

ordre :

THÈSE

présentée à la
Faculté des Sciences de l'Université de Paris

pour obtenir

27 JUIN 1985

Le Titre de Docteur de l'Université

Spécialité : GEOPHYSIQUE
Mention : METEOROLOGIE

par

Mansour SECK



Sujet de la Thèse : LES ORAGES DANS LA REGION OCCIDENTALE DE L'AFRIQUE.

Soutenue le 23 Octobre 1969 devant la commission d'Examen

- M. QUENEY.....Président
 - MM. BRUN.....
 - GESLIN.....
- } Examineurs
- de FELICE.....Invité

PARIS 1969

A V A N T - P R O P O S

J'adresse mes sincères remerciements à
M. MASSON, ancien doyen de la Faculté des Sciences de
Dakar et à notre regrettée Melle SALVADOR pour leurs
précieux conseils.

Je remercie de même M. SY pour l'aide qu'il
m'a apportée.

Mes remerciements vont également à toutes les
personnes qui m'ont aidé à la réalisation de cette entre-
prise :

- M. Marc HALLAIRE, du Centre de Bioclimatologie
de Versailles (I.N.R.A.)
- M. GIRAUD, Directeur de l'Ecole de la Météoro-
logie Française
- M. GENEVE, de la Météorologie Nationale Française
- M. BRICARD, de la Faculté des Sciences de Paris
- et tous mes collègues du Centre Météorologique
de Dakar Yoll.

Enfin je suis profondément reconnaissant à
M. le Professeur QUENEY, à M. DUBIEF et à M. de FELICE
pour l'intérêt qu'ils n'ont cessé de porter à mon tra-
vail et les encouragements qu'ils m'ont prodigués.

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I - <u>Conditions Géographiques</u>	
1- Relief et Végétation.....	3
2- Circulation Générale dans la région occidentale de l'Afrique....	6
3- Les Masses d'air et les Centres Bariques.....	12
CHAPITRE II - <u>Formation et Evolution des Orages</u>	
1- Généralités sur la formation des orages dans la région occidentale de l'Afrique.....	16
2- Evolution des orages dans la région occidentale de l'Afrique...	19
3- Caractères des orages dans la région occidentale de l'Afrique..	21
4- Quelques méthodes de prévision des orages.....	24
CHAPITRE III - <u>Fréquence des Orages dans la Région Occidentale de l'Afrique</u>	
1- Données pour différentes stations.....	27
2- Classification d'après le nombre de maxima d'orages et de précipitations.....	33
3- Conclusion.....	38
Introduction aux Chapitres IV et V.....	39
CHAPITRE IV - <u>Orages locaux</u>	
Evolution d'un orage par débordement marin à DOUALA.....	40
CHAPITRE V - <u>Orages Synoptiques</u>	
Evolution d'une ligne de grain sur la Région Occidentale de l'Afrique ,les 18 et 19 Juillet 1963.....	46
CONCLUSIONS GENERALES.....	54

I N T R O D U C T I O N

Jusqu'à présent peu de météorologistes se sont penchés sur l'étude des orages dans la région occidentale de l'Afrique.

D'éminents spécialistes tels que H. Hubert, Hamilton et Archbold, R. Genève, D.V. Glenn, H. Riehl, MM. P. Queney et J. Dubief, se sont intéressés d'une façon générale à la Météorologie Tropicale. Ces derniers ont particulièrement étudié la région Sahara -Afrique du Nord.

P. Duverger, dans un cadre plus étendu, a fait le bilan de quelques méthodes de prévisions des orages, dont les applications en Afrique n'ont pas encore été entreprises.

Dans le domaine des orages de nombreux points restent à élucider. En 1965, D. Mandingue, un jeune ingénieur camerounais, a étudié les perturbations atmosphériques et les précipitations dans la région de Douala ; cependant son travail est trop général pour apporter assez de précisions dans le domaine des orages.

C'est pourquoi nous nous sommes proposé d'une part de décrire les grands traits de la météorologie de la région occidentale de l'Afrique et d'étudier les divers processus de formation des orages ainsi que leur évolution dans cette région. Nous préciserons alors la répartition

des orages afin de pouvoir classer les climats.

D'autre part nous avons étudié l'évolution et le déplacement d'une ligne de grain du Dahomey au Sénégal, ainsi que le développement d'un orage de type particulier au voisinage de Douala.

C H A P I T R E I

CONDITIONS GEOGRAPHIQUES

I. 1. Relief et végétation

La région étudiée est ainsi délimitée :

Latitude : 3° Nord - 25° Nord

Longitude : 10° Est - 20° Ouest

Au nord du 25ème parallèle, c'est le Sahara où les renseignements météorologiques sont parfois rares. Au Sud du 3ème parallèle comme à l'Ouest du 20ème méridien, on se trouve en mer où les données sont peu nombreuses. Enfin à l'Est du 10ème méridien, c'est déjà la zone d'évolution des orages qui prennent leur origine dans la région orientale de l'Afrique. A titre exceptionnel une analyse de situation orageuse a été effectuée au Cameroun pour apporter plus de précision à ce travail.

La région occidentale de l'Afrique est une grande plaine dont le relief est très peu accidenté : (fig. 1 et fig. 2)

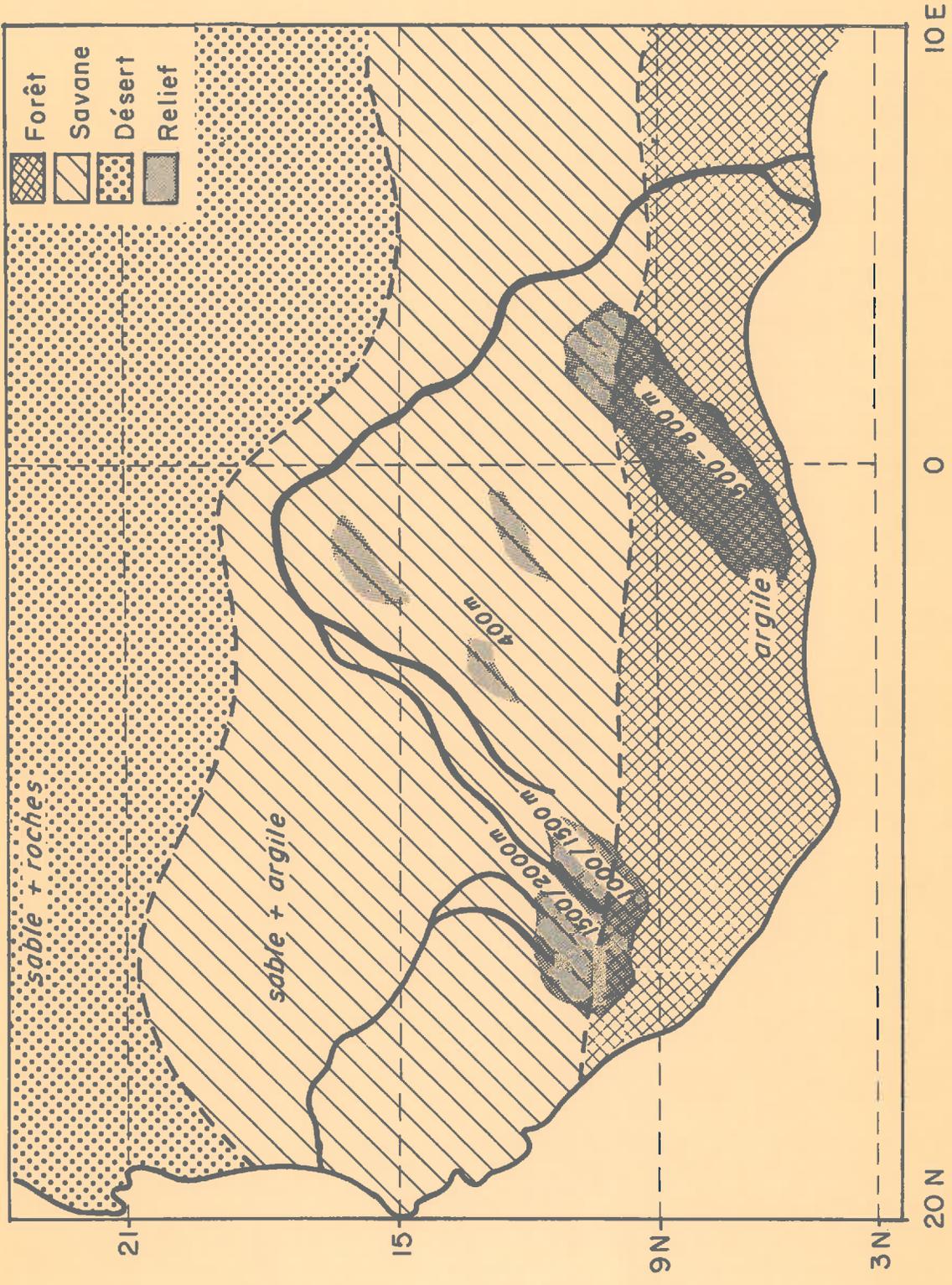
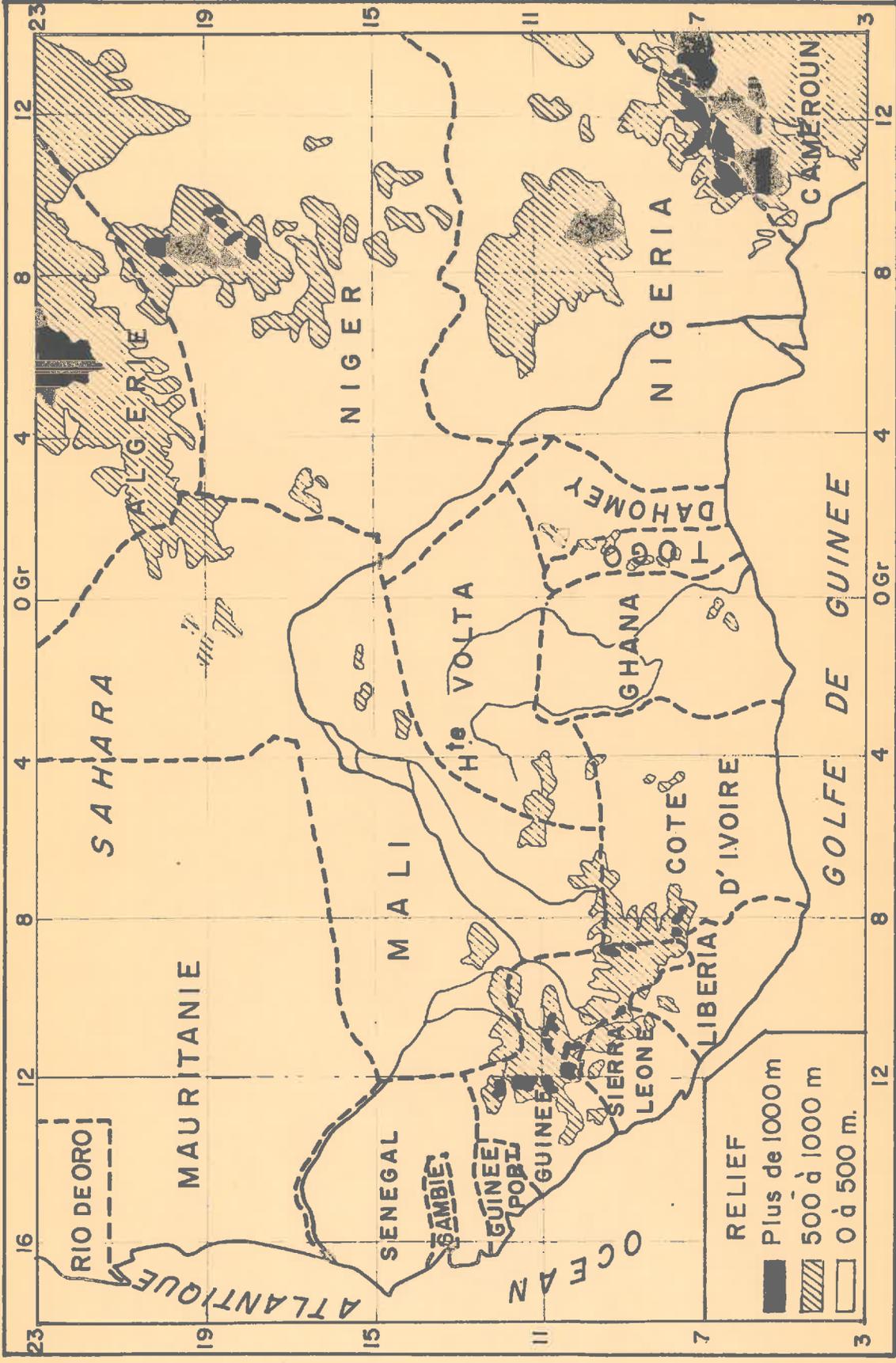


Fig. 1

AFRIQUE OCCIDENTALE



Projection de MERCATOR Echelle 1/15000000°

Echelle exacte le long du parallèle 22° 30'

Fig. 2

On y rencontre des collines hautes d'environ 400 à 1000 m au Togo et au Dahomey. Le seul massif montagneux est celui du Fouta Djallon qui atteint 1200 à 1500 m.

Du point de vue de la végétation, on distingue 3 parties sensiblement parallèles à l'équateur (fig.1) d'après une enquête de la F.A.O. :

- la zone des forêts : englobant le Sud de la Guinée, la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Nigeria du Sud; une végétation de type équatorial, très dense, y favorise l'évapotranspiration. Cette zone s'étend environ du 5ème au 8ème parallèle Nord.

- la zone des Savanes : comprise entre le 8ème et le 18ème parallèle Nord, caractérisée par une végétation en broussailles, avec quelques forêts épaisses ; elle intéresse le Sénégal, le Mali, la Haute Volta, le Dahomey, le Togo, le Niger et le Nigéria du Nord.

- la zone désertique : située au Nord du 18ème parallèle recouvrant surtout le Sahara : la végétation y est presque nulle.

Enfin il est intéressant de dire quelques mots sur les différentes sortes de sol :

- sol argileux au Sud du 12ème parallèle Nord

- sol sablonneux au Nord de ce même parallèle

car l'intérêt de cette remarque se trouve dans le rôle du sol sur le comportement thermique de l'atmosphère.

N.B. La fig. 2 permet déjà de situer les différents pays de nos régions d'après le Larousse en 3 volumes (Paris 1965)

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

I. 2; Circulation Générale dans la région occidentale de l'Afrique

Des études statistiques permettent de distinguer deux types de vents :

- ceux qui existent en altitude mais dont les traces se retrouvent au sol
- ceux qu'on ne rencontre qu'en altitude

Ces études viennent, comme nous le verrons, confirmer les résultats obtenus par MM. Queney, Dubief, Hubert sur les courants aériens dans la région occidentale de l'Afrique. (H. Hubert 1928)

I. 2 - 1 - Les vents en surface

On distingue 3 grands courants au Sud du 25e parallèle Nord (position extrême du Front Inter Tropical) ;
(fig 3)

Les Alizés

Ce sont des vents de secteur Nord à Nord-Ouest, dans la région que nous étudions ; ils soufflent en général en bordure Est de l'anticyclone des Açores, le long de la côte de l'Afrique Occidentale. Ils sont permanents mais réguliers entre octobre et mai, leur vitesse dépasse rarement 13 m/s. On les trouve au sol et dans les basses couches, jusqu'à 1500 à 2000 m. Ils se caractérisent par un temps frais et humide d'origine marine, en provenance

SENEGAL - Carrefour de vents au sol

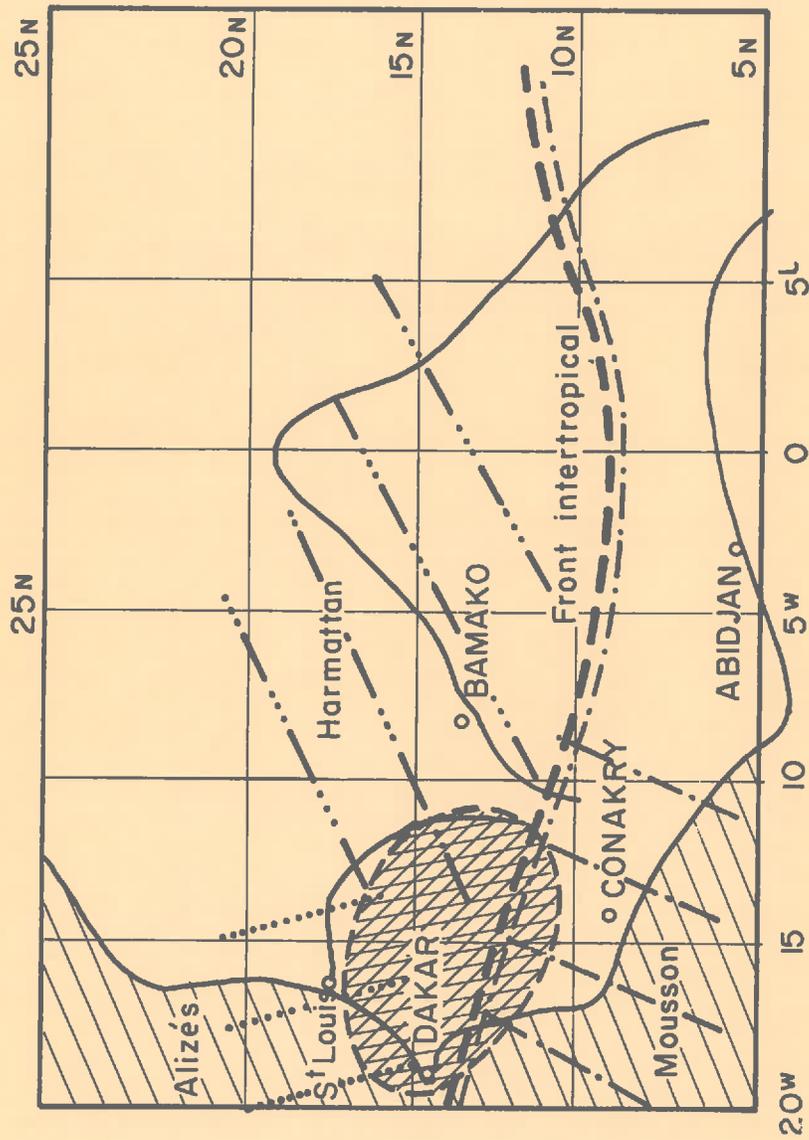


Fig. 3

des latitudes élevées : c'est un vent tropical maritime dont l'influence se fait sentir jusqu'à 60 km de la côte.

L'Harmattan

C'est un vent de secteur Nord-Est à Est sur le continent. Sa vitesse moyenne varie entre 3 et 13 m/s, elle peut atteindre 15 m/s dans les rafales et croît avec l'altitude. L'Harmattan s'étend jusqu'à 6000m. Il se caractérise par de l'air sec relativement froid en hiver et très chaud en été. Il peut provoquer des soulèvements de poussière qui se traduisent par du sable brassé et surtout par de la brume sèche : c'est un vent tropical continental. Il atteint parfois le golfe de Guinée et prend la forme d'une mousson d'hiver.

La Mousson

Elle souffle du secteur Sud-Ouest à Est et toujours au Sud du front inter tropical avec lequel elle se déplace. Sa vitesse varie entre 3 et 13 m/s, en général plus élevée le jour que la nuit. On rencontre la mousson jusqu'à 2000m, et même 4000m au Cameroun, convergeant autour de la dépression saharienne.

I. 2 - 2 Les vents en altitude

Nous ne parlerons pas des contre-alizés qui n'intéressent pas la zone considérée dans cette étude.

Nous ne distinguerons donc que 2 grands courants en altitude :

Les courants d'Est

Ce sont des vents de secteur Est, en général faibles et soufflant en altitude. Ils peuvent s'élargir jusqu'au Sud du F.I.T., soufflant dans le sens du déplacement des lignes de grains. Leur position par rapport à l'harmattan n'est pas encore précisée par suite du manque de sondages. D'après R. Genève (1953), il semble qu'il existe une oscillation biennale d' E/W du courant au dessus de 4000m.

Les grands courants d'Ouest

Ce sont des vents d'Ouest uniquement, d'une vitesse très variable, en moyenne de 13 m/s à 26 m/s, parfois même 65 m/s dans la zone où soufflent les courants jets subtropicaux . (le jet subtropical se situe entre le 25e et le 15e parallèle Nord, à une altitude moyenne de 12000m ; il n'existe pas en permanence.)

