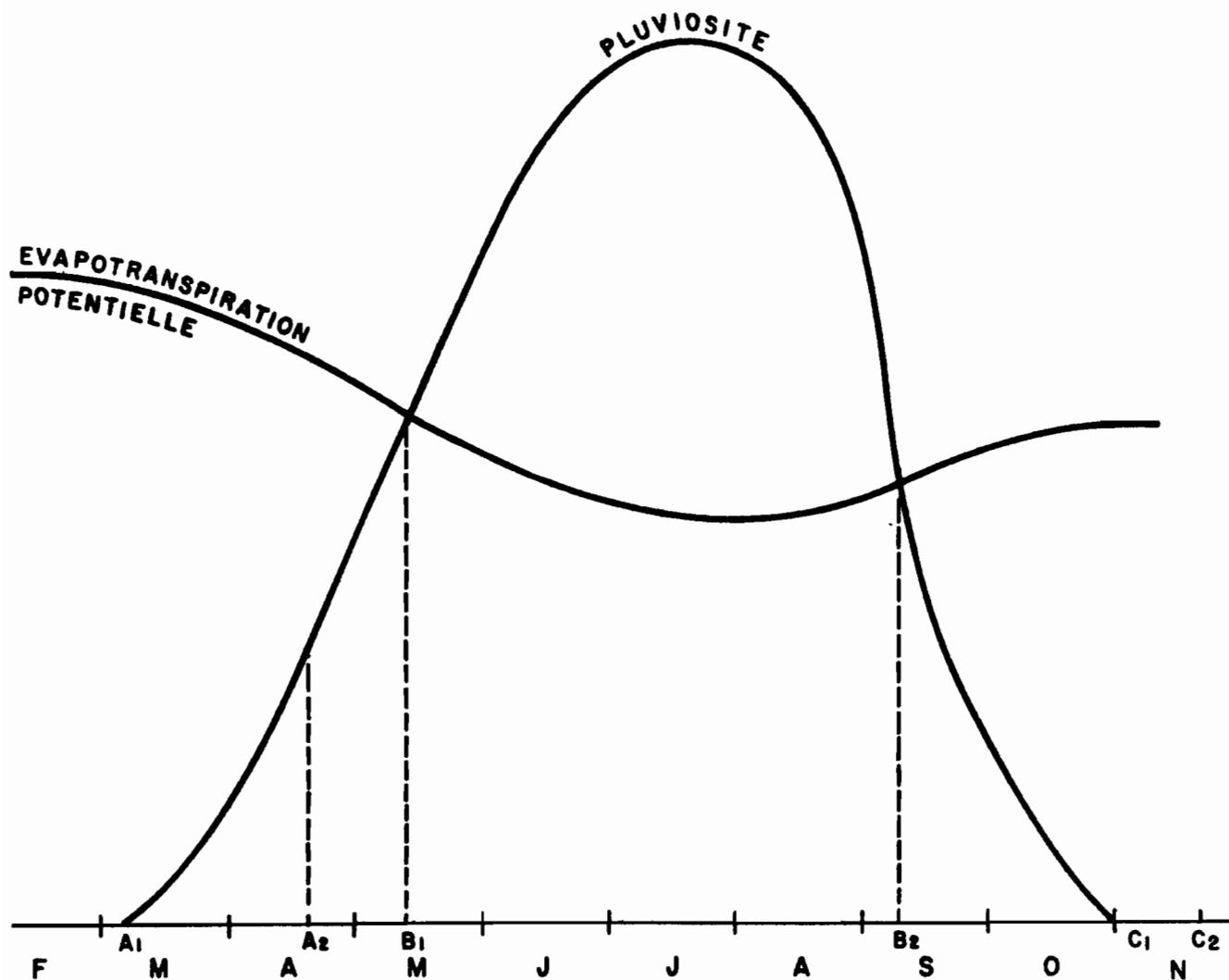


Fig BH.2.1.  $A_1$  : début des pluies.  $A_2$  : début de la "période intermédiaire", date à laquelle la pluviosité est égale à la moitié de l'évapotranspiration potentielle.  $B_1$  : fin de la "période intermédiaire", début de la "période humide".  $B_2$  : fin de la "période humide".  $C_1$  : fin des pluies.  $C_2$  : épuisement des réserves en eau du sol.

b) Dans les limites de la "Zone agroclimatique", l'échelle sera celle du bilan hydrique théorique de la région. On définira en effet plus loin la zone agroclimatique comme correspondant à un type de climat (aride, subaride, semi-aride, ...) permettant de pratiquer un système de culture d'intensivité déterminée\* et recouvrant des unités climatiques (régions) bien différenciées. La zone comportera donc en principe autant de stations élémentaires de recherche agronomique qu'il y a de régions agroclimatiques.

Le bilan hydrique théorique de la région ne tiendra pas compte des caractéristiques des sols et sera établi pour des périodes de l'ordre du mois, généralement de durée variable d'ailleurs, à partir des valeurs climatiques (moyennes des valeurs locales) d'évapotranspiration et de pluviosité. Parallèlement les caractéristiques de végétation des cultures ne seront aussi considérées que pour des événements phénologiques primordiaux : semis, phase végétative, floraison, fructification. Le découpage de la saison humide tendra à n'être fait qu'en fonction de ses événements climatiques.

2.3. C'est ainsi qu'en première approximation on pourra ne considérer que 3 périodes principales dans la saison humide :

- une 1ère période, la période pré-humide, durant laquelle la pluviosité est globalement inférieure à l'évapotranspiration potentielle  $E_T$  et représente, dans le cas d'une végétation permanente couvrant le sol, l'évapotranspiration réelle  $E_R$ . Elle va de la première pluie, en  $A_1$  (fig. B.H.1) jusqu'au moment, en  $B_1$ , où la pluviosité équilibre juste l'évapotranspiration potentielle, c'est-à-dire au point où se recourent (pour des niveaux de probabilité à définir suivant les besoins dans chaque cas particulier) les courbes de pluviosité et d'évapotranspiration. A la fin de cette période, si la culture couvre le sol (ce qui n'est généralement pas le cas pour des cultures annuelles), le bilan hydrique est considéré comme nul.

- une 2ème période, la période humide, durant laquelle la pluviosité est globalement supérieure à l'évapotranspiration potentielle qui représente alors, en première approximation, la valeur de l'évapotranspiration réelle d'une culture couvrante. Elle est entièrement située entre les 2 points,  $B_1$  et  $B_2$ , où se recourent (aux niveaux de probabilité désirables), les courbes de pluviosité et d'évapotranspiration. A la fin de cette période le bilan est positif.

- une 3ème période, la période post-humide, durant laquelle la pluviosité redevient globalement inférieure à l'évapotranspiration potentielle. Elle se situe entre les points  $B_2$ , où  $P = E_R = E_T$ , et le point  $C_2$  où l'évapotranspiration réelle s'annule, les réserves hydriques exploitables par la culture étant épuisées. On remarquera que la position de ce point  $C_2$  dépendra donc partiellement de la nature de la culture. Le point  $C_1$  situe la fin des pluies. L'évapotranspiration réelle durant cette période sera fonction de la quantité d'eau du sol et de sa disponibilité, c'est à dire de son potentiel efficace à tout moment. Cette eau est la somme des réserves constituées durant la période humide précédente et des pluies de fin de saison.

---

\* Zone aride : pas de culture sans irrigation; zone subaride : monoculture; zone semi-aride; polyculture extensive, etc... (voir chapitre "Adaptation des Systèmes d'Agriculture").

### 3. Implications Agronomiques.

Ce découpage de la saison humide d'après ses événements climatiques majeurs s'interprète bien en termes d'agronomie :

3.1. La première période correspond en effet à l'époque normale des semis. Un point remarquable de cette période est le moment  $A_2$  où l'évapotranspiration réelle, donc en principe la pluviosité\* est égale au tiers de l'évaporation potentielle  $E_0$  de Penman (pour un albedo de 0,05) ou encore, sensiblement, à la moitié de l'évapotranspiration potentielle  $E_T$  de Penman (pour un albedo de 0,25).

Cette valeur correspond, selon plusieurs auteurs, à l'évaporation réelle moyenne d'un sol nu ou faiblement recouvert de végétation lorsqu'il n'est mouillé que de temps à autre par les pluies. A partir de ce moment le semis deviendra donc en principe possible, en moyenne ou pour tout niveau de probabilité désirable, avec de moins en moins de risques. Pour un semis effectué au moment  $A_2$ , l'évapotranspiration réelle augmentera de façon exponentielle, comme la surface foliaire elle-même, jusqu'au moment où la culture couvrira le sol.

La possibilité, pour une culture, de couvrir le sol au moment  $B_1$ , comme il est souhaitable, dépendra de l'espèce et de la variété, de la densité de plantation et du temps qui sépare  $A_2$  de  $B_1$ , pour un niveau donné de fertilité.

La première partie,  $A_1$ - $A_2$ , de la période préhumide, sera au contraire celle du semis dit "en sec"\*\*. Ce mode de semis, des plus aléatoire, n'est praticable que pour des cultures, comme celle du Mil (*Pennisetum typhoïdeum*), dont les plantules opposent une très grande capacité de résistance aux périodes de sécheresse pouvant survenir après la levée. Ce sera aussi, en régions à pluviosité "limite", l'époque du semis d'une culture marginale dont la durée de cycle exige que soit allongé au maximum son temps réel de végétation.

Le risque d'avoir à refaire une ou plusieurs fois le semis est alors considéré comme compensé par la chance d'obtenir une récolte meilleure. Risque et chance ont des probabilités qui peuvent être estimées dans chaque cas particulier. Il est presque évident cependant que, pour des espèces comme le Sorgho, le Mil ou le Cotonnier, qui n'exigent que 10 à 20 K/ha de semence, le risque ne pèse que peu par rapport à la chance de récolter quelques quintaux supplémentaires.

La période  $A_1$ - $B_1$  est encore normalement celle de préparation du sol en début de campagne agricole, dans tous les cas où il n'est pas possible, comme il est généralement préférable, de l'effectuer à la fin de la saison humide précédente. Cette préparation devient de plus en plus facile à mesure qu'on se rapproche de  $B_1$  pour devenir très difficile (et même parfois impossible en sols lourds) au-delà, parce que le sol se trouve généralement trop mouillé.

La considération du point  $A_2$ , qu'il est possible de situer au niveau de probabilité désirable, donne enfin du début de la saison humide une définition plus concrète finalement que celle qui consiste à fixer le moment de la première pluie dite "efficace".

On distinguera donc bien, par la suite, une saison "humide" qui commence au moment  $A_2$ , d'une saison "pluvieuse" qui commence au moment théorique  $A_1$ . De même, la saison

---

\* Le ruissellement, à cette époque où les risques d'engorgement sont faibles, est supposé nul, dans la perspective d'une agriculture un peu évoluée.

\*\* En fait, il sera toujours possible de semer en sol mouillé à cette époque, à la suite d'une pluie suffisante.

"humide" se terminera au moment  $C_2$  et la saison "pluvieuse" au moment théorique  $C_1$ . La période  $A_2-B_1$  sera appelée période "intermédiaire" et une autre période intermédiaire pourra être délimitée entre  $B_2$  et le moment où la pluviosité, en période post-humide, redevient égale à la moitié de l'évapotranspiration potentielle. On remarquera cependant que ce moment n'aura guère que valeur de repère, sans présenter une signification agronomique aussi intéressante que  $A_2$  en période pré-humide. En période post-humide en effet une partie de l'évapotranspiration réelle est assurée par les réserves en eau du sol.

3.2. Au cours de la deuxième période, les besoins en eau des cultures, alors en état de végétation active, peuvent en principe être assurés de façon optimale ( $E_R = E_T$ ). Du fait du ruissellement cependant, il n'en sera pas toujours ainsi, comme c'est le cas par exemple pour certains sols limoneux de Nord Nigéria. Le plus souvent il y aura comblement du déficit en eau du sol dans la zone exploitée par les racines, et même drainage au-delà.

3.3. Dans ce dernier cas, le profil utile étant saturé, la troisième période s'ouvrira dans les meilleures conditions de maintien d'un état de végétation favorable au rendement. Cet état de végétation sera plus ou moins prolongé suivant les caractéristiques du sol et les valeurs de l'évapotranspiration potentielle.

Les positions relatives du point  $B_2$  et des dates de floraison (ou d'épiaison pour les graminées) des différentes cultures jouent un rôle prépondérant dans la réalisation du rendement. La troisième période permettra en effet à une fraction d'autant plus grande (floraison utile) de mûrir convenablement qu'elle sera elle-même plus longue, plus tardive et que la phase fécondation-maturation de l'élément fructifère sera plus courte. Mais la floraison sera d'autant plus exposée aux pluies de la période humide, et donc à la coulure et aux maladies cryptogamiques que le point  $B_2$  sera plus voisin en deçà, ou plus éloigné au-delà, de la fin de la floraison.

Il est enfin évident qu'une période de sécheresse de mêmes caractéristiques de temps et d'intensité n'aura pas la même signification (ce qui se traduira dans le rendement) si elle survient en  $A_1-A_2$  ou  $A_2-B_1$  ou  $B_1-B_2$ ... Une pluie de même hauteur ne présentera pas non plus pour la culture le même intérêt suivant qu'elle tombera dans l'une ou l'autre de ces périodes. Ces dernières devraient donc être analysées de façon distincte sous ces deux aspects.

3.4. Finalement, toutes autres conditions du "milieu climatique" égales, et en ne considérant que des événements climatiques et non phénologiques (hormis peut-être la date du semis), la fluctuation d'origine climatique du rendement devrait être fonction :

1 - de la durée de végétation réelle (ou fictive si on prend pour date du semis le moment  $A_2$ ), allant de la date du semis en période "pré-humide" à celle où  $E_R$  s'annule (point  $C_2$ ). La difficulté est de fixer en valeur absolue la position du moment  $C_2$ , ce qui peut néanmoins être tenté en valeur relative.

2 - de la quantité d'eau qui sera tombée en période "pré-humide", éventuellement d'une part avant, d'autre part après le semis réel ou fictif.

3 - de l'excès de la pluie sur l'évapotranspiration potentielle en période "humide", parce que cet excès peut constituer des réserves utilisables en période "post-humide".

4 - de l'excès, rapporté au nombre de jours entre  $B_1$  et  $B_2$  (ou au nombre de jours de pluie), de la pluie sur l'évapotranspiration potentielle, en période "humide", parce que cet excès représente les effets d'un engorgement possible du sol et donc d'asphyxie des cultures.

5 - de la quantité d'eau tombée en période "post-humide", parce qu'elle figure une amélioration de l'alimentation hydrique à une époque où les disponibilités sont généralement inférieures aux besoins du fait du haut potentiel de l'eau emmagasinée dans le sol.

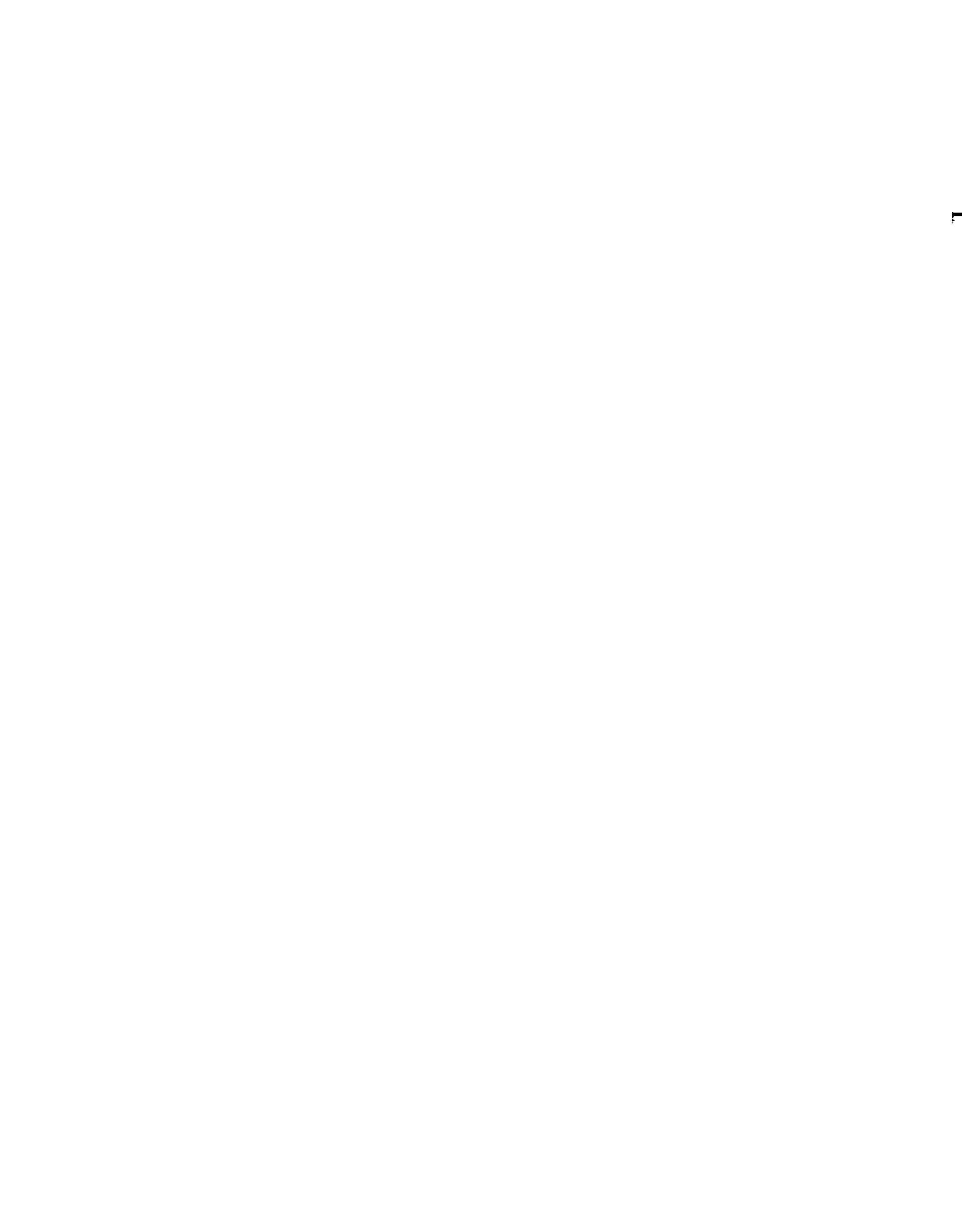
Des équations de régression multiple exprimant la fluctuation d'origine climatique du rendement en fonction de ces diverses variables devraient permettre de juger de l'importance relative de chacune d'elles. C'est dire tout l'intérêt qui doit s'attacher aux données de rendement et aux méthodes qui permettent d'isoler, dans la fluctuation globale du rendement, celle qui se rapporte en propre à la variabilité climatique.

D'autre part des régressions de cette même fluctuation en fonction de variables tirées du découpage de la saison humide suivant les événements phénologiques (découpage phénologique), et a fortiori suivant les événements phénologiques et climatiques à la fois (découpage phéno-climatique), ont toutes chances de conduire à un ajustement meilleur qu'en ne considérant, comme ci-dessus, que des événements climatiques (découpage climatique).

Le problème n'est pas d'expliquer toute la fluctuation climatique du rendement, c'est à dire de parvenir à un coefficient de détermination multiple  $R^2$  égal à 1, car ce but serait illusoire dans l'état actuel des connaissances sur les interactions. Il s'agit de s'en rapprocher le plus possible en testant d'abord les hypothèses les plus vraisemblables.

Dans le cas de découpage phénologique ou phéno-climatique, l'ajustement aura essentiellement pour objectif de tester en premier lieu la validité de la méthode utilisée pour isoler de la fluctuation globale du rendement la variation d'ordre climatique. Mais cet ajustement fondé sur des événements phénologiques fluctuants (parce que dépendant essentiellement de la date du semis en particulier) par rapport à des événements climatiques qu'il est au contraire possible de fixer en termes de probabilité, ne saurait permettre d'extrapoler du milieu expérimental à d'autres milieux climatiques, ce qui paraît légitime au contraire dans le cas d'ajustements purement climatiques.

La comparaison des deux types d'ajustement doit encore montrer dans quelle mesure la considération de tels événements climatiques rend bien compte de la réalité. On devra s'efforcer de rechercher ceux d'entre eux (à découvrir éventuellement) qui permettraient d'obtenir un ajustement climatique se rapprochant le plus de l'ajustement phéno-climatique.



WATER BALANCE - II. CLIMATIC CONSIDERATIONS  
BILAN HYDRIQUE - II. CONSIDERATIONS CLIMATIQUES

Availability of Water - WA

1. General Considerations.

1.1. In our Area, even more so than in that of the preceding study, de Briaumont and Wallén (1964), by far the most important agrometeorological factor limiting the periods and the extent of plant growth and development is the availability of water. This availability, as discussed in the first part of this chapter, does not depend simply on rainfall but is assessed by balancing it against those amounts of water which can be evaporated directly from the soil or the vegetation, or leave the area on which they fell by runoff or deep drainage.

1.2. We have therefore to make a water budget, of the kind first widely used by Thornthwaite, based on a comparison of rainfall and potential evapotranspiration.

(Some confusion arises out of the use of the words "evaporation" and "evapotranspiration" to describe the same thing. "Evaporation" is used by Penman and other scientists - presumably with the thought that water which is transpired by plants is also evaporated. Here, however, we shall use the word evapotranspiration which, it is believed, was coined by Thornthwaite, because it is more international in usage). In all cases it is important to make it clear whether it is potential or actual evapotranspiration which is being discussed and here, unless otherwise stated, we are concerned with potential, or maximum possible, evapotranspiration.

1.3. When considering water requirements of plants based on potential evapotranspiration it is not sufficient to think of it as a maximum plant need met in various degrees by the climate. It is also a demand for water made by the atmospheric environment on the plant and to which the plant cannot always respond to the fullest extent, as underlined by Geslin and his collaborators (1964). The relation between the response and the demand may be negative : an excessive potential evapotranspiration in the middle of the day may cause wilting and, in fact, lower actual evapotranspiration.

1.4. Whichever way we look at it, from the need of the plant or the demand from the atmosphere, we have to begin this inquiry into the availability of water by making a water budget as mentioned above. This can be made not only in various ways, but also at various spatial levels of enquiry, regional, crop, individual plants, and in consideration of intervals of time of various lengths. These various scales all have their utility and also their practicability in a given context. Here, because of the size of the Area, and the nature of the study which is, as explained in the introduction, a regional enquiry, we confine ourselves to the regional scale in space and do not as a rule consider time intervals shorter than a month, except by interpolation.

2. Evapotranspiration measurements.

2.1. Potential evapotranspiration can be measured with specially designed instruments, or deduced from the readings of evaporimeters or, more indirectly still, it can be estimated from measurements of meteorological elements using formulae made up of physical reasoning and empirically obtained factors in varying proportions.

2.2. In all cases enough readings must be available to give working coverage of the area considered. Little direct measuring of evapotranspiration has been done in the semiarid Area, and the only evaporation measurements available in sufficient numbers for a survey are those obtained from Piche evaporimeters in screens.

2.3. The merits and faults of this instrument have been discussed by several authors. Thornthwaite (1954), in a reexamination of the concepts and measurements of potential evapotranspiration, shows it as most adversely affected in a diagram illustrating the effect of the size of the evaporating area on rate of water loss and says: "instruments like the Piche evaporimeter do not give satisfactory measures of evapotranspiration except, possibly, under conditions of high humidity". The argument is that a very small evaporating surface in a relatively dry air stream will be predominantly affected by advected energy, unlike a very large surface from which evaporation must predominately depend on net radiation.

Furthermore if the Piche evaporimeter is in a screen, as in the case of the measurements available, its readings are affected, not only by its being protected from direct radiation from the sun, but also because its ventilation differs from that of a similar object in the open air in a complex way, Eyraud (1960).

In arid conditions the Piche evaporimeter was found unreliable by Omar at Giza, (1960), and Monteith (1960), on an advisory visit to Israel, concludes that: "much useless work could be avoided by withdrawing this obsolete instrument from all stations".

2.4. It is however suggested by some workers: such as Stanhill (1961), Bouchet (1964), Gilchrist in Nigeria (1961), and Riou in Chad (1964), that its numerous available readings can be put to certain specialised uses. Meanwhile, they clearly cannot be used for the estimates of potential evapotranspiration needed for our agroclimatic survey and we must therefore use a formula based on elementary meteorological measurements. A number of such formulas have been evolved, and much from many quarters has been written in the way of comparing them with each other, and with direct measurements. Amongst the many comparative reviews of these methods the reader is referred to those of Milthorpe (1961), of Penman (1963) and to the Arid Zone publications of UNESCO.

2.5. Although the utility of the methods of Thornthwaite, (1948) Blaney and Criddle (1950), and Turc (1954) is recognised, here we have followed the lead of the first survey in choosing Penman's formula as the most suitable. It is generally considered to rest on sound physical reasoning. Numerous workers have found that it gave reasonable agreement with reliable actual measurements taken with well designed evapotranspirometers. It takes into account the two possible approaches to the problem, the radiation budget and the drying power of the air, using expressions originally worked out by Dalton, Brunt and Bowen, and combines them in an original and suitably weighted manner.

2.6. There is no doubt that the relatively large set of meteorological measurements which it requires reduces the number of places for which it can be worked out. However, once a sound network has been built up, it should be possible to use abridged methods at places with insufficient observations.

The calculations involved are relatively long, but several, if not all, of the intermediate steps calculated have an interest and a use of their own, as will be seen, for instance, in the section on radiation, RA.

Potential Evapotranspiration Data and Estimates. WE.

1. Method.

1.1 The formula used was that originally evolved by Penman (1948) in connection with a free water surface :

$$E_T = \frac{\Delta/\gamma [(1-r)R_A(0.18+0.55 \sqrt{N}) - \sigma T^4(0.56-0.092\sqrt{e_d})(0.10+0.90 \sqrt{N})] + 0.35(e_s - e_d)(1+u/100)}{\Delta/\gamma + 1}$$

Where  $E_0$  and  $E_T$  are potential evapotranspiration in mm per day with surface reflectivities,  $r$ , of 5% and 25%, corresponding to open water and complete green vegetative cover.  $R_A$  is incident radiation outside the atmosphere on a horizontal surface expressed in mm of evaporable water per day,  $n$  is the duration of sunshine during the interval of the estimate and  $N$  maximum duration during the same time.  $\sigma$  is the Stefan-Boltzman constant.  $T$  is temperature in degrees absolute.  $E_d$  is vapour pressure and  $E_s$  saturation vapour pressure in mm of mercury.  $u$  is daily wind travel at 2 m above the ground in statute miles.  $\gamma$  is the psychrometric constant and  $\Delta$  is the rate of change with temperature of the saturation vapour pressure. Both are in  $\text{mb}/^\circ\text{C}$  and  $\Delta/\gamma$  is therefore dimensionless.

1.2. The first part of the numerator, the energy budget, within square brackets, estimates net radiation by subtracting the amount of energy reflected back into space from the incoming global radiation. The second part, the aerodynamic term estimates the advected drying power of the air in terms of its saturation deficit, and of its movement. The relative importance of the two terms is adjusted by the ratio which increases with temperature.

The term  $0.35 (1 + u/100)$  has been used in preference to  $0.35 (0.5 + u/100)$  to take into account the extra roughness of a crop as compared with open water (Penman 1963).

1.3. Thus there are six variables :  $R_A$  and  $N$  which depend on latitude and time of the year, and mean temperature, mean vapour pressure, sunshine and mean wind which vary irregularly. Tables were used for the calculations, modified for direct entering of vapour pressure in mb and temperatures in celsius. Together with those for  $R_A$  and  $N$  they are found at Appendix WE.

2. Data.

2.1. Ten years was considered to be the minimum period for the estimation of monthly mean potential evapotranspiration in the Area. 1953-1962 was chosen in preference to 1951-1960, because of the relative abundance of data in 1961 and 1962, due not only to the general improvement in instrumentation, but also to the impulse of the Geophysical Year. This was especially so with respect to sunshine records.

Data were taken from published climate summaries and supplemented by information collected by IRAT and during a visit to the Area by the coworkers. Some gaps were filled by further requests from national meteorological services. In all, sufficient data were obtained from the following 35 stations :

<u>Senegal</u>	Dakar Yoff	14° 44'N	17° 30'W	Niamey	13° 29'N	02 10E
	Matam	15 38N	13 13W	Tahoua	14 54N	05 15E
	Saint-Louis	16 03N	16 27W	Zinder	13 48N	09 00E
	Thiès	14 48N	16 57W			
	Tambacounda	13 46N	13 41W	<u>Nigeria</u>	Kaduna	10 36N 07 27E
<u>Mali</u>	Bamako	12 38N	08 02W		Kano	12 03N 08 32E
	Gao	16 16N	00 03W		Maiduguri	11 51N 13 05E
	Kayes	14 26N	11 26W		Sokoto	13 01N 05 15E
	Mopti	14 31N	04 06W	<u>Cameroun</u>	Maroua	10 28N 14 16E
	Segou	13 24N	06 09W		Kaélé	10 05N 14 27E
<u>Upper Volta</u>	Bobo-Dioulasso	11 10N	04 18W		Garoua	09 20N 13 23E
	Ouagadougou	12 21N	01 31W	<u>Chad</u>	Am-Timan	11 02N 20 17E
<u>Ghana</u>	Navrongo	10 53N	01 05W		Abéché	13 51N 20 51E
<u>Niger</u>	Agadès	16 59N	07 59E		Bouso	10 29N 16 43E
	Birni N'Konni	13 48N	05 15E		F. Archambault	09 08N 18 23E
	Maradi	13 28N	07 05E		Fort Lamy	12 08N 15 02E
	N'Guigmi	14 15N	13 07E		Mongo	12 11N 18 41E
					Moundou	08 37N 16 04E
					Pala	09 22N 14 55E

2.2. For daily mean temperatures the form  $(\max + \min)/2$  was used as it was the only one available from all stations. It is thought that the errors thus introduced will, to a large extent, cancel out when comparing stations within the Area.

2.3. Vapour pressure was mostly available in the form of three daily readings at 0600, 1200 and 1800 which seldom showed any but small differences and were averages. In a few cases it was necessary to calculate the vapour pressure from temperature and relative humidity using hygrometric tables.

2.4. There was a shortage of sunshine data. The methods used to estimate  $n/N$  are discussed at section RA. Eventually, it should become possible to use direct measurement of global and net radiation.

2.5. The wind measurement needed here is daily air travel. Records of it were few and far between and, of those available, a large percentage appeared to be of very dubious quality. Thus, for the greater part, it was necessary to fall back on aviation winds, measured at 10 metres and reduced in terms of a logarithmic decrease. These aviation winds are, on the whole, obtained with sound instruments and reliable. In two cases it was necessary to use visual estimates of the wind. Wind strength is important in the Area since spatial variations seem to introduce significant differences in evapotranspiration in an otherwise very uniform area. Published wind summaries are often available only as classes of wind speeds coming from eight direction sectors in answer to aviation requirements at landing fields. To obtain mean winds from these necessitates lengthy conversion. It is hoped that in future publications of wind data, taking into consideration needs other than those of aviation, will include mean wind speed.

2.6. At Fig WE.2.1. is shown the form which was used to tabulate the ten years data needed for the estimates and at WE.2.2. that for the recording step by step of the actual computations, with specimen working. Together with the tables in appendix WE. these are given to help anyone in the Area wishing to work out some values without much preparation.

AGROCLIMATOLOGY SURVEY E<sub>T</sub> Data FORT LAMY Chad.

	JANUARY				FEBRUARY				MARCH				APRIL			
	R <sub>A</sub> =12.51		N=356.5		R <sub>A</sub> =13.61		N=328.6		R <sub>A</sub> =14.58		N=374.1		R <sub>A</sub> =15.22		N=372.2	
	T	e <sub>d</sub>	n	v	T	e <sub>d</sub>	n	v	T	e <sub>d</sub>	n	v	T	e <sub>d</sub>	n	v
1953	23.9	8.1	307.4	8.6	26.4	10.2	283.7	10.2	31.7	8.3	274.6	13.1	31.6	6.2	297.4	3.8
1954	23.3	7.2	306.7	9.2	28.1	10.2	245.2	10.9	31.7	11.2	236.1	10.6	33.0	16.0	241.2	11.2
1955	23.3	9.6	279.3	7.8	26.1	8.3	269.8	10.0	30.5	10.8	189.9	10.7	32.3	15.0	244.0	8.7
1956	27.7	7.4	307.8	9.3	27.4	9.6	284.1	9.5	31.1	12.0	205.9	10.6	32.2	10.1	274.8	11.3
1957	22.8	11.6	310.1	12.1	23.9	7.2	283.8	13.1	28.0	14.5	286.6	11.6	32.5	18.2	259.1	12.5
1958	25.1	9.8	288.9	10.6	24.3	6.0	260.0	11.5	30.3	5.3	293.9	13.3	33.3	12.0	259.3	12.5
1959	23.9	6.0	304.6	9.4	25.3	4.3	289.2	9.3	29.6	5.9	302.2	10.5	32.9	11.6	249.6	10.1
1960	22.9	7.8	297.0	9.8	28.7	7.9	310.0	13.0	29.0	8.2	278.2	7.9	32.9	14.9	266.9	12.7
1961	24.8	7.8	273.7	11.9	24.2	4.1	283.4	12.5	27.8	6.6	297.2	15.6	33.0	10.8	273.5	11.3
1962	22.0	7.2	327.4	7.0	24.6	6.4	287.9	11.0	30.3	10.0	287.4	11.0	32.0	12.0	268.6	11.0
Total	23.47	8.25	299.69	9.57	25.9	7.42	278.7	11.1	29.94	9.18	264.7	11.49	32.6	12.68	263.6	11.5
	MAY				JUNE				JULY				AUGUST			
	R <sub>A</sub> =15.23		N=393.2		R <sub>A</sub> =15.06		N=384.8		R <sub>A</sub> =15.10		N=395.8		R <sub>A</sub> =15.43		N=388.0	
	T	e <sub>d</sub>	n	v	T	e <sub>d</sub>	n	v	T	e <sub>d</sub>	n	v	T	e <sub>d</sub>	n	v
1953	32.1	21.2	241.7	12.3	30.1	20.6	235.8	8.4	27.2	27.2	161.1	7.3	26.7	28.1	170.6	5.8
1954	31.5	21.3	222.1	10.5	30.9	24.8	188.3	9.9	27.1	26.2	168.4	9.0	25.2	26.9	150.5	8.4
1955	31.6	20.7	259.5	8.5	29.2	24.7	237.9	8.6	27.6	25.0	197.7	7.2	25.8	26.7	191.6	7.3
1956	33.2	12.9	269.3	12.9	30.8	21.1	224.1	11.1	27.6	24.8	188.1	10.5	25.3	27.4	149.1	9.1
1957	32.4	22.1	244.8	12.2	29.8	25.3	253.6	10.8	27.7	26.5	227.7	10.3	26.7	27.2	202.4	9.8
1958	32.7	14.6	266.5	10.7	30.5	22.4	236.0	11.2	27.5	25.6	170.3	12.8	26.3	27.0	186.0	9.2
1959	32.9	18.6	297.3	9.2	30.7	20.4	267.3	7.7	27.9	24.3	254.8	9.5	25.9	26.8	182.6	5.8
1960	31.9	19.3	300.8	13.0	31.1	23.1	268.7	11.8	25.0	22.4	202.2	12.5	26.9	26.5	221.8	12.2
1961	33.7	13.6	304.6	11.3	30.5	20.8	249.2	12.2	27.0	25.0	208.5	10.0	25.7	25.6	137.0	9.6
1962	32.6	16.6	292.3	7.0	29.9	21.1	225.0	9.0	28.4	22.9	222.5	10.0	25.7	24.4	174.4	7.0
Total	32.5	18.69	269.9	10.8	30.35	22.83	238.3	10.1	27.3	25.0	200.1	9.0	26.02	26.66	178.61	8.2
	SEPTEMBER				OCTOBER				NOVEMBER				DECEMBER			
	R <sub>A</sub> =14.81		N=365.8		R <sub>A</sub> =13.91		N=367.7		R <sub>A</sub> =12.78		N=347.3		R <sub>A</sub> =12.05		N=352.4	
	T	e <sub>d</sub>	n	v	T	e <sub>d</sub>	n	v	T	e <sub>d</sub>	n	v	T	e <sub>d</sub>	n	v
1953	28.0	26.8	240.1	5.9	28.8	21.8	230.1	6.6	26.5	10.4	268.6	9.8	22.5	7.7	302.8	10.2
1954	27.6	27.4	224.1	6.8	27.8	24.2	232.6	7.2	27.3	16.3	271.1	7.9	24.0	11.3	298.4	7.9
1955	26.8	27.4	185.3	6.4	28.5	24.4	250.0	6.4	26.0	10.9	292.2	7.6	23.2	9.0	257.1	8.5
1956	26.6	27.6	220.6	7.3	27.5	18.5	290.8	8.3	27.4	14.8	303.0	9.6	24.0	10.6	290.7	11.9
1957	26.8	26.9	208.4	8.5	29.4	25.2	278.3	8.5	28.7	17.9	281.1	8.6	25.3	12.6	306.6	10.5
1958	27.7	25.8	205.1	10.4	29.1	17.5	285.6	8.3	28.6	10.6	299.4	9.6	25.8	8.0	315.1	9.0
1959	27.2	25.7	259.4	6.6	28.4	17.7	307.1	5.1	26.8	9.9	297.5	10.5	23.5	7.4	310.1	10.9
1960	27.6	26.3	210.2	13.2	29.0	22.5	264.8	14.2	26.7	10.5	314.3	16.5	26.4	14.4	280.3	10.7
1961	27.3	25.9	224.7	5.6	28.1	18.10	310.7	5.3	26.6	11.4	328.6	10.5	21.8	7.0	312.2	10.6
1962	27.3	24.9	234.7	5.6	29.1	21.7	294.6	7.5	29.3	16.1	310.7	6.0	25.1	9.0	311.2	4.9
Total	27.3	26.48	226.7	7.63	28.6	21.15	278.5	7.7	27.3	12.88	296.7	9.7	24.2	9.70	298.9	9.5

27.9 16.61 257.7 7.63     $\Sigma n = 3092.4$      $\Sigma N = 4428.4$      $\Sigma R_A = 5171.62$ .

Fig WE.2.1. Working sheet for grouping 10 years' data of the six variables in Penman's formula.

FAO / UNESCO / WMO AGROCLIMATOLOGY SURVEYS

POTENTIAL EVAPORATION, PENMAN

COUNTRY. Chad PLACE FORT LAMY LAT. 12°13' N

PERIOD August 1953-1962 LONG 15°02' E

$R_A$ , mm	15.13		$n$ , hours and tenths	176.6
$R_I = R_A \times f_1$	6.51		$N$ , " " "	388.0
$0.95 R_I$		6.18	$n/N$	0.46
$\sigma T^4$ , mm	15.86			
$R_B = \sigma T^4 \times f_2 \times f_e$		1.22	0.55 $n/N$	.25
$H_0 = 0.95 R_I - R_B$		4.96		0.18
			$f_1$	.43
$\Delta/\gamma H_0$	14.95			
$\Delta/\gamma H_0 (\Delta/\gamma + 1)^{-1}$		3.72	0.9 $n/N$	.41
$E_a = (e_a - e_d) f_{u0}$	3.08			0.10
$E_A (\Delta/\gamma + 1)^{-1}$		0.77	$f_2$	.51
			$f_e$	.151
$E_0$ day	4.49	mm	$T$ , celsius	26.0
$E_0$ month	139.2	mm	$\Delta/\gamma$	3.015
			$e_a$ , mbs	33.66
$0.75 R_I$	4.88		$e_d$	26.66
$R_B$	1.22		$e_a - e_d$	7.00
$H_T = 0.75 R_I - R_B$	3.66			
$\Delta/\gamma H_T$	11.03		$v$	8.4
$\Delta/\gamma H_T (\Delta/\gamma + 1)^{-1}$		2.75	$a$	0.0366
$E_{aT} = (e_a - e_d) f_{uT}$	4.0		$f_v$	0.3082
$E_{aT} (\Delta/\gamma + 1)^{-1}$		0.99		0.2625
			$b_T$	.5707
$E_T$ day	3.74	mm	$b_0$	0.1313
$E_T$ month	115.9	mm	$f_{u0}$	0.4395

Fig WE.2.2. Working sheet for calculating potential evapotranspiration ( $E_T$ ), and potential evaporation from an open water surface ( $E_0$ ). The units used are given in the tables of Appendix 1. In this example  $v$  is a sum of three daily readings in  $m.sec^{-1}$  observed at a height of 10m, and  $a$  has been modified accordingly. Coefficients  $b_T$  and  $b_0$  correspond to expressions  $0.35(1+v)$  and  $0.35(0.5+v)$  respectively.

2.7. The evapotranspiration estimates in this study were computed with a desk calculating machine (a programme for an Olivetti Divisumma 24 is included in the Appendix WE. ) It is thought that to punch the necessary data on cards or a tape to obtain monthly averages based on 10 years would take about as long as it does to do the work by hand. However, once the ten years are on a tape, the monthly amounts for the separate years can be obtained with a few additional seconds of computer time, thus making it possible in all cases to obtain annual variability. This should be aimed at in future studies.

### 3. Distribution of the variables.

3.1. The distribution in space and time of the variables in the evapotranspiration formula are discussed briefly to outline their contribution to the estimates.

$R_A$ , the external input, and  $N$ , maximum possible sunshine, vary with latitude and time of the year and are therefore fixed for a given place and period. Values are given in appendix WE. and seasonal variations are discussed briefly at sections RA and LT. Here the intervals of time over which the other four parameters are averaged for comparison are the year, April-October and November-March representing wet and dry seasons rather than summer and winter, and August, the wettest month everywhere.

3.2. The distribution of mean temperatures during these four periods is shown at Fig WE.3.1. A to D. For the whole year, A, the temperature is remarkably uniform varying between  $27^{\circ}\text{C}$  and  $28^{\circ}\text{C}$  all over the area with a slight gradient from south to north. Two exceptions are an area in the north of Mali where it exceeds  $29^{\circ}\text{C}$  and a coastal region in Senegal where it drops to  $24^{\circ}\text{C}$ . Thus, where altitude does not intervene, and this only happens in northern Nigeria, yearly evapotranspiration would show a slight increase from south to north over the Area on the score of temperature alone.

During the wet season, B, the south to north temperature gradient is steeper mainly because the reduction in temperature due to the rains is more important in the south. The gradient from the coast of Senegal to a relatively short way inland is still discernible for the wet season as a whole, but in August, C, with the preponderance of the southwesterly monsoon winds, it has disappeared. The most northerly displacement of the rainbelt occurs during this month and, in consequence, the overall south to north temperature gradient is weakened then, except in the extreme north.

This general temperature gradient is reversed during the dry season, as winter cooling makes the north with its higher latitudes colder than the south. In west Senegal, during this period, the return of the north easterly winds again makes the coast cooler than inland.

3.3. Vapour pressures during the year and at all seasons drop sharply from south to north, WE.3.2. A to D. During the dry season they are between one half and one third of the values in August, the most humid month. There is a gradient along the coast of Senegal which is greater during the dry winter and disappears in August. Thus on the strength of vapour pressure alone one would expect potential evapotranspiration to increase from south to north and, in Senegal, from the coast inland.

To gauge the effect of humidity on potential evapotranspiration it is not sufficient to consider vapour pressures alone. The saturation deficit which affects the drying power of the air in the aerodynamic term is probably more expressive. Furthermore, this atmospheric parameter seems to have an important bearing on the ratio between the quantity of water used per dry weight synthesised. The greater the saturation deficit the higher the ratio, which in field conditions varies between 200 and 2000, according to Slatyer (1964).

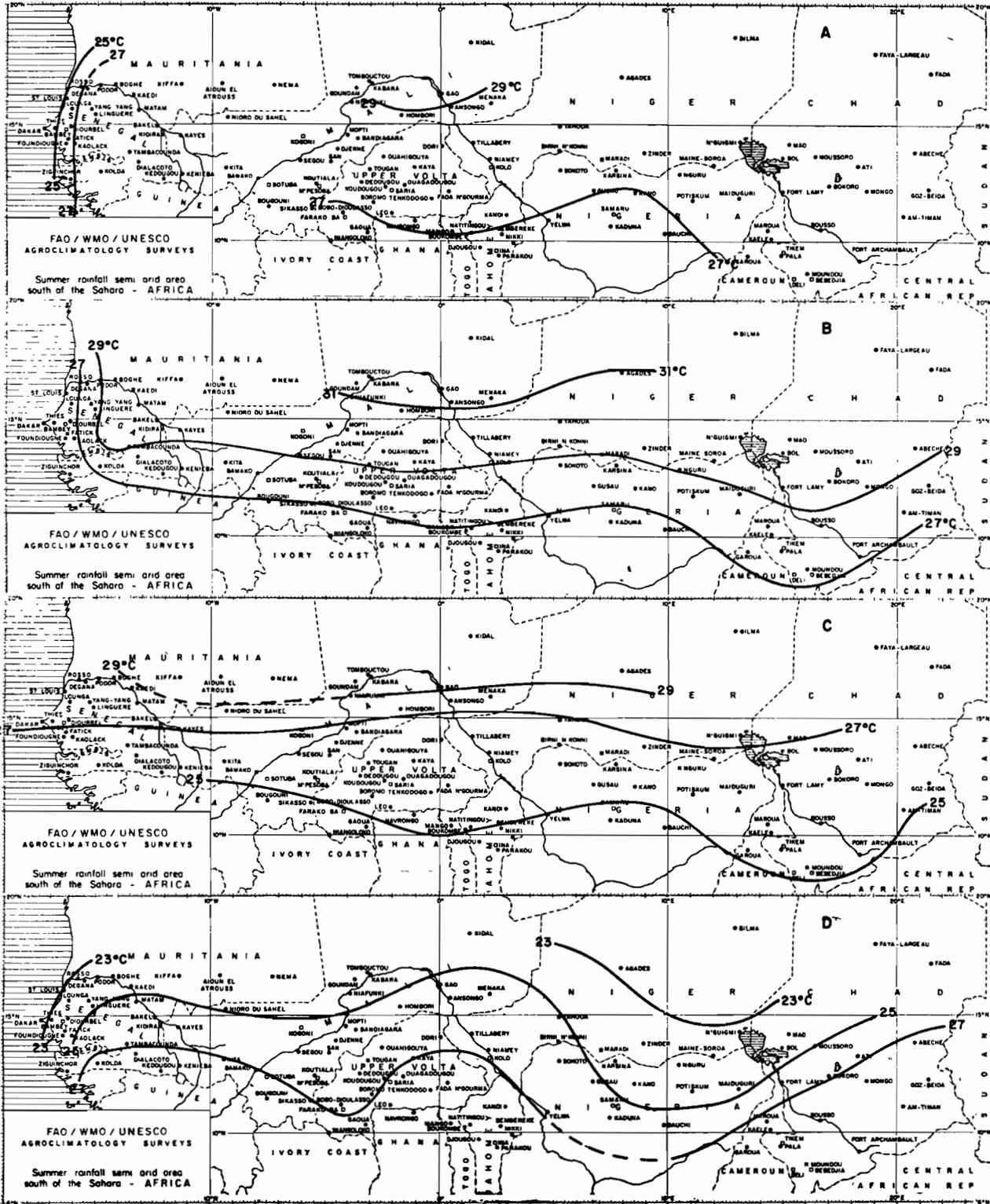


Fig WE.3.1. Mean screen temperatures in Celsius. A, year. B, April - October. C, August. D, November - March. The north-south gradient is slack and reversed in winter.

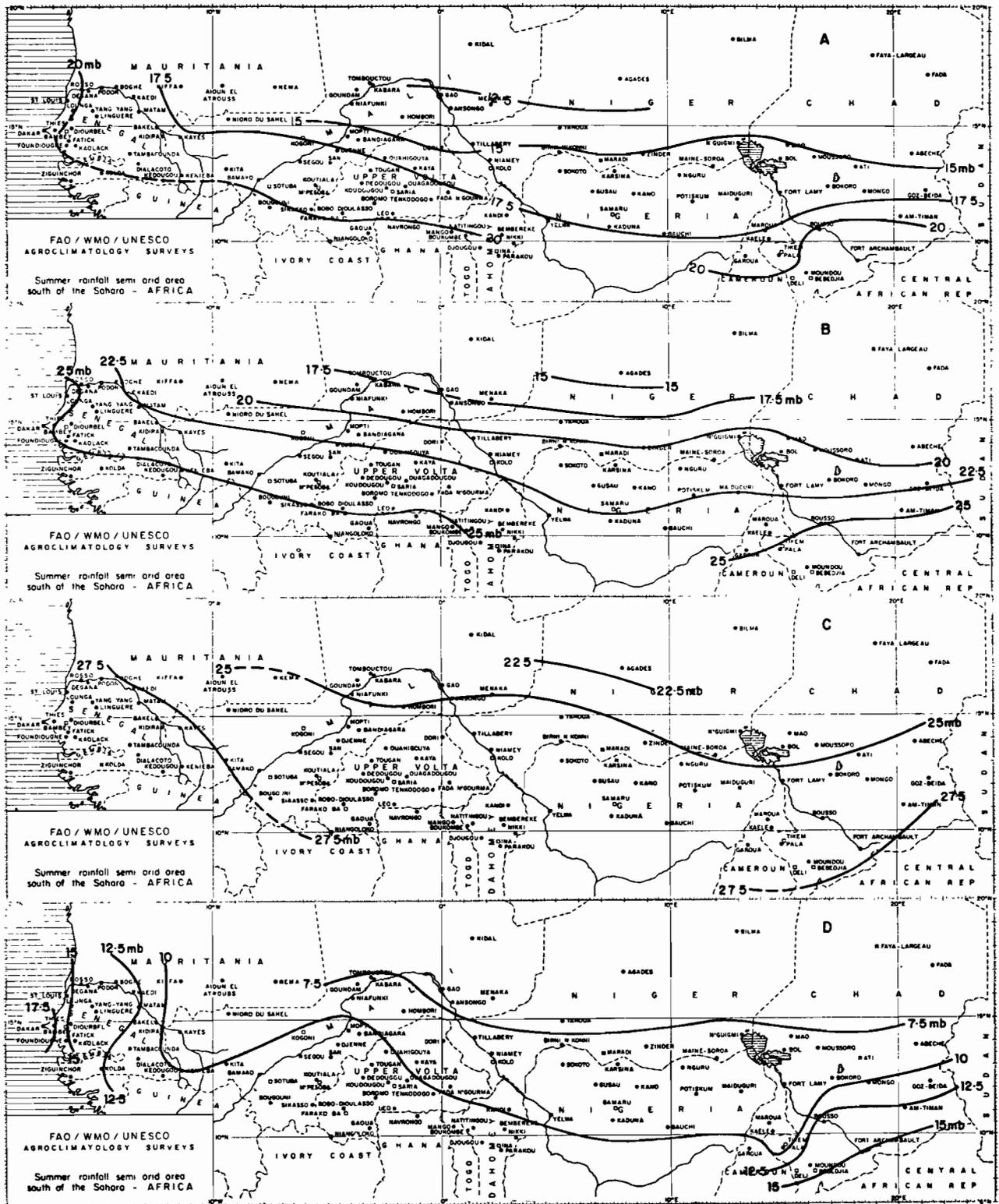


Fig WE.3.2. Mean screen vapour pressure in millibars. A, year. B, April-October. C, August. D, November - March. The seasonal variation with humid summers and dry winters is great but the same gradient is maintained throughout.

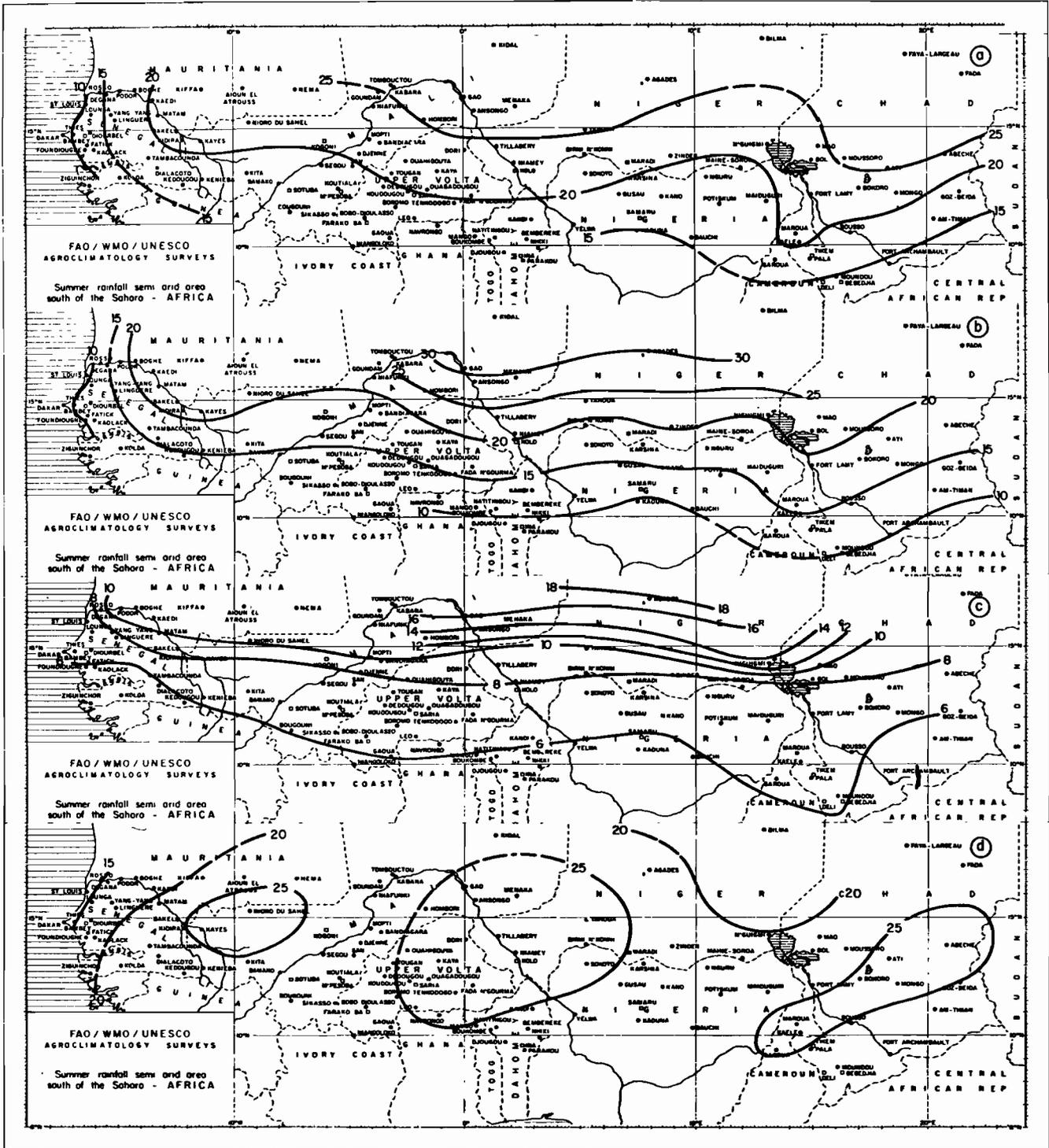


Fig WE.3.3. Mean saturation deficit in millibars. A, year. B, April - October. C, August. D, November - March.

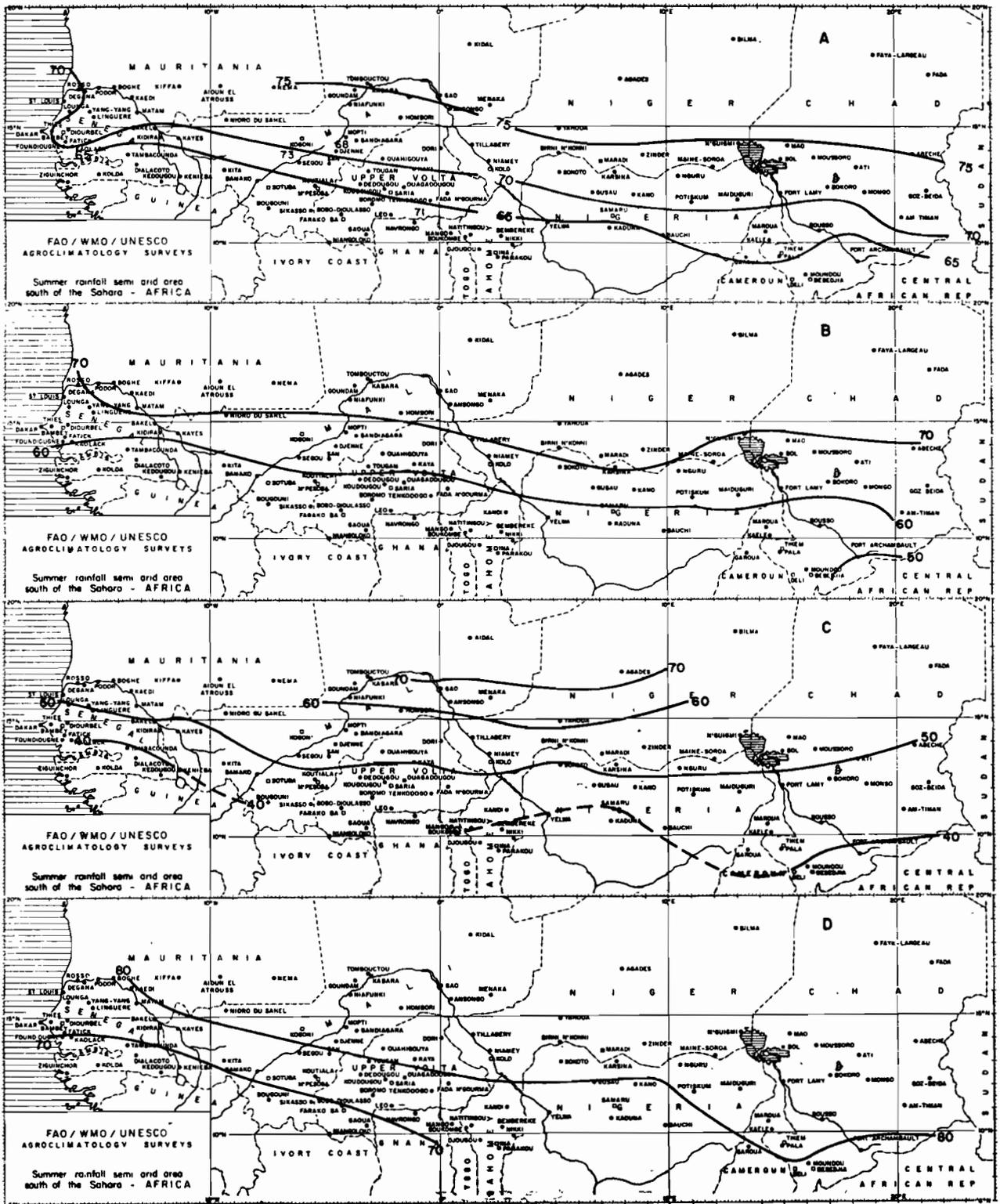


Fig WE.3.4. Ratio of observed to possible sunshine expressed as a percentage. A, year. B, summer rains season. C, August. D, winter. At all seasons there is an increase from south to north. The August percentages are generally the lowest and those of the winter the highest.

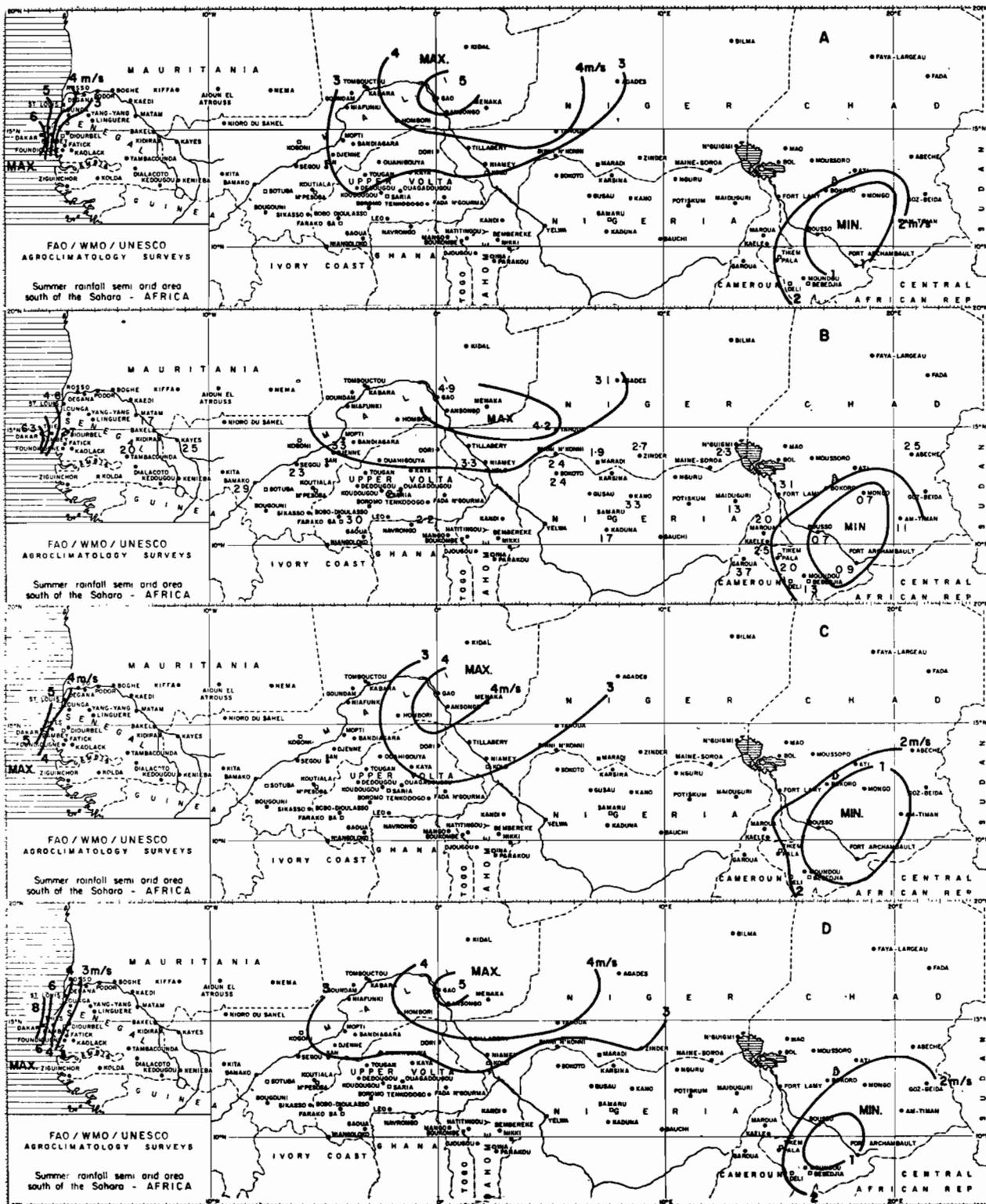


Fig WE.3.5. Mean scalar wind at 2 metres above the ground in metres per second. A, year. B, April - October, summer rains season. C, August and D, November - March, winter. The main features are, at all seasons, a maximum in northern Mali and another on the Atlantic coast, and a minimum in southern Chad.

At Fig WE.3.3. a) to d) saturation deficit has been plotted for the same four periods as before. The year, a) shows an increase from south to north from 15 to 25 mb with a decrease in the coastal area of Senegal to less than 15 mb. There appears to be a ridge maximum in west Chad and north Cameroun. The same features are apparent during the seven months covering the wet season but the general south to north range has increased to 10 to 30 mb. In August the general increase in humidity brings the range down to 6 to 18 mb, the maximum in Chad and the minimum in Senegal being less obvious. During the winter months the saturation deficit decreases northwards as well as southwards from a maximum belt, whereas in Senegal the gradient is attenuated by the Canarian Trade Winds. This central belt shows maxima of more than 25 mb in Chad and Cameroon, over the confines of Upper Volta, Niger, Nigeria and Mali, and in west Mali.

These patterns explain some of the departures from a strictly zonal configuration of the distribution of potential evapotranspiration, notably the ridge of maximum in west Chad and Cameroon which is to a certain extent mitigated in south Chad by a wind speed minimum.

3.4. Sunshine increases from south to north during all seasons, Fig 3.4. A to D, the increase being greatest in August and least in the dry season when on the average more than 70% of the sky is clear over the whole Area. Global radiation increases with clear skies but so does the amount of energy lost to outer space with consequent reduction of net energy and of potential evapotranspiration. On balance evapotranspiration increases with sunshine and thus, on this score also, an increase from south to north for the whole year would be expected. There were some discordant values of n/N. The three most important are plotted at Fig WE.3.3. A. First, Mopti and Segou should exchange places to fall in with the general pattern. Secondly, Navrongo is consistently high. No other records are available to date from north Ghana to compare with those of Navrongo.

3.5. With the wind the latitudinal pattern is no longer in evidence and maxima are seen, Fig WE.3.5. A to D, which are maintained during all seasons. The maximum in west Senegal is owed to land sea differences in temperature as well as to the trade winds from the Azores anticyclone. Another maximum centered on Gao (which scores on all counts and has the highest annual potential evapotranspiration in the Area) is probably connected with the most common position of an anticyclonic cell to the NNW of the Area. There is on the other hand a minimum in south Chad.

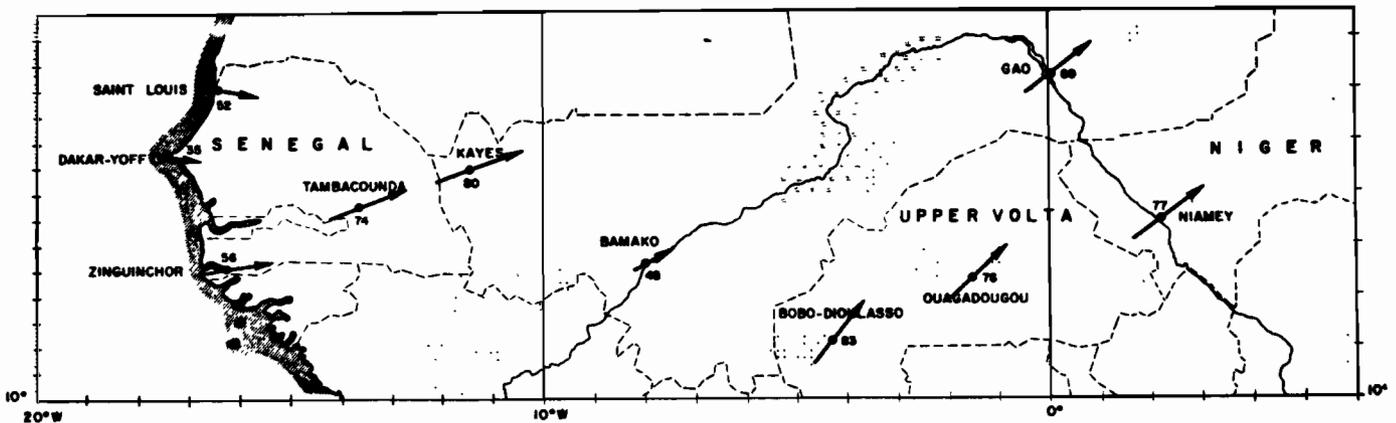


Fig WE.3.6. a) Vector mean winds at 1200 in August. The length of the arrows minus the head indicates a 10-hour displacement. The two-figure numbers denote the percentage constancy. All the stations are affected by the south-westerly monsoon.

As explained at section MC the wind pattern is dominated by the two main currents which converge on the ITCZ: to the north the dry and often hazy harmattan, which blows generally from the north east, and to the south the moist monsoon. With the seasonal movement of the ITCZ the winds at a given locality within the Area pass from one regime to the other according to their position relative to the front. This is shown at Fig WE.3.6. a) and b) which gives vector mean winds at 500 metres above the ground together with their constancy in January and in August.

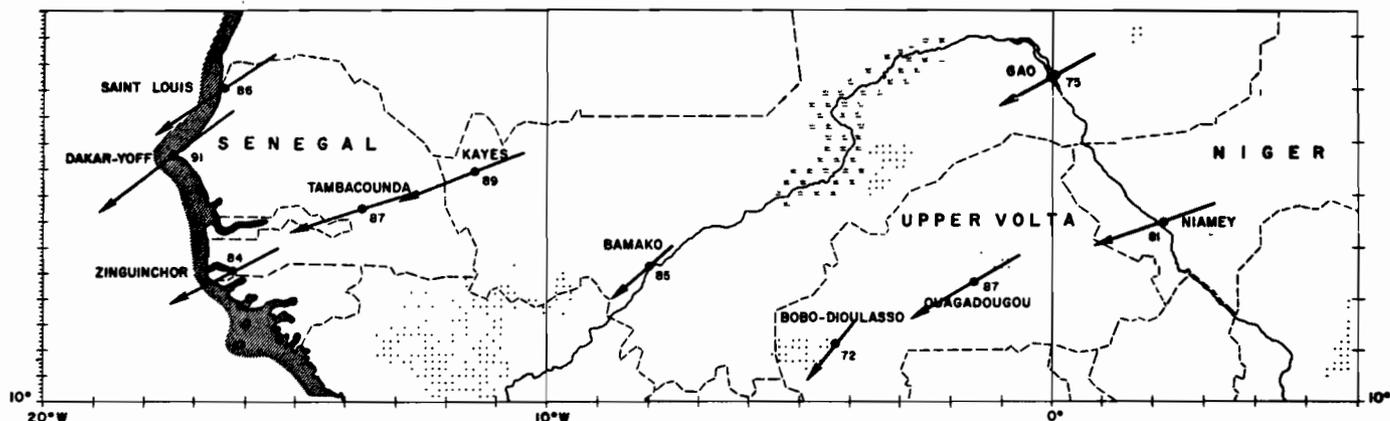


Fig WE.3.6. b) As at a), but for the month of January. All the stations are affected by the north-easterly harmattan. The frequencies are high.

Because of its dessicating effect the harmattan wind is a hazard at the beginning of the moist season, as fluctuations of the position of the ITF may bring it back at a time when crops are in the seedling stage.

3.6. At Table WE.3.7. the changes in potential evapotranspiration at Fort Lamy brought about by departures from 10-year average conditions in May and August are shown. It can be seen, for instance, that the importance of the wind varies greatly with the dryness of the air. Also that when saturation deficit is very high, as occurs before the start of the rains, further dryness (in theory) actually does reduce slightly potential evapotranspiration, as loss of energy to outer space more than compensates for the increased drying power of the air.

FORT LAMY Chad 1953 - 62

		$E_T$ $r=0.25$	TEMP. °C	VAPOUR PRESSURE mb			INSOLATION n/N	WIND m/s X 3	
	INCREMENT		+1	+2	-2	-4	-6	+0.05	+0.5
APRIL	AVERAGE 1952-63	7.22	32.6	12.7				0.71	11
	DIFFERENCE $E_T$		+0.15	-0.06	0	-0.01	-0.03	+0.12	+0.13
AUG.	AVERAGE 1952-63	3.74	26.0	26.7				0.46	8.4
	DIFFERENCE $E_T$		+0.25	-0.19	+0.20	+0.18	+0.17	+0.11	+0.03

Fig WE.3.7. Changes in potential evapotranspiration expressed in mm of water per day brought about by small departures by each of the four meteorological variables from April and August average conditions. In April, the driest month, further reduction in vapour pressure actually results in a slight decrease in  $E_T$ .

4. Results.

4.1. For all stations graphs of the values of the weighted heat energy and aerodynamic terms, together with their sum, the total estimate, were plotted to test for abnormal values. Those for Fort Lamy in Chad are shown at Fig WE.4.1.

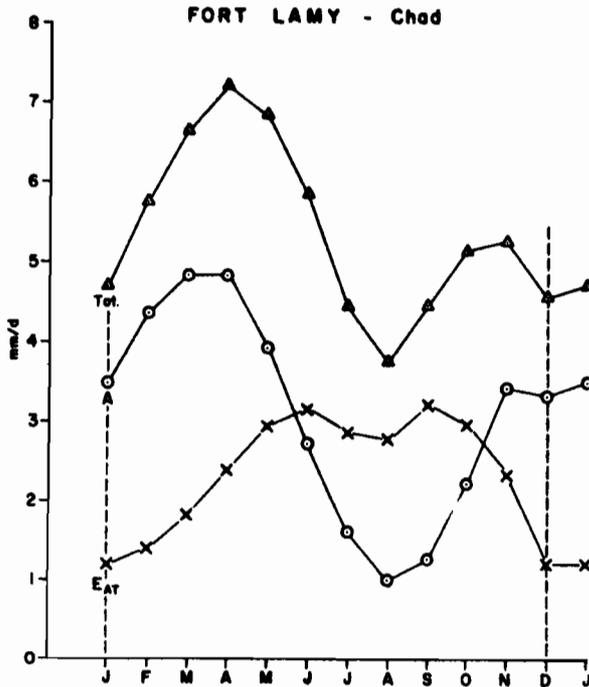


Fig WE.4.1. Monthly mean potential evapotranspiration in mm per day due to the net radiation (crosses) and the aerodynamic (circles) weighted terms, and their sum (triangles).

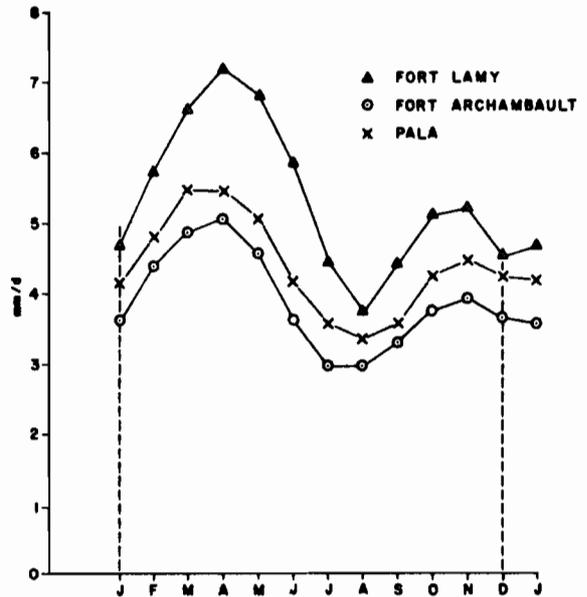


Fig WE.4.3. Seasonal variation in mean potential evapotranspiration at three stations in Chad at Latitudes varying between 12° and 9° N.

4.2. The march of events pictured at WE.4.1. is typical of the summer rainfall area and will be described briefly. At the beginning of the year in clear weather and dry air the aerodynamic term is more important than that for net energy. Both increase gradually in the spring with the increase of incoming solar radiation and temperatures. However, as with the approach of the monsoon humidity and cloudiness increase, the value of the aerodynamic term begins to fall off, whilst the net energy term goes on increasing. With further increase of humidity and also a decrease in wind owed to the passage from the north easterly to the south westerly winds, the aerodynamic term reaches a minimum in August. Meanwhile, the net energy term has gone on increasing and only shows a relatively slight depression in the middle of the rainy season, owing to cloudiness and general lowering of temperatures. As the monsoon retreats southwards, the process is generally reversed. Towards the end of the year the increase of the aerodynamic term is checked by the decrease in temperature. The sum of these two tendencies, therefore, results in a curve with two maxima before and after the rainy season, and two minima in August and in December-January.

4.3. At Appendix WE.2 yearly, monthly and seasonal potential evapotranspiration calculated as described for the network of stations in the Area is given.

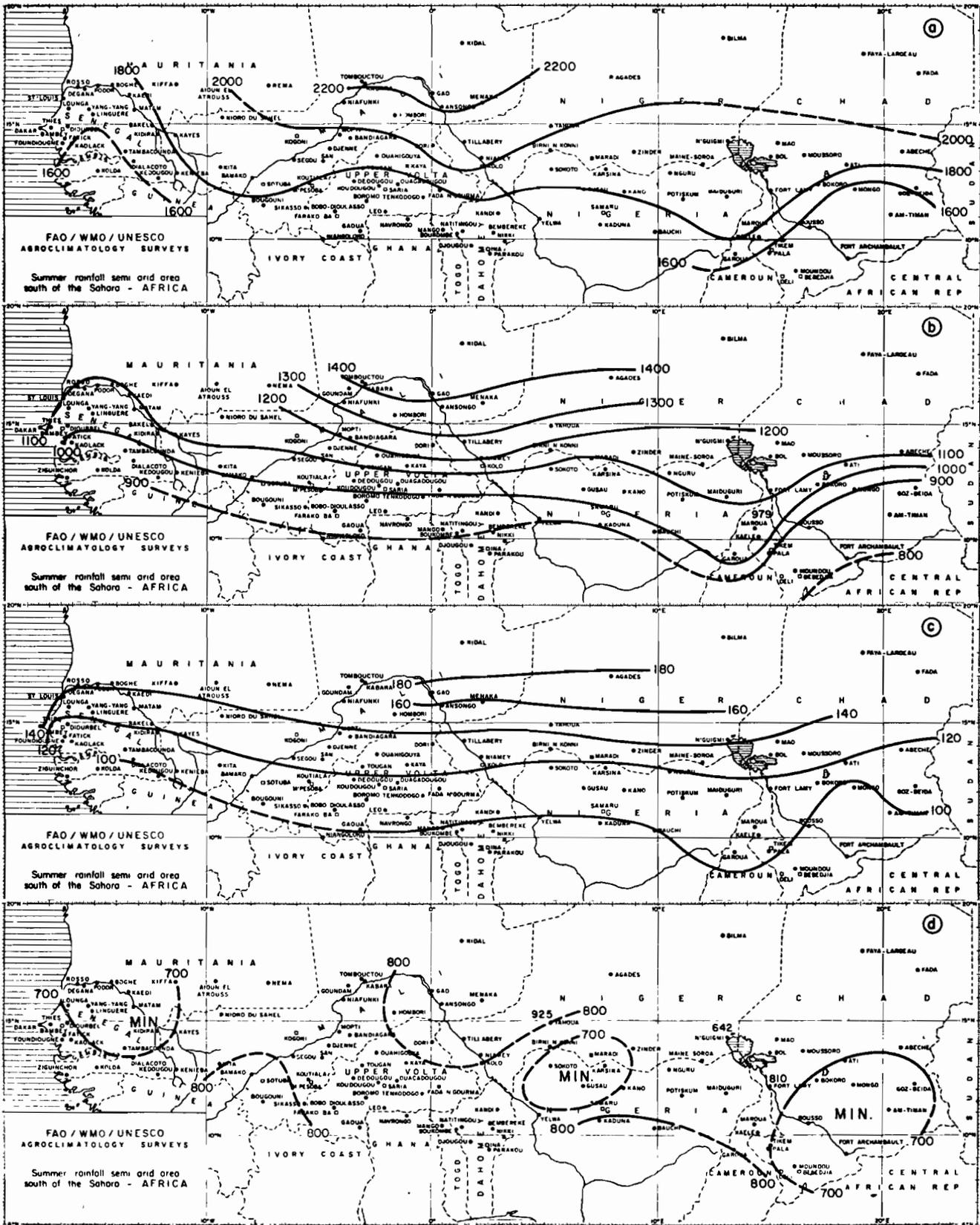


Fig WE.4.2. Distribution of potential evapotranspiration over the Area during a) the year, b) the moist season, c) August, the wettest month, and d) the dry season.

At Fig WE.4.2. a) to d) isolines for the year, the wet season, the month of August and the dry winter have been drawn. It is seen that for the whole year the pattern is rather similar to that for rainfall but with a reversed gradient.  $E_T$ , with a reflection coefficient of 0.25, varies between 1400 and 2200 mm from south to north over the Area considered. The annual distribution corresponds to the yearly patterns of the four elements, the effects of the wind minimum and maximum being reflected. During the seven months which contain the growing season, b), the general pattern is similar and so it is in August, c). During the dry season, d), the distribution is patchy. The wind minimum and maximums are reflected and there seems to be generally less evapotranspiration in the middle zones than to the south where temperatures are higher in winter and to the north where they are higher in spring.

4.4. At Fig WE.4.3. the monthly mean amounts for three stations in Chad at different latitudes have been plotted showing seasonal variation similar to that already described for Fort Lamy at Fig WE.4.1. and, with decreasing latitude, a general reduction in amounts and a spreading of the midsummer minimum.

The general implications of the distribution of evapotranspiration in the Area will be discussed in the next section.

## 5. Variability.

5.1. The interannual variability of potential evapotranspiration estimates and that of the meteorological elements from which they are derived should be investigated to gain an idea of the departures which can be expected from the mean amounts calculated.

5.2. This was done for the ten years of the period analysed at Fort Lamy. The small size of the sample did not warrant the working out of variance and only the mean deviation and its relation to the mean, the relative variability, were calculated. Results are tabulated at Table WE.5.1.

5.3. It is seen that potential evapotranspiration is four times more conservative than rainfall both with regard to relative variability and maximum deviation. Of the four variables from which evapotranspiration can be estimated at a given time and place, temperature is by far the least variable followed by sunshine, vapour pressure and wind in that order. wind being by far the most variable of the four. This

F O R T L A M Y 1953-1962

	P	$E_T$	T	Ed	S	W
Annual Mean	683 mm	1789 mm	27.9°C	16.6 mb	3106 h	2.6 m/s
Mean Deviation	121	72	0.31	1.17	122	0.37
Relative Variability	17.7%	4%	1.1%	7.1%	3.9%	11.3%
Maximum Deviation	45.0%	9%	3.6%	17.0%	9.0%	32.0%

Table WE.5.1. Interannual variability of rainfall and potential evapotranspiration and of the four meteorological variables.  $E_T$  varies far less than P. Temperature is the most conservative of the meteorological variables. Wind is the least.

must of course be viewed in terms of the extent to which these factors affect evapotranspiration. Some idea of the derivations with a given set of conditions was given at para WE.3.6.

5.4. The same interannual variability assessments were worked out for Fort Archambault, Table WE.5.2. Similar results were obtained. The potential evapotranspiration figures are practically the same and the more abundant rainfall is less variable, in agreement with values given at section PI. The magnitudes of the variability of the four elements are in the same order with temperature again showing so little variation that it could safely be taken as constant.

FORT ARCHAMBAULT 1953-1962

	P	E <sub>T</sub>	T	Ed	S	W
Annual Mean	1071 mm	12953 mm	27.6 °C	21.8 mb	2630.7 h	2.9 m/s
Mean Deviation	95.2	50.1	0.35	0.64	69.7	1.06
Relative Variability	8.9%	3.9%	1.2%	2.9%	2.6%	36.5%
Maximum Deviation	17.7%	10.5%	3.4%	5.2%	4.9%	49.2%

Table WE.5.2. The same estimates at a place further south, where precipitation is less variable.

5.5. These results were contrasted with those for May for the same place and period. Table WE.5.3. There is a great increase in the variability of rainfall, since May is at the beginning of the wet season, but only a small increase in potential evapotranspiration due to increased variation in the three more variable elements, temperature remaining very stable.

FORT ARCHAMBAULT - MAY 1953-1962

	P	E <sub>T</sub>	T	Ed	S	W
Annual Mean	100 mm	126 mm	29.4 °C	25.6 mb	231.1 h	4.4 m/s
Mean Deviation	42	8	0.63	1.16	7.98	2.1
Relative Variability	42%	6.3%	2.0%	4.5%	3.4%	47.7%
Maximum Deviation	73%	13.5%	4.4%	18.3%	8.3%	65.9%

Table WE.5.3. Variability of monthly mean amounts at the beginning of the season when the variation is greatest.

Thus it is seen that at different places and seasons potential evapotranspiration is a much more stable climatic characteristic than rainfall and, as will be seen to have been done at WB.5, it can sometimes be taken as constant without significant loss of accuracy.

APPENDIX WE.