Les courants d'Ouest peuvent atteindre 18 500 m et leur base se situe aux environs de 5000m. (O.M.M. 1966)

Ils surmontent l'harmattan à partir de 6000m (H. Hubert 1928) et sont également responsables des descentes froides (Detwille, 1963) (fig. 4)

En ce qui concerne l'oscillation biennale, la même re-

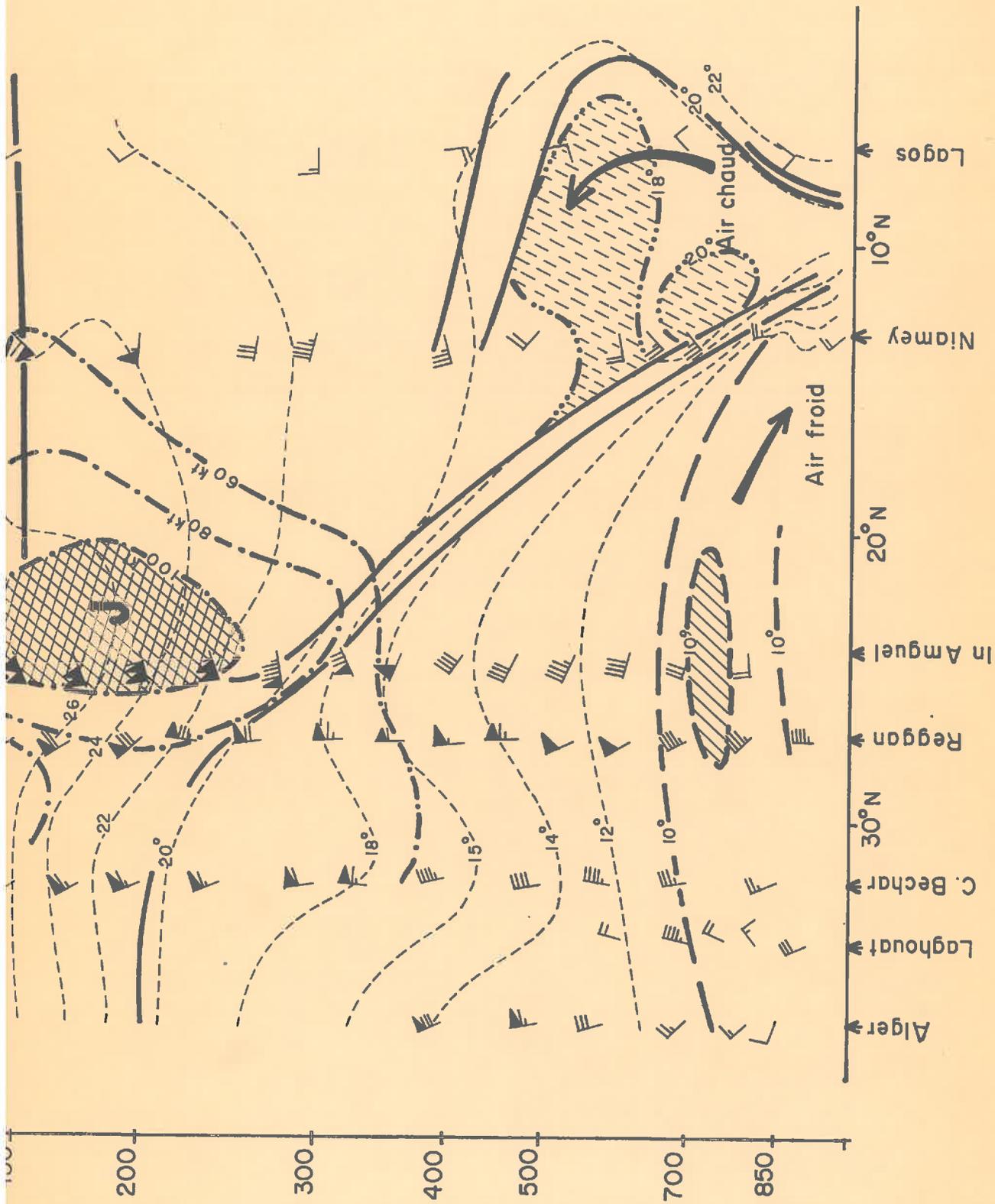


Fig. 4 - Coupe méridienne (vers 0° à 5°E), le 27 mars 1963

- discontinuités
- isotaches, près du Centre du JET
- - - lignes d'égalles valeurs de θ_w

marque que précédemment peut être mentionnée ici.

(R; Genève 1963)

I. 2 - 3 Conclusions

Nous donnons un extrait du rapport d'un Comité d'études Historiques et Scientifiques de la région occidentale de l'Afrique par la météorologie, (tableau 1) puis les positions du F.I.T. au cours d'un cycle annuel (fig. 5).

Enfin les 2 figures (6) et (8) traduisent approximativement les positions des vents.

De plus en ce qui concerne l'existence d'une oscillation biennale des grands courants d'Ouest à partir de 4000 m jusqu'à la stratosphère, on a constaté un noeud d'oscillation extrémum en juillet, tandis qu'en janvier on a un noeud d'oscillation excitatrice (fig.7). L'intensité de cette oscillation décroît de l'équateur au pôle.

Des études faites à Abidjan et à Banqui (Afrique) le long du méridien de Greenwich, à Canton Island (E.U., îles du Pacifique) et au 80e méridien Ouest aux Etats Unis, conduisent aux conclusions suivantes :

En traçant les isallotaches (variations interannuelles des vitesses de vent zonal) on s'est aperçu que :

Vents dans la région occidentale de l'Afrique
(données surtout valables pour la région de DAKAR)

COURANTS	PERIODE	ALTITUDE BASE	ALTITUDE SOMMET	VITESSE BASE LE MATIN	VITESSE BASE LE SOIR	VITESSE SOMMET LE MATIN	VITESSE SOMMET LE SOIR	DIRECTION
Alizés	Octobre Mai	Sol	1000 à 2000 m	3 à 13 m/s	3 à 13 m/s	2 m/s	10 m/s	N. NE
Mousson	Juin Octobre	Sol	1000 à 1500 m	1,5 m/s	3 à 13 m/s	3 à 13 m/s	3 à 13 m/s	NW à S. SE
Harmattan	Janvier Février et Mai-Déc.	Sol et 600 à 1000 m	1000 à 1500 m exception- nellement 1300 m	1,5 m/s 3 à 13 m/s	3 à 13 m/s	3 à 13 m/s	3 à 13 m/s	NE à SE
Grands courants d'ouest	Octobre Mai	5 000m	18 500m	13 à 26 m/s	13 à 26 m/s	13 à 26 m/s	60 m/s	NW à SW

(Tableau 1)

Positions du FIT dans un cycle annuel

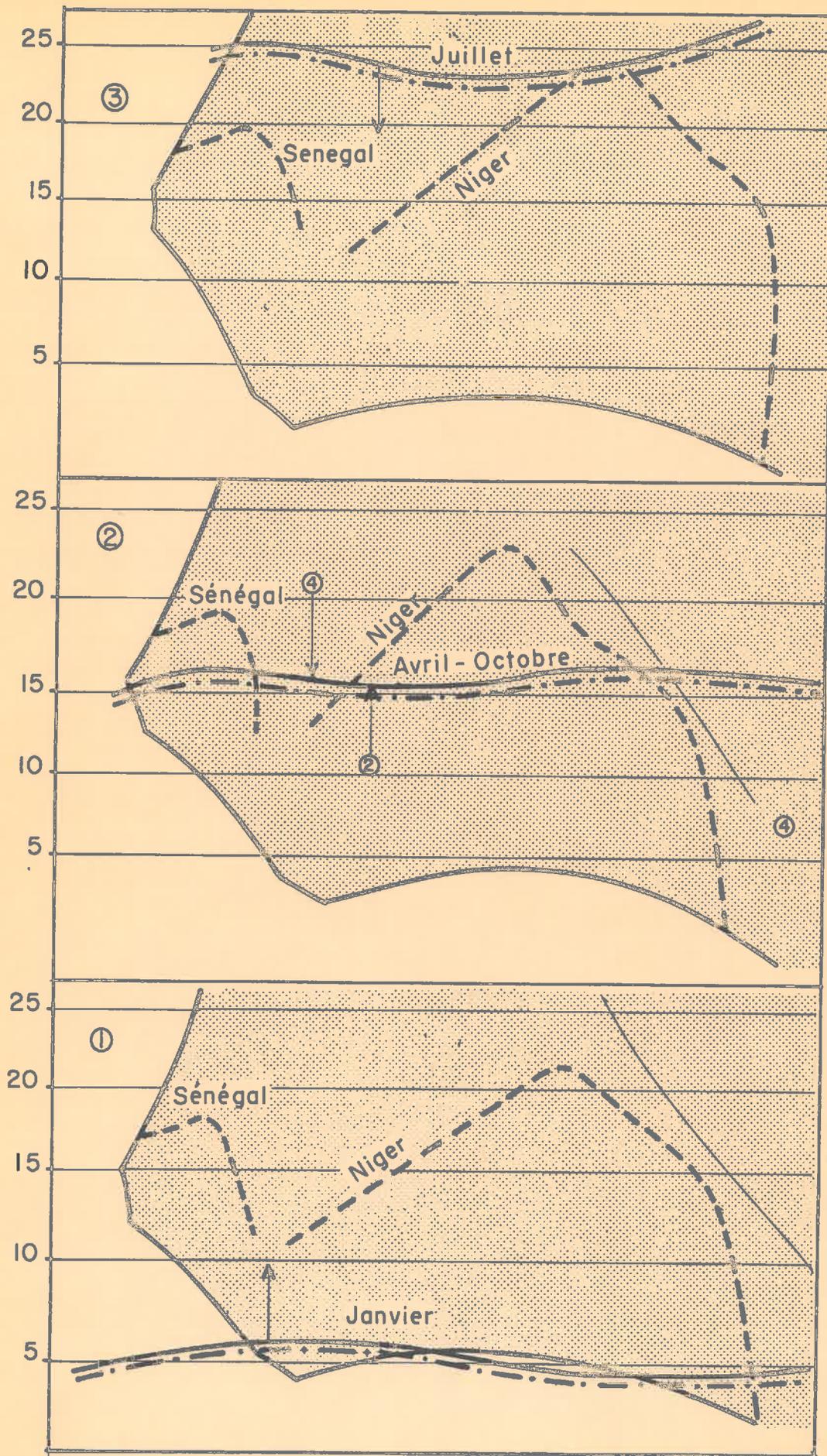
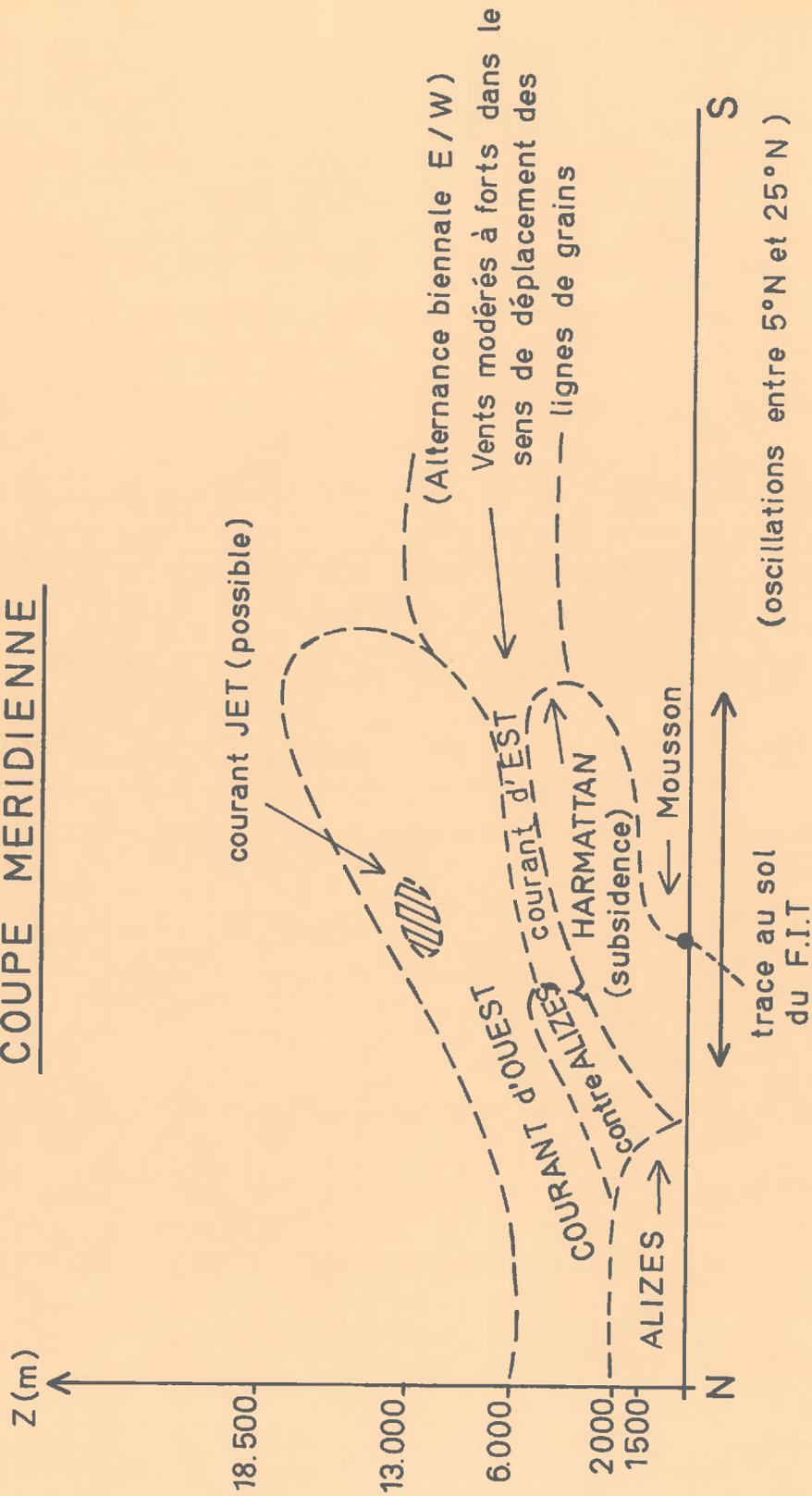


Fig. 5

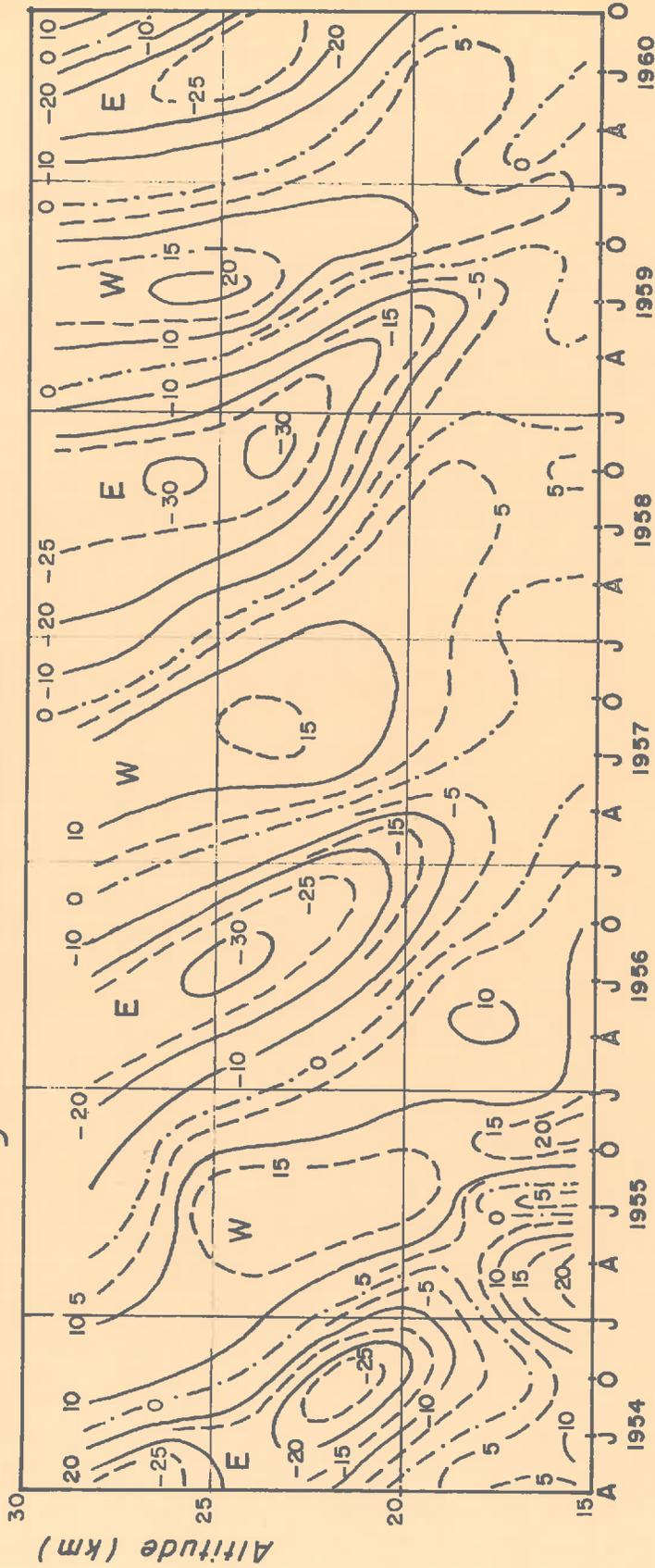
COUPE MERIDIENNE



(Fig. 6) : ensemble des courants aériens

Isobolotaches :

- vent d'Est } dans l'oscillation le noyau de hausse remplace
 + vent d'Ouest } celui de baisse et vice-versa



Oscillations biennales de la composante zonale du vent d'ouest à Canton Island (E.U)
 (170°W, 2°S) dans le Pacifique

Fig. 7

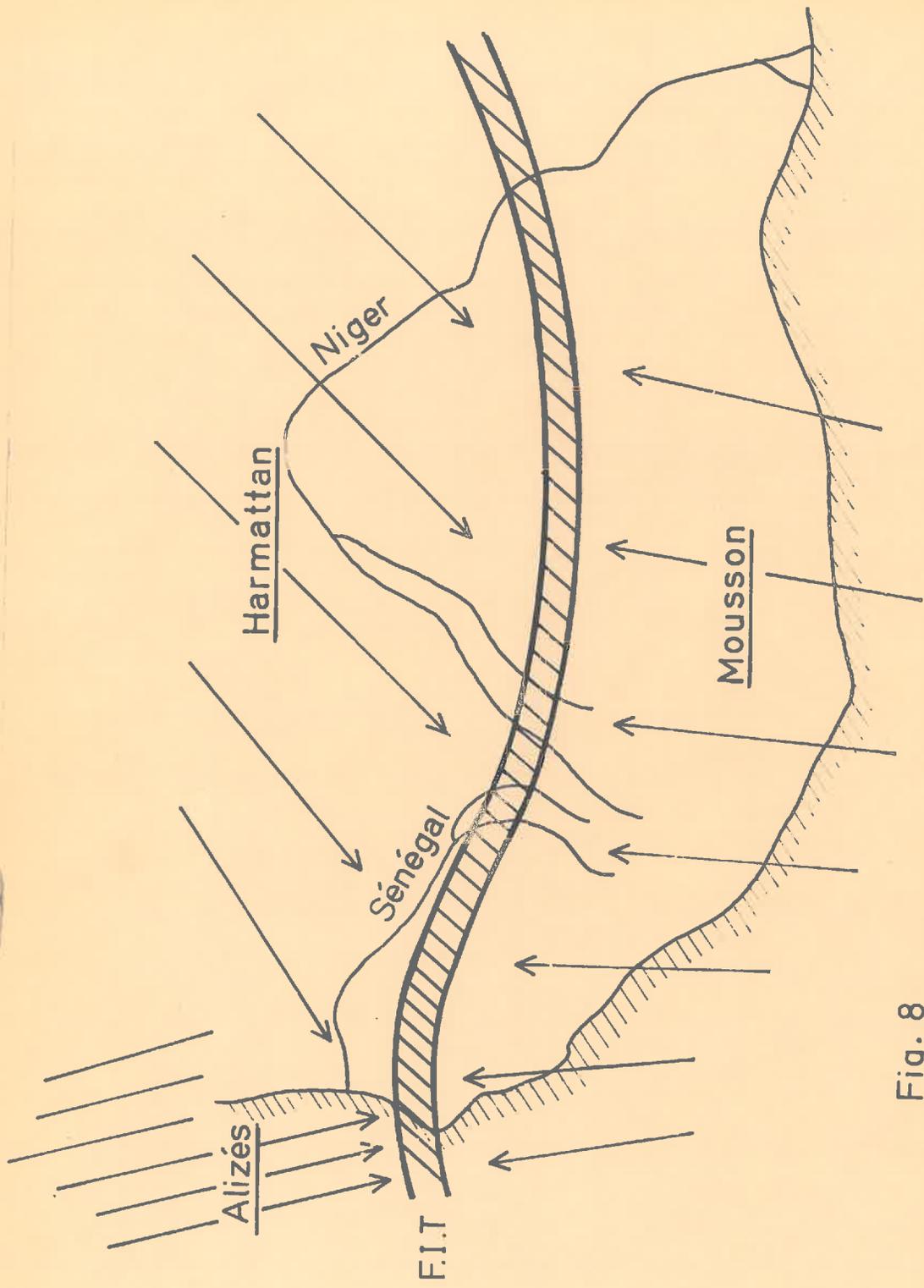
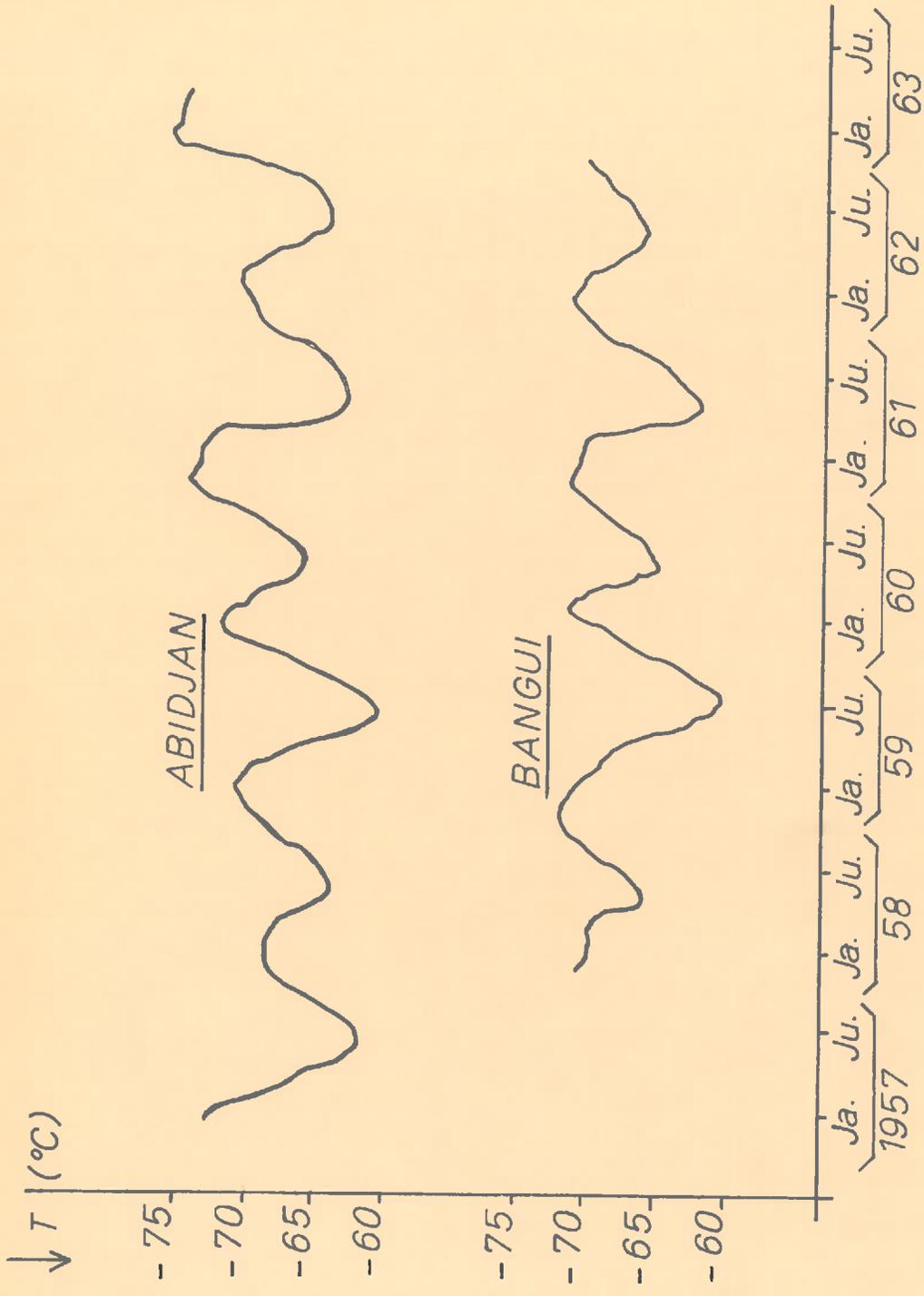


Fig. 8

- au-dessous de 4000m, la composante zonale est toujours positive, donc on a un courant d'Ouest.
- la durée d'oscillation n'est pas exactement 24 mois, elle est comprise entre 25 et 26 mois (quasi biennale)
- la vitesse de cette composante zonale est faible en Afrique, 20 m/s alors qu'elle est de 30 m/s le long du méridien 80 ° W.
- il existe à Abidjan et à Bangui une oscillation biennale de la température, mais sans liaison évidente avec celle du vent ; ces 2 oscillations seraient même en déphasage très important. Toutefois, on note que les maxima de températures correspondent, aux déphasages près, aux maxima des vents d'Ouest (fig. 7bis).