RA

Lat.	J.	F.	M.	A.	M.	J.	☉J.	A.	S.	O.	N.	D.
6	13.59 -.017	14.39 -.012	14.98 -.004	15.05 -.005	14.66 +.010	14.30 +.014	14.38 +.013	14.74 +.007	14.92 -.001	14.51 -.009	13.75 -.016	13.24 -.019
7	13.42 -.017	14.27 -.012	14.94 -.004	15.10 +.004	14.76 +.004	14.44 +.014	14.51 +.012	14.81 +.007	14.91 -.001	14.42 -.008	13.59 -.015	13.05 -.019
8	13.25 -.017	14.15 -.012	14.90 -.005	15.14 -.003	14.86 +.010	14.58 +.013	14.63 +.012	14.88 +.007	14.90 -.002	14.34 -.009	13.44 -.015	12.86 -.018
9	13.08 -.018	14.03 -.013	14.85 -.005	15.17 +.002	14.96 +.009	14.71 +.012	14.75 +.011	14.95 +.006	14.88 -.002	14.25 -.010	13.29 -.016	12.68 -.019
10	12.90 -.019	13.90 -.014	14.80 -.007	15.19 +.002	15.05 +.009	14.83 +.012	14.86 +.011	15.01 +.006	14.86 -.003	14.15 -.011	13.13 -.016	12.49 -.020
11	12.71 -.018	13.76 -.014	14.73 -.007	15.21 +.001	15.14 +.008	14.95 +.011	14.97 +.010	15.07 +.005	14.83 +.003	14.04 -.011	12.97 -.017	12.29 -.021
12	12.53 -.019	13.62 -.015	14.66 -.007	15.22 +.001	15.22 +.007	15.06 +.011	15.07 +.009	15.12 +.004	14.80 -.004	13.93 -.012	12.80 -.018	12.08 -.021
13	12.34 -.020	13.47 -.015	14.59 -.007	15.23 +.001	15.29 +.007	15.17 +.010	15.16 +.009	15.16 +.004	14.76 -.004	13.81 -.012	12.62 -.018	11.87 -.021
14	12.14 -.021	13.32 -.015	14.52 -.008	15.24 0.0	15.36 +.006	15.27 +.010	15.25 +.009	15.20 +.004	14.72 -.004	13.69 -.012	12.44 -.018	11.66 -.021
15	11.93 -.020	13.17 -.017	14.44 -.008	15.24 -.002	15.42 +.007	15.37 +.011	15.34 +.008	15.24 +.003	14.68 -.005	13.57 -.013	12.25 -.018	11.45 -.021
16	11.73 -.022	13.00 -.017	14.36 -.011	15.22 -.000	15.49 +.009	15.48 +.010	15.42 +.009	15.27 +.004	14.63 -.005	13.44 -.013	12.07 -.019	11.24 -.022
17	11.51 -.020	12.83 -.017	14.25 -.008	15.22 -.002	15.56 +.005	15.58 +.008	15.51 +.008	15.31 +.003	14.58 -.009	13.31 -.014	11.88 -.018	11.02 -.022

*Table No. 1. Mean daily values for the months of the year of the radiation incident outside the atmosphere in terms of degrees of latitude, expressed in mm of evaporable water per day. The differences shown between the values correspond to one hundredth of a degree.*

N

Lat.	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	F.
	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	29
6	366.3 -.16	334.1 -.09	374.7 -.01	367.6 +.07	384.2 +.14	373.8 +.18	385.4 +.16	381.6 +.10	364.6 +.02	371.8 -.07	355.7 -.14	365.4 -.18	346.0 -.09
7	364.7 -.15	333.2 -.09	374.6 0.0	368.3 +.08	385.6 +.15	375.6 +.18	386.0 +.17	382.6 +.11	364.8 +.02	371.1 -.06	354.3 -.13	363.6 -.18	345.1 -.09
8	363.2 -.16	332.3 -.09	374.6 -.01	369.1 +.07	387.1 +.14	377.4 +.18	388.7 +.16	383.7 +.10	365.0 +.02	370.5 -.07	353.9 -.13	361.8 -.17	344.2 -.09
9	361.6 -.16	331.4 -.09	374.5 -.01	369.8 +.08	388.5 +.15	379.2 +.18	390.3 +.17	384.7 +.11	365.2 +.02	369.8 -.06	351.7 -.14	360.1 -.18	343.3 -.09
10	360.0 -.17	330.5 -.09	374.4 -.02	370.6 +.07	390.0 +.15	381.0 +.18	392.0 +.17	385.8 +.10	365.4 +.02	369.2 -.07	350.3 -.14	358.3 -.18	342.4 -.10
11	358.3 -.16	329.6 -.09	374.2 -.01	371.3 +.08	391.5 +.15	382.8 +.18	393.7 +.17	386.8 +.11	365.6 +.02	386.8 -.07	348.9 -.14	356.5 -.19	341.4 -.09
12	356.7 -.16	328.7 -.09	374.1 -.01	372.1 +.08	393.0 +.15	384.6 +.18	395.4 +.17	387.9 +.11	365.8 +.02	367.8 -.06	347.5 -.14	354.6 -.18	340.5 -.09
13	355.1 -.17	327.8 -.09	374.0 -.01	372.9 +.07	394.5 +.16	386.4 +.19	397.1 +.18	389.0 +.12	366.0 +.02	367.2 -.07	346.1 -.14	352.8 -.18	339.6 -.10
14	353.4 -.17	326.9 -.09	373.9 -.01	373.6 +.08	396.1 +.15	388.3 +.19	398.9 +.18	390.2 +.11	366.2 +.03	366.5 -.07	344.7 -.14	351.0 -.19	338.6 -.09
15	351.7 -.17	326.0 -.09	373.7 -.01	374.4 +.08	397.6 +.16	390.2 +.18	400.7 +.18	391.3 +.11	366.5 +.02	365.8 -.07	343.3 -.15	349.1 -.19	337.7 -.10
16	350.0 -.17	325.1 -.09	373.6 -.01	375.2 +.08	399.2 +.16	392.0 +.19	402.4 +.18	392.4 +.11	366.7 +.03	365.1 -.06	341.8 -.14	347.2 -.19	336.7 -.09
17	348.3 -.17	324.2 -.09	373.5 -.01	376.0 +.07	400.8 +.15	393.9 +.19	404.2 +.18	393.5 +.12	367.0 +.02	364.5 -.07	340.4 -.14	345.3 -.19	335.8 -.10

Table No. 2. Monthly maximum sunshine in terms of degrees of latitude, expressed in hours and tenths. The differences shown between the values correspond to one hundredth of a degree.

fe

$e_d$ mb	0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
3	.422	.420	.418	.416	.414	.412	.409	.407	.405	.403
4	.401	.399	.397	.395	.393	.392	.390	.388	.386	.384
5	.382	.380	.379	.377	.375	.374	.372	.370	.368	.364
6	.365	.364	.362	.360	.359	.357	.355	.354	.352	.351
7	.349	.348	.346	.345	.343	.342	.341	.339	.338	.336
8	.335	.334	.332	.331	.329	.328	.327	.325	.324	.322
9	.321	.320	.318	.317	.316	.315	.313	.312	.311	.309
10	.308	.307	.306	.304	.303	.302	.301	.300	.298	.297
11	.296	.295	.294	.292	.291	.290	.289	.288	.286	.285
12	.284	.283	.282	.281	.280	.279	.277	.276	.275	.274
13	.273	.272	.271	.270	.269	.268	.266	.265	.274	.263
14	.262	.261	.260	.259	.258	.257	.256	.255	.254	.253
15	.252	.251	.250	.249	.248	.247	.246	.245	.244	.243
16	.242	.241	.240	.239	.238	.237	.236	.235	.234	.233
17	.232	.231	.230	.229	.228	.227	.226	.225	.224	.223
18	.222	.221	.220	.219	.218	.218	.217	.216	.215	.214
19	.213	.212	.211	.210	.209	.209	.208	.207	.206	.205
20	.204	.203	.202	.201	.200	.200	.199	.198	.197	.196
21	.195	.194	.193	.192	.191	.191	.190	.189	.188	.187
22	.186	.185	.184	.184	.183	.182	.181	.180	.180	.179
23	.178	.177	.176	.176	.175	.174	.173	.172	.172	.171
24	.170	.169	.168	.167	.166	.165	.164	.164	.164	.163
25	.162	.161	.160	.160	.159	.158	.157	.156	.156	.155
26	.154	.153	.152	.152	.151	.150	.149	.148	.148	.147
27	.146	.145	.145	.144	.143	.143	.142	.141	.140	.140
28	.139	.138	.137	.137	.136	.135	.134	.133	.133	.132
29	.131	.130	.130	.129	.128	.128	.127	.126	.125	.125
30	.124	.123	.123	.122	.121	.121	.120	.119	.118	.118
31	.117	.116	.116	.115	.114	.114	.113	.112	.111	.111
32	.110	.109	.109	.108	.107	.107	.106	.105	.104	.104

Table No. 3.  $(0.56 - 0.092 \sqrt{e_d})$  in terms of mean vapour pressure ( $e_d$ ) in mb and tenths.

$e_a$ , mb.

°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
16	18.17	18.29	18.41	18.52	18.64	18.76	18.88	19.00	19.12	19.25
17	19.37	19.49	19.61	19.74	19.86	19.99	20.12	20.24	20.37	20.50
18	20.63	20.76	20.89	21.02	21.16	21.29	21.42	21.56	21.69	21.83
19	21.96	22.10	22.24	22.38	22.52	22.66	22.80	22.94	23.09	23.23
20	23.37	23.52	23.66	23.81	23.96	24.11	24.26	24.41	24.56	24.71
21	24.86	25.01	25.17	25.32	25.48	25.64	25.79	25.95	26.11	26.27
22	26.43	26.59	26.75	26.92	27.08	27.25	27.41	27.58	27.75	27.92
23	28.09	28.26	28.43	28.60	28.77	28.95	29.12	29.30	29.48	29.65
24	29.83	30.01	30.19	30.37	30.56	30.74	30.93	31.11	31.30	31.48
25	31.67	31.86	32.05	32.24	32.43	32.63	32.82	33.02	33.21	33.41
26	33.61	33.81	34.01	34.21	34.41	34.62	34.82	35.03	35.23	35.44
27	35.65	35.86	36.07	36.28	36.50	36.71	35.92	37.14	37.36	37.58
28	37.80	38.02	38.24	38.46	38.69	38.91	39.14	39.37	39.59	39.82
29	40.06	40.29	40.52	40.76	40.99	41.23	41.47	41.71	41.95	42.19
30	42.43	42.67	42.92	43.17	43.41	43.66	43.91	44.17	44.42	44.67
31	44.93	45.18	45.44	45.70	45.96	46.22	46.49	46.75	47.02	47.28
32	47.55	47.82	48.09	48.36	48.64	48.91	49.19	49.47	49.75	50.03
33	50.31	50.59	50.87	51.16	51.45	51.74	52.03	52.32	52.61	52.90
34	53.20	53.50	53.80	54.10	54.40	54.70	55.00	55.31	55.62	55.93
35	56.24	56.55	56.86	57.18	57.49	57.81	58.13	58.45	58.77	59.10

Table No. 4. Saturation vapour pressure in terms of temperature in degrees Celsius and tenths, expressed in mb.

$\sigma T^4$ , mm/day

°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
16	13.84	13.86	13.88	13.90	13.92	13.94	13.95	13.97	13.99	14.01
17	14.03	14.05	14.07	14.09	14.11	14.13	14.15	14.17	14.19	14.21
18	14.23	14.25	14.27	14.29	14.31	14.33	14.35	14.37	14.39	14.41
19	14.43	14.45	14.47	14.49	14.51	14.53	14.54	14.56	14.58	14.60
20	14.62	14.64	14.66	14.68	14.70	14.73	14.75	14.77	14.79	14.81
21	14.83	14.85	14.87	14.89	14.91	14.93	14.95	14.97	14.99	15.01
22	15.03	15.05	15.07	15.09	15.11	15.13	15.15	15.17	15.19	15.21
23	15.23	15.25	15.27	15.29	15.31	15.34	15.36	15.38	15.40	15.42
24	15.44	15.46	15.48	15.50	15.52	15.55	15.57	15.59	15.61	15.63
25	15.65	15.67	15.69	15.71	15.73	15.76	15.78	15.80	15.82	15.84
26	15.86	15.88	15.90	15.92	15.94	15.97	15.99	16.01	16.03	16.05
27	16.07	16.09	16.11	16.14	16.16	16.18	16.20	16.22	16.25	16.27
28	16.29	16.31	16.33	16.35	16.37	16.40	16.42	16.44	16.46	16.48
29	16.50	16.52	16.54	16.57	16.59	16.61	16.63	16.65	16.68	16.70
30	16.72	16.74	16.77	16.79	16.81	16.84	16.86	16.88	16.90	16.93
31	16.95	16.97	16.99	17.02	17.04	17.06	17.08	17.10	17.13	17.15
32	17.17	17.19	17.22	17.24	17.26	17.29	17.31	17.33	17.35	17.38
33	17.40	17.42	17.45	17.47	17.49	17.52	17.54	17.56	17.58	17.61
34	17.65	17.68	17.70	17.72	17.75	17.77	17.79	17.81	17.84	17.86
35	17.88	17.90	17.93	17.95	17.97	18.00	18.02	18.04	18.07	18.09

Table No. 5. Radiated energy in terms of temperature in degrees Celsius and tenths, expressed in mm of evaporable water per day.

$\Delta/\delta$

°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
16	1.759	1.769	1.779	1.789	1.799	1.810	1.820	1.830	1.840	1.850
17	1.860	1.871	1.881	1.891	1.902	1.913	1.924	1.934	1.945	1.955
18	1.966	1.977	1.988	1.999	2.010	2.022	2.033	2.044	2.055	2.066
19	2.077	2.089	2.100	2.112	2.124	2.136	2.147	2.159	2.171	2.182
20	2.194	2.206	2.218	2.230	2.242	2.255	2.267	2.279	2.291	2.303
21	2.315	2.328	2.340	2.353	2.366	2.379	2.391	2.404	2.417	2.429
22	2.442	2.455	2.469	2.482	2.496	2.509	2.522	2.536	2.549	2.563
23	2.576	2.590	2.604	2.618	2.632	2.646	2.659	2.673	2.687	2.701
24	2.715	2.730	2.744	2.759	2.773	2.788	2.802	2.817	2.831	2.846
25	2.860	2.875	2.890	2.906	2.921	2.936	2.951	2.966	2.982	2.997
26	3.012	3.028	3.044	3.060	3.076	3.092	3.107	3.123	3.139	3.155
27	3.171	3.188	3.204	3.221	3.237	3.254	3.270	3.287	3.303	3.320
28	3.336	3.353	3.371	3.388	3.405	3.423	3.440	3.457	3.474	3.492
29	3.509	3.527	3.545	3.563	3.581	3.599	3.617	3.635	3.653	3.671
30	3.689	3.708	3.727	3.746	3.765	3.784	3.802	3.821	3.840	3.859
31	3.878	3.898	3.917	3.937	3.956	3.976	3.996	4.015	4.035	4.054
32	4.074	4.094	4.115	4.135	4.156	4.176	4.196	4.217	4.237	4.258
33	4.278	4.299	4.320	4.342	4.363	4.384	4.405	4.426	4.448	4.469
34	4.490	4.512	4.534	4.556	4.578	4.600	4.622	4.644	4.666	4.688
35	4.712	4.735	4.758	4.781	4.804	4.827	4.850	4.873	4.896	4.919

Table No. 6. Ratio of the slope of the saturation vapour pressure to the psychrometric constant in terms of temperature in degrees Celsius and tenths.

Water Budget - WB

1. Method

1.1 Monthly mean potential evapotranspiration ( $E_t$ ), (calculated with a reflection coefficient of 0.25) and rainfall (P) were compared, to assess how rain water is apportioned and estimate water availability in terms of atmospheric demand at various times. The importance of these characteristics for plant growth and development was discussed in the first part of this chapter.

1.2 This apportioning was done numerically and with the help of diagrams such as Fig WB.1.1., on which monthly histograms of rainfall and potential evapotranspiration have been plotted. The diagrams made possible graphical interpolation to reduce the length of the intervals of time considered from months to periods as short as single days.

1.3 The various water availability parameters derived from this comparison were listed on a special form. They are:

Water deficit, or excess of potential evapotranspiration over rainfall (WD)

Water surplus, or excess of rainfall over evapotranspiration (WS)

Evaporation loss (EL) or the amount of rain, markedly inferior to potential evapotranspiration, falling early in the season at a time when it is thought that it could not be made available to crops, but would instead be returned to the atmosphere by evaporation almost exclusively from bare soil. It is, in fact, rain falling before the beginning of the moist period, (which will be defined presently). Monthly mean evaporation loss was summed from estimates for periods shorter than a month, obtained by graphical interpolation.

1.4 In such a budget, the amount of water stored in the ground up to field capacity, later to be made available to the plant, must also be taken into account.

Ground storage denotes this amount. Its maximum will vary with the structure and texture of the soil and differences in storage capacity can only be examined in detail at the scale of local studies. Here, a maximum amount of 100 mm ground storage was taken as standard. It is realised that the amount may often be different in reality; however, assumptions can be made to budget for higher or lower storage.

Ground charge is the monthly amount put in or taken from the ground.

Run-off (RO) is the amount of water surplus left over after the ground has been charged to field capacity. Like water surplus, it will depend, for a given annual rainfall and other things being equal, on the intensity of the rainy season. Here it also includes deep drainage which it is not attempted to estimate.

1.5 Available water, or effective rainfall (EP), is the amount of rainfall which neither evaporated early nor ran off, and can, therefore, be deemed to be available for crop production. For the same conditions of total rainfall and evapotranspiration, it is greatest if the rains are evenly spread, without a peak in August, and if the beginning of the rainy season is fairly sharp; if the conditions are in fact the opposite of those which make for relatively large evaporation loss and run-off.

Water budgets for the 35 reference stations are given at Appendix W.B.

1.6 In BILAN HYDRIQUE.- I the agronomic import of the dates at which rainfall is one half of, and equal to, potential evapotranspiration at the beginning and during the end of the rainy season was underlined.\* The periods defined by these dates have been called dry, preparatory, intermediate and humid. A humid period, as

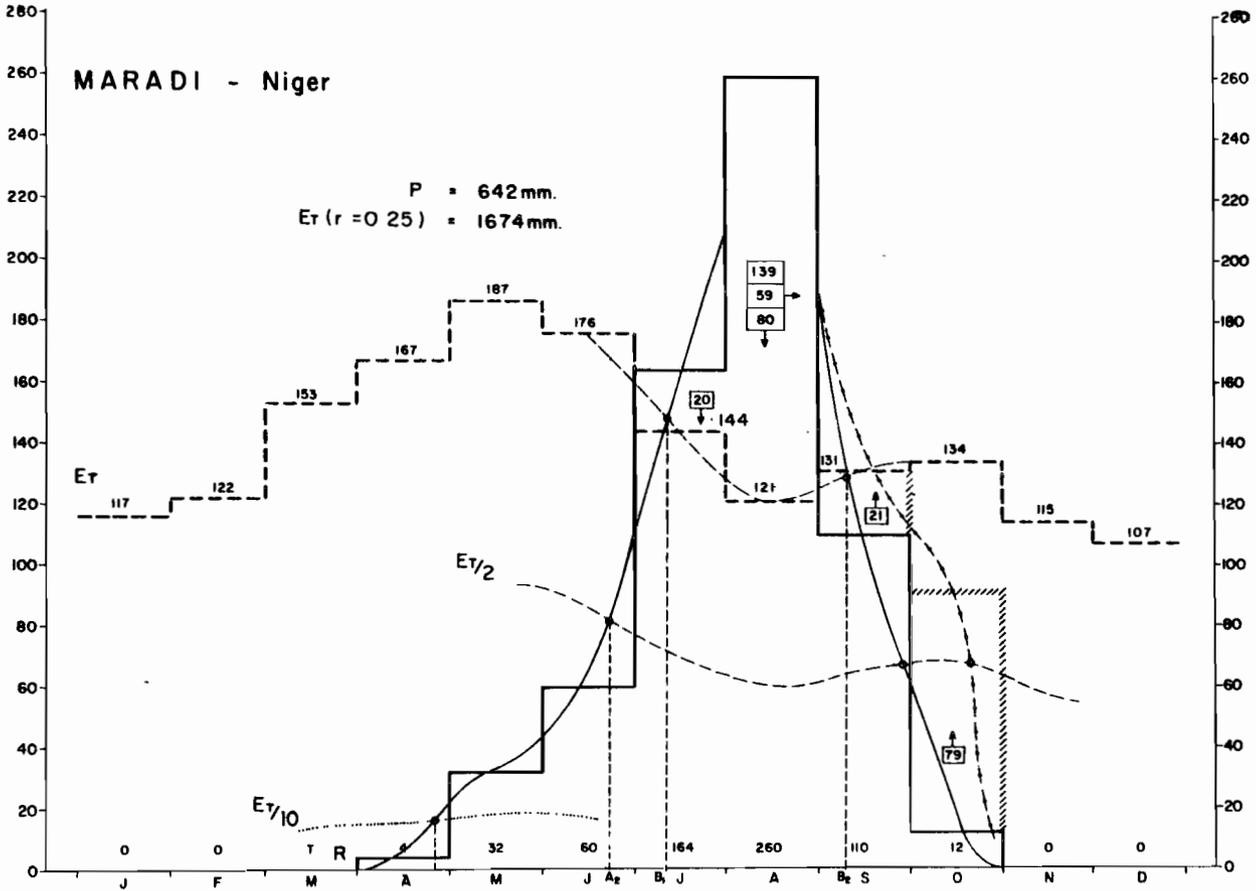


Fig WB.1.1: Monthly mean histograms of rainfall (plain line) and potential evapotranspiration (broken line) with smoothing for interpolation and comparison. Storage is indicated by a diagonally hatched histogram. The first  $P = E_T/2$  and the first and second  $P = E_T$  points are labelled  $A_2$ ,  $B_1$  and  $B_2$  for reference to the agronomic analysis. The point  $P = E_T/10$  defines the beginning of the preparatory period which ends with the beginning of the first intermediate period. The two  $P = E_T$  points limit the humid period. The first  $P = E_T/2$  and the first  $P = E_T$  points limit the first intermediate period. The second intermediate period without storage extends from the end of the humid period (second  $P = E_T$  point) to the second  $P = E_T/2$  point, and with storage to a point  $P + s = E_T/2$  determined by the rainfall plus storage line (dashes with dots). The first and second intermediate and the humid periods together form the moist period, which can be considered with or without storage.

\* To these dates has been added, on Figure WB 1.1, that at which on average rainfall first equals one-tenth of evapotranspiration.

described earlier, is one during which rainfall exceeds potential evapotranspiration and, presumably, actual evapotranspiration equals the potential estimates. During an intermediate period, rainfall is more than half potential evapotranspiration but does not exceed it. Thus there are two such periods, one before and one after the humid period. Here the term "moist period" will be used to define the humid and the two intermediate periods together.

This subdivision of the water availability sequence was carried out to the nearest day by graphical interpolation.

1.7 Various coefficients were calculated.  $P/M+S$  represents average daily rainfall for the whole of the growing season and  $EP/M+S$  the daily mean amount of water available for circulation through the plant during that time.

The coefficient  $EP/P$  may be taken as an index of rainfall efficiency from the standpoint of crops.

The ratios of water surplus and water deficit to rainfall have also been worked out.

$P/E_T$  is an index of humidity on an annual basis which is logically related to productivity as will be seen at CF.3.3.

A more comprehensive relation was obtained by calculating the ratios  $WS$  and  $WD$  over  $E_T$ , called humidity (positive) and aridity (negative) indices respectively. Multiplying the first by 100 and the second by 60 and adding algebraically yielded Thornthwaite's moisture index, but using (as he had forecast would eventually happen) a more accurate estimate than his of potential evapotranspiration (Penman's).

## 2. Estimates

2.1 The values for these various parameters obtained for the 35 stations analysed are tabulated at WB.2.1. in order of magnitude of rainfall. Agadès, Gao and N'Guigni are too arid to form part of the semiarid Area but have been included to help define its subarid adjacent zone.

2.2 Within the Area itself the annual water deficit, estimated on a monthly basis, ranges from 1500 to 900 mm. The water surplus also increases from little or none to 550 mm. In no case does it exceed or even approach the water deficit. Its importance, besides the supplying of running water, will be discussed in the agronomic analysis on pastures and fodder.

The quantity called evaporation loss, or water falling too early to be of much immediate use (it can only be estimated very approximately with the rather coarse time scale used), varies between 25 and 90 mm within the Area. It is of course higher, and closer to rainfall, in the subarid zone where cultivation occurs only spasmodically, in hollows fed by surface run-off and drainage.

2.3. Run-off, estimated on a monthly basis assuming a 100 mm ground charge, begins to occur at places with an annual rainfall in excess of 500 mm. Depending first on August rainfall alone, it increases gradually to 450 mm on the border with the semihumid zone, whilst its proportion to the rainfall increases from 0 to 0.35.

Whenever rainfall intensity exceeds the rate of absorption by the soils (which is on the average about twice as high as rainfall intensity), run-off must occur before the ground is fully charged and, in this respect, the amounts of run-off calculated here are minimums.

	Pot. Transp. (r=0.25) $E_T$ mm	Rain-fall P mm	Water Deficit WD mm	Evap. Loss EL mm	Water Surplus WS mm	Run-off RO mm	Effect. rain-fall EP mm	Moist plus storage M+S Days	$\frac{P}{M+S}$	$\frac{EP}{M+S}$	$\frac{P}{E_T}$	$\frac{WS}{P}$	$\frac{EP}{P}$	$\frac{RO}{P}$	Moisture Index Th
	Agadès	1832	164	1669	164	0	0	0	0	-	-	0.09	-	-	-
N'Guigmi	1808	235	1573	42	0	0	193	(42)	5.6	4.6	0.13	-	0.73	-	-52
Gao	2255	261	1994	151	0	0	110	(25)	10.4	4.4	0.12	-	0.42	-	-53
St.-Louis	1686	346	1361	88	21	0	258	72	4.8	3.6	0.21	0.06	0.74	-	-48
Tahoua	2307	406	1901	112	0	0	294	(64)	6.3	4.6	0.18	-	0.72	-	-49
Abéché	1927	505	1535	51	113	13	441	94	5.4	4.6	0.26	0.22	0.86	0.03	-42
Matam	1619	535	1150	90	66	0	445	110	4.9	4.1	0.33	0.12	0.83	-	-39
Mopti	1984	552	1488	49	56	0	503	105	5.3	4.8	0.28	0.10	0.87	-	-42
Zinder	1924	548	1480	62	104	4	482	100	5.5	4.8	0.28	0.19	0.88	0.01	-41
Dakar Yoff	1825	578	1375	51	128	28	499	112	5.2	4.5	0.32	0.22	0.83	0.05	-38
Birni N'Konni	1875	600	1376	71	101	1	528	121	5.0	4.4	0.32	0.17	0.88	-	-39
Niamey	2057	638	1519	93	100	0	545	118	5.4	4.6	0.31	0.16	0.85	-	-39
Maradi	1674	642	1191	66	159	59	517	120	5.4	4.3	0.38	0.25	0.81	0.09	-34
Fort-Lamy	1958	648	1470	78	160	60	510	120	5.4	4.3	0.33	0.25	0.79	0.09	-37
Maiduguri	1910	659	1410	62	159	59	538	122	5.4	4.4	0.35	0.24	0.81	0.07	-36
Thiès	1726	694	1276	33	244	144	517	130	5.3	4.0	0.40	0.35	0.74	0.21	-30
Segou	1823	724	1277	57	178	78	589	129	5.6	4.6	0.40	0.25	0.81	0.11	-33
Sokoto	1724	734	1188	91	198	98	545	130	5.6	4.2	0.43	0.27	0.74	0.13	-30
Kayes	1820	821	1252	53	253	153	615	143	5.7	4.3	0.45	0.31	0.75	0.19	-27
Maroua	1709	841	1145	50	277	177	614	152	5.5	4.0	0.49	0.33	0.73	0.21	-24
Mongo	1491	858	1000	75	367	267	516	135	6.4	3.8	0.57	0.43	0.60	0.31	-15
Kano	1802	871	1204	51	273	173	647	143	6.1	4.5	0.48	0.31	0.74	0.20	-25
Kaélé	1807	878	1193	72	264	164	642	148	5.9	4.3	0.49	0.30	0.73	0.19	-25
Ouagadougou	1786	882	1151	82	247	147	653	159	5.6	4.1	0.49	0.28	0.74	0.17	-25
Am-Timan	1514	919	913	92	318	218	609	165	5.6	3.7	0.61	0.35	0.66	0.24	-15
Bouso	1472	931	940	48	399	299	584	160	5.8	3.6	0.63	0.43	0.63	0.31	-11
Tambaounda	1616	941	1065	22	390	290	629	163	5.8	3.9	0.58	0.41	0.67	0.31	-15
Garoua	1882	1012	1132	74	264	164	775	179	5.7	4.3	0.54	0.26	0.80	0.16	-22
Pala	1598	1044	930	72	376	276	696	185	5.6	3.8	0.65	0.36	0.67	0.26	-11
Navrongo	1703	1095	954	72	346	246	777	184	6.0	4.2	0.64	0.32	0.71	0.22	-14
Bamako	1804	1099	1156	49	451	351	699	164	6.7	4.3	0.61	0.41	0.64	0.32	-13
F. Arohambault	1421	1141	793	23	512	412	706	198	5.8	3.6	0.80	0.45	0.62	0.29	+ 2
Bobo Dioulasso	1712	1185	956	73	429	329	783	189	6.3	4.8	0.69	0.36	0.66	0.28	- 9
Moundou	1465	1228	793	42	555	455	731	208	5.9	3.5	0.84	0.45	0.60	0.37	+ 6
Kaduna	1793	1298	1037	52	542	442	804	202	6.4	4.0	0.72	0.42	0.62	0.34	- 5

Table WB.2.1. Mean annual water budget parameters and coefficients of the 35 reference stations arrayed in increasing order of mean annual rainfall. All the amounts listed on the right are in millimeters of water. WD, WS, EL, RO and EP are worked out on a monthly basis. From amongst the coefficients on the left, it is seen that P/M+S and EP/M+S are fairly constant. EP/P, the rainfall efficiency index, is highest around 600 mm mean annual rainfall. The moisture index is derived from Thornthwaite's formula,  $60WD+100WS/E_T$ , but using  $E_T$  values obtained by Penman's method.

On the other hand, it is appreciated that cultivation practices may be designed to reduce run-off and bring actual effective rainfall nearer to total rainfall.

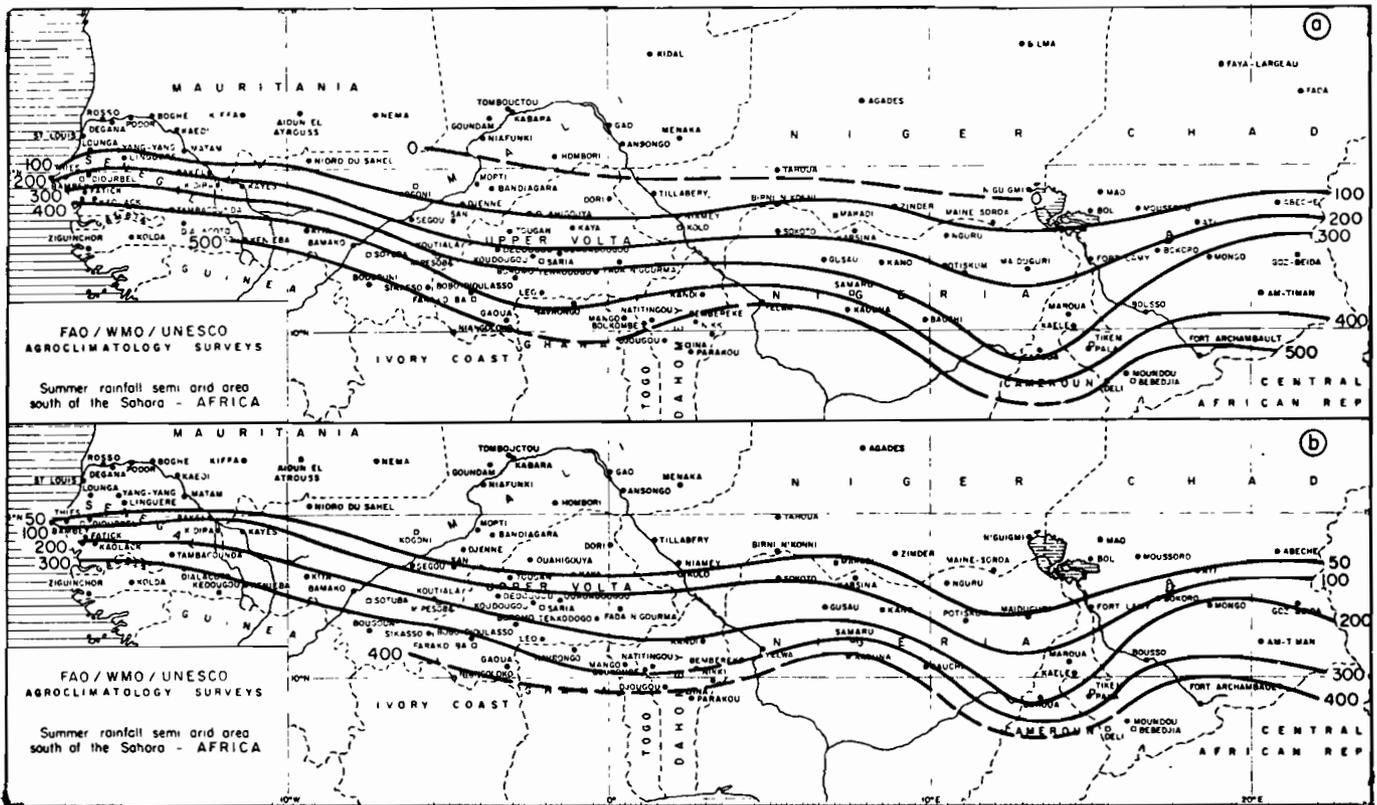


Fig WB.2.2. Water Surplus a) and run-off b) in mm. In the south of the Area run-off is 1/3 of rainfall although potential evapotranspiration is still well in excess of rainfall.

The distribution of water surplus and run-off in the Area are given at WB.2.2. and may be taken to give some idea of its water storage and irrigation potentials.

2.4. Effective rainfall, the distribution of which is illustrated at WB.2.3a) is seen to increase gradually from north to south but not in complete accordance with rainfall, being relatively highest where rainfall is most evenly spread and excessive August falls do not occur. The range is from about 200 to 800 mm within the Area itself. The index of rainfall efficiency, WB.2.3.b), going from north to south, at first shows a slight increase reaching a maximum where annual rainfall is around 600 mm away from the coast. It then falls off southwards as rainfall and water surplus increase.

2.5. The daily mean effective rainfall during the moist period is fairly constant throughout the Area, not departing very far from four mm. Thus we see that although there is much variation in the length of the moist period, water is available during it at a fairly constant rate. This is of course due to the prevailing rates of potential evapotranspiration during the rains.

2.6.  $P/E_T$  varies from 0.20 to 0.80 from north to south across the semiarid Area and the Thornthwaite-Penman index from about -50 to nil.

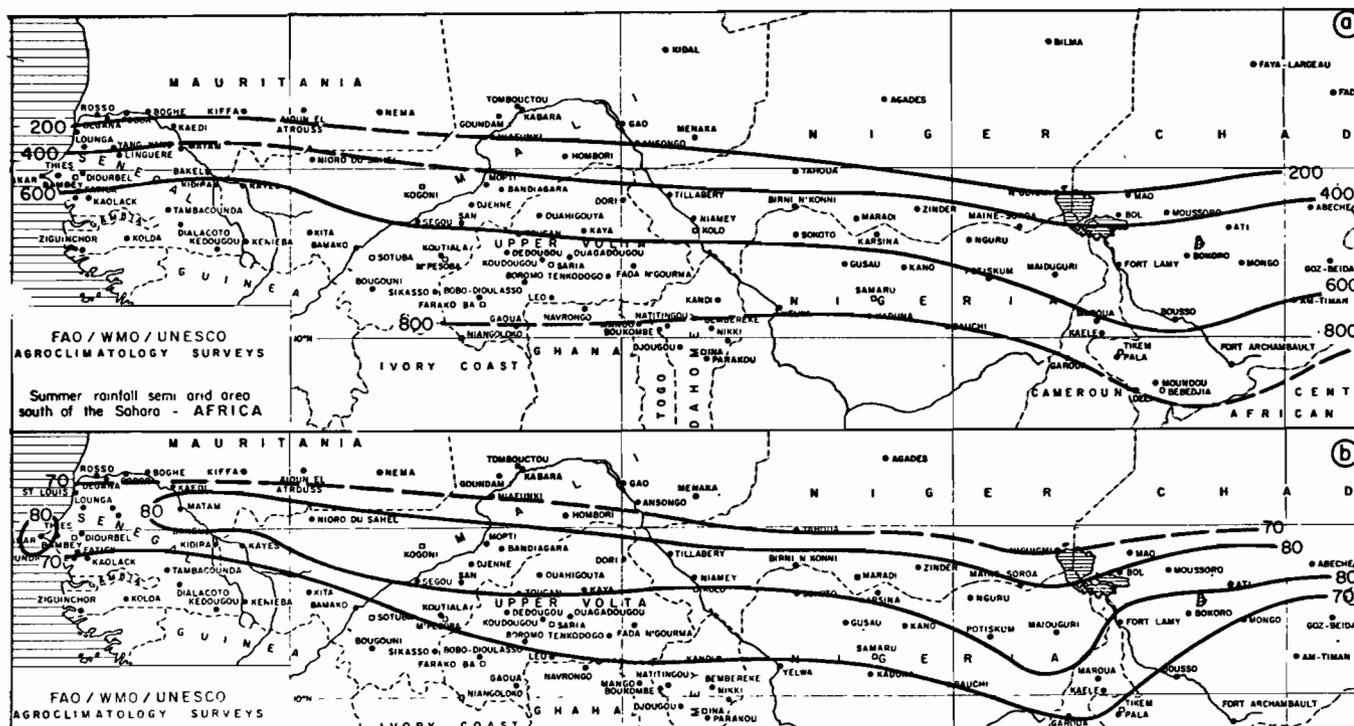


Fig WB.2.3. a) Effective Rainfall. b) Rainfall Efficiency Index. Highest in the central zone it decreases northward because of relatively large amounts of unused evaporated water and to the south because of increasing run-off.

### 3. Periods.

3.1. The approximate dates of the beginning and end of the various periods defined at 1.5. and obtained by graphical interpolation are given at Table WB.3.1. Period durations were calculated from these dates and this information will now be discussed in some detail.

3.2. The preparatory period as explained in the agronomic part of this chapter may be utilised for preparation of the soil and early sowing of crops resistant to drought in the seedling stage. Its beginning as estimated graphically and illustrated at WB.3.2.a) is related to mean annual rainfall with the important exception that it is retarded on the west coast. At Dakar in Senegal the period begins on 15 June whereas at Birni N'Koni in Niger with approximately the same annual rainfall the date is 4 May and at Abeche in Chad with a little less rain, 9 May.

The extreme west of the Area also differs from the rest in that the length of this period, illustrated at WB.3.2.b), is also much shorter. This is one of the few criteria according to which some meridional boundaries can be drawn across the rainfall zones. It is not without importance in terms, for instance, of national pools of agricultural implements, when more might be required if the period is shorter, or of subsistence cultivations carried out prior to the sowing of cash crops, or of supplementary irrigation.

Generally this period is longest in the central zone, where it exceeds 50 days. It falls off to the north as all the rainfall periods become shorter, and to the south, where more abundant rainfall soon enters the moist period. This decrease with increasing rainfall is also marked in the west so that the shortest period estimated here is 17 days at Tambacounda as compared with 37 at Bamako and 41 at Bousso of similar annual rainfall.

PLACES	Dates							Number of days						
	P	B of Pr	B of M	B of H	E of H	E of M	E of M+S	Pr	I <sub>1</sub>	H	I <sub>2</sub>	M	S	M+S
Agadès	164	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0
N'Guigmi	235	20.VI	23.VII	-	-	3.IX	3.IX	33	-	0	-	42	-	(42)
Gao	261	27.V	2.VIII	-	-	25.VIII	25.VIII	67	-	0	-	23	-	(23)
St.-Louis	346	21.VI	22.VII	7.VIII	25.VIII	28.IX	2.X	31	16	18	34	68	4	72
Tahous	406	26.V	6.VII	-	-	8.IX	8.IX	41	-	0	-	64	-	(64)
Abéché	505	9.V	29.VI	18.VII	4.IX	15.IX	1.X	51	19	48	11	78	16	94
Matam	535	4.VI	30.VI	22.VII	9.IX	30.IX	17.X	26	23	49	21	93	17	110
Mopti	552	16.V	25.VI	15.VII	7.IX	27.IX	8.X	40	20	54	20	94	11	105
Zinder	548	5.V	25.VI	16.VII	4.IX	15.IX	3.X	50	21	50	11	82	18	100
Dakar Yoff	578	15.VI	9.VII	25.VII	20.IX	9.X	29.X	24	16	57	19	92	20	112
Birni N'Konni	600	4.V	23.VI	19.VII	8.IX	23.IX	22.X	50	26	51	15	92	29	121
Niamey	638	28.IV	20.VI	10.VII	6.IX	24.IX	16.X	53	20	58	18	96	22	118
Maradi	642	30.IV	22.VI	11.VII	10.IX	27.IX	20.X	53	19	61	17	97	23	120
Port-Lamy	648	1.V	20.VI	10.VII	10.IX	26.IX	18.X	50	20	62	16	98	22	120
Maiduguri	659	3.V	17.VI	5.VII	11.IX	29.IX	17.X	45	18	68	18	104	18	122
Thiès	694	6.VI	30.VI	18.VII	1.X	13.X	8.XI	24	18	74	13	105	25	130
Segou	724	15.V	13.VI	2.VII	17.IX	30.IX	20.X	29	19	77	13	109	20	129
Sokoto	734	19.IV	10.VI	5.VII	21.IX	3.X	20.X	52	25	78	12	115	15	130
Kayes	821	15.V	11.VI	3.VII	21.IX	11.X	1.XI	27	22	80	20	122	21	143
Maroua	841	19.IV	25.V	22.VI	25.IX	6.X	24.X	36	28	95	11	134	18	152
M'ngo	858	18.IV	16.VI	28.VI	25.IX	8.X	29.X	59	12	89	13	114	21	135
Kano	871	23.IV	28.V	25.VI	16.IX	30.IX	19.X	35	27	83	14	124	19	143
Kaélé	878	6.IV	24.V	21.VI	26.IX	8.X	20.X	48	27	97	12	136	12	148
Ouagadougou	882	15.IV	22.V	24.VI	22.IX	6.X	28.X	37	33	90	14	137	22	159
Am-Timan	919	10.IV	17.V	20.VI	24.IX	9.X	29.X	37	34	96	15	145	20	165
Bouso	931	14.IV	25.V	18.VI	28.IX	10.X	2.XI	41	24	102	12	138	23	161
Tambacounda	941	15.V	2.VI	19.VI	6.X	20.X	12.XI	18	17	109	14	140	23	163
Garoua	1013	1.IV	6.V	9.VI	1.X	14.X	1.XI	36	34	114	13	161	18	179
Pala	1044	28.III	8.V	5.VI	4.X	20.X	9.XI	41	28	121	16	165	20	185
Navrongo	1095	17.III	2.V	13.VI	3.X	14.X	2.XI	46	42	112	11	165	19	184
Bamako	1099	19.IV	26.V	17.VI	2.X	14.X	6.XI	37	22	107	12	141	23	164
F.-Archambault	1141	23.III	2.V	1.VI	8.X	23.X	17.XI	43	27	129	15	171	25	196
Bobo Dioulasso	1185	14.III	1.V	15.VI	3.X	17.X	6.XI	48	45	110	14	169	20	189
Moundou	1228	27.III	27.IV	24.V	11.X	27.X	21.XI	31	27	140	16	183	25	208
Kaduna	1298	19.III	22.IV	20.V	9.X	21.X	10.XI	34	28	142	12	182	20	202

Table WB.3.1. To the left, mean dates of beginning and end of the availability-of-water periods at the 35 reference stations. The stations are arrayed in order of increasing mean annual rainfall listed in column P. Listed under B of Pr are the dates of the beginning of the preparatory period, and under E of M+S those of the end of the moist period with storage. M stands for moist period and H for humid period. To the right, mean number of days of those periods. I<sub>1</sub> is the prehumid intermediate period and I<sub>2</sub> the posthumid. S is the number of days which can be added to M or I<sub>2</sub> owing to storage. Where there was no humid M+S is in brackets.

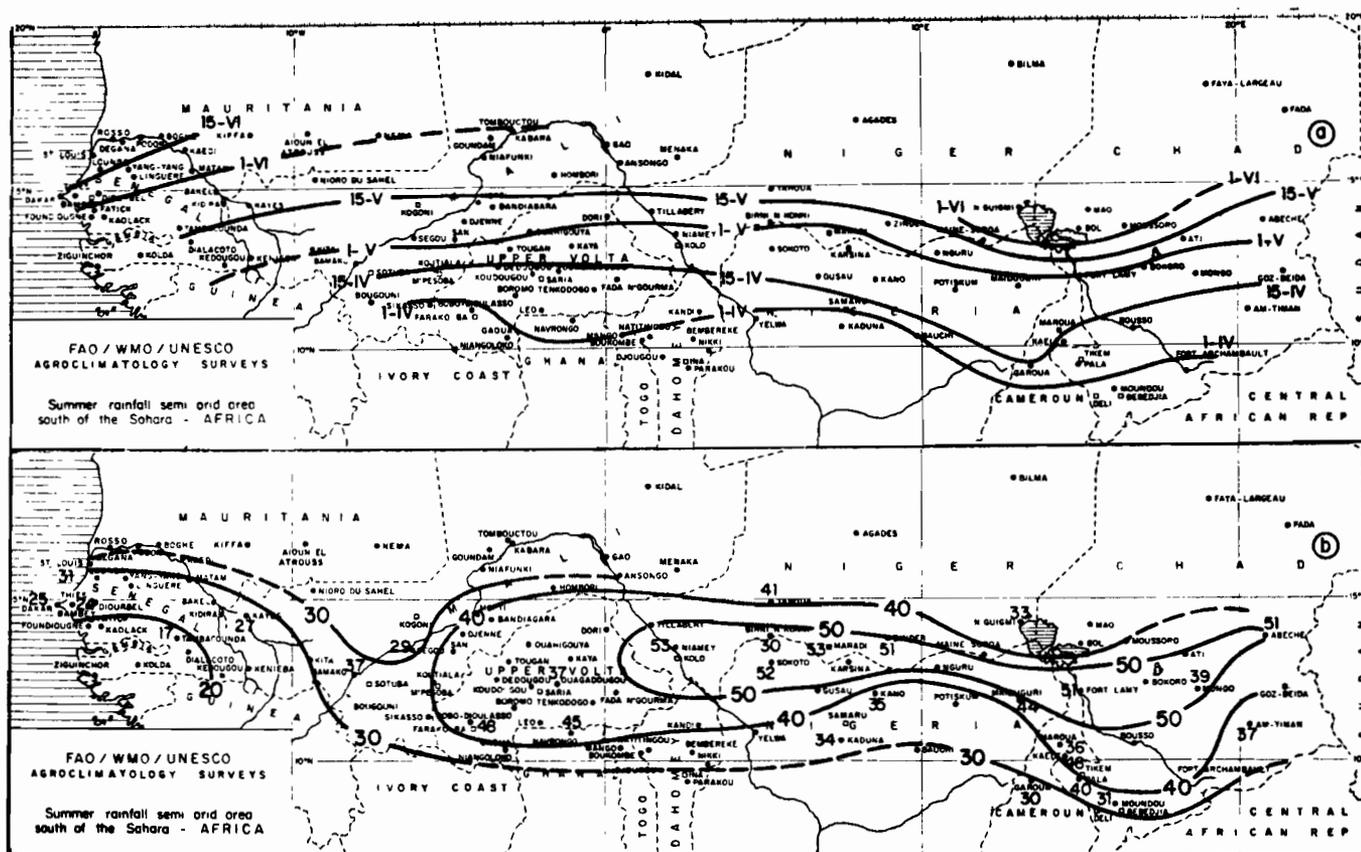


Fig WB.3.2. Preparatory period. a) Isochrones of the beginning. b) Distribution of the length of the period in days.

3.3. The beginning of the moist period which is also that of the first intermediate is an important date since in many cases, as already explained, it is the best time for sowing. Its distribution is illustrated at Fig WB.3.3.a). It too shows alignment with rainfall with some retardation in Senegal. At St. Louis on the coast with an annual rainfall of 345 mm it is on 22 July whereas at N'Guigmi, just west of lake Chad, which receives 235 mm it is 23 June. Furthermore, in west Senegal, this climatic event does not show as much variation with annual rainfall as further east. Whereas in that region, as shown at section PA, there is much variation in rainfall over a relatively short distance, sowing time, after a very short preparation period, arrives almost everywhere at once. The end of the moist period, as can be seen at b), is also retarded on the Atlantic coast but not to the same extent as the beginning.

The length of the moist period, together with the 100 mm allowance for water storage, is probably at the scale of this analysis the nearest approach to the length of the dry farming growing season. Its distribution is shown at WB.3.3.d). It varies in the area itself between about 200 and 75 days. The gradient, unlike that of annual rainfall, is not appreciably tighter in Senegal than anywhere else. The southerly slope of the isolines from Senegal to Chad is about the same as with annual rainfall. This means that the same length of growing season will be associated with different photoperiodic conditions and seasonal temperatures as longitude varies.

3.4. At WB.3.4.a) to c) are shown the distribution of the dates of the beginning and end of the humid period and of the length of the humid period itself. There again the isochrones for the beginning of the period generally follow the annual isohyets with sharp retardation near the Atlantic coast. As a result of the preparatory period and

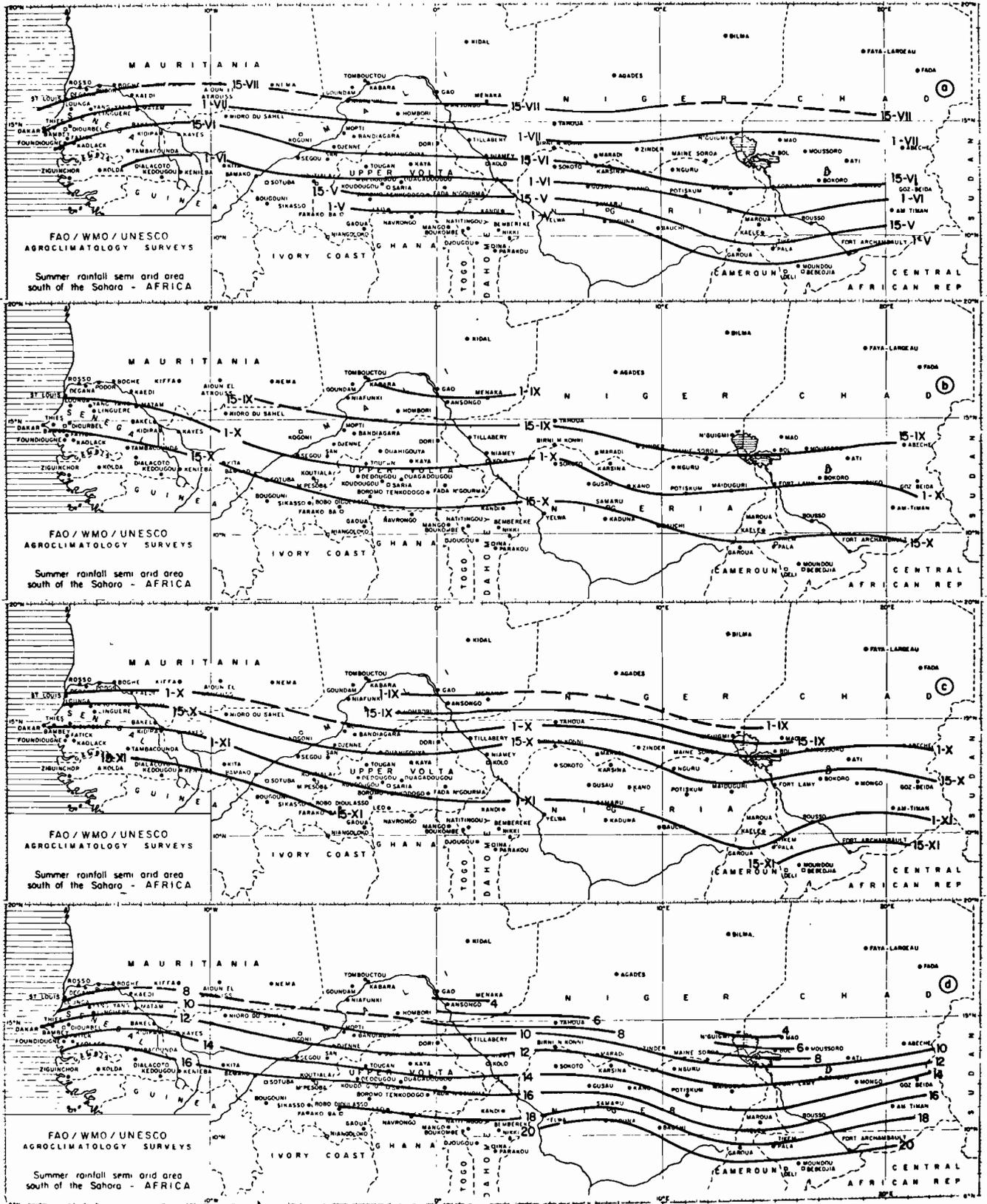


Fig WB.3.3. Moist period. Isochrones of (a) beginning, (b) end, (c) end plus reserve, (d) length in ten day units.

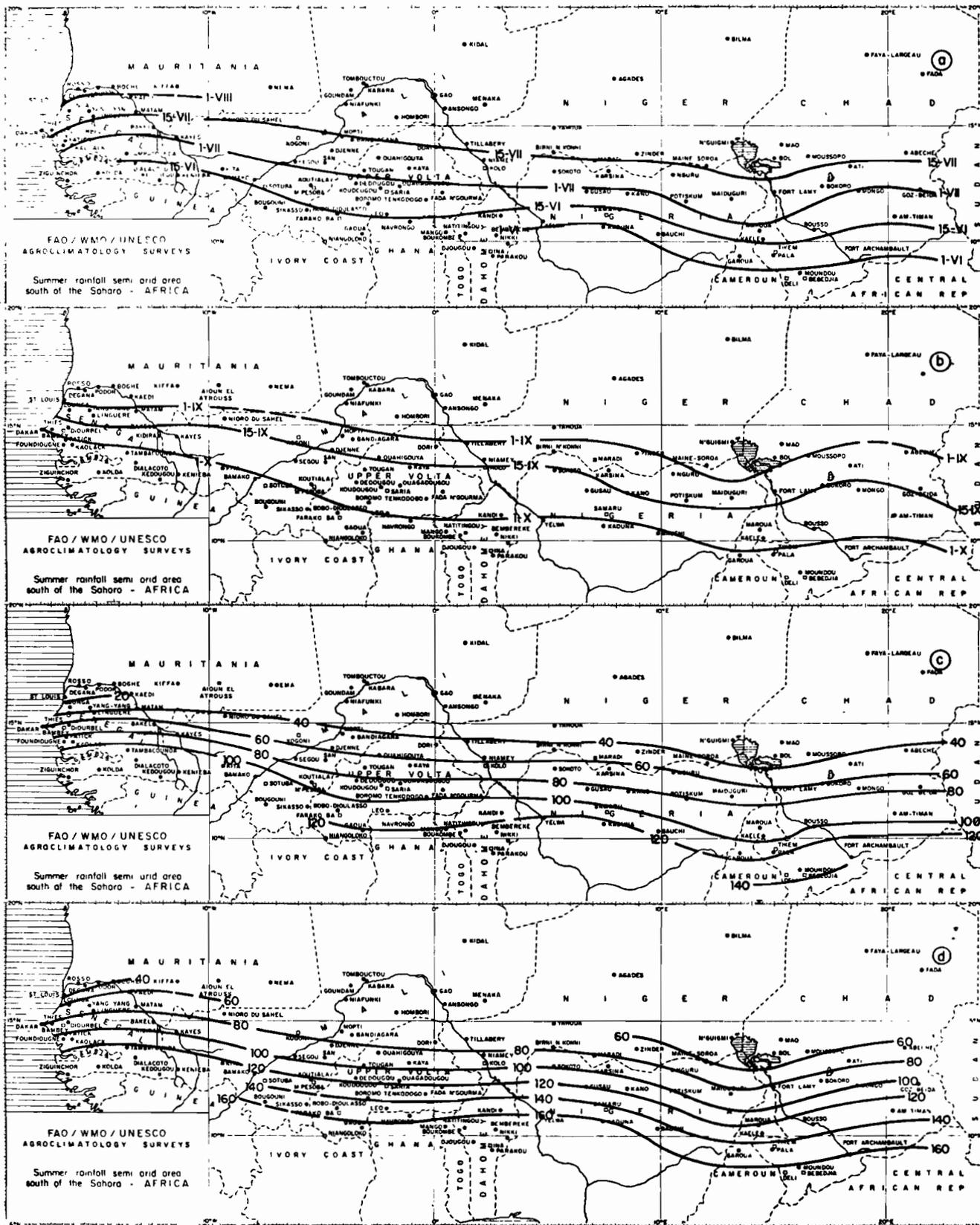


Fig WB.3.4. Humid Period. a) Beginning. b) End. c) Length in ten-day steps  
d) Length of first intermediate plus humid period.

to some extent the first intermediate being shorter in Senegal the beginning of the humid period is now about the same everywhere for places of equal rainfall. It is 18 June both at Tambacounda and Bousso. The end of the period is also retarded in Senegal where it shows, as a result, a time lag compared with the rest of the area, probably best seen on the general diagram WB. 3.5. shown at the end of this section.

At d) the distribution of the length of the first intermediate and humid periods combined, of which the importance has been stressed in the agronomic analysis and will be taken up again when discussing the crops of the area, is illustrated. Again the familiar pattern is seen, similar to that of the rainfall and with two minimums along meridional axes on the coast of Senegal and south of lake Chad.

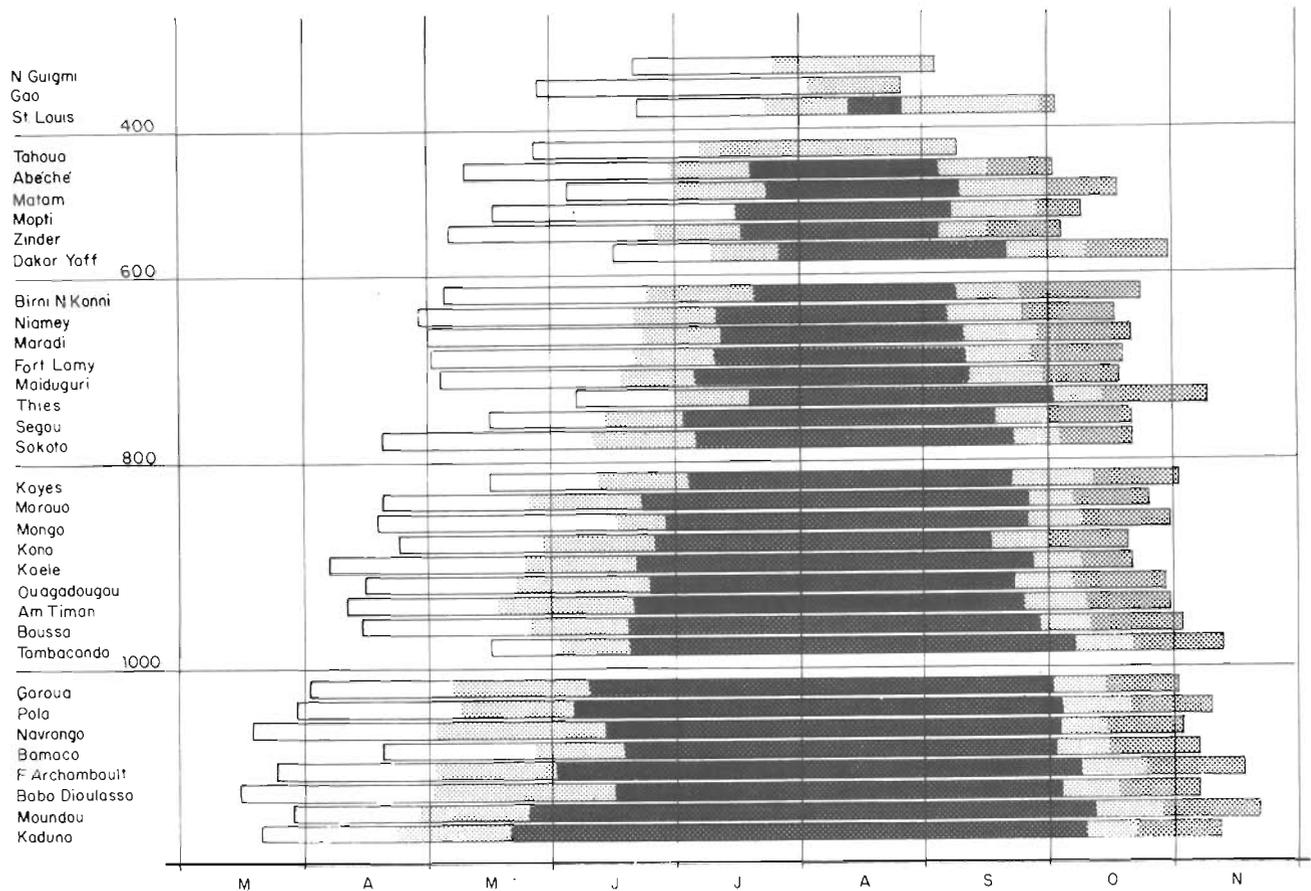


Fig WB.3.5. Relative length of water availability periods. From left to right : preparatory, intermediate, humid (darkest), intermediate, intermediate with storage. Notice the lag, especially at the beginning of the season of St. Louis, Thies, Dakar and Tambacounda, all in Senegal.

4. Variability of Availability-of-Water Periods.

4.1. The periods which have been estimated are averages. In response to yearly fluctuations, mainly of rainfall, availability-of-water periods vary in duration and timing from year to year. A pilot study was carried out to gain some idea of this variability.

4.2. For the period 1931-1960 at Zinder, in central Niger, with a mean annual rainfall of 550 mm and a coefficient of variability of 22%, the dates of the beginning of the moist and of the humid periods were determined to the nearest ten days. This was done graphically by comparing annual histograms of 10-day rainfall amounts with an annual mean potential evapotranspiration curve based on the period 1953-1962, potential evapotranspiration - as shown at WE.5 - being by far the less variable element. The results are tabulated at WB.4.1. showing the number of occasions when these two seasons began during each decade.

Z I N D E R    N i g e r    1931-1960

Month	May			June			July			August	Mean dates
Decade	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	of beginning
Intermediate				3	5	3	10	8	1		21 June
Intermediate false start	2	5	3	1	2	1					
Humid					2	4	8	9	5	2	15 July

*Table WB.4.1. Frequency by decades of beginning of first intermediate and humid periods in terms of decade rainfall and 10 year average potential evapotranspiration.*

4.3. It is seen that the beginning of the first intermediate or moist period is spread between the first decade of June and the last decade of July, the median date falling during the first decade of July. The mean date of beginning was 21 June, and the mean date obtained from the graphical smoothing of the monthly histograms and tabulated at WB.3.1. is June 25. The agreement between these two mean dates and the median is improved if false starts are taken into account.

The median ten day period for the beginning of the humid period is July 11-20, the calculated mean date is 15 July and that taken from Table WB.3.1. is 16 July. For both periods the distribution of the frequencies of occurrence appears somewhat normal, with a mean deviation of  $2\frac{1}{2}$  decades for the moist period and  $1\frac{1}{2}$  for the humid. The 30 starts of the humid period are more closely bunched. Their frequency distribution may be taken to mean that more than half of the time the period will begin during the first twenty days of July, and sometime during that month three occasions out of four.

4.4. False starts of the first intermediate or moist period are important since, as suggested in the agronomic analysis, this date may be the best for sowing some of the important crops in the Area. They were defined as conditions such that for at least one decade the water balance reverts to preparatory or even more arid conditions. An example is given at Fig WB.4.2.

From Table WB.4.1. it can be seen that false starts occurred half of the years. None however during the median decade for the beginning of the moist period or later. They seem, in fact, to be due to early rains rather than to late interruptions of the rains. This means that, on the evidence of a 30-year series, systematic sowing on 1 July would be free from the risk of false starts. Interruptions of the humid period were fewer and in most cases there were indications of sufficient reserve to maintain available water level at least as high as the half evapotranspiration level.

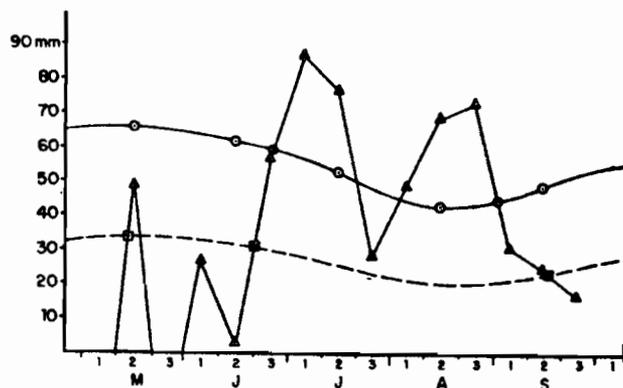


Fig WB.4.2. Determination of availability of water periods in 1960 by comparing 10 day rainfall amounts (triangles), 1953-62 mean  $E_p$  (circles) and  $E_p/2$  (dotted line). False start of moist is considered significant but not dent in humid.

## 5. Potential Evapotranspiration during the Availability-of-Water Periods.

5.1. Since the availability of water is the dominant limiting factor to the duration of the growing seasons, it is during the various availability-of-water periods that the climatic parameters which control growth and development become particularly important and require analysis.

Outside these periods the parameters may be of importance in connection with flood plain and irrigation cultivations which are not considered in this survey.

5.2. As an example, at Table WB.5.1. monthly mean potential evapotranspiration at the 35 reference stations expressed in mm per day is listed and, on the same table, the durations of the moist and humid periods have been outlined. It is seen that the demands for water from the atmosphere which actually affect plants are appreciably smaller than those prevailing before and after the growing season.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Agades	4.45	5.75	6.16	6.75	7.03	6.81	6.53	5.74	5.66	5.45	4.84	4.19
N'Guigmi	3.83	4.59	5.20	5.72	5.95	5.98	5.43	4.71	4.88	4.83	4.21	3.57
Gao	4.56	5.88	6.87	7.32	7.93	7.63	6.80	5.71	6.11	5.86	4.91	4.54
St. Louis	4.22	4.59	5.49	5.17	4.75	4.70	4.62	4.52	4.60	4.54	4.24	4.06
Tahoua	5.90	6.65	6.83	7.47	7.72	7.58	6.00	4.89	5.47	6.11	6.19	5.13
Abéché	4.55	5.44	6.11	6.86	6.54	5.84	4.90	3.83	4.59	5.28	5.19	4.25
Matam	3.06	3.74	4.57	5.20	5.73	6.20	5.02	4.37	4.56	4.42	3.48	2.95
Mopti	4.72	5.82	6.78	7.43	6.80	6.29	4.99	4.48	4.53	4.76	4.50	4.17
Zinder	4.44	5.48	5.95	6.39	6.39	6.15	5.08	4.12	4.87	5.39	4.81	4.19
Dakar	4.59	4.78	5.16	5.76	5.36	5.51	5.14	4.55	4.75	4.81	4.96	4.88
Birni N'Konni	4.58	5.45	5.85	6.24	6.42	6.09	4.74	4.22	4.53	4.83	4.46	4.25
Niamey	5.20	5.98	6.68	6.96	7.08	6.76	5.04	4.23	4.58	5.52	5.06	4.61
Maradi	3.77	4.37	4.94	5.55	6.02	5.87	4.65	3.91	4.35	4.33	3.83	3.46
Fort Lamy	4.70	5.77	6.64	7.21	6.85	5.84	4.43	3.74	4.44	5.14	5.24	4.53
Maiduguri	4.66	5.68	6.48	6.95	6.70	5.74	4.34	3.64	4.32	5.04	4.96	4.27
Thies	4.31	5.22	6.16	6.39	5.79	5.14	4.39	3.71	3.99	4.16	3.92	3.59
Segou	4.44	5.30	5.93	6.05	6.31	5.70	4.53	3.96	4.25	4.59	4.42	4.14
Sokoto	4.17	4.81	5.43	6.03	5.90	5.41	4.18	3.62	4.14	4.70	4.42	3.90
Kayes	4.34	4.97	5.98	6.56	6.97	5.93	4.66	3.81	4.15	4.47	4.07	3.91
Maroua	4.21	5.41	5.96	5.97	5.80	4.71	3.94	3.38	3.71	4.53	4.47	4.16
Mongo	3.60	4.53	4.74	4.99	5.18	4.45	3.77	3.05	3.60	4.03	3.66	3.46
Kano	4.17	4.96	5.67	6.55	6.60	5.47	4.38	3.70	4.44	4.88	4.49	3.94
Kaele	4.89	5.81	6.23	6.33	5.97	5.91	4.04	3.56	3.80	4.39	4.87	4.70
Ouagadougou	4.56	5.34	6.09	6.39	6.08	4.92	4.29	3.60	3.96	4.77	4.45	4.23
Am Timan	3.82	4.20	4.79	5.30	5.15	4.28	3.49	3.21	3.62	3.97	3.76	3.38
Bouso	3.74	4.47	4.86	5.26	4.58	4.11	3.47	3.06	3.53	3.96	3.84	3.37
Tambacounda	4.02	4.76	5.54	5.86	6.23	4.87	3.67	3.43	3.54	3.84	3.72	3.67
Garoua	4.75	5.68	6.87	7.06	6.02	4.69	4.12	3.83	3.98	4.93	5.28	4.73
Pala	4.15	4.81	5.48	5.47	5.07	4.17	3.61	3.34	3.54	4.26	4.54	4.21
Navrongo	4.57	5.18	5.73	5.73	5.32	4.63	3.87	3.68	3.93	4.68	4.60	4.08
Bamako	4.85	5.80	6.59	6.62	5.96	5.05	4.00	3.58	3.95	4.36	4.29	4.35
F. Archambault	3.65	4.40	4.83	5.04	4.61	3.62	2.95	2.99	3.29	3.78	3.94	3.64
Bobo Dioulasso	4.76	5.62	6.07	5.69	5.26	4.35	3.94	3.79	3.88	4.43	4.28	4.39
Moundou	3.93	4.70	4.89	4.98	4.59	3.79	3.31	3.14	3.30	3.80	4.02	3.74
Kaduna	6.30	6.64	6.22	5.80	5.05	4.06	3.42	3.05	3.76	4.31	4.77	5.55

Table WB.5.1. Monthly mean potential evapotranspiration in mm per day. The availability-of-water periods are demarcated, by a solid line (humid period) and a dotted line (intermediate periods).

References. WA, WE and WB

- Blaney, H.F. & Criddle, W.D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. U.S.Dept.Agric. SCS. 96p. 1950
- Bouchet, R.J. Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle, et production agricole. In H. Geslin (ed.) L'eau et la production végétale. Paris, Institut National de la Recherche Agronomique. 455p. 1964
- Eyraud, R. Note préliminaire sur les mesures psychométriques. Notes de l'établissement d'études et de recherches météorologiques. Direction de la Météorologie Nationale, 27p. 1960
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. A study of agroclimatology in semi-arid and arid zones of the Near East, by C.C. Wallén and G. Perrin de Brichambaut. Rome. 185p. 1962
- Geslin, H. Introduction. In Geslin, H. (ed.) L'eau et la production végétale. Paris, Institute National de la Recherche Agronomique. 455p. 1964
- Gilchrist, A. Evaporation in Nigeria. Lagos, Nigerian Meteorological Services Technical Note No. 6. 21p. 1961
- Milthorpe, F.L. The income and loss of water in arid and semi-arid zones. In Plant-water relationships in arid and semi-arid conditions. UNESCO Arid Zone Research Programme (Reviews of Research : 9 - 36). Paris, UNESCO. 1960
- Monteith, J.L. Research on crop evaporation in Israel. New York, United Nations Commissioner for Technical Assistance. Department of Economic and Social Affairs. Report No. TAO/ISR/30. 36p. 1960
- Omar, M. H. Evaporation at Gaza. Regional Training Course on Microclimatology, for Ecology and Soil Sciences. Cairo, UNESCO, Middle East Science Cooperation Office. 1960
- Penman, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London (A) 193 : 120 - 145. 1948
- Penman, H.L. Vegetation and hydrology. Farnham Royal, Bucks, Commonwealth Agricultural Bureaux, Technical Communication No. 53. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden. 124p. 1963
- Riou, L. H., Callede, J. & Bouchardeau, A. Mesures d'évaporation au Tchad, ORSTOM (Centres de recherches Tchadiennes). 17p. 1964
- Slatyer, R.O. Efficiency of water utilization by arid zone vegetation. Annals of Arid Zone, Jodhpur. 3 : 1 - 11. 1964
- Stanhill, G. A comparison of methods of calculating evapotranspiration from climatic data. (Unpublished manuscript). 1961
- Thorntwaite, C.W. An approach toward a rational classification of climate. Geog. Rev. 38 : 85 - 94. 1948

- Thornthwaite C. W. A re-examination of the concept and measurement of potential  
1954 transpiration. In Mather, J. R. (ed.) The measurement of  
potential evapo-transpiration. Publications in Climatology,  
Seabrook, N.J. 7 : 225p.
- Turo, L. Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations,  
1954-5 l'évaporation et l'écoulement. Ann. Agron. 5 : 491 ~ 596  
& 6 : 5 -131.
- UNESCO Arid Zone Research Programme. Reviews of Research and Proceedings of  
1951 - Symposia. Paris, UNESCO.

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory	Moist, M: -				M+S	Ratios
										AGADES		Niger			1st I	Humid		2nd I	Storage	
										Pr: -	-	H: None	-		S: -					
	$E_T$ r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect rainfall EP	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M.+S.					
January	117	0	117													$\frac{P}{M+S} = -$				
February	139	0	139													$\frac{EP}{M+S} = -$				
March	164	0	164													$\frac{P}{E_T} = 0.09$				
April	174	1	173	1												$\frac{WS}{P} = -$				
May	190	6	184	6												$\frac{EP}{P} = -$				
June	179	8	171	8												$\frac{RO}{P} = -$				
July	182	49	133	49																
August	163	78	85	78																
September	149	20	129	20																
October	144	1	143	1																
November	122	0	122																	
December	109	0	109																	
Year	1832	163	1669	163												Thornthwaite/Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.00$   HU+ 0 $\frac{WD}{E_T} 0.90$   AR-54 Moisture index: - 54				

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory	Moist, M: 42				M+S 42	Ratios
N'GUIGMI Niger										Pr: 33	1st I		Humid H: None		2nd I		Storage S: -			
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall E P		B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M.+S.				
January	119	0	119													$\frac{P}{M+S} = 5.6$				
February	129	0	129													$\frac{EP}{M+S} = 4.6$				
March	158	0	158													$\frac{P}{E_T} = 0.13$				
April	192	0	192													$\frac{WS}{P} = -$				
May	184	7	177	7												$\frac{EP}{P} = 0.73$				
June	179	8	171	8						20						$\frac{RO}{P} = -$				
July	168	57	111	27					30		23	-	-							
August	146	141	5						141											
September	146	22	124											3	3					
October	150	0	150																	
November	126	0	126																	
December	111	0	111																	
Year	1808	235	1573	42					171							Thornthwaite/ Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.00$   HU+ 0 $\frac{WD}{E_T} 0.87$   AR- 52 Moisture index: - 52				

# Water Budget

FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys  
GAO Mali

Preparatory  
Pr: 67  
Moist, M: 23  
M+S: 23  
Storage S: -  
E. of M+S.  
1st I: -  
Humid H: None  
2nd I: -  
B. of Pr.  
B. of M.  
B. of H.  
E. of H.  
E. of M.

Ratios

	$E_T$ $r=0.25$	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run-off RO	Effect. rainfall EP	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M+S.	
January	141	0	141													$\frac{P}{M+S} = 10.4$
February	165	0	165													$\frac{EP}{M+S} = 4.4$
March	213	1	212	1												$\frac{P}{E_T} = 0.12$
April	220	1	219	1												$\frac{WS}{P} = -$
May	246	6	240	6						27						$\frac{EP}{P} = 0.42$
June	229	27	202	27												$\frac{RO}{P} = -$
July	211	75	136	75												
August	177	110	67					110		2			25	25		
September	183	36	147	36												
October	182	5	177	5												
November	147	0	147													
December	141	0	141													
Year	2255	261	1994	151					110							Thornthwaite/ Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.00$ HU+ 0 $\frac{WD}{E_T} 0.88$ AR-53 Moisture index : - 53

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory	Moist, M: 68				M+S 72	Ratios
ST. LOUIS Senegal										Pr: 31	1st I 16	Humid H: 18	2nd I 34		Storage S: 4					
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M+S.					
January	127	1	126	1												$\frac{P}{M+S} = 4.8$				
February	129	1	128	1												$\frac{EP}{M+S} = 3.6$				
March	170	0	170													$\frac{P}{E_T} = 0.21$				
April	155	0	155													$\frac{WS}{P} = 0.06$				
May	147	1	146	1												$\frac{EP}{P} = 0.74$				
June	141	7	134	7						21						$\frac{RO}{P} = -$				
July	145	44	101	44							22									
August	140	161			21	21	21		140			7	25							
September	138	97	41						118					28						
October	141	29	112	29											2					
November	127	2	125	2												Thornthwaite/ Perman index				
December	126	3	123	3												$\frac{WS}{E_T} = 0.01$   HU+ 01				
Year	1686	346	1361	88	21				258							$\frac{WD}{E_T} = 0.81$   AR- 49 Moisture index: -48				

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys TAHOUA Niger					Pre para tory		Moist , M : 64			M + S 64	Ratios
	E <sub>T</sub> r = 0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run off RO	Effect. rainfall EP	Pr: 41	1st I -	Humid H: None		2nd I -	Storage S: -						
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M.+S.						
January	183	0	183														$\frac{P}{M+S} = 6.3$				
February	186	0	186														$\frac{EP}{M+S} = 4.6$				
March	212	0	212														$\frac{P}{E_T} = 0.18$				
April	224	2	222	2						26							$\frac{WS}{P} = -$				
May	239	18	221	18							6						$\frac{EP}{P} = 0.72$				
June	227	45	182	45													$\frac{RO}{P} = -$				
July	186	117	69					117													
August	152	144	8					144													
September	164	66	98	33				33					8	8							
October	189	14	175	14																	
November	186	0	186																		
December	159	0	159																		
Year	2307	406	1901	112				294									Thornthwaite/ Permon index $\frac{WS}{E_T} 0.00$ HU+ 0 $\frac{WD}{E_T} 0.82$ AR-49 Moisture index : - 49				

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys ABECHE Chad					Pre poratory		Moist , M : 78			M + S 94	Ratios
	E <sub>T</sub> r = 0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	Pr: 51	1st I 19	Humid H: 48		2nd I 11	Storage S: 16	E. of M.+S.					
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.							
January	141	0	141														$\frac{P}{M+S} = 5.4$				
February	152	0	152														$\frac{EP}{M+S} = 4.6$				
March	189	0	189														$\frac{P}{E_T} = 0.26$				
April.	206	1	205	1													$\frac{WS}{P} = 0.22$				
May	203	24	179	24						9							$\frac{EP}{P} = 0.86$				
June	175	26	149	26							29						$\frac{RO}{P} = 0.03$				
July	152	141	11						141			18									
August	119	232			113	100	100	13	119												
September	138	67	71						138				4	15							
October	164	14	150						43						1						
November	156	0	156														Thornthwaite/ Perman				
December	132	0	132														index				
Year	1927	505	1535	51	113			13	441								$\frac{WS}{E_T} 0.06$ HU+ 06 $\frac{WD}{E_T} 0.80$ AR- 48 Moisture index: - 42				

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys					Pre para tory	Moist , M : 93				M+S 110	Ratios
										MATAM		Senegal				1st I 23	Humid H: 49		2nd I 21	Storage S: 17	
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall E P	Pr: 26	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.			E. of M.	E. of M+S.			
January	95	1	94	1													$\frac{P}{M+S} = 4.90$				
February	105	1	104	1													$\frac{EP}{M+S} = 4.08$				
March	142	0	142														$\frac{P}{E_T} = 0.33$				
April	156	0	156														$\frac{WS}{P} = 0.12$				
May	178	4	174	4													$\frac{EP}{P} = 0.83$				
June	186	50	136	50						4	30						$\frac{RO}{P} = -$				
July	156	129	27					129					22								
August	136	202			66	66	66		136												
September	137	122	15			-15	51		137				9	30							
October	137	22	115	30		-51			43							17					
November	99	2	97	2													Thornthwaite/ Perman index				
December	92	2	90	2													$\frac{WS}{E_T} = 0.04$   HU+ 04				
Year	1619	535	1150	90	66				445								$\frac{WD}{E_T} = 0.71$   AR- 43 Moisture index : - 39				

Water Budget		FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys								Pre para tory	Moist , M : 94				M+S 105	Ratios	
		MOPTI Niger									1st I 20	Humid H: 54		2nd I 20			Storage S: 11
	$E_T$ $r=0.25$	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run off RO	Effect. rainfall EP	Pr:40	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M+S.	
January	146	1	145	1													$\frac{P}{M+S} = 5.25$
February	163	0	163														$\frac{EP}{M+S} = 4.79$
March	210	0	210														$\frac{P}{E_T} = 0.28$
April	223	3	220	3													$\frac{WS}{P} = 0.10$
May	211	19	192	19						16							$\frac{EP}{P} = 0.87$
June	189	55	134	25				30			25						$\frac{RO}{P} = -$
July	155	154	1					154				15					
August	139	195			56	56	56	139									
September	136	104	32			-32	24	136					7	27			
October	148	20	128			-24		44							8		
November	135	1	134	1													Thornthwaite/ Perman index
December	129	0	129														$\frac{WS}{E_T} 0.03$ HU+ 03
Year	1984	552	1488	49	56			503									$\frac{WD}{E_T} 0.75$ AR- 45 Moisture index : - 42

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory	Moist , M : 82				M + S	Ratios
										ZINDER					Niger				100	
	E <sub>T</sub> r = 0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	Pr: 50	1st I 21	Humid H: 50	2nd I 11	Storage S: 18						
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M.+S.					
January	138	0	138													$\frac{P}{M+S} = 5.48$  $\frac{EP}{M+S} = 4.82$  $\frac{P}{E_T} = 0.28$  $\frac{WS}{P} = 0.19$  $\frac{EP}{P} = 0.88$  $\frac{RO}{P} = 0.01$				
February	153	0	153																	
March	185	0	185																	
April	192	3	189	3																
May	198	27	171	27						5										
June	185	55	130	25					30		25									
July	158	153	5						153			16								
August	128	232			104	100	100	4	128											
September	146	71	75						146				4	15						
October	167	7	160	7					25						3					
November	144	0	144																	
December	130	0	130																	
Year	1924	548	1480	62				4	482							Thornthwaite/ Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.05$   HU+05 $\frac{WD}{E_T} 0.77$   AR-46 Moisture index . - 41				

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys DAKAR-YOFF Senegal				Pre pora tory	Moist , M : 92				M+S 112	Ratios
	E <sub>T</sub> r = 0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	Pr. 24	1st I 16	Humid H: 57	2nd I 19	Storage S: 20	E of M+S.					
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.						
January	142	0	142													$\frac{P}{M+S} = 5.16$				
February	134	2	132	2												$\frac{EP}{M+S} = 4.45$				
March	155	0	155													$\frac{P}{E_T} = 0.32$				
April	173	0	173													$\frac{WS}{P} = 0.22$				
May	166	1	165	1												$\frac{EP}{P} = 0.83$				
June	165	15	150	15						15						$\frac{RO}{P} = 0.05$				
July	159	88	71	22					66		9	25								
August	141	249			108	100	160	8	141											
September	143	163			20		100	20	143				20							
October	149	49	100			-100			149					9	29					
November	149	5	144	5												Thornthwaite / Perman index				
December	149	6	143	6												$\frac{WS}{E_T} 0.07$   HU+ 07				
Year	1825	578	1375	51	128			28	499							$\frac{WD}{E_T} 0.75$   AR- 45 Moisture index . - 38				

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys					Pre para tory	Moist , M : 92					M+S 121	Ratios
										BIRNI N'KONNI						Niger						
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	Pr: 50	1st I 26	Humid H: 51	2nd I 15	Storage S: 29								
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M.+S.							
January	142	T	142														$\frac{P}{M+S} = 4.95$					
February	153	T	153														$\frac{EP}{M+S} = 4.36$					
March	181	0	181														$\frac{P}{E_T} = 0.32$					
April	187	2	185	2													$\frac{WS}{P} = 0.17$					
May	199	29	170	29						4							$\frac{EP}{P} = 0.88$					
June	183	72	111	40					32		23						$\frac{RO}{P} = -$					
July	147	138	9						138			19										
August	131	232	0		101	100	100	1	131													
September	136	111	25						136				8	23								
October	150	16	134						91						22							
November	134	0	134																			
December	132	0	132																			
Year	1875	600	1376	71	101			1	528								Thornthwaite/ Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.05$ HU+05 $\frac{WD}{E_T} 0.73$ AR-44 Moisture index - 39					

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory	Moist, M: 96				M+S 118	Ratios
NIAMEY Niger										Pr:53	1st I	Humid	2nd I		Storage					
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP		20	H: 58	18		S:22					
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M+S.					
January	161	0	161													$\frac{P}{M+S} = 5.40$				
February	167	0	167													$\frac{EP}{M+S} = 4.61$				
March	207	1	206	1												$\frac{P}{E_T} = 0.31$				
April	209	3	206	3						28						$\frac{WS}{P} = 0.16$				
May	220	46	174	46							20					$\frac{EP}{P} = 0.85$				
June	203	79	124	43				36				10				$\frac{RO}{P} = -$				
July	156	181			25	25	25	156												
August	131	206			75	75	100	131												
September	137	101	36			-36	64	137				6	24							
October	171	21	150			-64		85							16					
November	152	0	152																	
December	143	0	143																	
Year	2057	638	1519	93	100			545								Thornthwaite/Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.05$ HU+ 05 $\frac{WD}{E_T} 0.74$ AR- 44 Moisture index -39				

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory	Moist , M : 97				M+S 120	Ratios
MARADI Niger										Pr: 53	1st I 19		Humid H: 61		2nd I 17	Storage S: 23				
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP		B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M+S.				
January	117	0	117													$\frac{P}{M+S} = 5.35$				
February	122	0	122													$\frac{EP}{M+S} = 4.30$				
March	153	0	153													$\frac{P}{E_T} = 0.38$				
April	167	4	163	4						30						$\frac{WS}{P} = 0.25$				
May	187	32	155	32												$\frac{EP}{P} = 0.81$				
June	176	60	116	30				30			22					$\frac{RO}{P} = 0.09$				
July	144	164			20	20	20	144				11								
August	121	260			139	80	100	59	121											
September	131	110	21			-21	79		131				10	27						
October	134	12	122			-79			91						20					
November	115	0	115																	
December	107	0	107																	
Year	1674	642	1191	66	159			59	517							Thornthwaite/ Perma index $\frac{WS}{E_T} 0.09$   HU+ 09 $\frac{WD}{E_T} 0.71$   AR- 43 Moisture index . - 34				

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory	Moist , M : 98			M + S	Ratios
FORT LAMY										Chad					Pr 50	1st I	Humid	2nd I	
	E <sub>T</sub>	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.		E of M+S.			
January	146	0	146													$\frac{P}{M+S} = 5.40$			
February	161	0	161													$\frac{EP}{M+S} = 4.25$			
March	206	0	206													$\frac{P}{E_T} = 0.33$			
April	216	5	211	5												$\frac{WS}{P} = 0.25$			
May	212	36	176	36						1						$\frac{EP}{P} = 0.79$			
June	175	66	109	36				30			20					$\frac{RO}{P} = 0.09$			
July	137	156			19	19	19	137				10							
August	116	257			141	81	100	60	116										
September	133	104	29			-29	71		133				10	26					
October	159	23	136			-71			94						18				
November	157	1	156	1												Thornthwaite/ Perman index			
December	140	0	140													$\frac{WS}{E_T} 0.08$ HU+08			
Year	1958	648	1470	78	160			60	510							$\frac{WD}{E_T} 0.75$ AR-45 Moisture index . -37			

Water Budget										Pre paratory		Moist, M: 104			M+S	Ratios	
FAO /UNESCO /WMO - Agroclimatology surveys										Pr: 45	1st I		Humid H: 68		2nd I		Storage
MAIDUGURI Nigeria											B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.		S: 18
	$E_T$ r = 0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run off RO	Effect rainfall EP								
January	146	0	146													$\frac{P}{M+S} = 5.40$	
February	159	0	159													$\frac{EP}{M+S} = 4.41$	
March	201	1	200	1												$\frac{P}{E_T} = 0.35$	
April	209	4	205	4												$\frac{WS}{P} = 0.24$	
May	208	34	174	34						3						$\frac{EP}{P} = 0.81$	
June	172	78	94	23					55		17					$\frac{RO}{P} = 0.07$	
July	135	180			45	45	45		135			5					
August	113	227			114	55	100	59	113								
September	130	112	18			-18	82		130				11	29			
October	156	23	133			-82			105						17		
November	149	0	149														
December	132	0	132														
Year	1910	659	1410	62	159			59	538							Thornthwaite/ Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.08$ HU+ 08 $\frac{WD}{E_T} 0.74$ AR- 44 Moisture index: - 36	

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory Pr24	Moist , M : 105				M+S 130	Ratios
										THIES		Senegal			1st I 18	Humid H: 74		2nd I 13	Storage S: 25	
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run off RO	Effect. rainfall EP	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.		E. of M.	E. of M.+S.				
January	134	0	134														$\frac{P}{M+S} = 5.33$			
February	146	2	144	2													$\frac{EP}{M+S} = 3.97$			
March	191	0	191														$\frac{P}{E_T} = 0.40$			
April	192	0	192														$\frac{WS}{P} = 0.35$			
May	180	2	178	2													$\frac{EP}{P} = 0.74$			
June	154	24	130	24						6	30						$\frac{RO}{P} = 0.21$			
July	136	122	14						122			18								
August	115	273			158	100	100	58	115											
September	120	206			86		100	86	120											
October	129	57	72			-72	28		129				1	13						
November	118	3	115			-28			31						8					
December	111	5	106	5																
Year	1726	694	1276	33	244			144	517								Thornthwaite/ Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.14$   HU+ 14 $\frac{WD}{E_T} 0.74$   AR- 44 Moisture index . - 30			

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys SEGOU Mali					Pre para tory		Moist , M : 109			M + S 129	Ratios
	E <sub>T</sub> r = 0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall E P	Pr. 29	1st I 19	Humid H: 77		2nd I 13	Storage S: 20	E. of M.+S.					
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.							
January	138	0	138														$\frac{P}{M+S} = 5.61$				
February	148	0	148														$\frac{EP}{M+S} = 4.57$				
March	184	3	181	3													$\frac{P}{E_T} = 0.40$				
April	182	9	173	9																	
May	196	20	176	20						15							$\frac{WS}{P} = 0.25$				
June	171	94	77	22					72		13						$\frac{EP}{P} = 0.81$				
July	140	202			62	62	62		140			2									
August	123	239			116	38	100	78	123								$\frac{RO}{P} = 0.11$				
September	128	127	1			-1	99		128				17	30							
October	142	27	115			-99			126						20						
November	133	3	130	3													Thornthwaite / Penman				
December	138	0	138														index				
Year	1823	724	1277	57	178			78	589								$\frac{WS}{E_T} = 0.09$				
																	$\frac{WD}{E_T} = 0.70$				
																	Moisture index : - 33				

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys		SOKOTO		Nigeria		Pre paratory	Moist , M : 115			M + S 130	Ratios	
	E <sub>T</sub> r = 0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	Pr: 52	1st I 25	Humid H: 78		2nd I 12	Storage S: 15							
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M.+S.							
January	129	0	129																		$\frac{P}{M+S} = 5.64$	
February	135	0	135																			$\frac{EP}{M+S} = 4.19$
March	168	0	168																			$\frac{P}{E_T} = 0.43$
April	181	13	168	13						19												$\frac{WS}{P} = 0.27$
May	183	53	130	53																		$\frac{EP}{P} = 0.74$
June	162	89	73	25					64		10											$\frac{RO}{P} = 0.13$
July	130	165			35	35	35		130				5									
August	112	252			140	65	100	75	112													
September	124	147			23		100	23	124					21								
October	146	15	131				-100		115						3	20						
November	133	0	133																			
December	121	0	121																			
Year	1724	734	1188	91	198			98	545													Thornthwaite/ Perman index
																						$\frac{WS}{E_T} 0.11$ HU+11
																						$\frac{WD}{E_T} 0.69$ AR-41
																						Moisture index : - 30

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory	Moist , M . 122				M + S 143	Ratios
										Pr: 27	1st I		Humid H: 80		2nd I		Storage			
											B. of Pr.	B. of M.		B. of H.		E. of M.		E. of M.+S.		
	E <sub>T</sub> r = 0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall E P											
January	135	1	134	1													$\frac{P}{M+S} = 5.74$			
February	139	1	138	1													$\frac{EP}{M+S} = 4.30$			
March	185	0	185														$\frac{P}{E_T} = 0.45$			
April	197	2	195	2													$\frac{WS}{P} = 0.31$			
May	216	21	195	21						15							$\frac{EP}{P} = 0.75$			
June	178	100	78	28					72		11						$\frac{RO}{P} = 0.19$			
July	145	203			58	58	58		145			3								
August	118	257			139	42	100	97	118											
September	125	181			56		100	56	125				21							
October	139	51	88			-88	12		139					11						
November	122	4	118			-12			16							1	Thornthwaite / Penman			
December	121	0	121														index			
Year	1820	821	1252	53	253			153	615								$\frac{WS}{E_T} 0.14$   HU+ 14 $\frac{WD}{E_T} 0.69$   AR- 41 Moisture index: - 27			

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys		Pre para tory Pr 36	Moist , M : 134				M + S 152	Ratios
MAROUA					Cameroun					1st I 28	Humid H: 95		2nd I 11	Storage S:18				
	E <sub>T</sub> r = 0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run off RO	Effect. rainfall E P	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M+S.			
January	131	0	131													$\frac{P}{M+S} = 5.53$		
February	152	0	152													$\frac{EP}{M+S} = 4.03$		
March	185	1	184	1						19						$\frac{P}{E_T} = 0.49$		
April	179	13	166	13							25					$\frac{WS}{P} = 0.33$		
May	180	66	114	36				30				22				$\frac{EP}{P} = 0.73$		
June	141	117	24					117								$\frac{RO}{P} = 0.21$		
July	122	196			74	74	74	122										
August	105	260			155	26	100	129	105									
September	111	159			48		100	48	111				25					
October	140	29	111			-100			129					6	24			
November	134	0	134													Thornthwaite/ Perman index		
December	129	0	129													$\frac{WS}{E_T} 0.16$   HU+ 16 $\frac{WD}{E_T} 0.67$   AR- 40 Moisture index - 24		
Year	1709	841	1145	50	277			177	614									

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys		Moist, M: 114		M+S 135		Ratios
MONGO					Chad					Pre para tory	1st I	Humid H:	2nd I	Storage S:		
E <sub>T</sub> r = 0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	Pr: 59	12	89	13	21			
									B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M+S.		
January	112	0	112													$\frac{P}{M+S} = 6.35$
February	127	0	127													$\frac{EP}{M+S} = 3.82$
March	147	2	145	2												$\frac{P}{E_T} = 0.57$
April	150	12	138	12					18							$\frac{WS}{P} = 0.43$
May	161	57	104	57												$\frac{EP}{P} = 0.60$
June	134	64	70	4				60		16	28					$\frac{RO}{P} = 0.31$
July	117	207			90	90	90	117								Thornthwaite/Perman index
August	95	325			230	10	100	220	95							$\frac{WS}{E_T} 0.25$ HU+25
September	108	155			47		100	47	108			25				$\frac{WD}{E_T} 0.67$ AR-40
October	123	35	88			-88	12		123				8	29		Moisture index: -15
November	110	1	109			-12			13							
December	107	0	107													
Year	1491	858	1000	75	367			267	516							

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys		Moist , M : 124		M + S	Ratios	
KANO										Pre para tory	1st I	Humid H: 83		2nd I		Storage
Nigeria										Pr. 35	27	14	S: 19			
	E <sub>T</sub> r = 0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall E P	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.		E. of M.+S.
January	129	0	129													$\frac{P}{M+S} = 6.09$
February	139	0	139													$\frac{EP}{M+S} = 4.52$
March	176	2	174	2						23						$\frac{P}{E_T} = 0.48$
April	197	8	189	8							28					$\frac{WS}{P} = 0.31$
May	205	71	134	41					30			25				$\frac{EP}{P} = 0.74$
June	164	119	45						119							$\frac{RO}{P} = 0.20$
July	136	209			73	73	73		136							
August	115	311			196	27	100	169	115							
September	133	137			4		100	4	133				16	30		
October	151	14	137				-100		114						19	
November	135	0	135													
December	122	0	122													
Year	1802	871	1204	51	273			173	647							Thornthwaite/ Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.15$ HU+ 15 $\frac{WD}{E_T} 0.67$ AR- 40 Moisture index : - 25

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys					Pre para tory	Moist , M : 136				M+S 148	Ratios
										KAELE						Cameroun					
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	Pr: 48	1st I 27	Humid H: 97	2nd I 12	Storage S: 12							
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M+S.						
January	152	0	152													$\frac{P}{M+S} = 5.93$					
February	163	0	163													$\frac{EP}{M+S} = 4.33$					
March	193	4	189	4												$\frac{EP}{M+S} = 4.33$					
April	190	26	164	26						6						$\frac{P}{E_T} = 0.49$					
May	185	72	113	42					30		24					$\frac{WS}{P} = 0.30$					
June	147	130	17						130			21				$\frac{EP}{P} = 0.73$					
July	125	199			74	74	74		125							$\frac{EP}{P} = 0.73$					
August	110	236			126	26	100	100	110							$\frac{RO}{P} = 0.19$					
September	114	178			64		100	64	114				26			$\frac{RO}{P} = 0.19$					
October	136	31	105			-100			131					8	20						
November	146	2	144																		
December	146	0	146																		
Year	1807	878	1193	72	264			164	642							Thornthwaite/ Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.15$ HU+ 15 $\frac{WD}{E_T} 0.66$ AR- 40 Moisture index : - 25					

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory	Moist, M: 137			M+S 159	Ratios
										OUAGADOUGOU					Upper Volta			Storage S: 22	
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	Pr: 37	1st I 33	Humid H: 90	2nd I 14	E of M.	E of M+S				
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M+S				
January	141	0	141													$\frac{P}{M+S} = 5.55$  $\frac{EP}{M+S} = 4.10$  $\frac{P}{E_T} = 0.49$  $\frac{WS}{P} = 0.28$  $\frac{EP}{P} = 0.74$  $\frac{RO}{P} = 0.17$			
February	150	3	147	3															
March	189	8	181	8															
April	192	19	173	19						15									
May	189	84	105	50				34			22								
June	148	118	30					118				24							
July	133	193			60	60	60	133											
August	112	265			153	40	100	113	112										
September	119	153			34		100	34	119				22						
October	148	37	111			-100			137					6	28				
November	134	2	132	2															
December	131	0	131																
Year	1786	882	1151	82	247			147	653							Thornthwaite/ Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.14$ HU+ 14 $\frac{WD}{E_T} 0.65$ AR- 39 Moisture index: - 25			

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys AM-TIMAN Chad				Pre para tory	Moist, M: 145			M+S 165	Ratios
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	Pr: 37	1st I 34	Humid H: 96		2nd I 15	Storage S: 20	E. of M+S.			
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.					
January	114	0	114														$\frac{P}{M+S} = 5.57$		
February	118	4	114	4															
March	150	8	142	8													$\frac{EP}{M+S} = 2.69$		
April	161	19	142	19						10									
May	163	80	83	50					30		17						$\frac{P}{E_T} = 0.61$		
June	133	123	10						123			20							
July	112	182			70	70	70		112								$\frac{WS}{P} = 0.35$		
August	103	311			208	30	100	178	103										
September	114	154			40		100	40	114				24				$\frac{EP}{P} = 0.66$		
October	127	38	89						127					9	29				
November	114	0	114	11													Thornthwaite/ Perman index		
December	105	0	105																
Year	1514	919	913	92	318			218	609								$\frac{WS}{E_T} 0.21$ HU+ 21 $\frac{WD}{E_T} 0.60$ AR-36 Moisture index . - 15.		

# Water Budget

FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys

BOUSSO

Chad

Pre  
para  
tory

Moist, M: 138

M+S  
161

Pr: 41

1st I  
24

Humid  
H: 102

2nd I  
12

Storage  
S: 23

Ratios

	$E_T$ $r=0.25$	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M+S.	
January	116	0	116													$\frac{P}{M+S} = 5.78$
February	129	0	129													$\frac{EP}{M+S} = 3.62$
March	151	0	151													$\frac{P}{E_T} = 0.63$
April	159	18	141	18						14						$\frac{WS}{P} = 0.43$
May	142	54	88	30					24		25					$\frac{EP}{P} = 0.63$
June	123	109	14						109			18				$\frac{RO}{P} = 0.31$
July	108	234			126	100	100	26	108							
August	95	305			210		100	210	95							
September	106	169			63		100	63	106				28			
October	123	39	84				-84	16	123					10		
November	115	3	112				-16		19						2	
December	105	0	105													
Year	1472	931	940	48	399			299	584							Thornthwaite/Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.27$ HU+ 27 $\frac{WD}{E_T} 0.64$ AR- 38 Moisture index - 11

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory	Moist , M : 140				M+S 163	Ratios
TAMBACONDA Senegal										Pr: 18	1st I 17		Humid H: 109		2nd I 14		Storage S: 23			
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP		B. of Pr	B. of M.	B. of H.		E. of H.	E. of M.	E. of M+S.			
January	125	0	125														$\frac{P}{M+S} = 5.77$			
February	133	0	133														$\frac{EP}{M+S} = 3.86$			
March	172	0	172														$\frac{P}{E_T} = 0.58$			
April	176	2	174	2													$\frac{WS}{P} = 0.41$			
May	193	20	173	20						15							$\frac{EP}{P} = 0.67$			
June	146	131	15						131		2	19					$\frac{RO}{P} = 0.31$			
July	114	196			82	82	82		114											
August	106	289			183	18	100	165	106											
September	106	231			125		100	125	106											
October	119	70	49			-49	51		119				6	20						
November	112	2	110			-51			53						12		Thornthwaite/ Perman index			
December	114	0	114														$\frac{WS}{E_T} 0.25$ HU+ 25			
Year	1616	941	1065	22	390			290	629								$\frac{WD}{E_T} 0.66$ AR- 40 Moisture index: - 15			

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys GAROUA Cameroun				Pre para tory	Moist , M : 161				M+S 179	Ratios
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	Pr. 36	1st I 34	Humid H: 114	2nd I 13	Storage S: 18	E. of M.+S.					
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.						
January	147	0	147													$\frac{P}{M+S} = 5.66$				
February	159	1	158													$\frac{EP}{M+S} = 4.32$				
March	213	5	208	5												$\frac{P}{E_T} = 0.54$				
April	212	38	174	38						1						$\frac{WS}{P} = 0.26$				
May	187	122	65	30					92		6					$\frac{EP}{P} = 0.80$				
June	141	155			14	14	14		141			9				$\frac{RO}{P} = 0.16$				
July	128	178			50	50	64		128							Thornthwaite / Penman index				
August	119	224			105	36	100	69	119							$\frac{WS}{E_T} 0.14$ HU+ 14				
September	119	214			95		100	95	119							$\frac{WD}{E_T} 0.60$ AR- 36				
October	153	75	78			-78	22		153				1	14		Moisture index - 22				
November	158	1	157			-22			23						1					
December	146	1	145	1																
Year	1882	1014	1132	74	264			164	775											

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory	Moist, M: 165				M+S 185	Ratios
PALA					Chad					Pr:41	1st I 28		Humid H: 121		2nd I 16		Storage S:20			
$E_T$ $r=0.25$	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	B. of Pr.		B. of M.	B. of H.	E. of H.		E. of M.	E. of M.+S.				
January	129	0	129															$\frac{P}{M+S} = 5.64$		
February	135	0	135															$\frac{EP}{M+S} = 3.76$		
March	170	10	160	10					28									$\frac{P}{E_T} = 0.65$		
April	164	32	132	32						8								$\frac{WS}{P} = 0.36$		
May	157	94	63	30				64										$\frac{EP}{P} = 0.67$		
June	125	156			31	31	31	125				5						$\frac{RO}{P} = 0.26$		
July	112	230			118	69	100	49	112											
August	104	224			120		100	120	104											
September	103	210			107		100	107	103											
October	132	84	48			-48	52	132				4	20							
November	136	4	132			-52		56							9			Thornthwaite/ Perman index		
December	131	0	131																	
Year	1598	1044	930	72	376			276	696									$\frac{WS}{E_T} 0.24$ HU+ 24 $\frac{WD}{E_T} 0.58$ AR- 35 Moisture index - 11		

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys		Moist , M . 165		M + S 184	Ratios			
NAVRONGO										Ghana		Pre para tory	1st I 42	Humid H: 112		2nd I 11	Storage S: 19	
	E <sub>T</sub>	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	Pr. 46	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.		E of M+S.		
	r = 0.25									B. of Pr.								
January	142	0	142													$\frac{P}{M+S} = 5.95$		
February	145	6	139	6												$\frac{EP}{M+S} = 4.22$		
March	178	16	162	16						17						$\frac{P}{E_T} = 0.64$		
April	172	49	123	49												$\frac{WS}{P} = 0.32$		
May	165	112	53						112		2					$\frac{EP}{P} = 0.71$		
June	139	144			5	5	5		139			13				$\frac{RO}{P} = 0.22$		
July	120	201			81	81	86		120									
August	114	263			149	14	100	135	114									
September	118	229			111		100	111	118									
October	145	68	77			-77	23		145			3	14					
November	138	6	132			-23			29						2	Thornthwaite / Penman index		
December	127	1	126	1												$\frac{WS}{E_T} 0.20$ HU+ 20		
Year	1703	1095	954	72	346			246	777							$\frac{WD}{E_T} 0.56$ AR- 34 Moisture index . - 14		

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys					Pre para tory	Moist , M : 141					M + S 164	Ratios				
BAMAKO										Maji						Pr. 37	1st I 22		Humid H: 107				2nd I 12	Storage S: 23		
	E <sub>T</sub> r = 0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall E P	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.	E. of M+S.											
January	150	1	149	1																				$\frac{P}{M+S} = 6.70$		
February	162	0	162																						$\frac{EP}{M+S} = 4.26$	
March	204	3	201	3																					$\frac{P}{E_T} = 0.61$	
April	199	15	184	15						19															$\frac{WS}{P} = 0.41$	
May	184	60	124	30					30		26														$\frac{EP}{P} = 0.64$	
June	152	145	7						145			17														$\frac{RO}{P} = 0.32$
July	124	251			127	100	100	27	124																	
August	111	334			223		100	223	111																	
September	119	220			101		100	101	119																	
October	135	58	77			-77	23		135				2	14												
November	129	12	117			-23			35														6		Thornthwaite/ Perman index	
December	135	0	135																						$\frac{WS}{E_T} 0.25$ HU+ 25	
Year	1804	1099	1156	49	451			351	699																$\frac{WD}{E_T} 0.64$ AR- 38 Moisture index: - 13	

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory Pr: 43	Moist, M: 171				M+S 196	Ratios
										FORT ARCHAMBAULT		Chad			1st I 27	Humid H: 129	2nd I 15	Storage S: 25		
	$E_T$ r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.		E. of M.	E of M+S.				
January	113	0	113														$\frac{P}{M+S} = 5.82$			
February	123	1	122	1													$\frac{EP}{M+S} = 3.60$			
March	150	8	142	8						23							$\frac{P}{E_T} = 0.80$			
April	151	39	112	14					25								$\frac{WS}{P} = 0.45$			
May	143	105	38						105		2						$\frac{EP}{P} = 0.62$			
June	109	143			34	34	34		109			1					$\frac{RO}{P} = 0.29$			
July	92	226			134	66	100	68	92											
August	93	311			218		100	218	93											
September	99	225			126		100	126	99											
October	117	80	37			-37	63		117				8	23						
November	118	3	115			-63			66						17		Thornthwaite/ Penman			
December	113	0	113														index			
Year	1421	1141	792	23	512			412	706								$\frac{WS}{E_T} 0.36$ HU+36 $\frac{WD}{E_T} 0.56$ AR-34 Moisture index: + 2			

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys BOBO DIOULASSO Upper Volta				Pre para tory	Moist, M: 169			M+S 189	Ratios
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP	Pr. 48	1st I 45	Humid H: 110		2nd I 14	Storage S: 20	E. of M+S.			
										B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.					
January	148	1	147	1													$\frac{P}{M+S} = 6.26$  $\frac{EP}{M+S} = 4.14$  $\frac{P}{E_T} = 0.69$  $\frac{WS}{P} = 0.36$  $\frac{EP}{P} = 0.66$  $\frac{RO}{P} = 0.28$		
February	157	3	154	3															
March	188	20	168	20						14									
April	171	47	124	47															
May	163	116	47						116		1								
June	131	132			1	1	1		131			15							
July	118	229			111	99	100	12	118										
August	114	336			222		100	222	114										
September	116	211			95		100	95	116										
October	137	75	62			-62	38		137				3	17					
November	133	13	120			-38			51						6				
December	136	2	134	2															
Year	1712	1185	956	73	429			329	783								Thornthwaite/Perman index $\frac{WS}{E_T} 0.25$ HU+ 25 $\frac{WD}{E_T} 0.56$ AR- 34 Moisture index: - 9		

Water Budget										FAO / UNESCO / WMO - Agroclimatology surveys				Pre para tory	Moist, M: 183				M+S 208	Ratios	
										MOUNDOU		Chad			Pr 31	1st I	Humid		2nd I		Storage
																B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.		E. of M.
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run - off RO	Effect. rainfall EP												
January	122	0	122																		$\frac{P}{M+S} = 5.90$
February	132	0	132																		$\frac{EP}{M+S} = 3.51$
March	152	2	150	2						27											$\frac{P}{E_T} = 0.84$
April	149	40	109	40							27										$\frac{WS}{P} = 0.45$
May	142	118	24						118				24								$\frac{EP}{P} = 0.60$
June	114	171			57	57	57		114												$\frac{RO}{P} = 0.37$
July	103	244			141	43	100	98	103												
August	97	303			206		100	206	97												
September	99	250			151		100	151	99												
October	118	96	22			-22	78		118					11	27						
November	121	4	117			-78			82											21	Thornthwaite/ Perman index
December	116	0	116																		
Year	1465	1228	792	42	555			455	731												$\frac{WS}{E_T} = 0.38$ HU+ 38 $\frac{WD}{E_T} = 0.54$ AR-32 Moisture index. +6

Water Budget										FAO/UNESCO/WMO - Agroclimatology surveys		Moist, M: 182		M+S 202	Ratios		
KADUNA Nigeria										Pre paratory Pr. 34	1st I 28	Humid H: 142		2nd I 12		Storage S: 20	
	E <sub>T</sub> r=0.25	Rain fall P	Water deficit WD	Evap. loss EL	Water surplus WS	Ground charge	Ground storage	Run-off RO	Effect. rainfall EP	B. of Pr.	B. of M.	B. of H.	E. of H.	E. of M.		E. of M+S.	
January	195	0	195														$\frac{P}{M+S} = 6.42$
February	186	3	183	3												$\frac{EP}{M+S} = 3.98$	
March	196	15	181	15					19								
April	174	64	110	34					30	22						$\frac{WS}{P} = 0.42$	
May	157	147	10						147		20						$\frac{EP}{P} = 0.62$
June	122	170			48	48	48		122							$\frac{RO}{P} = 0.34$	
July	106	226			120	52	100	68	106								Thornthwaite/ Perman index
August	95	292			197		100	197	95							$\frac{WS}{E_T} 0.30$   HU+30	
September	113	290			177		100	177	113								$\frac{WD}{E_T} 0.58$   AR-35
October	134	86	48			-48	52		134			9	21			Moisture index: -5	
November	143	5	138			-52			57					10			
December	172	0	172														
Year	1793	1298	1037	52	542			442	804								



COMPLEXE HELIOTHERMIQUE - I. CONSIDERATIONS AGRONOMIQUES - HT  
HEAT AND LIGHT - I. AGRONOMIC CONSIDERATIONS - HT

Outre les besoins en eau, les exigences des cultures s'expriment en termes :

- d'éclairage lumineux, qui détermine l'activité photosynthétique et la réaction photopériodique.
- d'éclairage énergétique, qui fournit l'énergie dont dépend la vitesse des phénomènes de la croissance et du développement.

La Région agroclimatique, qu'on vient de voir fondée, en première approche, sur le bilan hydrique "théorique", devra donc une part de ses caractéristiques aux conditions hélio-thermiques.

Il a paru utile, pour traiter cette partie, non seulement de rappeler quelques notions mais d'en tenter une synthèse en considération des phénomènes de croissance et de développement des cultures en milieu tropical.

#### 1. Considérations Physio-Climatiques.

Dans l'énergie globale disponible, il faut au moins distinguer :

- les énergies radiantes lumineuse (400 à 720 m $\mu$ ) et non lumineuse, composantes du rayonnement global.
- l'énergie thermique qui a pour origines, en un point donné la fraction des énergies radiantes dissipée en chaleur, et, éventuellement, l'advection de chaleur.

Si l'énergie globale n'est généralement pas limitante en régions tropicales, sauf parfois par son excès, sa composante lumineuse peut limiter l'activité photosynthétique. Pour une culture couvrant parfaitement le sol, la lumière est en effet plus que saturante dans la partie du feuillage plus ou moins directement exposée au rayonnement. Mais elle ne l'est généralement plus quand on considère la surface foliaire dans sa totalité, du fait de l'ombrage réciproque (auto-ombrage) qui se manifeste aux niveaux inférieurs de la végétation.

La lumière intervient d'autre part par sa durée d'éclaircissement, ou longueur du jour, dans les phénomènes photopériodiques. Ce problème ne peut être traité indépendamment de celui des températures car la température intervient dans les processus de végétation, en interférant avec la photopériode, suivant deux modalités : la sommation de température ou "températures cumulées" et la thermopériodicité ou "oscillation des températures diurne et nocturne".

1.1. Croissance et Développement. Le développement est la succession des états qualitatifs qui conduit, dans la vie d'une plante, de la graine à la graine.

La croissance est la résultante des phénomènes de multiplication et de grandissement cellulaires. Le grandissement, est l'accumulation de matière sèche au cours du développement.

Suivant la théorie phasique du développement, croissance et développement évoluent de façon indépendante.

1.1.1. La croissance pondérale, expression du grandissement cellulaire, est une résultante des processus de photosynthèse et de respiration ou photosynthèse nette. Elle est donc fonction (abstraction faite ici du facteur eau) d'une part de l'éclairage lumineux et de la teneur en CO<sub>2</sub> (réaction lumineuse ou photochimique) et d'autre part de la température (réactions obscures du métabolisme).

La vitesse de croissance suivrait la loi du Q<sub>10</sub> de Van't Hoff'entre température minimale spécifique (10° à 15° pour les cultures tropicales en général) et température optimale (31° à 37°), pour décroître rapidement ensuite jusqu'à s'annuler au maximum tolérable (44° à 50°).

En fait, ces températures minimale, optimale et maximale, moyennes du jour et de la nuit, n'ont probablement pas de signification physiologique réelle, même dans le développement, comme on en verra un exemple précis à propos de sorghos. Il est donc indispensable de considérer indépendamment les valeurs diurne et nocturne de la température.

Il semble par exemple\* qu'une croissance convenable, qui dépend des rapports photosynthèse/respiration, ne soit réalisable, chez la plupart des plantes, que si la température nocturne est notablement inférieure à la température diurne. Ceci explique l'importance de l'oscillation des températures diurne et nocturne (thermopériodicité) au cours du cycle des 24 heures, en relation avec les phénomènes d'ordre climatique qui la déterminent : nébulosité, degré de continentalité, etc...

Durant le jour la photosynthèse est le facteur limitant de la croissance en poids, mais elle ne le reste que si les phénomènes de la phase obscure (transformations, migrations, accumulations,.... des métabolites) se déroulent dans une marge de température optimale, laquelle a toute chance d'être différente de la marge optimale de température de jour pour la photosynthèse.

L'optimum de la phase obscure se trouve aussi influencé par l'intensité lumineuse et par la durée de la photopériode (d'où l'intérêt de considérer le rapport Radiation/Température\*\*): il ne saurait donc être fixe, d'où la notion de marge plutôt que de valeur déterminée. Il semble qu'une température limite de la phase obscure se situe à 26°C : au-dessus de celle-ci bien des plantes ne croîtraient plus, certaines même dépérissant\*. On verra plus loin que cette température est assez souvent approchée en régions tropicales durant la saison humide.

1.1.2. Le développement, comme la croissance, peut être modifié suivant que, pour une même température journalière, les phases diurne et nocturne se déroulent à des températures différentes. Il en sera donné un exemple précis à propos des sorghos. Pour Kimball\*, "le plus significatif" pour la floraison de certaines espèces et variétés serait la relation entre température diurne et température nocturne, cette dernière étant l'élément prédominant. Un abaissement progressif de la température nocturne et une réduction de sa marge tolérable de variation paraissent nécessaires au cours de l'évolution de la plante de la phase végétative à la fructification.

Il ne faut probablement voir cependant, dans la réaction à la thermopériodicité, qu'un phénomène secondaire à la réaction photopériodique : le première n'est pas inductive de la floraison, contrairement à la deuxième. Chez les variétés photopériodiques, tout se passerait comme si l'induction à la floraison dépendait de la photopériode et l'initiation des températures.

---

\* Kimball M.H. and Brooks F.A. "Plant climates of California" Calif. Agric. 13(5) 1959

\*\* Geslin H. "La caractérisation des climats locaux". I.N.R.A., France, 1947.

D'ailleurs, chez les espèces de jour court, c'est à dire pouvant posséder à la fois des variétés de jour court et des variétés neutres, c'est la somme des températures (nocturnes, semble-t-il) qui paraît déterminer l'initiation de la floraison chez les cultures préalablement induites à fleurir par la photopériode spécifique, ou naturellement (cas des variétés neutres).

S'il en est bien ainsi, thermopériodicité et sommation de température pourraient bien n'être que deux aspects d'un même phénomène, concernant le développement évidemment, et non pas la croissance.

1.2. Classification photopériodique. Sur ces bases, on peut très simplement classer comme suit les espèces et variétés de plantes cultivées en régions tropicales (toutes de jour court ou neutres) :

a) Plantes strictement non photopériodiques (neutres), chez lesquelles l'initiation florale est étroitement liée à un stade de développement minimal, mesuré en nombre de noeuds. Le nombre de noeuds est lui-même linéairement fonction de la somme des températures. Chez ces plantes, dont par exemple les cotonniers habituellement cultivés, nombre de noeuds et somme des températures au moment de l'initiation florale sont constants.

b) Plantes strictement photopériodiques, chez lesquelles la floraison, à une latitude donnée, sera induite toujours à la même date, celle où la photopériode critique spécifique est atteinte. L'initiation ne dépendra plus alors que de la somme des températures (nocturnes, s'il en est, pour toutes les plantes de jour court, comme pour les sorghos : voir au chapitre "Sorghos"). Nombre de noeuds et somme des températures sont toujours linéairement liés, mais la floraison ne se fera pas toujours au même noeud ni pour la même somme des températures.

c) Plantes à réaction photopériodique faible, comme il en existe dans le groupe des variétés de sorghos dites "hâtives" (voir chapitre "Sorghos"). En conditions de photopériode inductive, elles se comportent comme les précédentes (paragraphe b), l'initiation dépendant de la somme des températures. En conditions de photopériode non inductive, elles ont un comportement intermédiaire entre a et b, l'initiation n'étant que retardée.

## 2. Implications Agronomiques.

2.1. La productivité finale d'une plante isolée est fonction de sa surface foliaire totale à compter du moment de la floraison, cette surface étant supposée saturée de lumière et donc photosynthétiser de façon à peu près uniforme dans toutes ses parties.

On montrera plus loin, à propos de sorghos et de cotonniers, que la productivité d'une plante, isolée ou en culture dense, est aussi fonction du nombre de noeuds final (ou nombre de feuilles total, présentes + passées).

La surface foliaire elle-même peut être considérée comme le produit du nombre de feuilles actuel par leur surface moyenne.

Le nombre de noeuds, ou de feuilles, est une expression de la multiplication cellulaire (ou développement végétatif) indépendante de la croissance pondérale. Seulement fonction de la somme des températures chez les variétés neutres, le nombre de noeuds est finalement déterminé, chez les variétés photopériodiques, par l'interférence des facteurs dont dépend l'initiation florale : somme des températures et photopériode. Il en va de même pour le nombre actuel de feuilles, mais de façon moins rigoureuse : il subsiste en effet plus ou moins de feuilles selon les conditions culturelles.

La surface foliaire moyenne est au contraire une expression de la croissance pondérale, qui traduit l'importance de la photosynthèse nette : elle dépend donc des facteurs du milieu climatique, mais aussi de la fertilité du sol.

Abstraction faite ici du niveau de fertilité et du facteur eau, la productivité finale d'une plante isolée dépendra donc de la durée de la période de développement (nombre de noeuds) et de la vitesse de croissance (surface foliaire moyenne). Plus la période de végétation sera courte au total, plus la production de matière sèche sera faible pour une vitesse de croissance déterminée.

Au cours d'une saison humide de durée donnée, le nombre de noeuds augmentera avec la température, ce qui est un facteur positif. De même l'activité photosynthétique, donc la vitesse de croissance, d'une plante isolée varie de façon assez considérable avec la température : elle augmente avec elle jusqu'au moment où, le CO<sub>2</sub> devenant limitant, la respiration croîtra seule. La température à cet instant représente l'optimum diurne.

2.2. Mais le rendement d'une culture (par opposition à la productivité d'une plante isolée) est fonction, non plus directement de sa surface foliaire, mais du rapport de cette surface à la surface couverte ou "indice de surface foliaire" (LAI ou "leaf area index" de Watson). Du fait de l'auto-ombrage, toute la surface foliaire n'est pas saturée de lumière et photosynthétise donc inégalement du sommet à la base du feuillage\*, la fraction non saturée augmentant avec le développement et la croissance.

Cet indice de surface foliaire prend, pour des conditions de température et de lumière déterminées, une valeur optimale pour laquelle la partie du feuillage le plus faiblement éclairée l'est à une intensité voisine de celle correspondant au point de compensation. Cette valeur rend donc maximale la photosynthèse nette :

$$dw/dt = (dP - dR)/dt$$

Jusqu'à cette valeur optimale de l'indice, la production de matière sèche  $dw/dt$  ira en augmentant avec l'intensité de la photosynthèse  $dP/dt$ , après quoi elle diminuera quand l'intensité de la respiration  $dR/dt$  croîtra, la partie du feuillage éclairée au-dessous du point de compensation ayant, du fait de l'importance de la respiration, une photosynthèse nette négative.

Dans ces conditions, une augmentation de l'intensité lumineuse (sans grand intérêt pour la productivité d'une plante isolée), en accroissant la valeur optimale du LAI et donc la valeur de  $dP/dt$ , sera favorable au rendement. Au contraire, une élévation de température, fera croître la valeur du point de compensation et en conséquence celle de  $dR/dt$ , diminuant la valeur optimale du LAI : elle devrait donc être défavorable au rendement. Et ceci d'autant plus que, le renouvellement des couches d'air dans la masse d'une culture étant moins rapide que pour une plante isolée, la teneur en CO<sub>2</sub> a toute chance d'être limitante même pour une partie du feuillage saturée de lumière.

Relativement aux valeurs de l'indice de surface foliaire, les rapports entre l'éclairement lumineux et la température diurne ont donc une signification physiologique et donc agronomique évidente. Mais éclairement et température sont étroitement liés en régions tropicales. Cependant les déphasages lumière-température que provoquent à chaque instant la nébulosité et la pluviosité, comme aussi les effets de serre, d'advection de chaleur, etc... pourraient jouer un rôle non négligeable dans la production de matière sèche en régions tropicales, indépendamment de leur incidence sur l'alimentation en eau des cultures.

---

\* Il faut remarquer que si, dans les conditions actuelles de la culture africaine, trop souvent encore primitives, la question de la saturation par la lumière de la totalité du feuillages ne se pose pas, ce n'est pas un avantage, car ce sont ces conditions mêmes qui sont alors limitantes du rendement.

Ceci justifie l'étude du rapport Radiation/Température, encore que ses valeurs moyennes, pour des périodes de temps plus ou moins longues, ne puissent rendre compte qu'imparfaitement de ses valeurs instantanées.

### 3. Conclusion.

Outre ce dernier objectif, et pour résumer, l'étude du complexe héliothermique devra tenir compte :

- des incidences, évoquées plus haut, de la température nocturne sur la croissance et le développement

- de ce que les températures minimales en saison sèche constituent un facteur important de la vitesse de développement des cultures

- de ce que les températures maximales peuvent être limitantes en régions tropicales (comme les températures minimales en régions tempérées).

Elle reviendra donc essentiellement à considérer la distribution dans l'espace et dans le temps des variables suivantes, qui pourront, seules ou en combinaison, être autant de variables indépendantes à tester dans les équations de régression multiple du rendement (voir fin du chapitre "Bilan Hydrique") :

- Rayonnement sous ses différentes formes
- Températures moyenne, minimale, maximale, diurne et nocturne
- Somme des températures
- Photopériodes
- Rapport Radiation/Température

Ce dernier rapport, cependant, prend des significations physiologiques et donc agronomiques différentes suivant qu'on considère :

- la valeur R de la radiation globale (expression très approximative de l'éclairement lumineux) ou son intensité :

$$I = R/Ld$$

où Ld est la durée du jour.

- la température nyctimérale T, la température diurne Td, la température nocturne Tn, ou encore la somme des températures de la phase nocturne : Tn.Ln, où Ln est la durée de la nuit.

Outre les variations du rapport R/T, considéré classiquement, mais sans signification physiologique bien précise, il faudrait au moins étudier celles du rapport I/Td, expression des variations relatives de l'intensité lumineuse et de la température diurne, en rapport avec la photosynthèse nette.



HEAT AND LIGHT - II. CLIMATIC CONSIDERATIONS  
 COMPLEXE HELIOTHERMIQUE - II. CONSIDERATIONS CLIMATIQUES

Radiation - RA

1. Incoming radiation at the top of the Atmosphere

1.1. Using a solar constant, or total solar radiation at normal incidence at the top of the atmosphere, of 1.94 gram calorie per square centimetre per minute, some yearly and seasonal gross amounts calculated to fall at the latitude of the Area and, for comparison, at higher latitudes, are shown at Table RA.1.1., taken from the Smithsonian Tables. Yearly amounts for the Area, slightly in excess of  $300 \text{ kcal.cm}^{-2}$  and increasing a little from north to south, compare with  $250 \text{ kcal.cm}^{-2}$  approximately for the Mediterranean area and  $200 \text{ kcal.cm}^{-2}$  for north-west Europe.

1.2. The summer half-year amounts are shown on the same table. For the Area they are more representative of the gross energy input tapped for dry farming food production. They are evenly distributed owing to the movements of the sun over the Area during that time - there is in fact a slight increase from south to north, contrary to the gradient for the whole year. This input, about  $160 \text{ kcal.cm}^{-2}$ , is roughly the same in the Mediterranean and north-west Europe areas, a fact which is not always appreciated. Indeed, when the days are longest, the Mediterranean and north-west Europe areas receive more solar energy outside the atmosphere than the survey Area, as shown at Table RA.1.2.

1.3. It is in winter that there is an important difference between the Area and the temperate countries of higher latitude with respect to the solar energy input before it is reduced by the atmosphere. As can be seen from the bottom line of Table RA.1.1., whilst the decrease from the summer half-year quantities is 10% to 20% in the Area, it is 50% in the Mediterranean basin and 70% in southern England and the Low Countries.

1.4. The unit now recommended by the World Meteorological Organisation to express radiation energy is the Joule (J), whilst most readers are probably more familiar with the calorie. One calorie = 4.19 Joules.

$\text{kcal.cm}^{-2}$

Lat. °N	5°	10°	15°	40°	50°
Year	311.6	307.3	301.9	241.1	213.0
Summer half year	160.9	164.9	167.7	164.6	156.0
Winter half year	149.6	142.4	134.2	81.5	57.0

Table RA:1.1. Solar radiation at the top of the atmosphere: 40° may be taken as representing the Mediterranean area and 50° temperate latitudes: Note uniformity in summer and differences in winter.

$\text{kcal.cm}^{-2}.\text{day}^{-1}$

Lat. °N	10°	40°	50°
	873	991	989

Table RA.1.2. Solar radiation at the top of the atmosphere on 22 June.

2. Global radiation.

2.1. The amount of solar radiation per unit area reaching a horizontal surface at vegetation height directly or as reflected or scattered radiation, here called global, is of more immediate agroclimatic application. It is recalled that a little less than 1/20th of it is available for photosynthesis. To try and estimate accurately the quantity of global radiation reaching the Area is therefore of particular importance. Furthermore, in this study, global radiation values are also used for estimating potential evapotranspiration and the amounts of water available to crops at various times.

2.2. Direct measurements of global radiation are few and far between in the Area. For a comprehensive survey it was necessary to fall back on Brunt's empirical formula:

$$R_g = R_A (0.18 + 0.55 n/N)$$

where  $R_A$  is the incident radiation at the top of the atmosphere and  $n/N$  the observed fraction of total possible sunshine. For estimating  $n/N$  records of insolation are necessary and from the network of selected stations even this was not always available for all the years of the 1953-1962 series analysed. In most cases there were sufficient sunshine records for the last few years of the decade to make it possible to work out graphically an insolation and mean amount of cloud cover relationship from which  $n/N$  could be obtained when only observations of cloud amounts in octas were available, as shown at Fig RA.2.1.

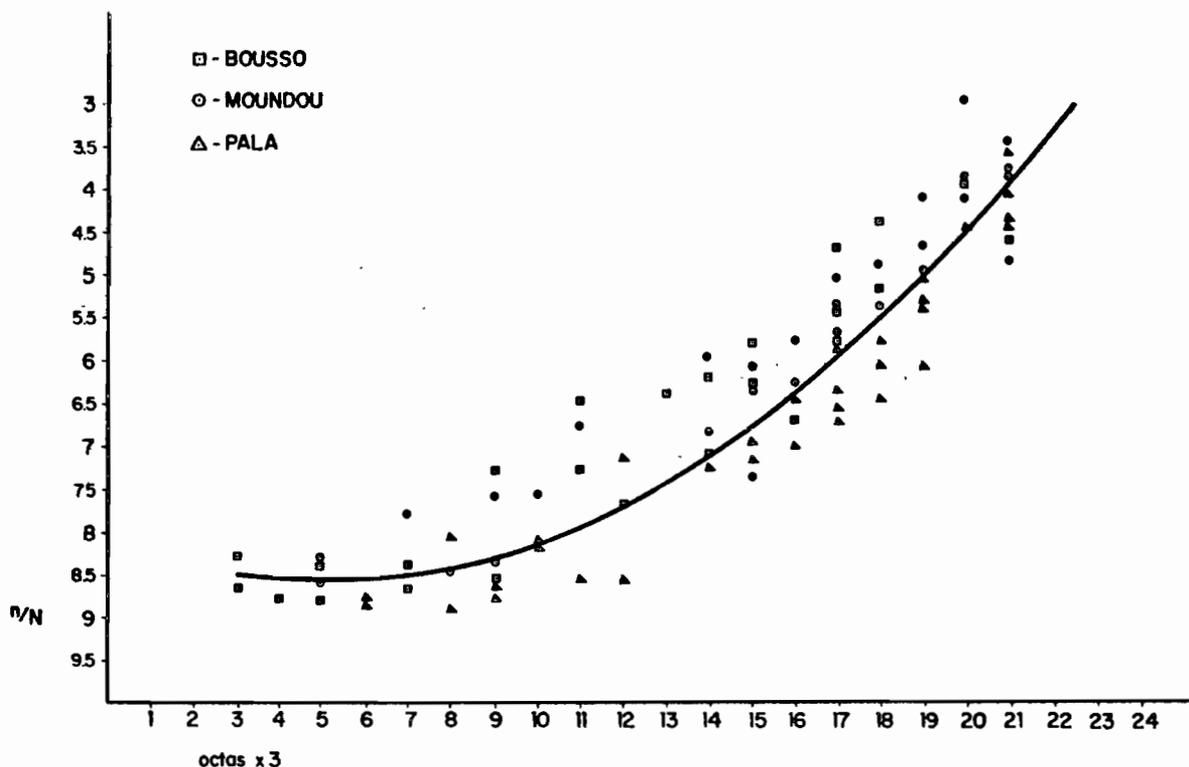


Fig RA.2.1. Relation between simultaneous daily sunshine measurements related to maximum possible sunshine and cloud cover observations in octas three times a day.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<u>Senegal</u>												
Dakar Yoff	388	453	529	566	536	489	407	395	451	458	428	366
Matam	404	478	543	575	556	529	454	450	474	478	437	394
St. Louis	360	422	525	557	530	475	455	441	457	444	406	345
Tambacounda	366	425	523	539	498	396	359	359	391	412	405	324
Thies	408	467	562	602	573	508	444	396	442	464	441	385
<u>Mali</u>												
Bamako	425	466	506	486	452	449	404	367	426	438	421	381
Gao	438	485	507	549	530	493	510	505	500	498	460	409
Kayes	405	446	530	548	490	452	415	386	443	451	423	355
Mopti	405	468	496	513	472	470	451	431	477	474	430	381
Segou	485	506	524	521	497	503	466	439	478	495	459	431
<u>Nigeria</u>												
Maiduguri	483	522	505	511	499	483	422	382	455	516	500	475
Sokoto	458	500	482	494	505	510	447	402	470	522	491	455
Kaduna	457	473	479	466	472	422	352	311	385	465	484	467
Kano	451	482	493	485	512	486	445	392	480	518	491	449
<u>Cameroun</u>												
Maroua	483	522	505	493	481	457	414	373	420	374	454	467
Garoua	469	512	490	474	477	444	392	371	412	487	490	469
Kaele	486	523	523	484	480	455	404	372	421	460	472	478
<u>Ghana</u>												
Navrongo	481	536	513	494	491	476	424	400	438	506	490	472
<u>Niger</u>												
Agades	441	493	514	522	529	523	530	523	516	510	469	410
Birni · N'Konni	460	504	506	513	507	513	459	448	487	510	486	438
Maradi	477	514	550	548	533	538	470	439	496	519	480	458
N'Guigmi	457	509	522	539	545	533	468	445	468	508	461	445
Niamey	462	498	498	503	506	494	452	421	461	503	580	437
Tahoua	465	506	537	549	536	544	488	467	502	513	471	433
Zinder	453	489	497	503	489	495	407	430	496	510	471	442
<u>Chad</u>												
Am Timan	480	527	539	520	509	485	415	409	455	505	490	471
Abeche	474	519	523	548	525	513	450	412	478	517	456	455
Bouso	491	514	497	484	463	431	387	355	412	458	485	475
F. Archambault	463	504	455	456	450	399	330	344	378	429	462	449
F. Lamy	474	517	490	511	502	462	408	384	454	493	490	455
Mongo	467	512	497	506	507	456	405	357	424	469	457	449
Moundou	481	507	518	456	458	415	373	352	378	438	465	474
Pala	493	520	517	467	477	382	384	371	404	470	493	484
<u>Upper Volta</u>												
Ouagadougou	441	464	492	467	477	428	410	366	427	482	451	396
Bobo Dioulasso	427	478	486	440	456	424	389	392	419	455	420	419

Table RA.2.2. Monthly mean global radiation at the 35 reference stations in  $\text{cal. cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ .

2.3. Thus the global radiation amounts calculated and used in this study are dependent on eye estimates of cloud cover which, even for the few years over which they were averaged, may show systematic variations not only from station to station but also from country to country.

There are in fact some anomalies in the yearly mean amounts of n/N obtained in this way which are illustrated Fig WE.3.3.a) in connection with water availability. Most discordant were the estimates at Mopti and Segou in Mali, and Navrongo in north Ghana, the departure in both cases being about 6%. These values were provisionally accepted and used. Further and careful examination of the data and methods of observation is needed to establish the significance of these departures.

2.4. The computed monthly mean amounts for the ten-year period are listed at Table RA.2.2., and the distribution of the yearly amounts over the Area is illustrated at RA.2.3. It is seen that there is an increase from south to north of about 12%, thus reversing the gradient of the incident radiation at the top of the atmosphere which is higher at the equator. This is caused by more prolonged cloud cover in the south, due to the seasonal movement of the intertropical convergence zone, as explained in the section on meteorology (and illustrated at MC.1.2.) and again in connection with temperatures

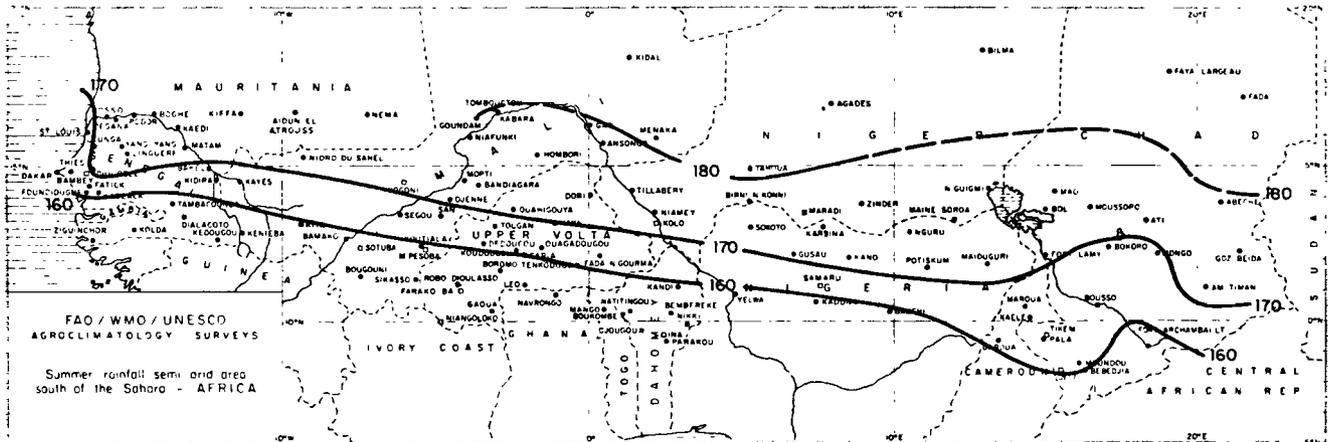


Fig RA.2.3. Annual mean global radiation in  $\text{kcal.cm}^{-2}$ . The distribution is in general agreement with the cloudiness of the monsoon. North Cameroun shows a maximum and adjoining southwest Chad shows a minimum.

2.5. This gradient is steepest in August, at the height of the rainy season, as shown at RA.2.4., when the difference between the north and south of the Area is about 30%. In August incident radiation at the top of the atmosphere in the Area also decreases from north to south but at a much smaller rate than global radiation, as shown at table RA.2.5. On the map of Fig RA.2.4., isolines published in Black's world-wide survey (1956) have also been plotted for comparison. The agreement is good on the whole, although the distribution of the values obtained in this study, probably in greater detail, shows irregularities which, as argued above in the case of insolation, may be genuine and due to local differences of agroclimatic significance. Such questions can only be solved by more detailed studies.

2.6. Some values of global radiation observed experimentally at Fort Lamy are available from Riou, Callede and Bouchardeau (1964) and have been compared with our estimated values for the same period, Fig RA.2.6. There is a systematic difference (which may be instrumental and connected with temperature) apart from which the agreement is good.

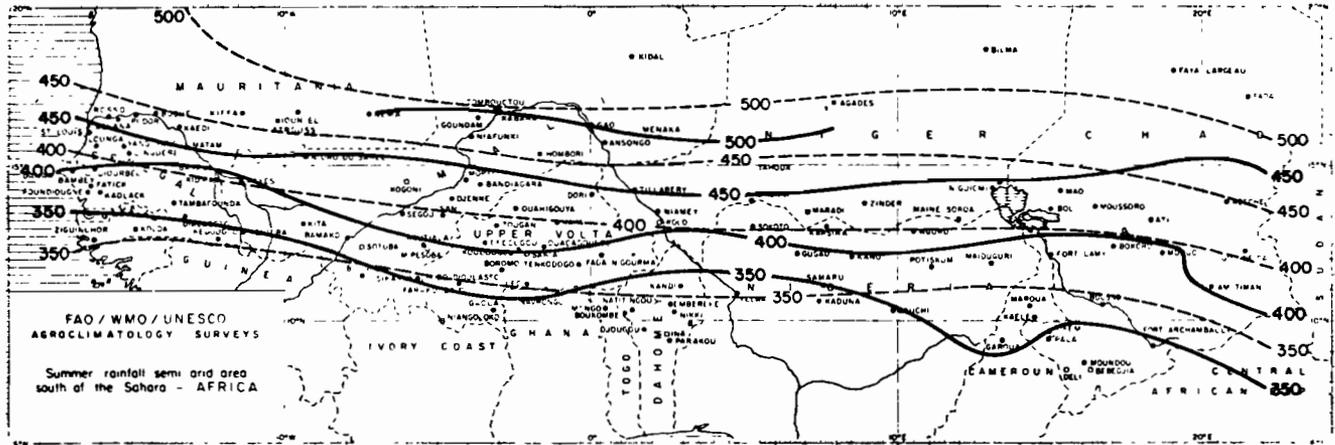


Fig RA.2.4. Mean global radiation in August (plain lines) and according to Black (dotted lines) in  $\text{cal.cm}^{-2}$  per day.

2.7. The two curves show a seasonal variation in monthly mean global radiation which is typical of the Area and reflected in the temperature as shown in the previous section. There is a rapid increase during the first three months of the year, corresponding to an increase in solar input, followed by a period of gradual decrease during the next three months with the increasing cloudiness due to the approach of the monsoon. Further and more important

August 1953-1962

	Lat. °N	kcal. $\text{cm}^{-2}$	
		Gross Rad.	Global Rad.
Agades	17.0	28.0	16.2
Zinder	13.8	27.8	13.3
Kano	12.1	27.7	11.2
Kaduna	10.6	27.5	9.2

Table RA.2.5. Showing slight decrease in incident radiation on top of the atmosphere and important reduction in global radiation going from north to south in August.

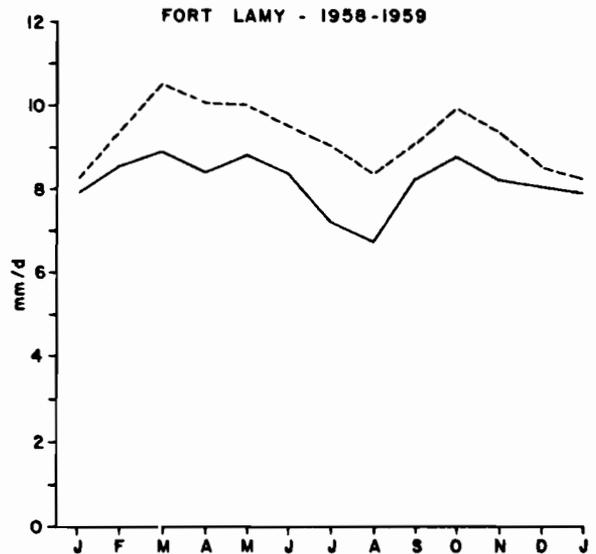


Fig RA.2.6. Global radiation measured (dotted line) and calculated (plain line).

reduction during the rains leads to a yearly minimum in August, the wettest month. This is followed by a sharp increase, as the skies clear, which by October is cancelled and later reversed by the winter decline in solar radiation.

2.8. The empirical formula does not take into account the effect of excessive amounts of dust in suspension. This dry haze occurs frequently in the Area especially in strong harmattan winds bringing fine dust from the Sahara. Measurements taken by Professor Masson at Dakar University (private communication) show a difference of up to 6.5% between otherwise similar limpid and hazy days. In general, a greater reduction in global radiation due to haze would be expected in the north of the Area than in the south.

### 3. Net radiation.

3.1. This energy balance takes into account incident global radiation and the long wave emission of the earth. It indicates how much heat will be available to evaporate water and keep the soil and the lower atmosphere at temperatures which control plant metabolism.

3.2. Direct instrumental measurement of net radiation is even more difficult to achieve than with global radiation. It might be said that a satisfactory and widely acceptable instrument to do this has yet to be designed. Apart from some measurements from Dakar University no reliable data are, to our knowledge, available to date (1966) from the Area.

3.3. Thus it was again necessary to have recourse to an empirical formula :

$$R_A(0.18+0.55 \frac{n}{N}) - \sigma T^4(0.56 - 0.092\sqrt{e_d})(0.10+0.90 \frac{n}{N})$$

as detailed at section WE, into which  $n/N$  enters. Here, however, excessive global radiation quantities due to underestimating cloud cover would be compensated in some measure by excessive back radiation values.

3.4. Monthly mean values for the network of stations in the Area are given at Table RA.3.1. and the distribution of the yearly mean amounts is illustrated at Fig RA.3.2.a) Although there is a general increase towards the north, the gradient is fairly slack and indeterminate, being greatest from the coast of Senegal inland. In August, Fig RA.3.2.b), the south to north gradient is more definite, though there are some anomalies of which the significance, as said earlier, remains to be confirmed.

3.5. When estimating energy available for plant growth, amounts advected by air coming from areas where such energy is at a higher level may add themselves to those determined by the budget. Thus there is a risk in such a case of underestimating net radiation. This may be happening in the north of the Area especially where much heating by anticyclonic subsidence is taking place. In the potential evapotranspiration estimates this risk is to some extent mitigated by the use of the aerodynamic or advection term.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<u>Senegal</u>												
Dakar Yoff	245	303	369	414	407	387	329	326	371	363	307	228
Matam	194	248	294	339	342	378	362	369	384	357	270	192
St. Louis	215	261	352	396	401	381	375	371	384	346	271	198
Tambacounda	171	213	279	323	335	312	298	304	325	327	270	170
Thies	213	264	348	404	414	390	358	329	363	359	290	202
<u>Mali</u>												
Bamako	192	224	278	324	337	356	338	301	343	331	253	188
Gao	159	194	234	271	313	337	378	389	362	271	191	155
Kayes	169	198	248	289	314	346	337	318	362	343	242	159
Mopti	192	224	253	293	319	351	357	350	382	349	257	184
Segou	210	246	282	317	349	383	371	355	383	360	268	206
<u>Nigeria</u>												
Maiduguri	239	257	272	313	349	369	339	311	362	358	273	237
Sokoto	173	205	242	311	358	379	355	325	369	363	234	169
Kaduna	211	228	295	336	362	329	281	251	300	333	283	211
Kano	204	233	262	307	362	371	350	314	375	348	253	200
<u>Cameroun</u>												
Maroua	211	237	257	310	343	352	329	300	333	335	242	211
Garoua	224	249	286	333	369	353	314	301	333	372	307	234
Kaele	221	244	286	325	345	349	319	299	335	333	263	224
<u>Ghana</u>												
Navrongo	215	270	321	364	389	372	339	325	352	381	313	224
<u>Niger</u>												
Agades	165	202	248	271	303	327	372	388	332	248	192	149
Birni N'Konni	196	226	264	320	358	385	360	362	385	349	240	185
Maradi	185	215	249	319	361	399	370	353	388	339	224	179
N'Guigmi	203	253	294	348	375	394	363	349	356	320	254	200
Niamey	197	215	254	305	357	378	359	342	366	347	238	178
Tahoua	171	187	228	280	320	384	370	369	377	293	211	142
Zinder	201	235	260	293	320	364	365	343	375	306	227	186
<u>Chad</u>												
Am Timan	246	276	309	342	362	356	320	320	353	371	302	247
Abeche	185	217	255	296	327	360	339	332	359	301	210	177
Bouso	244	269	303	343	348	345	314	293	336	358	326	252
F.Archambault	252	289	309	344	353	320	271	284	309	340	322	265
F.Lamy	217	182	260	303	346	349	322	312	360	347	263	269
Mongo	196	232	265	301	341	332	254	284	321	335	241	187
Moundou	263	288	304	335	351	322	301	288	309	340	312	274
Pala	232	244	296	336	358	301	304	299	327	354	355	287
<u>Upper Volta</u>												
Ouagadougou	189	218	264	307	352	333	325	298	339	349	257	178
Bobo Dioulasso	201	250	295	319	349	334	317	315	333	339	273	217

Table RA.3.1. Monthly mean net radiation in  $\text{cal.cm}^{-2}.\text{day}^{-1}$ .

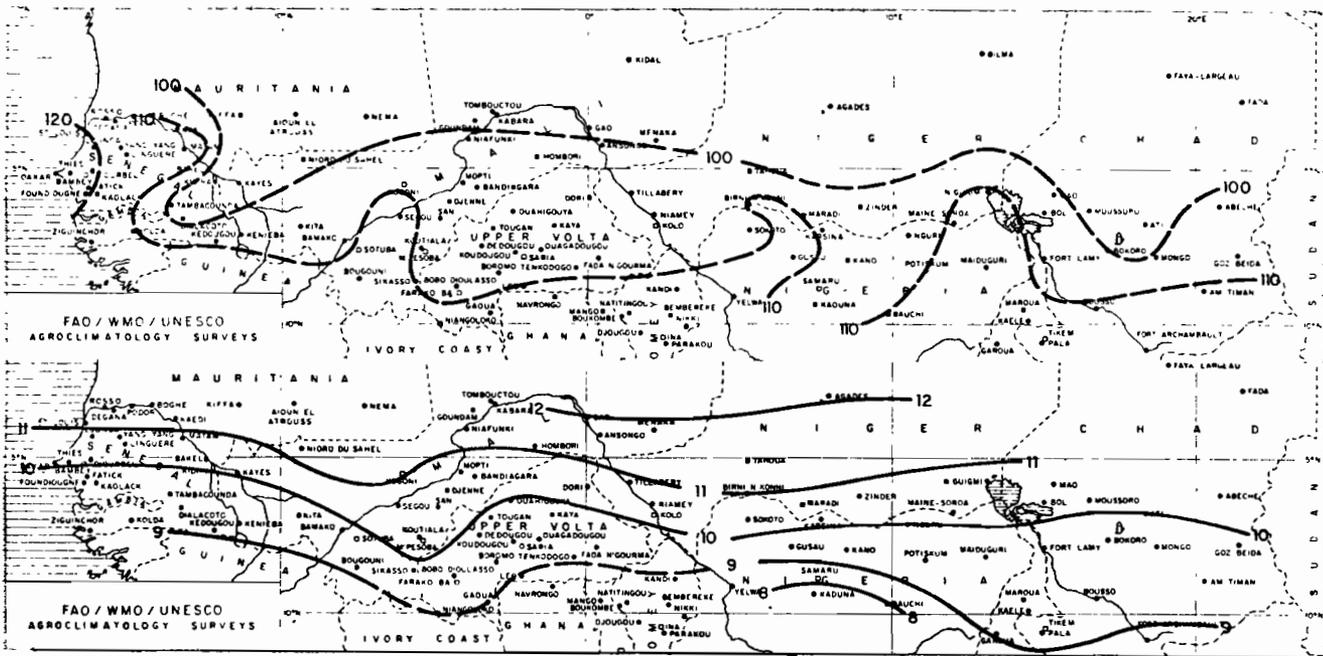


Fig RA.3.2. Net radiation in  $\text{kcal/cm}^2$  for (a) the year, showing slack gradient and maritime influence in Senegal; (b) August during the rains, showing south-to-north gradient.

#### 4. General remarks on radiation.

4.1. Typical amounts and also variation in the Area of the three radiation parameters discussed are shown at RA.4.1. where the monthly mean amounts for Bamako have been plotted. The radiation on top of the atmosphere is dependent on the position of the sun and Bamako is sufficiently close to the equator to have a double maximum. The global radiation shows the decrease associated with the monsoon. This is also reflected in the net radiation, but to a lesser extent because the loss of energy to outer space is reduced during the moist season by absorption of the long wave earth radiations by water vapour in the atmosphere and downwards reflection by clouds. Consequently, global and net radiation tend to converge during the rains. The relatively high values of the net radiation during the humid season is not reflected by the temperatures because a larger portion of the energy available is used in evaporating water.

4.2. The supply, both of global radiation necessary for photosynthesis and of net radiation which largely controls temperature and water circulation, maintains the same high level throughout the year in the Area. This implies that wherever water is continuously available in the Area it should be possible to produce crops at any time of the year, unlike areas in the mediterranean and temperate zones where the winter supply is insufficient with respect to net radiation.

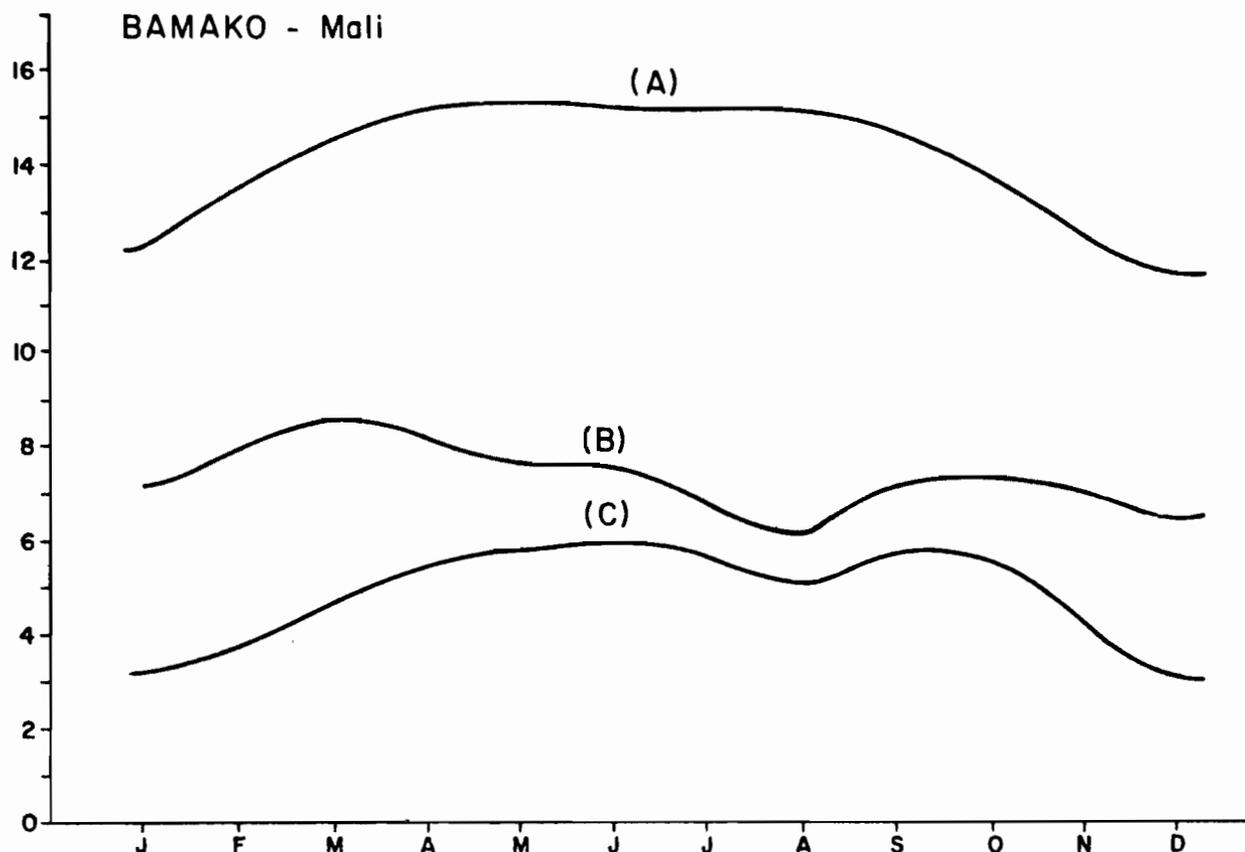


Fig RA.4.1. (A) Radiation outside the atmosphere. (B) Global. (C) Net, in mm of evaporable water per day.

## 5. Heliothermic parameters

5.1. Parameters compounded of the relative quantities of available heat and light are useful in comparing the climatic resources of the Semiarid Area with other parts of the world.

Geslin (1944) has used the ratio daily mean global radiation to daily mean temperature. He found that in Western Europe this ratio varied on the average from 40 in the spring to 20 in the Autumn (owing to the lag of temperatures on radiation changes during the annual cycle) when radiation is in calories per square centimetre per day and temperature in degrees celsius.

5.2. At RA.5.1. the values and variation during most of the year of this ratio at three stations representing a cross section of conditions in the Area have been plotted. It is seen that they vary between 13 and 18 and are therefore much less than in temperate countries. This may imply a relative shortage in the light radiation necessary for photosynthesis as was discussed briefly in the agronomic analysis.

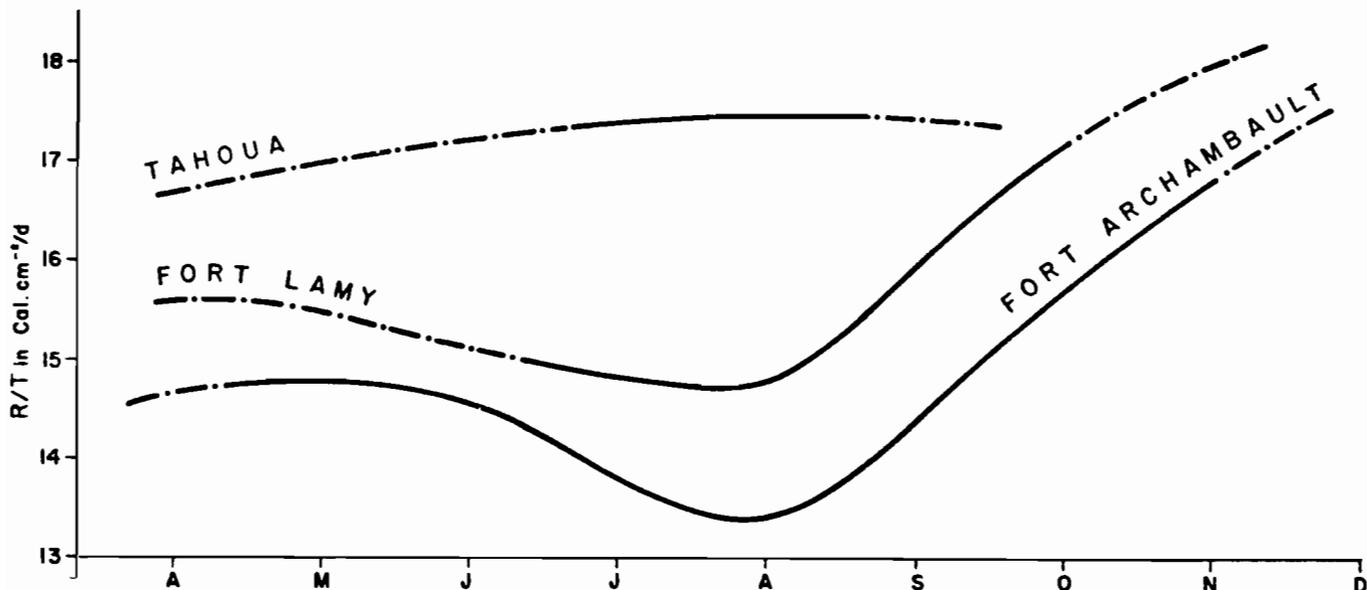


Fig RA.5.1. Monthly mean R/T. Plain line represents moist period.

5.3. It is also seen from Fig RA.5.1. that the seasonal variation of R/T is small. The moist period has been represented by a continuous line and shows generally in the Area a decrease during the first part of the growing period followed by a decrease. The longer and heavier the rains, the more marked the variation. At Tahoua at the northern limit of the Area it has disappeared.

5.4. At RA.5.2. the distribution of the ratio during the month of August is shown. It is seen to increase from south to north by about 20% and reflects the anomalies in cloudiness and radiation already discussed.

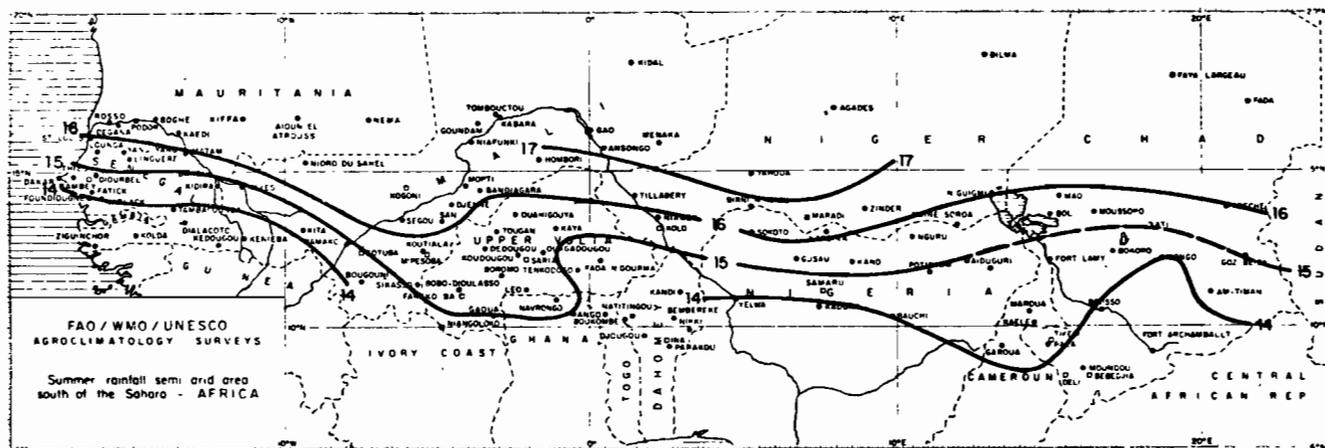


Fig RA.5.2. Ratio R/T for August. Ten-year average.

6. Maritime influence and continentality.

6.1. The absence of temperature-equalising maritime influence, usually called continentality, is often assessed by measuring the yearly range and the daily range of temperatures and combining them in one way or the other. In an area so near to the equator the yearly range would not be expected to be very pronounced, and the daily range yields more information on continentality.

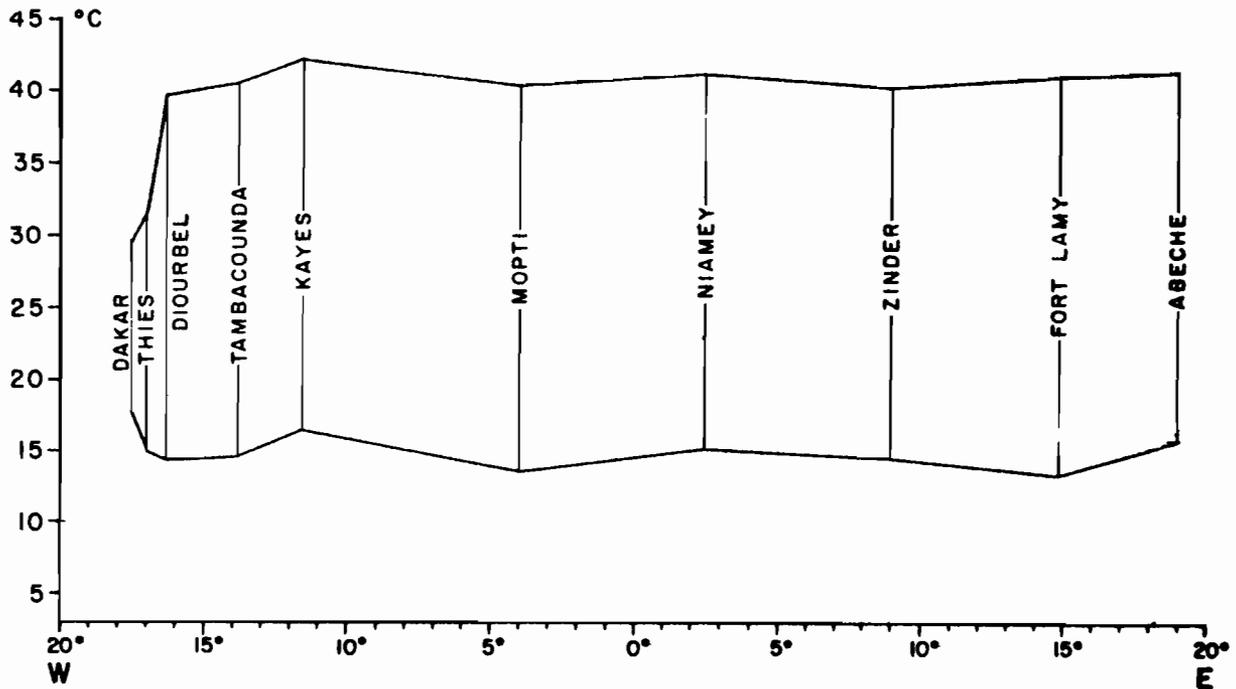


Fig RA.6.1. Mean minimum of coldest month and mean maximum of warmest month for stations in Area at about 15°N.

6.2. The penetration of maritime influence must be advective: it must depend on movement inland of air masses from the Atlantic Ocean. Practically no such movement takes place from West to East. Thus only the west coast of Senegal is affected. There the influence of NNW winds associated with a large anticyclone over the Azores is felt and in consequence a so called Sahelio Canarian zone is discernible in north-west Senegal. This is illustrated at RA.6.1. where it is seen that at Diourbel in Senegal continental temperature conditions have already been reached.

6.3. It might on the other hand be argued that the monsoon is a penetration of maritime influence from the south and that the Sahara which it does not reach is an expression of continentality. Such arguments are of little agroclimatic import. It can be said, in conclusion, that, in our Area and for our study, continentality is a parameter of little use.

References RA

- Black, J. N. The distribution of solar radiation over the earth's surface.  
1956 Arch.f. Met. Geoph. und Biobl. B.7, h.2.
- Brunt, D. Physical and Dynamical Meteorology. 2nd ed. Cambridge,  
1939 Cambridge University Press, 428p.
- Geslin, H. La caractérisation des climats locaux. In Comptes Rendus de la  
1947 Conférence de Pédologie Méditerranéenne, Alger-Montpellier.  
Paris, L'Association Française pour l'Etude du Sol. pp 37-84.
- Riou, C.H., Callede, J. & Bouchardeau, A. Mesures d'évaporation au Tchad.  
1964 ORSTOM (Centres de recherches Tchadiennes) 17p.
- Smithsonian Meteorological Tables. Prep R.J. List. 6th ed. Washington,  
1951 Smithsonian Institution. Smithsonian Miscellaneous  
Collections Vol114. 527p.

Temperature and Daylight - TL

1. General Considerations.

1.1. As recalled in the first part of this chapter, the forms of solar energy which control the growth and development of crops are the temperatures to which they are exposed and the intensity and duration of sunshine. These temperatures act not only by their accumulations to give critical quantities of heat but also qualitatively, as thresholds, either singly or as part of a seasonal or diurnal rhythm. Requirements are different in these respects, not only for different crops but also for different stages of growth and development.

1.2. The channelling and transformation of solar energy is illustrated at Fig TL.1.1. where particular emphasis has been given to those aspects with which we are more directly concerned. The supply of the various forms is discussed at section RA.