Remarque :

Ce qui complique le climat de Dakar pendant "l'hivernage" c'est que cette région est un carrefour où luttent de façon permanente alizés, harmattan et mousson. Si bien que les prévisions restent excessivement délicates par suite des fluctuations des différents vents, surtout au début et à la fin de cette saison.



Oscillations biennales des températures (moyennes mensuelles) à 60 mb.
 (d'après R.Genève)

Fig. 7 bis

I. 3. Les Masses d'Air et les Centres bariques.

Les quelques sondages qui ont été dépouillés pour Dakar, ne permettent pas de faire une étude très précise des masses d'air (fig.9).

Néanmoins des études statistiques ont permis de mettre en évidence 4 types de masses d'air en rapport étroit avec les vents. Cette classification confirme d'ailleurs les études faites par H. Hubert (1938) et J. Dubief (1951).

I. 3.-1 Ces masses d'air sont:

Les masses d'air tropical maritime neutre :

Elles se rencontrent en bordure occidentale des cellules anticycloniques, notamment celle des Açores, et n'interviennent pas dans la formation des orages car l'humidité relative y est faible.

Les masses d'air tropical maritime subsident :

Elles sont sensiblement identiques aux premières, mais étant donné qu'on les rencontre surtout à l'Est de l'anticyclone des Açores, elles présentent toujours une inversion de température en altitude, créée par une subsidence. Elles freinent l'évolution des orages par leur subsidence. L'humidité relative y est encore plus faible que dans les masses d'air tropical ; l'air est stable.

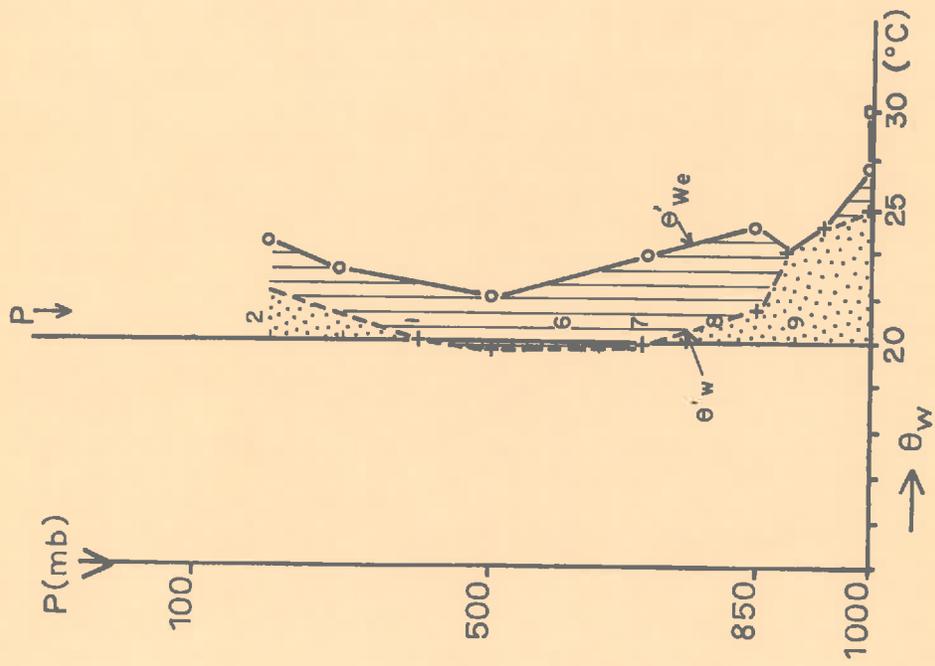


Fig. 9.1 - DAKAR-OUAKAM - 17 Septembre 1962 à 12 h.

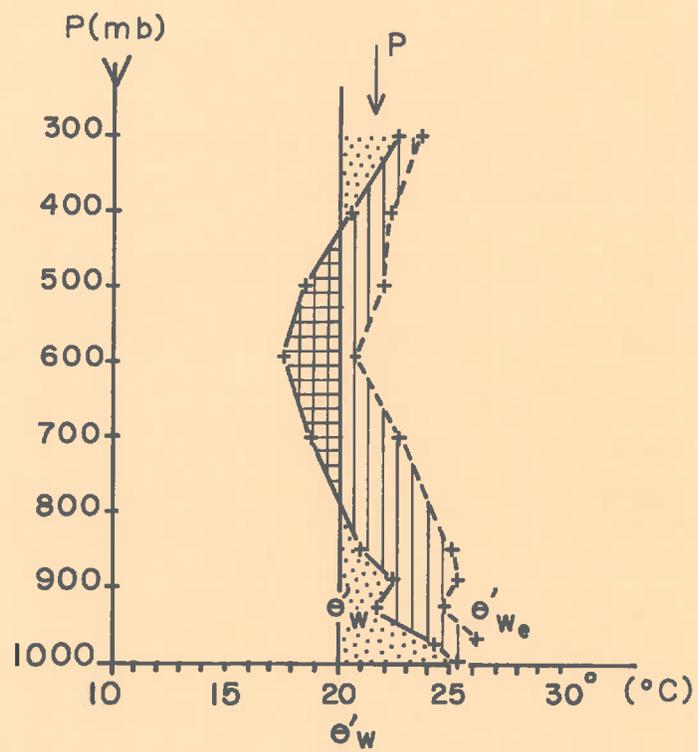
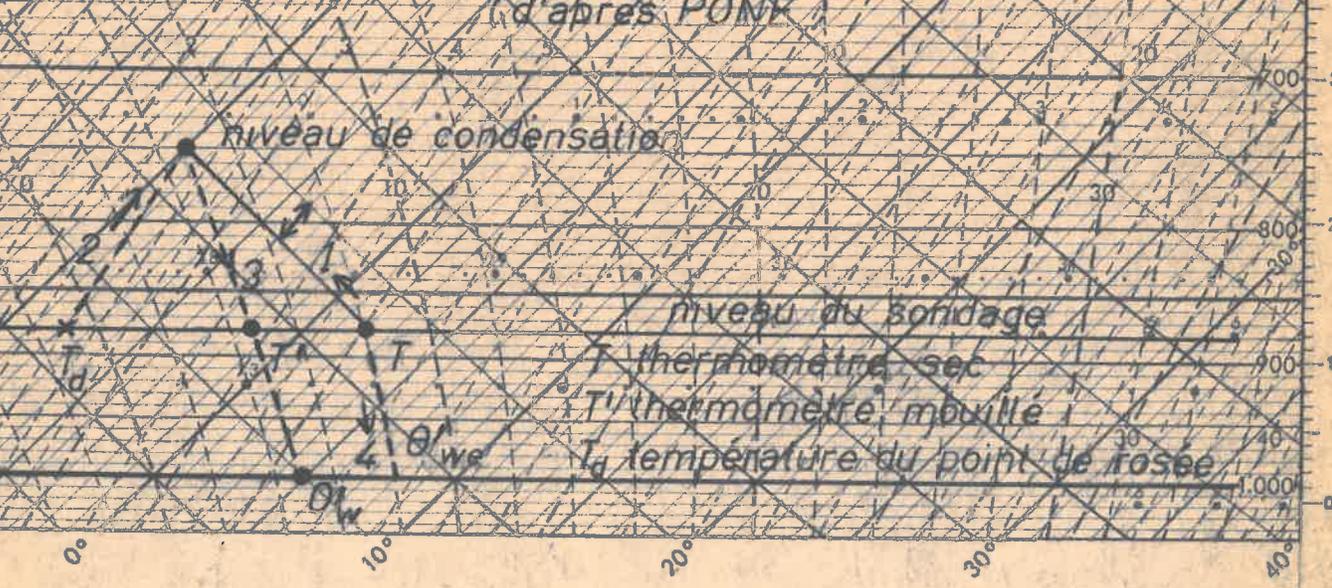


Fig.9.2 - DAKAR_OUAKAM - 18 Septembre 1962 à 12 h.

Fig. 9-3) Détermination de θ'_w et de θ''_w
 (d'après POME)



Les masses d'air tropical continental :

Caractérisées par une humidité relative très basse, on les rencontre au-dessus du continent. La convection thermique diurne, liée à quelques traces de mousson humide, permet d'observer fréquemment des nuages moyens du type altocumulus. Le vent associé à ces masses d'air est l'harmattan.

Les masses d'air tropical maritime convergent ou
"Equatorial"

Ce sont les masses d'air les plus importantes pour les orages car elles se caractérisent par une forte humidité relative et une température relativement chaude. Elles sont instables, favorisent la formation des orages et seraient, en général, responsables des saisons pluvio-orageuses dans nos régions.

Nous avons essayé de bien préciser ces types de masses d'air en nous basant sur des critères d'humidité spécifique, de vents associés et de direction (tableau 2 -1) et H. Hubert 1938.

DENOMINATION	VENTS ASSOCIES	DIRECTION	HUMIDITE SPECIFIQUE
Tropical maritime neutre	Contre-Alizés (altitude)	S.W. à N.E.	inconnue
Tropical maritime subsident	Alizés	N. à N.E.	6 à 10g/kg
Tropical continental	Harmattan	N. à E.	4 à 5g/kg
Tropical maritime convergent ou Equatorial	Mousson	W. à S.W. parfois S.	15 à 18g/kg

(tableau 2 -1-)

De plus, la figure 10 montre les zones origines de ces masses d'air.

I.3 -2 Les centres de pression

Situons sommairement les centres de hautes et de basses pressions dans la région occidentale de l'Afrique, centres qui commandent en partie le régime climatique et permettent de mieux comprendre l'évolution du temps dans nos régions. (fig. 11-1 et 11-2).

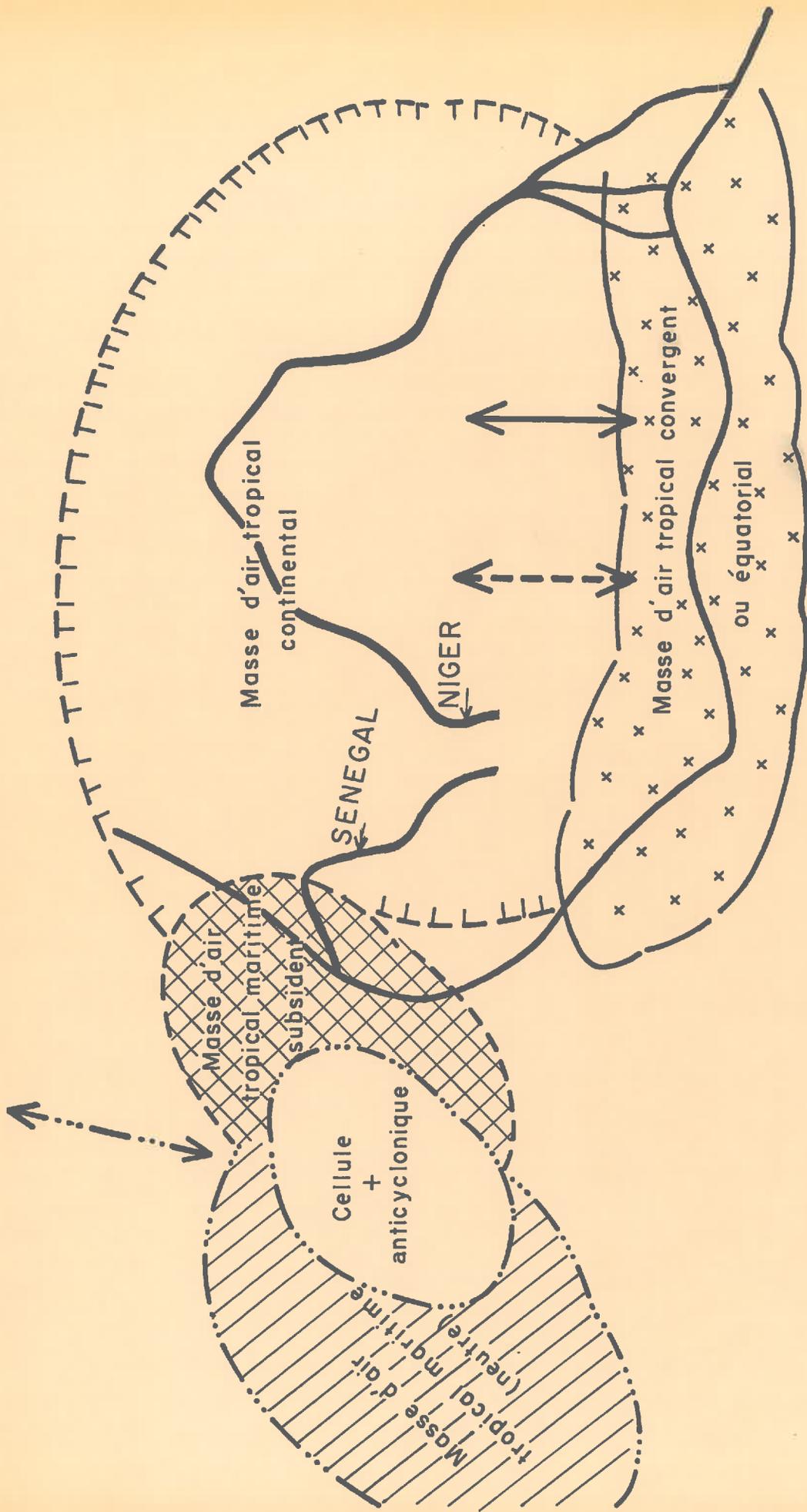
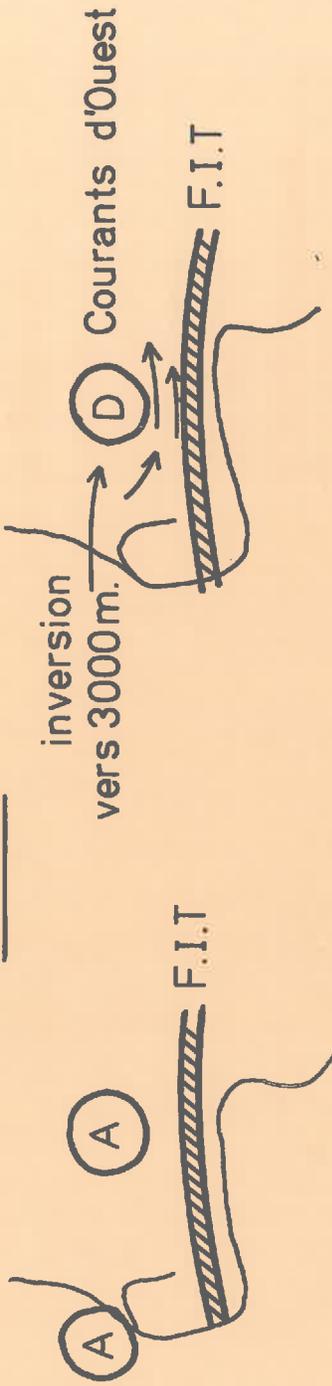


Fig. 10 - Masses d'air

HIVER

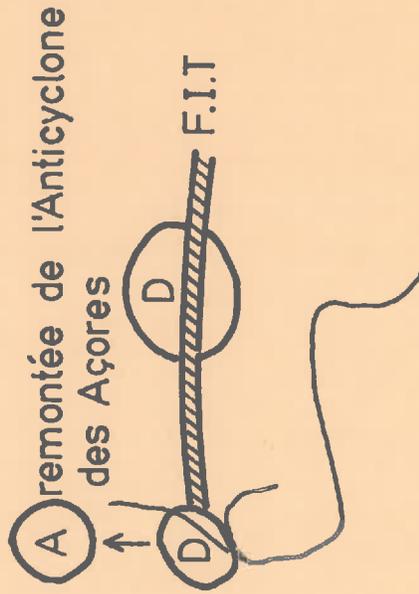


au sol

Fig. 11-1

en altitude
(au-dessus de 3.000m.)

ETE



au sol

Fig. 11 - 2

en altitude

Fig. 11.1 En hiver : le F.I.T. se situe à l'extrême Sud de la région occidentale de l'Afrique, en bordure du Golfe de Guinée. Sur tout le Nord règne, en surface, un régime anticyclonique, en altitude (au-dessus de 3000m (700mb)) un centre dépressionnaire au Sud duquel se situe une circulation de vents d'Ouest. Le ciel est souvent clair dans les basses couches, nuageux dans les couches moyennes et supérieures par Ac, As C_g Cs provenant de l'air humide marin apporté par ce courant.

Fif. 11.2 En été: le F.I.T. remonte à sa position extrême, (23 à 25°N) En surface, on observe souvent en mer, à l'Ouest du Sénégal, un centre dépressionnaire responsable de grandes averses ; au Nord, l'anticyclone des Açores a toujours tendance à bloquer le F.I.T. et à provoquer des périodes de sécheresse sur le Sénégal, la Mauritanie, le Mali, etc...En général le F.I.T. est le siège d'une dépression permanente au sol à l'intérieur des terres. Par contre, en altitude la présence d'un anticyclone donnant naissance à des vents d'Est, favorise en général la formation et le déplacement des lignes de grain.

C H A P I T R E I I

FORMATION ET EVOLUTION DES ORAGES

II.1. Généralités sur la formation des orages dans la région occidentale de l'Afrique

En tenant compte aussi bien des conditions géographiques qu'atmosphériques, nous avons essayé d'analyser les différents modes de formations orageuses dans la zone qui nous intéresse.

II.1-1 Orages provenant d'un "conflit" entre l'harmattan et la mousson.

Ces orages sont très violents et souvent à l'origine des cyclones (J. Dubief 1951). On les explique par une poche d'"harmattan" qui se détache au voisinage du F.I.T. et pénètre dans la mousson. Nous donnerons des précisions à ce sujet dans d'autres paragraphes de ce chapitre, en particulier à propos des orages tropicaux et des orages de perturbations cycloniques.

II.1-2 Orages provenant de descentes froides :

Parfois, pendant l'hiver, des fronts froids peuvent atteindre le Sud du Sahara et déclencher une instabilité en rencontrant l'air tropical relativement plus chaud.

Ce phénomène, connu sous le nom de "euq" au Sénégal, en Mauritanie et au Mali, se produit surtout en hiver

(Décembre -Janvier). Il se manifeste par une pluie fine dont la fréquence est relativement faible.

II.1-3 Orages de fronts d'alizés :

Sur la côte Mauritanienne, au printemps, il y a souvent convergence entre l'harmattan et l'alizé, ce qui donne naissance à des fronts d'alizés dont le caractère orageux n'est pas très significatif -(M. Berenger 1960) et (P. Queney 1945). Nous le mentionnons seulement à titre indicatif.

II.1-4 Orages de réchauffement à la base :

C'est l'exemple même de l'orage local dû à la convection thermique diurne dans les pays chauds. Nous n'insisterons pas ici car ce type d'orage sera traité en détail dans le chapitre IV.