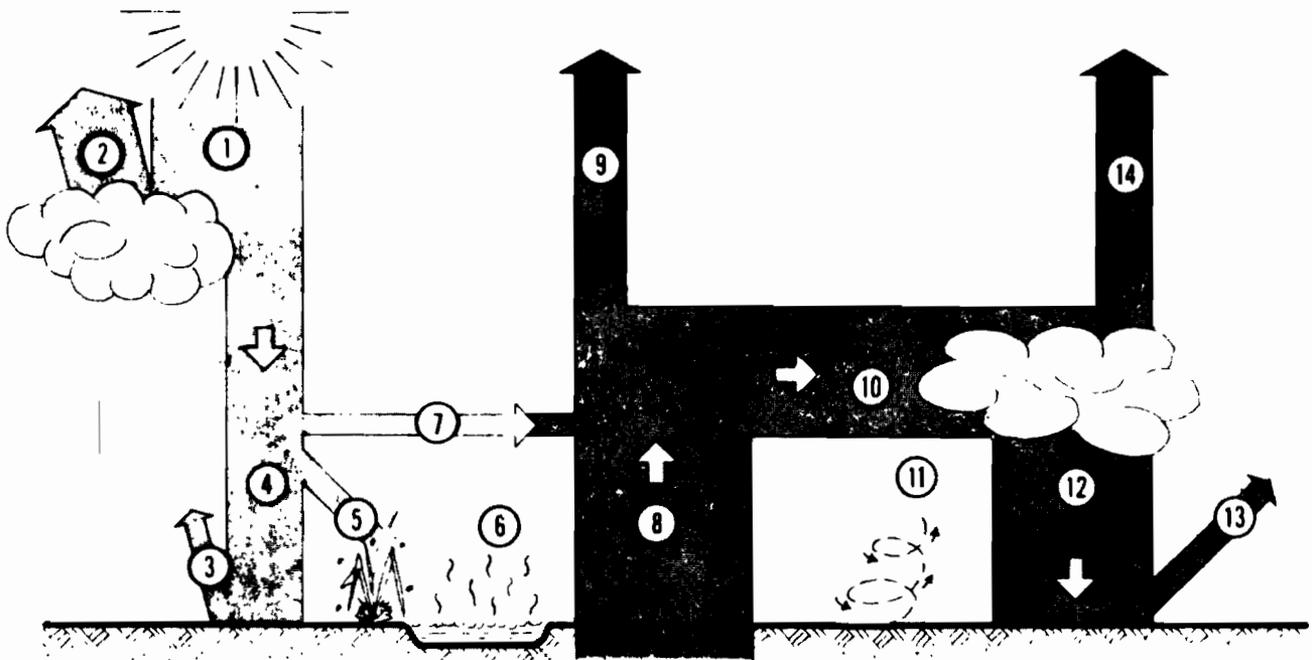


Figure TL.1.1. The pattern of solar energy exchange. (1) Incoming radiation. (2) Radiation reflected by clouds. (3) Radiation reflected by surface. (4) Radiation absorbed by the earth. (5) Radiation used for photosynthesis. (6) Radiation used for evaporating water. (7) Incoming radiation absorbed by atmosphere. (8) Long-wave radiation emitted by earth. (9) Long-wave radiation radiated directly to outer space. (10) Long-wave radiation absorbed or reflected by atmosphere and clouds. (11) Energy used for making winds. (12) Long-wave radiation reflected by atmosphere and cloud to earth. (13) Portion of (12) reflected by earth. (14) From atmosphere and cloud to outer space.

It may be recalled here that the air at vegetation level is not appreciably heated by the sunrays traversing it and owes its temperatures to those of the ground nearby which itself is warmed by absorbing solar radiation. Air is also warmed by condensation of water vapour and cooled by evaporation. Being almost perpetually involved in large scale movement, air tends to reflect the characteristics of its areas of recent origin. Thus the monsoon coming from the Atlantic is relatively moist and the harmattan coming from the desert is dry and hot in summer.

## 2. Length of day.

2.1. The importance of photoperiodism in the Area has been discussed in the first part of this chapter, where it is suggested that, though small, the seasonal differences which occur are significant. Length of day varies with latitude and time of the year, and at Table TL.2.1. its variation over the area is given month by month and degree by degree. If changes during the growing season only are considered, it is seen that at Moundou in south Chad during a relatively long season daylength will first increase by 20 min and then decrease by 51, whilst at Matam in north Senegal during a much shorter and later period we see a decrease of 72 min.

The variation of daylength is rigidly zonal but it can be usefully considered in conjunction with other climatic characteristics susceptible of more regional variation. At section PA, for instance, length of day was discussed in connection with annual rainfall. At WE several maps are given for the beginning and end of water availability periods and from those and Table TL.2.1. relevant day and night lengths may be obtained.

Lat	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
6°	11.82	11.93	12.09	12.25	12.39	12.46	12.43	12.31	12.15	11.99	11.86	11.79
7°	11.76	11.90	12.08	12.28	12.44	12.52	12.48	12.34	12.16	11.97	11.81	11.73
8°	11.72	11.87	12.08	12.30	12.49	12.58	12.54	12.38	12.17	11.95	11.77	11.67
9°	11.66	11.84	12.08	12.33	12.53	12.64	12.59	12.41	12.17	11.93	11.72	11.62
10°	11.61	11.80	12.08	12.35	12.58	12.70	12.65	12.45	12.18	11.91	11.68	11.56
11°	11.56	11.77	12.07	12.38	12.63	12.76	12.70	12.48	12.19	11.88	11.63	11.50
12°	11.51	11.74	12.07	12.40	12.68	12.82	12.75	12.51	12.19	11.86	11.58	11.44
13°	11.45	11.71	12.06	12.43	12.73	12.88	12.81	12.55	12.20	11.84	11.54	11.38
14°	11.40	11.67	12.06	12.45	12.78	12.94	12.87	12.59	12.21	11.82	11.49	11.32
15°	11.35	11.64	12.05	12.48	12.83	13.01	12.93	12.62	12.22	11.80	11.44	11.26
16°	11.29	11.61	12.05	12.51	12.88	13.07	12.98	12.66	12.22	11.78	11.39	11.20
17°	11.24	11.58	12.05	12.53	12.93	13.13	13.04	12.69	12.23	11.76	11.35	11.14

Table TL.2.1. Monthly mean length of day in hours in terms of latitude.

### 3. Temperatures.

3.1. Daily mean temperatures in the Area are consistently high and their seasonal variation is relatively small, especially in the south, as can be seen from Fig TL.3.1. where two stations from Chad are contrasted with Tunis, on the other side of the anticyclonic belt, to the north.

Both stations show a variation very typical of the Area. The winter cooling, however slight, is a little more pronounced at Fort Lamy,  $12.13^{\circ}\text{N}$ , than at Fort Archambault  $09.22^{\circ}\text{N}$ .

There is during the first part of the year a gradual increase in mean temperature interrupted by the onset of the summer rains. This occurs later at Fort Lamy which is further north and where, consequently, a higher monthly mean is attained. The cooling effect of the rains is due to loss of heat by evaporation and decreased solar radiation, as will be seen in the section RA, and advection of cooler air.

This cooling reaches a maximum in August, the wettest month everywhere. In the south, as can be seen at Fort Archambault, the August temperature is lower than December and January.

As the intertropical convergence zone retreats southwards temperatures increase again and this is more marked at Fort Lamy where the rains are shorter. This increase is eventually cancelled by winter cooling which, as already pointed out, is more pronounced at Fort Lamy.

Tunis, by contrast, has a cool and wet winter and a hot and dry summer.

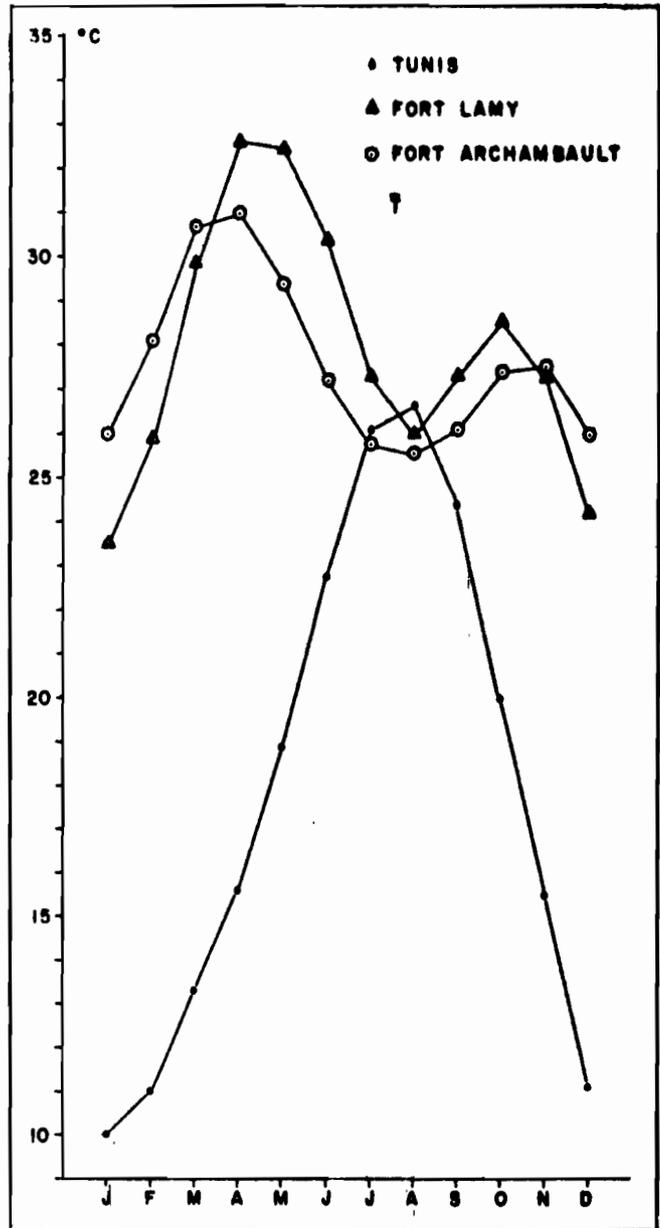


Fig TL.3.1. Monthly mean temperatures in the Semiarid Area,  $\blacktriangle$  &  $\blacksquare$ , and in Tunisia,  $\bullet$ , on the north side of the anticyclonic belt. Cooling by the summer rains lowers temperatures to the level of the dry Mediterranean summer.

3.2. At Fig TL.3.2. monthly mean extreme temperatures for the same two stations are shown together with those for Faya Largeau also in Chad but in the Sahara Desert to the north of the area. It is seen that the prerainfall increase in temperature is most marked for maximum temperatures.

At Fig TL.3.3. the distribution of the occurrence of the hottest month of the year in the area is shown. The effects of the time of arrival of the intertropical convergence and of its retardation in north west Senegal are both clearly shown. The effect of the rains on the minimum temperatures is far less pronounced because, as will be seen in the next section, RA, cloudiness and humidity reduce night cooling. As a result the difference between the two extremes, or diurnal range, is greater in winter than in summer as shown at Fig TL.3.4. where it is also seen that at Faya Largeau, practically unaffected by the rains the variation in diurnal range is less and of completely different rhythm.

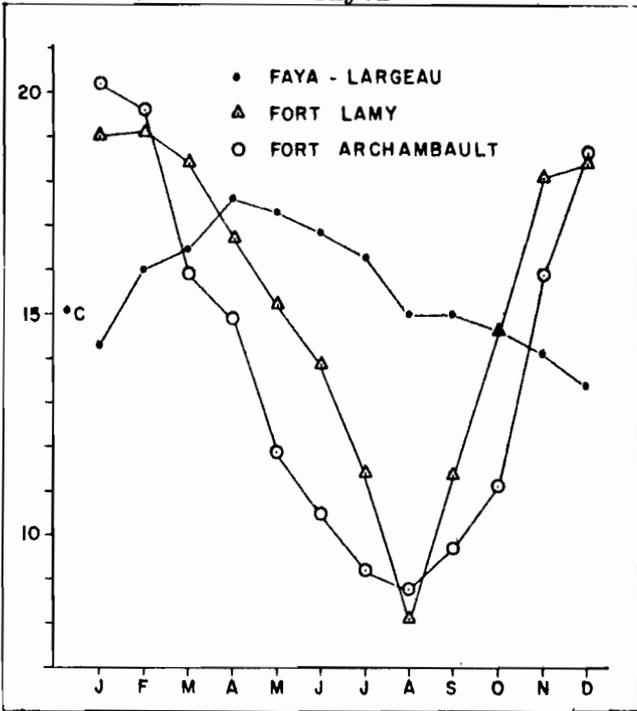


Fig TL.3.2. Monthly mean extreme temperatures for three stations in Chad one in the south and one in the north of the Semiarid Area and a third in the Sahara Desert, further north.

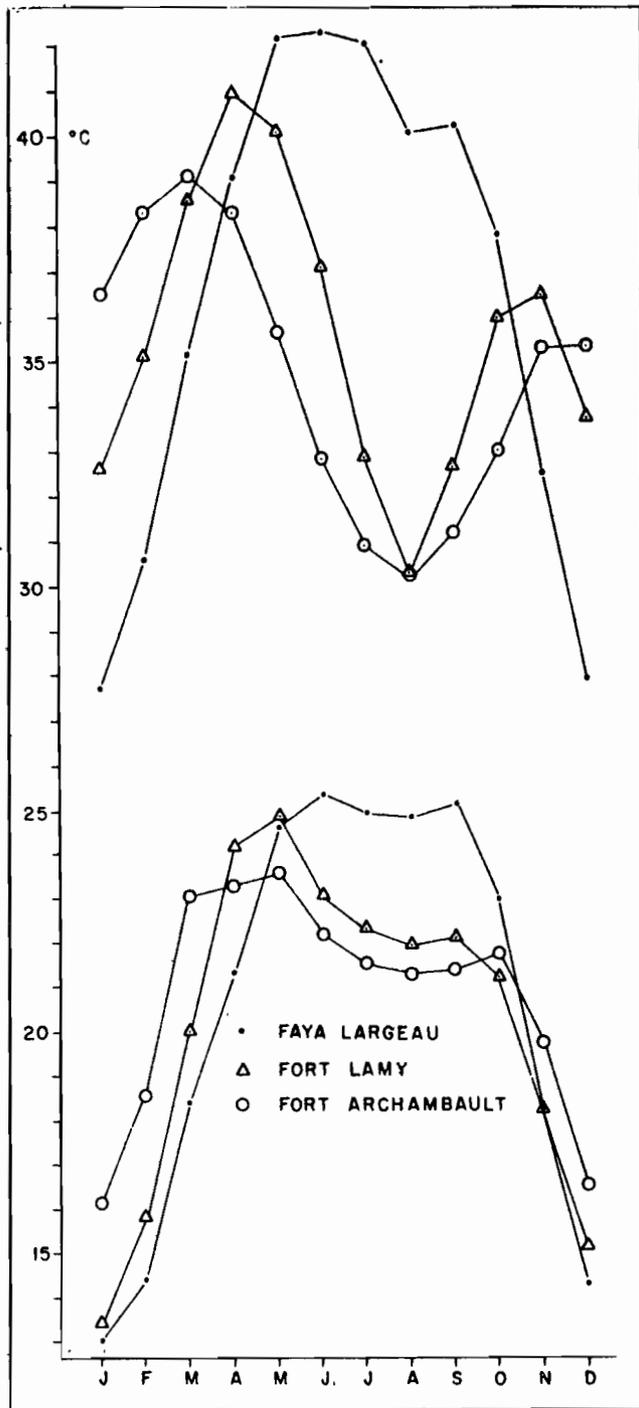


Fig TL.3.4. Monthly mean diurnal temperature range for three stations in Chad. Faya Largeau in the desert to the north of the Semiarid Area is only slightly affected by the summer rains.

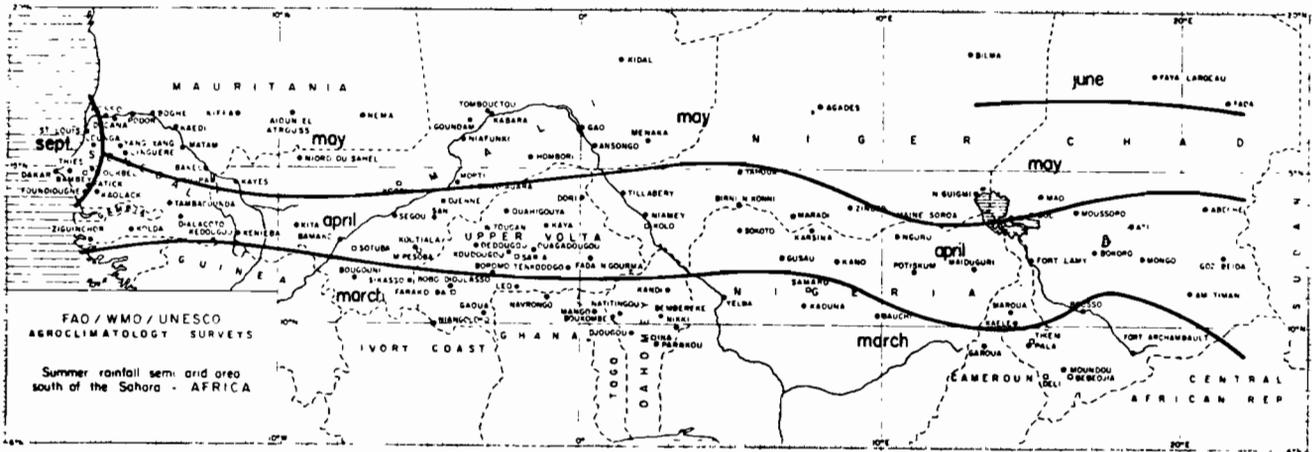


Fig TL.3.3. Distribution of the hottest monthly mean maximum of the year.

3.3. Temperatures in excess of 44°C by day and 26°C by night have been mentioned in the agronomic analysis as having adverse effects on crops. Occurrence of such temperatures may be arbitrarily associated with monthly mean maximums of 40 and minimums of 24. Such temperatures do occur in the area but mostly outside the growing season, especially the high maximums. The interval of time during which these temperatures are experienced is clearly important. An extreme temperature of short duration might not be very harmful. With this in mind, effective day and night temperatures (situated respectively half way between the mean temperature and the extremes) were also computed. These temperatures are thought to be fairly close to average temperatures for day and night.

3.4. At table TL.3.5. is shown an example of the routine monthly mean temperature analysis carried out for stations in the area showing effective as well as extreme

COUNTRY: Niger . . . . .

PLACE: Zinder . . . . .

Temperatures 1951 - 1960.

	Jan.	Feb.	March	April	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	TOT.
Mean temp.	22.6	25.6	30.0	32.5	32.7	31.1	27.9	26.5	27.7	29.5	27.1	23.3	336.5
Mean max.	30.7	34.0	38.0	40.2	39.7	37.6	33.2	31.2	33.3	37.1	35.2	31.0	421.2
Mean min.	14.5	17.3	22.0	24.7	25.6	24.7	22.7	21.7	22.2	22.0	19.1	15.6	252.1
Range	16.2	16.7	16.0	15.5	14.1	12.9	10.5	9.5	11.1	15.1	16.1	15.4	169.1
1/4 range	4.1	4.2	4.0	3.9	3.5	3.2	2.6	2.4	2.8	3.8	4.0	3.8	42.3
Day temp.	26.7	29.8	34.0	36.4	36.2	34.3	30.5	28.9	30.5	33.3	31.4	27.1	379.1
Night temp.	18.5	21.4	26.0	28.6	29.2	27.9	25.3	24.1	24.9	25.7	23.1	19.5	294.2

31167/E/E/1

Table TL.3.5. Monthly mean temperatures form.

	Effect day 37			Maximum >40°C				Minim. <15°C			Effective night > 26°C							Effective night >28°C							
	4	5	6	3	4	5	6	1	2	12	3	4	5	6	7	8	9	10	3	4	5	6	7	9	
Agades			o		o		o	o	o	o				o	o	o	o	o				o	o		
N'Guigmi								o	o	o					o	o	o	o							
Gao		1	o	1	o		o	o	o	o				o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	
St. Louis																									
Tahoua					o	1	o							o	1	o	1	o				o	1	o	1
Abeche					o	1	o						o	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Matam		1	o		1	o	1	o		o					1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Mopti					o	1	o		o					o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Zinder					o				o						1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Dakar Yoff																									
Birni N'Konni					o	1	o						o	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Niamey		1	o		1	o							o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o
Maradi					1	o			o	o	o			1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o
Fort Lamy					o	1	o		o					o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Maiduguri					o				o	o	o			o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Thies																									
Segou															1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Sokoto															1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Kayes		o	1	o			o	1	o					o	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o
Maroua														o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Mongo		1	o			o	1	o						o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Kano									o	o	o				1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Kaele														o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Ouagadougou														o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Am Timan								o		o				1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o
Bosso														o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Tambacounda					o										o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o
Garoua														o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
Pala														1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o
Navrongo														1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o
Bamako														o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1
F. Archambault														1	o	1	o	1	o	1	o	1	o	1	o
Bobo Dioulasso															1	o									
Moundou															1	o									
Kaduna															1	o									

† o . part preparatory    o † . part moist    [o] † . part humid  
 1 o . preparatory        o 1 . moist            [o] . humid

Table TL.3.6. Occurrence of possible threshold temperatures in the Area. Numbers 1-12 in heads represent months of the year.

temperatures. The salient features of this analysis in association with the timings at the growing season are shown at Table TL.3.6. This takes into account the occurrence of selected monthly mean and effective temperatures at stations in the Area in terms of availability-of-water periods. As stated above, such harmful or inhibitive temperatures occur in the Area mostly outside the growing season with respect to space and time. This is illustrated further at Fig TL.3.7.a) to c) showing the position with respect to these various parameters on June 15 and July 15. The most common occurrence is of night effective temperatures below 26°C. These are frequent during the preparatory period almost everywhere and are seen to occur during the first intermediate but not during the humid period.

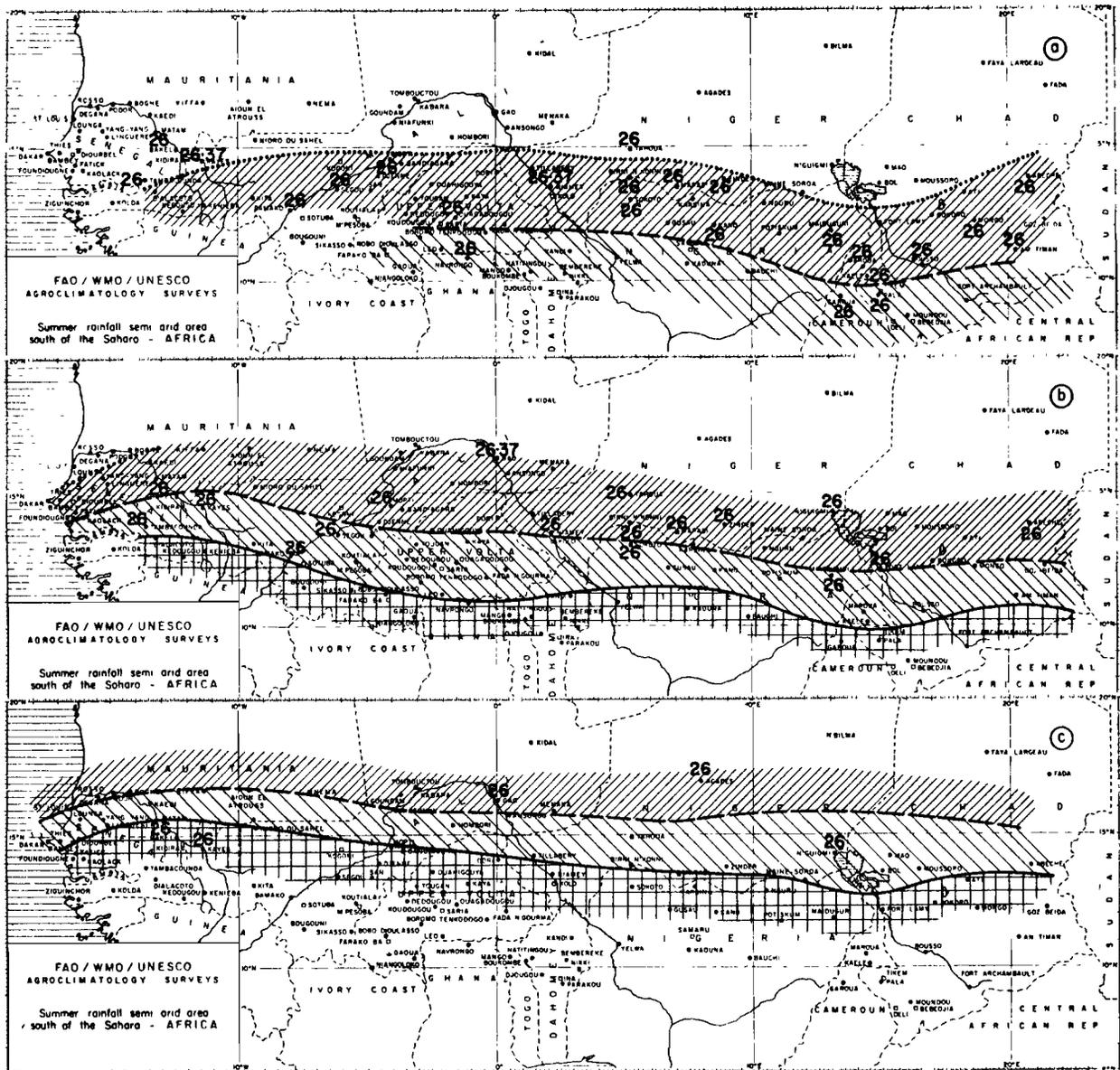


Fig TL.3.7. Occurrence of suggested threshold night and day effective temperatures and position of northern limits of preparatory, moist and humid periods on 15 May, June and July.

Place	Rainfall	Sums of Temperatures °C 1st Intermed. + Humid			Sums of Temperatures °C Moist period + 100 mm Stor.		
		No. days	from 0°	from 15°	No. days	from 0°	from 15°
Agadès	164						
N'Guigmi	235		1206.0	576.0	42	1206.0	576.0
Gao	261						
St. Louis	345	35	968.0	443.0	73	1788.2	693.2
Tahoua	405	65	1775.0	806.0		1119.6	144.6
Abéché	505	68	1785.9	765.9	95	2523.4	1098.4
Matam	535	72	2055.7	975.7	110	3153.2	1503.2
Mopti	550	75	2071.0	946.0	106	2934.0	1344.0
Zinder	550	72	1971.3	891.3	101	2799.3	1284.3
Dakar Yoff	580	74	2025.7	915.7	113	3095.3	1400.3
Birni N'Konni	600	78	2142.4	972.4	122	3387.4	1557.4
Niamey	640	79	2187.7	1002.7	119	3323.7	1538.7
Maradi	640	81	2170.4	955.4	121	3268.4	1453.4
Fort Lamy	650	83	2156.8	911.8	121	3209.8	1394.8
Maiduguri	660	87	2336.6	1031.6	123	3319.2	1474.2
Thies	695	94	2544.6	1134.6	132	3582.8	1602.8
Segou	725	97	2640.0	1185.0	130	3543.5	1593.5
Sokoto	735	104	2730.5	1170.5	133	3526.5	1531.5
Kayes	820	103	2823.6	1278.6	144	3920.0	1760.0
Maroua	840	124	3298.8	1438.8	153	4087.0	1792.0
Mongo	860	102	2733.0	1203.0	136	3689.5	1649.5
Kano	870	112	2933.9	1253.9	145	3812.7	1637.7
Kaele	880	126	3335.5	1445.5	150	3989.5	1739.5
Ouagadougou	880	124	3365.7	1505.7	160	4364.7	1964.7
Am-Timan	920	131	3470.3	1505.3	166	4404.4	1914.4
Bouso	930	127	3737.8	1832.8	162	4413.9	1983.9
Tambaconda	940	127	3420.1	1515.1	164	4459.7	1999.7
Garoua	1015	149	4029.8	1794.8	180	4889.9	2189.9
Pala	1045	150	3919.3	1669.3	186	4892.2	2102.2
Navrongo	1095	155	4204.2	1879.2	185	5037.0	2262.0
Bamako	1100	130	3511.4	1561.4	165	4481.1	2006.1
F. Archambault	1140	160	4274.4	1874.4	200	5377.6	2377.6
Bobo Dioulasso	1185	156	4091.5	1751.5	190	5014.7	2164.7
Moundou	1230	168	4466.8	1946.8	209	5574.4	2439.4
Kaduna	1300	171	4198.2	1633.2	203	5000.7	1955.7

Table TL.4.1. Sums of temperatures during availability-of-water periods.

4. Sums of temperatures.

4.1. The importance of sums of temperatures has been stressed in the agronomic analysis and will be discussed again in the sections dealing with individual crops. To be directly comparable with yields, such sums must clearly be worked out in terms of the timing of biological events such as sowing and heading. Here we only have the mean dates of climatological events such as the beginning and end of the availability of water periods. However, in as far as some phenological events should with advantage and in practice often do coincide with these climatic events sums may profitably be calculated for the duration of these periods. Thus accumulations of degree days for the first intermediate and humid period and for the moist period with 100 mm reserve were estimated starting from 0°C and 15°C and are tabulated at Fig LT.4.1. Distributions in the area are shown at LT.4.2.a) to b). There again the familiar pattern emerges, compounded as it is of the length of the water availability periods and a nearly uniform daily mean temperature field.

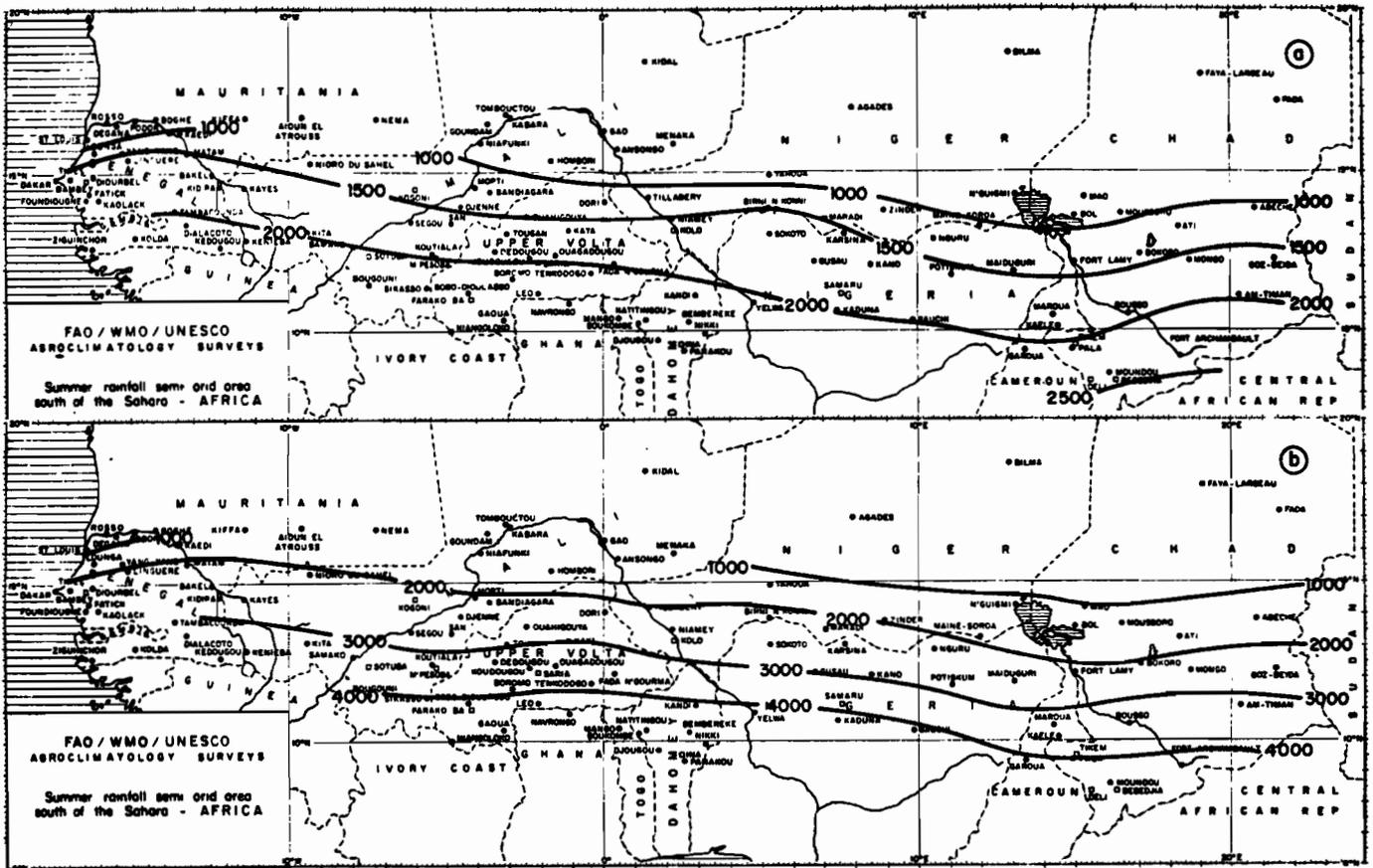


Figure TL.4.2. Sums of degree-days. (a) Moist period with 100 mm reserve, starting from 15°C. (b) First intermediate plus humid period, starting from 0°C.

5. Variability of temperatures.

5.1. Temperatures at a given place and time of the year vary relatively little in the Area and the departures from the mean appear to be distributed according to a normal law, thus making it possible to assess the probabilities of occurrence of specified values.

5.2. For example, the distribution of the maximum temperatures of 13-17 August during the period 1951-1962 at Fort Lamy in Chad, 60 temperatures in all, was analysed. For a mean of 29.9°C the standard deviation was 2.07, giving a coefficient of variability of 8.4%. Arrayed in ranks, these 60 values formed a series which agreed closely with the theoretical frequencies.

For five days in June for the same number of years the mean maximum was 36.1°C the standard deviation 2.55 and the coefficient of variability 7.1% again with good agreement between theoretical and experimental values.

5.3. Daily mean temperatures show less variation. During the same five days in August as at paragraph 5.2. the daily mean temperature for the 12-year period is 25.9°C and the standard deviation 1.33 making the coefficient of variability 5.1%. This, of course, amounts to saying that temperatures on these dates have a 66% probability of falling between 24.5°C and 26.2°C and a 96% probability of being between 23.3°C and 27.5°C.

## 6. Temperatures during the growing seasons.

6.1. As well as trying to trace the occurrence and distribution of temperatures said to be significant thresholds, as was done at paragraph 3.4., the temperatures known to occur currently during the different availability-of-water periods obtained in section WB must also be determined.

6.2. At Table TL.6.1. the monthly mean maximum temperatures of the 35 reference stations in the Area have been tabulated together with outlines of the limits of the availability-of-water periods. It is seen, in agreement with paragraph 3.2., that these temperatures are reduced during the summer rains and that the highest values occur before the beginning of the growing season. Whereas the monthly mean maximum of the hottest month reaches 42°C at many places in the north and centre of the Area, during the first intermediate period monthly mean maximums vary between 32°C and 36°C, during the humid period between 29°C and 33°C and during the second intermediate period between 32°C and 34°C approximately.

6.3. At Table TL.6.2. the monthly mean minimums are represented in the same way. During the moist period the temperature is above 20°C everywhere in the Area except where the season extends well into the autumn when it drops further by one or two degrees and at Kaduna where altitude intervenes to a slight extent.

6.4. Effective night temperatures, of which the possible importance has already been mentioned in this section, are also shown at Table TL.6.3. During the humid period they range between approximately 22°C and 26°C, and during the intermediate periods between 24°C and 27°C with the same departures due to length of season and high ground as before.

6.5. It is seen that the average temperature characteristics of the moist period are not only markedly different from those of the rest of the year but also show great uniformity with only light gradients throughout the Area. This will be discussed again in terms of crops needs and tolerances.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Agadès	29.5	32.5	36.7	40.1	41.6	41.6	39.1	36.9	38.4	37.2	34.3	25.4
N'Guigmi	29.6	31.9	35.8	37.8	39.0	38.5	36.0	33.5	35.0	36.1	33.5	29.7
Gao	31.1	34.0	37.6	40.9	42.5	41.8	38.3	35.4	38.0	39.5	36.8	31.8
St. Louis	27.4	27.2	27.2	25.6	25.3	28.1	29.2	29.9	30.8	30.7	30.0	27.9
Tahoua	32.0	34.9	38.5	40.8	40.3	38.3	34.0	32.0	33.8	37.6	36.2	32.2
Abéché	36.0	37.2	40.0	41.5	40.5	38.9	34.5	31.4	34.2	37.8	37.2	35.4
Matam	32.9	35.3	39.1	41.3	42.1	39.7	35.0	33.0	33.1	34.9	35.1	31.7
Mopti	31.3	34.6	37.8	40.1	40.5	38.2	34.0	31.4	32.3	34.2	34.2	31.0
Zinder	30.7	34.0	38.0	40.2	39.7	37.6	33.2	31.2	33.3	37.1	35.2	31.0
Dakar	24.6	24.0	24.3	24.9	26.1	28.5	30.0	29.3	30.4	30.3	29.1	26.3
Birni N'Konni	32.6	35.5	39.4	40.9	40.0	36.9	33.0	31.4	32.8	36.6	36.6	32.9
Niamey	33.5	36.4	39.7	41.4	39.8	36.7	33.2	31.3	33.0	37.2	37.2	33.6
Maradi	31.8	34.6	38.8	40.5	39.1	36.7	32.3	30.6	32.1	35.9	35.5	31.9
Fort Lamy	32.6	35.1	38.6	41.0	40.2	37.1	32.9	30.2	32.7	36.0	36.5	33.7
Maiduguri	31.7	34.5	38.4	40.3	39.0	36.1	31.8	30.5	32.2	35.4	35.2	32.0
Thies	31.4	31.8	33.3	32.7	32.6	33.2	31.7	30.6	31.2	32.6	33.5	32.1
Segou	32.1	35.3	37.7	39.7	39.1	36.3	31.9	30.6	31.4	34.2	34.7	31.8
Sokoto	32.4	35.4	38.8	39.9	38.0	35.4	31.5	29.9	31.4	34.7	35.4	32.6
Kayes	33.8	36.4	39.9	42.2	42.5	38.5	33.6	31.8	32.8	35.8	36.9	33.9
Maroua	33.1	35.7	38.8	39.7	39.6	34.0	31.2	29.9	31.3	35.0	35.6	30.5
Mongo	35.9	38.8	40.3	41.0	38.6	35.7	31.9	29.7	32.0	35.8	37.6	35.7
Kano	30.2	32.9	36.9	38.4	36.6	33.6	30.4	29.2	30.9	33.9	33.7	30.4
Kaele	33.4	35.9	38.9	39.1	36.9	33.2	30.7	29.8	31.1	34.6	36.1	34.0
Ouagadougou	34.3	36.7	38.6	38.9	36.4	33.1	31.2	30.3	31.8	35.6	36.9	34.1
Am-Timan	35.7	37.5	39.1	38.1	37.0	33.7	30.7	29.5	31.2	33.6	35.6	35.7
Bouso	35.8	38.7	39.8	39.7	37.2	33.9	30.9	30.2	31.4	33.7	36.3	35.7
Tambaconda	34.7	36.7	39.3	40.6	39.9	36.0	31.6	30.8	31.6	33.7	35.8	33.7
Garoua	35.0	37.3	39.5	38.6	36.0	32.2	30.5	30.1	30.8	33.5	36.1	35.4
Pala	33.4	36.6	38.2	38.1	34.2	31.9	29.3	28.9	30.2	32.2	34.7	32.9
Navrongo	35.0	37.2	38.4	37.7	35.2	32.2	30.3	29.7	30.4	33.3	36.1	35.1
Bamako	33.3	36.2	38.5	39.5	38.5	34.6	31.3	30.1	31.7	33.8	34.7	33.1
F.Archambault	36.5	38.3	39.1	38.3	35.6	32.8	30.9	30.2	31.2	33.0	35.3	35.3
Bobo Dioulasso	33.8	35.7	36.5	36.3	34.3	31.8	30.1	29.5	30.7	32.8	34.4	33.5
Moundou	35.3	38.1	39.8	38.7	35.7	33.2	30.7	30.1	30.4	32.5	35.2	34.7
Kaduna	31.7	33.4	35.1	34.4	31.6	29.6	27.5	26.9	29.0	31.2	32.7	31.8

Table TL.6.1. Monthly mean maximum temperatures of the 35 reference stations. The availability-of-water periods are marked by a solid line (humid period) and a dotted line (intermediate periods).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Agadès	10.7	13.7	18.1	22.0	24.9	24.8	23.8	23.1	23.0	20.4	15.9	12.5
N'Guigmi	12.5	14.8	19.3	21.2	23.7	24.1	24.1	23.1	23.0	20.3	16.7	13.1
Gao	14.0	16.4	19.9	23.3	26.5	27.5	25.6	24.1	24.7	23.9	19.6	15.3
St. Louis	16.4	16.5	16.6	17.5	19.2	22.9	24.7	25.0	25.2	24.4	20.8	17.5
Tahoua	15.0	18.1	22.3	24.1	26.3	24.8	23.1	22.1	22.4	21.8	19.7	15.9
Abéché	16.0	18.1	22.1	23.9	24.8	24.5	22.9	21.2	20.7	20.5	19.8	16.7
Matam	13.9	15.5	18.0	21.4	25.1	25.9	24.1	23.6	23.1	23.6	19.8	15.7
Mopti	13.8	16.1	19.7	23.8	25.2	24.6	23.2	22.7	23.2	22.7	19.0	15.4
Zinder	14.5	17.3	22.0	24.7	25.6	24.7	22.7	21.7	22.2	22.0	19.1	15.6
Dakar	17.7	16.8	17.0	18.3	20.0	23.2	24.5	25.1	24.4	24.4	22.9	19.9
Birni N'Konni	15.8	17.7	22.0	24.7	26.3	25.2	23.1	22.3	22.5	21.2	18.2	16.1
Niamey	15.6	17.8	22.4	25.6	26.9	25.1	23.2	22.5	22.7	23.0	19.0	15.0
Maradi	12.8	14.6	19.7	22.7	24.6	23.8	22.0	21.1	21.5	19.3	15.4	12.8
Fort Lamy	13.6	16.0	20.2	24.3	25.0	23.2	22.5	22.1	22.3	21.4	18.4	15.3
Maiduguri	12.1	13.9	19.2	22.6	24.4	23.6	22.1	21.7	21.6	19.7	15.4	12.6
Thies	15.0	16.0	16.8	17.7	19.3	21.9	23.0	22.8	22.6	21.9	17.7	15.5
Segou	15.5	17.9	20.6	23.8	25.5	24.0	22.4	22.1	22.2	21.9	19.1	16.1
Sokoto	15.2	17.3	21.8	24.9	25.4	24.1	22.1	21.4	21.5	21.0	17.8	15.3
Kayes	16.9	19.5	22.5	25.8	28.4	25.9	23.9	23.0	22.9	23.1	20.6	17.7
Maroua	17.2	19.3	23.5	25.3	24.3	22.3	21.5	21.2	21.0	20.9	19.7	17.4
Mongo	18.7	21.7	25.4	26.5	25.6	23.9	22.3	21.6	21.7	21.5	20.8	18.1
Kano	12.6	14.9	19.5	22.7	23.8	22.5	21.1	20.8	20.9	19.8	16.0	13.2
Kaele	18.3	20.3	23.9	25.5	24.2	23.3	21.5	21.1	20.9	21.3	20.4	18.6
Ouagadougou	16.1	19.3	23.2	25.2	24.6	22.9	22.2	21.4	21.3	21.8	20.0	17.0
Am-Timan	12.7	15.1	20.0	22.6	22.9	21.8	20.9	20.7	20.7	19.6	15.3	12.7
Bouso	15.3	18.0	22.9	23.8	24.4	22.9	22.2	21.8	21.8	21.9	18.9	15.2
Tambaconda	13.5	17.5	20.3	22.9	25.3	24.1	22.5	20.0	21.9	21.7	18.7	15.2
Garoua	18.1	21.2	24.5	26.1	24.5	22.2	22.1	21.8	21.5	21.8	19.8	17.8
Pala	16.5	19.5	23.5	24.6	23.4	21.8	21.3	21.1	20.6	21.1	19.8	16.7
Navrongo	19.4	21.5	24.5	25.6	24.7	23.1	22.4	22.2	22.0	22.1	20.5	18.9
Bamako	17.3	19.5	23.5	25.7	26.2	23.8	22.7	22.7	21.5	21.5	19.1	17.4
F. Archambault	16.3	18.7	23.2	23.4	23.7	22.3	21.7	21.4	21.5	21.9	19.9	16.7
Bobo Dioulasso	15.5	18.7	21.7	23.4	22.5	21.3	20.7	20.6	20.4	20.6	19.2	16.0
Moundou	15.0	17.4	21.8	23.7	23.1	21.9	21.5	21.4	21.0	21.3	18.4	15.2
Kaduna	15.1	16.7	20.4	21.6	20.9	19.8	19.4	19.4	19.1	18.7	15.6	14.3

Table TL.6.2. Monthly mean minimum temperatures of the 35 reference stations. The availability-of-water periods are marked by a solid line (humid period) and a dotted line (intermediate periods).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Agadès	15.4	18.4	22.7	26.5	29.0	29.0	27.6	26.6	26.9	24.6	20.5	16.7
N'Guigmi	16.7	19.0	23.4	25.3	27.5	27.7	27.1	25.7	26.0	24.3	20.9	17.2
Gao	18.3	20.8	24.3	27.7	30.5	31.1	28.8	26.9	28.0	27.8	23.9	19.4
St. Louis	19.1	19.2	19.2	19.6	20.8	24.2	25.9	26.3	26.6	26.0	23.1	20.1
Tahoua	19.5	21.7	26.0	28.6	30.0	28.6	24.9	24.7	25.4	25.8	23.3	20.0
Abéché	20.4	23.0	26.6	28.2	28.9	28.1	25.7	23.2	23.9	25.0	23.8	21.3
Matam	18.7	20.5	23.3	26.4	29.4	29.4	26.8	26.0	26.0	26.4	23.6	19.7
Mopti	18.2	20.7	24.2	27.9	29.0	28.0	25.9	24.9	25.6	25.6	22.8	19.3
Zinder	18.5	21.4	26.0	28.6	29.2	27.9	25.3	24.1	24.9	25.7	23.1	19.5
Dakar	19.5	18.6	18.9	19.9	21.6	24.6	25.9	26.1	25.9	25.9	24.7	21.7
Birni N'Konni	20.0	22.1	26.3	28.7	29.7	28.1	25.6	24.6	25.0	25.1	22.8	20.3
Niamey	20.1	22.4	26.7	29.6	30.1	28.0	25.7	24.7	25.2	26.6	23.5	20.2
Maradi	17.5	19.1	24.4	27.1	28.2	27.0	24.5	23.4	24.1	23.4	20.4	17.5
Fort Lamy	18.7	21.1	25.5	28.5	28.5	27.0	24.9	24.2	24.5	25.0	22.6	19.5
Maiduguri	17.0	19.0	24.0	27.1	28.0	26.8	24.1	23.9	24.2	23.7	20.3	17.4
Thies	19.1	19.9	21.0	21.7	22.7	24.8	25.2	24.7	24.7	24.5	21.6	19.6
Segou	19.7	22.3	24.9	27.8	28.9	27.1	24.8	24.2	24.5	25.0	23.1	20.0
Sokoto	19.5	21.9	26.0	28.6	28.6	27.0	24.2	23.6	24.0	24.5	22.2	19.7
Kayes	21.2	23.8	26.8	29.9	31.9	29.0	26.3	25.2	25.4	26.3	24.7	21.7
Maroua	21.2	23.4	27.3	28.9	27.6	25.2	23.9	23.4	23.6	24.4	23.7	20.7
Mongo	23.0	26.0	29.2	30.2	28.8	25.8	24.7	23.7	24.3	25.1	25.0	22.5
Kano	17.0	19.4	23.8	26.7	27.0	25.3	23.5	22.9	23.4	23.4	20.5	17.5
Kaele	22.1	24.2	27.6	28.9	27.4	25.8	23.8	23.3	23.5	24.6	24.3	22.4
Ouagadougou	20.6	23.5	27.0	28.7	27.6	25.4	24.4	23.7	24.0	25.2	24.3	21.3
Am-Timan	18.5	20.7	24.7	26.4	26.4	24.7	23.3	22.9	23.3	23.1	20.3	18.5
Bouso	20.5	23.2	27.2	26.8	27.6	25.6	24.4	23.9	24.2	23.8	23.1	20.4
Tambaconda	18.8	22.3	25.0	27.4	29.9	27.1	24.4	22.7	24.4	24.7	23.0	19.9
Garoua	22.3	25.2	28.2	29.2	27.4	24.7	24.2	23.9	23.8	24.7	23.9	22.2
Pala	20.8	23.8	27.2	28.0	26.1	24.4	23.3	23.0	23.0	23.9	23.6	20.7
Navrongo	23.3	25.4	28.0	28.6	27.3	25.4	24.4	24.1	24.1	24.6	24.4	23.0
Bamako	21.3	23.7	27.3	29.2	29.3	26.5	24.9	24.6	24.1	24.6	23.0	21.3
F. Archambault	21.1	23.5	27.1	27.5	26.6	24.8	23.8	23.3	23.7	24.5	23.5	21.4
Bobo Dioulasso	20.1	22.9	25.4	26.7	25.4	24.0	23.0	22.9	23.3	23.6	23.2	20.4
Moundou	19.8	22.2	25.5	27.1	26.0	24.8	23.8	23.2	23.0	23.9	22.8	20.1
Kaduna	19.2	20.9	24.1	24.8	23.6	22.5	21.5	21.1	21.6	21.9	19.9	18.7

Table TL.6.3. Effective night temperatures of the 35 reference stations. The availability-of-water periods are marked by a solid line (humid period) and a dotted line (intermediate periods).



ADAPTATION DES CULTURES ANNUELLES AUX CONDITIONS CLIMATIQUES  
ADAPTATION OF ANNUAL CROPS TO CLIMATE

Nature des Cultures - CN

1. Cultures Vivrières et Cultures Industrielles.

La considération des facteurs économiques et sociaux amène à distinguer de façon très générale, parmi les cultures, celles qu'on dit vivrières de celles qu'on nomme industrielles. Cette différenciation est surtout valable, et utile, dans les pays en voie de développement qui ont une économie très simple, de nature essentiellement agricole. Cette économie est fondée sur des cultures commercialisées, à l'exportation surtout, qui donnent à ces pays les moyens de se procurer des produits généralement non alimentaires. La distinction tend à s'estomper au fur et à mesure de l'évolution vers une économie plus diversifiée et plus complexe.

Il n'y a pas de démarcation précise entre cultures vivrières et cultures industrielles. Les premières peuvent donner lieu à un certain marché local qui résorbe les excédents des uns pour combler les déficits des autres, comme c'est le cas pour le riz. Inversement, une culture industrielle comme l'arachide au SENEGAL (dont le revenu permet à certains producteurs de se procurer jusqu'aux produits alimentaires) peut n'être ailleurs qu'une culture vivrière, au Tchad par exemple où l'éloignement des ports ne favorise pas l'exportation. En dépit de cette délimitation imprécise, la distinction entre culture industrielle et culture vivrière est indispensable :

- En premier lieu pour concevoir l'assolement, déterminé finalement par des facteurs économiques et sociaux.

- Ensuite parce qu'elle implique la notion de probabilité : on ne peut considérer les chances de réussite d'une culture de subsistance absolument vitale vis à vis des conditions climatiques de la même façon que les chances d'obtenir un certain rendement pour une culture de rapport.

On appelle donc cultures vivrières celles qui fournissent des produits alimentaires formant le fond de l'alimentation dans les pays producteurs et qui se pratiquent par conséquent en grand, donc le plus souvent de façon extensive, suivant des méthodes souvent encore plus ou moins primitives, soit en champs familiaux soit en cultures collectives. Les produits en sont habituellement consommés à l'état brut ou après transformation élémentaire à l'échelle familiale.

Par opposition, on appelle industrielles celles des cultures qui visent à produire des denrées végétales diverses, alimentaires ou non, destinées à la commercialisation, le plus souvent à l'exportation. Elles ne sont mises sur le marché qu'après avoir été plus ou moins transformées dans des usines, sur place ou à l'extérieur.

En Afrique tropicale, les produits vivriers proviennent essentiellement de deux grands groupes de plantes cultivées :

- Grains produits par des plantes appartenant à deux familles principales, Graminées et Légumineuses. Les graminées fournissent le grain consommé en farine et les légumineuses donnent des graines le plus souvent consommées sans broyage.

- Tubercules et racines de diverses plantes renfermant des substances de réserve, amidon surtout : manioc, igname, patate ....

Ce second groupe domine en régions humides et subhumides à tendance forestière, sensiblement jusqu'à la limite nord du riz dit "de montagne". En Afrique sèche au contraire, aire de savanes herbeuses plus ou moins boisées, les 2 principales cultures vivrières sont le Sorgho (gros Mil) et le Pénicillaire (petit Mil). Accessoirement on rencontre aussi : le Maïs et les Légumineuses à graines (Vigna, Doliques, Voandzea, Arachide,...) dans l'ensemble de l'aire, et aussi le Manioc, les Patates, les Ignames, les Taros dans le Sud, enfin le Riz, plus ou moins inondé, en situations privilégiées.

Les 2 principales cultures industrielles, en culture sèche, sont le Cotonnier et l'Arachide pour l'ensemble de l'Afrique sèche. Ces deux cultures débordent largement vers le sud l'aire d'investigation. Vers le nord, le cotonnier peut le faire aussi avec le concours de l'irrigation, qui permettrait d'introduire une autre culture industrielle importante, la Canne à sucre.

Enfin un élevage de plus en plus vital et développé du Sud au Nord, mais qui ne fait guère que côtoyer la culture, sans interpénétration, devient la ressource prépondérante dans les zones Nord, au bénéfice de populations plus ou moins nomades. Il est l'unique ressource de nombreuses populations de pasteurs et, pour d'autres, plus favorisées par le climat mais qui n'en tirent qu'un très faible intérêt, il contribue à assurer des conditions d'existence quelque peu meilleures. Elevage et culture relèvent donc le plus souvent de deux sortes d'activité différentes.

Dans le cadre de cette étude limitée à la culture sèche, l'effort sera porté essentiellement sur le Sorgho, le Pénicillaire, le Cotonnier, l'Arachide et, secondairement, le Maïs et le Vigna sinensis (Niébé, Cowpea ...). Enfin le problème de l'élevage sera considéré tant sous l'aspect de la culture des plantes fourragères que sous celui de l'intégration de l'élevage dans le système d'agriculture.

2. Adaptation des cultures. Pour une diversité génétique donnée, liée à l'étendue de l'aire d'adaptation, les limites naturelles ou artificielles (telles que réalisées dans le milieu cultural) d'une culture déterminée sont imposées par les facteurs écologiques. De tous ces facteurs, le milieu climatique (climat atmosphérique + climat du sol) est sans doute celui qui domine.

Pour juger de l'adaptation des cultures à ce milieu climatique, une connaissance toujours approfondie de leurs besoins et tolérances spécifiques s'impose. Cette connaissance suppose d'autre part celle, toujours améliorée, de leurs processus de croissance et de développement. C'est d'après ces deux idées directrices que vont être examinées individuellement les cultures désignées ci-dessus.

## Les Sorghos CS

### 1. Généralités.

Les sorghos cultivés dans l'aire d'investigation se rattachent à plusieurs espèces (Snowden) du genre Sorghum. Comme le font Bezot (1) et Niqueux (22) au Tchad, pour moins de rigueur concernant des types parfois mal déterminés, il est commode de faire correspondre à ces espèces "des groupes" : guineense, elegans, caudatum, etc... Ces groupes plus ou moins spécialisés sont inégalement représentés, en longitude comme en latitude, par des formes culturelles dont la multiplicité est le signe d'une extrême diversité génétique aboutissant à une adaptation étroite aux exigences locales : climat principalement, mais aussi sol, usages, qualités gustatives,...

Ces formes culturelles sont des populations complexes de sortes fixées ou hétérozygotes (5% à 40% d'allogamie). Comme telles, elles sont plus ou moins stables en fonction principalement des fluctuations climatiques annuelles et du choix sommaire auquel elles sont soumises de la part du cultivateur qui peut constituer sciemment des mélanges. Elles se distinguent essentiellement par des caractéristiques écologiques dont les principales sont :

- La longueur du cycle végétatif (précocité au sens vague), en rapport avec la photopériode et/ou les températures.

- L'adaptation à des sols de texture plus ou moins fine, en relation avec la tolérance à l'inondation et à la sécheresse et avec l'importance globale des besoins en eau. Ces besoins dépendent eux-mêmes de la longueur du cycle et leur satisfaction est liée d'une part à la possibilité pour le sol de retenir et de conserver l'eau dans son profil utile, et à la durée de la saison humide, de l'autre.

- L'aptitude à être cultivées en saison pluvieuse et/ou en saison sèche, elle-même en rapport avec les réactions à la photopériode et aux températures.

Ces trois caractéristiques sont dans une assez grande mesure interdépendantes, le type physique de sol déterminant (concurrentement avec la pluviosité, l'évapotranspiration, la photopériode et les températures), les conditions du milieu climatique dont dépend la possibilité de cultiver telle ou telle forme. Ces caractéristiques commandent leur époque optimale de culture et leur distribution géographique.

### 2. Distribution.

2.1. Sorghos de décrue. Ils sont cultivés intégralement ou partiellement en saison sèche sous des photopériodes de moins de 12 heures décroissantes (septembre à décembre) puis croissantes (décembre à mars) et/ou de plus de 12 heures croissantes (mars à juin), avec des températures dont le minimum (minimum annuel) se situe en janvier-février. Ils ont, dans ces conditions, suivant la variété et la date du semis, des cycles plus ou moins longs auxquels doit nécessairement répondre la capacité de mise en réserve de l'eau de la crue dans le profil utile du sol.

La productivité étant en corrélation positive avec la durée du cycle, les sols sont d'autant mieux adaptés à ce mode de culture qu'ils sont plus profonds et que leur volume d'eau disponible, entre capacité au champ et point de flétrissement, est plus étendu, c'est à dire que leur texture en général est plus fine. Ils vont des alluvions très argileuses des zones d'expansion du delta central nigérien et des fleuves du Tchad méridional (terres de "berbérés") aux terres sableuses ("berbérés de sable") de la cuvette tchadienne, en passant par les "oualo" argilo-siliceux et les "diéri" silico-argileux de la vallée du Sénégal.

Les cultivateurs utilisent souvent des mélanges de variétés afin de parer aux nombreux risques de la culture de décrue : date, durée, importance de la crue, précocité et force de l'harmattan, prédateurs, ....

Les variétés des groupes durra, nigericum, caudatum surtout, sont bien spécialisées. Mais certaines sont mixtes. C'est le cas, par exemple, des populations "fella" du Sénégal, très tardives, qui sont cultivables indifféremment en saison humide ou en saison sèche, ou encore à cheval sur la fin de la première et le début de la seconde. C'est le cas aussi pour certaines variétés du groupe cernuum dans la zone lacustre d'épandage du Niger au Mali, ces variétés pouvant en outre être cultivées à cheval sur la fin de la saison sèche et le début de la saison humide dans la boucle sahélienne du Niger et au-delà. La crue très tardive ne s'en retire en effet qu'en mars/avril. Le cycle de ces cultures se déroule alors essentiellement en jours de plus de 12 heures.

Parmi les variétés très spécialisées au contraire, on peut citer celles de décrue normale de rivière (goulbi) au Niger et les variétés très hâtives, du groupe caudatum, des berbérés de sable de la cuvette tchadienne.

Ainsi, compte tenu de toutes les possibilités qu'offrent le climat, l'hydrographie et les variétés, les sorghos sont susceptibles de couvrir la totalité du cycle annuel, ce qui suppose une diversification et une plasticité assez rares.

2.2. Sorghos de saison pluvieuse. Appelés aussi "sorghos d'hivernage", ils ont à s'adapter à des conditions écologiques tout aussi variées que dans le cas des sorghos de décrue. Ils profitent toujours de sols finement texturés. Mais au Niger, par exemple, où ils sont le plus souvent cultivés en vallées et bas-fonds humides très argileux, certaines variétés de cycle très court sont adaptées aux sols sableux dunaires. Ici aussi, d'ailleurs, la spécialisation peut être mixte.

L'aire de culture s'étend du 7°N (limite sud du Tchad) au 16° de latitude (limite nord du Sénégal). Elle couvre des pluviosités de 1500 à 400 mm, sous des photopériodes maximale de 12<sup>h</sup>35 à 13<sup>h</sup>05 et minimale de 11<sup>h</sup>40 à 11<sup>h</sup>10, et sous des températures extrêmes dont l'amplitude va croissant du Sud au Nord.

En général la longueur du cycle, critère essentiel d'adaptation, décroît du Nord au Sud parallèlement à la durée de la saison humide qui est le facteur climatique déterminant du rendement : il s'agit dans ce cas de sorghos dits tardifs, semi-tardifs, semi-hâtifs, à réaction photopériodique marquée. Dans les régions septentrionales on ne cultive guère, sauf culture de décrue, que des variétés hâtives. Celles-ci se retrouvent généralement aussi dans les régions méridionales, en cultures de case et comme production de soudure. Leur cycle court, peu variable avec les conditions photopériodiques, permet leur culture à tout moment de la saison humide.

En regroupant les données de la bibliographie relative aux variétés de sorgho, on peut composer un tableau (Tableau CS. 1) approximatif des longueurs de cycle (précocité) dans les divers groupes ou espèces de Sorghos à grains, en définissant assez arbitrairement des classes de durée du cycle. Celle-ci n'est d'ailleurs vraisemblablement pas la durée de cycle optimale (qui semble ne pas avoir été jusqu'ici rationnellement étudiée), mais la durée de végétation le plus fréquemment observée dans la pratique.

	Hâtif	1/2 Hâtif	1/2 Tardif	Tardif	Très tardif
Nombre de jours	80-110	110-130	130-150	150-180	plus de 180
caudatum	+	+	+	+	+
guineense	+	+	+	+	
margaritifерum		+	+	+	
gambicum		+	+	+	
notabile			+	+	
elegans				+	
membranaceum				+	
exsertum				+	
cernuum					+

Tableau CS.1 Sorghos. Longueurs de cycle.

Ce classement suivant la longueur de cycle ne doit évidemment être considéré que comme provisoire : outre ses lacunes possibles, il demande en effet à être revu et corrigé en considération de la longueur de cycle optimale, à estimer dans les collections et essais suivant la méthodologie proposée ci-après.

### 3. Ajustement aux Conditions Climatiques.

3.1. Régime Héliothermique. En toute rigueur, ce n'est pas en termes de "nombre de jours" mais de "somme des températures" qu'il est le plus rationnel d'exprimer la durée du cycle. Plusieurs auteurs (30, principalement) ont depuis longtemps reconnu l'existence d'une relation entre températures accumulées et vitesse de déroulement de telle phase du cycle de développement des sorghos, sans pourtant que la question ait jamais été claire. Or, sur la base du principe, énoncé au chapitre "Complexe Héliothermique", d'une relation entre somme des températures et nombre de noeuds (ou d'entre noeuds, ou de feuilles), il est possible d'établir la forme de cette relation et d'en dégager quelque peu la signification.

Ce progrès a été rendu possible par la publication dans *Agronomie Tropicale* (2), par P. Bezot, représentant de l'I.R.A.T. au Tchad, d'une série de données phénologiques d'une extrême qualité. Ces données ont été recueillies par leur auteur, au Centre d'Amélioration des Cultures Vivrières de Deli (8°5 N, 15°5 E), en vue d'étudier le comportement de diverses variétés de sorghos en fonction de la date du semis, dans le but de faire coïncider ultérieurement, dans un programme d'hybridations, les époques de floraison de types de précocités différentes. Ces variétés sont les suivantes, d'après un tableau de l'auteur :

	Semis	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars
528 hâtif	- Nb. jours semis- épiaison	69	71	64	60	58	54	53	(59)	67	96	92	71
	- Date épiaison	7/6	10/7	2/8	29/8	26/9	23/10	22/11	28/12	5/2	5/4	2/5	10/5
	- M T	2020	1960	1695	1530	1455	1395	1445	1580	1700	2685	2710	2105
	- M T M	2425	2340	2010	1800	1705	1660	1765	2050	2350	3565	3445	2380
	- M T M	1615	1580	1380	1260	1205	1130	1125	1110	1050	1805	1975	1860
	- Durée moyenne du jour	12.43	12.54	12.59	12.48	12.30	12.09	11.86	11.70	11.68	11.90	12.08	12.23
	- Nb. d'entre-nœuds	9.5	8.6	9.0	7.2	5.6	5.5	5.8	-	-	9.9	10.5	11.6
	- Nb. feuilles fonction.	6.6	6.2	6.2	4.6	2.5	2.0	1.8	3.0	-	5.1	4.9	5.8
	- Surf. foliaire moyenne	324	336	348	284	244	166	155	96	-	224	377	327
	9 variétés tardives	- Nb. jours semis- épiaison	189	163	136	110	92	78	82	94			
- Date épiaison		5/10	10/10	13/10	18/10	30/10	16/11	21/12	1/2				
- M T		5095	4295	3515	2815	2355	2070	2205	2455				
- M T M		6055	5085	4150	3220	2790	2485	2780	3285				
- M T M		4140	3505	2875	2305	1925	1645	1635	1630				
- Durée moyenne du jour		12.42	12.42	12.39	12.31	12.17	12.00	11.80	11.69				
- Nb. d'entre-nœuds		25.1	21.3	18.0	14.5	10.6	8.2	7.6	6.5				
- Nb. feuilles fonction.		8.0	6.4	4.9	4.1	3.3	-	3.2	4.0	-	4.9	5.8	
- Surf. foliaire moyenne		475	400	350	345	270	-	145	105	-			
- Nb. de grains		915	840	680	385	60							
956 tardif	- Nb. jours semis- épiaison	191	161	131	108	84	67	(68)	77	(93)	113		
	- Date épiaison	7/10	8/10	8/10	16/10	22/10	5/11	7/12	15/1	3/3	22/4		
	- M T	5145	4240	3380	2770	2135	1755	1850	2015	2460	3195		
	- M T M	6115	5020	3990	3150	2525	2100	2300	2665	3350	4190		
	- M T M	4180	3465	2770	2265	1750	1415	1400	1360	1570	2200		
	- Durée moyenne du jour	12.42	12.42	12.40	12.31	12.19	12.04	11.63	11.69	11.95	12.38		
- Surf. foliaire moyenne	460	415	310	-	-	-	110	80	-	255	320		

Tableau CS.2 Sorghos. Caractéristiques phénologiques.

<u>Numéro catalogue</u>	<u>Espèce botanique</u>	<u>Précocité</u>
528	caudatum	hâtive
739	"	tardive
1027	"	1/2 tardive
956	guineense	1/2 tardive
989	notabile	1/2 tardive
844	elegans	tardive
1372	"	tardive
1495	membranaceum	tardive
1104	memb-elegans	tardive
1110	mellitum	tardive

Les semis avaient été effectués tous les 10 jours, sur une année entière d'avril 1962 à mars 1963. Mais seules ont été publiées les observations relatives aux semis du 30 de chaque mois. Ces observations, auxquelles on a joint les valeurs des sommes de températures et des photopériodes moyennes entre le semis et l'épiaison, sont réunies dans le tableau CS.2, pour la variété hâtive caudatum 528, les 9 variétés tardives prises en moyenne et la variété tardive guineense 956 considérée en particulier. Les quelques valeurs mises entre parenthèses ont été intrapolées sur les courbes, non représentées ici, figurant l'évolution de la date d'épiaison en fonction de celle du semis. Faute de disposer des températures journalières à Deli même, il a fallu utiliser celles du poste météorologique de Moundou, station synoptique située à la même latitude à une trentaine de kilomètres plus à l'Est.

### 3.1.1. Variétés tardives.

a) Les points A (pour Avril) à N (pour Novembre) de la figure CS.3 correspondent chacun à une date de semis des 9 variétés tardives dont les caractéristiques phénologiques moyennes sont inscrites dans le tableau CS.2. Ces points ont comme abscisses la somme des températures moyennes X et comme ordonnées la photopériode moyenne H pour la période allant du semis à l'épiaison.

Les points A à S définissent une courbe à saturation par rapport à laquelle les points O et N auraient une position aberrante. Par analogie avec des études antérieures (Geslin notamment, 11) cherchant à relier la somme des températures à la photopériode ou à la radiation globale, on a tout lieu de penser que cette courbe à saturation est une hyperbole. Les asymptotes étant manifestement parallèles aux axes de coordonnées, cette hyperbole devrait être de la forme :

$$\frac{1}{H} = a + \frac{b}{X}$$

Cependant l'ajustement aux points A à S de l'hyperbole calculée :

$$\frac{1}{H} = 0.1787 + \frac{8.128}{X} \quad \text{est tout à fait médiocre (Fig CS. 3).}$$

On considère alors la relation entre le nombre de noeuds (à l'épiaison) N en ordonnées et la somme des températures X en abscisses, pour les points A à N. Ces points ne se disposent pas sur une même courbe, mais très rigoureusement sur trois droites (Fig CS.4).

- droite N<sub>1</sub> pour les points A, M, J, J.
- droite N<sub>2</sub> pour les points J, A, S.
- droite N<sub>3</sub> pour les points S, O, N.

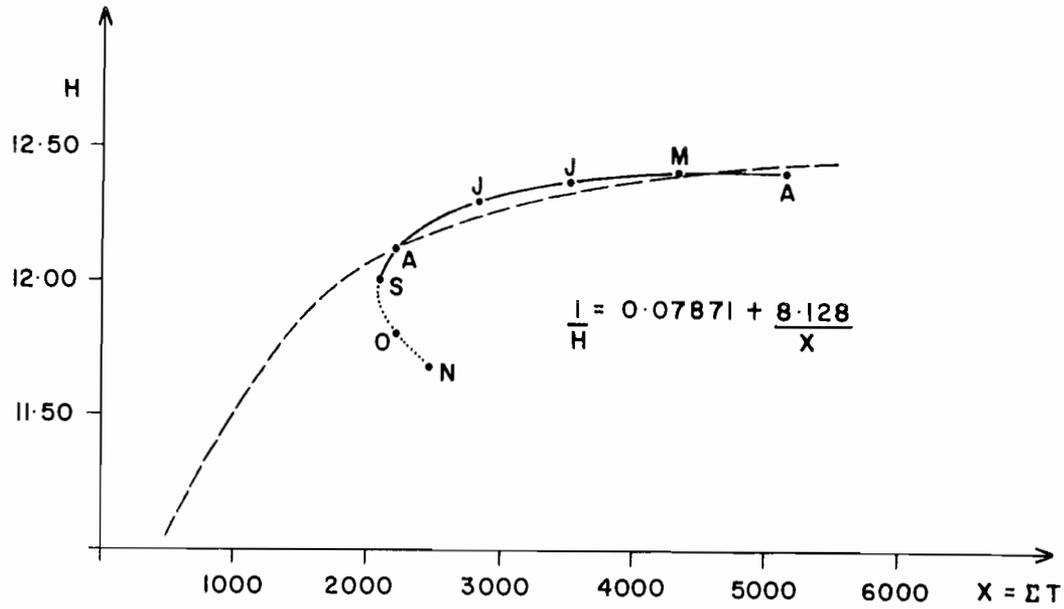


Fig CS.3  $H$  : photopériode moyenne

$X$  : somme des températures moyennes

L'ajustement des points A, M, J, J, A, S à une hyperbole (courbe en trait discontinu) est médiocre et ne saurait d'ailleurs concerner les points O et N.

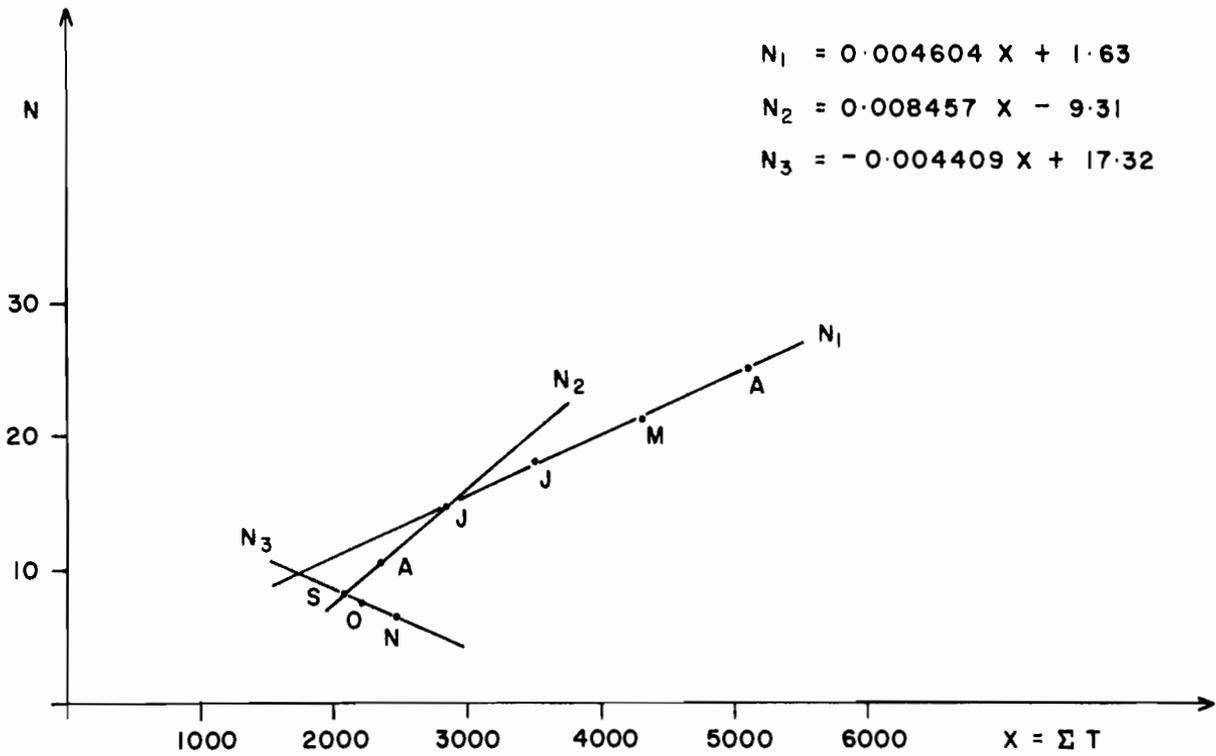


Fig CS.4       $X$  : somme des températures moyennes  
                   $N$  : nombre de noeuds  
Les points A à N s'ajustent par groupes à 3 droites  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ .  
La droite  $N_3$  a une pente négative.

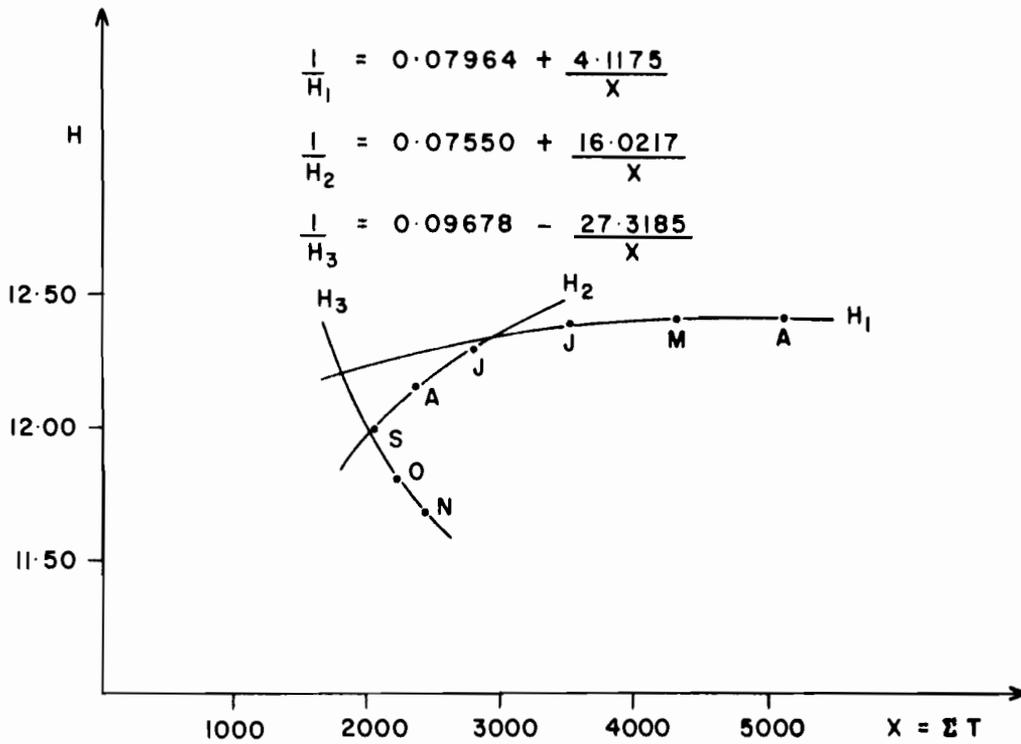


Fig CS.5

*X* : somme des températures moyennes

*H* : photopériode moyenne

Les points, groupés comme sur les droites  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ , s'ajustent à 3 hyperboles  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ .

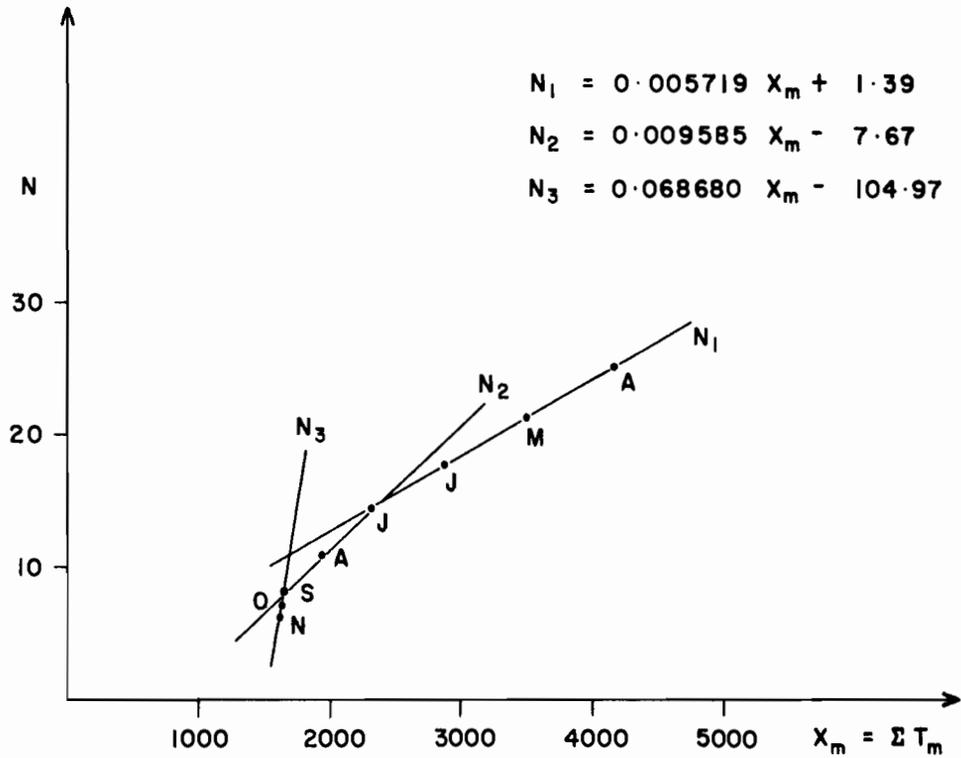


Fig CS.6 .  $X_m$  : somme des températures minimales  
 $N$  : nombre de noeuds

Si on substitue, à la somme des températures moyennes, celle des températures minimales, la droite  $N_3$  prend une pente positive, proche de celle de la verticale,

On regroupe alors les points de la figure CS.3 comme ils le sont sur ces trois droites, afin de définir trois hyperboles  $H_1, H_2, H_3$  (Fig CS.5) correspondant chacune à une des trois droites.

Dans cette représentation la position des points O et N ne paraît plus aberrante, mais surtout on constate que, sur chaque hyperbole, les points ont pour caractéristique commune de correspondre à des semis qui se sont développés dans des conditions de photopériode comparables (les points communs à deux hyperboles faisant la transition), soit :

- photopériodes de plus de 12 heures, croissantes puis décroissantes, pour l'hyperbole  $H_1$ . Ce sont les conditions de la culture normale de saison humide.

- photopériodes de plus de 12 heures décroissantes, puis de moins de 12 heures décroissantes pour l'hyperbole  $H_2$ . Ce sont les conditions de la culture à cheval sur la fin de la saison humide et le début de la saison sèche.

- photopériodes de moins de 12 heures, décroissantes puis croissantes, pour l'hyperbole  $H_3$ . Ce sont les conditions de la culture normale de saison sèche (culture de décrue).

De ces résultats on peut déjà tirer les conclusions suivantes :

- A condition de considérer les phénomènes dans des limites de photopériode comparables, la photopériode moyenne  $H$  et la somme des températures moyennes  $X$ , à l'épiaison, sont liées par une fonction hyperbolique dont les coefficients sont vraisemblablement caractéristiques de la variété. Cette hyperbole est du type :

$$\frac{1}{H} = a + \frac{b}{X} \quad (1)$$

- La relation entre le nombre de noeuds  $N$  du chaume à l'épiaison (nombre définitif) et la somme des températures moyennes  $X$  à ce même instant est une droite dont les coefficients dépendent, pour une variété donnée, des caractéristiques de la photopériode moyenne durant la phase végétative :

$$N = c + dX \quad (2)$$

b) Cependant, la pente négative de la droite  $N_3$  (Fig CS.3) paraît un non-sens : le nombre de noeuds formés ne peut être d'autant plus grand que la somme des températures est plus faible.

Substituons alors, dans les équations des droites  $N_1, N_2, N_3$ , la somme  $X_m$  des températures minimales à la somme  $X$  des températures moyennes. On constate que la droite  $N_3$  prend une pente positive, qui cesse donc d'être aberrante (Fig CS.6).

Si on substitue de même  $X_m$  à  $X$  dans les équations des hyperboles  $H_1, H_2, H_3$ , l'hyperbole  $H_3$  tend vers une droite pratiquement verticale, ce qui signifie que, dans les limites des photopériodes concernées, la somme des températures minimales à l'épiaison est constante, quelle que soit la date du semis.

Or il s'agit de l'époque de l'année (septembre à mars) où les photopériodes, inférieures à 12 heures, sont toujours inductives pour les variétés en cause. L'initiation de la floraison ne dépend plus alors que de la somme des températures et, en l'occurrence, de la somme des températures minimales ou, plus vraisemblablement, de la somme des températures nocturnes qui lui est proportionnelle. La température minimale est utilisée ici comme une expression commode de la température nocturne.

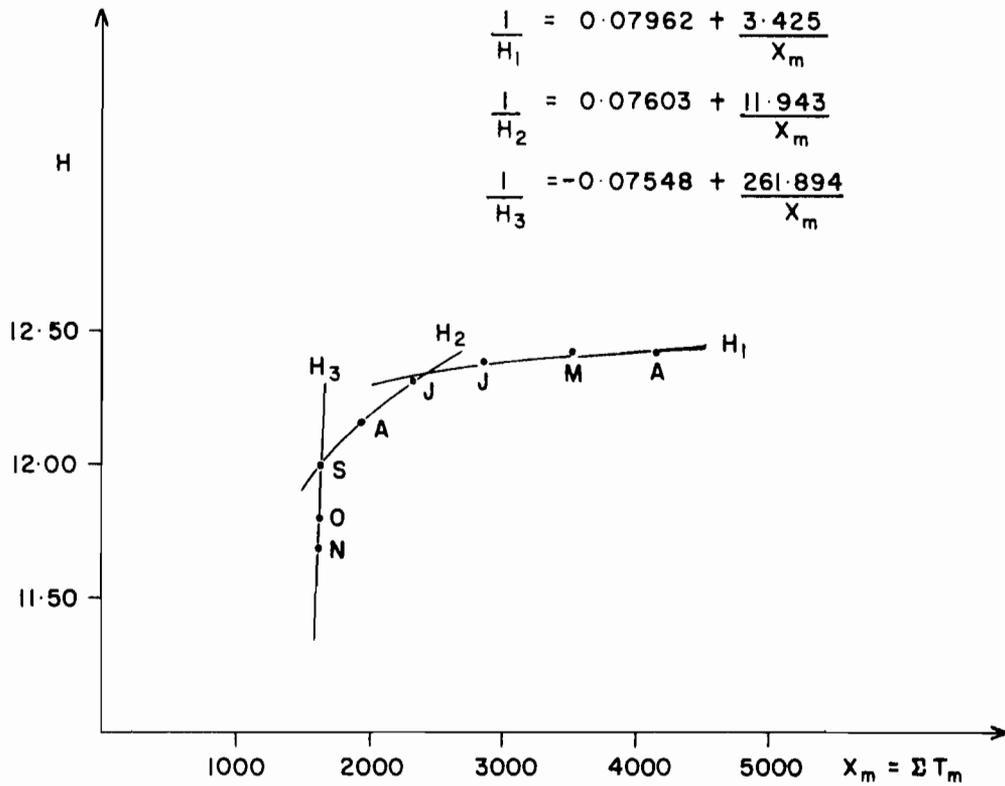


Fig CS.7

$X_m$  : somme des températures minimales  
 $H$  : photopériode moyenne

Si on substitue, à la somme des températures moyennes, celle des températures minimales, l'hyperbole  $H_3$  tend vers une droite proche de la verticale.

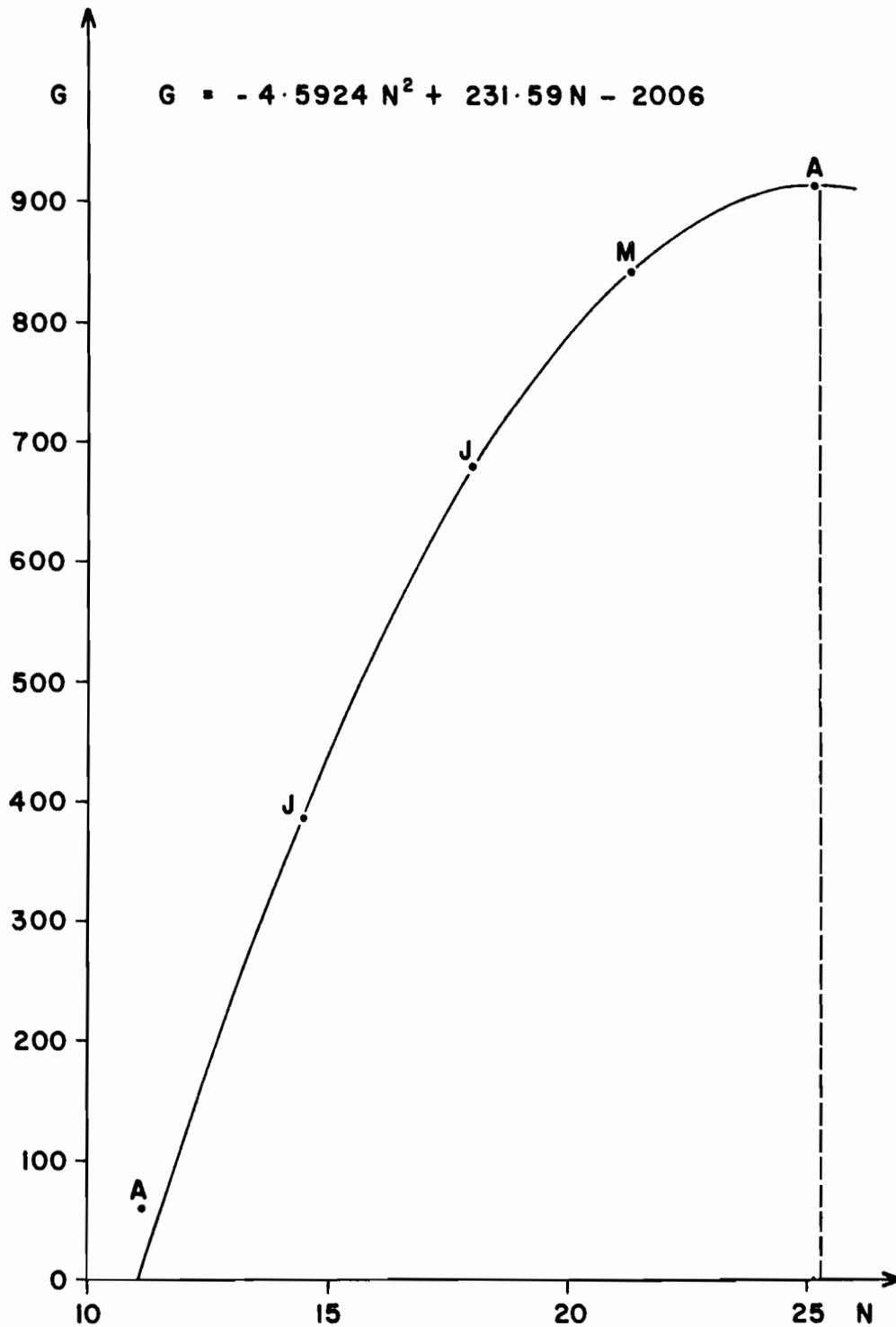


Fig CS.8

*N* : nombre de noeuds

*G* : nombre de grains d'une panicule

Le nombre de grains, expression de la productivité, en termes de développement, s'ajuste étroitement, suivant une parabole à maximum, au nombre de noeuds.

Ce rôle déterminant de la température minimale (ou nocturne) pourrait tenir à ce que, chez les plantes de jour court, le nombre de cycles "jour court-nuit longue" nécessaire pour initier la floraison, en photopériode inductive, est d'autant plus grand que la température de la phase obscure est plus basse. Ceci peut se traduire par l'équation :

$$(\text{Nombre de jours}) \times (\text{Température minimale moyenne}) = \text{Constante}$$

Or si, pour les semis de septembre (S), octobre (O) et novembre (N), on multiplie le nombre de jours écoulé entre le semis et l'épiaison par la température minimale moyenne durant cette période de végétation, on obtient bien une somme de température constante, de 1640° environ :

- semis 30/8 - épiaison 16/11 : 78 x 21°09 - 1645°
- semis 30/9 - épiaison 21/12 : 82 x 19°94 - 1640°
- semis 30/10 - épiaison 1/2 : 94 x 17°34 - 1630°

Ainsi, dans le cas du sorgho, et peut-être dans celui des plantes de jour court en général, c'est la somme des températures nocturnes qu'il faut considérer et non celle des températures moyennes. Les températures nocturnes ont d'ailleurs diverses significations physiologiques alors que les températures moyennes n'en ont pas réellement. Cette observation est très importante pour les cultures de saison sèche, car alors la somme des températures minimales n'est plus, comme en saison humide, proportionnelle à la somme des températures moyennes.

c) A condition de se placer dans des conditions comparables de photopériode, le nombre de noeuds de la tige apparait comme un critère de développement en rapport étroit avec la somme des températures, comme l'établit la relation (2).

Si d'autre part il était possible de relier mathématiquement ce nombre de noeuds à une expression de la productivité, cette dernière pourrait être rapportée directement à la somme des températures. Or si on porte en abscisse le nombre N de noeuds à l'épiaison et en ordonnée le nombre G de grains de la panicule, on peut ajuster de façon presque parfaite à ces points observés une parabole à maximum :

$$G = fN^2 + gN + h$$

De cette parabole, on peut tirer :

- le nombre optimal de noeuds que peut atteindre une variété dans des conditions de photopériode déterminées : ici 25.2 (25.1 valeur observée pour le semis du 30/3 qui est donc la date de semis optimale, compte non tenu des conditions hydriques).

- le nombre de grains maximal de la panicule correspondant à ce nombre de noeuds : ici 914 (915 observés pour le même semis du 30/3).

le nombre minimal de noeuds que doit atteindre une variété pour commencer à produire, pour des conditions déterminées tout au moins : ici 11 environ (60 grains observés pour 10.6 noeuds au semis du 30/7).

On peut comprendre encore, à considérer cette courbe à maximum\*, qu'au delà d'un certain nombre de noeuds (23 ou 24 ici), il n'y aura pas d'augmentation sensible de la productivité, ce qui exclut l'intérêt d'un semis plus précoce.

---

\* On verra plus loin que cette parabole à maximum dans le cas du Sorgho, plante à floraison déterminée ou terminale, devient une parabole à minimum dans le cas du Cotonnier, plante à floraison indéterminée ou axillaire.

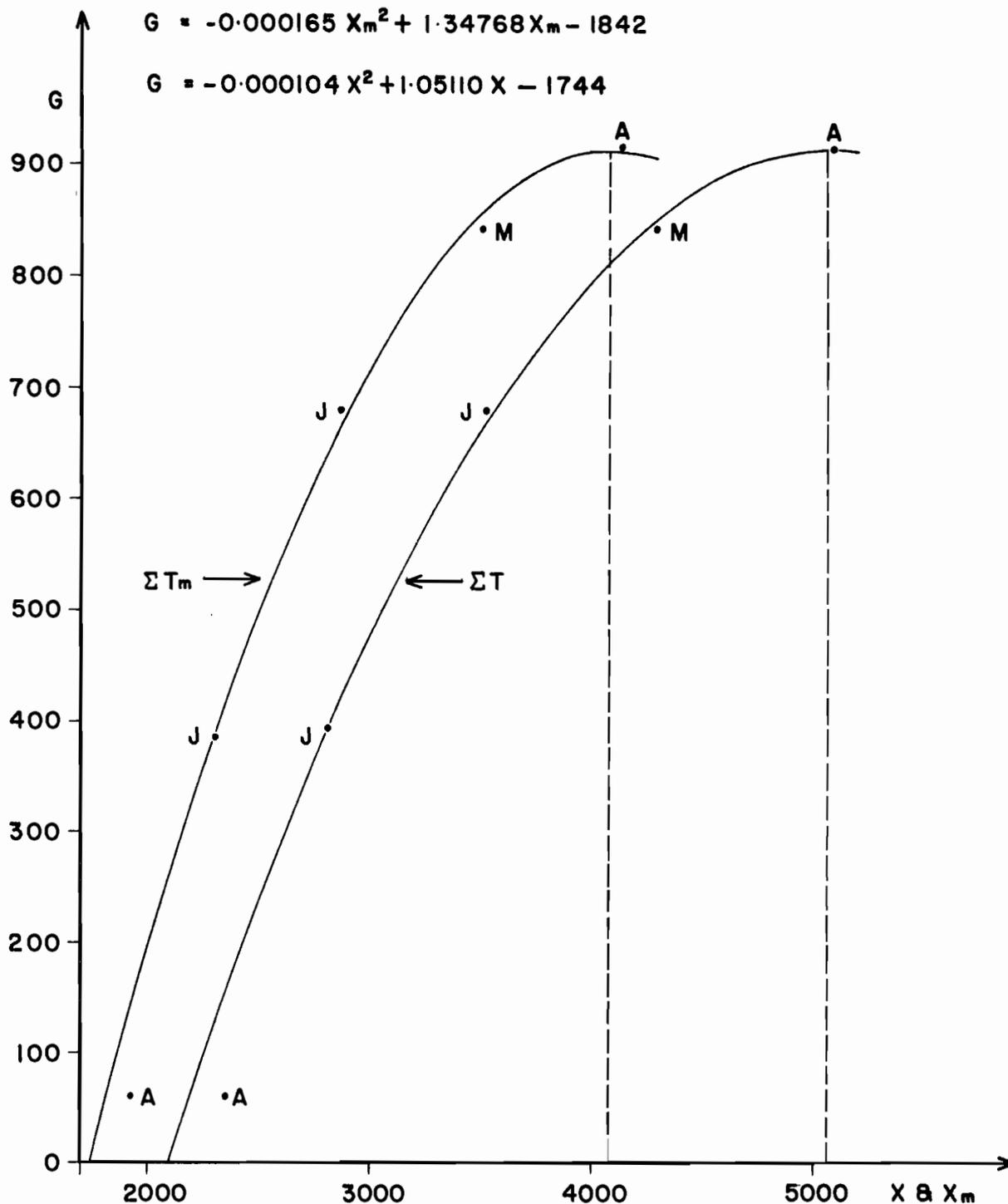


Fig CS.9

$X_m$  : somme des températures minimales

$X$  : somme des températures moyennes

$G$  : nombre de grains d'une panicule

Le nombre de grains, expression de la productivité, en termes de développement, s'ajuste étroitement, suivant une parabole à maximum, à la somme des températures moyennes ou minimales.

Il est enfin possible de déterminer la somme optimale des températures (critère de longueur de cycle évoqué plus haut) caractéristique d'une variété dans des conditions de photopériode déterminées (à une latitude donnée). Si en effet on porte dans (3) l'expression de N dans (2), on obtient une parabole théorique :

$$G = fd^2X^2 + d(2cf + g)X + fc^2 + gc + h \quad (4)$$

De cette parabole on tirera la valeur de X pour G maximum : ce sera la somme optimale des températures.

En ajustant d'ailleurs directement, aux nombres de grains observés G, une parabole en  $X_m$  (somme des températures minimales) ou, ce qui revient au même en saison pluvieuse, une parabole en X (somme des températures moyennes), on peut constater que cet ajustement est presque parfait, sauf pour le semis d'août (point A en bas) qui s'est développé sous des photopériodes de caractéristiques différentes.

Le maximum de grains (910 et 912 respectivement) est atteint pour une somme des températures minimales de 4085° (parabole en  $X_m$ ) et pour une somme des températures moyennes de 5055° (parabole en X). Chacune de ces sommes représente la somme optimale des températures recherchée.

3.1.2. Variétés hâtives. Un spécimen de variété "hâtive" est le numéro 528 dont les caractéristiques phénologiques sont données dans le tableau CS.2. Cette variété n'est pas, comme on aurait pu s'y attendre, à réaction photopériodique nulle. En effet, la durée de son cycle à l'épiaison, exprimée en nombre de jours et en somme des températures, varie au cours de l'année de 53 jours et 1050° à 96 jours et 1975° de températures minimales (ou de 1455° à 2710° de températures moyennes).

D'autre part, comme pour les variétés tardives vues précédemment, la somme des températures minimales à l'épiaison est constante pour les cultures ayant évolué sous photopériodes inférieures à 12 heures :

<u>Semis</u>	<u>Epiaison</u>	<u>Nb. de jours</u>	<u>Somme des températures</u>	
			<u>minimales</u>	<u>moyennes</u>
- 30/8	23/10	54	1130°	1655°
- 30/9	22/11	53	1125°	1765°
- 30/10	28/12	59	1110°	2055°
- 30/11	5/2	67	1055°	2350°

La question est de savoir s'il existe des variétés réellement neutres photopériodiquement, c'est à dire ayant une durée de cycle, exprimée en somme des températures minimales, constante au cours de l'année. Les variétés naines américaines sont réputées non photopériodiques, ce qui permet d'ailleurs de les cultiver en jours longs. Mais Bezot (1) donne pour trois d'entre elles : Combine Kafir 60, Martin, Redlan, des caractéristiques phénologiques qui permettent d'établir le tableau suivant, en moyenne pour les trois variétés :

<u>Semis</u>	<u>Epiaison</u>	<u>Nb. de jours</u>	<u>Somme des températures</u>	
			<u>minimales</u>	<u>moyennes</u>
- 21/9	9/11	49	1030°	1300°
- 6/10	22/11	47	1010°	1300°
- 22/10	13/12	52	1030°	1415°
- 6/11	1/1	56	1015°	1490°

Dans ce cas encore, on constate la constance de la somme des températures minimales. Mais il s'agit toujours des mois durant lesquels les photopériodes sont inférieures à 12 heures et donc inductives dès le stade de germination. Il faudrait, pour se faire une opinion, posséder des données phénologiques pour les mois de la saison humide.

Etant donné l'importance que pourraient prendre ces variétés dites hâtives, parfois naines, locales ou importées, tant comme producteurs directs que comme géniteurs, leur étude physio-climatique devrait être encouragée. Il importe donc avant tout de recueillir sur elles les données phénologiques indispensables.

3.2. Régime Hydrique. On connaît maintenant la longueur de cycle optimale d'une variété en termes de somme des températures à une latitude donnée. Il reste à examiner comment son cycle s'ajuste aux événements remarquables de la saison humide tels que déterminés au chapitre "Bilan Hydrique".

Une variété photopériodique épiera sensiblement toujours à la même date, quelle que soit celle du semis, à condition toutefois de ne pas dépasser une certaine limite après laquelle un semis n'a plus de sens, le 15-20/6 environ pour "guineense 956" par exemple (Tableau II) :

- <u>semis</u> :	30/3	- <u>épiaison</u> :	7/10
	30/4		8/10
	30/5		8/10
	30/6		16/10

ou bien la date d'épiaison pourra être retardée de quelques jours pour des semis de mois en mois plus tardifs, comme dans le cas de "elegans 844b" :

- <u>semis</u> :	30/3	- <u>épiaison</u> :	14/10
	30/4		15/10
	30/5		19/10
	30/6		20/10

Mais, de toute façon, pour un écart de 3 mois dans les dates de semis, ce qui représente une bonne marge de manoeuvre, l'écart à l'épiaison ne sera guère supérieur à une semaine, ce qui est de peu d'importance pour des variétés tardives en régions où la saison de culture est longue.

Cependant il faut aussi compter, comme on le montrera pour les Mils, avec les positions relatives de la date d'épiaison et de la fin de la période humide qu'on a défini dans cette étude, au chapitre "Bilan Hydrique", comme le moment où la pluviosité redevient, en moyenne ou pour tout niveau de probabilité désirable, inférieure à l'évapotranspiration potentielle.

La première opération consistera donc (Fig CS.10) à comparer la date d'épiaison E au moment B<sub>2</sub> qui situe la fin de la "période humide".

Si les positions relatives des points E et B<sub>2</sub> peuvent être considérées comme satisfaisantes, la somme optimale des températures caractéristique de la variété, comptée à rebours depuis la date d'épiaison E, indiquera la date de semis optimale compte non tenu du départ des pluies.

Les positions relatives de cette date théorique de semis S<sub>0</sub> (Fig CS.10) et du point A<sub>2</sub> fourniront un critère du degré d'adaptation de la variété à la durée de la saison humide. On rappelle ici la définition donnée au chapitre "Bilan Hydrique" du

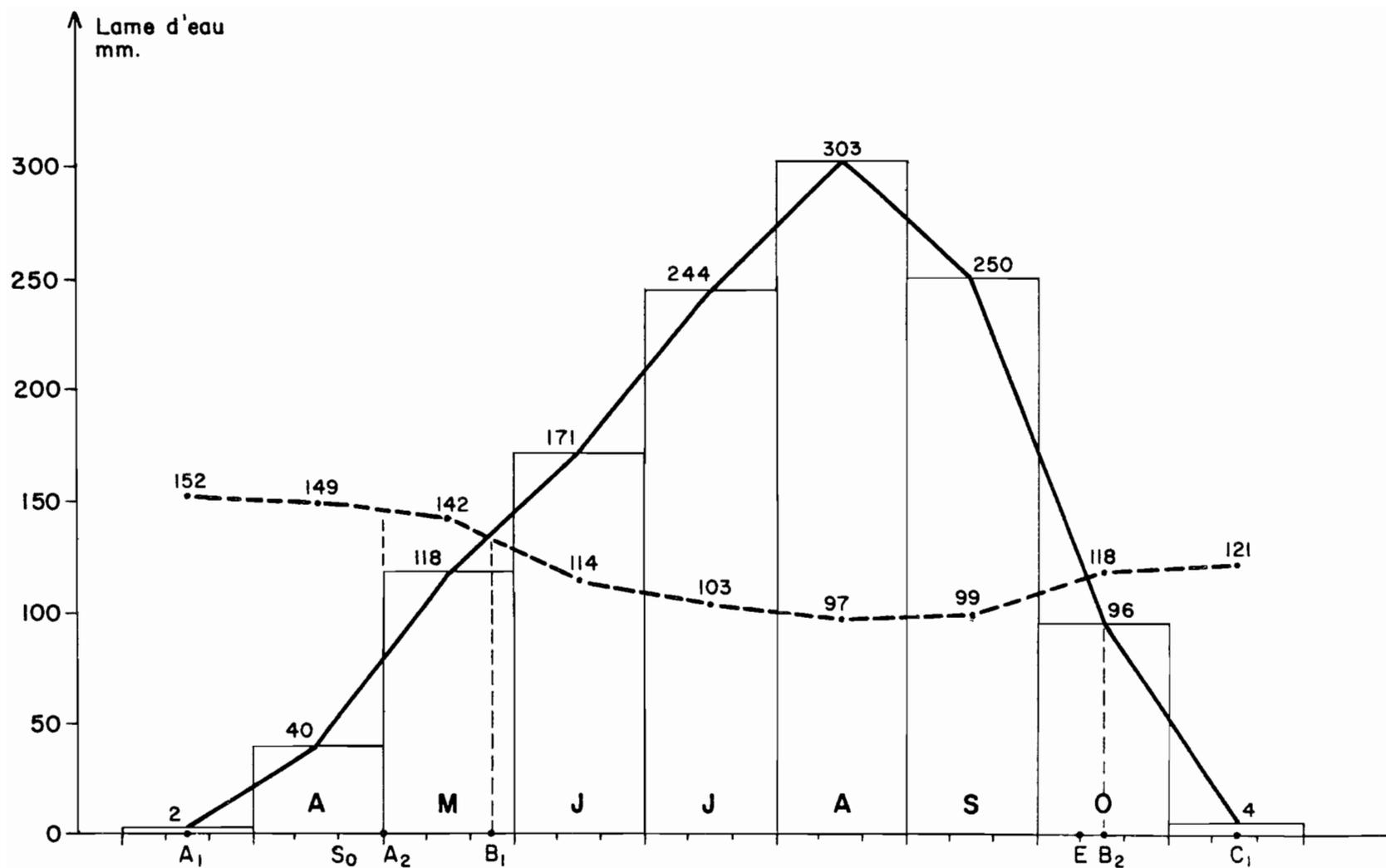


Fig CS.10. Diagrammes de pluviosité (trait continu) et d'évapotranspiration potentielle (trait discontinu) à Moundou (Tchad). A<sub>2</sub>-B<sub>1</sub>: "période intermédiaire". B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub>: "période humide". A<sub>2</sub>: date théorique de semis. E: date d'épiasion. S<sub>0</sub>: date optimale de semis d'une variété déterminée, relativement à sa date fixe (pour une variété photopériodique) d'épaison, comte tenu de la relation parabolique "productivité somme des températures", mais comte non tenu des conditions hydriques.

point A<sub>2</sub> : moment où la pluviosité, en période "préhumide" devient supérieure à la moitié de l'évapotranspiration potentielle, en moyenne ou pour tout autre niveau de probabilité.

Par exemple, à Moundou (8°5 N, 15°5 au Tchad) les points B<sub>2</sub> et A<sub>2</sub> (Fig OS.10) se situent respectivement au 15/10 et au 1/5 sensiblement. Si on considère que la date d'épiaison E doit coïncider, par exemple, avec celle du point B<sub>2</sub>, toute variété épiait entre le 10/10 et le 20/10 répondra bien à cette exigence. Cette estimation de la meilleure position relative des points E et B<sub>2</sub> pourra être établie à partir d'une série de rendements, dont on ne dispose malheureusement pas pour les sorghos, au contraire des mils pénicillaires, comme on le verra plus loin.

Il faudra ensuite confronter aux 3500° de températures minimales accumulées entre A<sub>2</sub> et B<sub>2</sub> la somme optimale des températures caractéristique de chacune des variétés retenues après le premier test. Ceci permettra de juger de leur adaptation à la durée de la saison humide et de déterminer leur date de semis la meilleure, compte tenu du risque lié aux aléas de pluviosité.

Il est possible désormais, sur ces bases, d'entreprendre une étude approfondie des variétés de sorgho quant à leurs caractéristiques de cycle et à leur adaptation aux conditions climatiques. L'indication de la précocité notamment devrait toujours préciser, non seulement la somme optimale de température à l'épiaison mais aussi la date même d'épiaison.

Bibliographie  
-----

- 1 - BEZOT P. - L'amélioration des cultures céréalières au Tchad.  
- Agron. Trop. 18(1), 1963.
- 2 - BEZOT P. - L'amélioration des Sorghos au Tchad. - Agron. Trop.  
18(10), 1963.
- 3 - BONO J.J., ARMY T.J., LEHMAN O.R. - Row spacing, plant populations  
and moisture supply as factors in dry-land grain Sorghum production.  
- Agron. Jour. 56(1), 1964.
- 4 - BONO M. - Des caractères dans la sélection des Sorghos et Mils  
Pennisetum. - Min. Fr. O.M., Bull. Agr. No.12, 1954
- 5 - BONO M., LECLERCQ P. - Méthodes d'amélioration variétale des Mils  
et Sorghos utilisées au C.R.A. de Bambey. - Agron. Trop. 18(1), 1963.
- 6 - BOUCHET P. - Les Mils et Sorghos dans la République du Mali.  
- Agron. Trop., 18(1), 1963.
- 7 - CHARREAU C., POULAIN J.F. - La fertilisation des Mils et Sorghos.  
- Agron. Trop. 18(1), 1963.
- 8 - COLEMAN O.H., BELCHER B.A. - Some responses of Sorgho to short  
photoperiods and variations in temperature. - Agron. Jour. 44(1),  
1952.
- 9 - CORRIOLS J. - Quelques observations sur la biologie florale du Mil  
et du Sorgho au Sénégal. - Min. F.O.M., Bull. Agr. No.6
- 10 - DIRECTION DE L'AGRICULTURE DU SENEGAL. - Situation actuelle de la  
production du Sorgho et du Mil au Sénégal. - Agron. Trop. 18(1) 1963
- 11 - GESLIN H. - Etude des lois de croissance d'une plante en fonction  
des facteurs du climat (température et radiation solaire). Contri-  
bution à l'étude du climat du blé. - Thèse, Paris, 1944.
- 12 - GLOVER J. - The apparent behaviour of Maize and Sorghum stomata  
during and after drought. - Jour. Agr. Sci. 53(3), 1959.
- 13 - INSTITUT DE RECHERCHE AGRONOMIQUE TROPICALE. - Rapports et comptes  
rendus d'activité des Stations de Bambey (Sénégal), M'Pesoba (Mali,  
Saria et Farako Ba (Haute Volta), Kolo et Maradi (Niger).
- 14 - INSTITUTE FOR AGRICULTURAL RESEARCH AND SPECIAL SERVICES. AHMADU BELLO  
UNIVERSITY, NORTHERN NIGERIA. - Reports to advisory board.

- 15 - KARPER R.E., QUINBY J.R., JONES D.L., DICKSON R.E. - Grain Sorghum date of planting and spacing experiments. - Texas Agr. Expt. Sta. Bull. 424, 1931.
- 16 - LE CONTE J. - Situation de la production et de l'expérimentation concernant Sorgho, Mil, Maïs. - IRAT 1961.
- 17 - LEONARD W.H., MARTIN J.H. - Cereal Crops. - McMillan Cy, N.Y.
- 18 - MARTIN J.H. - The comparative drought resistance of Sorghum and Corn. - Bureau of Plant Industry. USDA, Wash. D.C., 1930.
- 19 - MARTIN J.H. - Climate and Sorghum. - From Climate and Man, Yearbook of Agriculture, USDA, 1941.
- 20 - MARTIN J.H., SIEGLINGER J.B. - Spacing and date of seeding experiments with grain sorghums. - Kansas Agr. Expt. Sta., Bull. 11, 1929.
- 21 - MAXIMOV N.A. - The plant in relation to water. - Translated by R.H. YAPP, McMillan Cy, N.Y., 1929.
- 22 - NIQUEUX. - Les Sorghos d'hivernage au Tchad. Variétés, répartition, amélioration. - Riz et Rizic. et Cult. Vivr. Trop., 1959.
- 23 - PAINTER C.G., LEAMER R.W. - The effects of moisture, spacing, fertility and their interrelationships on grain Sorghum production. - Agron.Jour.
- 24 - QUINBY J.R., MARTIN J.H. - Sorghum improvement. - Advances in Agronomy, VI, 1954.
- 25 - ROBINSON R.G., BERNAT L.A., NELSON W.W., THOMPSON R.L., THOMPSON J.R. - Row spacing and plant population for grain Sorghum in the humid North. - Agron. Jour. 56(2), 1964.
- 26 - SERVICE DE L'AGRICULTURE DE HAUTE VOLTA. - Amélioration de la culture du Sorgho en Haute Volta. - Agron. Trop. 18(1), 1963.
- 27 - SIEGLINGER J.B. - Leaf number of Sorghum stalks. - Jour. Amer. Soc. Agron. 28(8), 1936.
- 28 - TOURTE R., NICOU R., BONLIEU A. - Quelques techniques de culture des Mils et Sorghos au Sénégal. Possibilités de la culture mécanique. - Agron. Trop. 18(1), 1963.
- 29 - VIGUIER P. - Les Sorghos et leur culture au Soudan Français. - Grande Imprimerie Africaine, Dakar, 1947.
- 30 - VINALL H.N., REED H.R. - Effect of temperature and other meteorological factors on growth of Sorghums. - Jour. Agr. Res. 18(2), 1918.

## Les Pénicillaires CP

### 1. Généralités.

Les Pénicillaires ou Mils (*Pennisetum typhoïdeum*) occupent, dans l'aire d'investigation, des surfaces d'importance variable mais en moyenne supérieure, relativement aux sorghos. Plus cultivés au Niger, par exemple, ils le sont moins en Haute Volta. Outre qu'ils sont généralement mieux appréciés dans l'alimentation, leur fréquence en moyenne plus grande tient essentiellement à des raisons d'ordre climatique plus ou moins interdépendantes :

- Meilleure résistance à la chaleur et à la sécheresse. Les besoins en eau d'une culture de pénicillaire, dans l'aire considérée, peuvent être évalués très approximativement à 450-500 mm en moyenne. Mais certaines variétés de cycle très court se contentent de beaucoup moins (dans certaines parties du désert occidental de l'Inde, certains mils seraient cultivés sous 150 mm seulement). D'autres, de cycle très long, exigent 600 à 700 mm. Ils peuvent dans tous les cas supporter des périodes sèches de 2 à 3 semaines, surtout en début de végétation.

- Exigences moindres à l'égard du sol, qu'ils tolèrent plus pauvre, mais surtout de texture bien plus grossière (donc à volume réduit d'eau disponible), allant du silico-argileux pour les plus longs cycles au dunaire parfaitement sableux pour les plus courts.

- Possibilités de plantation plus précoce, parce que le semis "en sec" leur réussit généralement bien, d'où une utilisation maximale de la durée de la saison pluvieuse quand le ressemis n'a pas été nécessaire. Ceci est au moins vrai pour les types de cycle court, comme les Souna du Sénégal qui se sèment, à la latitude de Bambey, en fin mai-début juin, généralement avant les pluies, tandis que les Sanio tardifs sont semés fin juin, comme le sorgho, quand les pluies sont établies.

- Epiaison parfois plus précoce que celle des sorghos, pour les variétés photopériodiques, ce qui situe mieux la floraison par rapport à la fin de la saison pluvieuse et favorise la maturation. Mais, de ce fait, la floraison est plus exposée aux précipitations qui déterminent la ooulure et favorisent le développement de maladies cryptogamiques (charbon principalement).

Pluviosité et nature du sol déterminent donc essentiellement la répartition des pénicillaires par rapport aux sorghos. En régions sahéliennes, au Niger par exemple, leur culture s'étend au-delà de l'isohyète 300 mm alors que celle des sorghos s'arrête pratiquement aux environs de 400 mm. La limite nord des pénicillaires y suivrait approximativement une ligne reliant Auderaboukane à N'Guigmi, en passant à 50 km au nord de Tahoua, ligne qui correspond grossièrement à l'isohyète 275. Le mil réussirait même, certaines années, à In Gall, quand les pluies, de 200 mm en moyenne, sont bien réparties en juillet-août (19). De façon générale, du Sud au Nord, le sorgho cède progressivement le terrain au mil moins exigeant en eau. La différence de rendement, à l'avantage du premier, serait due en partie au fait que les mils, plus rustiques, sont cultivés sur des sols plus pauvres et dans des aires plus sèches.

L'adaptation à la pluviosité ou à la longueur de la saison humide peut être favorisée par une adaptation aux sols allant dans le même sens. C'est généralement le cas

au Sénégal : le sorgho, qui domine nettement au sud de l'isohyète 1000, y est remplacé progressivement par le mil entre 1000 et 600 mm, en même temps que les sols légers (sols Dicors) deviennent plus fréquents. Il disparaît vers 400 mm, sauf culture de décrue, devant le pénicillaire en culture dunaire.

Au Mali au contraire, où la limite de dominance d'une espèce sur l'autre se situe entre 700 et 750 mm, lisière nord de la zone à Karité, les sols plus ou moins sableux issus des formations gréseuses l'emportent largement dans le Sud et le Centre. Au Nord par contre, ce sont les alluvions argileuses du fleuve Niger qui constituent la majorité des surfaces (7). Mais fréquemment, comme au Niger, mil et sorgho sont cultivés côte à côte sur les mêmes sols, et même en association : mil court-cycle en production de soudure semé en même temps que sorgho long-cycle; ou mil et sorgho long-cycle semés simultanément; ou encore mil semé l'année après sorgho dans les repousses de ce dernier.

## 2. Distribution.

Dans l'aire de culture des mils, la répartition variétale se fait essentiellement sur le critère de longueur du cycle. Peut-être parce que les pénicillaires, du fait de leur appartenance à une seule espèce, ne sont pas aussi différenciés, l'amplitude de durée du cycle, du plus court au plus long, semble moindre que chez les sorghos : 80 à 200 jours contre 80 à plus de 250. Cependant on signale (19) au Niger des sortes de moins de 80 jours : 65 à 70 dans l'Ouest pour une variété de soudure : 70 à 75 au nord de Zinder, 60 vers N'Guigmi pour une variété qui se satisfait de 220 mm bien répartis.

Dans la littérature, les données sur les réactions photopériodiques sont extrêmement rares, mais il semble qu'il existe, comme chez les sorghos, 2 grands groupes : d'une part un ensemble, assez peu diversifié, de variétés hâtives (Souna du Sénégal), à réaction photopériodique faible ou nulle, à cycle total de 80 à 100 jours; d'autre part des populations plus ou moins tardives, de 100 à 200 jours, à réaction photopériodique bien marquée et telle que ces variétés, sous une latitude donnée, épieint sensiblement toujours à la même date : le 20/9 à Bambey pour les Sanio. Les Souna et les Sanio du Sénégal différeraient, dans leur réaction photopériodique, par un seul gène à 2 allèles, sans dominance pour les uns, avec dominance du facteur "cycle court non photopériodique" pour les autres.

La situation culturale des pénicillaires est ainsi assez étroitement équivalente à celle des sorghos : les populations à cycle court sont cultivées en régions moyennes et méridionales comme production de soudure, à rendement faible mais précoce, et dans les régions septentrionales comme culture principale du fait de la faible durée de la saison humide. Les populations photopériodiques à cycle plus ou moins long se rencontrent comme culture principale dans les régions à saison culturale plus durable.

Dans ce parallèle entre mils et sorghos, il faut encore signaler que les premiers, et surtout ceux à cycle long, tallent beaucoup plus que les derniers. Cette caractéristique a ses avantages ou ses inconvénients, suivant les circonstances (problèmes de la densité de plantation et de la population à l'unité de surface, par rapport aux facteurs du milieu).

Enfin la culture de décrue des sorghos n'a pas d'équivalent chez les mils, quoiqu'on puisse rapporter qu'au Sénégal, dans la vallée du fleuve, des mils sont cultivés jusqu'en décembre, avec 300 à 400 mm de pluie, sur les sols "dieri", de nature argilo-siliceuse, plus ou moins visités par l'inondation suivant l'année. D'autre part, à la station agronomique de Kolo dans l'Ouest du Niger, des Pennisetum ont été cultivés sous irrigation, à contre-saison, avec des rendements de 1700 à 2500 K/ha. Si donc on ne peut pas cultiver les mils en décrue, comme les sorghos, peut-être simplement du fait de leur inadaptation aux terrains mal drainés, il n'est pas exclu que certaines variétés puissent être cultivées en saison sèche à l'irrigation.

### 3. Ajustement aux Conditions Climatiques.

3.1. Régime Héliothermique. Le parallélisme étroit des deux plantes en matière de réaction photopériodique permet de croire, en l'absence de données phénologiques analysables, que le comportement des mils en fonction de la somme des températures et de la longueur du jour est identique à celui des sorghos. La méthodologie déjà proposée pour étudier les caractéristiques d'adaptation de ceux-ci aux facteurs du complexe héliothermique devrait donc s'appliquer assez strictement aux mils.

3.2. Régime Hydrique. A la différence des sorghos, on ne dispose pas pour les mils de données phénologiques. Par contre la littérature fournit, à leur sujet, une série de données de rendement, qui manquait aux sorghos pour tester leurs exigences hydriques. Ce qui sera déduit, concernant les mils, de cette série, pourra s'appliquer en retour aux sorghos, à des modifications de détail près. La méthodologie restera de toute façon la même.

a) La série va de 1950 à 1960 et représente "les rendements annuels moyens de l'ensemble des populations complexes des essais comparatifs au CRA de Bambey" (25). Elle est sans doute un peu courte mais sa finesse permet de l'utiliser, surtout dans l'objectif de traiter un exemple concret. On doit d'ailleurs pouvoir y ajouter maintenant les rendements de 1961 à 1965, ce qui ferait 16 années au total.

Cette même série a déjà été exploitée par Vidal (25), dans un esprit assez différent, pour déterminer l'importance respective des alimentations hydrique et azotée lors des phases successives du développement et de la croissance d'une culture de mil. Son analyse prend essentiellement en considération les événements phénologiques de cette culture. Elle s'appuie sur une description détaillée du développement de la variété Sanio 165. Cette description doit d'ailleurs être donnée en exemple car elle est précise, et la littérature n'en contient pas d'autre, ni pour les mils ni pour les sorghos.

Cependant, si l'analyse de Vidal répond parfaitement à son objectif, il ne satisfait pas entièrement le nôtre qui impose de ne considérer finalement que les événements climatiques remarquables au cours de la saison de culture.

Comme on l'a en effet exposé dans la conclusion du chapitre "Bilan Hydrique", les méthodes qui consistent à découper la saison humide à la fois d'après ses événements phénologiques et d'après ses événements climatiques (découpage phéno-climatique) ont pour principal intérêt de permettre un test de la validité des procédés de séparation, dans la fluctuation globale du rendement, de la part à attribuer aux seuls facteurs climatiques. Mais les corrélations avec le rendement ne seront pas extrapolables à d'autres conditions climatiques pour lesquelles les événements phénologiques d'une même variété auront des valeurs différentes.

Pour estimer dans quelle mesure la fluctuation du rendement à analyser peut être attribuée à la fluctuation climatique, la méthode proposée par Vidal est intéressante : elle conduit à un coefficient de corrélation  $r$  égal à 0.93, entre données (non corrigées) de rendement et indice climatique (somme de 8 indices particuliers aux diverses phases phénologiques de la culture). La fluctuation de cet indice prend ainsi en compte 86% ( $r^2 = 0.86$ ) de la fluctuation non corrigée. En corrigeant les rendements comme on le verra à propos de cotonnier, il n'est pas impossible que la corrélation eût été encore meilleure, car il y a une légère pente moyenne positive, de 1950 à 1960 (Fig CP. 3.), qui laisse penser qu'une amélioration plus ou moins continue des méthodes culturales et/ou des variétés a contribué à relever quelque peu le rendement moyen.

Il serait d'autre part intéressant de rassembler dans une même équation de régression multiple les 8 variables indépendantes auxquelles correspondent les 8 indices de Vidal, pour juger dans quelle mesure le coefficient de corrélation multiple  $R$  se rap-

	Rendement K/ha	Pluie mm	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>
1950	670	1270	9.5	148	-	896	30	40
1951	790	940	10.0	227	10	470	40	107
1952	1440	885	9.0	101	24	413	25	95
1953	1330	755	9.0	62	5	305	20	82
1954	1230	745	7.5	2	58	360	0	51
1955	1770	780	8.5	15	16	380	10	58
1956	1060	640	6.0	47	54	170	15	155
1957	1100	670	7.0	77	6	284	20	124
1958	1220	820	6.5	39	46	492	5	61
1959	910	460	5.5	-	13	150	5	101
1960	1040	790	8.0	14	14	380	15	73
Moyenne	1141.8	796	7.8	66.5	21.5	390.9	16.8	86.1

Tableau CP. 1, Variables climatiques, x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, .... x<sub>6</sub>.

b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	r	r <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup>
0,000015	-0.109	0.027	-0.208	- 0.016	-0.017	0.003 -0.48 0.38 -0.32 -0.41 -0.15	- 0.23 0.14 0.10 0.17 0.02		
131.908	-4.057			-23.332				0.66	0.44
137.755								0.61	0.37
131.016	-3.673	3.383						0.70	0.49
170.955	-3.687		-0.605					0.73	0.53
138.148	-3.289			- 5.284				0.66	0.44
200.325	-5.268				3.317			0.72	0.52
130.066		1.874		-20.937				0.62	0.38
28.762		5.583			1.034			0.37	0.14
169.694	-3.310	3.350	-0.600					0.76	0.58
121.880	-4.364	4.004		5.730				0.70	0.49
187.358	-4.813	2.073			2.711			0.73	0.54
120.614	-1.131	4.058	-1.236		-4.452			0.78	0.60

Tableau CP. 2. b, coefficients de régression.  
 r, coefficients de corrélation simple.  
 R, coefficients de corrélation multiple.  
 r<sup>2</sup>, R<sup>2</sup>, coefficients de détermination.

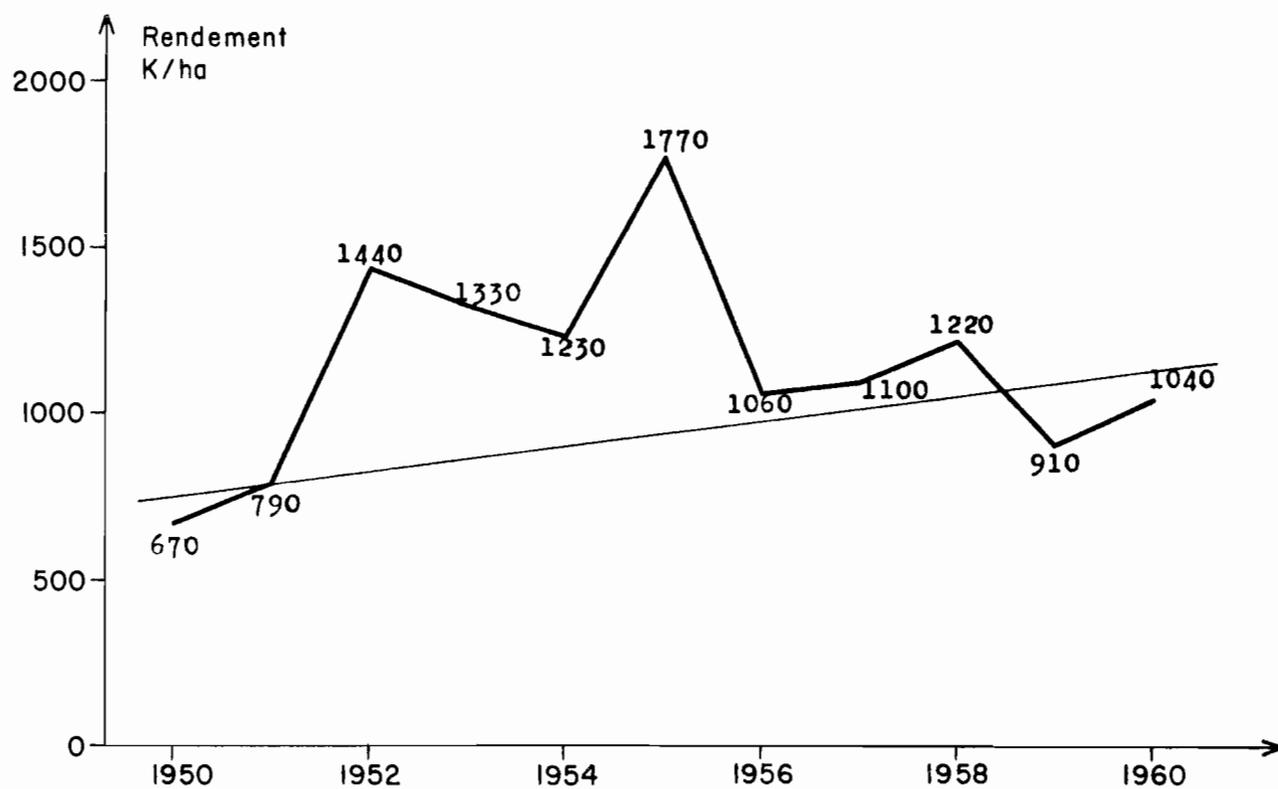


Fig CP. 3. Rendements de Mil Pennisetum au Centre de Recherches Agronomiques de Bambey (Sénégal), de 1950 à 1960. La droite représente une augmentation moyenne du rendement dans le temps.

procherait de  $r = 0.93$ . Le coefficient de corrélation brut atteint déjà 0.70 avec la variable No.8, qui est définie comme étant le pourcentage de couverture par la pluviométrie annuelle de l'évapotranspiration potentielle et du déficit initial du sol.

Quoiqu'il en soit, on s'en tiendra au test de Vidal, qui fournit une excellente présomption, pour vérifier l'origine essentiellement climatique de la fluctuation du rendement. En conséquence, on analysera les données de rendement telles quelles, sans correction.

b) Les coefficients de régression  $b_1, b_2, \dots$ , des équations du rendement en fonction des variables climatiques  $x_1, x_2, \dots$ , sont inscrits dans la tableau CP. 2. Ces variables (Tableau CP. 1.) sont les suivantes :

- $x_1$  durée, en décades, de la "période humide"  $B_1B_2$  (Fig CP. 4.)
- $x_2$  total pluviométrique du mois d'octobre.
- $x_3$  total pluviométrique de la "période post-humide"  $B_2C_1$ .
- $x_4$  excès des pluies sur l'évapotranspiration durant la période  $B_1B_2$ .
- $x_5$  intervalle, en jours, entre l'épiaison (point E) et la fin de la "période humide" (point  $B_2$ ).
- $x_6$  total pluviométrique de la "période préhumide"  $A_1B_1$ .

Le tableau CP. 2. donne aussi les valeurs des coefficients de corrélation ( $r, R$ ) et de détermination ( $r^2, R^2$ ) pour chaque combinaison de variables. Ceci permet de constater que les deux variables essentielles, quasi à égalité, sont : la durée  $x_1$  de la "période humide" et le total  $x_2$  des pluies du mois d'octobre.

Avec  $x_1$  la corrélation est positive, comme il est normal, mais avec  $x_2$  elle est négative, ce qui est inattendu. Ces pluies provoquent en effet un déplacement vers la fin du mois d'octobre de la date  $B_2$  de fin de "période humide", située en moyenne au 10/10 à Bambey (fig CP. 4.) pour la période 1950-1960. Elles devraient donc être bénéfiques puisqu'elles améliorent l'évapotranspiration réelle à une époque où la variété Sanio 165 développe ses épis. A ce résultat inattendu, on peut proposer deux explications :

- l'une est empruntée à Vidal (25) : celui-ci considère que les pluies en excès sur l'évapotranspiration potentielle en fin de saison pluvieuse déterminent un lessivage de l'azote préjudiciable au rendement.

- l'autre tient compte du fait que la floraison se situe en octobre et que toute pluie à cette époque provoque une coulure des fleurs et éventuellement l'apparition de charbon.

La première explication a pour elle que si on prend distinctement les décades de septembre et d'octobre, les coefficients de corrélation bruts du rendement avec les pluies sont négatifs, de la 2ème décade de septembre à la 3ème décade d'octobre incluse. Cette période de 50 jours déborde largement la période de floraison proprement dite, et donc de coulure possible, qui va du 20/9 (épiaison du Sanio 165) au 10/10 (fin de floraison). Cependant, les pluies durant ces 50 jours peuvent aussi favoriser le développement des maladies cryptogamiques. D'autre part il faut compter avec la floraison plus tardive des talles.

La question devrait pouvoir être tranchée expérimentalement par des apports fractionnés d'azote durant cette période et par des observations de l'épi. Les responsabilités dans la baisse du rendement sont peut-être d'ailleurs partagées. Quel que

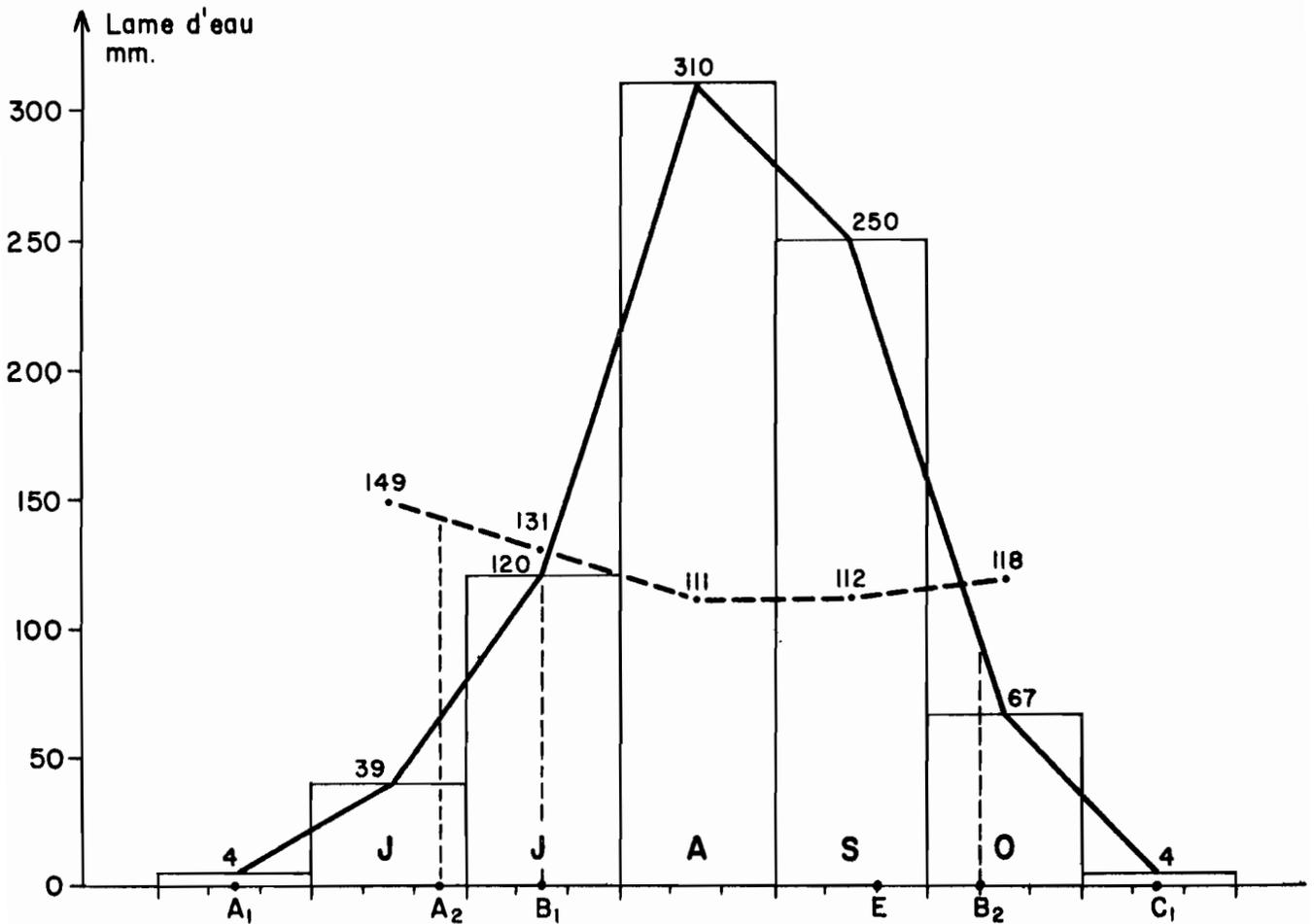


Fig CP.4. . Diagramme de pluviosité à Bambey (trait continu) et d'évapotranspiration potentielle à Thiès (trait discontinu), localité voisine.

$A_2-B_1$  : "période intermédiaire"

$B_1-B_2$  : "période humide"

$E$  : date réelle d'épiaison du Santo 165.

$B_2$  : date moyenne réelle de fin de la "période humide".

Le rendement maximal est obtenu pour une position de  $B_2$  de 10 jours environ postérieure à la date d'épiaison  $E$ .

soit finalement le phénomène en cause, il arrive à masquer par son importance l'effet bénéfique (donc en corrélation positive) que les pluies du mois d'octobre devraient avoir sur le rendement du fait d'une évapotranspiration potentielle améliorée.

Or cet effet paraît bien réel. Considérons la variable  $x_5$  définie par la position de la fin de la "période humide" (point  $B_2$ ) par rapport à la date fixe d'épiaison (point E). Cette variable est en corrélation avec chacune des autres variables indépendantes :

$r_{51}$	0.73
$r_{52}$	0.93
$r_{53}$	- 0.49
$r_{54}$	0.45

Alors que dans les équations où cette variable  $x_5$  est représentée en l'absence à la fois de  $x_2$  et de  $x_3$ , son coefficient de régression est négatif, dans l'équation en  $x_1, x_2, x_3, x_5$  (Tableau CP. 2.) son coefficient devient positif. C'est ce dernier coefficient qui rend compte de l'effet positif des pluies d'octobre sur le rendement.

c) Mais puisque cette variable  $x_5$  qui définit la "position" de la fin de la "période humide" participe de chacune des autres, elle représente en quelque sorte leur résultante, en termes d'écart entre E et  $B_2$ . Il est alors intéressant de la considérer seule avec  $x_1$  qui représente d'autre part la "durée" de la "période humide".

S'il est une position privilégiée de  $B_2$  par rapport à E, l'expression du rendement en fonction du temps qui sépare les deux points doit passer par un maximum pour une valeur de  $x_5$ . Une régression linéaire, comme celles utilisées jusqu'ici, ne rendra pas compte de la situation véritable. Sur la base de nos régressions linéaires, il faudrait passer progressivement aux régressions curvilinéaires, par la méthode des approches successives par exemple (Ezékiel M.). Etant donné la longueur de ce travail, il ne sera effectué ici que pour la régression :

$$\text{Rendement} = 137.75 x_1 - 23.33 x_5 + 452 \quad (1)$$

La figure CP. 3. montre le passage de la droite de régression :

$$\text{Rendement} = - 23.33 x_5 + 1535 \quad (2)$$

à une courbe ajustée à main levée à 4 points définis par le regroupement ci-dessous des valeurs de  $x_5$  et le regroupement des écarts correspondants  $Z$  entre valeurs de rendement observées et valeurs calculées d'après l'équation (1).

On a porté en ordonnée ces écarts  $Z$ , la droite (2) servant de base zéro, avec pour abscisse les valeurs regroupées moyennes de  $x_5$ . Ceci donne les valeurs théoriques moyennes de rendement de la 4ème colonne du tableau ci-dessous :

$x_5$ moyen	Nb de cas	$Z$ moyen	Rendement théorique
3.33	3	- 150	1307
13.33	3	115	1340
21.66	3	195	1225
35.00	2	- 165	555

Il apparaît clairement, sur la figure CP. 5. que cette courbe présente un maximum aux environs de  $x_5 = 10$ , c'est à dire pour un point B<sub>2</sub> (fin de la "période humide") situé en gros 10 jours après la date d'épiaison. Il serait intéressant de préciser ce résultat en allant plus loin dans l'ajustement, mais l'opération n'aurait guère de sens avec le faible effectif (11 années) de données disponibles.

Telle quelle, la courbe montre grossièrement que le rendement ne diminue que faiblement quand le point B<sub>2</sub> se rapproche de la date d'épiaison E, c'est à dire quand  $x_5$  tend vers zéro : pour cette dernière valeur on a encore, en 1954, un rendement de 1230 K/ha, supérieur à la moyenne (1142 K), alors que la pluviosité (745 mm) était inférieure à la moyenne (795 mm). Le rendement le plus élevé (1770 K/ha) a été atteint en 1955 pour une valeur de  $x_5$  égale à 10 jours et alors que la pluviosité était moyenne.

Au contraire, le rendement décroît rapidement dès que la date de fin de "période humide" se situe à plus de 20 jours au-delà de la date d'épiaison (20/9) : les rendements les plus faibles, 670 et 790 K/ha, ont été atteints en 1950 et 1951 pour des valeurs de  $x_5$  de 30 et 40 jours respectivement : c'étaient aussi les années les plus pluvieuses, avec 1270 et 940 mm.

Or, en moyenne pour ces 11 années, la fin de la "période humide" B<sub>2</sub> se place le 10/10, soit 20 jours après l'épiaison (Fig CP. 4. ). Au vu de ces résultats, fondés en réalité sur des données trop peu nombreuses pour qu'il soit permis d'en tirer des conclusions définitives, la variété Sanio 165 paraîtrait assez bien adaptée à la position moyenne dans le temps de la "période humide" aux latitudes et longitudes de Bambeï. Mais elle le serait peut-être mieux encore si elle épiait 5 à 10 jours plus tard. Tout ceci dans l'hypothèse où la date d'épiaison du Sanio 165 représente bien la date moyenne d'épiaison des populations concernées.

Quant à l'adaptation de la longueur de cycle (ou somme des températures) optimale à la durée de la saison humide à Bambeï, on ne pourrait la juger qu'à partir de données phénologiques comparables à celles dont on disposait au chapitre précédent pour les sorghos.

#### 4. Conclusion.

L'adaptation d'une variété dépendra donc essentiellement :

- 1) de la date d'épiaison par rapport à la fin de la "période humide";
- 2) du nombre de noeuds (fonction de la somme des températures) que la culture, semée dès que possible en début de saison humide ou en début de saison pluvieuse, aura pu accumuler à la date d'épiaison.

Quoique pouvant varier avec les températures à compter du jour où la photopériode devient inductive, la date d'épiaison restera sensiblement la même le long d'un même parallèle. Or les courbes isochrones (Fig WB.3.4.b) de la fin de la "période humide" présentent d'Ouest en Est une pente générale négative par rapport aux parallèles. De ce fait, sur le parallèle de Bambeï par exemple, la fin de la "période humide" sera progressivement plus précoce vers l'Est, se rapprochant de la date d'épiaison du Sanio 165 qui devrait donc, de ce point de vue, se montrer de mieux en mieux adapté.

Mais à mesure qu'on va vers l'Est, le début de la "période humide" se montrera plus tardif. En conséquence, au total, la durée de la "période humide" va diminuer. Et de ce point de vue, la variété Sanio 165 se montrera moins bien adaptée.

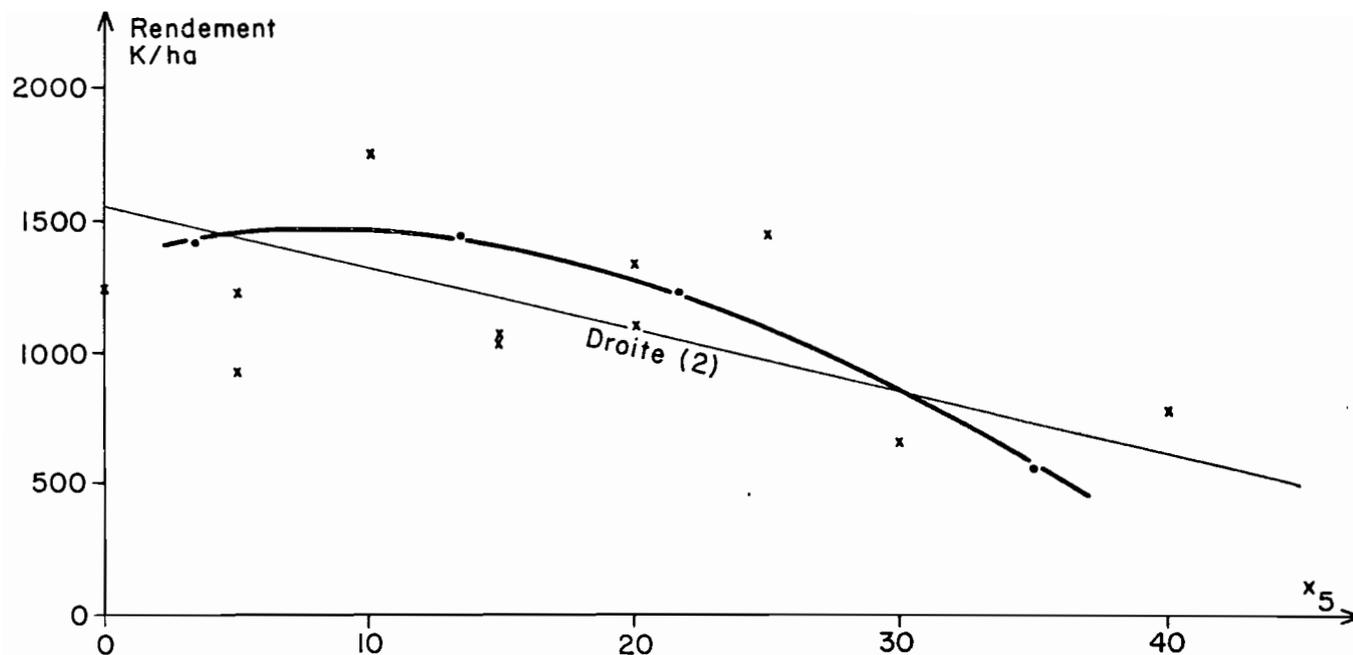


Fig CP.5. -  $x_5$  : intervalle, en jours, entre la date d'épiaison  $E$  de la variété Sanio 165 et la date  $B_2$  de fin de la "période humide". Voir Fig CA.3.2.

- Trait fin : régression linéaire

- Trait fort : régression curvilinéaire

Le rendement est maximal pour une date  $B_2$  postérieure de 10 jours environ à la date  $E$ .

Tout ceci explique bien les différences d'adaptation en longitude d'une même variété photopériodique, suivant que l'un ou l'autre facteur, adaptation à la fin de la "période humide" ou adaptation à sa durée, domine l'autre. Et cette prédominance sera pour beaucoup une question de sol. En effet, sur un autre sol que celui de Bambey (sol Dior vraisemblablement), le maximum de rendement pourrait correspondre à une valeur de  $x_5$  différente de celle, égale à 10 jours, qui a été calculée pour ce sol.

Cette pente des courbes isochrones des événements remarquables de la saison humide, négative en général jusque vers le Tchad, pour remonter ensuite, a une signification considérable dans l'agroclimatologie de l'aire d'investigation. Il suffit en effet, pour s'en convaincre, de remarquer qu'entre le point le plus septentrional (au Sénégal) de l'isochrone de fin de période humide qui passe par Bambey et son point le plus méridional (à la longitude du Nord Cameroun sensiblement), il y a  $4^{\circ}$  à  $5^{\circ}$  de latitude, soit une distance de 450 à 550 km.

Bibliographie

- 1 - BEZOT P. - L'amélioration des cultures céréalières au Tchad. - Agron. Trop. 18(1) 1963.
- 2 - BONO M. - Des caractères dans la sélection des Sorghos et des Mils (Pennisetum). - Conf. Arachide-Mil, Bambeý 1954, Bull. Agron. No.12.
- 3 - BONO M. - Etude et évolution sur deux campagnes (1957 et 1958) des caractères utilisés dans la sélection des Mils Pennisetum par la méthode dite "des fiches perforées" pratiquée au C.R.A. de Bambeý. - Annales du CRA de Bambeý 1957.
- 4 - BONO M. - L'expérimentation variétale sur Mil Pennisetum. Les obstacles. Les résultats. L'orientation nouvelle de l'amélioration. - Agron. Trop. 9, 1962.
- 5 - BONO M. - Contribution à l'étude botanique du Mil Pennisetum. - Colloque sur les céréales des zones de savane, No.26, 1962.
- 6 - BONO M., DURAND Y., MOUSSEAU J. - Contribution à l'étude des populations sélectionnées de Mil (Pennisetum typhoïdes). - Annales du CRA de Bambeý, 1955.
- 7 - BOUCHET P. - Les Mils et Sorghos dans la République du Mali. - Agron. Trop. 18(1), 1963.
- 8 - CATHERINET M.D., DUMONT S., MAYAKI A.A. - Le Mil et le Sorgho dans l'agriculture du Niger. - Agron. Trop. 18(1), 1963.
- 9 - CHARREAU C., POULAIN J.F. - La fertilisation des Mils et Sorghos. - Agron. Trop. 18(1), 1963.
- 10 - CORRIOLS J. - Quelques observations sur la biologie florale du Mil et du Sorgho au Sénégal. - Annale du CRA de Bambeý, 6, 1950.
- 11 - DIRECTION DE L'AGRICULTURE DU SENEGAL. - Situation actuelle de la production du Sorgho et du Mil au Sénégal. - Agron. Trop. 18(1), 1963.
- 12 - HART J. - Growing Millets in Queensland. - Queensland Agri. Jour. 84(12), 1958.
- 13 - I.R.A.T. SENEGAL. - Growing Millets in Queensland. - Queensland Agri. Jour. 84(12), 1958.

- 14 - I.R.A.T. - Rapports et comptes rendus d'activité des Stations de Bambey (Sénégal), M'Pesoba (Mali), Saria et Farako Ba (Haute Volta), Kolo et Maradi (Niger).
- 15 - LE CONTE J. - Mission en Afrique Noire (3/11-16/12). Situation de la production et de l'expérimentation concernant Sorgho, Mil, Maïs. - IRAT 1961.
- 16 - LEONARD W.H., MARTIN J.H. - Cereal Crops. - Mc Millan Cy, N.Y.
- 17 - MAGNEN A. - Monographie de la région du Logone. - L'inspection de l'Agriculture, Tchad.
- 18 - MALI. SERVICE DE LA RECHERCHE AGRICOLE. - Principaux résultats obtenus au cours de la campagne d'expérimentation agronomique 1960.
- 19 - MARCHAL A. - Les Pénicillaires cultivés au Niger. - Agron. Trop. 5(11-12), 1950.
- 20 - MINISTRY OF AGRICULTURE, NORTHERN NIGERIA. - Annual Reports.
- 21 - NICOU R. - L'influence de quelques techniques de culture sur les rendements des Mils et Sorghos. - A paraître.
- 22 - RASSEL A. - Le Mil à chandelles (*Pennisetum typhoideum*) et sa culture au Kivango. - Bull. Agr. Congo Belge, 49(1), 1958.
- 23 - S.T.A.T. - Bibliographie sur la culture des Mils et Sorghos. - Bull. Agron. STAT, 12, 1955.
- 24 - TOURTE R., FAUCHE J. - Recherches pluriannuelles sur les densités de semis et les écartements des Mils et Sorghos. - Bull. Agr. STAT, 15, 1957.
- 25 - VIDAL P. - Croissance et nutrition minérale des Mils (*Pennisetum*) cultivés au Sénégal. - Agron. Trop. 18(6-7), 1963.
- 26 - VINCHON. - Etude sur la génétique des *Pennisetum* cultivés. - Agron. Trop. 4, 1949.



Le Cotonnier - CO

1. Généralités.

Le long du méridien de Ségou ( $6^{\circ}$  W au Mali) se succèdent tous les modes de culture cotonnière qu'il est possible de rencontrer entre Sahara et Equateur. Trois Stations de recherche et d'expérimentation de l'Institut de Recherche du Coton et des Textiles (I.R.C.T.) se trouvent d'ailleurs situées à proximité même de ce méridien : Bouaké ( $7^{\circ}4$  N) en Côte d'Ivoire, hors de l'aire d'investigation, N'Tarla-M'Pesoba ( $12^{\circ}4$  N) et Kogoni ( $14^{\circ}4$  N) au Mali.

Ces modes de culture cotonnière sont étroitement liés au système de culture en général. Leur description succincte permettra de schématiser dans leurs grandes lignes certains de ces systèmes avant même d'aborder le chapitre qui traite de leur adaptation aux conditions climatiques.

a) D'implantation toute récente, le mode de culture cotonnière le plus méridional se développe progressivement aux dépens du mode traditionnel, parallèlement au perfectionnement général de l'agriculture. Alors que dans le système traditionnel le cotonnier est associé sur la même sole et au même instant à des cultures vivrières (igname, manioc, maïs, arachide,...), le nouveau système substitue à cette association la succession des cultures sur la même sole au cours d'une même saison humide (Angelini, 1). À un maïs de cycle court ou à une arachide, semés en mars-avril et récoltés en juillet, succède un cotonnier semé en août et récolté en janvier.

Ce procédé s'étend actuellement à la région de Bouaké ( $7^{\circ}4$  N,  $5^{\circ}$  W), en Côte d'Ivoire, dominée par le climat Baouléen-Dahoméen d'Aubreville (2). Celui-ci se caractérise essentiellement par une petite saison sèche en juillet-août qui interrompt de façon plus ou moins durable et radicale une saison pluvieuse de 7 mois environ (début avril à début novembre). Cette intensification du système de cultures impose le remplacement du cotonnier barbadense local, de 150 jours de cycle (du semis à la première capsule mûre), par un cotonnier hirsutum de cycle bien plus court (115 jours), de floraison mieux groupée (8 semaines) et de potentiel de productivité plus élevé qu'une fumure et une protection insecticide mettent en mesure de s'exprimer.

b) C'est cependant ce même cotonnier barbadense (série des Mono) qui se maintient plus au Nord, vers Korhogo et Boundiali ( $9^{\circ}3$  N,  $5^{\circ}4$  et  $6^{\circ}3$  W), en dépit d'une certaine avance de l'hirsutum en culture pure (non associée). Le raccourcissement de la saison humide et la mutation de la saison sèche en un simple ralentissement ne permettent plus de pratiquer régulièrement la succession des cultures comme ci-dessus. Ces mêmes conditions conviennent à un cotonnier de cycle assez long (150 jours) et de floraison suffisamment étalée dans le temps (15 semaines) pour qu'il puisse endurer la concurrence imposée par l'association aux cultures vivrières.

Cette zone, dénommée d'ailleurs "zone intermédiaire" en terminologie de production cotonnière, fait la transition entre la zone précédente d'intensification culturale et celle de culture plus extensive au Nord. Elle couvre, aux environs du méridien  $6^{\circ}$  W, l'extrême nord de la Côte d'Ivoire et l'extrême sud du Mali. On peut dire que la limite septentrionale de la culture du cotonnier barbadense, qui correspond, quoiqu'avec un peu de retrait, à la limite septentrionale du riz dit "de montagne" (riz de culture sèche), définit sensiblement, en termes d'agriculture, la limite méridionale de notre aire d'investigation.

c) Plus au Nord, jusqu'à Ségou (13°3' N) qui constitue pratiquement la limite de la culture sèche du cotonnier au méridien considéré, celui-ci était surtout cultivé en association avec sorgho et mil, conjointement à quelques parcelles de culture pure (N'Kourala, Allen). Le cotonnier barbadense, de cycle trop long pour s'encadrer dans les limites, progressivement plus étroites, de la saison humide des régions soudanaises et soudano-sahéliennes, laissait la place au G. punctatum dans cette association.

Les qualités de résistance à la sécheresse et au parasitisme de ce cotonnier, mais surtout sa tendance à être pérenne, et en conséquence à produire des fruits sur une période très prolongée, lui permettent d'assurer une fructification après la récolte de la céréale associée, parfois même l'année suivante. Ce cotonnier rustique, mais producteur d'une fibre de caractéristiques technologiques médiocres, est en voie de disparition, de même que la culture associée, devant la culture pure d'un hirsutum à grosse productivité et à caractéristiques technologiques excellentes, l'Allen.

C'est ce mode de culture sèche, le plus souvent hors association, d'un cotonnier hirsutum très productif si on lui apporte les soins indispensables, qui est caractéristique de notre aire d'investigation.

d) La culture irriguée, qui fait suite à la culture sèche au nord de Ségou et qui s'étend sur les alluvions de l'ancien delta intérieur du fleuve Niger, ne représente en effet encore que quelques milliers d'hectares qui n'ont pas d'équivalent ailleurs dans l'aire d'investigation, si ce n'est peut-être, pour l'avenir, dans la basse vallée du fleuve Sénégal (Richard Toll). Le problème de la culture cotonnière sous irrigation ne sera donc pas examiné dans le cadre de cette étude. Il a d'ailleurs déjà fait l'objet d'études poussées de nature agroclimatique par les spécialistes de l'I.R.C.T. (20).

e) Il existe encore un mode de culture cotonnière qui ne se rencontre pas sur le méridien de Ségou, la culture de décrue proprement dite. Mais il n'est que faiblement représenté dans l'aire d'investigation par quelques centaines d'hectares au Niger.

## 2. Localisation et Distribution variétale.

Alors que Sorgho et Mil, plantes vivrières, au surplus génétiquement très différenciées, sont assez uniformément répandus dans l'aire d'investigation, le Cotonnier, plante industrielle, très peu diversifiée, est bien localisé. Sa longueur de cycle peu variable l'exclut évidemment (sauf culture irriguée ou de décrue) des régions septentrionales à saison humide trop courte. Mais même sous climat favorable, la nature des sols ou leur niveau de fertilité en rapport avec l'intensivité d'exploitation, la concurrence d'autres cultures mieux adaptées ou plus économiques, ou simplement la tradition culturelle, peuvent être des facteurs d'exclusion.

a) La production la plus importante est celle de Nord Nigéria : 130.000 tonnes environ de coton-graine sur 250.000 ha, soit un rendement avoisinant 500 K/ha. Cette production est peut-être aussi la plus concentrée, dans l'aire d'investigation, car elle provient presque entièrement des provinces de Sokoto, Katsina, et Nord Zaria, le long de la voie ferrée Zaria-Gusau principalement. Bien que les provinces à l'Est de Kano ne soient pas écologiquement vraiment différentes, sauf inclinaison des isohyètes vers le Sud-Est, le cotonnier n'y est guère représenté que par des cultures traditionnelles de mélanges de variétés dont le produit est utilisé par l'artisanat local. Les noyaux de production des provinces de Baohi et d'Adamawa, qui ont pour principale raison d'être les qualités de leurs sols noirs, sont déjà en dehors de l'aire d'investigation. Quant à Maiduguri au Nord-Est, sous pluviosité faible, il n'est encore qu'un important point d'essais. La Station de Samaru, chargée de la recherche, est à la limite de l'aire cotonnière Nord. Mais le centre de multiplication de Daudawa, au nord-ouest de Zaria, et de nombreux points d'essais couvrent l'ensemble de l'aire cotonnière.

b) Le Tchad vient ensuite avec une production maximale de 100.000 tonnes, le rendement étant de l'ordre de 300 K/ha. Le cotonnier y est localisé aux régions méridionales plus pluvieuses et plus peuplées : Logone, Moyen-Chari, Mayo-Kebbi. Il s'y ajoute, au Nord et à l'Est (Mongo, Bousso, Massenya, Am Timam), une région, dite "5ème zone", trop peu peuplée pour une progression à court terme de la production. Deux Stations de recherche de l'I.R.C.T. couvrent l'ensemble de l'aire cotonnière, prolongées par 7 fermes expérimentales : Deli (8°4 N, 15°5 E), Bekamba (8°4 N, 17°2 E), Moussafoyo (8°5 N, 18°4 E) rattachées à la Station de Bebedjia (8°4 N, 16°3 E), Youhé (9°5 N, 14°5 E), Karual (9°3 N, 15°1 E) et Ba-Illi (10°3 N, 16°3 E) rattachées à la Station de Tikem (9°5 N, 15° E). Bekao se trouve déjà en climat nettement Soudano-Guinéen (Aubreville) et donc en dehors de l'aire d'investigation.

c) Le Nord Cameroun (Maroua, Garoua) produit 45.000 tonnes avec un rendement de 600 K/ha supérieur à ceux du Tchad et de Nigeria. Ce résultat tenant plus à la qualité de l'encadrement (assuré par la C.F.D.T. : Compagnie Française pour le Développement des Textiles) qu'à des conditions écologiques meilleures, le Nord Cameroun peut être considéré comme une région-pilote pour la culture cotonnière. Les rendements, connus avec précision sur une période de 12 ans (1952-63), se prêteraient bien à une analyse statistique globale en fonction des variables non seulement climatiques mais écologiques. Faute de temps et d'information complète, cette analyse ne sera faite que partiellement.

d) Le Mali (près de 30.000 t. en 1964) est le pays où les tentatives d'amélioration de la culture cotonnière ont été poussées le plus loin, sous l'action de la C.F.D.T. Des rendements de plus de 2000 K/ha ont en effet été obtenus par de simples cultivateurs appliquant les principes, depuis longtemps établis, d'une culture rationnelle. L'intégration du cotonnier dans un système de mixed farming est l'aboutissement logique de cette orientation.

La culture cotonnière s'étend de Bamako au Centre à la Haute Volta à l'Est, avec pour limite septentrionale la ligne Ségou-San-Banamba et pour limite méridionale la frontière de Côte d'Ivoire. La Station I.R.C.T. de N'Tarla qui double, pour le cotonnier, la Station agronomique de M'Pesoba, couvre toute cette aire, en même temps que celle de Haute Volta. Dans l'Est du pays les sols, mais surtout la faible densité de population, se prêtent moins bien à la culture cotonnière : l'arachide y est au contraire très répandue.

e) La Haute Volta se trouve presque entièrement incluse dans l'aire climatique du cotonnier. Seuls sont peu favorables l'extrême Nord (Djibo, Dori) au-delà de l'isohyète 650 mm environ, et l'extrême Sud (Banfora, Gaya) en zone Soudano-Guinéenne à plus de 1200 mm de pluie, où le parasitisme intense exclut la culture cotonnière sans protection insecticide. En outre l'extrême Est, peu peuplé et situé hors des voies de communication, ne pratique pas cette culture qui est diffuse dans presque tout le reste du pays. La production a atteint 9000 tonnes en 1964 pour un potentiel à court terme de 12.000 tonnes et à long terme (par augmentation du rendement) du double.

f) Au Niger (près de 7000 tonnes en 1964), le cotonnier a une situation particulière du fait, d'une part des possibilités de culture de décrue, d'autre part des difficultés de la culture sèche dans un pays où la pluviosité ne dépasse pas 850 mm (Gaya dans le Sud-Ouest) et se trouve généralement inférieure à 650 mm. Seuls quelques milliers d'hectares de culture sèche et de culture de décrue sont en production jusqu'ici dans les secteurs de Birni N'Koni, Maradi et Madaoua.

Une étude des possibilités d'extension a été faite par la C.F.D.T. (Tourancheau), dont les conclusions sont intéressantes à rapporter parce qu'elles peuvent être extrapolées à d'autres milieux. L'auteur examine ces possibilités au Niger Central et au Niger Occidental. Au Niger Occidental, du Sahel à Gaya, sous 400 à 850 mm, la culture cotonnière (culture de décrue proprement dite mise à part) dépendrait des conditions suivantes :

- plus de 800 mm (aucune année inférieure à 650 mm en 30 ans), au sud d'une ligne Koulou-Sabongari : semis aussi précoce que possible.

- entre 800 et 600 mm (ligne Niamey-Dogondoutchi) : sols de bonne fertilité et de capacité convenable pour l'eau seulement.

- moins de 600 mm : sols de fertilité exceptionnelle seulement et de caractéristiques hydriques leur permettant de retenir les eaux de la nappe phréatique ou de ruissellement.

Dans tous les cas les techniques du semis "en sec" doivent évidemment être appliquées (quitte à ressemer plusieurs fois), de même que les techniques de mise en réserve de l'eau : prélabour avant toute première pluie, semis à plat, buttage avec cloisonnement (tie-ridging), façons superficielles à la suite des pluies importantes, sarclages, ...

Au Niger Central, la culture sèche est possible entre 450 et 650 mm dans les mêmes conditions que ci-dessus. A Maradi même, sous 640 mm, d'une pluviosité assez régulière il est vrai, l'auteur remarque par l'examen détaillé des décades que tous les semis de la 1ère décade de juillet auraient été réussis dans les 12 dernières années (sauf peut-être en 1957) et qu'ils l'auraient été 7 fois sur 12 dans la dernière décade de juin : il eût donc été possible de semer toujours avec succès entre le 25/6 et le 10/7. Or si on se reporte à la figure WB.1, on peut constater que cette période du 25/6 au 10/7 est précisément pour Maradi la période intermédiaire qu'on a définie, au chapitre "Bilan Hydrique", comme celle où théoriquement le semis devient possible.

D'après la même figure, le cotonnier dispose en moyenne de 6 décades "humides", du 10 juillet au 10 septembre, pour développer son appareil fructifère. C'est probablement là une limite au-dessous de laquelle il est difficile de descendre, sauf conditions exceptionnelles de sol et apport d'eau supplémentaire (par nappe ou ruissellement). Chaque jour gagné pour le semis antérieurement au 10/7, et même antérieurement au 25/6, se répercutera favorablement sur le rendement.

g) Le Nord Ghana se trouve situé à l'extrême limite Sud de l'aire d'investigation, comme d'ailleurs le Nord Togo, le Nord Dahomey, le Sud-Ouest de la Haute Volta et l'extrême Sud du Mali, dans la région "intermédiaire" de culture cotonnière définie précédemment. Les conditions de parasitisme y excluent la production cotonnière sans protection insecticide.

h) Au Sénégal enfin, sauf peut-être en culture irriguée dans la basse vallée du fleuve (Richard Toll), le cotonnier ne peut prendre quelque importance que là où la culture de l'arachide ne s'est pas définitivement et exclusivement implantée, c'est à dire dans le S-E, vers Dédougou, Kolda et le sud de Tambacounda.

Dans toute l'aire d'investigation, un cotonnier hirsutum, l'Allen, s'est imposé contre les autres espèces et variétés de même espèce, en culture irriguée et en culture de décrue comme en culture sèche. Ce cotonnier venu anciennement d'Ouganda, où il avait été importé en 1912 des U.S.A., a constitué en Afrique sèche au sud du Sahara des populations bien adaptées. De ces populations sont issues, dans les Stations de recherche du Tchad (Tikem, Bebedjia) et de Nigeria (Samaru) des variétés, Allen 161 et 333, Samaru 26C et 26J, qui ont envahi toute l'aire cotonnière, la débordant même au-delà de la zone "intermédiaire" pour se substituer au cotonnier barbadense dans la zone de culture intensive.

Si bien adaptées cependant que paraissent ces populations d'Allen et les sélections qui en ont été tirées, elles ne présentent pas la variabilité génétique qui permettrait d'étendre leur culture à des régions aujourd'hui climatiquement marginales,

d'améliorer leur résistance au parasitisme et de leur conférer des caractéristiques technologiques susceptibles de valoriser leur rendement. Aussi est-ce dans la voie de la création de variétés tout à fait nouvelles, par hybridation interspécifique, que s'est désormais engagée la recherche (20).

### 3. Ajustement aux Conditions Climatiques.

3.1. Problèmes Majeurs et Climat. La culture cotonnière est dominée principalement par trois problèmes en relation étroite avec le climat :

- parasitisme
- shedding
- date de semis

a) Le parasitisme est évidemment étroitement conditionné par le climat. Etant donné cependant son caractère multiple, quand un de ses agents n'est pas favorisé par les conditions climatiques à une époque de l'année, un autre peut l'être, en sorte que le parasitisme masque toujours, dans une certaine mesure, les effets directs du climat.

Dans l'aire d'investigation, le prédateur principal est le *Diparopsis*, un ver de la capsule. Galichet (15) a montré par exemple "l'existence d'une corrélation négative entre, d'une part la pluviométrie cumulée du 1 janvier au 31 mai et d'autre part l'importance des populations larvaires aux mois de septembre et octobre suivants. Elle s'explique par le fait que les précipitations du début de l'année font cesser l'inhibition qu'exercent les températures élevées sur le développement des nymphes en diapause".