Toutefois, on peut remarquer que les cumulonimbus ont une vitesse d'évolution extrêmement rapide se traduisant par une véritable explosion à cause de la forte convergence de mousson. (Weather n°3 1967) On a également observé des évolutions de ce genre dans les Caraïbes.

II.1-5 Orages de soulèvement à la base : (fig. 13)

Ce mode de formation d'orages orographiques est un phénomène très courant au-dessus du Fouta Djallon (entre la

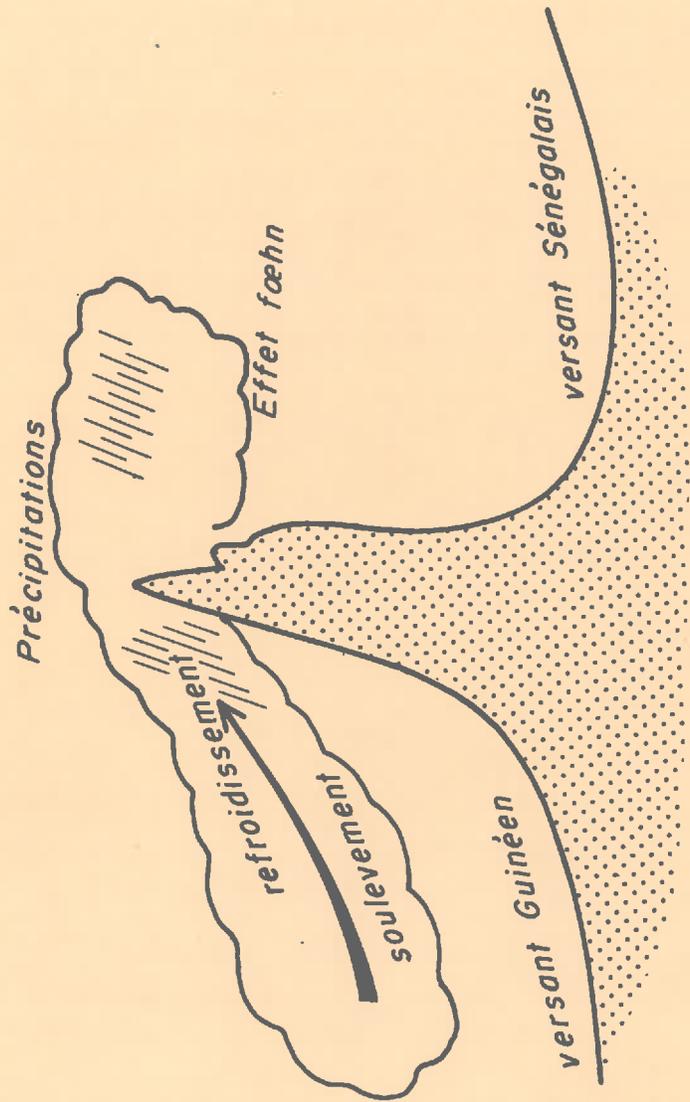


Fig. 13

Guinée, le Mali et le Sénégal).

Son processus est le suivant : une masse d'air ascendante se refroidit le long d'une montagne et a tendance à redescendre, mais son ascension se poursuit ; les particules d'air sont alors soumises à une véritable agitation verticale identique à celle de la convection thermique. Il y a donc instabilité, c'est à dire condition favorable à la formation orageuse. Par analogie, on pourrait parler ici de "Convection orographique." Ce phénomène est extrêmement courant en Ethiopie, sur les plateaux d'Asmara.

II.1 -6 Lignes de grains :

Qu'est-ce qu'une ligne de grain ?

C'est un ensemble de cumulonimbus plus ou moins soudés, et orientés sensiblement Nord-Sud, qui est le siège de manifestations orageuses telles que : averses, tonnerre, éclairs, turbulence, rafales, etc...

Dans la région occidentale de l'Afrique, deux possibilités sont à envisager à cause de la nature même de ces lignes de grains :

1° Fréquemment il arrive que, pris dans le flux d'Est, les cumulonimbus qui se déplacent d'Est en Ouest ne soient pas très rapprochés, mais restent simplement sur une ligne Nord-Sud ; on dit qu'ils forment une ligne d'instabilité.

Dans ce cas, la force de la perturbation est accentuée par le relief ; en effet, peu active avant de franchir la montagne, la ligne d'instabilité peut prendre un caractère très violent dans la partie orientale du Sénégal. (fig.14)

2° Plus rarement il peut au contraire arriver que, tout en se déplaçant, cette ligne forme un véritable "mur" de cumulonimbus soudés sur une longueur variable que nous essayerons de déterminer plus loin. Dans ce cas, et dans ce cas seulement, on a véritablement une ligne de grains.

Le plus souvent le caractère violent de cette perturbation est rompu par le relief ; c'est en particulier ce qui se passe pour les lignes de grains qui traversent le massif du Fouta Djallon avant d'arriver au Sénégal. Leur violence, déjà importante avant de traverser le massif, est accentuée à la montée puis tant affaiblie à la descente, que, dans la région de Tambacounda, le grain disparaît.

II. 2 Evolution des orages dans la région occidentale de l'Afrique

Nous indiquons dans ce qui suit les différents facteurs favorables à l'affaiblissement ou à l'aggravation des orages déjà formés.

II. 2 -1 Effet orographique (fig. 15)

D'une façon générale, le relief aggrave les pertur-

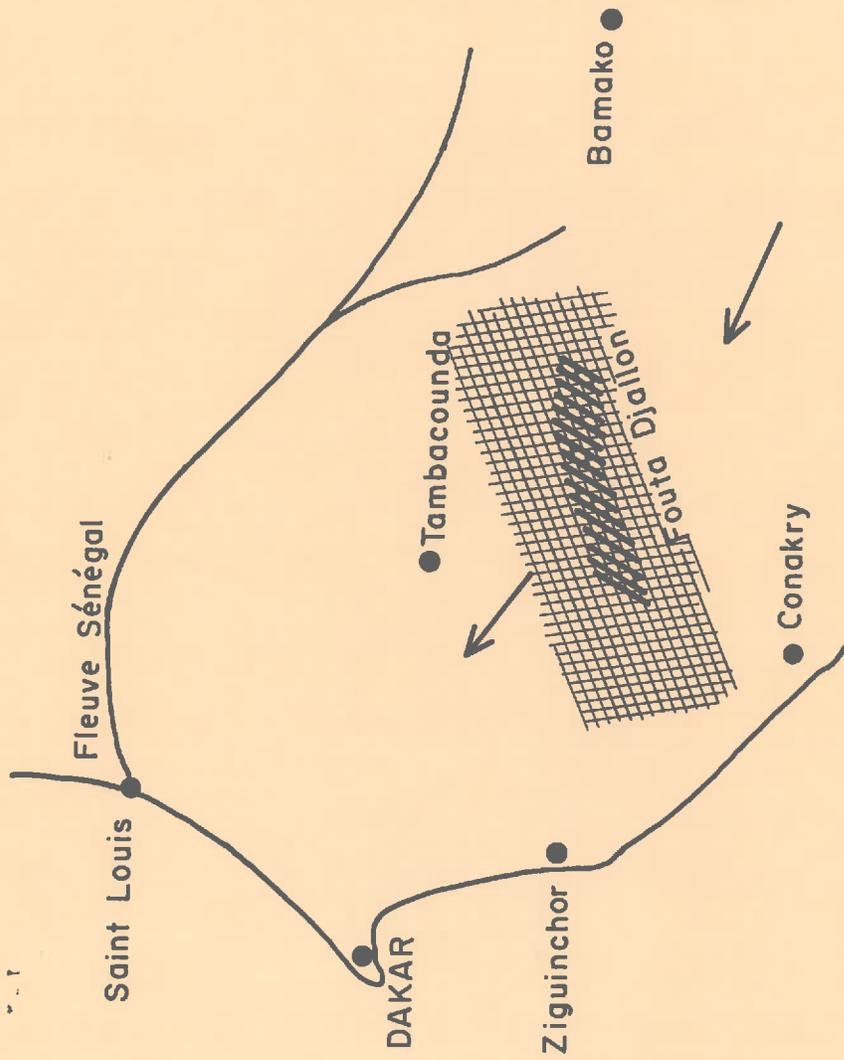


Fig. 14 - Trajectoires les plus fréquentes des lignes de grains au Sénégal Oriental

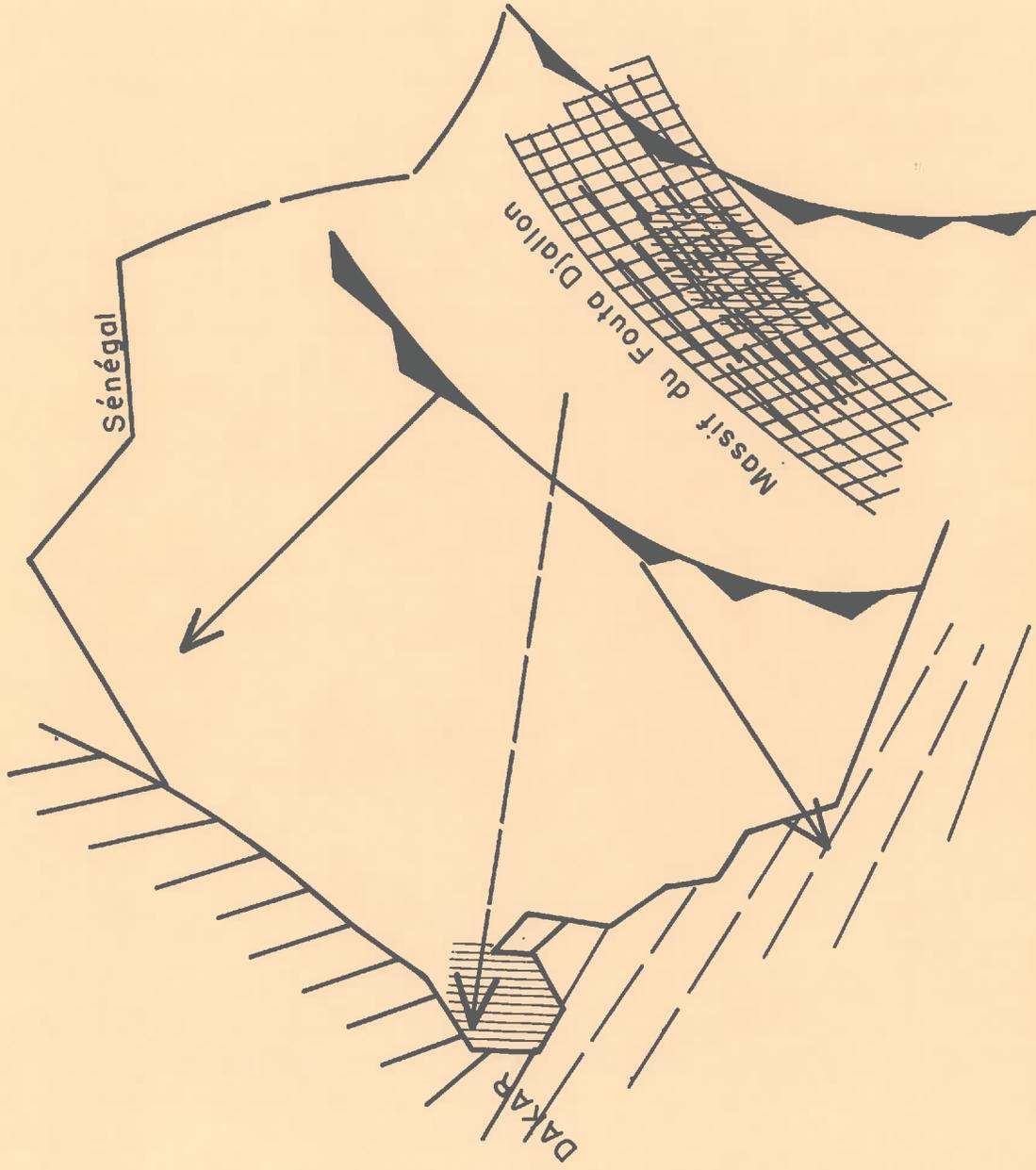


Fig. 15 - Cassure d'un grain sous l'effet du relief

bations, Le massif du Fouta Djallon modifie la trajectoire des lignes de grain. Ceci rend les prévisions au Sénégal assez délicates, notamment dans le Nord du pays qui peut parfois ne pas être du tout intéressé par l'orage. Il se peut aussi qu'au passage d'une perturbation au-dessus d'un relief il y ait des précipitations, ce qui correspond à une atténuation du phénomène du côté du versant sous-le-vent et se traduit par un effet de foehn.

II.2.-2 Effet du Front Intertropical (fig.16)

Lorsqu'une ligne de grain arrive dans la région de la côte de l'Afrique Occidentale, où le F.I.T. subit une incurvation vers le Sud par suite des alizés et des frottements plus faibles en mer, elle peut subir une déviation, sa trajectoire basculant vers le Sud ; d'où des conséquences sur la prévision locale et même synoptique. Ainsi à Dakar, il arrive très souvent qu'une ligne de grain orageuse, dont la trajectoire prévue $T_1 T_2$ passe par la presqu'île du Cap Vert, soit déviée vers le Sud suivant $T'_1 T'_2$, ceci principalement pendant le début (Juin) ou la fin (Septembre) de la période d'hivernage, lorsque le F.I.T. passe sur cette zone.

II. 2.-3 Effet du refroidissement nocturne (fig. 17 -coupe AB)

La nuit, une ligne de grain peut perdre de sa violence à cause de l'effet de rayonnement terrestre qui entraîne un refroidissement de l'air chaud antérieur,

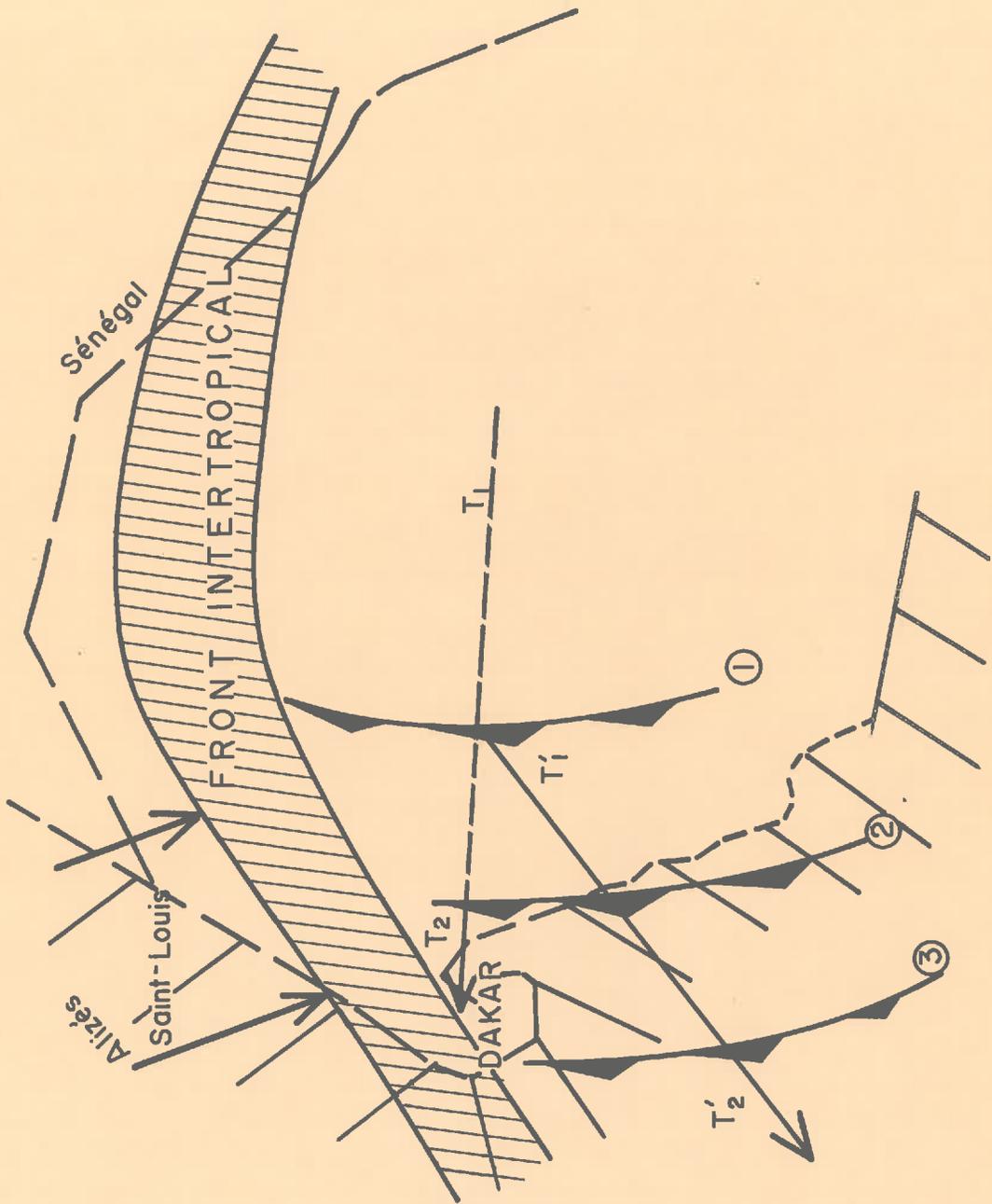


Fig. 16 - glissement vers le sud d'une ligne de grain sous l'effet du F.I.T

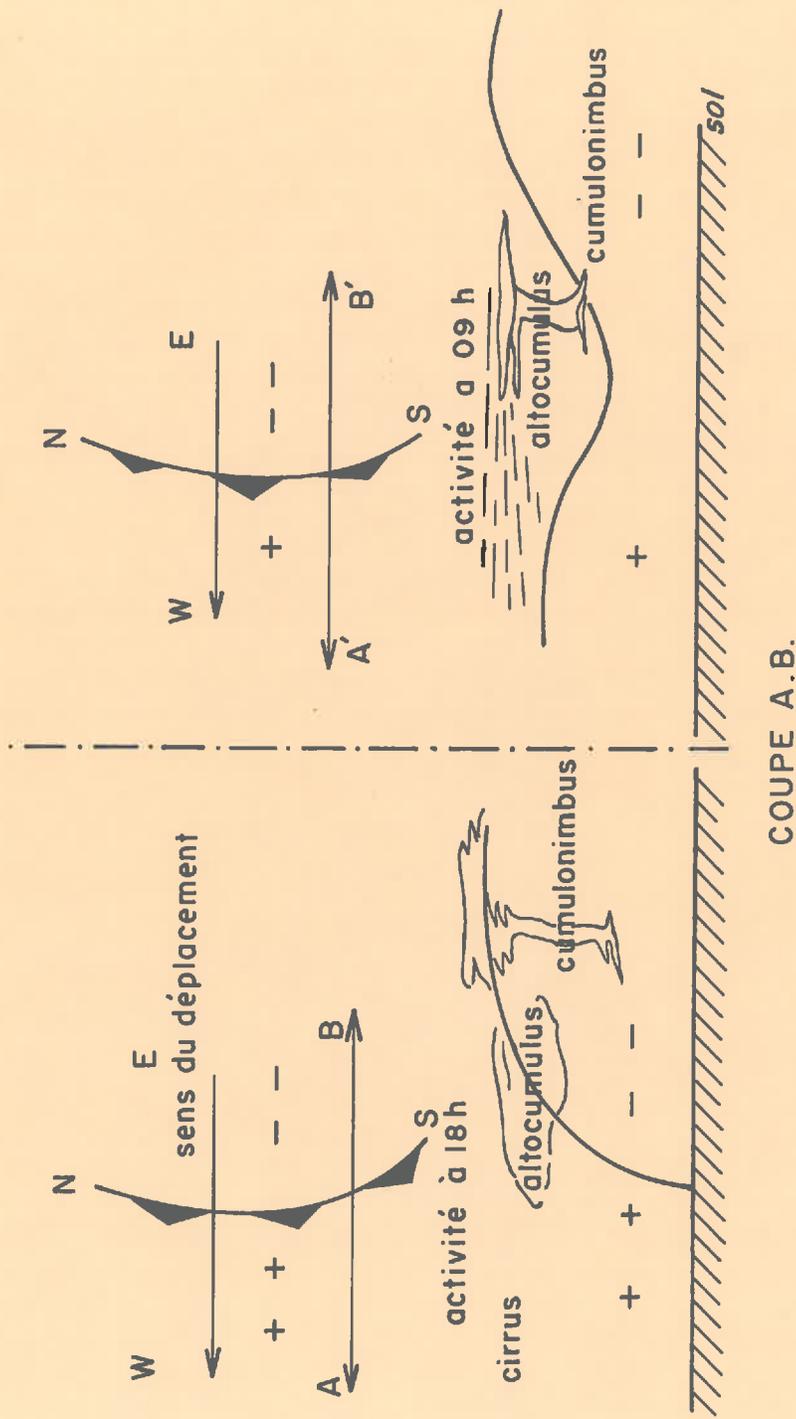


Fig. 17 - coupes verticales d'une ligne de grain le soir et le matin

surtout dans les basses couches. Parfois il n'y a de manifestation orageuse qu'en altitude (coupe A'B')

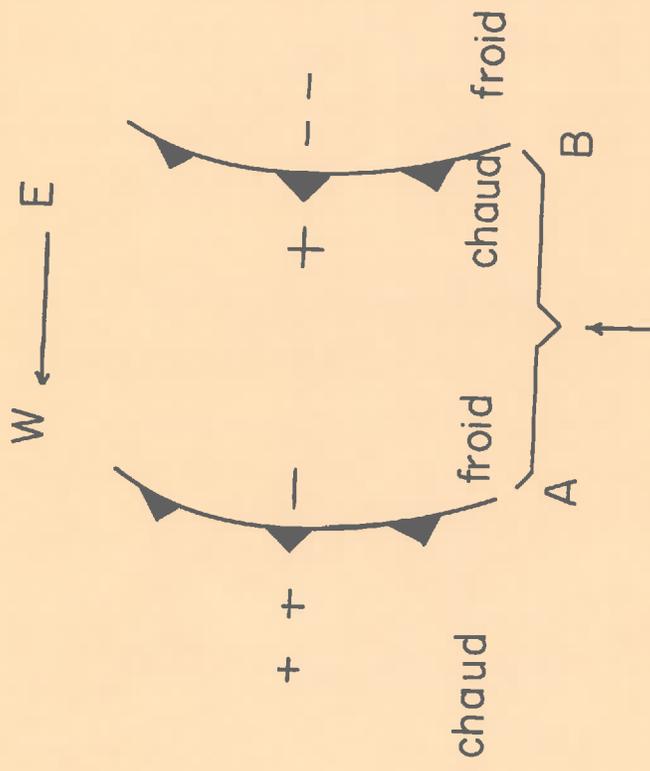
II.2.-4 Effet de "Captage" (fig. 18)

Deux lignes de grain peuvent se "neutraliser" lorsqu'elles sont très rapprochées : en effet l'air froid postérieur de la première refroidit l'air chaud antérieur de la seconde. Le gradient de température de cette dernière est alors diminué et par suite son intensité. Ce cas est fréquent en amont d'un relief, celui-ci freinant la première ligne de grain.