La plus grave des maladies infectieuses est la "bactériose" ou "black arm" (*Xanthomonas*), favorisée par des alternances de pluie et d'insolation. Les Allen y sont relativement résistants et la variété P 14, issue au Tchad d'une parcelle de panmixie et, semble-t-il, destinée à remplacer à terme assez court les Allen en Afrique francophone, est totalement résistante. Mais cette maladie s'oppose à ce que soient cultivés sous irrigation, à l'Office du Niger, au Mali, des cotonniers égyptiens à fibre longue extrêmement sensibles au *Xanthomonas*, parce que la pluviosité à Kogoni est encore de l'ordre de 600 mm.

b) Le shedding, ou chute des boutons floraux et des capsules, est en majorité l'effet du parasitisme. Des taux de shedding de 50% sont communs et ceux de 70 à 80% ne sont pas rares, sans être incompatibles avec de bons rendements quand la saison culturale est longue. En culture protégée contre les insectes, un shedding résiduel, dit "physiologique", peut affecter les boutons floraux et affecte toujours plus ou moins les capsules, principalement les jeunes, à certaines époques de la vie de la plante. Les variations climatiques ont évidemment une responsabilité directe dans ce shedding physiologique. Mais celui des jeunes capsules, bien qu'il puisse être accentué en situations extrêmes de sécheresse ou d'excès d'eau, paraît lié dans son déterminisme essentiel à des processus de régulation internes au plant, sans rapport direct avec le milieu extérieur. Du fait de l'étalement de la période de floraison, de l'ordre de 2 mois pour le seul premier cycle, des phénomènes de compensation permettent au cotonnier de restaurer au moins partiellement sa productivité quand la saison humide est assez longue. Mais cet étalement et cet effet de compensation ajoutent encore à la difficulté de mettre en rapport rendement et climat.

c) La durée du cycle du cotonnier, de 115 jours environ pour un Allen, du semis à la première capsule ouverte, en régions soudano-guinéennes (à la limite méridionale de l'aire d'investigation), est très longue si on considère que la floraison s'étale environ sur 2 mois. Le cycle total, jusqu'à la dernière capsule mûre, serait donc de :  $115 + 60 = 175$  jours. Mais le temps nécessaire à une fleur pour devenir une capsule mûre décroît à mesure que la saison avance, de 55 à 45 jours environ. D'autre part les étapes du développement sont couvertes plus rapidement quand on s'élève en latitude,

du fait de l'augmentation des températures, comme il sera vu plus loin.

On peut considérer grossièrement qu'à la limite Nord de la culture sèche du cotonnier un cycle complet se déroule en 150 à 160 jours. D'autre part une capsule atteint son poids maximal en 30 jours environ (Boullanger, 4) et toute capsule qui n'a pas atteint ce stade à la fin de la saison humide n'est pas récoltable. Le semis devra donc être effectué à un moment situé entre : 150-160 moins 30 = 120 à 130 jours antérieurement à la fin de la saison humide. Il est possible de déterminer assez rigoureusement ce moment quand on connaît les températures et les caractéristiques de la saison humide.

En fait, il n'est pas besoin d'une floraison entière, en bonne culture, pour assurer un rendement convenable. Il est donc possible de pousser la culture sèche du cotonnier au-delà de la limite où toute la floraison est utilisable, et ce d'autant plus que le parasitisme sera moins intense ou mieux neutralisé.

Finalement, plus la saison humide sera courte, plus la date de semis devra être précoce par rapport aux moments A<sub>2</sub> ou B<sub>1</sub> (figure CO. 7.) de cette saison. A Samaru par exemple où la "période humide" (intervalle B<sub>1</sub> - B<sub>2</sub>), de 12 à 13 décades et commençant au 1/6 en moyenne, encadre presque les 175 - 30 = 145 jours nécessaires à la dernière capsule pour qu'elle ait le temps de mûrir, le rendement va rapidement décroissant quand le semis est retardé. En culture soignée de Station, il passe de 2000 p/acre pour un semis du 1/6 à 700 p/acre pour un semis du 1/8. A Maradi ou à Maiduguri, où la "période humide" est de 6 décades en moyenne, ne commençant que vers le 10/7, la date du semis prendra plus d'importance encore : il devra être exécuté aussi tôt que possible, "en sec" de préférence, avant le moment A<sub>2</sub>.

On peut dire qu'en un lieu donné la date du semis a plus d'importance que la variété pour le rendement. Le simple respect, par les planteurs, de la date de semis la plus favorable, permettrait au moins de le doubler. Cette condition domine d'ailleurs toute amélioration ultérieure de la culture par emploi d'insecticides et de fumures, lesquels ne peuvent être rentabilisés que par des semis précoces offrant un potentiel de production suffisant.

3.2. Régime Héliothermique. Les cotonniers cultivés des espèces *G. hirsutum* et *G. barbadense* sont photopériodiquement indifférents. Comme exposé au chapitre "Complexe Héliothermique", la floraison est initiée sensiblement toujours pour la même somme de températures et au même noeud de la tige principale, indépendamment de la photopériode. Kammacher (I.R.C.T., non publié) considérant des variétés de *G. hirsutum*, sur plusieurs années et dans des localités de latitudes très différentes, a calculé les durées moyennes suivantes pour la phase "semis - début de floraison" :

	Durées en sommes de température	Durées en jours
- BAMBARI (R.C.A.), 5°5 N, 20°4 E.	1630°	66
- BOUAKE (Côte d'Ivoire), 7°4 N, 5°W.	1600°	65
- BEBEDJIA (Tchad), 8°4 N, 16°3 E.	1650°	55
- TIKEM (Tchad), 9°5 N, 15° E.	1660°	67
- TADLA (Maroc), 37° N, 7° W.	1680°	90
- BONE (Algérie)	1690°	95

Tableau CO. 1. Durée de la phase "semis - début de floraison".

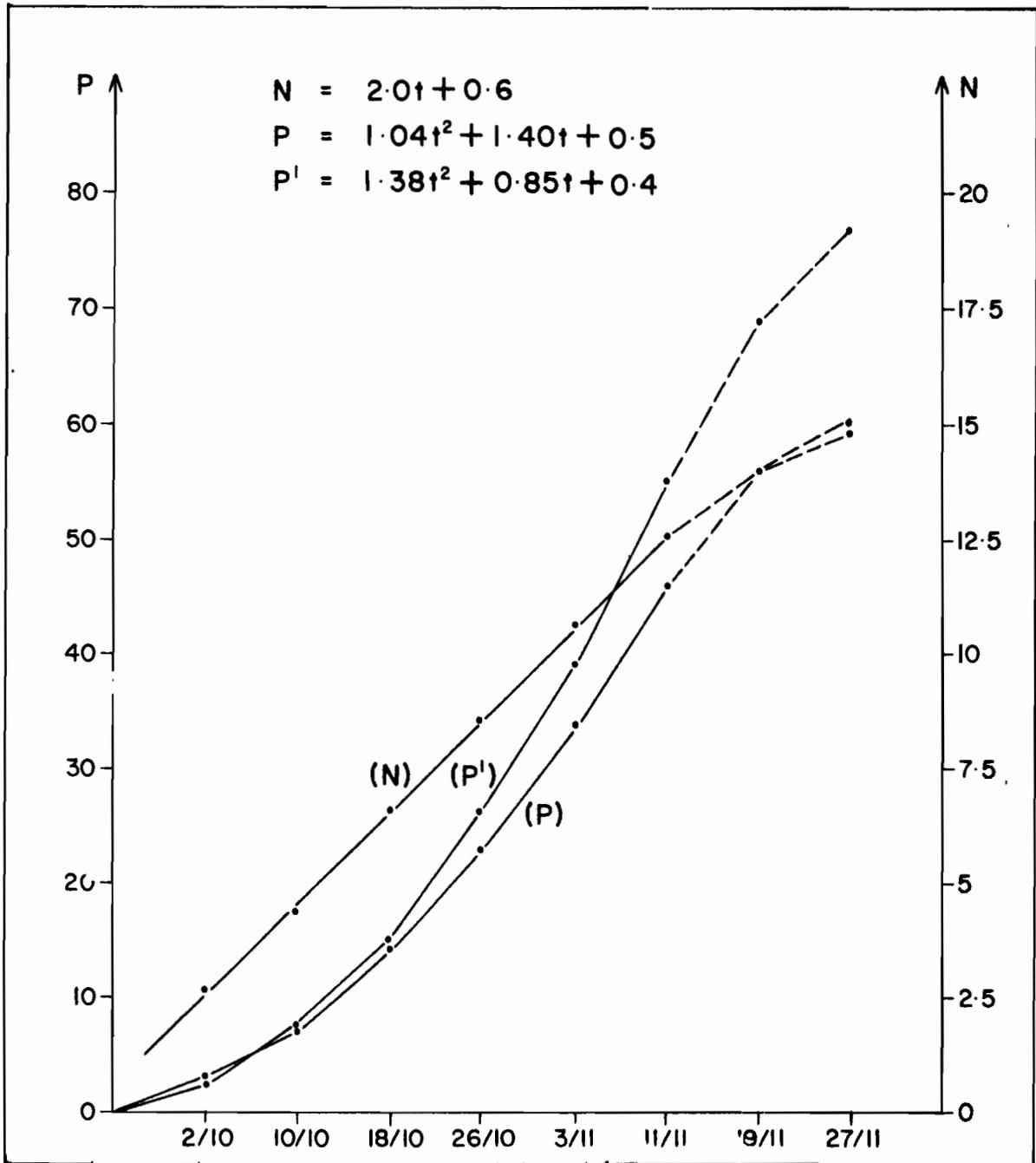


Fig CO.2. *N* : nombre de noeuds de la tige principale  
*P* et *P'* : nombre de positions de fleurs

(*N*) : nombre de noeuds fonction linéaire du temps  
(*P*) : parabole théorique dérivée de la relation :  $P = \frac{N^2 + 2N}{4}$   
(*P'*) : parabole observée dans la réalité

Droite et paraboles sont des courbes presque parfaites durant le temps de la saison pluvieuse (dernière pluie le 3/11)

En moyenne, car il y a des différences variétales qui contribuent à déterminer la précocité, la floraison débute aux environs de 1650° degrés-jours chez un cotonnier de l'espèce *G. hirsutum*. Chez un cotonnier *G. barbadense*, 1800° sont nécessaires (Kammercher). Il est bien connu d'autre part que la première branche fructifère (ou inflorescence) apparaît toujours, dans une même variété homogène, sensiblement au même noeud, dont le rang, compté à partir des noeuds cotylédonaire, est un critère de précocité.

La précocité en un lieu donné d'une variété déterminée sera fonction, en gros :

- du rang du noeud de la lère branche fructifère, caractéristique variétale.
- de la température, caractéristique locale qui détermine, en termes de sommation, la date d'initiation de la lère fleur sur la lère branche fructifère.

Mais la température règlera aussi la vitesse d'apparition des noeuds qui se succèdent sur la tige principale à partir du noeud de la première branche, donc la vitesse d'apparition des branches fructifères et des boutons floraux portés sur ces branches. Boulanger et Gutnecht (6), étudiant le rythme de développement du cotonnier, montrent que, indépendamment de la variété, on compte, 100 jours après le semis, 30 fleurs (ou plutôt 30 positions de fleurs, du fait du shedding) à Bambari contre 60 à Tikem, différence qui est attribuable à la température.

Franquin (14) produit des courbes montrant que le nombre de noeuds observé  $N$ , à compter du noeud de la lère branche fructifère, est proportionnel au temps  $t$  durant la saison humide, comme par exemple dans le cas de la droite ( $N$ ) de la figure CO. 2. pour un cotonnier *G. hirsutum*. Soit, alors, la droite passant par l'origine :

$$N = bt \quad (1)$$

Il établit d'autre part (14) que le nombre  $P$  de positions de fleurs en fonction du nombre de branches fructifères ou de noeuds  $N$  de la tige principale est donné théoriquement par la relation :

$$P = \frac{N^2 + 2N}{4} \quad (2)$$

Si on porte dans (2) l'expression de  $N$  dans (1), on obtient théoriquement la parabole :

$$P = \frac{b^2 t^2 + 2bt}{4} \quad (3)$$

Théoriquement car la relation (2) suppose que les branches fructifères se développent, en produisant des positions de fleurs, aussi longtemps que le fait la tige principale, ce qui n'est pas le cas (14, confirmé par Horowitz, 17), pour diverses raisons dont l'une, d'un grand intérêt, pourrait être la densité de plantation. Au lieu donc de la parabole (3), on aura une relation  $P' = f(t)$  dont on peut rechercher la nature.

Sur la figure CO. 2. on a construit, en fonction du temps  $t$  comme pour la droite ( $N$ ) d'une part une courbe théorique ( $P$ ) obtenue à partir de la relation (2) dans laquelle on a porté les nombres  $N$  de noeuds de la tige principale cumulé tous les 8 jours. On a construit d'autre part une courbe ( $P'$ ) obtenue à partir des nombres  $P'$  de positions de fleurs réellement observées tous les 8 jours. Or, si on tente d'ajuster une courbe du second degré à ces courbes ( $P$ ) et ( $P'$ ), on constate (Tableau CO. 3) que ce sont deux paraboles presque parfaites jusqu'à la date du 11/11 qui annonce l'établissement de la saison sèche.

Si on admet que la somme cumulée des températures est, à cette époque de l'année (saison humide), proportionnelle au temps, on aura encore, comme pour les sorghos, une parabole pour représenter le nombre de fruits, une des expressions majeures de la productivité (avec leur poids moyen), en fonction de la somme des températures.

Cependant, alors que la parabole avait un maximum dans le cas des sorghos, plantes à floraison terminale ou définie, elle part ici d'un minimum dans le cas du cotonnier, plante à floraison axillaire, indéfinie.

En réalité, la forme parabolique à minimum ne reste vraie que jusqu'au 11/11. Il s'amorce ensuite pour les paraboles, comme pour la droite, un palier qui s'explique par le fait que la dernière pluie, de 19 mm, étant tombée le 3/11, la croissance se trouve ralentie dès le 11.

Connaissant la loi qui lie le nombre de positions de fleurs à la somme des températures, il sera possible d'estimer, pour toute saison humide dont on connaîtra les caractéristiques de durée et de limites, le pourcentage moyen ou probable de floraison à espérer.

Date	N		P		P'	
	Observé	Théorique	Calculé	Théorique	Observé	Théorique
2/10	2.7	2.6	3.2	3.0	2.7	2.6
10/10	4.4	4.6	7.0	7.5	7.5	7.5
18/10	6.6	6.6	14.2	14.1	15.2	15.4
26/10	8.6	8.6	22.8	22.8	26.2	25.9
3/11	10.7	10.6	34.0	33.5	39.3	39.3
11/11	12.6	12.6	46.1	46.4	55.3	55.3
19/11	14.0		56.0		68.8	
27/11	14.8		60.1		76.6	

Tableau CO.3. Nombre de noeuds théoriques observé.

### 3.3. Régime Hydrique.

On a déjà vu à propos de sorghos et de mils qu'il est possible, à partir de données phénologiques, d'ajuster les cycles de développement des cultures aux conditions héliothermiques (photopériode et somme des températures) et aux conditions hydriques (événements remarquables de la saison humide). Mais le rendement d'une culture est une résultante de la croissance et du développement. Compte tenu de la croissance, l'adaptation d'une culture ne peut donc être testée que sur la base de données de rendement et/ou (à défaut) de données de production.

Dans tous les cas, rendement ou production, ces données doivent être conditionnées avant d'être soumises à l'analyse en rapport avec les facteurs climatiques.

3.3.1. Les Données et leur Conditionnement. La fluctuation annuelle, sur une aire plus ou moins vaste, des données de rendement ou de production d'une culture n'est évidemment pas entièrement imputable au climat. Si on admet que d'une année à l'autre, surtout pour des surfaces suffisamment étendues, le sol ne change pas, la fluctuation pourra globalement être attribuée à deux sortes de facteurs (Wang, 30) :

- des facteurs de variation à court terme, le climat principalement, mais aussi le parasitisme, les maladies, l'enherbement,...., et la surface cultivée dans le cas de données de production. Les effets de nature pathologique et ceux de l'enherbement peuvent, dans une mesure variable avec les circonstances, être rapportés au climat. Quant aux variations de surface plantée, elles peuvent être dues aussi bien à des facteurs d'ordre économique (d'effet à court, moyen ou long terme) qu'à des facteurs climatiques, la pluie essentiellement en régions tropicales.

- des facteurs de variation à long terme, l'amélioration et l'introduction progressives des techniques culturales et des variétés, et l'extension ou la régression progressives des surfaces dans le cas de données de production.

Avant toute analyse par rapport aux facteurs climatiques, il y a lieu de séparer de la fluctuation globale celle qui peut être rapportée, directement ou indirectement, au climat. Il s'agit d'écarter tout d'abord la variation à long terme, qui suit une tendance déterminée (yield trend). Cette tendance pourra être représentée par une droite moyenne (ou éventuellement par une ou plusieurs courbes) dont la pente est ascendante, ou encore, de façon moins rigide, par plusieurs droites successives de pentes variées. Les rendements sont alors comptés à partir de cette droite ou de ces droites prises comme base zéro. Un bon exemple relativement récent est donné par Barger et Thom (3, 1949).

Un autre procédé, illustré par Shaw et Durost (28), consiste à calculer des moyennes glissantes sur un nombre d'années qu'on aura eu des raisons de choisir tel ou qu'on aura trouvé le meilleur par tâtonnement. Ce procédé, plus souple que le précédent, tiendra mieux compte des facteurs dont l'effet est à moyen terme. Ce sera le cas notamment pour les variations de surface cultivée en rapport avec des facteurs économiques, dans le cas où l'analyse porte sur des données de production. Alors que pour des données de rendement il sera peut être préférable d'user du premier système, il est donc vraisemblable que le second sera mieux adapté pour des données de production.

Le premier présente sur le second, qui donne une ligne brisée, l'avantage de conduire à l'expression mathématique (linéaire généralement) d'une variable qui peut être intégrée directement dans l'analyse statistique, sans qu'il soit nécessaire de calculer préalablement les données corrigées. On peut rappeler à ce propos que Fisher (12) en 1921 intégrait déjà dans ses analyses de telles tendances à long terme.

Les données analysées sont habituellement des valeurs de rendement. Ce ne sont, parfois, des valeurs de production globale à l'échelle d'une région ou d'un pays que lorsqu'il y a des raisons de penser que les surfaces n'ont pas significativement varié d'une année à l'autre : valeurs de production et valeurs de rendement sont alors confondues. Or il n'est pas sans intérêt d'analyser la production par rapport aux facteurs climatiques. En effet, outre les effets indirects de ceux-ci sur la production par l'intermédiaire du rendement, il peut en être de plus directs comme, par exemple, les variations de surface ensemencée suivant la précocité des pluies.

L'agronome sera plus intéressé par le rendement, l'économiste par la production. D'autre part, qu'il s'agisse de rendement ou de production, l'analyse a pour but non seulement de rechercher quelle part de la fluctuation peut être attribuée à tel facteur climatique, mais aussi de permettre d'écarter de la fluctuation globale celle qui est

d'ordre proprement climatique. La fluctuation résiduelle pourra alors être analysée, en fonction des autres variables de l'environnement cultural par l'agronome, et en fonction des facteurs économiques par l'économiste.

L'idéal serait évidemment d'analyser parallèlement, d'une part les rendements et d'autre part les productions, pour une même aire et une même période. Nul doute qu'il ne puisse ressortir de cette étude comparative des notions intéressantes. Ceci aurait pu être fait ici pour la culture cotonnière au Nord Cameroun, pays pour lequel, grâce à l'obligeance des dirigeants de la Compagnie Française pour le Développement des Textiles (C.F.D.T.), on possédait des données précises de rendement et de production sur 12 ans. Faute d'avoir obtenu en temps utile les données climatiques correspondantes, on s'est contenté de traiter, à titre d'exemple, des données de production concernant le Tchad (données aimablement communiquées par la Cotonfran), puis d'examiner de façon succincte les données de rendement du Cameroun.

Il faut enfin considérer la fluctuation climatique du rendement ou de la production dans le temps, c'est à dire en un même lieu sur des années successives, et dans l'espace, soit pour une même période dans les diverses régions d'une aire déterminée. Dans le premier cas l'analyse fournira, entre autres, des indications sur les conditions d'exploitation d'un climat local par une culture donnée. Dans le second les renseignements se rapporteront surtout à l'adaptation de la culture et pourront conduire à la notion de productivité climatique relative.

3.3.2. Fluctuation dans le Temps. Parmi les données de production disponibles pour le Tchad, de 1951 à 1963, le choix s'est porté, à titre d'exemple, sur celles relatives au secteur cotonnier de Fort-Archambault, bien qu'il se trouve à la limite méridionale de l'aire d'investigation, dans une région où les conditions hydriques sont moyennement bonnes et donc non typiques de l'aire. Mais on possédait pour ce secteur, sans lacunes, toutes les données climatiques indispensables au calcul de l'évapotranspiration potentielle pour chaque mois de chaque année. Pour quatre autres secteurs, Moundou, Pala, Bousso, Am Timam, on possédait aussi, parce qu'il s'agit de stations météorologiques synoptiques, les mêmes données, avec quelques lacunes. Il eût été intéressant, pour comparaison avec Fort Archambault, d'en soumettre un à l'analyse où les conditions hydriques fussent en moyenne médiocres - Am Timam par exemple. Cette comparaison, faute de temps, n'a pas été possible.

3.3.2.1. Présentation et Conditionnement des Données de Fort-Archambault. La figure CO. 4 contient :

- un graphique des valeurs réelles de production cotonnière à Fort-Archambault, de 1951 à 1963 (ligne brisée en trait plein)

- une droite ajustée à ces valeurs et représentant l'augmentation moyenne de production due en principe aux facteurs de variation à long terme : augmentation moyenne des surfaces, amélioration des techniques culturales et des variétés ....

- une ligne brisée en tirets représentant les moyennes de production pour des périodes glissantes de 5 ans.

S'agissant de données de production, donc sujettes non seulement à des variations de surface à court terme imputables au climat, mais aussi à des variations de surface à moyen et à long terme, elles eussent vraisemblablement été mieux corrigées sur la base des moyennes glissantes (ligne brisée en tirets). On les a corrigées néanmoins sur la base de la droite moyenne, le procédé des moyennes glissantes faisant perdre, à raison de 2 à chaque extrémité, 4 années d'observations sur les 13 seulement disponibles déjà.

La pluviométrie décadaire du poste de Fort-Archambault est inscrite au Tableau CO. 5. Le trait interrompu souligne la décade de début (point A<sub>2</sub> de la Fig CO. 7.) de la "période intermédiaire", date à laquelle le semis devient en principe possible, en moyenne. Les traits forts situent, de haut en bas : la décade de début (point B<sub>1</sub>, qui est aussi la fin de la période intermédiaire) de la "période humide" et la décade de fin (point B<sub>2</sub>) de cette même période. Les définitions de ces périodes sont données au chapitre "Bilan Hydrique". En moyenne, à Fort Archambault, le point A<sub>2</sub> se situe au 1 Mai, le point B<sub>1</sub> au 1 Juin, soit un mois plus tard, et le point B<sub>2</sub> au 10 Octobre, soit 13 décades après le point B<sub>1</sub>.

Au Tableau CO. 6. sont présentées :

- les productions Pr réelles ( en dizaine de tonnes arrondies) du secteur de Fort-Archambault.

- les productions Pc corrigées à partir de la droite de la figure CO. 4 et augmentées du plus grand écart négatif (afin de n'avoir que des valeurs corrigées positives).

- les durées de la "période humide" et les hauteurs de pluie des diverses périodes du cycle de développement du cotonnier et des diverses périodes remarquables de la saison humide. Ces variables ont été notées de x<sub>1</sub> à x<sub>14</sub>. Ce sont :

- x<sub>1</sub> , hauteur de pluie avant la date moyenne (B<sub>1</sub>, Fig CO. 7.) du début de la "période humide", soit en Avril et Mai dans le cas présent.
- x<sub>2</sub> , hauteur de pluie durant le mois précédant le semis, soit au mois de Juin.
- x<sub>3</sub> , hauteur de pluie durant le 1er mois de végétation du cotonnier, soit en juillet, le cotonnier étant considéré comme semé en moyenne le 1er Juillet dans le secteur de Fort-Archambault.
- x<sub>4</sub> , hauteur de pluie dans le 2ème mois de végétation du cotonnier, soit en Août, qui voit la formation de plus de la première moitié des boutons floraux.
- x<sub>5</sub> , hauteur de pluie durant le 3ème mois de végétation du cotonnier, Septembre, qui couvre la première moitié de la floraison.
- x<sub>6</sub> , hauteur de pluie du restant de la saison pluvieuse, Octobre et Novembre, qui représentent la "période post-humide", laquelle débute en moyenne le 10/10 (point B<sub>2</sub>).
- x<sub>7</sub> , durée de la "période humide" (B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub>), en décades.
- x<sub>8</sub> , nombre de décades, du 1/9 à B<sub>2</sub>, fin de la "période humide".
- x<sub>9</sub> , nombre de décades, de B<sub>1</sub>, début de la "période humide", au 31/7.
- x<sub>10</sub>, hauteur de pluie durant la "période humide".
- x<sub>11</sub>, rapport x<sub>10</sub>/x<sub>7</sub> de la hauteur de pluie de la "période humide" à sa durée en décades.
- x<sub>12</sub>, hauteur de pluie tombée durant la "période post-humide".
- x<sub>13</sub>, hauteur de pluie tombée durant la "période pré-humide".
- x<sub>14</sub>, hauteur de pluie totale.

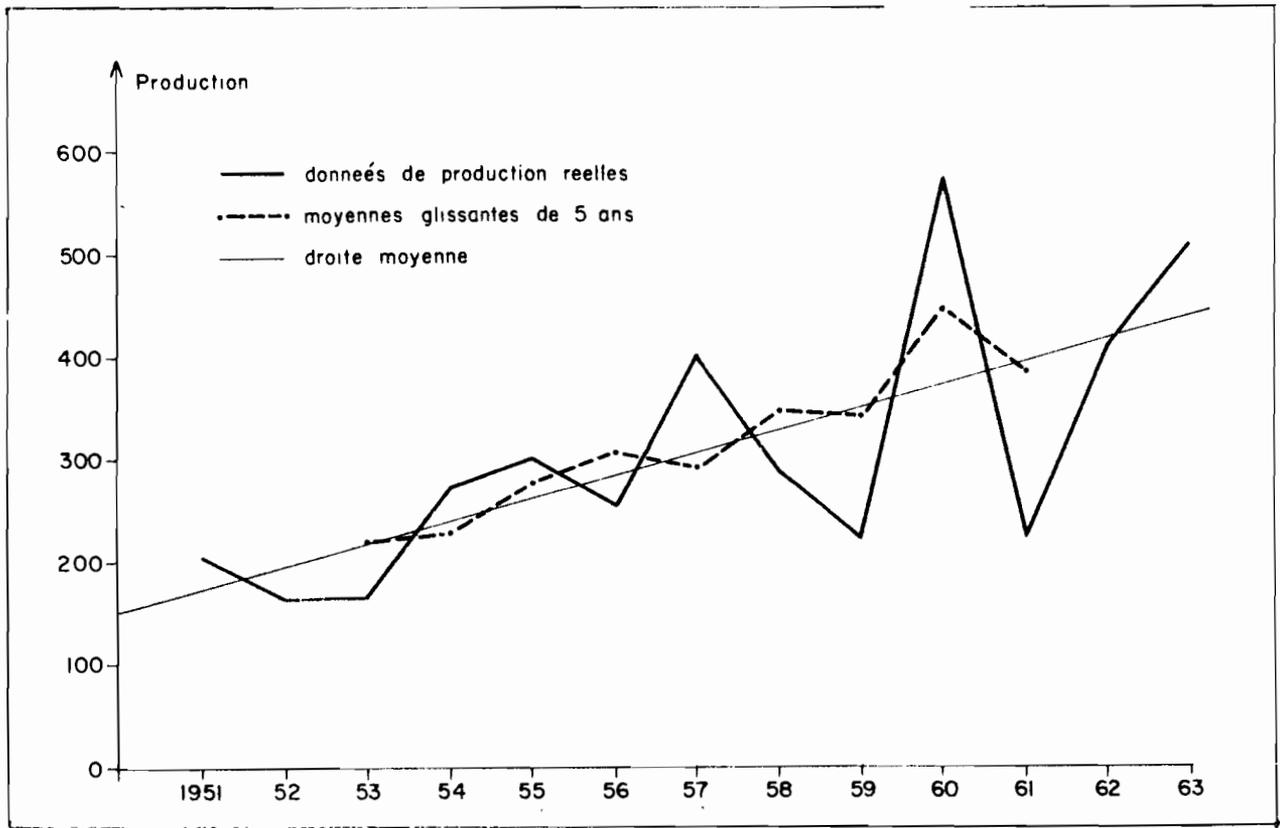


Fig CO.4. Données de production cotonnière à Fort Archambault (Tchad) et leur conditionnement en vue de séparer, dans la fluctuation globale, celle qui est d'origine climatique.

	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	Moy.
M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.8	
	11,1	-	0.2	-	-	3.1	-	3.7	-	-	-	9.9	-	
	3.7	2.3	24.0	0.2	-	9.5	-	-	-	-	19.7	3.7	-	
	14.8	2.3	24.2	0.2	-	12.6	-	3.7	-	-	19.7	13.6	1.8	8
A	1.2	3.7	1.7	17.5	33.4	-	10.9	-	36.9	-	32.1	6.6	3.3	
	-	-	-	-	46.8	0.6	68.5	14.9	-	37.7	75.2	4.6	32.3	
	0.2	17.2	23.8	24.5	1.8	-	0.7	48.5	16.5	57.2	32.2	11.0	61.3	
	1.4	20.9	25.5	42.0	82.0	0.6	80.1	63.4	53.4	94.9	139.5	22.2	96.9	53
M	37.6	5.5	25.4	11.2	131.5	0.7	40.9	15.6	95.0	0.3	15.7	69.3	17.9	
	93.5	5.2	13.4	3.3	2.3	19.5	65.6	-	27.9	23.9	14.8	29.6	98.0	
	4.5	5.5	47.8	50.1	39.9	44.6	63.6	60.5	42.8	39.8	-	2.4	72.1	
	135.6	16.2	86.6	64.6	173.7	64.8	170.1	76.1	165.7	64.0	30.5	101.3	188.0	107
J	41.2	26.7	78.3	38.3	38.9	74.4	73.1	61.8	23.8	26.9	25.4	1.7	58.4	
	1.6	13.6	41.5	104.6	40.8	29.6	32.7	8.8	92.9	79.3	44.7	75.3	69.6	
	67.6	65.2	34.7	24.7	45.5	31.1	9.9	39.0	14.1	39.5	158.4	18.2	40.5	
	110.4	105.5	154.5	167.6	125.2	135.1	115.7	109.6	130.8	145.7	228.5	95.2	168.5	140
J	28.5	75.1	30.4	69.5	19.8	39.8	71.4	65.5	74.1	90.8	174.3	79.4	52.7	
	129.1	61.6	46.0	100.1	136.7	114.6	54.2	15.3	82.3	42.2	58.5	15.9	80.0	
	93.1	13.1	27.4	115.5	39.1	30.2	89.3	107.8	159.5	65.7	113.9	45.0	115.9	
	250.7	149.8	103.8	285.1	195.6	184.6	214.9	188.6	315.9	198.7	346.7	140.3	248.6	230
A	107.2	73.8	124.3	60.1	109.0	115.2	61.2	79.7	128.2	151.3	70.8	49.9	110.6	
	114.0	133.6	41.7	202.9	56.7	89.2	122.7	139.4	60.1	77.4	48.7	110.0	59.7	
	96.3	181.7	74.8	160.1	67.8	108.0	144.5	37.4	61.7	96.8	131.6	80.1	107.1	
	317.5	389.1	240.8	423.1	233.5	312.4	328.4	256.5	250.0	325.5	251.1	240.0	277.4	290
S	93.2	103.9	66.6	20.4	105.1	86.7	57.1	83.2	52.1	35.7	42.3	48.5	24.8	
	72.8	125.3	17.7	19.3	112.2	94.2	24.9	126.0	63.0	44.7	27.6	113.7	46.2	
	11.6	85.7	90.9	63.5	48.5	72.3	34.3	98.6	2.4	75.8	36.5	64.1	63.1	
	177.6	314.9	175.2	103.2	265.8	253.2	116.3	307.8	117.5	156.2	106.4	226.3	134.1	193
O	36.8	60.4	0.3	52.0	98.2	7.2	46.6	-	48.0	42.0	53.4	35.5	22.6	
	64.0	20.8	56.7	44.4	20.0	2.2	0.3	10.7	6.9	17.6	18.3	1.8	12.2	
	62.0	44.2	11.9	10.5	2.9	-	4.1	4.0	12.5	78.4	-	21.6	17.7	
	162.8	125.4	68.9	106.9	121.1	9.4	51.0	14.7	67.4	138.0	71.7	58.9	52.5	82
N	-	-	-	-	-	9.6	14.1	-	-	-	-	-	-	
	-	-	1.3	-	-	-	-	12.9	-	-	-	0.2	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	
	-	-	1.3	-	-	9.6	14.1	12.9	-	-	-	0.3	-	3
Tot.	1171	1128	881	1193	1197	993	1091	1034	1101	1124	1194	898	1181	1116

Tableau CO.5. Fort Archambault. Fluviométrie décadaire.

	Pr	Pc	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>7</sub>	x <sub>8</sub>	x <sub>9</sub>	x <sub>10</sub>	x <sub>11</sub>	x <sub>12</sub>	x <sub>13</sub>	x <sub>14</sub>
1951	203	205	137	110	251	318	178	163	14	6	5	957	68	62	152	136
1952	162	142	37	106	150	389	315	125	11	3	5	935	85	44	145	106
1953	166	123	112	155	104	241	175	69	13	6	4	675	52	70	136	87
1954	275	209	107	168	285	423	103	107	14	6	5	1075	77	11	107	65
1955	300	211	256	125	196	234	266	121	17	9	5	1112	65	3	82	82
1956	254	142	65	135	185	312	253	19	11	5	3	811	68	19	152	139
1957	402	267	250	116	215	328	116	65	14	9	2	911	65	99	80	80
1958	290	133	140	110	189	257	308	28	12	5	4	801	67	28	205	127
1959	223	43	219	131	316	250	118	67	14	8	3	978	70	67	148	112
1960	575	373	157	146	199	325	156	138	14	6	5	886	63	78	159	64
1961	226	-	170	229	347	251	106	72	12	6	3	933	78	72	190	31
1962	414	165	124	95	140	240	226	59	12	5	4	736	61	23	137	34
1963	515	244	285	169	249	277	134	53	16	10	3	1078	67	53	36	36
	308	174	158	138	217	296	189	83,5	13,4	6,5	3,9	914	68,2	48,4	133	84,5

Tableau CO.6. Productions réelles (Pr), corrigées (Pc) et périodes humides (x<sub>1</sub> à x<sub>14</sub>).

3.3.2.2. Ajustement au Découpage Phéno-Climatique. Cette opération envisagée dans la conclusion du chapitre "Bilan Hydrique" a pour objectifs :

- de tester la validité du procédé de séparation, dans la fluctuation globale, de celle qui est d'origine climatique.

- de mettre en évidence les réactions de la culture aux facteurs climatiques durant les phases successives du développement.

Pour cette opération, tout groupement de variables, qu'elles soient de nature phé- nologique ou purement climatique, est légitime pourvu qu'il permette d'approcher les 100% de la fluctuation supposée d'origine climatique.

Dans le Tableau CO. 8 sont présentés les coefficients de régression relatifs aux variables considérées isolément ou en combinaisons, avec les coefficients de corrélé- tion et de détermination simples ( $r$ ,  $r^2$ ) et multiples ( $R$ ,  $R^2$ ).

Il est bien certain que des régressions linéaires ne rendent pas toujours compte véritablement des phénomènes. Aussi ne constituent-elles qu'une première approche. Mais le temps disponible pour cette étude n'a pas permis de passer aux régressions cur- vilinéaires. Cependant les résultats de cette première approche sont trop logiques, pour qui connaît bien le cotonnier et sa culture, pour n'avoir pas de signification. Des procédés permettant de passer des régressions linéaires aux régressions curvili- néaires sont décrits par Ezékiel et Fox (11), et une intéressante application dans le domaine agroclimatique en a été faite récemment par Gangopadhyaya et Sarker (16), mais en 1925 par exemple Bradford (7) les utilisait déjà.

Ces réserves étant faites, l'examen du Tableau CO. 8. fait apparaître essentiel- lement :

a) que les variables prises isolément auxquelles se rapportent les parts les plus fortes de la fluctuation d'origine climatique sont :

. la durée  $x_7$  de la "période humide", comme prévu, avec 20% de la fluctuation ( $r = 0.45$  et  $r^2 = 0.20$ ).

. la hauteur de pluie  $x_6$  de la "période post-humide", avec 16%, cette variable déterminant l'importance de la floraison utile.

. la hauteur de pluie  $x_4$  du mois d'Août, période de formation des boutons flo- raux.

Ces coefficients ne sont pas significatifs.

b) que les combinaisons à 2 variables les meilleures sont :

.  $x_7 + x_4$  (40%), déjà vus ci-dessus. Significatif à  $P = 0.05$ .

.  $x_7 - x_3$  (37%), où  $x_3$  est la hauteur d'eau du premier mois de végétation du co- tonnier, son coefficient négatif s'accordant bien avec le fait que en début de végéta- tion le cotonnier est extrêmement sensible à l'excès d'eau. Significatif à  $P = 0.05$ .

.  $x_7 - x_2$  (35%), où  $x_2$ , à coefficient négatif, est la hauteur d'eau du mois de Juin qui précède la date moyenne de semis, le 1/7 : cette corrélation négative pour- rait signifier que plus il pleut au mois de Juin plus les travaux de préparation du sol pour le cotonnier, alors que les plantations de cultures vivrières sont terminées, se font tardivement, aux dépens de la précocité du semis. Mais l'importance de cette va- riable diminue beaucoup dans les combinaisons à plus de 2 variables. Significatif à  $P = 0.05$ .

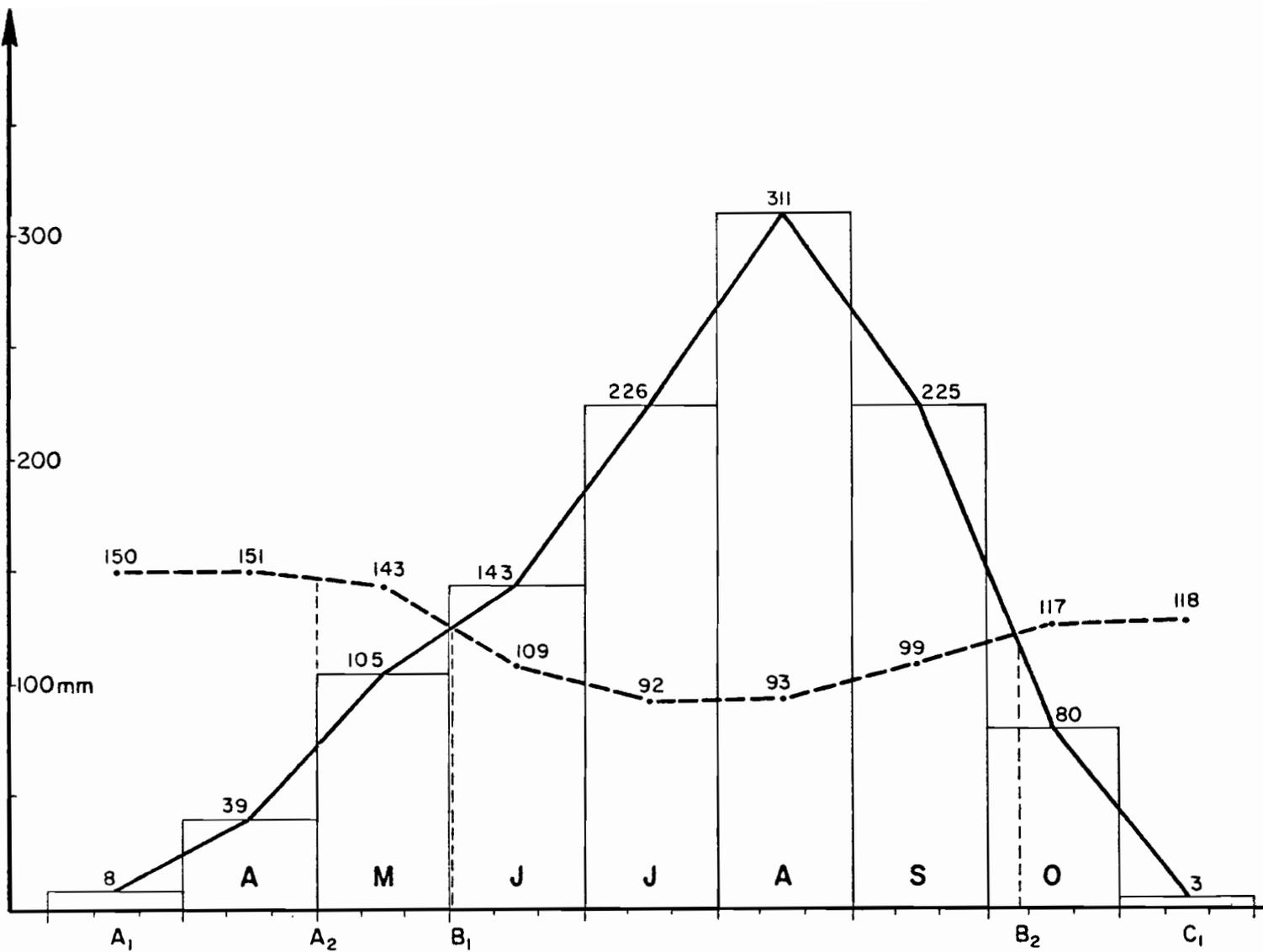


Fig CC.7. Diagrammes de pluviosité (trait continu) et d'évapotranspiration potentielle (trait discontinu) à Fort Archambault. A<sub>2</sub>: commencement de la période intermédiaire. B<sub>1</sub>: commencement de la période humide. B<sub>2</sub>: fin de la période humide:

b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	b <sub>6</sub>	b <sub>7</sub>	r	r <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup>
0,39	-0,75	-0,40	0,59	-0,06	0,90	25,31	0,22 -0,28 -0,29 0,38 -0,05 0,40 0,45	0,05 0,08 0,08 0,14 0,16 0,20		
0,35 0,50 0,59 0,31 0,31 -0,47	-0,88  -0,45 -0,70 -1,35 -0,65 -0,87	-0,61  -0,27  -0,44 -0,76 -0,45 -0,57	0,91  0,57  0,63  0,60 0,40 0,72	0,07  -0,46  -0,52  -0,10  -0,03 -0,05	0,93  0,84  0,95  0,67  0,89 0,66	41,27  27,01  30,65  29,21  27,23 20,65			0,39 0,46 0,56 0,23 0,46 0,51 0,33 0,45 0,40 0,46 0,59 0,49 0,43 0,52 0,61 0,38 0,46 0,63 0,40 0,46 0,54	0,15 0,22 0,31 0,05 0,22 0,26 0,10 0,20 0,16 0,22 0,35 0,24 0,18 0,27 0,37 0,14 0,21 0,40 0,16 0,22 0,29
0,49 0,67 -0,37 1,03 -0,20 -0,01	-0,37 -0,92 -0,79  -0,30 -0,36 -0,83	-0,49  -0,91 -0,53  -0,35 -0,46 -0,66	0,92  1,23  0,72 0,61  0,70 0,81			39,40  37,11 29,41  30,31 30,77 35,85			0,48 0,65 0,59 0,81 0,62 0,64 0,50 0,62 0,71 0,79	0,23 0,43 0,35 0,65 0,38 0,41 0,25 0,39 0,50 0,62
1,03 0,67 0,99 0,94	0,02	-0,92 -0,84 -0,91 -1,17	1,23 1,10 1,05 1,24	-0,43	0,53	16,44			0,81 0,83 0,84 0,85	0,65 0,68 0,70 0,72
0,91 0,60 0,81		-1,15 -1,10 -0,87	1,08 1,12 1,02	-0,40 -0,41	0,48 0,43	12,26 8,21			0,87 0,86 0,84	0,76 0,74 0,70

Fig CO. 8. Etude des groupements de variables.

.  $x_1 + x_4$  (31%), où  $x_1$  est la hauteur de pluie du début de la saison pluvieuse, antérieurement à la "période intermédiaire" moyenne. La signification serait que plus les pluies sont précoces, plus les travaux relatifs aux cultures vivrières le sont aussi et, en conséquence, ceux concernant la culture cotonnière. Mais il est vraisemblable aussi que plus les pluies sont précoces plus les surfaces plantées en cotonnier sont importantes : l'analyse comparée de données de rendement permettrait de séparer ces deux causes possibles. Presque significatif à  $P = 0.05$  : limite à 33%.

c) Parmi les combinaisons à 3 variables, viennent dans l'ordre décroissant :

- .  $x_1 - x_3 + x_4$  (65%). Significatif à  $P = 0.01$  (limite à 53%).
- .  $x_1 - x_2 + x_4$  (43%). Significatif à  $P = 0.05$  (limite à 36%).
- .  $x_1 - x_4 + x_7$  (41%). Significatif à  $P = 0.05$

Le fait d'ajouter  $x_1$  à  $x_4 + x_7$  n'apporte que 1% de plus, la durée de la "période humide" étant fortement corrélative de la précocité des pluies.

d) Parmi les combinaisons à 4 variables :

.  $x_1 - x_3 + x_4 - x_5$  (72%), où  $x_5$  représente la hauteur de pluie durant le mois de Septembre, mois qui voit la partie la plus importante de la floraison et durant lequel les fortes précipitations déterminent une coulure des fleurs, d'où le signe négatif. Cette variable ajoute 27% à la combinaison :  $x_1 - x_3 + x_4$ . Significatif à  $P = 0.01$  (limite à 58%) et au-delà.

.  $x_1 - x_3 + x_4 + x_6$  (70%), où  $x_6$  représente les pluies de la "période post-humide" qui déterminent l'importance de la floraison utile. Cette variable ajoute 5% à la combinaison :  $x_1 - x_3 + x_4$ . Significatif à  $P = 0.01$  et au delà.

.  $x_1 - x_3 + x_4 + x_7$  (68%), où  $x_7$ , durée de la "période humide", se substitue à  $x_5$  et  $x_6$ . Significatif à  $P = 0.01$  et au-delà.

e) Parmi les combinaisons à 5 variables :

.  $x_1 - x_3 + x_4 - x_5 + x_6$  (76%), où  $x_6$  apporte encore 4%. Significatif à  $P = 0.01$  (limite à 64%) et au-delà.

.  $x_1 - x_3 + x_4 - x_5 + x_7$  (74%), où  $x_7$  apporte 2%. Significatif à  $P = 0.01$  et au-delà.

.  $x_1 - x_3 + x_4 + x_6 + x_7$  (70%), où  $x_7$ , durée de la "période humide", n'apporte rien quand la variable  $x_6$  représentant les pluies des mois d'Octobre + Novembre est présente, ce qui est tout à fait normal. Significatif à  $P = 0.01$ .

Finalement, la combinaison d'une variable climatique  $x_1$ , de 3 variables phénologiques  $x_3, x_4, x_5$ , et d'une variable qu'on peut dire phéno-climatique  $x_6$ , permet d'expliquer 76% (coefficient de corrélation  $r = 0.87$ ) de la fluctuation supposée d'origine climatique, ce qui peut être considéré comme excellent.

Il y a lieu de remarquer qu'il serait possible de gagner encore un certain nombre de points en raffinant, par exemple :

- en passant aux régressions curvilinéaires chaque fois qu'elles le sont.

- en faisant intervenir, dans chaque période considérée, non plus seulement la hauteur de pluie mais le bilan : pluie - évapotranspiration potentielle ou le rapport  $R/E_T$  de ces deux variables.

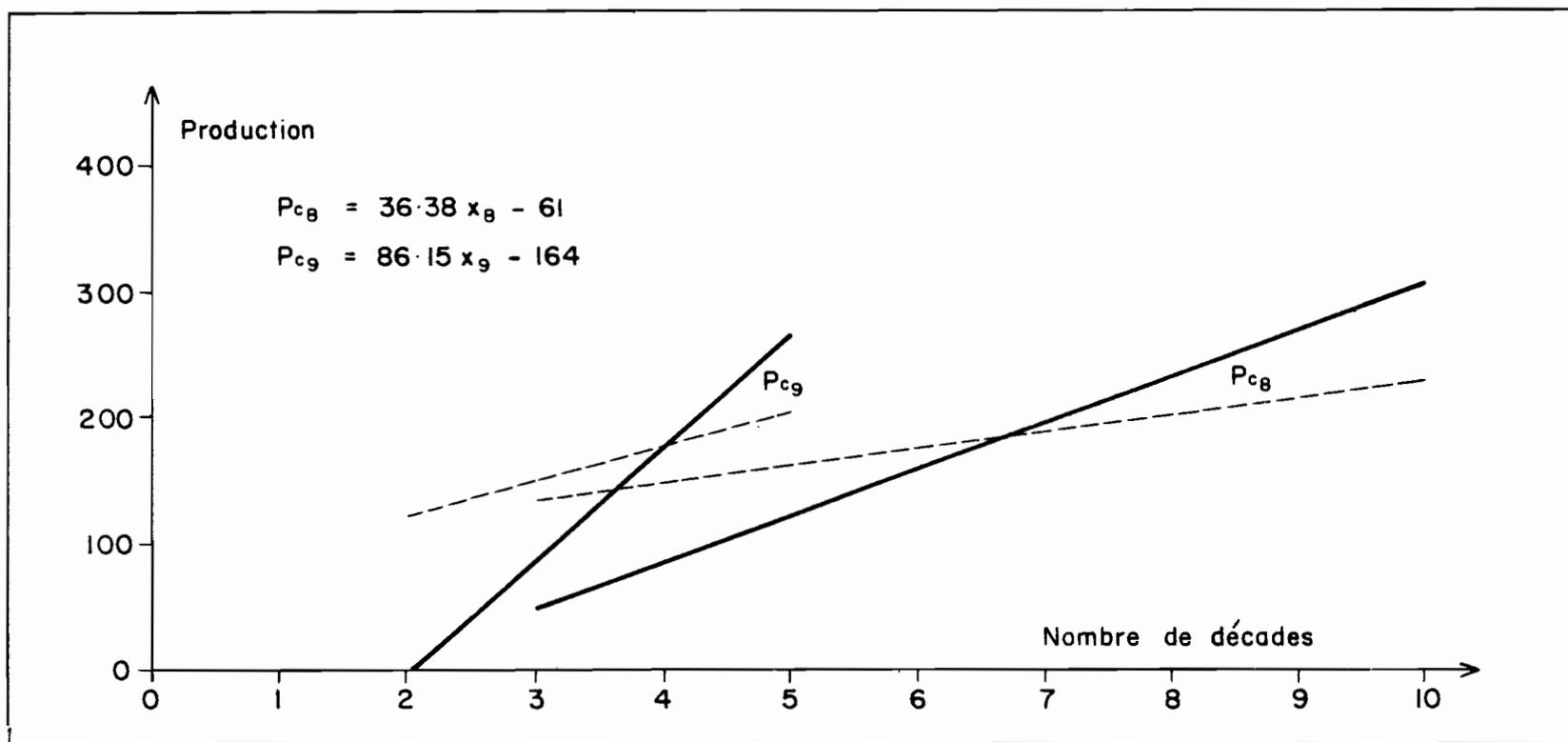


Fig CO. 9. - Abscisses :  $X_8$  et  $X_9$ , qui définissent la "période humide" en durée et "en position".

- Ordonnées : valeurs de production cotonnière à Fort Archambault.

Les lignes de régression, linéaires en 1ère approche (trait discontinu), le restent en 2ème approche (trait continu). La pente plus forte de la droite  $P_{c9}$  indique qu'une variation de la durée de la "période humide" en fin de saison a sur la production une incidence plus forte qu'une variation de même importance en début de saison.

- en opérant sur des variables glissantes de 3 décades pour trouver l'arrangement qui correspondrait le mieux au cycle de végétation moyen réel du cotonnier dans le secteur de Fort-Archambault, dont on a fixé le début approximativement au 1/7.

- en considérant d'autres variables climatiques comme le rayonnement, la température, le rapport de ces deux facteurs, une expression de l'évapotranspiration instantanée maximale, les périodes de sécheresse définies en durée et en intensité....

- en considérant aussi des variables phénologiques plus fines, décomposant par exemple les périodes de formation des boutons floraux, des fleurs et des capsules.

- en opérant, dans le cas de données de production comme ici, sur des données corrigées à partir des moyennes glissantes (voir ci-dessus) et non à partir de la droite moyenne.

Une partie enfin de la fluctuation résiduelle inexpliquée peut provenir de l'imperfection des variables climatiques utilisées. On a pris par exemple ici, pour expression de la pluviosité de tout le secteur de Fort-Archambault, la pluviométrie de ce seul poste, alors que la moyenne des relevés de tous les postes pluviométriques du secteur eût été plus représentative.

3.3.2.3. Ajustement au Découpage Climatique. Les variables résultant de ce découpage sont toutes de nature strictement climatique. Ce sont celles qui ont été énumérées au chapitre "Bilan Hydrique" et notées ci-dessus de  $x_7$  à  $x_{14}$ .

a) Il faut observer que la variable  $x_7$  caractérise la "période humide" en durée mais non pas en position. Une "période humide" de 10 décades par exemple n'aura pas sur la productivité de la culture la même incidence si elle commence au 1/6 ou au 1/7. Dans le cas des mils et sorghos photopériodiques, il nous était possible de fixer la position de cette période, c'est à dire son début et sa fin, par rapport à un point origine fixe, événement à la fois phénologique et climatique, qui est la date d'épiaison, sensiblement toujours la même à une même latitude, indépendamment de la date du semis.

Pour une variété non photopériodique (cas des variétés de cotonnier), dont la floraison ne dépend que de la somme des températures et donc de la date de semis variable, il n'y a pas d'origine fixe de nature à la fois phénologique et climatique. Mais on peut imaginer de trouver une origine de nature purement climatique dont la position ait un caractère de généralité quasi absolu. Ce peut être par exemple le mois en moyenne le plus pluvieux, qui est le mois d'Août dans toute l'aire d'investigation. A partir du centre ou des extrémités de ce mois pris pour origines, on peut définir les positions du début et de la fin de la "période humide", comme on l'a fait ci-dessus en définissant les variables  $x_8$  et  $x_9$ .

Le Tableau CO. 10 montre que si on caractérise la "période humide" par ces deux variables et non plus par  $x_7$  seulement, le coefficient de détermination passe de 0.20 à 0.26. On a ainsi gagné 6 points, mais avec l'inconvénient d'une variable supplémentaire. Si, par souci de vérification, on ajoute  $x_7$  à  $x_8 + x_9$ , on obtient toujours  $R^2 = 0.26$ .

Finalement, si à ces deux variables,  $x_8$  et  $x_9$ , on associe  $x_{10}$ ,  $x_{11}$ ,  $x_{12}$  et  $x_{13}$  ( $x_{14}$ , pluviosité globale annuelle, n'apportant rien de plus), le coefficient de détermination atteint tout juste 0.45 (correspondant à un coefficient de corrélation  $R = 0.67$ , presque significatif à  $P = 0.05$ ). Ces 6 variables assumeraient donc moins de la moitié de la fluctuation supposée d'origine climatique. En raffinant, comme déjà vu ci-dessus, il est probable qu'on dépasserait 50% et peut-être même atteindrait-on 60%, mais au prix d'un grand nombre de variables à faire entrer dans les équations de régression. De ce point de vue, la recherche devrait s'orienter vers la définition d'expressions climatiques ayant, comme ce fût le cas avec la notion d'évapotranspiration potentielle, un grand pouvoir de synthèse.

Il est intéressant de noter aussi que durée et position de la "période humide" assurement 26% de la fluctuation d'origine climatique, contre 3% seulement pour la pluviosité globale de l'année ( $x_{14}$ ).

b) Les lignes de régression relatives aux variables  $x_8$  et  $x_9$ , qui représentent les limites de la "période humide", devraient logiquement comporter un maximum, donc être curvilignes. Or si on tente de passer des droites de 1ère approximation (droites en tirets de la Fig CO. 9) à des courbes, on constate que dans les limites de l'observation celles-ci peuvent encore être assimilées à des droites (en trait plein, même figure). Ces droites,  $Pc_8$  et  $Pc_9$ , montrent bien, par leurs pentes comparées, qu'un même allongement de la "période humide" aura une incidence bien plus notable sur la production s'il se produit en fin de "période humide" plutôt qu'au début. Si on avait traité des données de rendement, cet effet eût vraisemblablement été encore plus accusé. Au contraire, si la date du semis se trouvait plus précoce d'un mois, la pente de  $Pc_9$  diminuerait, les pluies de fin de saison devenant moins importantes, tandis que celle de  $Pc_8$  augmenterait. On voit ainsi tout le parti qu'il serait possible de tirer de pareilles études.

3.3.3. Fluctuation dans l'Espace. On a déjà dit, concernant une culture dans une aire déterminée, qu'il pourrait être intéressant d'analyser parallèlement, en fonction des mêmes facteurs du milieu, d'une part les données de rendement (donc d'un point de vue purement technique) et d'autre part les données de production (d'un point de vue plus économique, la surface plantée ne dépendant pas que de facteurs techniques).

Dans une telle perspective, les facteurs à considérer sont tous les facteurs quantitatifs du milieu écologique : édaphiques, climatiques, biologiques, techniques (humains).

Pour être complète, enfin, l'analyse doit traiter les fluctuations respectives du rendement et de la production, d'une part dans le temps (comme il vient d'être fait pour les données de production cotonnière de Fort Archambault) pour chaque région particulière de l'aire, d'autre part dans l'espace au cours d'une même période.

$b_7$	$b_8$	$b_9$	$b_{10}$	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{14}$	$r$	$r^2$	$R$	$R^2$
25,31	12,45	27,00	0,14	-3,36	0,27	-0,96	0,14	0,45 0,26 0,29 0,19 -0,29 0,08 -0,46 0,16	0,20 0,07 0,08 0,03 0,08 - 0,21 0,03		
41,89	22,48 -19,20 21,81 31,42 19,97 21,89 4,65	45,15 3,76 45,17 56,02 44,99 54,48 37,50	-0,18	-2,65	0,79	-0,95	-0,12			0,51 0,51 0,51 0,55 0,56 0,56 0,60	0,26 0,26 0,26 0,30 0,31 0,31 0,36
	41,17	86,15	-0,70	6,30	0,78	-1,24				0,67	0,45

Tableau CO. 10. Caractérisation de la période humide.

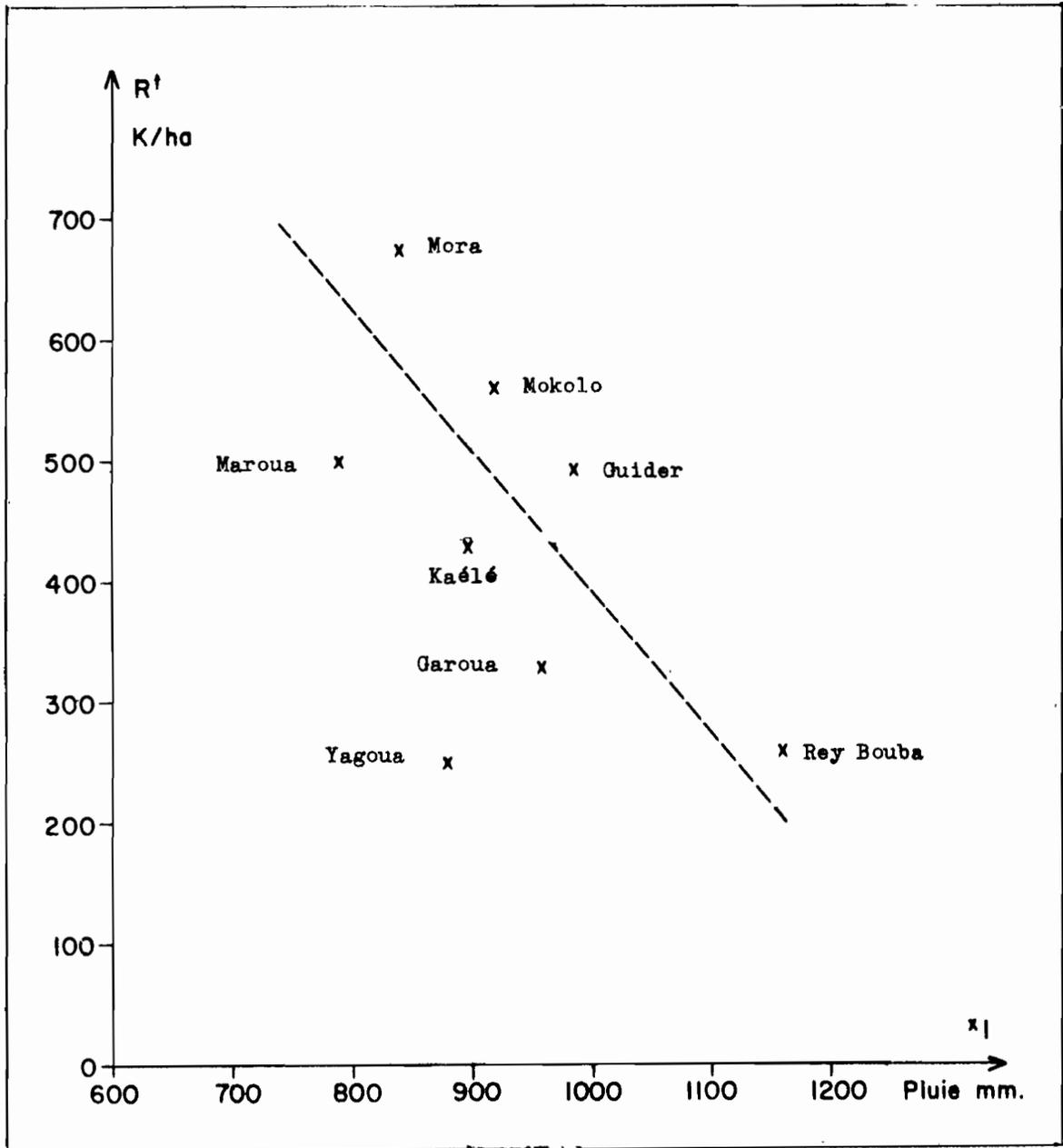


Fig CO. 11.  $X_1$  : pluviosité moyenne -  $R^t$  : rendement moyen.

En régression simple, le rendement apparaît négativement lié à la pluviosité (ligne discontinue). Avec d'autres variables indépendantes, latitude, niveau de fertilité du sol, niveau de technicité, la ligne de régression prend une pente pratiquement nulle.

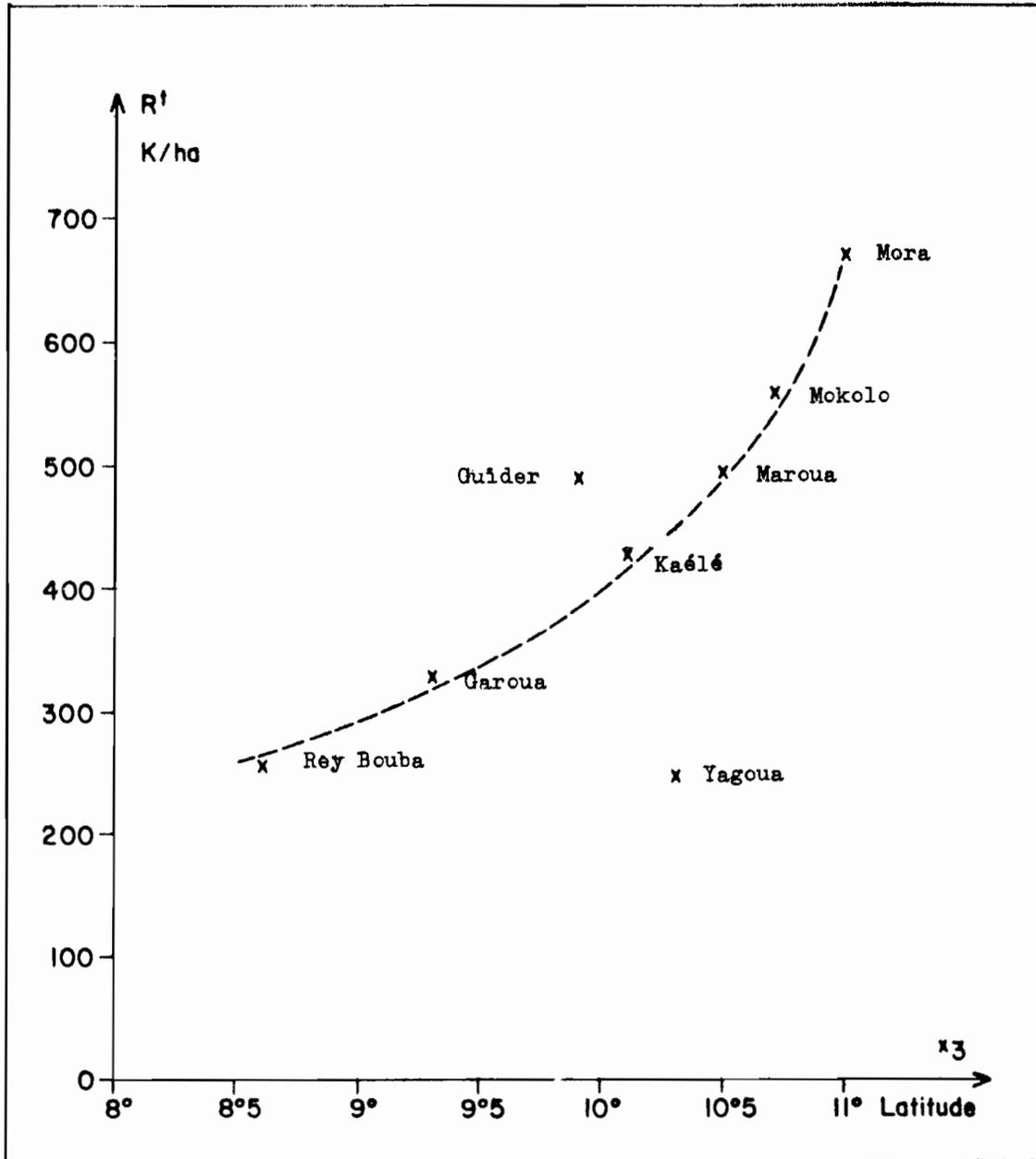


Fig CO. 12.. Le rendement est en régression curvilinéaire positive avec la latitude. Avec d'autres variables indépendantes, pluviosité, fertilité du sol et niveau de technicité, la ligne de régression devient linéaire avec une pente pratiquement nulle.

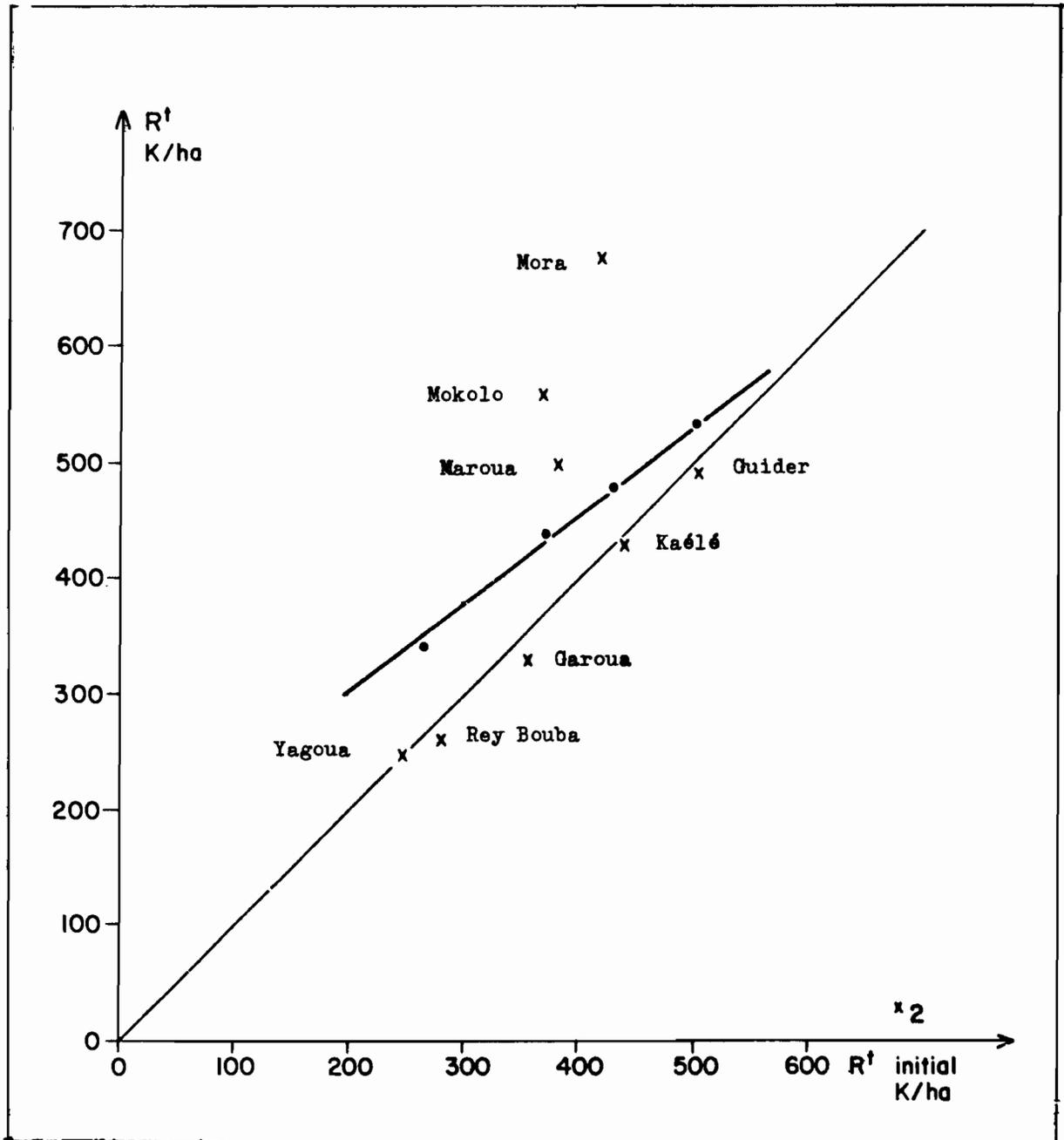


Fig CO. 13.  $X_2$  : rendement initial ou indice de fertilité du sol.

En régression multiple (pluviosité, latitude, fertilité du sol et niveau de technicité), le rendement est linéairement relié au niveau de fertilité du sol. Les secteurs situés le long de la bissectrice des axes de coordonnées sont ceux dont les effets du niveau de technicité sur le rendement sont restés faibles.

Des données très fines de rendement et de production, aimablement communiquées par la Compagnie Française pour le Développement des Textiles (C.F.D.T) pour 8 régions cotonnières du Nord Cameroun, se prêteraient bien à ce genre d'analyse.

Cependant, faute de posséder ici tous les éléments qui caractérisent le milieu, on se contentera de montrer, à titre expérimental, comment il pourrait être envisagé, dans une première approche, de séparer, dans la fluctuation spatiale du rendement, les parts attribuables aux composantes principales de ce milieu.

La variabilité globale, dans l'espace, du rendement moyen (sur 12 ans ici) est essentiellement fonction :

- des facteurs climatiques et des phénomènes biologiques associés, comme le parasitisme (dont on connaît toute l'importance pour le cotonnier) et l'enherbement.
- des facteurs édaphiques dont la résultante est le niveau de fertilité du sol.
- du niveau de technicité ou, plus exactement, de ses effets.

3.3.3.1. Facteurs Climatiques. Le seul facteur climatique dont on possède pour l'instant les données sans lacunes est la pluviosité. Le rendement moyen se présente, en première approximation (corrélation brute) et vraisemblablement du fait du parasitisme, en corrélation négative ( $r = - 0,53$  et  $r^2 = 0,28$ ) avec la pluviosité moyenne  $x_1$  pour les 12 ans, de 1952 à 1963 (Fig CO. 11).

Les données sont malheureusement insuffisantes concernant les autres facteurs du climat : éclaircissement, température, déficit de saturation, vent, qui ont sur le rendement une incidence directe (déterminant la vitesse du développement et l'intensité de la photosynthèse nette) ou indirecte (par l'effet de l'évapotranspiration sur la photosynthèse brute). Mais, comme d'ailleurs la pluviosité, ces facteurs sont assez étroitement liés, suivant des gradients, à la latitude. Celle-ci,  $x_3$ , se montre (Fig CA.4.12) en corrélation positive avec le rendement moyen ( $r = 0,75$  et  $r^2 = 0,56$ ) significatif au risque 5%), dans les limites de l'observation ( $8^{\circ}5$  à  $11^{\circ}$  de latitude Nord).

Si on compose  $x_1$  et  $x_3$ , les coefficients de corrélation et de détermination multiples avec le rendement moyen sont respectivement égaux à 0,79 et 0,62 (significatif à 5%), comme on le voit au Tableau CO. 15 où sont rassemblés tous les coefficients de régression, corrélation et détermination. Il faudrait connaître au moins le gradient de température pour démêler ce qui est imputable de façon nette, d'une part à la pluviosité et d'autre part à l'ensemble des autres facteurs climatiques liés à la température.

3.3.3.2. Facteurs édaphiques. Il est beaucoup plus délicat d'estimer les effets du facteur "fertilité du sol", c'est à dire de les séparer de ceux du climat et de ceux du niveau de technicité. Pourtant, considérons le rendement initial moyen sur les 3 premières années par exemple (1952 à 1954). Le départ de la culture cotonnière étant supposé dater de la même année (1952) dans les 8 régions, on admettra que le niveau de technicité, encore bas après 3 ans de pratique, n'a pu différencier les rendements moyens de ces 3 années de façon significative (contrairement à ce qui se passe par la suite).

D'autre part on a quelque chance d'éliminer, sur une période aussi courte, dans les effets du climat, au moins ceux relatifs aux facteurs qui varient fortement d'une année à l'autre, la pluviosité principalement (avec la part du parasitisme qui lui est étroitement liée).

Soit  $x_2$  ce rendement initial moyen (Tableau CO. 14). Pour constituer un "indice de fertilité" valable (approximatif et tout relatif évidemment), il devra se montrer en corrélation faible, d'une part avec la pluviosité moyenne  $x_1$  des 3 premières années,

REGIONS	R <sup>t</sup>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	z
REY-BOUBA	260	1160	280	8 <sup>0</sup> 6	1005	3
GAROUA	330	955	355	9 <sup>0</sup> 3	925	6
GUIDER	495	985	505	9 <sup>0</sup> 9	1125	14
KAELE	430	895	440	10 <sup>0</sup> 1	975	8
YAGOUA	250	880	245	10 <sup>0</sup> 3	1085	7
MAROUA	500	790	385	10 <sup>0</sup> 5	790	30
MOKOLO	560	920	370	10 <sup>0</sup> 7	1000	44
MORA	675	840	420	11 <sup>0</sup> 0	790	67
Moyenne	437	928	375	10 <sup>0</sup> 0	962	22.4

Tableau CO. 14. Données relatives à la production cotonnière au Nord-Cameroun

	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	r	r <sup>2</sup>	R	R <sup>2</sup>
RENDEMENT	-0.70	1.23	143.81	-0.53	0.28	0.78	0.61
				0.69	0.48		
	-0.51	1.06	221.93	0.75	0.56		
	0.63			0.90	112.84		
	0.90	112.84			0.89	0.79	
	0.56	0.91	185.12			0.92	0.85
PENTE : z	-0.11	0.08	22.66	-0.52	0.27	0.55	0.30
				0.30	0.09		
	-0.10	0.05	37.34	0.77	0.59		
	0.12			0.02	22.06		
	0.02	22.06			0.77	0.60	
	0.12	0.01	36.73			0.83	0.68

Tableau CO. 15. Coefficients de régression, corrélation et détermination relatifs à l'analyse de la production cotonnière au Nord Cameroun.

ce qui est bien le cas ( $r = 0.09$ ) et d'autre part aussi avec la latitude  $x_3$  considérée (voir ci-dessus) comme indice climatique global : la valeur  $r = 0.32$  est encore faible, les variabilités de  $x_2$  et  $x_3$  ne paraissant liées que pour 10% ( $r^2 = 0.10$ ).

Cet indice de fertilité  $x_2$  se montre alors (Fig CO.13) en corrélation positive ( $r = 0.69$  et  $r^2 = 0.48$ , presque significatif au risque 5%) avec le rendement moyen sur 12 ans. Si on le compose avec les variables  $x_1$  (pluviosité) et  $x_3$  (latitude), on obtient :

	<u>R</u>	<u>R<sup>2</sup></u>	
- $x_1 + x_2$	0.78	0.61	Significatif au risque 5%
- $x_3 + x_2$	0.89	0.79	Significatif au risque 1%
- $x_1 + x_2 + x_3$	0.92	0.85	Significatif au risque 1%

Il serait possible aussi de calculer les coefficients de corrélation et de détermination nets pour chacune de ces 3 variables.

3.3.3.3. Facteurs techniques. Enfin le rendement est aussi fonction du niveau de technicité. Mis à part, la dernière année (1963) et sur un total de 72.227 has cultivés, 461 has traités aux insecticides, 3707 has fumés (au fumier de ferme ou au tourteau) et 3595 has buttés, il est probable que le niveau de technicité est sensiblement équivalent dans les 8 régions. L'encadrement est en effet assuré ou contrôlé partout par le même organisme (la C.F.D.T., qui opère depuis le début) et les variétés d'Allen diffèrent peu en productivité.

Par contre, il y a tout lieu de penser que les effets, sur le rendement, de ce même niveau de technicité, varient d'une région à l'autre selon les conditions écologiques. Par exemple, une amélioration technique aura une incidence favorable moindre dans une région infestée de parasitisme (sauf protection insecticide).

Or le niveau de technicité et ses effets peuvent être évalués, dans une région déterminée, par la pente moyenne d'accroissement du rendement au cours des années. Cette pente  $z$ , qu'on dénommera "indice de technicité", varie de la valeur 3 à Rey Bouba à la valeur 67 à Mora (Tableau CO. 14). On constate qu'elle ne paraît pas dépendre du rendement initial, ou "indice de fertilité". Par exemple, on a porté sur une même figure (Fig CO. 19) les graphiques relatifs à Mora et à Guider, régions qui ont pour rendement initial respectivement 420 et 505 et pour pente 67 et 14. De même, pour un rendement initial égal à 360-370, Mokolo, Maroua et Garoua ont respectivement pour pente : 44, 30 et 6. Pour l'ensemble des 8 régions, la corrélation "technicité - fertilité" est très faible :  $r = 0.30$ .

Au contraire l'indice de technicité paraît plus fortement lié à la pluviosité  $x_1$  ( $r = - 0.52$ ,  $r^2 = 0.27$ , non significatif) et à la latitude  $x_3$  ( $r = 0.77$ , et  $r^2 = 0.59$ , presque significatif au risque 2%). En composant  $x_1$  et  $x_3$ , on obtient :  $R = 0.83$  et  $R^2 = 0.68$  (significatif au risque 2%) et le fait d'ajouter  $x_2$  (indice de fertilité) n'améliore pas cette dernière corrélation. Cette corrélation assez étroite de l'indice de technicité avec les facteurs climatiques peut s'expliquer par leur incidence sur le parasitisme et l'enherbement.

Mais 30% environ (soit :  $1 - 0.68$ ) de la variabilité de l'indice de technicité  $z$  ne peuvent être rapportés aux variables considérées jusqu'ici. Il est possible qu'une part du parasitisme échappe au déterminisme climatique et se rapporte à cette variabilité résiduelle, encore que cette part, si elle existe, devrait être associée à  $x_2$  (rendement initial). Il faut remarquer aussi que les lignes de régression de  $z$  sur  $x_1$  et sur  $x_3$  ne sont pas des droites (Fig CO. 17 et CO. 18) et qu'ainsi les coefficients de corrélation et de détermination sont sous-estimés. Enfin, pour caractériser la pluviosité et la latitude de régions qui s'imbriquent en latitude de façon très irrégulière (parce qu'il s'agit de régions administratives), on s'est contenté de se référer à la pluviosité et à la latitude du centre administratif.

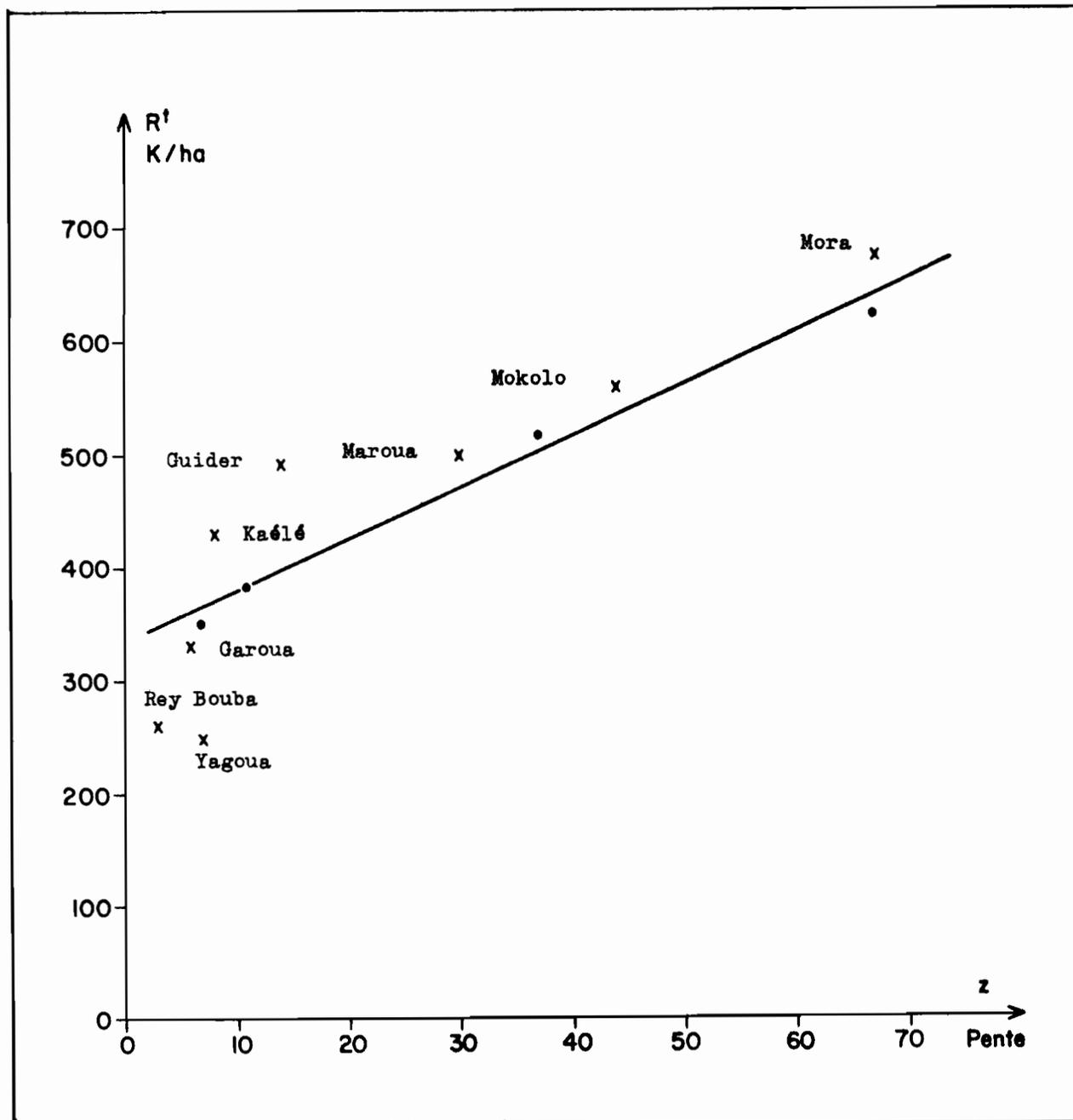


Fig CO. 16.  $Z$  : pente moyenne d'accroissement du rendement ou indice du niveau de technicité.

Dans les limites de l'observation le rendement moyen peut être considéré comme en relation linéaire avec le niveau de technicité.