II. 3. Caractères des orages dans la région occidentale de l'Afrique

Tout orage est produit par un nuage à grand développement vertical appelé cumulonimbus dont le sommet peut atteindre la tropopause et même la stratosphère. Il y a refroidissement de la partie supérieure du nuage et accélération de la convection thermique dans la partie inférieure et médiane. Ces mouvements s'accompagnent d'ailleurs de phénomènes électriques : décharges provoquant des éclairs, tonnerre etc... Nous avons vu que les conditions essentielles de formation orageuse sont :

- une épaisseur assez grande d'air instable
- une forte humidité relative.



effet mutuel de 2 lignes de grain

Fig. 18

L'apparition de cumulonimbus, précédée le plus souvent par celle d'altocumulus lenticularis "précurseurs d'orages", ou bien même l'apparition de cumulus congestus bourgeonnants, sont autant de signes caractéristiques de l'intensité orageuse.

Dans nos régions, on distingue les types d'orages suivants :

II.3.-1 Orages équatoriaux :

Ces orages très violents donnent de fortes averses, souvent accompagnées de tonnerre et d'éclairs. Dans les basses couches, la turbulence est relativement faible à cause des vents faibles des régions équatoriales. Par contre, au "coeur" du cumulonimbus, cette turbulence est très intense à cause d'une forte convection.

On rencontre ces types d'orages surtout en bordure Sud de l'Afrique occidentale (Côte d'Ivoire, Ghana etc...)

II.3.-2 Orages tropicaux :

Ils se distinguent plus par leur caractère turbulent que par les précipitations qu'ils donnent. Une forte convergence des vents, une instabilité thermique marquée et une humidité relative assez faible font que ces orages comptent parmi les plus violents. Ils évoluent fréquemment en cyclones tropicaux.

II.3.-3 Orages de perturbations cycloniques

Le passage d'un cyclone d'origine extra-tropicale peut donner lieu à des manifestations orageuses très violentes. Le cas est assez rare dans nos régions. Néanmoins celles-ci restent les lieux d'origine de beaucoup d'orages tropicaux. Ainsi en Août 1966, une petite trombe prit naissance au voisinage du F.I.T. (peut-être à la suite d'une incursion d'harmattan dans la mousson), juste dans la région du Cap Vert ; elle produisit d'importants dégâts à l'aéroport, avant de donner, quelques jours plus tard, un véritable cyclone sur les Antilles. Ces orages, caractérisés par des mouvements tourbillonnaires de forte turbulence, sont accompagnés au début de leur formation de faibles précipitations.

II.3.-4 Orages à caractères tempérés:

Nous n'insisterons pas sur ce cas banal que l'on peut résumer en disant ; quelques éclairs peu violents au sein d'altocumulus instables. En effet, il s'agit rarement de cumulonimbus, puisqu'en hiver l'air tropical est relativement froid et l'instabilité provenant de l'advection du front polaire nettement réduite. (Nous ne nous occupons pas des fronts d'alizés, encore moins importants, qui se forment en bordure de la Mauritanie, au moment où l'harmattan arrive sur la Côte Ouest de l'Afrique, en don-

nant un flux opposé aux alizés.)

II.3.-5 Orages de débordement marin

Les pays chauds situés en bordure de mer peuvent être envahis, le matin, par des orages locaux dûs à l'air tiède et humide de la mer qui, en s'écoulant sur le continent relativement froid, déclenche une instabilité côtière à caractère orageux de courte durée.

Au chapitre IV, une explication détaillée du processus sera donnée sur l'exemple du Cameroun. Il faut noter que l'on rencontre aussi ce type d'orages au Dahomey et en Côte d'Ivoire, mais assez rarement au Sénégal.

II. 4. Quelques méthodes de prévision des orages

Jusqu'à présent, il est impossible de prévoir, uniquement à l'aide de modèles théoriques, les orages en formation dans la région occidentale de l'Afrique : les lois atmosphériques n'y sont plus les mêmes que celles des pays tempérés et de nombreux problèmes n'ont encore été qu'en partie résolus. Quelques méthodes relatives à des considérations d'indices (Schwalter, Telfer, Galway..) ont été appliquées à certaines régions (P. Duverger 1958). Personnellement, l'auteur s'est intéressé pendant 3 ans, à l'indice de Telfer sans aboutir à aucune conclusion valable (voir remarque).

Il en a été de même pour des prévisionnistes d'Abidjan, ce qui tend à prouver que la méthode des indices ne peut pas

s'appliquer à la région occidentale de l'Afrique.

Par contre il est possible, une fois les perturbations formées, de suivre leur évolution et de faire des prévisions acceptables, même dans des situations météorologiques très complexes, grâce au radar, aux cartes synoptiques, et bientôt aux satellites artificiels.

Là aussi, nous nous bornons à citer ces méthodes à titre indicatif. La méthode des cartes a été vérifiée sur un exemple exposé plus loin.

Nous avons essayé tout à la fin de ce travail, de donner une méthode de prévision orageuse à l'échelle locale pour la région du Cap Vert au Sénégal, méthode basée surtout sur l'observation directe du ciel et l'analyse des cartes au sol.

Remarque :

Donnons ici quelques précisions sur le principe de la détermination de l'indice de Telfer (P. Duverger 1958)

Il est basé sur l'humidité des couches moyennes et la stabilité de la couche 850mb et 500mb :

-l'humidité de la couche moyenne est représentée par la somme des différences entre le point de rosée T_d et la température T de l'air, à 700mb et 500 mb

-la différence de température entre les isobares 850 mb et 500mb traduit plutôt des conditions de stabilité.

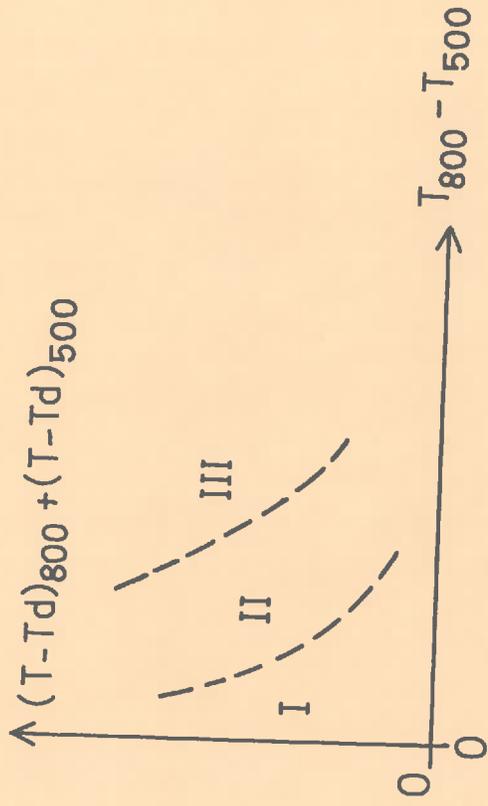


Fig. 12

Pour une série d'expériences, on porte sur un
graphique en ordonnée : $(T - T_d)_{700mb} + (T - T_d)_{500mb}$
et en abscisse : $T_{850} - T_{500}$

On détermine ainsi des zones de probabilité d'orages.
(fig. 12)

Exemple : Zone I : 80% d'orages : orages très probables
Zone II : 20% d'orages : faible probabilité
d'orages
Zone III : orages peu ou pas du tout probables.

C H A P I T R E I I I

FREQUENCE DES ORAGES DANS LA REGION OCCIDENTALE DE L' AFRIQUE -----

Cette étude de la fréquence des orages dans la région occidentale de l'Afrique est basée sur les données statistiques d'une période de 5 ans (1951 - 1955) fournies par la Direction du Service Météorologique de l'A.O.F.

Nous allons voir qu'une analyse graphique très détaillée des précipitations et des jours d'orages pour une trentaine de stations conduit à des situations très intéressantes et permet de suivre l'évolution de ces deux phénomènes dans le temps et dans l'espace ; dès lors on comprend les conditions météorologiques de nos régions qui sont complètement différentes de celles des régions tempérées.

III. 1. Données pour différentes stations

III.1 -1 Au Sénégal (fig 19)

Pour l'ensemble des stations du Sénégal, on ne remarque qu'un seul maximum de précipitations correspondant à un seul maximum d'orages. Il y a toutefois quelques nuances à cause d'effets locaux liés au site géographique, au relief et à la nature du sol, (humidité, végétation etc)

A Dakar, le maximum des précipitations se situe en Juillet-Août, alors que le maximum des orages est en Septembre; il y a donc, entre ces deux phénomènes, un léger décalage que l'on essayera d'expliquer à la fin du chapitre, Au contraire, à Tambacounda, Ziguinchor et Podor, les maxima de précipitations et d'orages coïncident sensiblement.

On peut d'ores et déjà faire une classification locale par ordre décroissant de précipitations : Ziguinchor, Tambacounda, Dakar et Podor. Cette répartition s'explique par la mousson plus abondante et plus fréquente au Sud qu'au Nord du pays.

Par contre une classification par ordre décroissant d'orages donne les résultats suivants : Tambacounda, Ziguinchor, Podor et Dakar. Les villes situées à l'Est sont donc plus exposées aux lignes de grains "véhicules d'orages" et l'effet du relief explique la plus grande fréquence de grains à Tambacounda.

Remarque :

Lorsque la mousson est assez épaisse, la stabilité augmente à condition qu'il n'y ait pas de facteurs d'instabilité tels que le relief ou la température. Par exemple à Ziguinchor où le relief est peu important, la mousson est un facteur inhibiteur d'orages, tandis qu'à Tambacounda, l'effet de relief se fait sentir et augmente l'instabilité.

III. 1.-2 En Côte d'Ivoire (fig. 20)

Deux maxima de précipitations et d'orages assez nets caractérisent les deux saisons des pluies, l'une en Mai-Juin, l'autre en Septembre-Octobre.

A Abidjan comme à Dakar, un maximum d'orages se trouve légèrement décalé par rapport à un maximum de précipitations.

Quant à Man, les deux saisons d'orages^y sont bien nettes, alors qu'il n'y a qu'un seul maximum de précipitations. C'est l'effet du relief qui donne au régime pluvieux de Man ce caractère semblable à celui de Conakry.

III. 1.-3 En Haute Volta et Dahomey (fig 21)

Bobo Dioulasso et Ouagadougou présentent sensiblement les mêmes caractéristiques, excepté un petit maximum supplémentaire de précipitations à Bobo Dioulasso en Avril-Mai. Les deux maxima d'orages et de précipitations décelés à Abidjan n'existent plus ; on se trouve de nouveau dans une région à une seule saison pluvio-orageuse.

A Cotonou, les deux maxima d'orages sont encore assez nets alors que les précipitations présentent des variations provenant d'effets locaux.

Remarque

Il semble que le premier petit maximum constaté

700

30 - 600

25 - 500

20 - 400

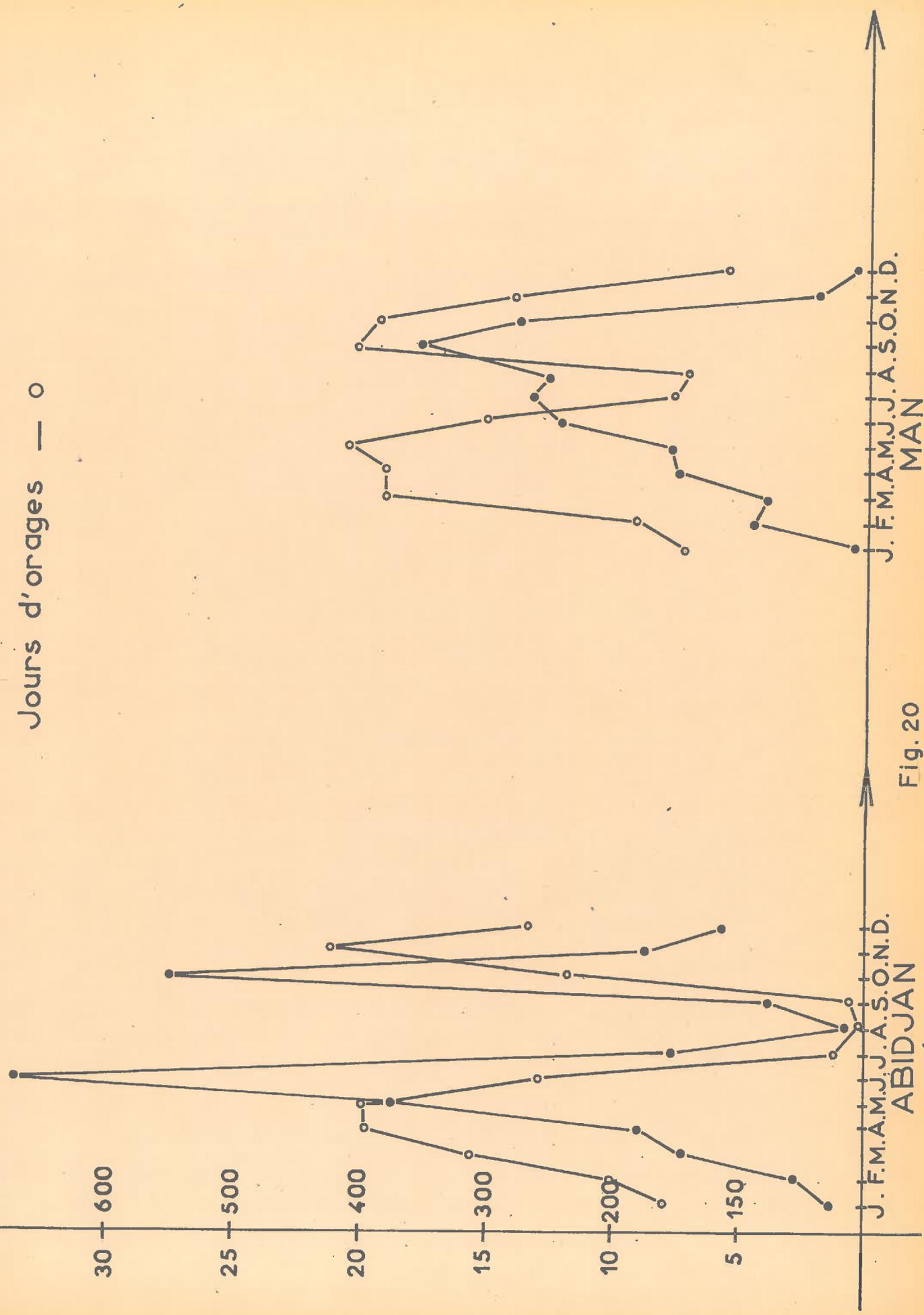
15 - 300

10 - 200

5 - 150

Précipitations en mm ●

Jours d'orages — ○



J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.
ABIDJAN

J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.
MAN

Fig. 20

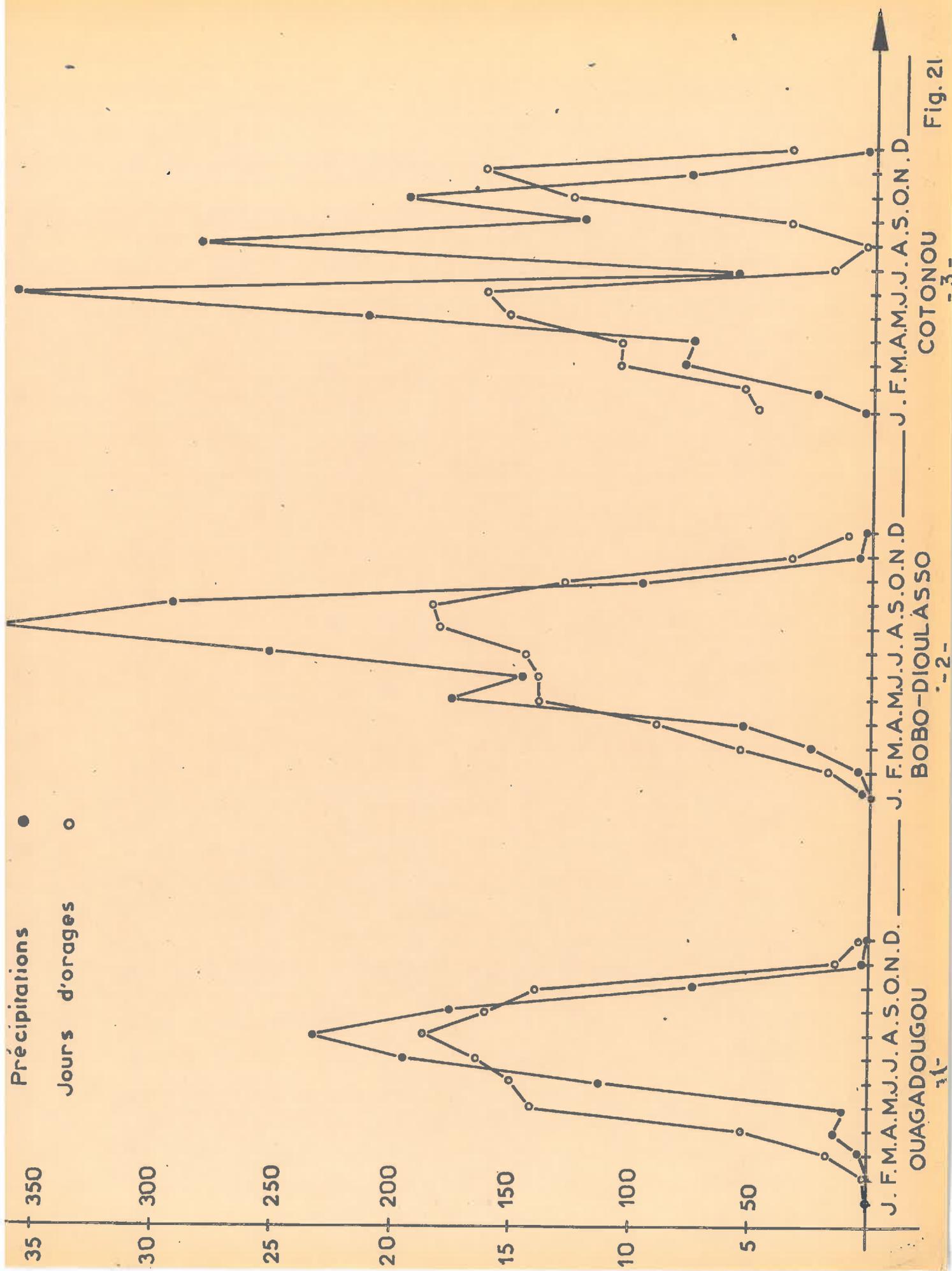


Fig. 21

COTONOU
-3-

BOBO-DIOULASSO
-2-

OUAGADOUGOU
-1-

à Bobo Dioulasso soit dû à l'influence des dépressions soudano-sahariennes à cette saison (P. Queney et J. Dubief 1938)

III.1.-4 En Guinée (fig. 22)

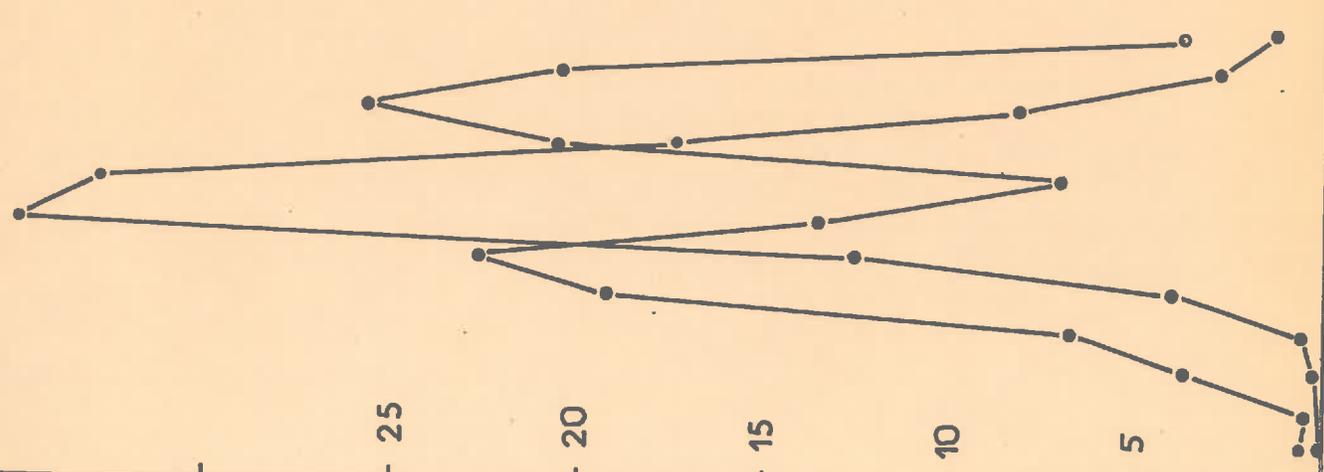
Les courbes présentent deux maxima d'orages et un seul maximum de précipitations, qui coïncide d'ailleurs exactement, à Labé comme à Conakry, avec le minimum d'orages. En fin de chapitre, nous verrons comment on peut donner une explication à ce phénomène. Remarquons déjà qu'il pleut beaucoup plus à Conakry qu'à Labé où les orages sont plus fréquents. La mousson, plus humide à Conakry qu'à Labé, donne plus de précipitations sur la côte qu'à l'intérieur. De plus, Labé est située sur la trajectoire des lignes de grains orageuses et l'influence du relief s'y fait plus sentir qu'à Conakry.