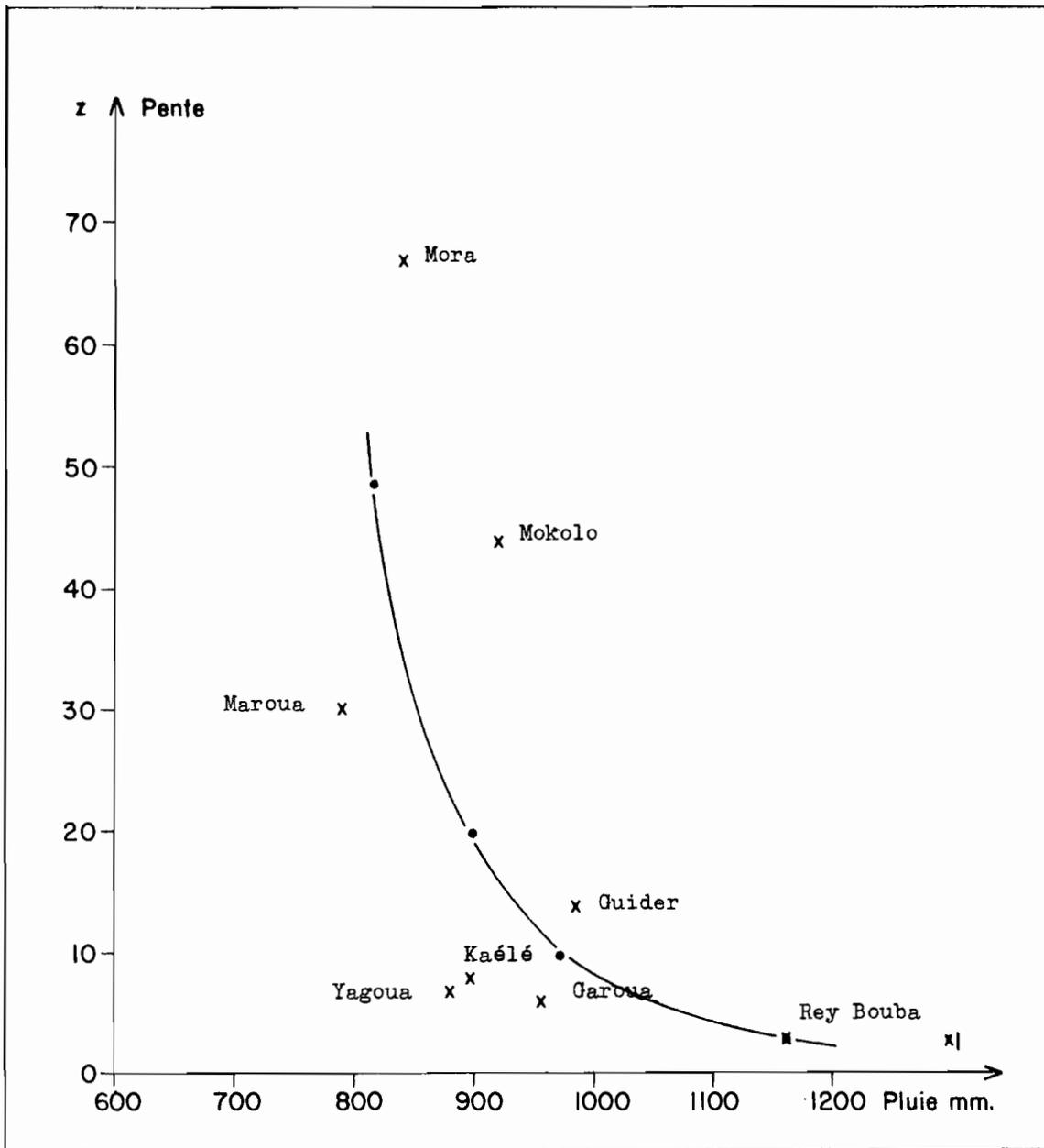


Fig CO.17. Z : pente moyenne d'accroissement du rendement ou indice de technicité. L'indice de technicité est en relation curvilinéaire négative avec la pluviosité.

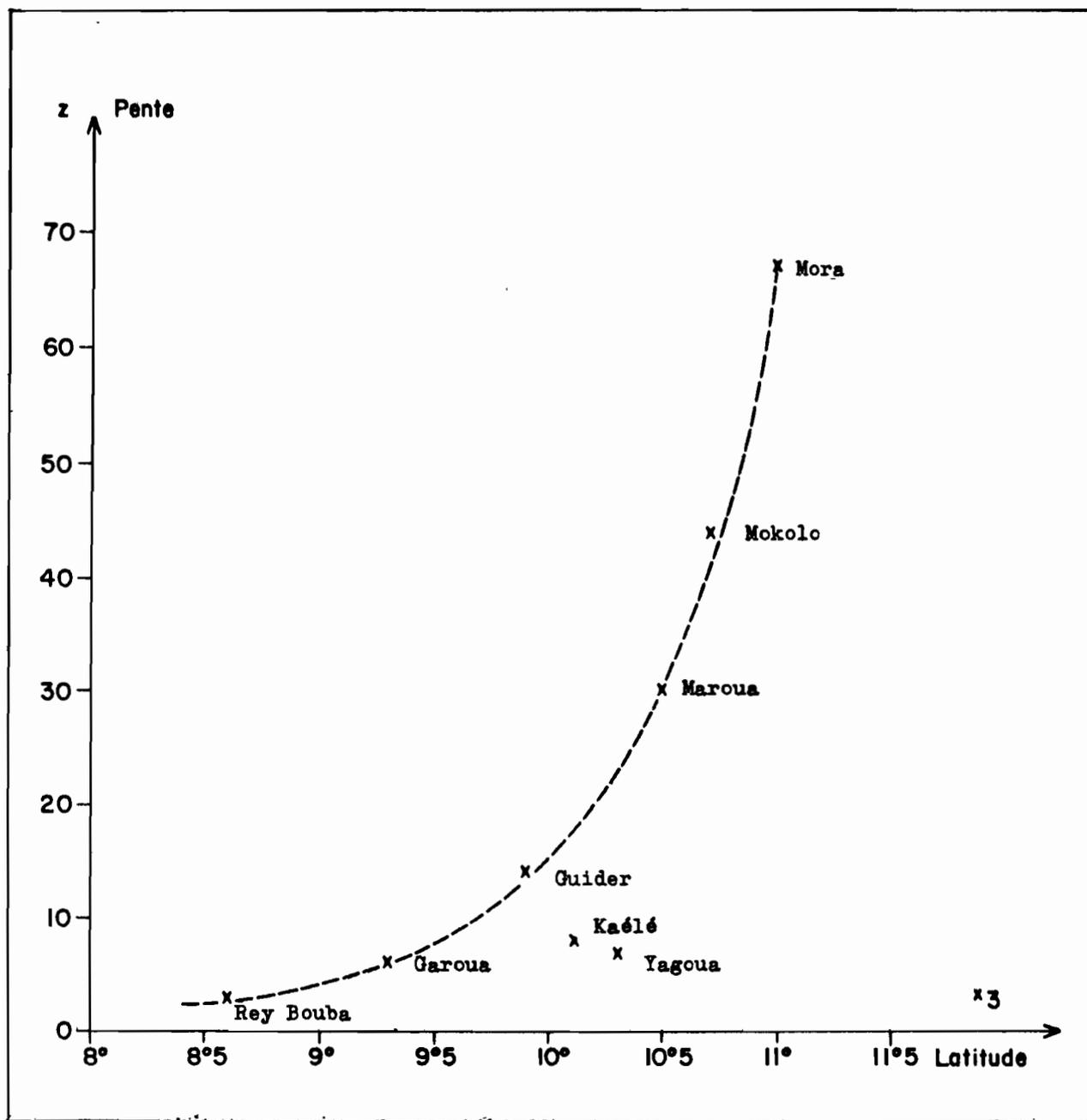


Fig CO. 18. Z : pente moyenne d'accroissement du rendement ou indice de technicité.  
L'indice de technicité est en relation curvilinéaire positive avec la latitude.



Fig CO.19. Fluctuation annuelle du rendement du cotonnier à Mora et à Kaélé, au Nord Cameroun. La droite moyenne d'augmentation du rendement est une mesure (indice de technicité) de l'amélioration du niveau de technicité ou tout au moins de ses effets. Pour un niveau de fertilité du sol apparemment équivalent, cette pente ou indice est très forte à Mora et très faible à Kaélé, en rapport avec la pluviosité d'une part et, de l'autre, avec la latitude considérée comme indice climatique.

3.3.3.4. Conclusion. Quoiqu'il en soit, on peut essayer de classer comme suit les 8 régions cotonnières du Nord Cameroun :

- Fertilité bonne, parasitisme modéré : Mora (rendement initial élevé, pente forte).

- Fertilité bonne, parasitisme important : Guider et Kaélé (rendement initial élevé, pente faible).

- Fertilité médiocre, parasitisme modéré : Maroua et Mokolo (rendement initial moyen, pente moyenne à forte).

- Fertilité faible à médiocre, parasitisme important : Garoua, Yagoua et Rey Bouba (rendement initial moyen à bas, pente faible).

Les figures CO.12 et CO.18 ne sont valables que pour le Nord Cameroun, du fait de l'inclinaison des isohyètes sur les parallèles (voir Fig RA.1.1. et RA.1.2.). Il serait intéressant de voir comment l'indice de technicité z varie en fonction de la latitude pour d'autres régions de l'aire d'investigation, au Niger, en Haute Volta et au Mali.

3.3.3.5. Vérification. Cette analyse effectuée par l'auteur en parfaite ignorance du milieu naturel de l'aire de culture cotonnière au Nord Cameroun a été communiquée pour vérification à M. Tourancheau, directeur technique de la C.F.D.T. Ses observations essentielles sont reproduites ci-après :

a) "On a toujours admis empiriquement, au Cameroun du moins ...., que les années sèches étaient les années à bons rendements. En fait, ce qui paraît jouer est un bon ensoleillement et des températures élevées en début de végétation, un bas niveau de précipitations en Août et Septembre évitant l'engorgement du sol et permettant des sarclages efficaces. Une partie de la corrélation positive entre sécheresse et rendement est donc indirecte ..."

b) "Il y a certes un parasitisme en étroite corrélation avec la durée de la saison des pluies mais, au Cameroun, il y a de plus une zone assez nettement plus touchée que les autres au Nord Est d'une ligne Kaélé-Bogo-Mora".

c) On admet, au Cameroun, un gradient de fertilité des sols décroissant du Nord au Sud, résultant :

- d'une pluviométrie croissante accélérant les phénomènes de lessivage et d'érosion.

- de phénomènes géologiques : sols sur alluvions de la cuvette tchadienne au Nord, pointements de roches basiques dans la région de Maroua".

d) "L'évolution des rendements dans le temps est le résultat de deux actions antagonistes :

- d'une part évolution du niveau des techniques culturales (date de semis, densité, entretien, variétés), sans parler engrais et traitements encore peu répandus.

- d'autre part, en sens contraire, extension des surfaces cultivées par mise en culture de terres à niveau immédiat de fertilité beaucoup plus bas que celui des premiers champs de coton ..."

e) "Notons que les plus faibles rendements du Sud Bénoué sont accentués par le fait que les vagues de remplacement des nouvelles variétés progressent du Nord au Sud et que, encore récemment, on cultivait dans ces régions (Touboro) des variétés diffé-

rentes de celles du Nord".

f) "Les régions cotonnières considérées dans l'étude coïncident avec le découpage administratif et ne correspondent pas toujours à des régions naturelles bien caractérisées. Ainsi, Mokolo du point de vue cotonnier représente deux zones bien distinctes à tous points de vue, la vallée du Mozgo au Nord est identique à la zone Mora et au Sud les vallées du Louti et du Boula sont jointives à Maroua. Toute la moitié Est de Kaélé est à rattacher à la zone Yagoua".

g) "Dans ces nouvelles limites, nous estimons :

- Zone Mora : fertilité bonne à très bonne - parasitisme faible.
- Zone Maroua : fertilité bonne - parasitisme faible.
- Zone Kaélé-Guider : fertilité moyenne - parasitisme moyen.
- Zone Yagoua - Garoua - Rey Bouba : fertilité faible à médiocre - parasitisme élevé, ce qui correspond assez exactement aux interprétations statistiques.

### 3.3.3.6. Discussion.

1) Les observations reproduites en (a) et (b) confirment assez bien l'analyse des effets du climat et de l'importance corrélatrice du parasitisme :

- Insolation et température augmentent bien avec la latitude, considérée ici comme "indice climatique", en même temps que diminue la pluviosité. L'importance attribuée à ces deux facteurs est d'autre part à rapprocher de l'étude des incidences, sur le rendement d'une culture, du rayonnement et de la température (chapitre "Complexe Héliothermique").

- Les remarques relatives à l'influence négative présumée des précipitations abondantes d'Août et Septembre sont à confronter aux conclusions de l'analyse dans le temps effectuée pour Fort Archambault (3.3.2.2.) : la production cotonnière y apparaissait en corrélation négative avec les pluies de Juillet et avec celles de Septembre, mais en corrélation positive avec celles d'Août. Il est bien évident cependant que la position dans le temps de la saison pluvieuse n'est pas la même à Fort Archambault et à Maroua par exemple et que la date de semis moyenne joue un rôle très important. Une analyse doit donc être faite dans chaque cas particulier, ce qui serait possible pour Garoua, Kaélé et Maroua, secteurs pour lesquels on dispose des données climatiques nécessaires, le rendement étant en outre connu maintenant sur 14 ans (1952-1965).

Enfin le traitement statistique des données de rendement a mis en évidence l'importance du parasitisme dans le secteur de Yagoua, en dépit de sa latitude ( $10^{\circ}$  à  $11^{\circ}$ ) sensiblement aussi élevée que celle des secteurs de Maroua et de Mokolo où le parasitisme est relativement faible. Le parasitisme dans le secteur de Yagoua se compare à celui des secteurs de Garoua ( $8^{\circ}5$  à  $10^{\circ}$ ) et de Rey Bouba ( $7^{\circ}5$  à  $9^{\circ}$ ) de latitude plus basse. Or le secteur de Yagoua se trouve justement situé à l'Est de la ligne Kaélé-Bogo-Mora.

2) Sans contestation possible, la partie de l'analyse relative à la fertilité des sols est la plus faible. Elle fait bien apparaître, comme le voudrait (c), une corrélation positive entre rendement initial ( $x_2$ , considéré comme "indice de fertilité") et latitude. Mais cette corrélation est très faible ( $r = 0.30$ ) et non significative. Cependant il semble bien qu'il y ait aussi un gradient Ouest-Est décroissant des valeurs du rendement initial. L'introduction dans l'équation de régression de ce rendement d'une variable "longitude" ferait donc vraisemblablement apparaître une meilleure corrélation avec la latitude.

D'autre part, si on connaissait le gradient de température (auquel sont étroitement liés les gradients d'insolation et de déficit de saturation), il serait possible de séparer de façon plus nette, dans la corrélation du rendement moyen avec la latitu-

de, ce qui est imputable respectivement au climat et au niveau de fertilité. Toute cette question demanderait de nouveaux développements.

3) Les remarques, en (d), concernant l'évolution des rendements dans le temps, sont en accord parfait avec ce qui a été dit, au paragraphe 4.3.3.1., des facteurs de variation à long terme. Cette variation peut être représentée par une droite moyenne ou par une ligne brisée de moyennes glissantes.

4) Finalement, si on considère le nouveau découpage proposé en (f), qui rapporte à Yagoua la moitié du secteur de Kaélé et qui répartit celui de Mokolo entre Mora et Maroua, les deux classements des secteurs pour la fertilité et le parasitisme ne sont vraiment en désaccord que pour Maroua (fertilité médiocre au lieu de bonne), Kaélé (fertilité bonne au lieu de moyenne) et Guider (fertilité bonne au lieu de moyenne et parasitisme important au lieu de moyen).

Une conclusion d'ordre général s'impose : les secteurs considérés sont trop vastes et donc trop hétérogènes. Les données de rendement devraient être établies pour des surfaces plus réduites présentant une certaine unité écologique (ce qui augmenterait aussi l'effectif de l'échantillon analysé). Il est vraisemblable qu'alors l'analyse statistique permettrait d'aller plus loin que l'observation seule dans la connaissance du déterminisme du rendement.

Bibliographie

- 1 - ANGELINI A. - L'association "Maïs-Coton" ou "Arachide-Coton" en Côte d'Ivoire. - Cot. et Fib. Trop., 18(2), 1963.
- 2 - AUBREVILLE A. - Climats, forêts et désertification de l'Afrique Tropicale. - 1949.
- 3 - BARGER et THOM. - A method for characterizing drought intensity in Iowa. - Agron. Jour., 41(1), 1949.
- 4 - BOULANGER J. - Sur la nécessité des semis de Juin en culture cotonnière pour le Centre-Est Oubangui. - Cot. et Fib. Trop., 11(1), 1956.
- 5 - BOULANGER J. - Les éléments du port du cotonnier Upland. - Cot. et Fib. Trop., 19(4), 1964.
- 6 - BOULANGER J., GUTKNECHT J. - Influences variétales et climatiques sur le rythme de floraison du Cotonnier. - Cot. et Fib. Trop., 10(1), 1955.
- 7 - BRADFORD B.S. - Relation between weather conditions and yield of Cotton in Louisiana. - Jour. Agr. Res., 30(11), 1925.
- 8 - BRAUD M., RICHEZ F. - L'importance de la date de semis pour la culture cotonnière de l'Ouest et du Nord de la Centrafrique. - Cot. et Fib. Trop., 18(2), 1963.
- 9 - Compagnie Française pour le Développement des Textiles (C.F.D.T.) - Etude des possibilités de développement de la production cotonnière en Haute Volta.  
  
Rapports pour la Haute Volta, le Mali, le Niger, le Nord Cameroun.
- 10 - EATON F.M. - Physiology of the Cotton plant. - Advances in agronomy.
- 11 - EZEKIEL M., FOX K.P. - Methods of correlation and regression analysis. Linear and curvilinear. - New York, Wiley, 1959.
- 12 - FISHER R.A. - Trans. Roy. Soc. London, B 213, 89-142, 1921.
- 13 - FOSTER W.D. - A study of weather factors affecting Cotton yields. North Carolina State College of Agriculture, 1949.

- 14 - FRANQUIN P. - Essais de comportements physiologiques et parasitaires en Moyenne Côte d'Ivoire. - Rapport IRCT, 1952.
- 15 - GALICHET P.F. - L'action du froid sur l'entrée en diapause chez la nymphe de *diparopsis watersi*. - Cot. et Fib. Trop., 17(3), 1962.
- 16 - GANGOPADHYAYA M., SARKER R.P. - Curvilinear study on the effect of weather on growth of sugar cane. - Ind. Jour. Meteor. Geoph. 15(2) 1964.
- 17 - HOROWITZ M. - Influence des conditions de milieu sur la formation et la chute des organes floraux chez le Cotonnier. - Cot. et Fib. Trop., 17(1 et 3), 1962.
- 18 - HUDSON J.P. - Variations in evaporation rates in Gezira Cotton fields. - Emp. Cott. Grow. Rev., 1957.
- 19 - Institute for Agricultural Research, SAMARU, Nigeria. - Reports.
- 20 - Institut de Recherche du Coton et des Textiles (I.R.C.T.) - Rapports et comptes rendus d'activité des Stations de N'TARLA et KOGONI au MALI, de BEBEDJIA et TIKEM au TCHAD, et des secteurs de HAUTE VOLTA et du NIGER.
- 21 - KING H.E. - Cotton yields and weather Northern Nigeria - Empire Cot. Grow. Rev., 1957.
- 22 - LAWES D.A. - Rainfall conservation and the yield of cotton in Northern Nigeria. - Empire Cot. Grow. Rev., 1962.
- 23 - LEUWERS A. - Pluviométrie et culture cotonnière au Nord Cameroun. - Cot. et Fib. Trop., 13(3), 1958.
- 24 - LEUWERS A. - Le département du Diamaré et la culture cotonnière. - Cot. et Fib. Trop., 18(2), 1963.
- 25 - MEGIE C. - Cycle de floraison et productivité du Cotonnier. - Cot. et Fib. Trop., 15(3), 1960.
- 26 - MEGIE C. - Pluviométrie, date de semis et productivité du Cotonnier dans la région de TIKEM. - Cot. et Fib. Trop., 18(2), 1963.
- 27 - RICHMONDS T.R. - How crop climate research contributes to Cotton improvement. - Econom. Botany, 16(4), 1962.
- 28 - SHAW L.H., DUROST D.D. - Measuring the effects of weather on agricultural output. Procedures for constructing weather indexes. - USDA, Farm Econ. Div., Econ. Res. Serv., 1962.
- 29 - VIGUIER P. - Note sur la production cotonnière non irriguée au SENEGAL. - Paris, 1953 - 6 p.
- 30 - WANG J.Y. - Agricultural meteorology. - Univ. of Wisconsin, Madison. 1963.



## Le Maïs CM

### 1. Généralités.

Il faut juger la situation du Maïs, dans l'aire d'investigation, par rapport à celle du Sorgho. Selon Martin (9), le second prend la place du premier, en Afrique, en Asie et en Amérique, dans les régions trop chaudes et trop sèches. Aux U.S.A., le maïs est cependant préféré dès que son rendement peut atteindre les  $\frac{2}{3}$  de celui du sorgho, en raison essentiellement de ses valeurs alimentaire et marchande supérieures et des moindres risques de conservation.

Pour être considéré comme une culture vivrière de base, directement consommée par le producteur, le maïs doit atteindre un rendement équivalent à celui du sorgho. Si par contre il est cultivé en vue de la commercialisation, son prix de vente supérieur doit permettre d'en attendre un rendement plus faible. Tout ceci, du moins, en admettant que le nombre de journées de travail, sinon le prix de revient, reste le même pour les deux cultures.

La culture du maïs a le plus de chances de devenir spéculative au sud de l'aire d'investigation, dans les régions où les sorghos (sauf variétés de soudure, non photo-périodiques, qui fructifient précocement) ont un cycle long en rapport avec la durée de la saison humide. Dans ces conditions, et en sols suffisamment fertiles, le maïs devrait atteindre des rendements au moins équivalents, en valeur marchande, à ceux du sorgho, mais en occupant le sol plus tôt et moins longtemps. Celui-ci, libéré plus précocement, peut porter une culture dérobée ou tout au moins se prêter à une association de cultures plus bénéfique.

Martin (9) attribue la moins bonne adaptation à la sécheresse du maïs, comparativement au sorgho, aux caractéristiques spécifiques suivantes : stomates moins nombreux à l'unité de surface foliaire mais plus grands; épiderme des feuilles et des tiges moins cutinisé et moins cireux; surface foliaire moins étendue; réseau moins dense de racines secondaires; pression osmotique du suc cellulaire plus forte dans les feuilles mais plus faible dans les tiges et les racines; plus forte teneur en eau des tissus; coefficient de transpiration plus élevé en conditions de végétation identiques.

Il résulterait de tout ceci que le sorgho flétrit plus tardivement, ce qui lui permet de résister à des sécheresses plus durables et surtout de récupérer plus facilement au retour de conditions hydriques meilleures. Enfin, si la tige principale a été détruite par la sécheresse, les sorghos émettent des talles qui leur permettent d'assurer un minimum de production.

Glover (4) considère que la capacité pour une plante de retrouver un fonctionnement stomatique normal après une période de sécheresse représente un critère de résistance. Or le maïs serait très désavantagé à cet égard par rapport au sorgho car ses stomates ne reprennent pas leur rythme initial de fonctionnement, même après retour à la turgescence.

Cependant des conditions de sécheresse sévères seraient bien moins dommageables à de très jeunes plantes de maïs qu'à des individus adultes, le phénomène d'enroulement des feuilles à ce stade assurant aux premiers le retour à une activité photosynthétique normale après déroulement. Ceci, selon l'auteur, expliquerait la pratique qu'ont les Africains de semer effectivement très tôt, dès les premières pluies, leurs cultures de maïs. On peut couramment constater qu'elles flétrissent très gravement en début de vé-

gétation sans incidence notable sur le rendement. Cette capacité extrêmement importante qu'a donc le maïs d'être semé très tôt en fait un partenaire de choix dans les associations de cultures qui sont généralement la règle en milieu africain.

Au contraire, des déficits atteignant le point de flétrissement, à certains stades avancés du développement, ont un effet dépressif considérable. De tels déficits, même d'un à deux jours, durant la floraison ou la pollinisation, peuvent réduire le rendement de 20% (7), et de 50% s'ils durent de 6 à 8 jours.

Suivant les auteurs, les différences de comportement entre variétés, concernant la résistance à la sécheresse, seraient importantes ou très faibles. Cependant la sélection dans des populations adaptées à des conditions aussi variées (le maïs est cultivé entre 58°N et 40°S), a produit des types qui se distinguent essentiellement par la longueur de leurs cycles, qui vont de 60-70 jours avec 8-9 feuilles à 300-330 jours avec 42-44 feuilles.

## 2. Localisation et Distribution Variétale.

Dans l'aire d'investigation le maïs représente une production d'intérêt actuellement secondaire bien qu'elle soit assez généralement répandue. Il s'agit surtout d'une culture dite "de case" qu'on peut définir comme plus intensive et mieux soignée que la culture de plein champ. Cette espèce exige en effet des sols assez riches en matière organique et en bases, qui ne se rencontrent guère qu'aux abords des villages et dans les bas-fonds enrichis par le colluvionnement où l'alimentation en eau est de surcroît meilleure.

Le maïs ne se cultive guère autrement, avec des rendements de l'ordre de 1000 K/ha, au Nord-Nigeria, où des efforts sont cependant tentés pour l'étendre à des sols de plateau. Dans cet objectif, la Station de Samaru introduit des variétés plus tardives et donc plus productives que les variétés précoces locales dont l'utilisation se limite à une production de soudure semée en avril. Les rendements atteignent en station 2000 K/ha en moyenne, avec des pointes de 3.500.

C'est dans les mêmes conditions que le maïs se rencontre au Niger, où il n'intéresse guère que 3000 has semés aux premières pluies, fin mai - début juin, avec un rendement de l'ordre de 900 K/ha. Une partie est consommée en vert à 2.5 mois, le reste à maturité à 3 - 3.5 mois.

Au Tchad, où les populations sont morphologiquement très hétérogènes mais régulièrement précoces, cultures de case et de bas-fonds sont semées aux premières pluies, en avril par exemple au Logone, les premiers épis étant récoltés verts dès juillet, le reste à maturité en août.

Au Sénégal, la situation est sensiblement la même, sauf en Casamance, où le maïs constitue un des aliments de base. Mais la Casamance sort de l'aire d'investigation. Des variétés précoces, dont certaines ne dépasseraient pas 65 jours, sont cultivées dans la vallée du Sénégal.

Il faut passer en Haute Volta et au Mali pour voir la production de cette céréale prendre une certaine importance. Encore n'est-ce, en Haute-Volta, qu'au Sud et au Sud-Ouest, vers Gaoua, Banfora, déjà en dehors de l'aire, et vers Po et Diébougou, juste à la limite. D'autres centres de production, qui ne s'expliquent que par la qualité exceptionnelle des sols, se situent à plus haute latitude, à Houndé, Boué, sur les schistes birrimiens. La production totale est de 75.000 tonnes pour 110.000 has, avec un rendement de 700 K. Les variétés de soudure, répandues dans tout le pays, sont très précoces. Les variétés de production saisonnière au contraire sont de cycle long, se sèment un peu plus tardivement et se récoltent à maturité de septembre à octobre.

Au Mali, le maïs occupe une place très appréciable avec 100.000 has situés en majeure partie à l'intérieur de l'aire d'investigation. Il tend à se répandre aux dépens des sorghos et des mils jusqu'à la hauteur même de Ségou (13°3 N), sous pluviosité de 725 mm. Deux originalités caractérisent assez bien la production :

- une culture de décrue qui s'ajoute à la culture normale de saison humide.

- une région de production traditionnelle, celle de Kayes (14°2 N, 11°3 W) - Yélimané (15°1 N, 10°3 W) dans le Nord-Ouest, qui se situe en latitude bien plus au Nord que celle de Sikasso (11°2 N, 5°4 W) - Bougouni (11°3 N, 7°3 W), laquelle ne fait que prolonger à l'Ouest la région maïsière de Haute Volta. De 1200 à 1300 mm dans cette dernière, la pluviosité passe à 650-850 mm dans la première. Dans celle-ci, les variétés, morphologiquement nombreuses, présentent toutes un cycle équivalent de 90 jours environ, tandis qu'au Sud se rencontre toute une gamme de précocités suivant conditions de culture : cycles de 70 à 90 jours pour production de soudure; de 105 jours pour l'association au pénicillaire; de 120-130 jours pour la culture pure. En décrue les mêmes variétés sont utilisées.

### 3. Ajustement aux Conditions Climatiques.

3.1. Régime Héliothermique. Le maïs est une espèce de jours courts dont certaines variétés sont photopériodiquement neutres, capables qu'elles sont de fleurir en jours longs puisque jusque sous le 58°N, quoique peut-être en jours décroissants.

Les variétés d'origine tropicale ne fleurissent généralement pas avant l'automne dans le Corn Belt aux U.S.A. Même dans le cas de variétés neutres cependant, il semble que le raccourcissement des jours hâte l'épiaison. Celle des variétés précoces nordiques du Corn Belt, adaptées aux longs jours d'été, est hâtée quand elles sont transportées près de l'équateur et inversement.

Cette question est très importante, concernant l'adaptation des variétés aux latitudes de l'aire d'investigation. Tout ce qui a été dit à ce sujet à propos des sorghos devrait pouvoir s'appliquer aux variétés de maïs et, en tout cas, être vérifié.

Le zéro de végétation de l'espèce est donné pour 10°C environ. Bien plus importante ici est la limite supérieure de température tolérable, dans la perspective d'un rendement convenable. L'existence d'une région de production traditionnelle à haute latitude, de Kayes à Yélimané au Mali (en partie en culture de décrue de saison sèche, il est vrai) et la présence de cette céréale en culture de case et de bas-fonds dans presque toute l'aire d'investigation laissent penser que les limitations imposées à l'extension de sa culture sont bien plus une question de caractéristiques de sol et, en tout cas, d'alimentation en eau, que de niveaux de température.

En ce qui concerne son développement, il est probable que le maïs se conforme à la règle de sommation des températures nocturnes, comme déjà vu pour les sorghos, et ceci tout particulièrement en culture de décrue de saison sèche.

3.2. Régime Hydrique. Il y a lieu de distinguer deux sortes de culture : celle qui vise à la production de grains et celle dont on récolte les épis à l'état vert. Dans les deux cas, on a vu que la capacité de la plante à supporter sans dommages graves des périodes de flétrissement sévère en début de végétation lui permettait d'échapper aux aléas de fin de saison pluvieuse.

Dans le cas d'une production de grains, l'ajustement aux événements remarquables de la saison humide devrait cependant s'accompagner de la prise en considération, jusqu'ici non envisagée, des périodes de sécheresse pouvant survenir durant les périodes successives de la saison culturale. Le maïs est en effet extrêmement susceptible aux déficits hydriques survenant au cours de la phase de reproduction.

#### 4. Conclusion.

Dans la perspective d'une agriculture en développement et en perfectionnement, la substitution au sorgho de la céréale plus riche qu'est le maïs, comme elle paraît se produire au Mali, par exemple, jusqu'à la hauteur de Ségou, est un problème à la fois de fertilité du sol et de climat. Les parts respectives de ces deux facteurs complexes dans la distribution relative des deux céréales ne paraissent cependant pas suffisamment connues et pourraient faire l'objet d'études à venir.

Nul doute déjà que le maïs exige des sols plus riches, en matière organique et en bases, mieux alimentés en eau et mieux drainés. Pour le climat, il paraît très vraisemblable que les hautes températures ne constituent pas un obstacle et que le facteur hydrique est seul limitant. Une caractéristique du maïs à retenir est sa capacité à être semé très tôt, dès les premières pluies, en raison de son excellente résistance à la sécheresse dans le premier âge.

Bibliographie

- 1 - ADEBOYETO A. FAYEMI. - Effect of plant population and spacing on the yield of Maize in the humid Tropics. - Emp J. Exp. Agr. 31(124), 1963.
- 2 - ANGLADETTE A. - Le Maïs dans les Territoires de la France d'Outre-Mer. - Agron. Trop. 5(7-8), 1950.
- 3 - BOUFFIL F., CORRIOLS J. - Rapport de mission dans les Centres d'expérimentation du secteur Soudanais de Recherches Agronomiques. 1949
- 4 - GLOVER J. - The apparent behaviour of Maize and Sorghum stomata during and after drought. - Jour. Agr. Sci. 53(3), 1959.
- 5 - HUBER L.L. - Some aspects of Corn ecology. - Agr. Expt. Sta. Pennsylvania, Bull. 679, 1961.
- 6 - INSTITUT DE RECHERCHES AGRONOMIQUES TROPICALES (I.R.A.T.) - Rapports et compte-rendus d'activité des Stations.
- 7 - JENKINS M.T. - Influence of climate and weather on growth of Corn. Climate and Man, Yearbook of Agriculture, USDA, Wash. DC, 1941.
- 8 - LECONTE J. - Situation de l'expérimentation et de la production concernant Sorgho, Mil et Maïs. - Rapport de mission en Afrique Noire, 1961.
- 9 - MARTIN J.H. - The comparative drought resistance of Sorghum and Corn. - Jour. Amer. Soc. Agron., 1930.
- 10 - ROBINS J.S., DOMINGO C.E. - Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth stages in Corn. - Agron. Jour., 1953.
- 11 - THOMPSON L.M. - Weather and Corn production. - CAEA Report 12, Iowa State Univ. Sci. and Techn. Ames, 1962

## L'Arachide CA

### 1. Généralités.

Il faut sans doute voir dans la rusticité de l'Arachide et partant dans son adaptation à des climats très divers la raison majeure pour laquelle cette plante et sa culture ont fait l'objet de si peu de recherches d'ordre proprement agroclimatique. Dans une abondante bibliographie de 4000 références (I.R.H.O., 28) antérieures à 1954, très rares sont celles qui se rapportent réellement au climat.

Les études de caractère physiologique sont par contre plus nombreuses, dans les 20 dernières années surtout. Deux ou trois mises à part (1,29), elles concernent essentiellement le comportement de la plante par rapport aux disponibilités en eau pendant les phases successives de la croissance et du développement.

Bouffil (8), Tardieu (35), Bolhuis (7), Martin et Bilquez (24) décrivent la floraison, qui débute, suivant la précocité du type, de 20 à 30 jours après le semis en régions tropicales. Elle se poursuit durant tout le cycle de végétation, mais avec une intensité maximale (palier de forte floraison) durant une vingtaine de jours entre le 50ème et le 80ème. Cette intense activité de floraison peut être artificiellement prolongée (7) par suppression des fleurs à mesure de leur apparition, le cycle de la plante pouvant être ainsi porté lui-même à plus d'un an.

Il s'agit là d'un phénomène de compensation par régulation interne comme il s'en produit naturellement, on l'a vu, chez le cotonnier en réponse au shedding. L'arachide est comme celui-ci une plante à floraison axillaire indéterminée. Mais si la durée du cycle du cotonnier et son mode de récolte fractionné lui permettent de bénéficier de ce phénomène qui répartit sur une plus longue période une floraison momentanément compromise, il n'en va pas de même pour l'arachide qui se récolte en une seule fois et dont la floraison doit en conséquence être groupée au maximum. Ce comportement sans souplesse, lié au cycle court de la plante, explique que les rendements apparaissent plus directement réglés par la hauteur de pluie globale qu'ils ne le sont chez le cotonnier par exemple.

Cependant période végétative, floraison et fructification sont soumis séparément à des aléas d'alimentation en eau qui se répercutent sur le rendement. Pour Prévot et Ollagnier (30) en 1959, "c'est au début de la floraison et pendant la période de pleine floraison que les phénomènes de croissance sont les plus intenses et qu'ils sont le plus fortement modifiés par les apports d'eau" et "la période de pleine floraison constitue une étape pendant laquelle la plante réagit fortement à des conditions de sécheresse". Pour Fourrier et Prévot (15) en 1958, "l'arrêt des pluies du 35ème au 60ème jour ou du 60ème au 85ème jour déprime fortement les rendements" et "cette expérience montre donc que l'arachide est sensible à la sécheresse du 35ème au 85ème jour après le semis".

Ochs et Wormer (28) en 1959, dans une étude du comportement de l'arachide en fonction de l'humidité du sol, constatent, entre autres, que "la période de grande activité allant de la floraison au 50ème jour est très sensible à la sécheresse, celle d'activité faible au contraire l'est beaucoup moins" et que "la sécheresse réduit fortement le nombre de fleurs formées au total, surtout par son action indirecte sur la longueur des tiges et également, mais avec beaucoup moins d'intensité, par son action directe sur la croissance des bourgeons floraux et sur le nombre de fleurs par tige".

En 1961, Billaz et Ochs (8) établissent comme suit les "stades de sensibilité croissante" à la sécheresse :

- remplissage et maturation des gousses (80 à 120 jours).
- croissance active (10-30 jours) et début de floraison.
- floraison intense (50-80 jours)

Enfin Prevot et Billaz (31) concluent définitivement la même année : "la sécheresse est toujours dommageable à l'arachide (il n'y a pas de stade résistant). Le stade le plus sensible est celui correspondant à la pleine floraison (50-80 jours), le stade le plus résistant est celui de la maturation des gousses (80-120 jours)".

En fait l'arachide est généralement considérée comme une culture relativement résistante durant la période végétative, de préfloraison, où elle peut supporter, en fonction du type de sol, des sécheresses de 8 à 10 jours. La notion de résistance à la sécheresse est d'ailleurs fonction du rendement attendu et l'arachide peut être considérée comme résistante en culture africaine traditionnelle où un rendement de 1 tonne/ha est très satisfaisant. De même, c'est une culture de choix en milieu médiocre, car sa tolérance à l'égard des caractéristiques chimiques du sol est grande, à condition que la structure et la texture de celui-ci permettent aux gynophores d'y pénétrer et à l'arrachage de s'effectuer facilement.

Comme pour les autres cultures enfin, le rendement est une fonction de la longueur du cycle en rapport avec la durée de la saison humide, les variétés long-cycle étant, en conditions adéquates, toujours plus productives que les variétés court-cycle.

## 2. Distribution Variétale et Localisation.

Pour la longueur du cycle, du semis à la maturité, en climats tropical ou équatorial, Gillier (17) classe simplement comme suit les arachides cultivées :

- types Virginia : cycle toujours long, de 105 à 160 jours.
- types Valencia et Spanish : cycle toujours court, de 85 à 110 jours.

- Les variétés hâtives sont, contrairement aux tardives, physiologiquement aptes à germer dès maturité. Elles germent alors en sol humide si elles ne sont pas récoltées dès que mûres. Quand, en régions à saison humide prolongée, elles sont semées tardivement pour être récoltées par temps sec, leur rendement est très diminué, notamment du fait de la maladie de la rosette.

Si les types court-cycle sont en principe les mieux adaptés aux confins septentrionaux de l'aire arachidière, ce critère paraît ne pas être le seul à déterminer leur distribution. C'est ainsi qu'en Nigeria (premier producteur africain avec près de 1 million de tonnes) il peut sembler paradoxal de ne rencontrer que dans les provinces les moins arides du Nord (et comme telles extérieures à l'aire d'investigation) des variétés hâtives (80-100 jours) des types Valencia ou Spanish : 28-204 (Sénégal) et Natal common (South Africa) en Benue, Spanish 205 (USA) et 47-59 (Sénégal) en Ilorin. Dans les provinces plus nordiques au contraire on ne cultive que des variétés long-cycle (120-140 jours) : Samaru 57 (local) au Bauchi, DS-5418 (local) au Bornu, Samaru 61 (local), 37-47 (Sénégal), Kano 50 (local) et DS-569 (local) dans les provinces de Sokoto, Katsina et Kano, Samaru 28 (local) enfin sur Zaria.

Au Sénégal (production voisine de celle de Nigeria) 3 variétés tardives se sont imposées dans les 3 grandes zones écologiques arachidières :

- 28-206 (120 jours) au Sud et à l'Est (Kaolack, Boulel, Tambacounda) entre 700 et 1200 mm.

- 48-115 (120 jours) dans le Centre (Thiès, Bambey, Diourbel) entre 600 et 700 mm.

- 47-16 (110-115 jours) dans le Nord (Louga, L'anguéré) entre 450 et 550 mm, du fait de son exceptionnelle résistance à la sécheresse.

Les variétés hâtives, 28-204 (85-90 jours) et Spanish 55-437 sont reléguées aux régions vraiment très sèches, à moins de 450 mm.

Au NIGER (200.000 tonnes), à part DOSSO, DOUTCHI et GAYA dans l'Ouest, c'est dans le Centre, entre la frontière de NIGERIA et une ligne N'GUILGMI-GOURE-MADOUA (sensiblement 14° N) que se situe l'aire de grande production arachidière. Le plus au Nord, au-delà de 500 mm, la variété 28-204 (85-90 jours) n'est pas surclassée. Dans la zone intermédiaire, de 500 à 650 mm, la 47-16 (110-115 jours) est à vulgariser pour sa résistance à la sécheresse. Dans l'Ouest enfin, avec plus de 650 mm (GAYA), la variété 48-37 pourrait remplacer la 28-206. C'est d'ailleurs cette même variété, résistante à la rosette, qui est vulgarisée au NORD-DAHOMÉY (KANDI), prolongement, au Sud, de la région de GAYA.

Au TCHAD (100.000 tonnes), la Ferme de DILBINI (12° N) couvre l'aire arachidière principale qui s'étend de 10° (BOUSSO, 1050 mm) à 14° N (ABECHE, 500 mm). Au sud de cette aire, la variété 28-206 s'est imposée. Au Nord du 12° N (FORT-LAMY, DILBINI), une variété hâtive, la Rose du Cameroun, est supérieure à la 28-204. Entre ces deux lignes, l'une ou l'autre variété, 28-206 ou Rose du Cameroun, peut être préconisée. Dans le NORD CAMEROUN, à latitude sensiblement égale, c'est aussi la 28-206 qui est vulgarisée.

La HAUTE VOLTA est dans une situation particulière du fait de l'existence d'un secteur de production important, celui de BANFORA dans le Sud-Ouest, à l'extrême limite Sud (1200 mm) de l'aire d'investigation, dont le climat est très favorable au développement d'*Aphis leguminosae*, insecte vecteur du virus de la "rosette" de l'arachide, maladie qui peut annuler la récolte si elle est contractée avant le 40<sup>ème</sup> jour après le semis (5), les dégâts étant d'autant moins graves qu'elle apparaît plus tard. D'où la nécessité de semer aussi tôt que possible, car s'il est des variétés résistantes, il n'en est pas d'immunes. Heureusement, dans ces conditions, en HAUTE VOLTA, les variétés, 48-37 en particulier, se montrent égales, voire supérieures aux variétés locales. Partout ailleurs, et notamment dans le secteur de DEDOUGOU (700 à 900 mm), c'est la 28-206 qui domine. Une variété hâtive cependant, Sarria 91, tendrait à se répandre.

Au MALI enfin, la 28-206 convient parfaitement pour la zone centrale soudano-sahélienne et pour la région arachidière de l'Ouest (KAYES-KEITA). En régions sahélo-soudaniennes (SEGOU), la variété hâtive 47-10 (90 jours) paraît bien adaptée, tandis qu'en régions sahéliennes (YELIMANE, NIORO, NARA), les essais n'ont pas encore permis de fixer un choix. Au Sud enfin, comme en HAUTE VOLTA, la difficulté réside dans la présence de la rosette, les variétés résistantes testées, en provenance de BAMBEY, n'ayant pas justifié le remplacement de la 28-206.

### 3. Ajustement aux Conditions Climatiques.

#### 3.1. Régime Héliothermique.

##### 3.1.1. Photopériode.

La littérature disponible ne permet pas de se faire une idée précise des réactions photopériodiques de l'Arachide. Pour HARRIS et BLEDSOE (34), elle ne paraît pas spécialement sensible, la plante se développant bien des Tropiques aux latitudes moyennes. Aux USA comme aux Indes, on constaterait qu'elle est capable de fleurir en jours croissants comme en jours décroissants.

MOORE (26) observe une floraison abondante chez un type Spanish cultivé en jour continu durant plusieurs semaines. CHELIADINORA (13) note que les jours longs accroissent le poids frais et aussi, mais de façon non significative, la floraison. Cependant le rapport fleurs fertiles/fleurs stériles était plus élevé en jours courts. Cette dernière observation est à rapprocher de celle de TARDIEU (35) qui constate que le rapport gousses/fleurs est variable avec la date de semis, croissant avec la tardivité, donc avec des photopériodes décroissantes.

L'étude d'ALEGRE (1) rapporte que : a) - "sous conditions thermiques optimales le raccourcissement du jour à 9 heures a un effet dépressif considérable sur la floraison (réduction de 50%)". b) - "lorsque le facteur thermique optimal n'est assuré que la nuit, le taux de floraison est pratiquement identique entre le traitement à jour normal et celui à jour raccourci". c) - sous conditions thermiques insuffisantes, le raccourcissement du jour augmente de plus de 3 fois le taux de floraison".

De tout ceci il ressort qu'il y a une réaction photopériodique réelle chez l'arachide. Mais il y a sans doute lieu de considérer au moins 2 groupes de variétés :

- l'un à réaction neutre, qui est très probablement celui des Spanish et des Valencia, de cycle court.

- l'autre à réaction de jour court, celui des variétés long-cycle, type Virginia.

Il n'est pas impossible aussi que, comme déjà vu pour les sorghos court-cycle, il existe un certain niveau de réaction photopériodique chez les arachides court-cycle. La variété expérimentée par ALEGRE (1) était en effet la 28-204. MAUBOUSSIN (communication verbale) constate d'ailleurs qu'il existe des variétés hâtives dont le cycle varie de 85 à 105 jours et des variétés tardives dont le cycle varie de 115 à 145 jours en fonction des conditions de milieu, notamment de la date de semis, tandis que partout le type Valencia est de 85-90 jours.

Il serait aisé d'établir les lois de réaction photopériodique des variétés d'arachide en effectuant, sur une année entière, des semis échelonnés de 10, 20 ou 30 jours. L'étude pourrait être liée à l'observation de l'état de dormance des graines et de la valeur du rapport gousses/fleurs.

##### 3.1.2. Température.

Pour les températures, elles ont évidemment un effet considérable sur la vitesse de déroulement des phases du développement et, notamment, la quantité de fleurs produites à l'unité de temps. Il est instructif à cet égard de considérer les données du tableau suivant dues à BOUFFIL (8) :

	<u>Lat.N</u>	<u>Long.W</u>	<u>Maximum journalier de fleurs</u>	<u>Nbre fleurs par pied (flor.utile)</u>	<u>Cycle (jours)</u>	<u>Pluie au cours du cycle</u> mm
- GUERINA	12°5	16°2	11	181	120	1102
- M'PESOBÀ	12°4	5°4	28	267	110	502
- KAKOULOÙ	14°1	11°2	32	353	112	443

Tableau CA.1. *Températures et développement de l'arachide*

Quand cet auteur en tire la conclusion que "plus les précipitations atmosphériques annuelles sont faibles plus la floraison est abondante", il faut évidemment comprendre que le rythme de la floraison est en raison directe des températures, lesquelles sont certainement plus fortes à KAKOULOÙ qu'à M'PESOBÀ du fait de la différence des latitudes (compensée dans une certaine mesure par celle des longitudes), et surtout qu'à GUERINA. Elles le sont de même plus à M'PESOBÀ qu'à GUERINA, bien qu'à égalité de latitude, du fait de la différence des longitudes, les isohyètes étant déprimées dans la direction de l'Est. Le même auteur constate encore qu'en France le palier de forte floraison se situe du 106ème au 130ème jour, au lieu des 55ème et 75ème jours en Afrique, et que le nombre journalier de fleurs est, dans le premier cas, très inférieur à ce qu'il est dans le second, ce qui peut être rapporté avant tout à la différence des températures.

Quand PREVOT et OLLAGNIER (30) énoncent : "l'apport de quantités d'eau croissantes (400 - 800 - 1200 mm) augmente considérablement l'intensité et la durée de la croissance sans en modifier le rythme" et BOLHUIS (7) que le cycle de floraison de l'arachide est peu affecté par les variations climatiques, il est encore évident que ces expériences ayant été faites en un même site, les températures étant les mêmes, ou peu variables d'une année à l'autre, le rythme du développement ne pouvait varier avec le régime hydrique.

Enfin Prévot (29), en 1950, comparant les vitesses "de croissance" d'une même variété (Rose de Loudima) sous les climats d'Antibes et de Bambeÿ, remarque que les différences les plus accentuées sont dans les températures, "plus uniformes et nettement plus accentuées à Bambeÿ qu'à Antibes".

### 3.2. Régime hydrique.

Il n'a pas été possible, faute de temps, d'analyser les données de production aimablement procurées par l'I.R.H.O. (P. Gillier) pour le Sénégal. Ces données, qui couvrent la période de 1946 à 1959 pour 14 points de traite (commercialisation), permettraient de tenter une analyse dans le temps et dans l'espace (voir Cotonnier). A propos de fluctuation dans l'espace, il faut signaler une étude, effectuée par Delolme (14), particulièrement intéressante sur le plan de la méthodologie.

### 4. Conclusion.

Il n'est donc pas inutile de souligner l'intérêt qui devrait être porté aux effets possibles des photopériodes et des températures dans l'interprétation de toute expérimentation visant à connaître les réactions de l'arachide aux variations du régime hydrique.

Bibliographie

- 1 - ALEGRE G. - Contribution à l'étude du photopériodisme de L'Arachide en relation avec la température. - Agron. Trop. 12(4), 1957.
- 2 - BEZOT P. - Six années d'expérimentation variétale sur l'Arachide dans les zones Centre et Est du Tchad. 1957-1962 - Non publié.
- 3 - BEZOT P. - Résultat de l'expérimentation sur la culture associée Arachide Mil. - Non publié.
- 4 - BEZOT P. - La zone arachidière au Tchad. - Non publié.
- 5 - BERCHOUX C. - La rosette de l'Arachide en Haute Volta. Comportement des lignées résistantes. - Oléag., 15, 229-33, 1960.
- 6 - BILLAZ R., OCHS R. - Stades de sensibilité de l'Arachide à la sécheresse. - Oléag. 16(10), 1961.
- 7 - BOLHUIS G.G. - Observations of the flowering and fructification of the Groundnut, *Arachis hypogea*. - Neth. J. Agr. Sci (1), 1958.
- 8 - BOUFFIL F. - Biologie, écologie et sélection de l'Arachide au Sénégal. - Min. F.O.M., Bull. Sci. No.1
- 9 - BOOKER R.H. - The effect of sowing date and spacing on rosette disease of Groundnut in Northern Nigeria, with observations of the vector, *Aphis craccivora*. - Samaru Res. Bull. No.30, 1963.
- 10 - CARRIERE DE BELGARIC. - Travaux de L.I.R.H.O. sur l'Arachide. - Oléag. 5(2), 1950
- 11 - CARRIERE DE BELGARIC ET BOUR. - Le développement de la productivité de l'Arachide au Sénégal. - Oléag. 18(10), 1963.
- 12 - CATHERINET M. - Etude sur le port de l'Arachide cultivée. - Min. F.O.M., Bull. Agron., 15.
- 13 - CHELIADINORA A.I. - Influence of illumination intensity upon the response of Peanuts to day-length. Influence of temperature on the response of *Arachis hypogea* to day-length. - C.R. Acad. Sci. URSS, 31(1 et 3). Abs. in Exp. Sta. Rec. 86, 775.1941
- 14 - DELOLME L. - Rendement à l'hectare des cultures indigènes d'Arachide au Sénégal. - Oléag. 3(5), 1948.
- 15 - FOURRIER P., PREVOT P. - Influence sur l'Arachide de la pluviosité, de la fumure minérale et du trempage des graines. - Oléag. 13, 1958.
- 16 - GALLAND Ph. - Vulgarisation auprès des cultivateurs Voltaïques des résultats de la recherche agronomique sur l'Arachide. - Oléag. 18(12), 1963.
- 17 - GILLIER P. - Caractéristiques des différents types d'Arachides cultivées et moyens de les reconnaître. - Oléag. 18(12), 1963.
- 18 - GOLDWORTHY P.R., HEATHCOTE R. - Fertilizer trials with Groundnuts in Northern Nigeria. - Emp. J. Exp. Agr. 41(124), 1963.
- 19 - ILYINA A.I. - Etude des périodes de haute sensibilité de l'Arachide aux différences d'humidité du sol. - Oléag. 14(2), 1959.

- 20 - INSTITUTE FOR AGRICULTURAL RESEARCH AND SPECIAL SERVICES. AHMADU BELLO UNIVERSITY, NORTHERN NIGERIA. - Reports to Advisory Board.
- 21 - INSTITUT DE RECHERCHE AGRONOMIQUE TROPICALE. - Rapports et Comptes Rendus d'activité des Stations.
- 22 - INSTITUT DE RECHERCHE POUR LES HUILES ET LES OLEAGINEUX. - Rapports des Stations, dont rapport annuel Sénégal 1963.
- 23 - I.R.H.O. - Bibliographie de l'Arachide.
- 24 - MARTIN J.P., BILQUEZ F. - Nouvelle contribution à la connaissance de la floraison et de la fructification de l'Arachide - Oléag. 17(5), 1962.
- 25 - MEREDITH R.M. - The effects of population density and manuring on Groundnut yields in Northern Nigeria. - Ministry of Agriculture, Northern Nigeria, Tech.Bull. No.25
- 26 - MOORE R.H. - Nutritional levels in the peanut plant. - Bot. Gaz. 98
- 27 - NIQUEUX M. - Choix de variétés d'Arachide au Tchad. - Agron. Trop. 14(4), 1959.
- 28 - OCHS R., WORMSER Th. - Influence de l'alimentation en eau sur la croissance de l'Arachide. - Oléag. 14, 1959.
- 29 - PREVOT P. - Croissance de l'Arachide en France et au Sénégal. Oléag. 5(1), 1950.
- 30 - PREVOT P., OLLAGNIER M. - Le problème de l'eau dans l'Arachide. - Oléag. 12, 1957
- 31 - PREVOT P., BILLAZ R. - Recherches agro-physiologiques sur le problème de la résistance de l'Arachide à la sécheresse. - Oléag. 17(12), 1962.
- 32 - SAUGER L. - Méthode de délimitation des zones d'adaptation des lignées sélectionnées d'Arachide au Sénégal. - Agron. Trop. 4(1) 1949.
- 33 - SILVESTRE P. - Monographie des recherches conduites à Bamby sur l'Arachide. - Agron. Trop. 16(6), 1961.
- 34 - SYMPOSIUM. - The Peanut, the unpredictable legume. - Published by the National Fertilizer Association.
- 35 - TARDIEU M. - Contribution à l'étude écologique de la floraison de l'Arachide. - Min. F.O.M., Bull. Agron. No.11, et Ann. CRA Bamby 1953.
- 36 - WORMSER Th., OCHS R. - Humidité du sol, ouverture des stomates et transpiration du Palmier à huile et de l'Arachide. - Oléag. 14, 1959.

### Les Légumineuses à Graines CL

Dans l'alimentation des populations de l'Afrique sèche au sud du Sahara, dont les céréales, Sorgho, Mil et Maïs constituent l'élément de base, l'apport végétal azoté, déjà représenté par l'Arachide qui est cependant avant tout une graine oléagineuse, est assuré par les Légumineuses à graines. Celles-ci sont avant tout des Doliques :

- Dolique de Chine, *Vigna sinensis*, ou encore Niébé, nom vernaculaire qui a cours dans presque toute l'aire francophone:

- Dolique d'Egypte, *Dolichos lab-lab*, beaucoup moins commune, mais intéressante par le rôle plus varié qu'elle est susceptible de jouer dans l'agriculture africaine.

Puis vient le Voandzou, *Voandzea subterranea*, ou Pois de terre, cultivé (2) "de la bordure méridionale du Sahara jusqu'au Cap".

Enfin sont à citer les différents Phaseolus : *acutifolius*, *angularis*, *lunatus*,...

Au Sénégal par exemple, où la production de Niébé est de 15.000 tonnes et vient au 4ème rang après arachide, mils et riz (encore que ce dernier soit produit essentiellement en Casamance, hors de l'aire considérée), les besoins seraient, d'après enquête de la FAO, de 60.000 tonnes. Les régions de production sont surtout celle de Louga, parce que cette plante possède des variétés très précoces (2 mois), et celle du Fleuve parce que, de par sa place en fin de saison dans les associations culturales avec mils ou arachide, elle bénéficie des sols qui restent longtemps humides.

Dans tous les pays de l'aire d'investigation, la production est inférieure aux besoins. Le Niger fait peut être exception avec 40.000 tonnes environ : c'est le plus gros producteur, relativement à sa surface cultivable. Les variétés y sont très nombreuses, en majorité tardives (120 à 140 jours) et semées en association avec mil dès la première pluie suivant le semis de celui-ci. Quelques variétés court-cycle, de 70 à 90 jours, se sèment plus tard. L'une d'elles, consommée en vert, aurait un cycle de 45 jours seulement. Les cultures pures sont assez fréquentes dans le Centre (Tahoua) et destinées essentiellement à la commercialisation. Les variétés de décrue enfin ne sont pas différentes des variétés de saison normale.

Le problème primordial de la culture du Niébé semble être celui du parasitisme. L'insecte le plus redoutable est l'Apion, surtout fréquent de septembre à décembre. Ceci explique la supériorité actuelle des variétés précoces sur les variétés tardives pourvues d'un potentiel de productivité plus grand (mais qui peuvent aussi souffrir d'un déficit en eau en fin de végétation) : leur floraison et leur fructification échappent en partie à la période de forte pullulation du parasite.

Pour la même raison, les semis précoces sont plus productifs, le rendement pouvant baisser de 60% (4) pour un mois d'écart, de fin juillet à fin août, ce qui est assez paradoxal pour une plante qui se cultive généralement en association avec des mils et qui devrait donc bénéficier d'une concurrence moins sévère à la fin du cycle de la céréale.

La recherche d'une formule de traitement insecticide rentable devrait permettre de rétablir une situation normale, les rendements moyens n'étant que de 200 à 300 K/ha alors qu'ils pourraient se situer entre 1 et 2 tonnes.

A l'avantage des variétés précoces, il faut dire cependant que, de port érigé, elles bénéficient de densités de plantation plus fortes.

Il semble qu'on sache peu de choses des réactions photopériodiques des niébes. Il est probable cependant que l'espèce est de jour court, et que les variétés court-cycle, dites précoces, sont photopériodiquement neutres. Des températures élevées seraient préjudiciables à la floraison.

Les Doliques d'Egypte paraissent curieusement mieux connues. Il y aurait des types "jour court", des types "jour long" et des types neutres. Les variétés de jour long, qui ne fleuriraient que très tard ou même pas du tout, semées après juin, seraient les plus intéressantes du point de vue utilisation fourragère, leur production végétative se montrant alors très développée. Il y a peut-être là une corrélation avec leur caractéristique d'être très résistantes à la sécheresse, certains types pérennants pouvant rester longtemps verts en saison sèche.

#### Bibliographie

- 1 - FARIS D.G. - A bibliography of cow-peas. - Ministry of Agr. of Northern Nigeria, Techn. Report No.7, 1959.
- 2 - JACQUES-FELIX H. - Pour une enquête sur le Voandzou. - Agron. Trop. 5(1,2) 1950.
- 3 - TARDIEU M. - Les cultures d'appoint dans la zone d'action du C.R.A. de Bambey. - Ann. CRA Bambey, 1957.
- 4 - TARDIEU M. - Impératifs cultureux et Dolique de Chine. - Ann. CRA Bambey, 18, 1957-58.
- 5 - Rapports des Services Agricoles et des Instituts de Recherche.

ADAPTATION DES SYSTEMES D'AGRICULTURE AUX CONDITIONS CLIMATIQUES  
ADAPTATION OF AGRICULTURAL SYSTEMS TO CLIMATE

L'Agriculture Traditionnelle - CT

1. Généralités.

Fondée uniquement sur l'observation, comme l'a été longtemps celle des régions tempérées avant de se développer sur des bases scientifiques, l'agriculture autochtone ne pouvait, en milieu fermé, aboutir qu'à des systèmes statiques, bien adaptés mais non progressifs. L'évolution qui s'est manifestée au cours des derniers siècles a été déterminée par des apports de l'extérieur.

Ces apports, progressivement plus nombreux jusqu'à l'ouverture de ce que l'on peut appeler la période scientifique (parce qu'elle est caractérisée par l'étude rationnelle "in situ" des problèmes) qui ne couvre guère que les 20 ou 25 dernières années, ont parfois débouché sur des réussites, surtout dans le cas d'introduction de nouvelles espèces cultivées. Mais ils ont très souvent conduit à des échecs, principalement quand il s'est agi de techniques.

Or, à l'origine des causes de succès ou d'échec, on retrouve presque toujours l'adaptation au climat, quand ce n'était pas aussi, évidemment, l'adaptation de l'individu à un progrès qui trop souvent le dépassait.

Telle qu'elle existe actuellement, l'agriculture africaine, malgré une certaine évolution dans des foyers de progrès encore très dispersés, au gré d'actions de modernisation qui sont l'application d'une recherche et d'une expérimentation locales, est encore essentiellement caractérisée par le faible rendement de l'effort humain. Ce faible rendement, s'il est le produit de techniques rudimentaires, est aussi très fréquemment la conséquence de la médiocrité des ressources naturelles, dont le climat qui conditionne en grande partie les autres.

C'est parce que le climat est rude aux sols, qu'il érode, lessive, stérilise de multiples façons, que l'agriculture est généralement itinérante, une jâchère de plus ou moins longue durée étant presque toujours nécessaire pour entretenir ou restaurer la fertilité.

Cependant, sous un même climat, le nomadisme cultural est d'autant moins accusé que le sol est moins vulnérable, comme c'est le cas sur les terres basses enrichies par le colluvionnement, ainsi qu'aux abords des villages qui profitent d'une certaine fumure organique. Ce sont surtout des cultures vivrières, assurant la subsistance, qui bénéficient de ces sols plus productifs, les cultures commercialisées étant souvent reléguées aux sols moins riches de plein champ. Car les notions d'assolement et de rotation n'existent pas.

On peut dire en effet qu'en matière de "succession" de cultures, tout est possible, tout se voit, que ce soit dans le cadre très large d'une région ou dans celui plus étroit d'un même sol. Le cultivateur, guidé essentiellement par l'observation et non par une règle générale tirée de l'expérimentation, décide en réalité chaque année, au vu de sa fertilité actuelle, ce qu'il fera l'année suivante de sa parcelle. Il y a loin de ce comportement qui peut, à tort d'ailleurs, paraître anarchique, au concept

de "rotation" érigé en principe.

Sous un même climat et sur un même sol, des ethnies différentes auront des comportements spécifiques. L'exemple est classique, au Sénégal, de ces deux paysans dont l'un, meilleur cultivateur, fait en mil une surface sensiblement double de celle d'arachide, contrairement au second chez qui ces proportions sont renversées. Le premier pratique aussi le pacage qui lui permet d'adopter une succession de cultures plus longue dans la phase d'exploitation, en même temps qu'une jâchère de moindre durée dans la phase de restitution.

## .2. Systemes d'agriculture.

Un système d'agriculture est entièrement défini par la nature, l'intensivité\* et la durée de ces deux phases : l'exploitation et la restitution.

Sans être absolument indépendantes l'une de l'autre, nature, intensivité et durée de chacune des deux phases se présentent, dans une aire déterminée, sous forme de constantes ou de variables qui sont fonctions d'un ou plusieurs des facteurs du milieu : climatiques, édaphiques, humains (technico-socio-économiques). Les constantes sont évidemment d'autant plus nombreuses que l'aire considérée est plus homogène pour l'ensemble de ces facteurs.

### .2.1. L'Exploitation ou "système de cultures" proprement dit.

- La nature du "système de cultures" dépend essentiellement du climat (puis du sol, puis de l'économie qui décide en dernier ressort). La possibilité de réussir telle ou telle culture est en effet avant tout déterminée (plus que par la hauteur d'eau annuelle qui ne tient pas compte de l'importance variable de l'évapotranspiration) par la durée de la saison humide par rapport aux cycles de développement des espèces et variétés. Dans l'aire d'investigation, la nature de la phase d'exploitation est variable, en gros, suivant la direction Nord-Sud, comme la durée de la saison humide.

- L'intensivité de cette même phase, ou intensivité d'exploitation de la sole annuelle, quelle que soit sa nature, a deux composantes : l'une, naturelle, qui est la fraction de l'année durant laquelle la culture exploite le sol, est déterminée encore par la durée de la saison humide (secondairement par la capacité du sol à mettre en réserve l'excès d'eau de la "période humide"). Elle aussi est variable, du Nord au Sud, comme la durée de la saison humide. La deuxième composante, artificielle parce que d'ordre technique, consiste dans les procédés d'intensification culturale : utilisation de machines, d'énergie mécanique ou animale, de fumures, de produits anti-parasitaires, ... Une caractéristique constante de toute la grande culture, celle de plein champ, est l'absence de tels procédés (si ce n'est, toujours, dans les foyers d'évolution).

- La durée de la phase d'exploitation ou de la succession culturale est principalement une question de sol et de technique. Elle varie, dans l'aire, avec ces facteurs.

### 2.2. La Restitution.

- La nature de la phase de restitution est constante : c'est la jâchère. Toute l'agriculture, en Afrique au sud du Sahara, est fondée sur le principe de la restauration de la fertilité du sol par ce système, que sa durée soit de plus de 10 ans, dans

---

\* Intensivité : substantif d'intensif, par opposition à extensivité, substantif d'extensif, intensité étant le substantif d'intense.

les meilleurs des cas, ou seulement d'un an quand la pression démographique est devenue très forte.

- Cette jâchère est toujours extensive, du fait de la séparation de la culture et de l'élevage (sauf pacage, qui ne représente cependant qu'un tout premier début d'intégration), que cet élevage soit parfaitement nomadisant, comme dans le Nord, ou qu'il appartienne à des paysans sédentaires qui en confient le soin à des bergers Peuhls.

- La durée de la jâchère est affaire de fertilités potentielle et actuelle du sol, mais surtout de pression démographique. Néanmoins, comme on le verra plus loin, cette durée tend à augmenter du Sud au Nord quand diminue le temps de la saison humide : les espèces les plus efficaces pour la restauration de la fertilité sont les plus longues à se rétablir et elles le sont d'autant plus que la saison humide est plus courte.

En résumé, concernant la dépendance à l'égard du climat, les variables sont essentiellement au nombre de deux : nature de la phase d'exploitation et intensivité naturelle de cette phase, toutes deux fonction de la durée de la saison humide. C'est donc suivant ces deux critères qu'il est possible de réaliser un découpage agroclimatique de l'aire.

### 3. Zones Agroclimatiques.

En ne considérant d'abord que l'intensivité culturale possible, on peut admettre que l'aire d'investigation se compose de deux "zones" fondamentales :

- une 1ère zone où la seule culture praticable sans irrigation est une culture de subsistance, le Mil pénicillaire. Le Sorgho peut aussi y être produit sur décrue. C'est la Zone "de monoculture céréalière" avec alternance céréale-jâchère. Elle est difficile à délimiter au Nord parce que, suivant les séquences d'années sèches ou pluvieuses, elle avance en direction du Sahara ou recule (c'est ainsi qu'au Niger l'abondance relative des pluies des dix dernières années aurait fait remonter vers le Nord la culture du mil) et parce que la nature du sol devient ici véritablement exclusive. On peut néanmoins estimer que sur une longue série d'années, elle se bornerait sensiblement à l'isohyète 275-300 mm. Elle finit au Sud à la limite où commencent Niébé et/ou Arachide.

- une 2ème zone où sont praticables Mil, Sorgho, Niébé, Arachide, Cotonnier, Maïs : c'est la Zone "de polyculture extensive", avec alternance cultures annuelles-jâchère. Elle est dite extensive parce que, sauf association sur une partie au moins de leurs cycles de végétation, deux cultures ne peuvent être réalisées successivement sur une même sole au cours d'une même saison humide.

Sur la base de l'intensivité culturale, il est possible de replacer simplement dans le cadre des "agroclimats" de l'Afrique Tropicale (Hémisphère Nord) les deux zones ci-dessus composant l'aire d'investigation.

- La Région A n'existe pas réellement, sauf peut-être au Niger. Mais sa réalité est souhaitable car elle permettrait de repousser plus loin au Nord la Zone Subaride et de remplacer l'arachide, là où elle est vraiment marginale, par le niébé. La sélection pourrait jouer là un rôle très important. Plus au Sud, le terme niébé doit être considéré comme synonyme de légumineuse à graines.

- La Région D voit apparaître les plantes à tubercules, le Riz, le Fonio, mais ce ne sont encore que des productions accessoires faisant la transition avec la Zone suivante (Semi-Humide). Le Manioc monte nettement plus haut, sans qu'il soit possible ici de préciser.

REGION :	CULTURES FONDAMENTALES :	CULTURES SECONDAIRES :
A :	- <u>Céréale</u> (Mil ou Sorgho C.C.) :	- Niébé C.C. :
:	- <u>Niébé</u> C.C. et L.C. :	:
B :	- <u>Céréale</u> (Mil ou Sorgho C.C. à M.C.) :	- Mil et Sorgho C.C. :
:	- <u>Arachide</u> C.C. à M.C. :	- Niébé C.C. :
C :	- <u>Céréale</u> (Mil ou Sorgho M.C. à L.C.) :	- Mil et Sorgho C.C. :
:	- <u>Arachide</u> L.C. :	- Niébé :
:	- <u>Cotonnier</u> :	- Maïs C.C. :
D :	- <u>Céréale</u> (Maïs L.C. ou Mil ou Sorgho L.C.) :	- Mil et Sorgho C.C. :
:	- <u>Arachide</u> L.C. :	- Niébé :
:	- <u>Cotonnier</u> :	- Maïs C.C., Fonio :
:	:	- Tubercules :
:	:	:
- C.C. = court-cycle - M.C. = moyen-cycle - L.C. = long cycle		

Tableau CT. 1. Découpage de la zone Semi-Aride en Régions Climatiques.

- Il est évidemment possible de distinguer des "Sous-Régions", en fonction notamment des longueurs de cycle des cultures fondamentales, de la nature et de l'importance des cultures secondaires. Etant donné le peu d'observations disponibles pour l'instant, on n'ira pas jusque là.

- L'élevage se développe parallèlement, du Sud au Nord, en raison inverse de l'intensivité culturelle. Dans les régions D et C, approximativement, il est sédentaire : la transhumance, rare, ne devient importante qu'au nord de la Région C. Dans ces deux régions, le troupeau est en augmentation, en concurrence avec les cultures, d'où surpâturage fréquent. Au-delà, en Régions B, A et en Zone Sub-aride, il est pratiquement entièrement nomade et transhumant.

L'Agriculture en Développement: La Sole Fourragère - CF

1. Généralités.

En Afrique, l'agriculture extensive fondée sur la jâchère naturelle paraît difficilement compatible avec la nécessité d'améliorer de façon significative et durable la fertilité du sol, et donc avec le souci d'élever de façon satisfaisante le niveau de vie de l'individu. L'agriculture qui actuellement se transforme devra donc devenir aussi intensive que possible, c'est à dire que le permettront les conditions économiques.

Les travaux des Stations agronomiques, surtout dans le domaine de l'amélioration du matériel végétal, ont déjà eu en ce sens des incidences bénéfiques. Mais le problème essentiel réside dans les sols. Or la réussite interne de ces Stations est, d'un point de vue purement technique, une preuve irréfutable, quoique assez récente (parce que consécutive au parti pris d'étudier "in situ" les problèmes), de la possibilité de créer une agriculture en même temps productive et stable (c'est à dire intensive et non itinérante) dans les conditions généralement difficiles du milieu tropical.

Cette preuve apportée, il reste à adapter les moyens mis en oeuvre, pour y parvenir, aux capacités de l'individu (technicité) et aux conditions économiques (rentabilité), questions qui ne sont pas directement du ressort de l'agroclimatologie. Mais qui le sont indirectement car, par exemple, la date du semis ou le conditionnement du sol dont les effets sur le rendement, et donc la rentabilité, sont considérables, et dont le choix est affaire de technicité, sont étroitement fonction des conditions climatiques.

Pour devenir plus intensive, l'agriculture africaine doit évidemment, au moins progressivement, acquérir des caractéristiques inverses de celles (voir "L'Agriculture traditionnelle") qui font son extensivité actuelle, c'est à dire :

- trouver des substituts, au moins partiels, à la jâchère naturelle.
- intégrer la culture et l'élevage.
- user de procédés d'intensification : fumures, protection sanitaire, emploi de machines, utilisation d'énergie, adoption de techniques modernes concernant le semis, les densités de plantation, le conditionnement physique du sol,....

L'objectif, ici, est de montrer l'importance du climat dans cette évolution, relativement aux autres facteurs, édaphiques principalement.

Pour les procédés d'intensification, la plupart, lutte anti-parasitaire, date optimale de semis, densité de plantation efficace, aménagement du sol pour l'amélioration du profil hydrique, conduite des associations culturales, ... ont avec le climat des rapports évidents. Chacun pourrait, et même devrait, faire l'objet, pour le milieu tropical, d'une étude ou tout au moins d'une mise au point tenant compte des acquisitions les plus récentes en physio-climatologie.

Cependant, et bien que, dans l'immédiat, les plus grands progrès, en matière de productivité, soient à attendre de l'amélioration des techniques culturales, ces études spéciales n'ont pas leur place dans ce rapport de base très général.

Au contraire, la question des substituts possibles à la jâchère naturelle, étroitement liée d'ailleurs à celle de l'intégration culture-élevage, doit être traitée ici, fût-ce succinctement (elle devrait donner lieu par ailleurs à une analyse plus détaillée de ses rapports avec le climat), parce qu'elle domine toute l'évolution à long terme de l'agriculture africaine.

## 2. La Jâchère, ses Substituts et leur Adaptation.

Parce que la jâchère improductive, dont le rôle n'est que de sauvegarder la fertilité du sol, est un système trop extensif pour permettre, à long terme, une amélioration substantielle du niveau de vie du cultivateur, elle est sans nul doute condamnée à disparaître sous sa forme actuelle.

Cependant, entre sa suppression totale dans un système d'exploitation continue du sol par des cultures annuelles (dont plantes fourragères éventuellement) et sa conservation en l'état présent, tous les intermédiaires concevables peuvent avoir leur intérêt, au moins provisoirement. Il n'est pas de solution unique, la meilleure dans chaque cas devant être adaptée, hormis le climat, au sol, à la démographie, aux réalités économiques.... Ce n'est donc que très progressivement que la surface actuelle de jâchères traditionnelles, brûlées chaque année et souvent surpâturées, ira en diminuant.

Les diverses possibilités d'évolution de la jâchère devront évidemment être adaptées aux conditions climatiques variées de l'aire d'investigation, c'est à dire :

- aux caractéristiques, de durée surtout, de la saison humide, qui détermineront essentiellement les possibilités d'implantation.

- aux caractéristiques de durée et d'intensité de la saison sèche qui détermineront essentiellement les possibilités d'exploitation.

Pour beaucoup cette adaptation dépendra des espèces, locales ou introduites, disponibles dans chaque cas.

2.1. La Jâchère Naturelle Protégée. Un premier procédé d'amélioration, pour donner à la jâchère naturelle son maximum d'efficacité dans le minimum de temps, est la "mise en défens". Cette solution radicale, qui assure la protection intégrale contre le feu et le pâturage, trouve sa pleine justification dans le cas de restauration de la fertilité d'un sol abandonné parce que devenu improductif (Gillier, 13).

Le procédé n'est généralement pas applicable cependant, quand il ne s'agit que de maintenir la fertilité sol à un niveau convenable consécutivement à une succession culturale de durée raisonnable, si le cultivateur pratique, comme il se doit, la culture attelée, qui est la voie la plus sûre vers l'intégration culture-élevage. Cette nécessité lui impose d'utiliser la jâchère, quoique de façon modérée, pour l'entretien de ses boeufs de travail. Il ne peut d'autre part, même avec une charrue attelée, remettre cette jâchère en culture sans pratiquer le brûlis au moins une fois, préalablement au labour. La production de fumier devrait d'ailleurs plus que compenser la perte de fertilité consécutive au feu et au pâturage obligatoires.

2.1.1. Restauration de la Fertilité. L'efficacité de la jâchère n'est pas douteuse, tout au moins en conditions d'exploitation extensive. Mais elle diminue par unité de temps avec la pluviosité (13). Ceci est logique car l'implantation et le développement d'espèces vivaces, de plus en plus rares d'ailleurs en direction du nord de l'aire, nécessite de plus nombreuses années quand la saison humide est plus courte. Cet effet différentiel est encore accentué par la pratique du feu et par celle du pâturage (13).

Il semble, en tout cas, qu'un premier palier d'efficacité soit assez vite atteint, en 2 à 4 ans vers le Sud contre 3 à 6 vers le Nord, suivant aussi la nature du sol et son état de dégradation. On insiste en N. Nigeria sur le fait que cet effet sur la fertilité ne serait que temporaire, limité à une ou deux soles culturales après la remise en service. Ceci pourrait s'expliquer par l'hypothèse que, tout en apportant une certaine quantité de matière organique dont la minéralisation en un ou deux ans profite immédiatement à la plante, la jâchère courte n'améliore la structure que de façon très provisoire. Ce n'est que la fertilité actuelle qui est restaurée.

La fertilité potentielle par contre ne peut vraisemblablement être reconstituée (hormis fumures de fond organique et/ou minérale) que par une action à très long terme, qui doit se poursuivre en conditions microclimatiques opposées à celles qui existent sous le couvert plus ou moins dense (plutôt moins) d'une culture. Celle-ci laisse en outre le sol nu durant la préparation et en début et fin de végétation.

Comparativement à ce qui se passe sous le couvert généralement dense de la végétation naturelle lorsqu'elle n'a jamais été défrichée ou ne l'a pas été depuis très longtemps, le sol sous culture est en effet :

- mieux aéré, parce que moins dur, moins tassé, moins compact. Le foisonnement consécutif au travail du sol peut en effet ramener de 1.5 à 1.2-1.0 la densité apparente de l'horizon supérieur, augmentant beaucoup sa perméabilité à l'air et à l'eau.

- plus humide généralement, surtout en début et en fin de végétation, le ruissellement étant moindre que sur le sol compact et la couverture cultivée ayant rarement l'homogénéité de recouvrement et la densité de la végétation naturelle qui évapotranspire au maximum.

- plus chaud vraisemblablement que sous cette même couverture naturelle parce que exposé plus directement au rayonnement, lors des périodes de dénudation notamment.

Ces trois circonstances contribuent sans doute à la destruction plus rapide sous culture de la matière organique humifiée (élément très important de la fertilité potentielle), dont le taux initial ne pourrait alors être reconstitué qu'en revenant strictement à la situation opposée, originelle.

Or si la 3ème exigence (écran contre le rayonnement) peut être considérée comme satisfaite par la jachère naturelle courte et par certains de ses substituts (à condition encore d'être réussis), la 2ème ne l'est que partiellement du fait d'une meilleure infiltration de l'eau dans un sol récemment cultivé, et la 1ère ne l'est pas du tout. Le tassement du sol et son imperméabilité relative à l'air et à l'eau, conditions sans doute nécessaires d'une accumulation de matière organique à évolution lente (provenant de racines principalement), sont en effet longs à obtenir, comme en témoigne bien la moindre difficulté de remise en culture d'un sol assez récemment cultivé.

2.1.2. Régénération du Pâturage. A ce sujet, Pagot (5) écrit : "La protection intégrale a un effet certain pour la régénération des pâturages dégradés, mais c'est plus une régénération du sol que l'on obtient qu'une véritable régénération du pâturage. En effet l'amélioration qualitative par la mise en défens est relativement faible. L'absence presque totale de graminées annuelles et de légumineuses dans un couvert herbeux très dense rend l'utilisation du pâturage par les animaux peu facile... Aussi arrive-t-on à la conclusion que la mise en défens, si elle est un moyen de régénérer un sol, n'est pas suffisante pour régénérer et améliorer un pâturage.

"Lorsqu'une parcelle aura été mise en défens pendant un certain nombre d'années... ..., il conviendra de l'aménager de façon à ce que les graminées utiles puissent à nouveau s'y développer. Plusieurs méthodes peuvent être employées, la mise à feu est la plus simple .... Elle peut, si elle est judicieusement pratiquée, donner de très bons résultats; elle a l'avantage d'être la moins onéreuse .....

"Le meilleur moment au Soudan se situe à la fin de la saison sèche, fin avril ou mi-mai, quelques jours après une bonne pluie. Si on allume le feu à ce moment, il détruit tous les grands ohaumes desséchés, les rejets secs ....., ainsi que les buissons. Par contre les graines des graminées annuelles et des autres plantes, qui se trouvent sur le sol, sont protégées par l'humidité et ne sont pas endommagées.

"Les touffes des grandes espèces vivaces, comme *Andropogon gayanus*, donnent après brûlage une excellente repousse très appréciée des animaux qui, épargnant les autres

petites graminées, leur permettent de mieux se développer. Le feu a remplacé, dans ce cas, la faucheuse.

"La principale raison qui fait recommander l'emploi des feux précoces allumés en novembre est l'apparition d'une repousse des espèces ligneuses très appréciée des animaux, elle n'est pas à notre avis susceptible de généralisation; en effet elle n'empêche nullement les feux tardifs ..... Par contre les dégâts sont considérables du fait que le feu détruit de nombreuses herbes utiles telles que les graminées annuelles qui grainent à cette époque de l'année...."

Confirmant l'intérêt de ces observations, on remarque en N. Nigeria que les feux précoces (novembre) favoriseraient les espèces arbustives aux dépens des herbes, cet effet se trouvant accentué si le pâturage suit immédiatement la repousse. Des feux tardifs (avril) auraient des conséquences opposées, tandis que ceux de mi-saison sèche seraient également dommageables aux herbes et aux arbres.

On rappellera néanmoins que toute exploitation, même si elle ne possède que des boeufs de travail, doit obligatoirement prévoir des parcelles exclusivement réservées au pâturage naturel, parallèlement aux parcelles cultivées soumises à la jâchère d'entretien de la fertilité. Elles seront d'autant plus étendues que le climat sera plus sec et seront prises sur les parties les moins cultivables. Le feu peut alors leur être appliqué en fonction des besoins des animaux, mais de façon aussi rationnelle que possible. Un certain compromis semble donc nécessaire.

Le seul procédé qui puisse éviter les dégradations dues au feu, tout en procurant ses avantages, est l'entretien au girobroyeur. Il permet aussi d'améliorer le pâturage, de façon considérable parfois, et de constituer éventuellement des réserves de fourrage. Moins fragile qu'une faucheuse, bien plus aisée à entretenir, il se contente d'un débroussaillage moins parfait et possède une rapidité d'exécution que ne peut atteindre la faucheuse. Son emploi exige néanmoins des moyens de traction qu'un particulier ne possède généralement pas et pour être économique il suppose l'intégration de l'exploitation au sein d'une coopérative.

.2.2. La Jâchère Semée avec des Espèces Locales. Une deuxième étape, dans la voie de l'aménagement de la jâchère, peut s'imposer quand le travail du sol, effectué à la charrue, élimine les espèces pérennantes fortement enracinées : le réensemencement de ces mêmes espèces.

Morel et Quantin (23) ont montré qu'une jâchère naturelle passe par trois ou quatre stades principaux caractérisés par l'établissement d'espèces de plus en plus efficaces, et correspondant à des états structuraux et à des niveaux de fertilité progressivement améliorés. Pour un sol donné, plus ou moins vulnérable suivant sa nature, le stade terminal, qui autorise la remise en culture, est d'autant moins vite atteint que l'état structural initial était moins bon du fait d'une succession culturale plus éprouvante. Mais il est possible d'accélérer le passage des stades en semant les espèces typiques de ce stade terminal, aux dépens des espèces annuelles qui normalement s'installent les premières. Du même coup, la valeur du pâturage se trouve améliorée, pour la saison sèche du moins, si toutefois un entretien rationnel est assuré.