III.1.-5 Au Mali (fig. 23)

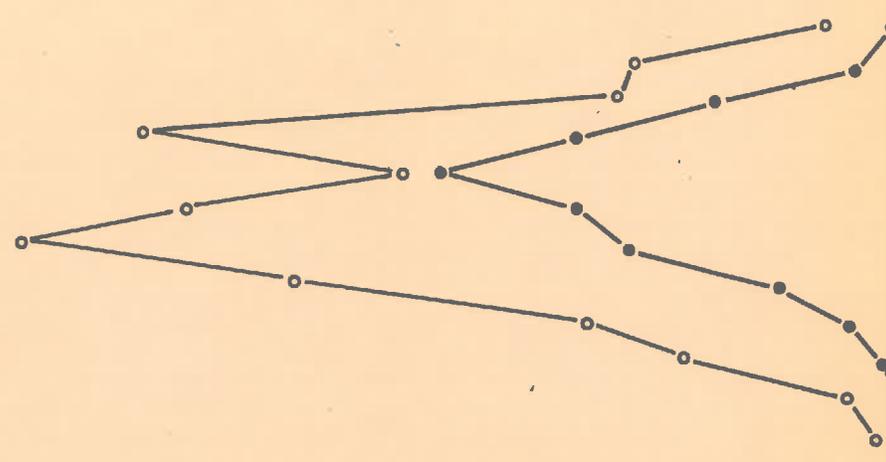
C'est le même régime pluvio-orageux qu'à Ouagadougou c'est à dire un seul maximum d'orages et de précipitations, avec un léger dédoublement du maximum d'orages à Bamako. On remarque à Gao, situé plus à l'intérieur, une avance du maximum d'orages sur le maximum des précipitations, car la mousson, faible au début, y déclenche une forte instabilité orageuse.

Précipitations ●
 Jours d'orages ○

1200 —
 1000 — 25
 800 — 20
 600 — 15
 400 — 10
 200 — 5



J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.
 CONAKRY - 1 -



J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.
 LABÉ - 2 -

Fig. 22

Précipitations en mm ●
 Jours d'orages ○

30-300

25-250

20-200

15-150

10-100

5-50

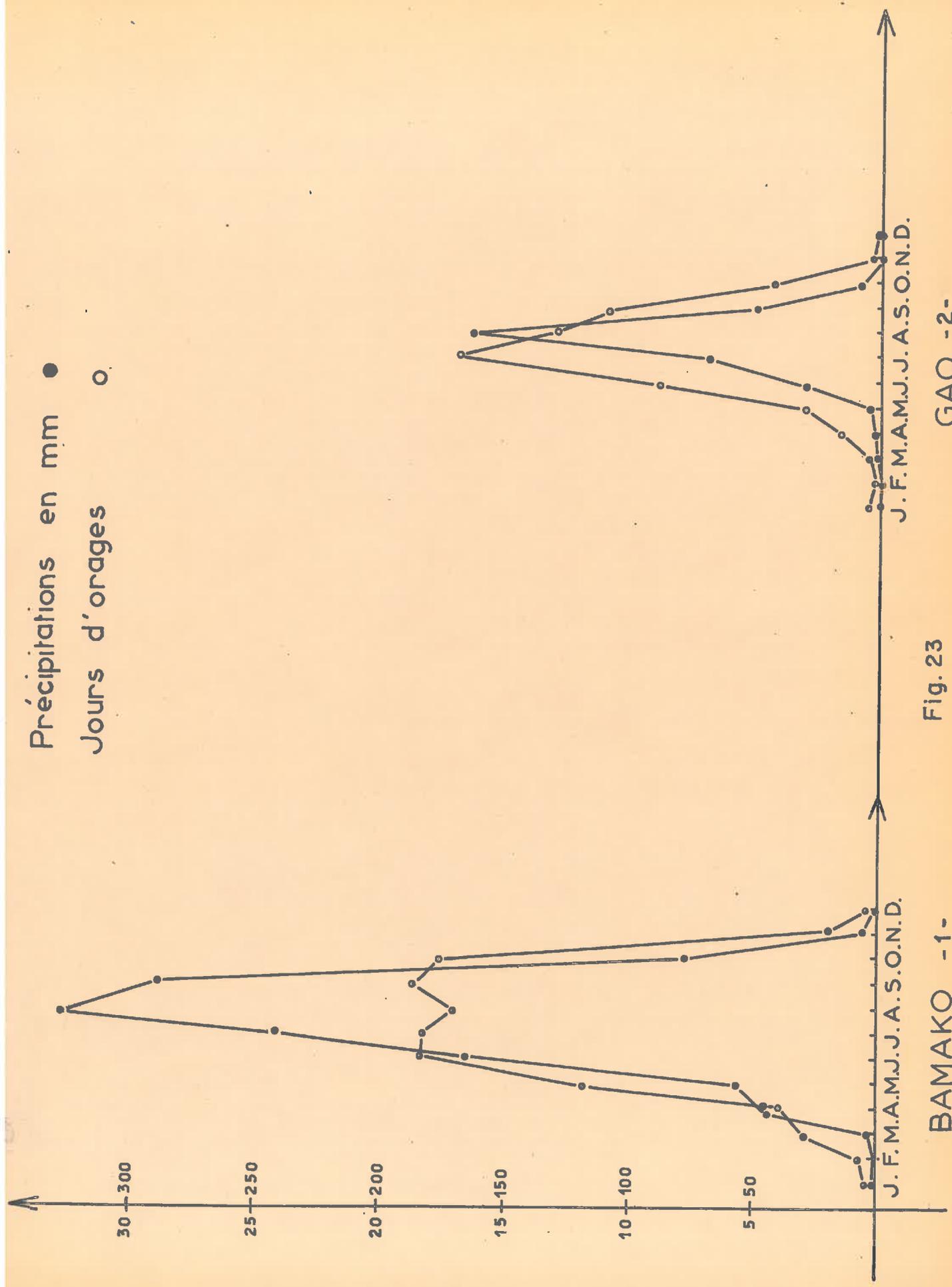
J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.

BAMAKO -1-

J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.

GAO -2-

Fig. 23



III.1.-6 En Mauritanie (fig. 24)

Le cas le plus frappant est celui de Port Etienne où il y a étalement et affaiblissement des précipitations et des orages, comparativement aux autres stations de Mauritanie. Or Port Etienne se trouve en pleine zone de transition entre les climats tempéré et saharien tropical : les effets de ces deux climats se neutralisent donc et l'influence de l'alizé se fait mieux sentir pour inhiber, toute l'année, orages et précipitations. Au contraire, Fort Gouraud, comme Gao au Mali, a des orages précoces explicables d'une façon analogue.

III.1.-7 Au Niger (fig. 25)

Du point de vue du régime pluvio-orageux une grande ressemblance existe entre Zinder, Niamey et Bobo Dioulasso. Toutefois, on remarque une petite particularité relative à un maximum des précipitations en Mai sous l'influence des dépressions soudano-sahariennes. (P. Queney et J. Dubief 1938).

III.1.-8 Au Togo (fig. 26)

Les variations des précipitations et des orages sont les mêmes ^{qu'} à Abidjan, Cotonou (2 saisons pluvio-orageuses) et les deux maxima de précipitations sont légèrement en avance sur les maxima des orages. A la fin du chapitre, on tentera de donner une explication de ce phénomène de

Précipitations en mm — ●
 Jours d'orages — ○

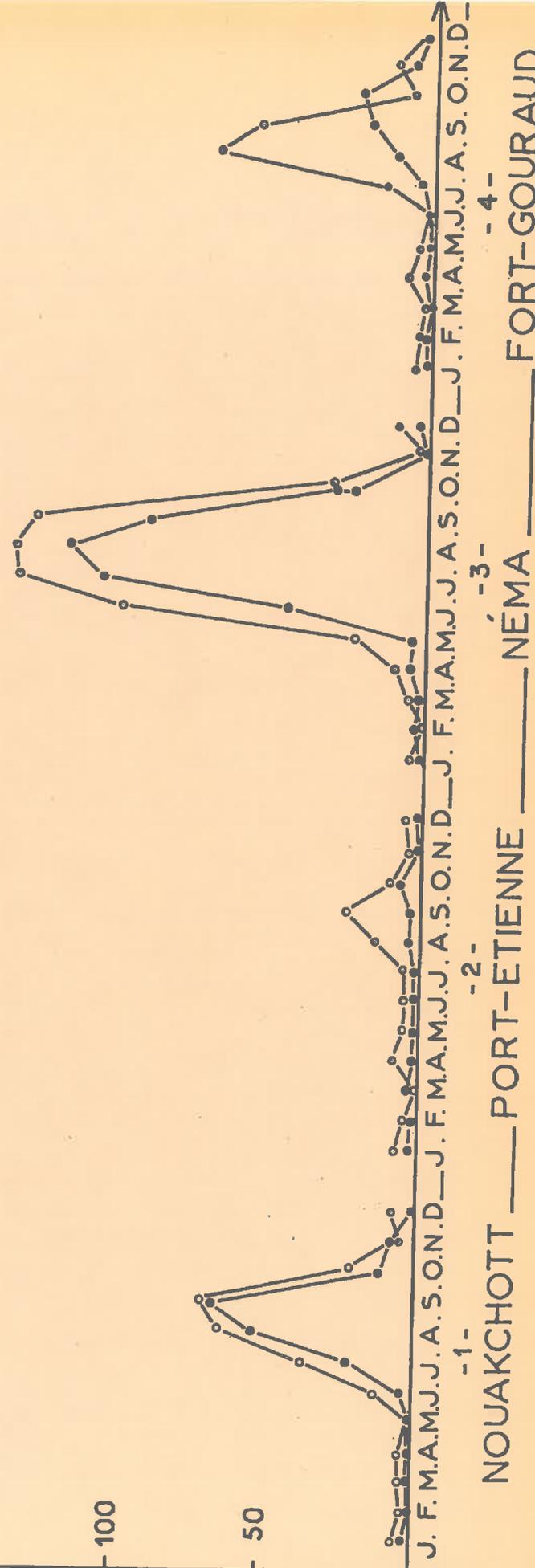
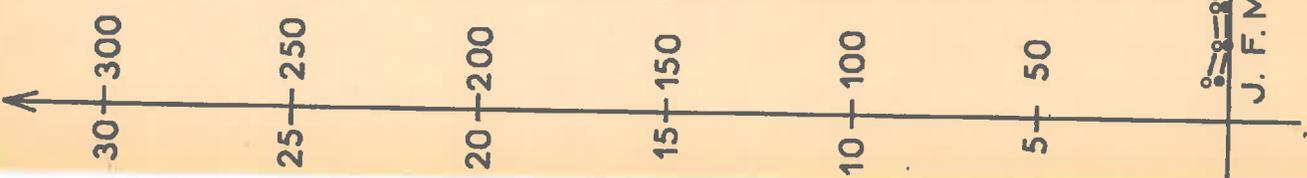


Fig. 24

Précipitations en mm ●
 Jours d'orages ○

30 - 300

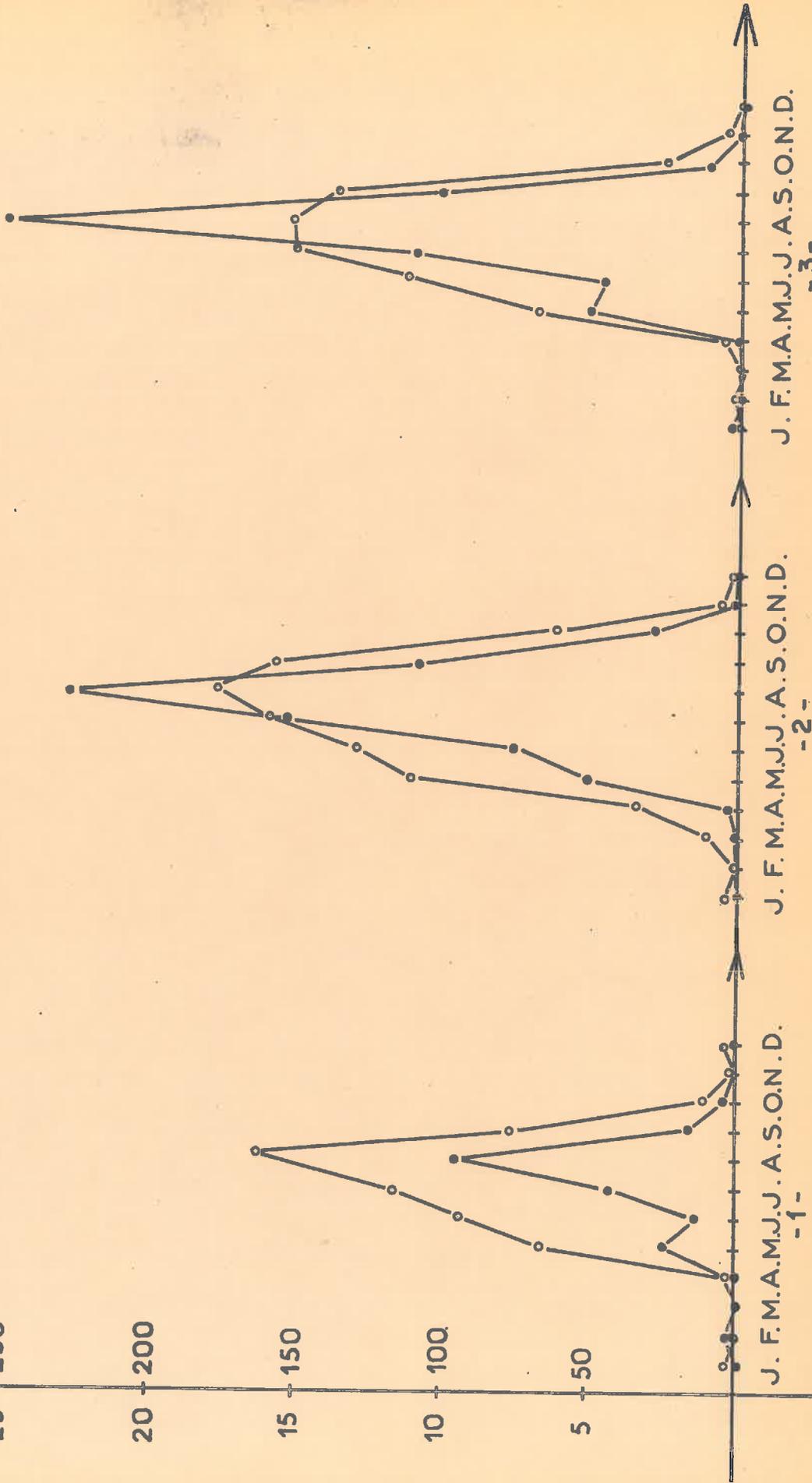
25 - 250

20 - 200

15 - 150

10 - 100

5 - 50



J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.

J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.

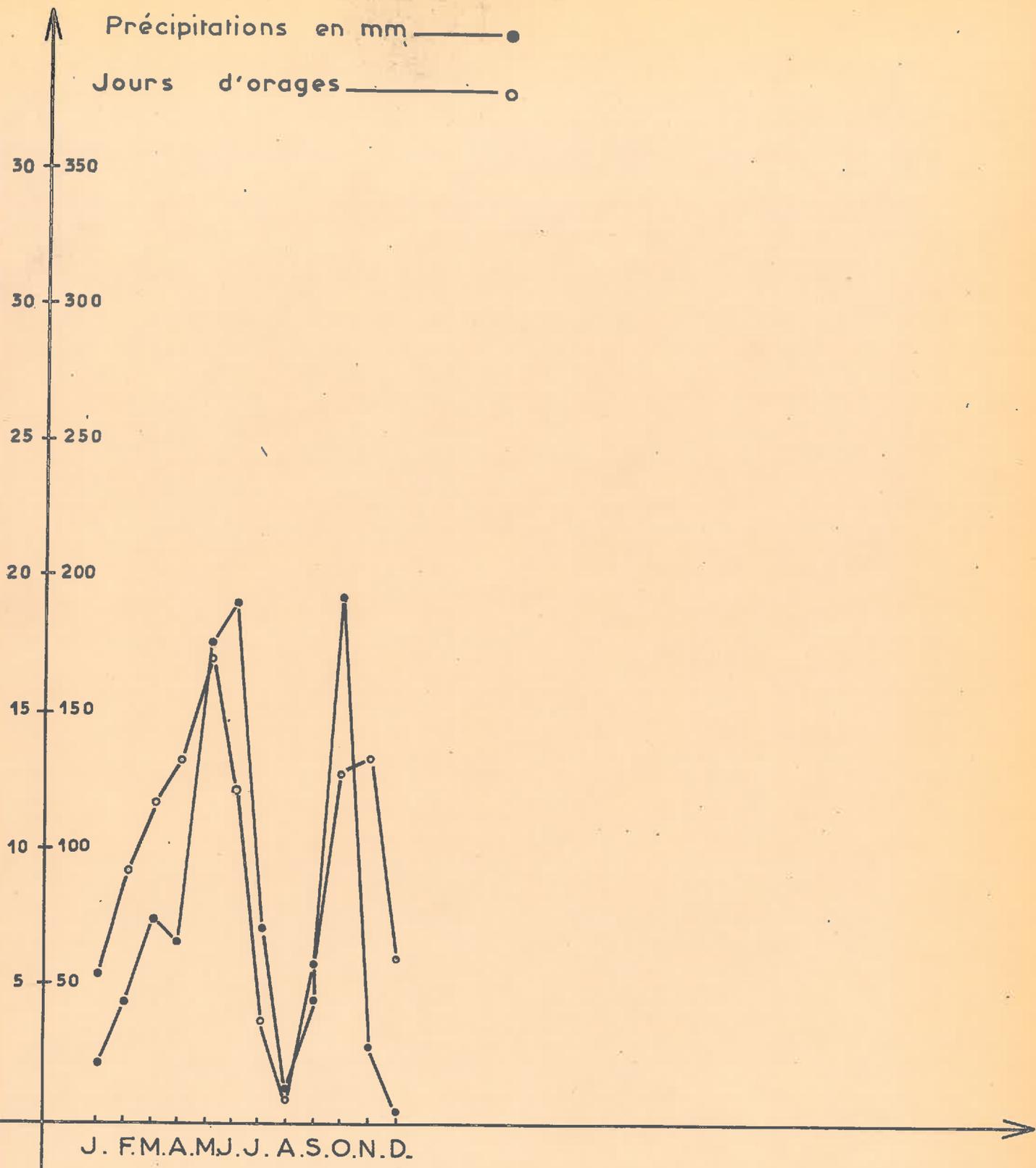
J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.

-1-
AGADEZ

-2-
NIAMEY

-3-
ZINDER

Fig. 25



LOMÉ

Fig. 26

décalage qui n'est d'ailleurs pas particulier à Lomé.

III.1.-9 Au Ghana (fig. 27)

Accra se classe dans le groupe de Cotonou, Lomé Abidjan : 2 saisons de pluies et d'orages ; ici les maxima des deux phénomènes ont presque lieu à la même période.