Ce procédé, comme celui de la jâchère simplement protégée, est applicable en principe dans toute l'aire d'investigation. L'ensemencement destiné à accélérer les processus de restauration de la fertilité sera évidemment favorisé par un climat pluvieux. Il le sera aussi par l'existence sur place d'espèces pérennantes, vivaces, qui sont cependant de plus en plus rares à mesure que la pluviosité diminue. A la limite, elles devront être au moins capables de se ressemer densément d'elles-mêmes chaque année.

Ces espèces devront aussi être résistantes à la sécheresse, aisément semables à la main (dût-on les enfouir ensuite par un léger hersage), capables de se défendre contre l'agressivité des annuelles à développement rapide, enfin d'une productivité et d'une qualité fourragères convenables.

A la limite Sud de l'aire d'investigation, celles qui répondent à ces exigences, ou du moins à la plupart, semblent relativement nombreuses, pour autant qu'on considère comme suffisante l'expérimentation les concernant. Mais rares sont celles d'entre elles qui paraissent se rencontrer de façon continue d'Est en Ouest.

a) Andropogon gayanus est peut-être la seule. En N. Nigeria, il en existe trois variétés (11) : bisquamulatus et squamulatus (tétraploïdes?) et tridentatus (diploïde). Ce sont principalement les deux premières, apparemment confondues, qui ont fait jusqu'ici l'objet de travaux. En N. Nigeria, Foster (11) étudiant leur variabilité, en vue de la sélection, constate que la date du début de floraison de types récoltés dans l'ensemble du pays présente, à Shila (Ferme d'élevage de la Station de Samaru) une amplitude de variation d'une cinquantaine de jours. Les types qui prédominent dans les régions septentrionales fleurissent plus tôt et présentent des feuilles plus étroites et pileuses que ceux qui sont le plus fréquents en régions méridionales.

Andropogon gayanus a une production végétative considérable, alliée à une très bonne résistance à la sécheresse. Son appétibilité, excellente avant floraison (début octobre au parallèle de Bamako), diminue beaucoup par la suite. Mais cette graminée est de celles qui, vraisemblablement photopériodiques, fleurissent aux environs du minimum de longueur du jour (septembre-octobre), puis se dessèchent plus ou moins vite avec l'arrivée de la saison sèche. Mais elles se dessèchent avant tout parce qu'elles ont fructifié et non pas tellement parce que les disponibilités en eau diminuent. Il faut alors les empêcher d'arriver à floraison par fauchage ou pâturage si on veut les maintenir vertes durant une partie plus ou moins longue de la saison sèche suivant caractéristiques physiologiques et disponibilités en eau. Après fructification, la destruction par le feu de la touffe desséchée favorise aussi l'émission de repousse.

Mosnier (24) remarque qu'à Dilbini (Ferme de l'Agriculture au Tchad), à la latitude approximative de Fort-Lamy, sous une pluviosité moyenne de 650 mm, "malgré ses longs chaumes (ceux d'A. gayanus) qui se dessèchent vite, de l'herbe verte croît en touffes à leur pied toute l'année. Ce recrû est abondant sur les touffes qui ont été bien mangées en hivernage, comme sur celles dont les chaumes ont été coupés. Enfin, cette poussée de végétation est particulièrement nette sur les touffes incendiées en saison sèche".

Ces qualités et son adaptation naturelle à une aire très vaste qui dépasse peut-être l'isohyète 600, font que cette espèce fourragère est celle qui a été jusqu'ici, sinon la plus étudiée et expérimentée, du moins la plus utilisée pour l'aménagement des jâchères. Plus d'un millier d'hectares auraient été ensemencés vers Kano (N. Nigeria). Au Mali, mais sur une plus petite échelle, on commence à l'utiliser pour activer des jâchères en assolement cotonnier (C.F.D.T.). Enfin étude et expérimentation paraissent assez avancés en Haute Volta, dans les Stations de Saria et de Faroko Ba confiées à l'I.R.A.T.

b) Il est difficile de se rendre compte, dans la littérature disponible, si Panicum maximum se retrouve d'un bout à l'autre de l'aire d'investigation dans sa marge méridionale. Il est signalé au Centre de Recherches Zootechniques de Sotuba-Bamako ainsi qu'à Shika, sous une pluviosité moyenne de 1100 mm environ dans les deux cas. Il est probable que cette espèce excellente à tous points de vue, qui reste verte en saison sèche tant que celle-ci n'est pas trop longue, ne prolifère vraiment, en conditions naturelles, que dans des sites suffisamment humides. Il n'est pas impossible cependant qu'elle parvienne à s'imposer par semis dans des jâchères aménagées facilitant son établissement. Sa tolérance à l'enherbement serait d'ailleurs assez bonne. Il en va de même pour certains Hyparrhenia, rufa et diandra, confinés habituellement aux stations humides, le premier surtout. Ces espèces n'ont cependant pas la résistance à la sécheresse d'A. gayanus et de P. maximum, la fructification étant rapidement suivie de dessiccation. Celle-ci peut néanmoins être retardée par fauchage ou pâturage avant floraison. De même, le feu est suivi de repousses.

c) Cenchrus ciliaris (Buffel grass) est une espèce qui paraît assez peu localisée car elle est signalée en plusieurs points. Il semble que son utilisation se développe au Queensland (Australie) pour l'établissement de prairies temporaires, du fait de ses qualités fourragères et de sa capacité de résistance à la sécheresse due au moins partiellement à son enracinement profond.

d) On peut citer enfin, mais sans trop d'illusions, un Paspalum local, scrobiculatum, cité pour l'aménagement des jâchères et des pâturages naturels à Sotuba, de même que Setaria sphacelata en conditions de sol assez humides (bas-fonds). Enfin, Pennisetum polystachion qui, pour des raisons sûrement valables, ne paraît pas avoir été retenu.

Lorsqu'on s'élève en latitude, ces espèces disparaissent progressivement, celle qui va le plus loin étant sans doute A. gayanus. Pour cette espèce, comme pour les autres, il est cependant probable que les conditions artificielles créées pour le semis devraient leur permettre de dépasser leurs possibilités naturelles et de gagner ainsi des latitudes moins pluvieuses.

Mais c'est surtout la sélection qui devrait permettre de trouver, chez une espèce aussi hétérogène que l'est A. gayanus, des types adaptés à des conditions plus difficiles. Enfin, pour les régions extrêmes où A. gayanus ne pourrait s'établir, il ne faut peut-être pas négliger la possibilité de semer des espèces annuelles caractéristiques des fins de jâchère, si elles sont capables de se défendre contre l'agressivité des espèces qui s'installent les premières.

e) Parmi les légumineuses locales susceptibles d'entrer dans l'aménagement des jâchères, on cite, au C.R.Z. de Sotuba, plusieurs espèces ayant une bonne résistance à la sécheresse mais réputées annuelles :

- Cajanus cajan (pois d'Angole), qui peut cependant se montrer vivace durant 2 ou 3 ans et que Quantin et Morel (23) préconisent.
- Canavalia ensiformis qui croîtrait même en saison sèche mais dont l'appétibilité est médiocre.
- Dolichos biflorus, bonne fourragère très résistante à la sécheresse.
- Calopogonium mucunoïdes capable de se ressemer seule et bien acceptée par le bétail.

Il n'est pas impossible que pour les latitudes septentrionales il soit finalement plus facile de trouver une légumineuse qu'une graminée mais, comme pour beaucoup de ces dernières, citées plus haut, il est probable que l'expérimentation n'a pas été suffisamment poussée pour qu'il soit possible de faire un choix.

2.3. La Jâchère Semée avec des Espèces non Locales. Un nouveau pas consiste dans l'introduction par le semis, en mélange ou non avec des espèces typiques du stade terminal d'évolution de la jâchère, d'espèces étrangères considérées comme simplement améliorantes ou comme possédant aussi une valeur fourragère supérieure. Ces espèces fourragères peuvent être des graminées, mais surtout des légumineuses. On passe alors progressivement à la véritable intégration culture-élevage qui suppose une intensification significative de la productivité et de la qualité du pâturage avec accroissement en retour des produits animaux.

Les espèces introduites peuvent provenir d'une autre région de l'aire d'investigation, cas qui s'identifie à celui du paragraphe précédent. Provenant au contraire de régions extérieures, de climat parfois bien différent, elles pourront exiger une expérimentation très poussée.

a) Faute, apparemment, de graminées semables, on ne peut citer ici que deux espèces qui se multiplient végétativement. Mais ce procédé paraît difficilement applicable, du fait surtout de la nécessité de défendre les boutures contre l'envahissement par les espèces spontanées. La plus intéressante serait Digitaria umfolozi qui, sauf cet inconvénient de devoir être bouturée, est excellente à tous points de vue, durant toute l'année, son départ en végétation aux premières pluies en faisant peut-être la plus précoce des espèces vivaces. Elle ne graine pas, pour des raisons de photopériodisme peut-être, si ce n'est là une caractéristique constante de l'espèce. Ceci favorise évidemment la production végétative et le maintien en état d'appétabilité. Pennisetum Merckeri, variété de P. purpureum extrêmement productive, très appréciée des animaux et remarquable pour son effet de reconstitution de la fertilité du sol, doit cependant aussi être bouturée.

b) Pour les légumineuses, l'intérêt est surtout d'introduire des espèces vivaces car l'aire d'investigation en est naturellement pauvre. Mais on ne peut guère avancer que Stylosanthes gracilis, dont on ne rappellera pas ici toutes les qualités bien connues (encore que Morel et Quantin, 23, émettent des doutes quant à sa capacité de restauration des sols). Peut-être aussi des Pueraria, mais leur résistance à la sécheresse est beaucoup moins bonne, et Centrosema pubescens que son départ en végétation trop lent rend probablement inadapté à ce genre d'exploitation.

On peut rapprocher de ce système d'amélioration de la jachère par introduction, après une succession culturale, de plantes locales ou étrangères, celui qui consiste à installer directement une légumineuse dans un pâturage naturel non défriché. Des exemples de réussite peuvent être cités au Congo-Brazzaville (Loudima, Madingou) et en Nigeria (Foster, 10), avec Stylosanthes gracilis. La protection contre le feu s'impose alors, seuls le pâturage rationnel ou le fauchage permettant d'assurer l'entretien.

2.4. La Prairie Temporaire. Le progrès ultérieur consiste à créer de toutes pièces la prairie temporaire, qui suppose un niveau de technicité élevé, tant pour son implantation que pour son exploitation. Il s'agit en effet d'établir, en principe à l'exclusion de toute concurrence de la part des espèces spontanées, une ou plusieurs espèces locales ou étrangères. L'entretien du pâturage doit ensuite être assuré au maximum par une utilisation rationnelle, l'intervention du feu étant exclue et la pratique du fauchage réduite au minimum pour des raisons de rentabilité, à moins qu'on n'envisage de constituer des réserves de fourrage pour la saison sèche.

De tous les substituts possibles à la jachère, la prairie temporaire est celui qui dispose du plus grand choix d'espèces susceptibles d'être utilisées, du fait des conditions artificielles que suppose sa réalisation. C'est ainsi qu'à côté d'espèces nouvelles, la plupart de celles qui ont été citées jusqu'ici rentrent dans les possibilités théoriques.

a) Chez les graminées, A. gayanus peut être pâturé en principe toute l'année car il est susceptible de donner des repousses en toute saison. Il peut en outre servir à constituer des réserves sous forme de foin ou d'ensilage. Du fait de sa quasi universalité en Afrique sèche au sud du Sahara, sa prairie temporaire a l'aire d'extension la plus prometteuse. D'après Boudet, une variété mieux adaptée, A. gayanus var. genuinus, pourrait se substituer à bisquamulatus au Nord. L'étude de cette espèce riche de formes ne fait d'ailleurs que commencer : la recherche d'écotypes pourrait être très fructueuse.

b) Dans le sud de l'aire, P. maximum, comme peut-être aussi Paspalum scrobiculatum, devrait pouvoir donner de bons résultats en sol suffisamment humide (dépressions) tant pour le pâturage que pour le foin ou l'ensilage. Une meilleure connaissance de sa variabilité dans le domaine des caractères physiologiques et de ses possibilités d'adaptation aux caractéristiques de durée et d'intensité de la saison sèche paraît cependant nécessaire.

c) Dans l'extrême Sud, limité sensiblement par l'isohyète de Bobo Dioulasso (Haute Volta) semble-t-il, par celui de Bamako-Sotuba à la rigueur, le Melinis minutiflora paraît pouvoir réussir, comme à la Station de Farako Ba (Haute Volta). Sa capacité de résistance à la sécheresse du sol lui permet de rester vert et souple durant toute la saison sèche, même ayant fructifié, ce qui est peut-être un cas unique. Cette caractéristique, qui lui assure une appétibilité de tous les instants, en fait un partenaire idéal pour les associations avec des légumineuses, de même qu'un matériel de choix pour la constitution de réserves vertes sur pied.

d) Cenchrus ciliaris, le Buffel grass des Australiens, cultivé au Queensland en conditions de pluviosité faible et irrégulière, présenterait une bonne adaptation aux sols pauvres, outre son très bon comportement en saison sèche.

e) L'intérêt de Panicum antidotale paraît assez discutable, malgré sa capacité à rester vert toute l'année, jusque sous l'isohyète de Bambey (Sénégal) et en dépit de sa forte productivité. Outre en effet qu'il supporterait mal le piétinement, et bien que grainant abondamment, le semis de cette plante paraît très peu sûr à en juger par la littérature. Mais peut-être n'est-ce qu'une question de mise au point. Panicum coloratum, de caractéristiques voisines quoique de résistance moindre à la sécheresse, a l'inconvénient de devoir se bouturer.

f) Parmi les graminées vivaces, on peut encore citer : Pennisetum polystachion (sensible au piétinement), Setaria sphacelata (pour des bas-fonds humides), Brachiaria ruziziensis (vert en saison sèche), Digitaria umfolozi et Pennisetum Merckeri (qui doivent être bouturés). Mais pour la grande majorité de ces espèces, il faut bien dire que l'expérimentation, à échelle suffisamment grande surtout, n'a pas été complète. Les limites climatiques de leur adaptation notamment sont encore mal connues.

g) Chez les légumineuses, S. gracilis est encore ici la valeur la plus sûre, jusqu'à une certaine limite cependant qu'on pourrait provisoirement (insuffisance d'observations) situer grossièrement vers 900 mm. Dans son aire d'adaptation, on peut lui comparer Centrosema pubescens, plus lent encore au départ, mais par la suite d'une vigueur et d'une productivité remarquables. Des essais à Farako Ba ont montré l'intérêt du mélange S. gracilis avec S. erecta, variété locale annuelle à croissance rapide, pour créer un pâturage rapidement utilisable. S. humilis, autre espèce annuelle locale se ressemant bien naturellement, devrait pouvoir jouer le même rôle.

Stylosanthes donne de bons mélanges avec Melinis, de même que Centrosema qui se trouve de ce fait (de même que par d'autres graminées) protégé contre le piétinement auquel il est très sensible. Comme autres mélanges, on peut citer : A. gayanus ou P. maximum avec Stylosanthes, Centrosema, ou encore Velvet bean.

h) Plus au Nord, au-delà de l'aire d'adaptation du Stylosanthes, on ne dispose plus, comme légumineuses vivaces, que de Dolichos lablab qui ne fleurit et fructifie que très tard (avril-mai) à Sotuba et dont le feuillage desséché, après la récolte des graines quand la plante n'a pas été déjà pâturée, est très recherché par les animaux. Comme déjà indiqué au chapitre "Légumineuses à graines", l'intérêt de cette espèce est qu'elle posséderait des variétés "de jour long" susceptibles de fleurir en fin de saison sèche et donc de fournir une production végétative à l'état frais au moment de la soudure. La sélection aurait peut-être ici un rôle important à jouer.

i) A propos de fourrage sec sur pied, il ne faut peut-être pas négliger, pour l'époque de soudure et en dépit de leur plus faible valeur nutritive, les espèces annuelles ou vivaces susceptibles d'être consommées sèches après avoir fourni un bon pâturage de saison pluvieuse. On peut citer Andropogon pseudapricus, annuel, intéressant en saison humide; Beckeropsis uniseta, vivace, qui repousse après passage du feu mais est bien consommé sec en raison de la finesse de son chaume, comme c'est le cas aussi pour Eragrostis tremula, enfin des Pennisetum annuels comme P. pedicellatum, subangustum...

2.5. La Sole Fourragère Annuelle. L'intensification maximale de l'intégration culture-élevage peut être atteinte par la pratique des cultures fourragères annuelles incluses dans la succession culturale proprement dite. Ce système, qui se prête le mieux à la production de fourrage en régions à saison pluvieuse trop courte pour que l'établissement d'une prairie temporaire exploitable se fasse dans un délai raisonnable, est applicable partout. En l'absence de jâchère ou de prairie temporaire, la succession culturale ainsi réalisée constitue la "rotation".

Une croissance rapide est un critère indispensable de choix des espèces adaptées à ce mode de production fourragère et ce, d'autant plus que la saison est plus courte.

a) Chez les graminées, il semble que le maximum de production dans un minimum de temps soit réalisé par les Sorghum : sorghos à grains, sorgho fourrager (Sudan grass). Il est évident que la longueur de cycle potentielle (voir chapitre "Sorghos") des premiers devra être adaptée à la durée de la saison pluvieuse.

A Bambey (Sénégal), sous pluviosité moyenne de 750 mm environ, on envisage la culture de Sorghum alnum, espèce vivace susceptible de subir au moins une coupe puis d'être pâturé vert pendant un certain temps en saison sèche, apparemment jusqu'en mars-avril. Selon Pritchard (28), des 27 variétés de S. alnum observées au Queensland (Australia), seule "Crooble" est réellement pérenne, c'est à dire capable de se maintenir quelques années, comme d'autre part "Krish", un hybride de S. halepense et de S. roxburghii. Cette variété "Crooble" serait aussi la plus productive.

La résistance à la sécheresse de S. alnum serait bien supérieure à celle de Sudan grass et à celle des sorghos à grains, mais il n'y aurait aucun avantage à le cultiver plutôt que l'un de ces deux derniers en régions à bonne pluviosité et si ce n'est que pour un cycle pluvieux. Au contraire, le caractère pérennant de S. alnum permet de l'utiliser aussi bien comme culture annuelle avec pâture en saison sèche que comme prairie temporaire, à peu près dans toutes les conditions. La Station de Bambey envisage en outre de cultiver S. alnum comme engrais vert avec enfouissement en fin de saison pluvieuse puis utilisation des repousses en saison sèche par le bétail.

b) Comme légumineuses susceptibles de donner une culture fourragère annuelle, on ne peut guère citer que des Doliques. Vigna sinensis (niébé, cowpea), espèce annuelle à double fin : grains et fourrages. Dolichos lablab, à cycle végétatif plus long. Peut-être Centrosema plumieri en saison pluvieuse assez longue, et aussi des Phaseolus atropurpureus, lathyroïdes, sur lesquels on manque encore de renseignements. Ces légumineuses en culture annuelle sont capables, par leur pouvoir améliorant, de remplacer dans une certaine mesure la jâchère.

### 3. Discussion.

Si le cas de substitution à la jâchère naturelle d'une plante "de couverture" plus ou moins améliorante mais non fourragère n'a pas été envisagé, c'est qu'il s'élimine de lui-même quand on considère la rentabilité d'une part et, de l'autre, la nécessité de mettre le maximum de surface pâturable à la disposition d'un troupeau en augmentation rapide.

Enfin cette énumération n'exclut pas la pratique de l'engrais vert. En effet, celui-ci peut être prévu au cours de la succession culturale proprement dite : c'est une question de sol plus que de climat. En outre l'enfouissement final de la jâchère plus ou moins améliorée ou de la prairie temporaire, après destruction par le feu, si nécessaire, de la masse végétale qui ne pourrait être retournée dans le sol, est susceptible de remplacer plus ou moins avantageusement l'engrais vert suivant l'objectif visé : enrichissement à long terme en matière organique ou minéralisation rapide au profit de la culture suivante.

3.1. Nature de la Phase de Restitution. Ces différents substituts possibles à la jâchère naturelle constituent la nature variable de la phase de restitution du système d'agriculture. Or on peut dire, pour résumer, que techniquement parlant ils sont réalisables dans presque toute la zone semi-aride, ou "de polyculture extensive", c'est à dire jusqu'à une limite qui reste à déterminer mais qui ne devrait pas passer bien loin de la limite septentrionale de l'arachide (telle qu'elle se trouve définie au chapitre précédent où elle représente la frontière des Régions A et B).

Grâce à la disponibilité d'une espèce comme Andropogon gayanus (sur l'intérêt duquel cependant la Station de Bambey paraît faire des réserves) et, plus au Nord, de A. gayanus var. genuinus\*, la jâchère ensemencée et la prairie temporaire sont en effet presque partout praticable. Il faut compter aussi avec la possibilité, dans l'avenir, de tirer des populations naturelles des écotypes mieux adaptés aux régions les plus sèches.

Une expérimentation approfondie devrait aussi dire si et jusqu'où d'autres espèces comme Cenchrus ciliaris, Panicum antidotale ou P. coloratum, Sorghum alnum... sont utilisables aux mêmes fins. La limite de Stylosanthes gracilis enfin, légumineuse difficilement remplaçable, reste à définir avec quelque précision.

A fortiori les cultures fourragères annuelles sont praticables partout, même en zone subaride, ou "de monoculture céréalière". Parce qu'il peut être semé "en sec", donc plus précocement que les Sorghum, le Mil Pennisetum devrait pouvoir les remplacer dans cette zone extrême. Pennisetum typhoïdeum serait d'ailleurs cultivé comme plante fourragère de grande vitesse de croissance, quoique sous un climat très différent, en certains points de la côte Sud-Est des U.S.A. Il est cependant probable que le cultivateur-éleveur africain trouvera plus économique de récolter son mil en grain et de déplacer son troupeau vers des régions mieux pourvues en saison sèche.

Ces différents systèmes de substitut à la jâchère ne s'éliminent donc nullement, tous pouvant être pratiqués simultanément en un même lieu, sauf évidemment très au Nord où il n'est plus possible de produire que des cultures fourragères annuelles, à croissance très rapide.

3.2. Intensivité de la Phase de Restitution. Ce qui change avec les conditions climatiques, c'est l'intensivité d'exploitation possible, ou productivité, de cette sole fourragère quelle qu'elle soit. Cette productivité augmente du Nord au Sud:

- d'une part avec la diminution de la saison sèche, en durée et en intensité.

- d'autre part avec la disponibilité d'espèces progressivement plus nombreuses et variées (dont légumineuses) parmi lesquelles ou parmi les mélanges desquelles il devient possible de faire un choix en fonction de la productivité, de la qualité, et de la capacité à rester vertes, donc à être exploitées au mieux en saison sèche.

Cette productivité de la sole fourragère détermine la valeur économique du système, dont dépend finalement le choix d'un mode d'élevage plus ou moins intensif, qui va du "ranching" pur à la production industrielle de viande et de lait. L'intensivité du mode d'élevage déterminera d'autre part en partie l'intensivité et la durée de la phase d'exploitation ou succession culturale ou système de cultures proprement dite.

Le choix d'un mode de substitut à la jâchère naturelle sera finalement dicté par des considérations d'ordre socio-économique. C'est ainsi qu'en régions à peuplement très dense, où les jâchères améliorées comme les prairies temporaires seraient de trop

---

\* Boudet, Comité National de la Recherche Agronomique au Mali, 1960.

courte durée pour être rentables, les cultures fourragères annuelles pourront s'imposer, quitte à assurer l'entretien de la fertilité par des fumures de fond si possible. De même, la proximité d'un important centre de consommation pour l'écoulement de lait et de viande engraisée pourra conduire à pratiquer à la fois la prairie temporaire et les cultures fourragères annuelles .....

3.3. La Productivité Relative. Il serait du plus grand intérêt de parvenir à exprimer la productivité de la sole fourragère, quelle que soit sa nature, en fonction des conditions climatiques qui la déterminent.

Une culture fourragère ou une jâchère aménagée occupant le sol en permanence durant une année au moins et le ruissellement pouvant être considéré comme négligeable sur un sol récemment cultivé et bien couvert (toute l'eau de pluie étant donc infiltrée), le plus simple serait évidemment, pour tenir compte à la fois de la pluviosité et de l'évapotranspiration, de se rapporter au déficit annuel :  $E_T - R$ . La productivité varie alors en raison inverse de cette variable.

Cependant ce critère n'est pas satisfaisant car une même lame d'eau évapotranspirée n'a pas pour la croissance d'une culture la même signification suivant que cette eau est théoriquement libre (évapotranspiration réelle égale à l'évapotranspiration potentielle, comme durant la "période humide" : voir les définitions au chapitre "Bilan Hydrique") ou suivant que son potentiel va croissant, comme c'est le cas durant la "période post-humide, puis au cours de la saison sèche quand toute l'eau évapotranspirée provient du surplus emmagasiné dans le sol en "période humide".

Par exemple, à Garoua et à Maroua, au Nord Cameroun, le déficit annuel moyen est le même, 870 mm, pour des pluviosités moyennes de 1015 et 840 mm respectivement. Or 510 mm sont évapotranspirés comme eau en principe libre à Garoua, couvrant une "période humide" de 120 jours, contre 335 mm en 90 jours à Maroua : cette différence de 30 jours a évidemment une importance capitale pour la productivité de la sole fourragère. D'autre part, pour une même durée de la "période humide", de 120 jours, à Pala et à Garoua, le surplus stocké dans le sol est de 375 mm pour le premier contre 265 mm pour le second. A Bobo Dioulasso (Haute Volta), pour une "période humide" dont la durée, 110 jours, est même inférieure, ce surplus atteint 430 mm.

Le mieux serait sans doute, si on disposait de données statistiques concernant la production des pâturages, de considérer de façon distincte les différentes périodes de l'année après découpage suivant les événements climatiques remarquables, comme il a été fait pour les cultures annuelles : sorgho, cotonnier .....

Une assez bonne solution cependant paraît être de considérer, non plus le déficit global absolu,  $E_T - R$ , mais un des deux déficits relatifs :

$$\frac{E_T - R}{E_T} \quad \text{ou} \quad \frac{E_T - R}{R}$$

On retiendra ici le premier, qui paraît présenter la meilleure corrélation avec la durée de la "période humide". Sa valeur pour Garoua est 0.46 et, pour Pala, 0.35, contre 0.51 pour Maroua, différenciant bien ces stations climatiques. Si par ailleurs on compare Tahoua (Niger), où la pluviosité est de 405 mm et le déficit absolu de 2305 mm, à N'Guigmi où on a 235 et 1810 mm respectivement, les valeurs du déficit relatif rétablissent la vraie situation relative de ces deux stations du point de vue productivité fourragère, avec 0.82 pour le premier et 0.87 pour le second.

Comme, cependant, la productivité varie en raison inverse de ce déficit relatif, on utilisera de préférence l'expression :

$$1 - \frac{E_T - R}{E_T} = \frac{R}{E_T}$$

qui est un indice déjà proposé au paragraphe "Analyse" du chapitre "Bilan Hydrique".  
On aura alors :

0.54	pour	Garoua
0.65		Pala
0.18		Tahoua
0.13		N'Guigmi

Cette expression, qui est un indice climatique relatif de productivité, varie donc de 0, pour un déficit égal à l'évapotranspiration potentielle, en région de pluviosité nulle, à 1 et plus. Mais la valeur 1, pour un déficit absolu qui serait nul, paraît ne pas pouvoir être dépassée dans la zone semi-aride qui nous concerne ici. Comme on peut le voir dans le Tableau Synthétique, il varie, entre les limites de cette zone, de 0.13 à N'Guigmi à 0.84 à Moundou.

Une question importante est alors de connaître la nature de la fonction qui relierait cet indice, considéré comme variable indépendante, à la productivité réelle représentée par exemple par la charge du pâturage. Il n'est pas certain en effet qu'il s'agisse d'une simple relation de proportionnalité.

Pour fixer les idées, on peut se rapporter au cas de Shika-Samaru (N. Nigeria) où des essais en vraie grandeur sont menés pour tester l'assolement suivant :

	<u>acres</u>	<u>hectares</u>
- Cotonnier	3	1.20
- Arachide	3	1.20
- Sorgho	3	1.20
- Prairie de <i>A. gayanus</i>	18	7.20
- Jardin, petit élevage	<u>3</u>	<u>1.20</u>
	30	12.00

Les 7.20 has de prairie temporaire semée en *A. gayanus* doivent assurer l'entretien de 2 boeufs de travail et 3 vaches, soit 5 têtes de bétail à raison de 1.44 ha par tête de 250 à 300 Kg, ce qui est vraisemblable dans les conditions de Shika. Faute cependant d'une connaissance détaillée de ces conditions, on peut se rapporter à celles de Sotube-Bamako qui se trouve sous pluviosité identique de 1100 mm, et où une charge de 1 tête pour 1.44 ha de prairie artificielle paraît raisonnable : à cette charge correspond donc la valeur de l'indice pour Bamako qui est égale à 0.61.

Si, toutes autres choses étant par ailleurs égales, il y avait relation de proportionnalité, à une valeur de l'indice égale à 1 (déficit absolu nul) correspondrait une charge de 1 tête pour 0.9 ha environ, ou encore de 1.1 tête par ha. Cette charge est encore admissible pour des bovins de si petit format. Pour des situations de moins en moins humides, on aurait les charges inscrites dans le tableau suivant :

	<u>Valeur de l'indice</u>	<u>Nombre d'ha par tête</u>	<u>Nombre de têtes par ha</u>
- MOUNDOU (Tchad)	0.84	1.0	1.1
- BOBO DIULASSO (Hte Volta)	0.69	1.2	0.8
- OUAGADOUGOU (Hte Volta)	0.49	1.8	0.6
- MAROUA (N. Cameroun)	0.49	1.8	0.6
- SOKOTO (N. Nigeria)	0.43	2.0	0.5
- FORT LAMY (Tchad)	0.33	2.6	0.4
- ZINDER (Niger)	0.29	3.0	0.35
- ABEICHE (Tchad)	0.26	3.4	0.30
- N'GUIGMI (Niger)	0.13	6.8	0.15

On remarquera que pour une valeur de l'indice égale à 0, la surface nécessaire théoriquement pour nourrir une tête de bétail deviendrait infinie. Il n'y a donc pas relation de proportionnalité, du moins pour les valeurs faibles de l'indice, c'est à dire inférieures au moins à 0.5. L'expérimentation devrait permettre de préciser l'allure de la relation.

D'autre part, toutes autres choses ne sont pas égales : températures et photopériodes notamment, mais surtout les caractéristiques du sol, chimiques et physiques. Si des fumures de fond, minérale et organique, peuvent réduire beaucoup les différences de fertilité chimique, on ne peut pratiquement rien faire pour les caractéristiques physiques qui déterminent le comportement hydrique du sol. Pour que le sol puisse emmagasiner, dans les horizons exploitables par la culture fourragère, tout le surplus d'eau disponible en période humide, la texture devrait être de plus en plus fine du Nord vers le Sud de l'aire.

Or, tout au Sud par exemple, à Bebedjia, Station de l'I.R.C.T. aux environs de Moundou (Tchad) où le surplus moyen est de 555 mm, la granulométrie du sol sableux est telle que, sur 1 mètre de profondeur, la capacité de rétention moyenne à pF 4.2. est de 5.8% (mesures personnelles). Avec un domaine d'humidité disponible qui n'est que de 4.4% et une densité apparente très voisine de 1.5, la lame d'eau susceptible d'être stockée dans ce premier mètre est de 66 mm. Au mieux ce sol pourrait retenir 150 mm sur 2 mètres alors que le surplus moyen est de 555 mm.

Enfin l'indice en question n'a de signification que pour un pâturage exploité au maximum, c'est à dire qu'on ne laisse pas venir à fructification, pour le maintenir en état de végétation active, et dont la production non pâturée est fauchée en vue de constituer des réserves utilisables en fin de saison sèche comme aliment de soudure. Or cette forme d'exploitation suppose une technicité d'un niveau élevé.

Quand la constitution de réserves fauchées n'est pas possible, il faut faire des réserves sur pied, ce qui implique non seulement des espèces et variétés susceptibles de rester sinon vertes, du moins appétibles (même sèches) durant toute la saison sèche, mais aussi des surfaces fourragères de plus en plus étendues en allant au Nord. A égalité de têtes de bétail entretenu, ces surfaces excèdent de plus en plus celles qu'il est possible d'inclure dans la rotation avec les cultures annuelles. La concurrence entre culture et élevage augmentent. A la limite les cultures doivent disparaître ou l'élevage doit devenir transhumant.

	A N J J A S O N D J F M A M J J												P mm	E <sub>T</sub> mm	E <sub>T</sub> -P mm	1 - $\frac{E_T - P}{E_T}$	CULTURES		
	Sécheresse																Fondamentales	Accessoires	
																	Mil C.C.	ZONE SUBARIDE	
N'GOUNI	14°2 N 13°1 E													235	1810	1575	0,13	- Mil C.C.	
TANOUA	14°5 N 5°2 E													405	2305	1900	0,18	- Mil C.C.	Z. SEMI-ARIDE
ST. LOUIS	16°0 N 16°3 W													345	1685	1340	0,20	- Mil C.C.	Région A
LOOGA	13°4 N 16°1 W													475	1620	1145	0,29	- Mil C.C.	Région B
AMBICE	13°5 N 20°5 E													505	1925	1420	0,26	- Mil C.C.	
NOPTA	14°3 N 4°0 W													550	1985	1435	0,28	- Mil C.C.	
KINDIE	13°5 N 9°0 E													550	1925	1375	0,29	- Mil C.C.	
MAHAM	15°4 N 11°2 W													535	1620	1085	0,33	- Mil C.C.	
NIAMEY	13°2 N 2°1 E													640	2055	1415	0,31	- Mil C.C.	
R. N'KONI	13°5 N 5°2 E													600	1875	1275	0,32	- Mil C.C.	
DAKAR	14°4 N 17°3 W													580	1825	1245	0,32	- Mil C.C.	
MARADI	11°3 N 7°1 E													640	1675	1035	0,38	- Mil C.C.	Région C
FR. LAMY	12°1 N 15°0 E													650	1960	1310	0,33	- Mil C.C.	
MAIDUGURI	11°5 N 13°0 E													660	1910	1250	0,35	- Mil C.C.	
REGOU	13°3 N 6°1 W													725	1825	1100	0,40	- Mil C.C.	
TWINS	14°5 N 16°6 W													695	1725	1030	0,40	- Mil C.C.	
BCKOFO	11°0 N 5°2 E													735	1725	990	0,43	- Mil C.C.	
KAYES	14°3 N 11°3 E													820	1820	1000	0,45	- Mil C.C.	
KANO	12°0 N 8°3 E													870	1800	930	0,48	- Mil C.C.	
MONGO	12°1 N 18°4 E													860	1490	630	0,58	- Mil C.C.	
MAROUA	10°3 N 14°2 E													840	1710	870	0,49	- Mil C.C.	
KAELE	10°1 N 14°3 E													880	1810	930	0,49	- Mil C.C.	
OGADABOU	12°2 N 1°3 W													880	1785	905	0,49	- Mil C.C.	
BOUSSO	10°3 N 16°4 E													930	1470	540	0,63	- Mil C.C.	
AM TIMAN	11°0 N 20°2 E													920	1515	595	0,61	- Mil C.C.	
TANBAKOURA	13°5 N 13°4 W													940	1615	675	0,58	- Mil C.C.	
BAKAO	12°4 N 8°0 W													1100	1805	705	0,61	- Mil C.C.	
R. DIOLASSO	11°1 N 4°1 W													1185	1710	525	0,69	- Mil C.C.	Région D
NAVROGO	10°5 N 1°1 W													1095	1705	610	0,64	- Mil C.C.	
GAROUA	9°2 N 13°2 E													1015	1880	865	0,54	- Mil C.C.	
PALA	9°2 N 14°3 E													1045	1600	555	0,65	- Mil C.C.	
F. ARCHAMB.	9°1 N 18°2 E													1140	1420	280	0,80	- Mil C.C.	
MCURESON	8°4 N 16°0 E													1230	1465	235	0,84	- Mil C.C.	
KADUNA	10°4 N 7°3 E													1300	1795	495	0,73	- Mil C.C.	Z. SEMI-ARIDE

Tableau CY.1. Tableau de synthèse.

## Synthèse - CY

### 1. Les Evènements Climatiques.

Une synthèse du précédent chapitre, "Adaptation des Systèmes d'Agriculture", est proposée dans le Tableau CY. 1. Dans une certaine mesure cette synthèse concerne aussi les cultures annuelles analysées chacune en particulier au chapitre "Adaptation des Cultures Annuelles".

Dans ce tableau, qui permet d'englober d'un coup les évènements les plus remarquables de l'année climatique en rapport avec la distribution des cultures dans l'aire d'investigation, les rectangles verticaux noirs, dont chacun couvre 10 jours de temps, représentent de gauche à droite :

- la décade où se situe, en moyenne, le début de la "période intermédiaire" : point  $A_2$  (Fig BH.1.)
- la décade où se situe la fin de la "période intermédiaire" ou début de la "période humide" : point  $B_1$ .
- la décade où se situe la fin de cette dernière période : point  $B_2$ .
- la décade, de nouveau, où se situe le début de la "période intermédiaire", de façon à encadrer entre  $B_2$  et  $A_2$  le temps de la saison sèche.

Les stations climatiques analysées dans un précédent chapitre ont été disposées, du Nord au Sud :

- premièrement, suivant les durées croissantes de la "période humide"  $B_1$ - $B_2$ .
- deuxièmement, à égalité de durée de cette dernière période, suivant la durée croissante de la "période intermédiaire"  $A_2$ - $B_1$ .
- troisièmement, à égalité de durées de ces deux périodes, suivant pluviosité  $R$  croissante.

De N<sup>o</sup>Guigmi (Niger), où la "période humide" se réduit à une décade (de même qu'à Tahoua) et se trouve donc entièrement contenue dans un seul rectangle, à Kaduna (Nigeria), l'allongement de ces périodes est assez progressif. Le cas de Kaduna, situé nettement en dehors de l'aire d'investigation, est cependant douteux, sa position par rapport aux isohyètes devant normalement lui valoir une "période humide" plus longue.

La valeur très élevée du déficit absolu  $E_T - R$ , égal à 495 mm à Kaduna, comparée aux 235 de Moundou et aux 280 de Fort Archambault laisse penser que les évapotranspirations calculées sont surestimées (en raison vraisemblablement d'une surestimation des vitesses du vent). Ceci est confirmé par la valeur relativement faible de l'indice climatique relatif de productivité, 0.73, contre 0.84 à Moundou et 0.80 à Fort Archambault.

### 2. Les Cultures Annuelles.

Il y a lieu de remarquer que l'amplitude de variation du début de la "période intermédiaire" (10 décades environ) et du début de la "période humide" (10 décades également) est beaucoup plus forte que celle de fin de "période humide" (5 décades environ). Cette circonstance, comme le fait que les isohyètes sont inclinées sur les parallèles (voir plus avant dans différents chapitres), d'une extrémité à l'autre de l'aire d'in-

vestigation, a une signification considérable du point de vue de l'adaptation des variétés photopériodiques dont la durée du cycle (qui conditionne étroitement la productivité, voir chapitre "Sorghos") dépend :

- d'une part de la date du semis, qui peut être rapportée au début  $A_2$  de la "période intermédiaire". On a vu en effet (chapitre "Bilan Hydrique" que ce point  $A_2$  peut situer le moment à partir duquel le semis devient en principe possible, le sol nu pouvant alors commencer à constituer des réserves d'eau (en fait, comme le semis pourra toujours être effectué antérieurement au point  $A_2$  s'il se présente une pluie suffisante, la position de ce point a surtout valeur de repère).

- d'autre part de la date d'épiaison ou de celle de floraison (déterminée par la photopériode en relation avec la latitude) par rapport au point  $B_2$  de fin de la "période humide".

Un cas particulièrement intéressant est celui des stations climatiques du Sénégal. A durées approximativement égales des périodes "humide" et "intermédiaire", elles présentent sur les autres stations un retard de fin de "période humide" qui peut atteindre 20 jours. Il en va ainsi pour Louga par rapport à Abéché, pour Saint Louis par rapport à Tahoua, pour Matam par rapport à Zinder et Niamey, pour Dakar par rapport à Birni N'Koni et Maradi, pour Thiès par rapport à Segou et Sokoto, pour Tambacounda enfin par rapport à Am Timam. Si on se reporte, au chapitre "Pénicillaires", à la Fig CP.5, et à la partie du texte qui s'y réfère, on comprendra pourquoi, comme il apparaît souvent dans les rapports des stations agronomiques, des variétés photopériodiques sélectionnées bien adaptées à la Station de Bambey (proche de Thiès) ne réussissent que médiocrement ailleurs sous pluviosité pourtant équivalente.

L'indice climatique relatif de productivité  $R/E_T$  (voir paragraphe CF.3.3.), dont on ne doit pas oublier que la nature mathématique de sa relation avec la productivité n'est pas connue, est sans doute mieux adapté à l'estimation relative de la production végétative d'une prairie que de la production fruitière d'une culture annuelle. Il pourrait cependant trouver des applications limitées dans ce dernier cas. Considérons par exemple le découpage (très grossier en raison de l'insuffisance actuelle d'analyses de stations) en Zones et Régions agroclimatiques effectué dans la partie droite du tableau : la présence de Garoua dans la Région D (indice de 0.64 à 0.84) avec son indice égal à 0.54 seulement, comme celle de Mongo avec 0.58 dans la Région C (0.33 à 0.49, peuvent paraître douteuses et demander examen approfondi.

Il serait illusoire, cependant, d'essayer d'élaborer un indice de productivité valable pour toute sorte de culture. Les analyses de rendements effectuées au chapitre "Adaptation des Cultures Annuelles" sont à cet égard assez convaincantes. Le meilleur indice pour les sorghos et les pénicillaires, comme aussi le plus simple, est sans aucun doute la somme des températures, comptée de la date de semis théorique  $A_2$  à la fin de la "période humide"  $B_2$  (événements purement climatiques). On a vu en effet que la productivité est en relation parabolique avec la somme des températures, comptée de la date de semis réelle à la date d'épiaison (événements phénologiques), cette date d'épiaison devant correspondre, au plus tard, à la date  $B_2$  de fin de "période humide".

Pour le Cotonnier, la question est plus complexe, comme il apparaît bien dans l'analyse des rendements au Nord Cameroun, et demande encore réflexion : un indice expressif devrait combiner au moins la somme des températures entre les dates  $A_2$  et  $B_2$  et la lame d'eau disponible en "période post-humide".

Pour l'Arachide, comme pour les Légumineuses à graines, une analyse de rendements s'impose avant toute proposition préconçue.

Pour le Maïs, un indice comme la somme des températures devrait probablement être affecté d'un coefficient tenant compte des probabilités de sécheresse au cours de la "période humide".

Il doit être bien entendu enfin que de tels indices, tout relatifs d'ailleurs, ne peuvent prétendre à évaluer le potentiel de productivité d'une région, qui dépend encore au moins du niveau de fertilité des sols.

### 3. La Sole Fourragère.

Le début A<sub>2</sub> de la "période intermédiaire", figuré dans le tableau CY. 1. à la fois par le premier (à gauche) et le quatrième (à droite) rectangles noirs, peut aussi être pris pour critère, tout au moins relatif, de la date à laquelle les soles fourragères peuvent être de nouveau données à pâturer au bétail, au début de la saison pluvieuse.

On estime en effet à Shika-Samaru que la repousse de la végétation naturelle devient utilisable par le bétail lorsqu'il est tombé environ 3 inches de pluie (75 mm). Or cette quantité correspond assez bien à la pluie accumulée avant le moment A<sub>2</sub> à Sotuba-Bamako par exemple. En fait cette hauteur de pluie antérieure au moment A<sub>2</sub>, paraît varier assez largement suivant les stations, moins en fonction de l'importance globale de la pluviosité qu'en fonction de la soudaineté d'établissement des pluies.

Pour la sole fourragère, il est encore intéressant de rapporter le surplus d'eau de la "période humide" (colonne du tableau placée en début de saison sèche) à la durée de celle-ci. A égalité de durée en effet, et à condition que les caractéristiques physiques des sols permettent de le stocker à la disposition des racines, ce surplus détermine l'adaptation relative d'une aire à la production fourragère. Bobo Dioulasso et Bamako, avec des surplus de 430 et 450 mm, sont par exemple beaucoup mieux placés que Garoua avec 265 mm seulement, ce dernier surplus correspondant à une courbe de pluviosité aplatie.

De façon générale, si on porte en abscisses les durées de la "période humide" et en ordonnées les valeurs correspondantes des surplus, les stations situées au-dessus de la droite moyenne seront favorisées du point de vue production fourragère par rapport à celles situées au-dessous pour une même abscisse. Ainsi, par exemple, les stations climatiques du Tchad, surtout à l'Est et au Sud, l'emportent très nettement sur celles du Nord Cameroun : Bouso (surplus de 400 mm) et Mongo (365 mm), sur Kaélé (265 mm) et Maroua (275 mm), comme Pala (375 mm) sur Garoua (265 mm). L'indice climatique relatif de productivité R/E<sub>T</sub> rend d'ailleurs bien compte de cette situation si on considère par exemple Ouagadougou (0.49), Kaélé (0.49), Maroua (0.49) encadrés entre Bouso (0.63) et Mongo (0.58).

Une limite très importante enfin pour la production fourragère est celle où s'arrête, vers le Nord, la production possible de Stylosanthes gracilis. Faute d'observations ou d'informations suffisantes, on la situera provisoirement, dans le tableau CY. 1., aux environs de l'isohyète 900 ou de l'indice 0.60. Il est dès maintenant impératif de chercher à préciser cette limite en tenant compte des caractéristiques physiques des sols.

### 4. Assolement et Rotation.

Concernant l'assolement, défini comme l'ensemble des soles exploitées au cours d'une même année agricole, on a vu que le climat régional détermine la "nature" des cultures susceptibles de composer la phase d'exploitation ou de succession culturale. Avec cette restriction que le sol doit se prêter à ces cultures. Mais ce sont finalement les conditions socio-économiques qui décideront du choix, et donc de l'assolement actuellement le meilleur.

Dans la rotation, définie comme la succession cyclique des cultures (dont la sole fourragère) sur une même parcelle, le rôle principal est tenu par le sol, dont les caractéristiques de fertilité détermineront les durées absolues et relatives des phases d'exploitation et de restitution. Néanmoins l'ordre de succession des cultures devra tenir compte de la nécessité de réaliser pour chacune d'elles le micro-climat le meilleur (question de "techniques", non traitée dans ce rapport) : par exemple, en plaçant en fin de succession culturale proprement dite une culture très épuisante en eau; ou en faisant précéder par une culture libérant tôt le sol une autre culture obligatoirement semée aux premières pluies (notamment dans les régions les plus sèches), le sol devant alors être préparé à la fin de la saison pluvieuse précédente; etc...

Bien que des plus important, on ne saurait cependant attendre du climat qu'il détermine à lui seul un système d'agriculture.

Bibliographie

- 1 - BLAIR I.J./FAO. - Production from grassland. - Report to the government of Ghana. 1963.
- 2 - BOUDET G. - Problèmes de l'association agriculture-élevage en Zone Soudanienne. Rev. El. Méd. Vét. Trop. 14(1)
- 3 - BOUDET G. - L'association agriculture-élevage peut elle devenir une réalité en milieu tropical? Rev. El. Méd. Vét. Trop. 15(3)
- 4 - BOUSQUET M. - Le Sine Saloum agricole. - Agron. Trop. 7(2 et 3) 1952.
- 5 - CHARREAU C., DOMMERCUES Y., ADAM J.G., DERBAL Z., PAGOT J., LAHORE J. - Etude des pâturages tropicaux de la Zone Soudanienne. - MALI, Bamako-Sotuba, Vigot frères, Paris.
- 6 - CLAYTON W.D. - A key to Nigeria grasses. - Samaru Res. Bull. 1, 1960.
- 7 - CLAYTON W.D. - The vegetation of Katsina Province, Nigeria. - Reg. Res. Sta., Samaru, Nigeria.
- 8 - COMITE DE LIAISON DES ORGANISMES DE RECHERCHE AGRICOLE OUTRE-MER. - Les plantes améliorantes et les prairies temporaires. - Bureau Technique du Comité, Paris.
- 9 - DOUGLAS M.J. - A place for Tropical Legumes in S.E. Queensland. - Queensl. Agr. Jour. 1962(1).
- 10 - FOSTER W.H. - Note on the establishment of a legume in range land in Northern Nigeria. - Samaru Res. Bull. 18.
- 11 - FOSTER W.H. - Investigations preliminary to the production of cultivars of *Andropogon gayanus*. - Samaru Res. Bull. 21.
- 12 - FOSTER W.H., MUNDY E.J. - Forage species in Northern Nigeria. - Samaru Res. Bull. 14, 1961.
- 13 - GILLIER P. - La reconstitution et le maintien de la fertilité des sols du Sénégal et le problème des jâchères. - Oléag. 15(8-9 et 10) 1960.
- 14 - HENIN S. - Quelques considérations sur les rotations. - Oléag. 15 (1) 1960.
- 15 - HIGGINS G.M. - Experimental farm coverage in Northern Nigeria. - Samaru Res. Bull. 17, 1962.
- 16 - KEULEMANS N.C./FAO. - Développements en agrostologie. - Rapport au gouvernement de la Haute Volta, 1965.
- 17 - KEULEMANS N.C./FAO. - Rapports périodiques au gouvernement de la Haute Volta, 1963-1965.
- 18 - KMOCH H.G./FAO. - L'amélioration des pâturages et de la production fourragère. Rapport au gouvernement de la Haute Volta, 1964.

- 19 - METGE - La mécanisation et le système cultural africain. - Agron. Trop. 7(2), 1952.
- 20 - MILLER T.B., RAINS A.B. - The nutrition value and agronomic aspects of some fodders in Northern Nigeria. - Samaru Res. Bull. 29, 1963.
- 21 - MINISTRY OF AGRICULTURE, NORTHERN NIGERIA. - Cattle, their vital role in agriculture. Some of the achievements in animal husbandry and grassland research at Shika and elsewhere. 1962.
- 22 - Mo ILROY R.J. - Grassland improvement and utilization in Nigeria. - Outlook on Agr. vol. 3, 1962.
- 23 - MOREL R., QUANTIN P. - Les jachères et la régénération du sol en climat soudano-guinéen d'Afrique Centrale. - Agron. Trop. 19(2) 1964.
- 24 - MOSNIER M. - Etude agrostologique des Fermes du Service de l'Agriculture de la République du Tchad. - TCHAD - Ministère de l'Agriculture. 1963
- 25 - PERRIN DE BRICHAMBAUT G. - Rapport d'une mission au Sénégal, Haute Volta, Mali et Nigeria septentrionale. - FAO - PL - 1963, 0095
- 26 - PERRIN DE BRICHAMBAUT G., WALLEN C.C. - Une étude d'agroclimatologie dans les zones arides et semi-arides du Proche Orient. FAO/UNESCO/WMO. 1962
- 27 - PORTERES R. - Climax de domestication et systèmes de culture. Agron. Trop. 4(3-4), 1949.
- 28 - PRITCHARD A.J. - Comparative trials with Sorghum alnum and other forage Sorghums in S.E. Queensland. - Austr. Jour. Exp. Agr. An. Husb. 4(12), 1964.
- 29 - OYENUSA V.A. - The composition and agricultural value of some grass species in Nigeria. - Emp. Jour. Exp. Agr. 25, 1957.
- 30 - TOURTE R. - Réflexions sur l'assolement au Sénégal. - Tiré à part C.R.A. Bambeý - 1961.

CROP CLIMATOLOGY - CC  
CLIMATOLOGIE DES CULTURES - CC

1. General considerations

1.1 In sections CN to CY the adaptations of the main annual crops to climate are considered, with the emphasis on agronomic considerations. In this section, complementary remarks concerning climate are made.

1.2 As stated at the beginning of Part III, in section CN, this survey is limited to dry farming, irrigation and flood-plain cultivation being taken into consideration only incidentally.

1.3 The most important biological characteristic used in the agronomic analysis is the "cycle" or length of time elapsed from seed to seed. Since, in the Area, the lengths of growing seasons are limited by availability of water, the climatic characteristic corresponding to the cycle is the moist period with reserve. The agreement between the cycle of crops adapted to a given locality and the mean moist period at the same place was found to be good.

Another biological characteristic of importance used in the agronomic analysis is the length of time from sowing to heading in cereals. The corresponding climatic characteristic is the sum of the first intermediate and humid periods.

1.4 The ratio, over the whole Area, between mean annual rainfall and the length of the moist period with reserve is constant at 5.5 mm per day, as shown at Table WB.2.1. Mean annual rainfall is a more familiar and more commonly available parameter than the length of the moist period plus reserve, but it is thought that the latter is more specific and can be more useful. The  $5.5 \text{ mm.day}^{-1}$  approximation offers a simple way of deriving the one from the other when  $E_T$  values and water budgets are not available.

Similarly, the ratio of effective rainfall to length of moist period is about 4 mm per day.

1.5 The climatic tolerances of the crops discussed can accommodate the climatic range of almost the entire Area. The only exception is the fairly narrow-range ecotype of cotton grown almost exclusively in the Area.

A comprehensive agroclimatic analysis must therefore subdivide the crops into ecotypes with narrower requirements. An example was given in the case of sorghum cycles, but because of the size of the Area and the scope of the survey it was not possible to do more. However, the parameters evolved, and the relations established and discussed, can be applied to a more detailed analysis.

1.6 As a result of the calendar position of the summer growing season, and of the low latitudes of the Area, crops adapted to it flower either after the longest day of the year or close to it. Consequently, they are either short-day or indifferent to photoperiodism if their growth cycle is shorter.

1.7 The most objective and, possibly, the most logical way of determining the climatic needs and tolerances of crops is to establish independently the distribution of the cultivations and of the climatic parameters concerned, and then compare them, discarding situations where soils and demographic factors intervene to an overruling extent.

Although it was not found possible to carry out this type of analysis systematically, examples of the approach will be given in this section, principally in connection with millet.

## 2. Sorghum

2.1 In the agronomic analysis, the growth cycle of sorghum is given as varying between 80 and 250 days. This corresponds approximately to mean annual rainfalls of 450 and 1350 mm, carrying sorghum well over the southern limits of the Area, but not quite up to the northern ones.

2.2 An analysis of phenological data from successive sowings at Deli in Moundou (see section CN) suggests that, in winter, the number of days between sowing and heading was determined by a constant sum of minimum temperatures expressed in degree-days.

### MOUNDOU Chad

Period	d	SMT	SNET
30/8 -23/10	54	1138	1271
30/9 -22/11	53	1096	1282
30/10-28/12	59	1096	1336
30/11- 5/2	67	1054	1376

*Table CC.2.1. Sums of "Minimum", SMT, and night effective temperatures, SNET, during the periods indicated. Units in the case of SNET may be taken as half degree days.*

A sum of minimum temperatures is a difficult concept to visualize physically since a minimum temperature only obtains for a fleeting instant.

Sums of effective night temperatures (defined at section HT) which could be expressed in half degree-days, were worked out for the periods considered and compared with the products of minimum temperature by number of days, Table CC.2.1. Both sets of values were worked out carefully. The results are constant in both cases but more so in the case of night minima.

### M O U N D O U

### D E L I

Agroclimatic parameters		Earliest sowing giving high yield		Next monthly sowing
Beginning of moist period	27 April	Sowing	30 March	30 April
End of humid period	11 October	Heading	5 October	10 October
Length of prehumid and humid	167 days	Sowing to heading	189 days	163 days
Degree-days above 0°C for period	4400	Degree-days for cycle	5095	4295
		Mean number of grains	915	840

*Table CC.2.2. Comparison of average availability of water and heat parameters at Moundou with Bezot's observations at Deli.*



Secondly, the limit drops southwards to nearly 500 mm along the Mali-Mauritania border, where the soils are poor and the nomadic populations to the north are not very much inclined to till the earth.

Such demographic factors intervene again, and even more strongly, further east. Two bulges in the limit, one southwards and one northwards, are seen side by side. The first is in the territories of the pastoral Fulani and the even more nomadic Touareg and again takes the limit to the 500 mm isohyet. The second, on the other hand, is occupied by an agrarian people, the Hausa, and there cultivation surges northwards.

3.3 In the agronomic analysis, when comparing the yield of millet at Bambeý with climatic factors, it was suggested that there was an optimum position for the end of the humid period relative to heading time (which is fixed by photoperiodism at September 20th); as a first approximation had shown the regression of the interval between these two events with yield to be curvilinear.

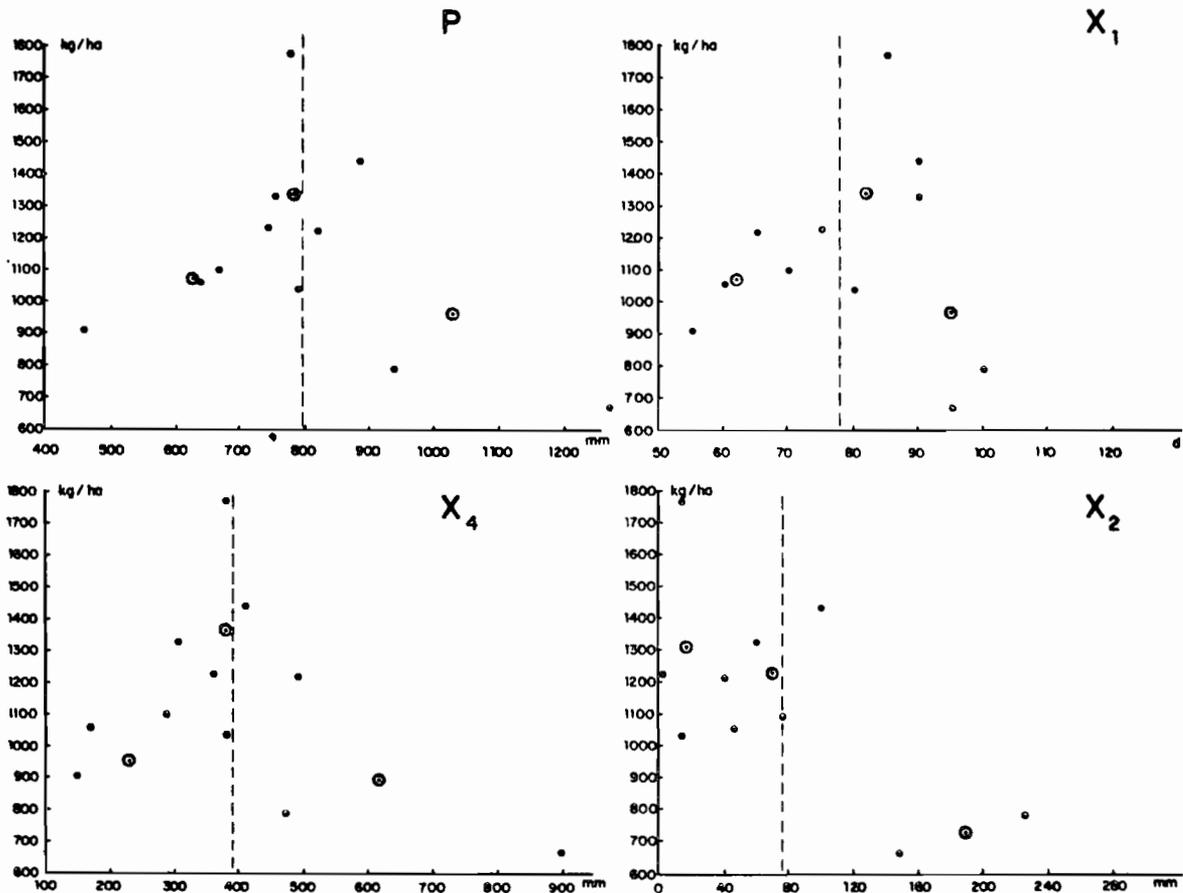


Figure CC.3.2. Scatter diagrams of yield versus rainfall  $P$ , duration of the humid period  $X_1$ , rainfall in October  $X_2$ , and water surplus  $X_4$ . The large ringed dots show the mean position of classes of the independent variables. A curvilinear regression with maximum close to the mean is indicated in the case of  $P$ ,  $X_1$  and  $X_4$ . The broken line shows the position of the mean of the independent variable.

Common sense suggests that the yield of an ecotype adapted to the climate of a locality might react adversely to marked departures above as well as below average values. This would happen even in semiarid conditions, since the main adaptation is a fitting of the various stages of growth and development to the availability-of-water periods. It will be easily appreciated that a humid period prolonged unduly beyond heading date would reduce yield through parasitic action and the washing down of pollen. Thus the regressions of yield on most, if not on all, of the climatic characteristics would be curvilinear. This would explain why the simple correlation coefficients calculated were too low to be significant, as one end of the curved regression line would tend to cancel out the other.

To test this further, scatter diagrams of yield versus rainfall and the factors  $X_1$ , duration of the humid period,  $X_2$ , rainfall in October, and  $X_4$ , water surplus, were plotted. They are shown at Figure CC.3.2. In each case, the eleven sets of coordinates were grouped in three classes according to the magnitude of the independent variable, and corresponding mean values were plotted. It is seen at a glance that in the case of the first three variables the relation is clearly curvilinear.  $X_2$ , rain during October, does not show the same relation, although if the one exceptional yield for 1955 were discarded, it too would show a group maximum in the central class.  $X_2$  was the variable which gave the highest single correlation coefficient with yield (negative) because its regression was the least curvilinear.

To give numerical expression to the characteristic that mean climatic and optimum yield values tend to coincide, simple correlations were worked out between yield and departures from mean climatic values irrespective of sign. The results are shown at Table CC.3.3. Highly significant results are obtained in the case of  $X_4$ .

	r	t	Significance
Mean annual rainfall 796 mm	- 0.80	4.0	Significant
Mean humid period, $X_1$ 78 days	- 0.67	2.8	Probably significant
Mean rainfall during October, $X_2$ 66 mm	- 0.58	2.0	Not significant
Mean water surplus, $X_4$ 391 mm	- 0.99	5.3	Highly significant

Table CC.3.3. Correlation between yield and departure from mean values of climatic variables.  $r$  is correlation coefficient;  $t$  is Student's significance parameter.

More formal quantitative expression could be given to these relations by working out correlation ratios and curvilinear regressions by recommended methods, but in view of the short length of the series it is thought that further elaboration is unnecessary at this stage.

The low values of the simple correlations were valuable negative evidence. They led to a realisation that the regressions were curvilinear.

#### 4. Cotton

4.1 Leaving aside two types of cultivations described at section CO which flourish in more humid conditions south of the Area, and also irrigated and flood-plain cultivations which are outside the terms of reference of this survey, cotton grown as a cash crop in the Area is, as explained in the agronomic analysis, derived almost exclusively from a G. hirsutum variety which, unlike sorghum and millet, does not show a wide range of adaptation, and therefore lends itself to more detailed analysis.

4.2 This cotton ecotype is not photoperiodic and the length of its growth cycle is approximately constant. Its main characteristics, as given at section CO, may be summarized as follows: average length, 160 days. Sowing to beginning of flowering, 55 to 65 days. Flowering, 60 days. Boll maturing and opening 45 to 55 days, with some overlap between the beginning of boll opening and the end of useful flowering.

4.3 At the equivalent rates suggested, this would correspond to mean annual amounts of 880 mm rainfall and 640 mm effective rainfall.

Where good soil and careful cultivation methods make it possible to use practically the whole of the rainfall and obtain economic yields, 650 mm mean annual rainfall might mark the northern limit of rainfed cotton grown as a cash crop. At this limit all the flowers would not be allowed to mature and the cycle would be shortened.

In addition to fitting the length of the growth cycle to that of the moist period, another adaptability requirement is that the humid period should cover flowering and yet not extend unduly beyond the beginning of boll opening.

4.4 1650 degree-days are stated to be necessary before flowering begins. This means 55 days at a mean temperature of 30°C or 65 at 25°C. From the isotherms illustrated at Figure WE.3.1, it will be seen that average temperatures of 30°C in the north of the cotton growing area and 28°C in the south are expected to prevail during the growing period. These average temperatures are not expected to vary much, thus commonly narrowing the vegetative stage to 55 to 60 days. The higher temperatures of the north would also hasten boll opening and maturing.

4.5 The growth cycle characteristics described in the agronomic section and restated above are represented graphically at Figure CC.4.1. On the same Figure and at

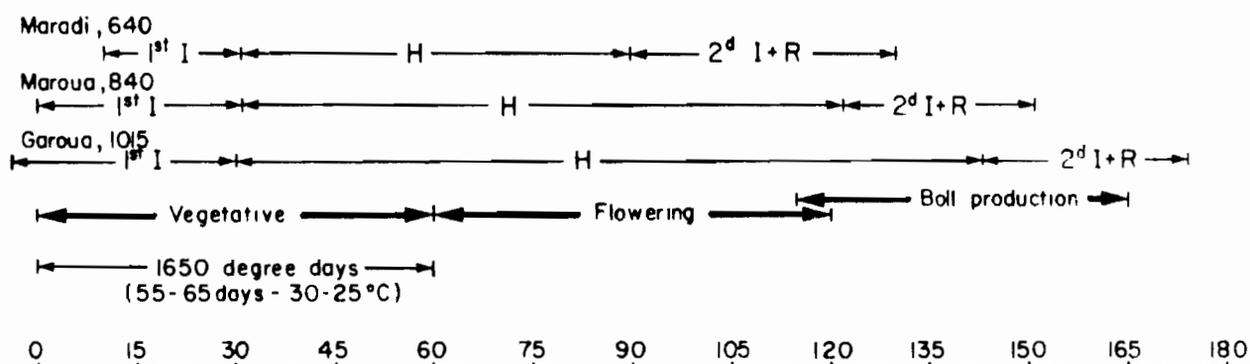


Fig CC.4.1. 165 day growing period of cotton in Area and availability of water periods at three localities. Maroua is only slightly shorter and represents the central zone of optimum production. Garoua is longer and there sowing might be delayed. Maradi is shorter and requires sowing as early as possible and good water storage to lengthen period 2nd I+R.

the same time scale, the availability-of water periods at three cotton producing places of different lengths of summer rains, Maradi in Niger and Maroua and Garoua in north Cameroun, are also shown.

An inspection of Figure CC.4.1 shows that the mean annual rainfall and length of availability-of-water periods at Maroua are the closest of the three to those described as optimum for the cotton ecotype discussed. Maroua also gives the best yield of the three. At Maradi the lengths of the humid period and of the moist period plus reserve would curtail the number of flowers giving bolls which could be picked. At Garoua, the prolonged humid period would foster parasitism of the bolls and interfere with fibre production.

4.6 On the basis of the needs and tolerances discussed above, three cotton agroclimatic zones have been sketched at Figure CC.4.2.

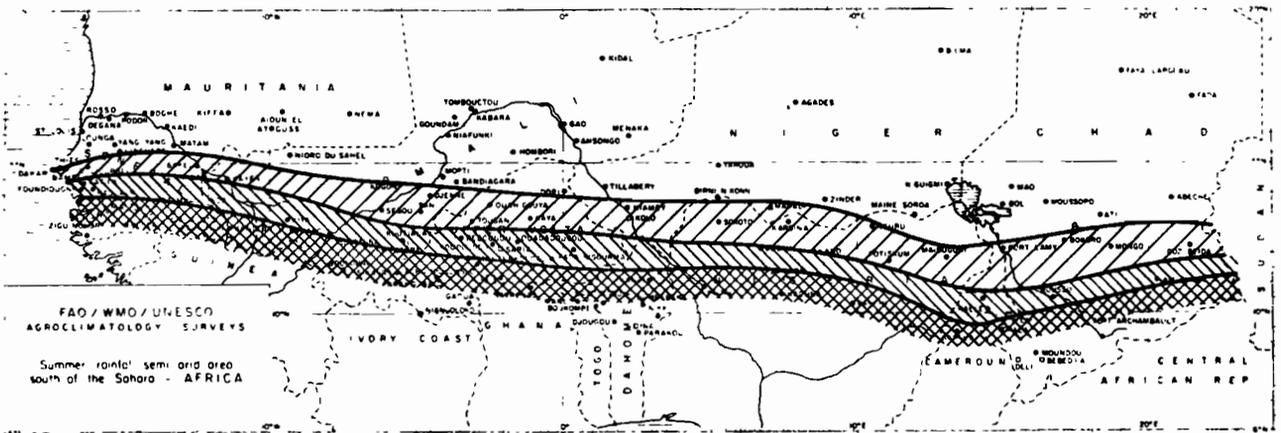


Fig CC.4.2. Climatic zones of rainfed *G. hirsutum* var. Allen. Boundaries, from north to south, correspond to 600 mm annual rainfall and 150 days and 170 days moist period with reserve.

The most northern is bounded to the north by the 600 mm mean annual isohyet. Assuming that sowing takes place as early as possible, and under very favourable conditions of soil and cultivation, it is thought that economical yields would be obtainable up to this limit. This also coincides approximately to the accumulated temperature isotherm of 3300 degree days over 0°C for the moist period plus reserve. (See Table TL.4.1 and figure TL.4.2.)

The central zone where, on the score of climate alone, optimum yields would be expected, is bounded by the 150- and 170-(day) isolines of the duration of the moist period with reserve.

To the south of this optimum production zone lies another in which the humid period appears to be too long for optimum production. It is assumed that there sowing would often be delayed, which makes it difficult to draw a southern boundary to the economic production of the cotton form discussed.

4.7 In the analysis at section CO of the effects of climatic variables on corrected production at Fort Archambault, the low values of the simple correlation fac-

tors are thought to be due to the curvilinear nature of the regressions, as in the case of the millet yields at Bambeby. Moreover, the very short series and the nature of production figures introduce an element of uncertainty. However, as Fort Archambault is well south of the zone considered to be optimum for production, the same degree of adaptability of the crop to the locality could not be expected - especially since there is a probability that sowing might be delayed.

4.8 The climatic factors analysed can be subdivided into two groups: those which depend on calendar months,  $X_1$  to  $X_6$ , and those which depend on the duration of the availability-of-water periods,  $X_7$  to  $X_{13}$ . There was no obvious difference between the significance of the correlations of yield with the factors of both classes. However, in view of what has been said in the previous paragraph concerning the adaptability of cotton to the climate of Fort Archambault, it is difficult to interpret this as evidence that one class was better than the other.

4.9 The analysis of the variation of yield in space, also found at section CO, was supplemented by a pictorial analysis, shown at Figure CC.4.3. Three maps were drawn showing the position of the eight places which gave their names to the districts whose yields are compared.

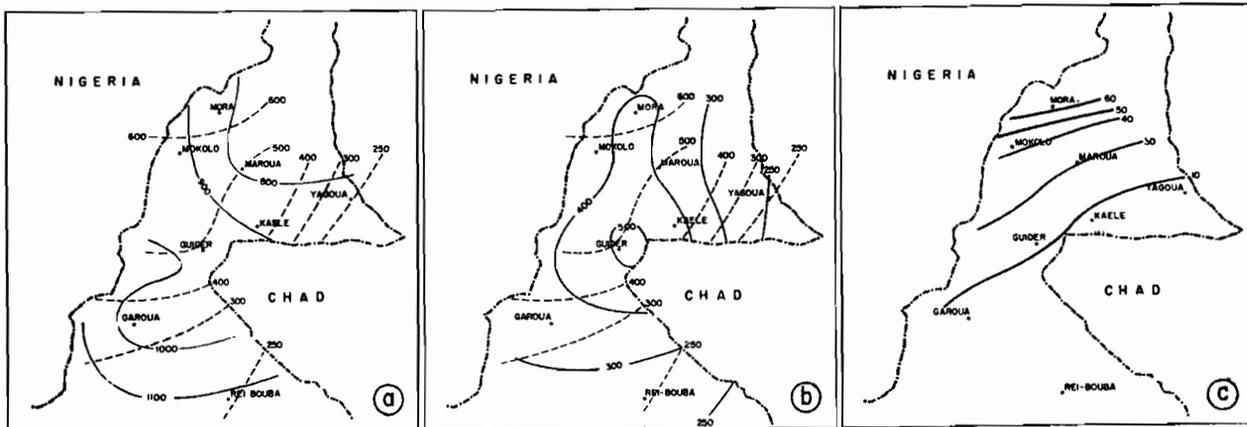


Figure CC.4.3. (a) Isohyets (plain lines) and mean yield for period (broken lines), showing north-northeast inverse rainfall gradient and northwest productivity gradient. (b) Average yield over the first three years (initial yield), (plain lines), with a maximum around Guider and a steep decrease to the west-southwest, and again mean yield for the period (broken lines). (c) Lines of equal improvement in yield, with an increasingly steep gradient towards the north.

Map (a) shows a gradient in mean yield towards the northwest, and an inverse rainfall gradient towards the northeast. This may be taken to mean that, within the range of mean annual rainfall considered, yield increases with decreasing rainfall, but that another factor, soil fertility, is also acting along a gradient inclined to that of decreasing rainfall.

It is interesting to note that the northern districts which give the best yields are within the optimum zone outlined at CC.4.2.

Map (b) shows that the distribution of the mean yield for the first three years (the initial yield) is concentric around Guider, unlike the mean yield for the whole



The mean cycle length of about 130 days matches well the 131 days of the moist period plus reserve. This means not only that all available moisture is made good use of, but that harvesting takes place before the ground has hardened unduly.

Useful flowering, during which groundnut needs most water and is most sensitive to drought, falls within the humid period at a time when water is plentiful and the risk of dry spells is least. (A dry spell analysis of the rainfall at Thies, similar to that worked out for Zinder in section PS, would yield the probability of occurrence of droughts of economic significance during the humid period.)

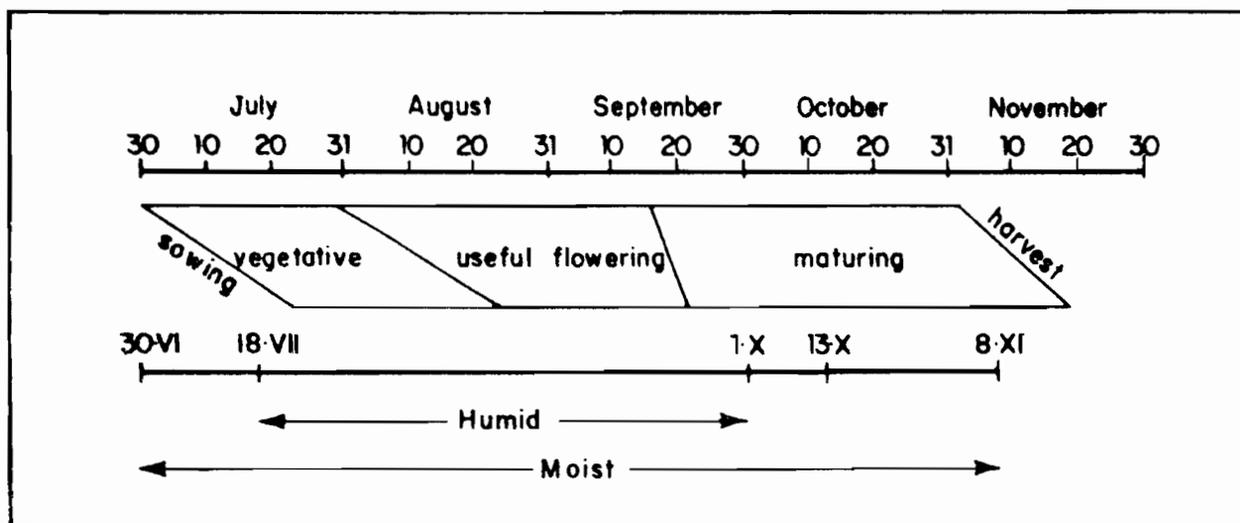


Fig CC.5.2. Occurrence and range of biological events in the Diourbel district (after Delolme). Below, average dates of availability-of-water periods at Thies.

This comparison shows that the varieties grown in the Diourbel district are well adapted to its climate. It also shows that the availability-of-water periods as defined at Part II are useful agroclimatic parameters.

5.3 Groundnut is sensitive to the rosette virus which is carried by an aphid. It has been explained in the agronomic analysis that the time of infection relative to the stage of growth determines the extent of the damage. This timing is probably related to the wind and humidity control of aphid occurrence, and advection by air current. Control measures must be largely dependent on meteorology.

## 6. Maize

6.1 Unlike millet and sorghum, maize is not a cereal specially adapted to semi-arid climates. It is primarily a crop of warm and moist regions although its plasticity, great antiquity, and much development work, have given it a very wide range of habitats. In the Area, it is grown as far north as sorghum and it is also grown as a catch crop in the south, as explained in the agronomic analysis.

6.2 In this analysis maize is said to be very sensitive to periods of drought and low atmospheric humidity, especially at flowering time. It is also pointed out that, in the seedling stage, it is fairly resistant to drought.

Thus, on the one hand, sowing should be so timed that the moist period is near at hand whilst, on the other, short dry spells at first might be tolerated. This points to the extreme west of the Area as being more suitable for maize cultivation where sowing must be done at the beginning of the season. In that region the prehumid periods are relatively shorter.

DONNEES AGRONOMIQUES INDISPENSABLES EN AGROCLIMATOLOGIE - DA  
AGRONOMIC DATA ESSENTIAL IN AGROCLIMATOLOGY - DA

Relativement aux données météorologiques, souvent bien mal adaptées cependant aux besoins de l'agroclimatologie, il y a grande pénurie de données agronomiques. Celles-ci se caractérisent aussi généralement par la discontinuité et les lacunes, l'imprécision, l'hétérogénéité des conditions d'obtention, l'absence d'interprétation synthétique et la décentralisation excessive. En résumé par le défaut de normalisation.

Tous les renseignements d'ordre agronomique peuvent avoir leur utilité. Mais les données qui se rapportent aux événements phénologiques des cultures et à leurs rendements sont les plus importantes. Il serait illusoire, en leur absence, de vouloir approfondir une étude agroclimatique qui aurait été entreprise dès l'abord essentiellement sur la base de données météorologiques et climatiques.

La connaissance des événements phénologiques permet en effet d'ajuster les cycles de végétation des cultures aux événements climatiques remarquables. Les rendements permettent de tester la validité des hypothèses qu'on est amené à faire sur l'importance de telle ou telle variable climatique. C'est enfin sur ces deux ordres de renseignements que doit être fondé le découpage agroclimatique d'une aire déterminée.

1. Les données de rendement.

Leur intérêt diffère suivant leur source.

1.1. Essais réalisés en Station.

Les plus intéressants sont les essais variétaux pluriannuels qui s'enchainent dans le temps avec des variétés progressivement plus productives et qui bénéficient de l'amélioration, progressive aussi, des techniques culturales, des formules de fumure et des méthodes et moyens de protection sanitaire. Ce caractère de progressivité dans l'amélioration du niveau de technicité permet de séparer, dans la fluctuation globale du rendement, celle qui est d'origine proprement climatique, si toutefois le facteur sol peut être tenu pour négligeable. Un inconvénient fréquent est en effet que ces essais sont établis sur des sols souvent variables d'année en année. Pour l'interprétation agroclimatique de ces essais, la connaissance des événements phénologiques majeurs, d'une ou plusieurs variétés, est indispensable.

Les essais de technique culturale, de fumure, de protection insecticide par contre présentent généralement des fluctuations, dues aux traitements testés, qui les rendent souvent inutilisables. Les essais de rotation sont parfois plus favorables.

La moyenne de rendement de tous les essais d'une station, enfin, dans une même année, peut être utilisable si ces essais sont en grand nombre. Par leur dispersion ils réalisent d'ailleurs une bonne homogénéité de sol.

1.2. Essais réalisés hors Station.

Ils sont d'autant plus intéressants que les points d'essai sont plus nombreux. Là encore, ce sont les essais variétaux qui fournissent l'information la plus utilisable. On devra distinguer :

- les essais réalisés à l'extérieur, par le personnel des stations, suivant des techniques expérimentales et culturales évoluées.

- les essais réalisés à l'extérieur, chez l'agriculteur et par lui-même, suivant les techniques culturales en usage.

Cette distinction permettra de comparer l'importance de la fluctuation d'origine climatique du rendement pour des cultures conduites suivant des techniques en amélioration continue et pour des cultures menées de façon traditionnelle.

Dans toute la mesure du possible, pour ces essais hors station, les évènements phénologiques majeurs seront repérés.

### 1.3. Multiplications de Semences effectuées en Station.

Leur intérêt est généralement supérieur à celui des essais variétaux, d'autant qu'ils recouvrent des surfaces plus grandes tendant à réaliser d'une année à l'autre une certaine homogénéité de sol. Comme pour les essais variétaux, on s'attachera à noter les évènements phénologiques majeurs de la culture.

### 1.4. Multiplications de Semences effectuées chez et par l'Agriculteur.

Leur intérêt est au moins égal à celui des essais réalisés par l'agriculteur, et d'autant meilleur que leur surface est plus grande. Ils permettent encore, relativement aux multiplications effectuées en station, dans de meilleures conditions de culture progressivement améliorées, de chiffrer l'influence du niveau de technicité sur l'importance de la fluctuation d'origine climatique du rendement. Les évènements phénologiques majeurs seront repérés dans toute la mesure du possible.

### 1.5. Essais de Vulgarisation, en Ferme expérimentale, des Variétés et Techniques culturales améliorées.

C'est de loin la source la plus intéressante de données de rendement à comparer, dans le cadre agroclimatique, aux rendements de la pratique courants. Toutes les observations faites en cours de culture auront leur utilité.

### 1.6. Statistiques de Rendement.

Elles sont établies pour des unités régionales plus ou moins étendues : village, canton, point de marché, district, etc... Leur grand intérêt, c'est qu'elles réalisent, d'année en année, une homogénéité de sol d'autant meilleure que l'unité régionale considérée est plus vaste. Par contre l'amplitude de fluctuation des variables climatiques se trouvera d'autant plus atténuée, puisque le rendement moyen devra être rapporté au climat moyen de l'unité régionale en cause. Chaque fois que possible un équilibre devra être recherché entre la nécessité de réaliser une bonne homogénéité de sol et celle de conserver une certaine amplitude de variation des facteurs climatiques. On essaiera, ici, d'avoir une connaissance approximative des dates moyennes de semis et de récolte.

### 1.7. Statistiques de Production.

On pourra toujours essayer de les utiliser quand manqueront, faute de connaître les surfaces, les statistiques de rendement. Un point très important est cependant de ne pas attribuer à une baisse de rendement une chute de production qui pourrait avoir été provoquée par une réduction des surfaces ensemencées, du fait d'une sécheresse persistante durant la période normale des semis par exemple.

Mais on pourra aussi ne viser qu'à rechercher les relations des variables climatiques, non pas avec le rendement, mais avec l'importance annuelle de la production intégrant tous ses facteurs de variation, dont la surface ensemencée.

## 2. Les données phénologiques.

Outre les événements phénologiques majeurs observés déjà dans les essais variétaux et les collections de plantes, tous les événements mineurs reconnus, concernant toutes les variétés en production et/ou en multiplication, et les variétés en essai les plus importantes, seront repérés sur parcelles de petites dimensions réservées à cet usage, si possible à proximité du poste météorologique.

La connaissance de ces événements n'aura généralement de valeur que dans la mesure où ils auront été relevés sur des plantes semées à des dates échelonnées et plus ou moins espacées suivant l'espèce, les amplitudes annuelles de la photopériode et de la température et le degré de précision désiré.

Le rendement ne sera pas évalué, sur ces petites parcelles, mais on pourra estimer la productivité moyenne d'une plante de la variété considérée par comptage et/ou pesée des produits de la fructification, à mettre en relation avec le degré de développement végétatif (nombre de noeuds de la tige principale) pour une date de semis déterminée. En cas de parasitisme, une protection sanitaire totale de ces parcelles s'impose évidemment.

Un bon exemple de notation des événements phénologiques est donné par une publication de P. Bezot concernant les Sorghos au Tchad : "L'amélioration des Sorghos au Tchad". L'Agronomie Tropicale, 18(10), 1963.

TIP. VARYSTAMPA  
R O M A  
Tel. 630674