III.1. -10 Au Nigéria et en Sierra Léone
(fig. 28, 1 et 2)

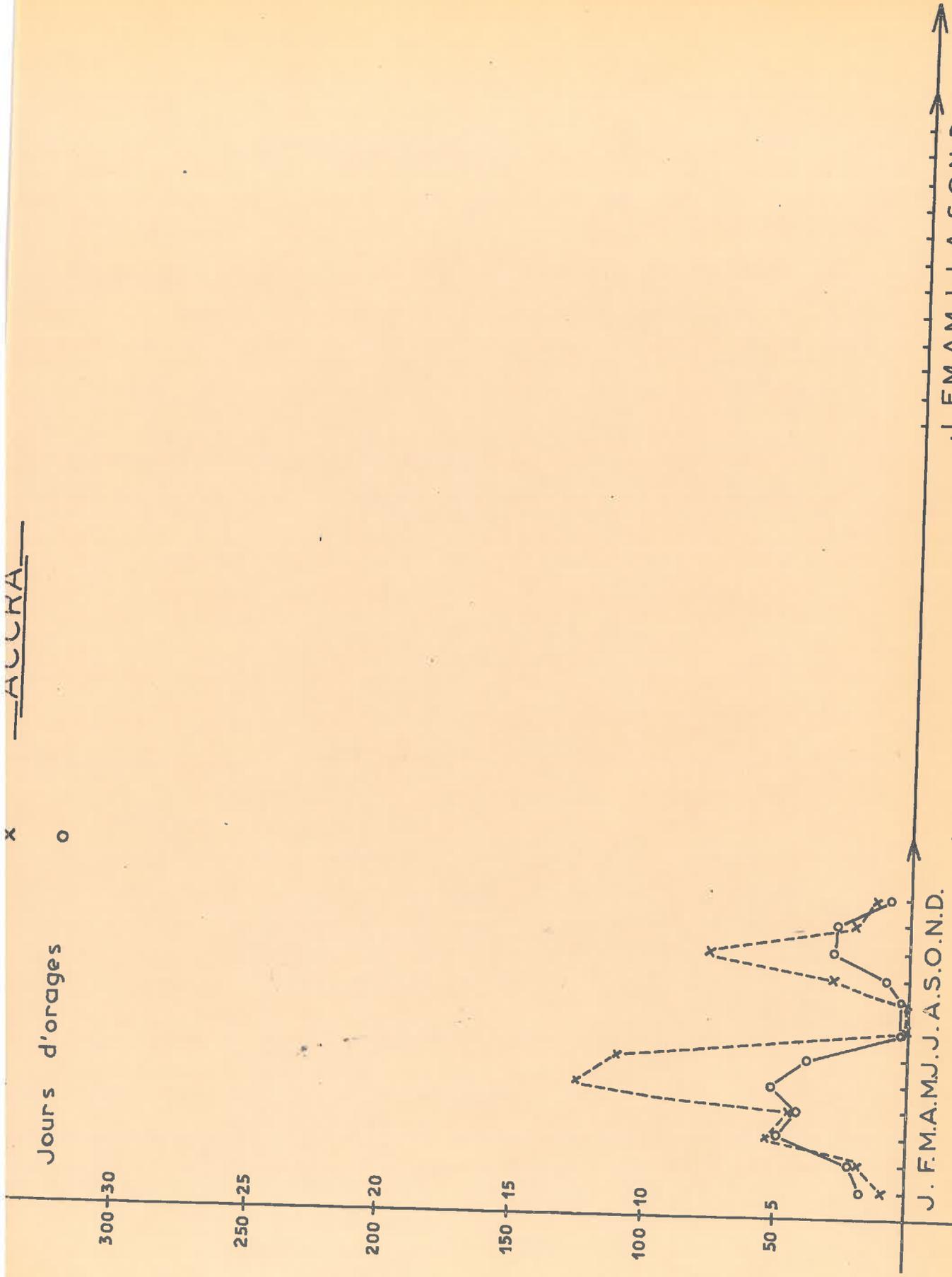
Situé au Nord du Nigéria et en plein continent, Kano, comme les stations du Sénégal, se caractérise par une seule saison des pluies et des orages.

De plus, à Kano comme à Gao, le seul maximum des précipitations est en retard sur le maximum des orages ; or ces deux stations sont sensiblement à la même latitude.

A Lagos, il n'a pas été possible d'obtenir de renseignements statistiques. Néanmoins, d'après des études ultérieures (Eldridge 1958), on sait que Lagos a le même régime pluvio-orageux qu'Abidjan, Cotonou, Lomé, voire 2 saisons : une en avril-mai, une autre en octobre.

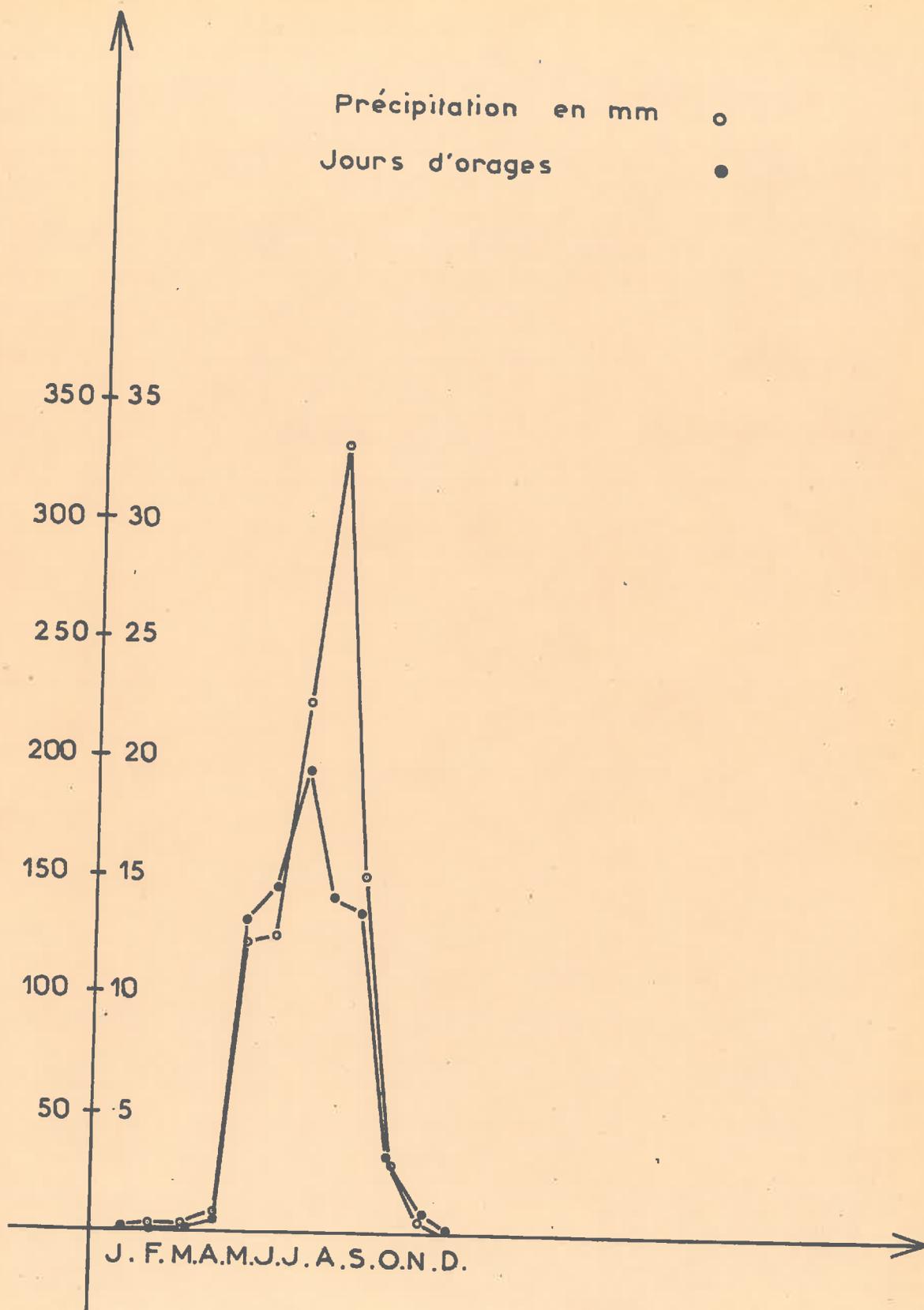
Enfin à Bouthé (en Sierra Léone) c'est le même type de temps qu'à Conakry : 2 maxima d'orages avant et après un seul maximum de précipitations situé en période de diminution des orages.

ACCRA



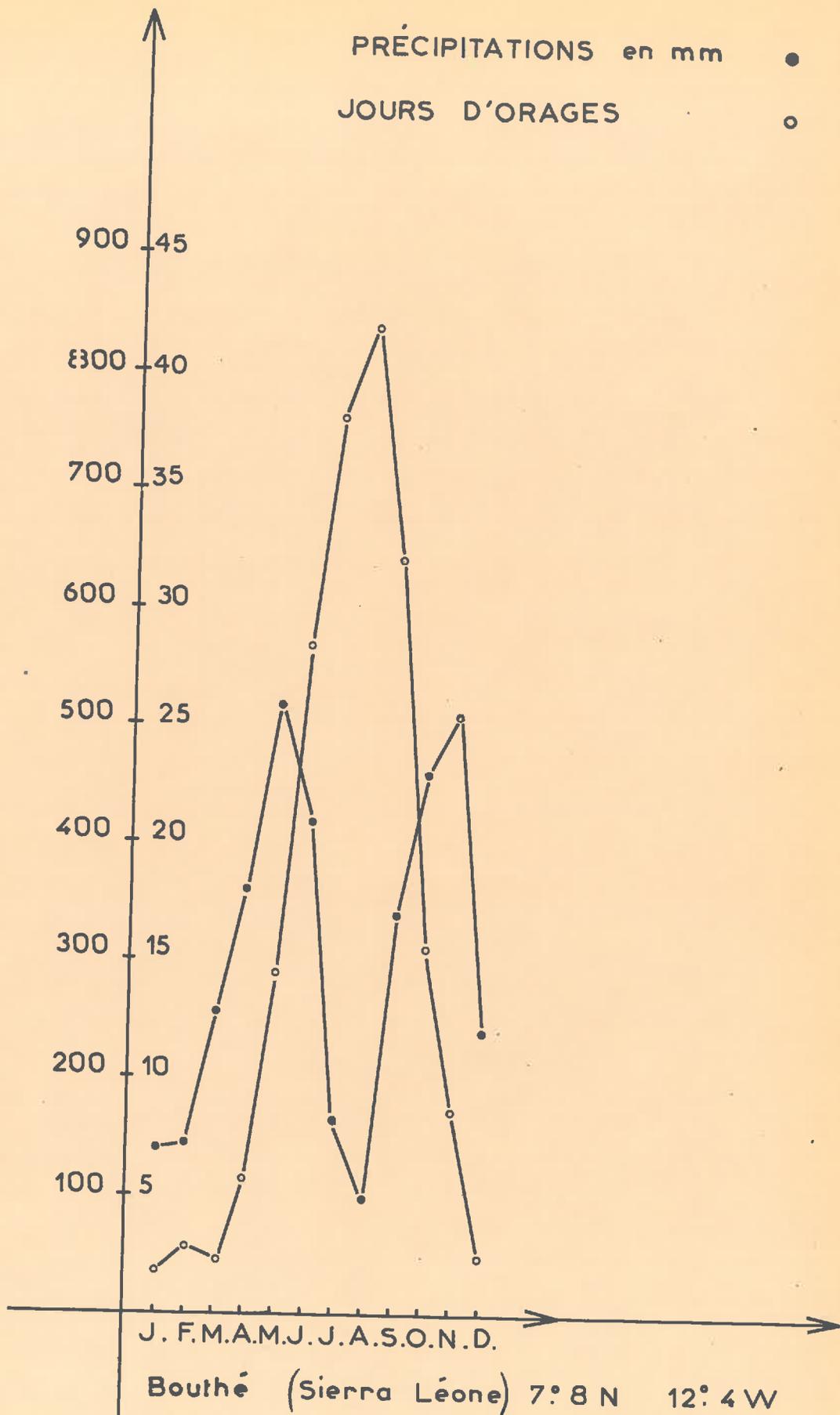
J. F. M. A. M. J. J. A. S. O. N. D.

Fig. 27



KANO

Fig. 28 - 1 -



Bouthé (Sierra Léone) 7° 8 N 12° 4 W

Fig. 28_2

III.2. Classification d'après le nombre de maxima d'orages et de précipitations

Compte tenu de cette analyse, nous allons maintenant essayer de dégager quelques conclusions.

Il faut tout d'abord remarquer que la comparaison entre fréquences d'orages et de précipitations est extrêmement délicate, en ce sens que plusieurs facteurs entrent en jeu ; l'estimation des fréquences d'orages est une source d'erreurs car un orage peut être entendu à distance sans se manifester réellement à la station, alors que les pluies sont enregistrées à la station même.

D'une façon générale, lorsque l'humidité relative est faible, l'instabilité est plus forte (cas des développements cumuliformes) et il y a une grande possibilité de manifestations orageuses. Au contraire, quand les pluies sont abondantes, c'est à dire dans le cas d'une forte mousson, les orages ont tendance à être inhibés. Autrement dit, une forte instabilité thermique, liée à une faible humidité relative et à une faible nébulosité, (si l'épaisseur de mousson est faible) fournit des conditions favorables à la formation des orages car le rayonnement solaire est plus intense, et la convection plus grande. C'est ce qui se produit à Gao, Labé, Agadez Zinder etc....., au début et à la fin de l'envahissement par la mousson ; il faut ajouter à celà la nature relativement sèche des sols qui diminue leur conductivité, donc

la température du sol, et accroît, par conséquent accélère le réchauffement de l'air par conduction (chapitre I.)

Pour récapituler nous dressons un tableau des différents types de régimes pluvio-orageux rencontrés, en les classant d'après leur nombre de maxima de précipitations et d'orages.

III.2.-1 Régions à deux maxima d'orages et de précipitations

Ce sont les régions d'Abidjan, Cotonou, Lomé, Accra et Lagos. Elles ont 2 saisons de pluies et d'orages, aux mêmes périodes, soit en mai-juin d'une part, en septembre-octobre d'autre part. Sur la figure 29, on voit que ces régions sont parcourues deux fois par an, par les zones C et D de la coupe du F.I.T. (Glenn 1966). De plus, les mois de juillet et d'août, qui correspondent à l'intersaison des pluies, coïncident avec la période froide (hiver) de l'hémisphère austral ; cet air froid de l'hémisphère Sud augmente la stabilité déjà existante dans la région occidentale de l'Afrique à cette époque où intervient la zone E.

Remarque :

Bien que les mois de juillet et d'août correspondent à l'été dans l'hémisphère boréal, la température moyenne à Accra marque une forte baisse (fig. 31) essentiellement à cause de l'arrivée de ce courant froid sur le Golfe de Guinée (fig. 30)

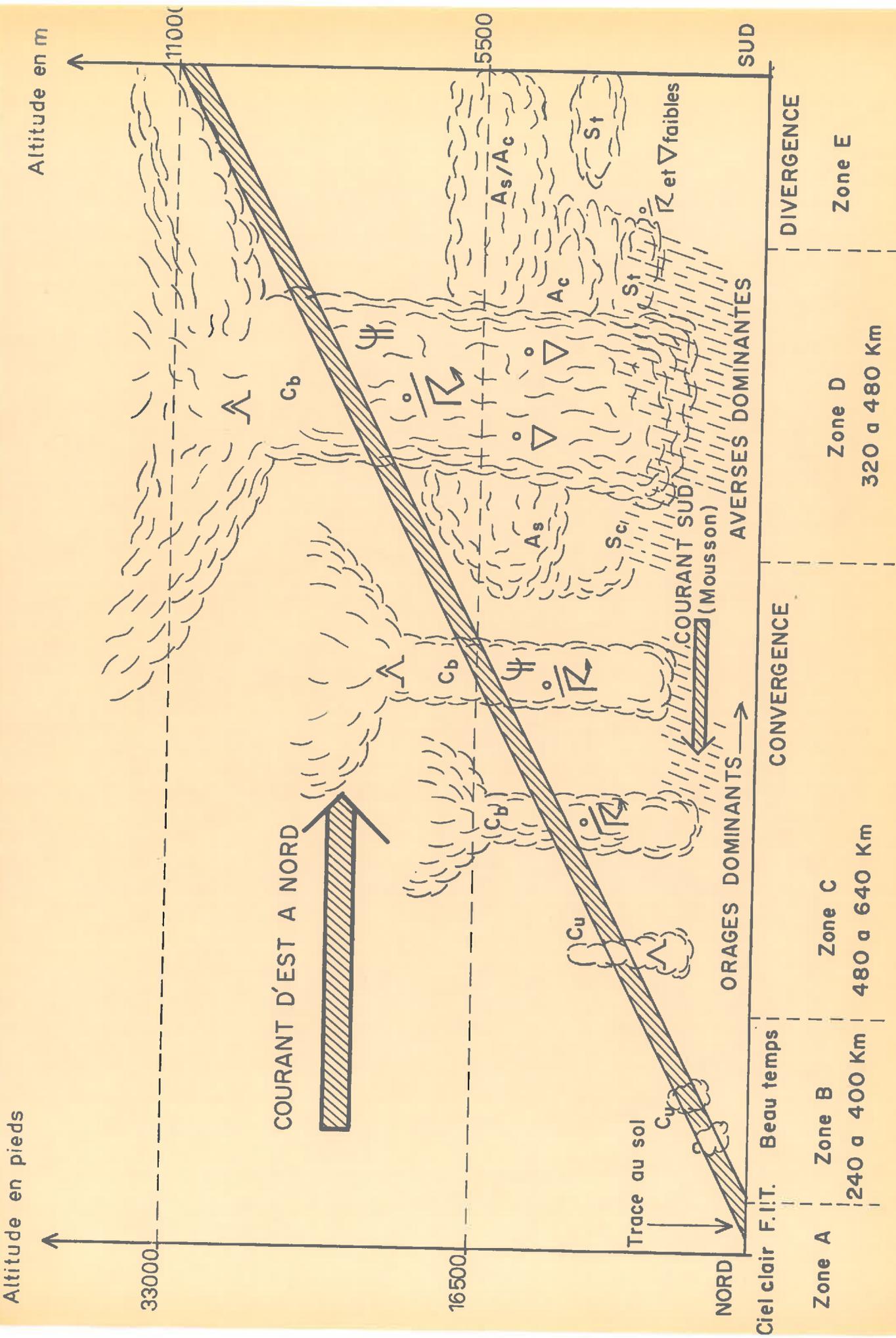


Fig. 29

Positions des zones du F.I.T. (selon TWALKER)

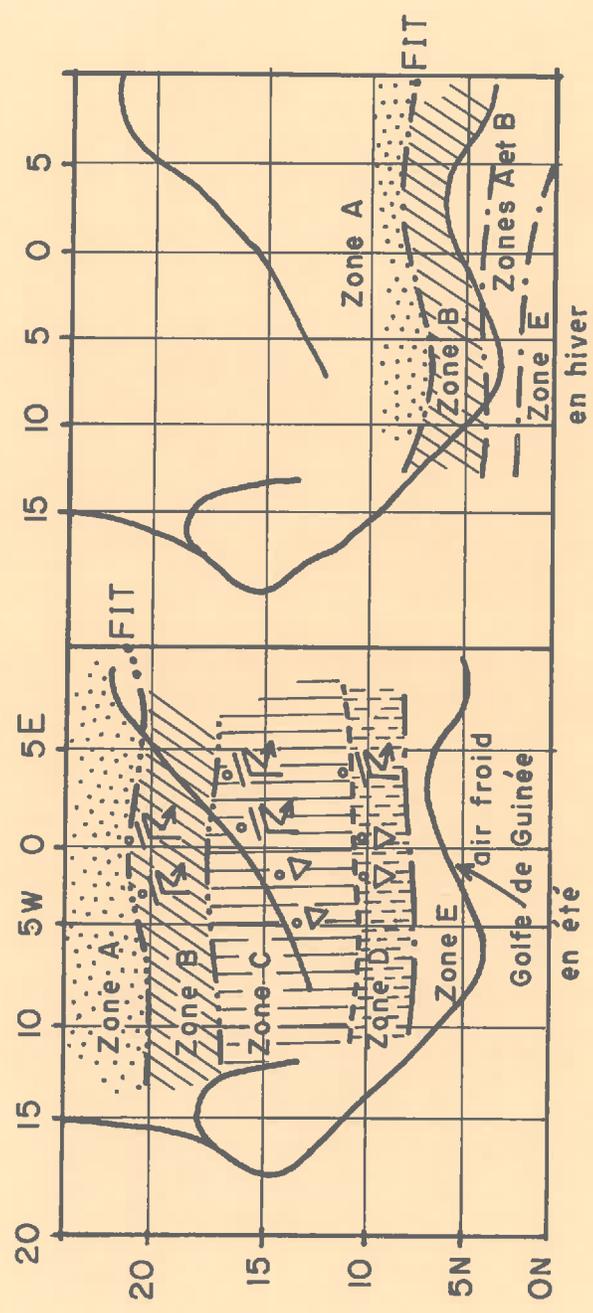
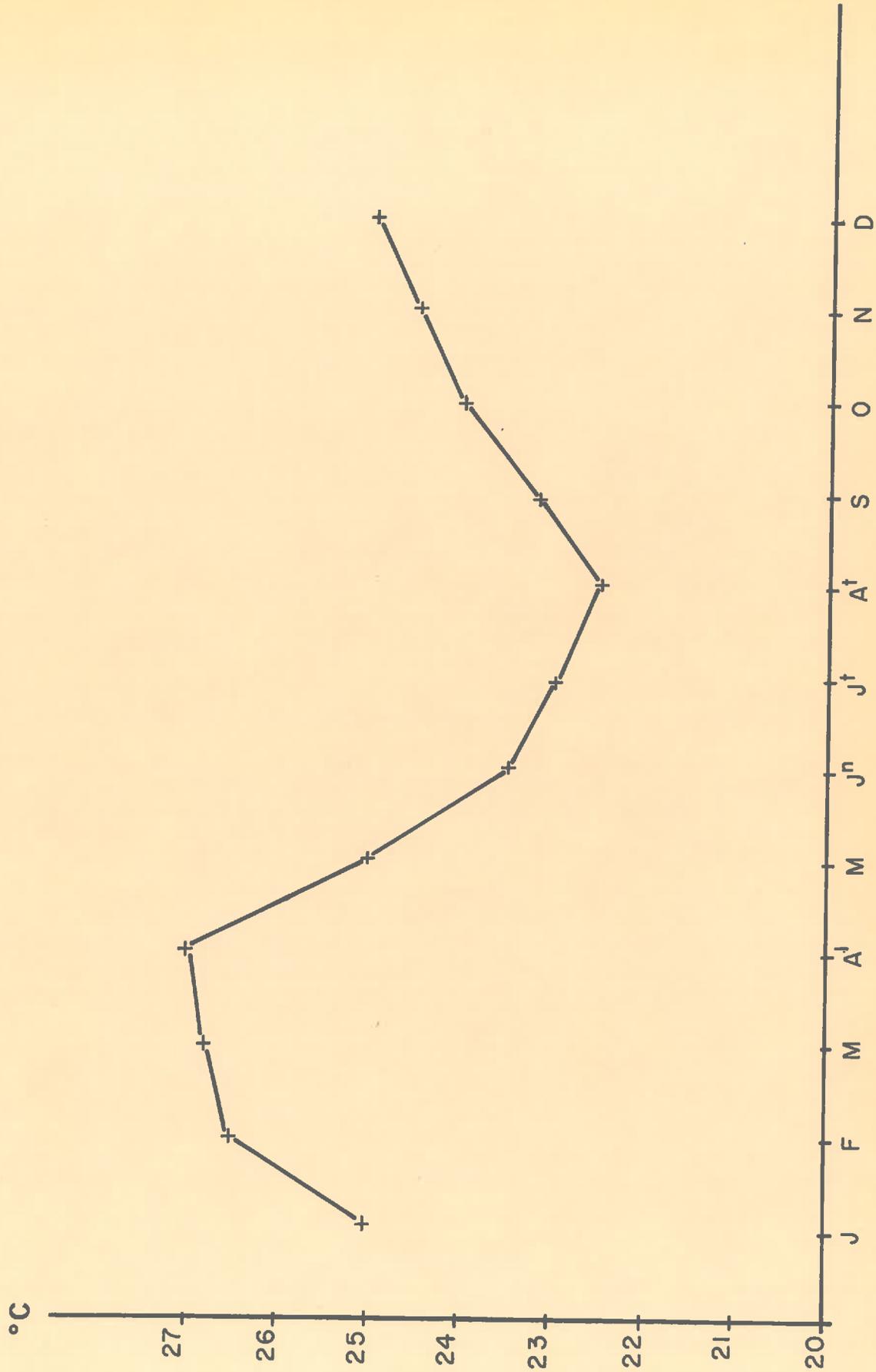


Fig. 30



Températures moyennes mensuelles à Accra

Fig. 31

III. 2. -2 Régions à 2 maxima d'orages et un maximum de précipitations

Ces régions englobent Conakry, Labé, Bouthé et ne possèdent qu'une seule saison des pluies, correspondant à une diminution notable du nombre des orages.

Ici, le facteur relief joue un rôle prépondérant, car il augmente le nombre des pluies et des orages par le phénomène de soulèvement à la base (§ II.1-5). Les deux maxima d'orages correspondent à un double passage de la zone C (partie pluvio-orageuse) du F.I.T. (fig. 29), alors que la zone D (partie à pluies continues) ne passe qu'une seule fois sans transition. Autrement dit, la zone E ne balaie jamais ces régions.

A Bobo Dioulasso et Ouagadougou, la répartition des précipitations et des orages est la même qu'à Conakry et Labé, mais avec une légère atténuation due à l'absence de relief.

III.2.-3 Régions à un maximum d'orages et de précipitations

Dakar, Tambacounda, Podor, Gao, Agadez, Niamey, Zinder, Néma, Nouakchott, Fort-Gouraud et Kano n'ont qu'une seule saison pluvio-orageuse. Ces régions sont traversées 2 fois par la zone B et une seule fois par la zone C (fig.29) et (fig. 30).

Remarque

D'après la figure 29, la zone C a une largeur de

l'ordre de 480 à 640 km. Or, sur la figure 36, cette zone C qui caractérise la région de transition entre l'équateur et les tropiques, a une largeur de 4°, soit environ 450 km, ce qui est acceptable aux erreurs d'expériences près.

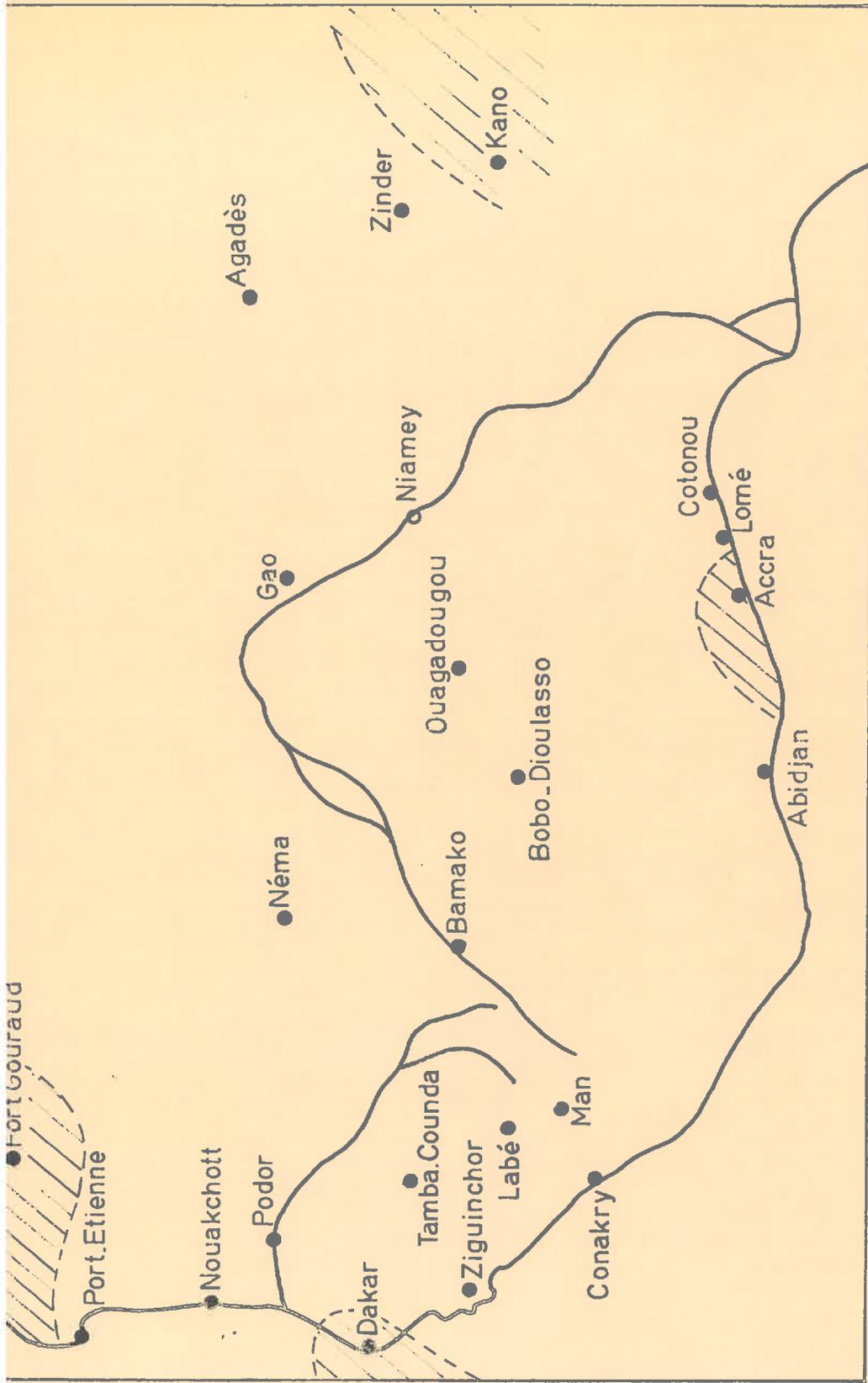
III.3. Conclusion

Nous allons essayer de discuter quelques particularités constatées dans certaines régions :

Excepté à Dakar, nous avons remarqué que des orages précoces précèdent les précipitations, et des orages tardifs se produisent après les maxima de précipitations. (fig. 32)

Au début de l'"hivernage", l'épaisseur de la mousson et la nébulosité sont faibles ; il y a donc une forte instabilité qui déclenche des orages précoces. Lorsque la mousson devient plus importante, a lieu le maximum de précipitations. Il faut faire la même remarque quant au retrait, tardif en général, des orages.

Le cas de Dakar est assez particulier. Bien qu'à l'arrivée de la mousson les conditions d'instabilité soient grandes, cette station, de par sa position géographique extrême (presqu'île dans l'océan), subit encore notablement l'influence de l'alizé qui freine l'instabilité ; d'où des orages tardifs au début et à la fin de



D'après la structure du FIT, en général les orages arrivent avant les averse et se retirent après. Les zones hachurées indiquent des particularités entre ces deux phénomènes.

Fig. 32 - Relation dans le temps entre orages et précipitations lors de leur apparition et de leur disparition (remarques sur quelques particularités)

l'hivernage car il y a alors un effet plus marqué de la mousson même peu épaisse, et une insolation plus importante.

Pour mieux préciser le rapport entre orages et précipitations, une carte indiquant des isoplètes du

rapport
$$R = \frac{\text{Hauteurs des précipitations en mm}}{\text{Nombre de jours d'orages}} \quad (\text{fig.33})$$

a été tracée.

On distingue 3 zones principales :

- $R > 12$: une bande à prédominance de précipitations le long des côtes où la mousson est très épaisse.

- $R < 8$: une zone à prédominance d'orages au nord.

- $8 < R < 12$: une zone de transition entre les deux.

On constate aussi une zone déficitaire en pluies et orages au Nord du Dahomey.

Par ailleurs, deux cartes séparées (fig. 34) et (fig.35) donnent les isoplètes des précipitations et les isoplètes des jours d'orages.

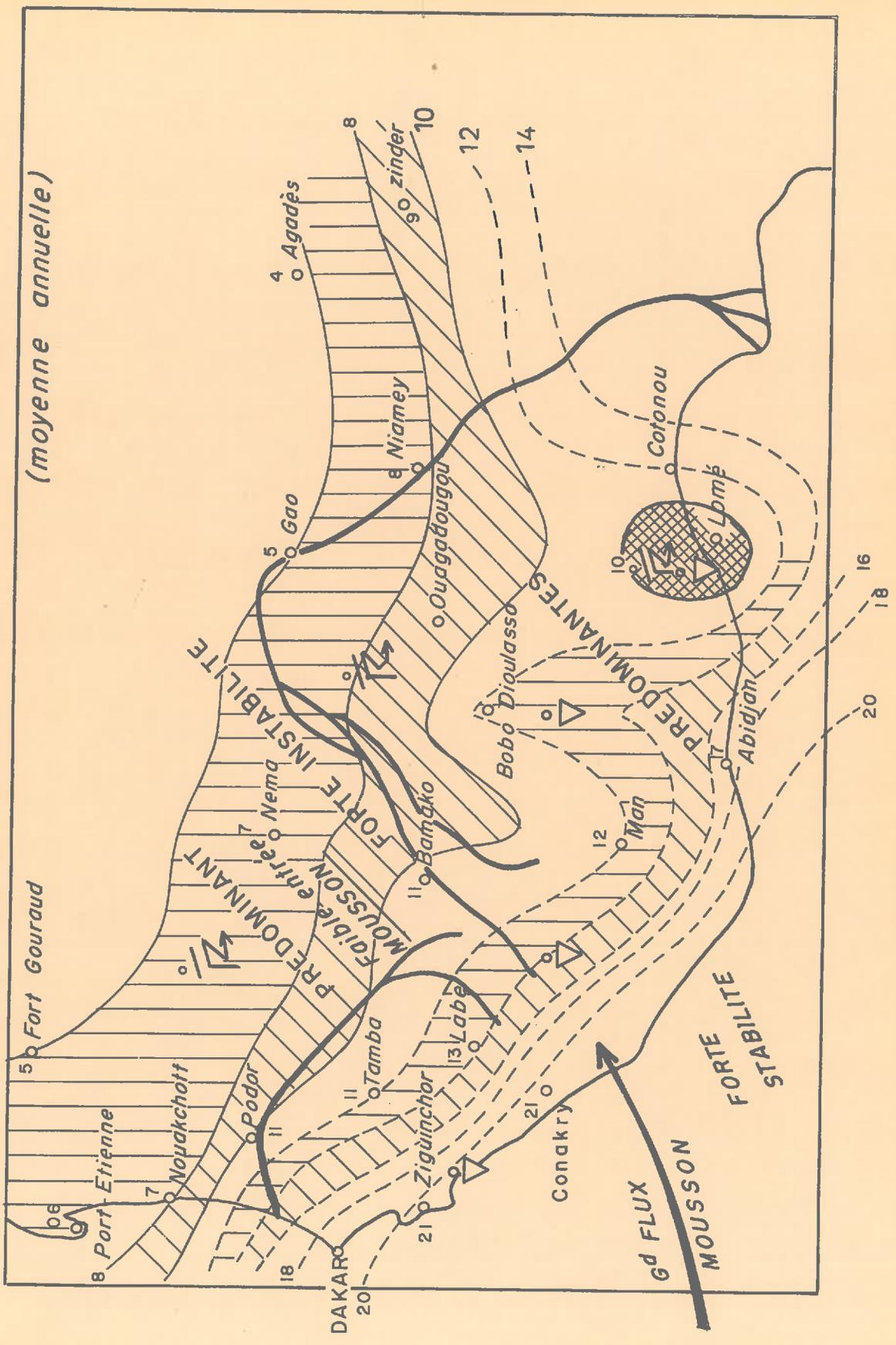
D'une manière générale, la même zone déficitaire au Dahomey se retrouve sur les 3 cartes (fig. 33), (fig. 34) et (fig. 35).

Différentes explications ont été données à cette zone de déficit .

En particulier Glenn estime que l'orientation SW -E à NE

Lignes d'égal rapport $R = \frac{\text{précipitations en mm}}{\text{jours d'orages}}$

(moyenne annuelle)



NB - Plus R est élevé, plus la région a une prédominance d'averses
 Plus R est faible, plus elle a une prédominance d'orages

Fig. 33

PRÉCIPITATIONS (moyennes annuelles en mm)

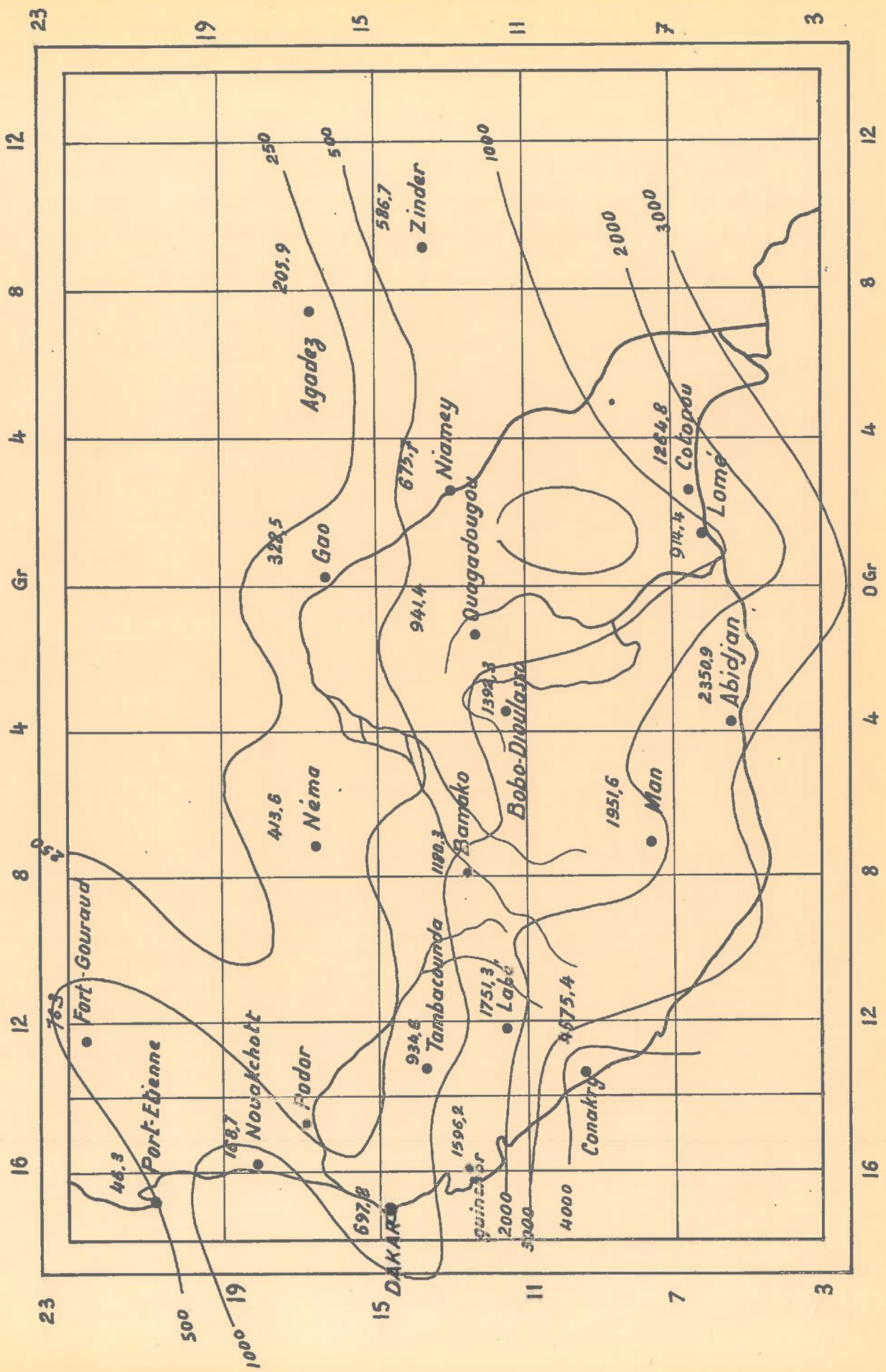


Fig. 34

Nombre de jours d'orages (annuels)

1951 - 1955

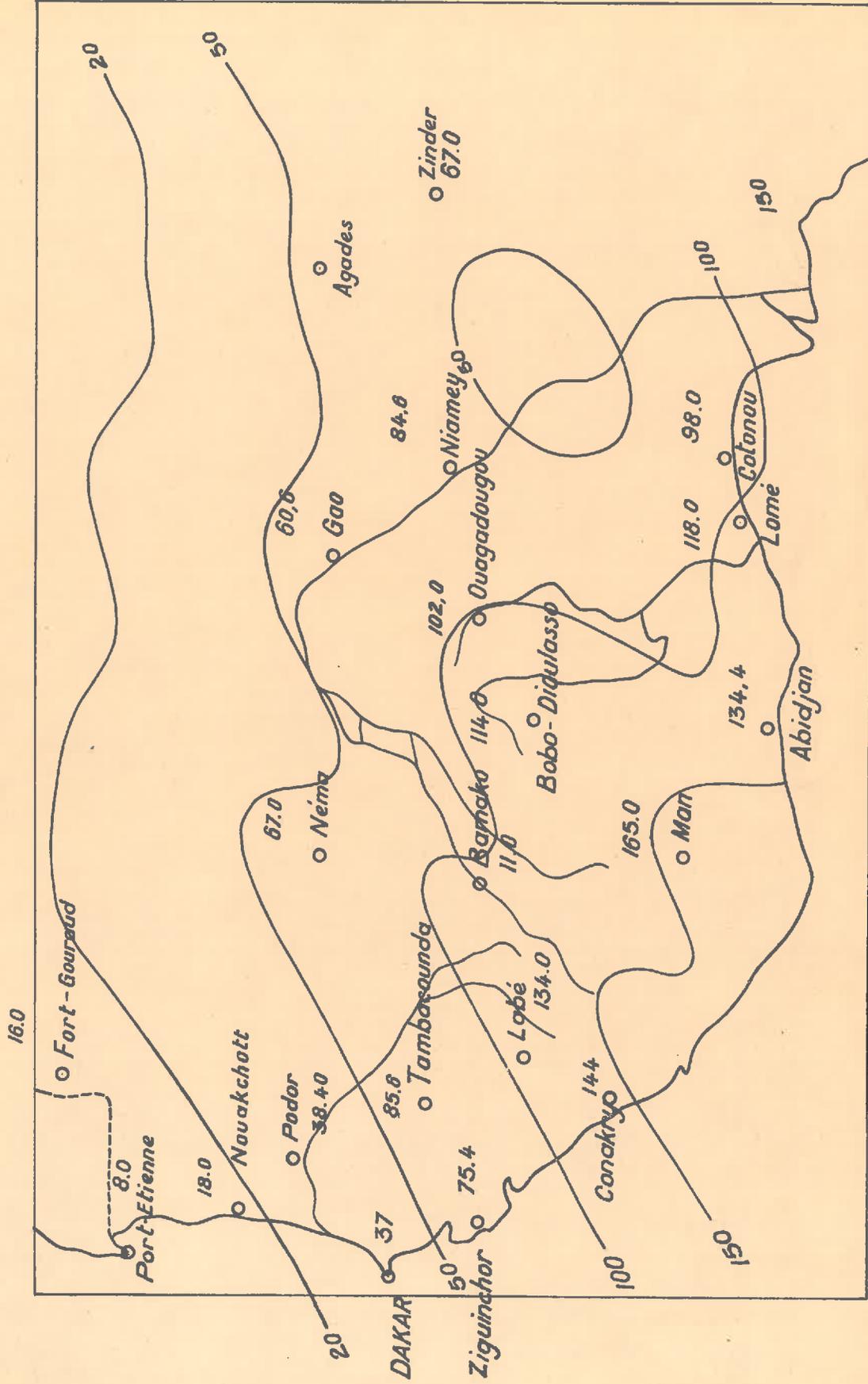


Fig. 35

des collines dévie la mousson, créant ainsi un appauvrissement en eau au dessus de ce relief et dans les basses couches.

A mon avis, à cet effet de déviation de la mousson souligné par Glenn, s'ajoute le fait que la végétation est moins dense sur les collines et plateaux semi-arides et l'évapo-transpiration moins intense que dans les régions voisines recouvertes de forêts. C'est l'effet contraire à l'effet d'oasis.

Remarque :

Une carte donnant la distribution géographique des stations a été jointe à ce chapitre (fig. 36) afin de permettre au lecteur de mieux situer ces stations. On peut d'ailleurs y esquisser les 3 zones pluvio-orageuses déjà précisées plus haut.

Distribution géographique des stations

(fig. 39)

-  2 maxi. d'orages — 1 maxi. précip.
-  1 maxi d'orages et de précipitations

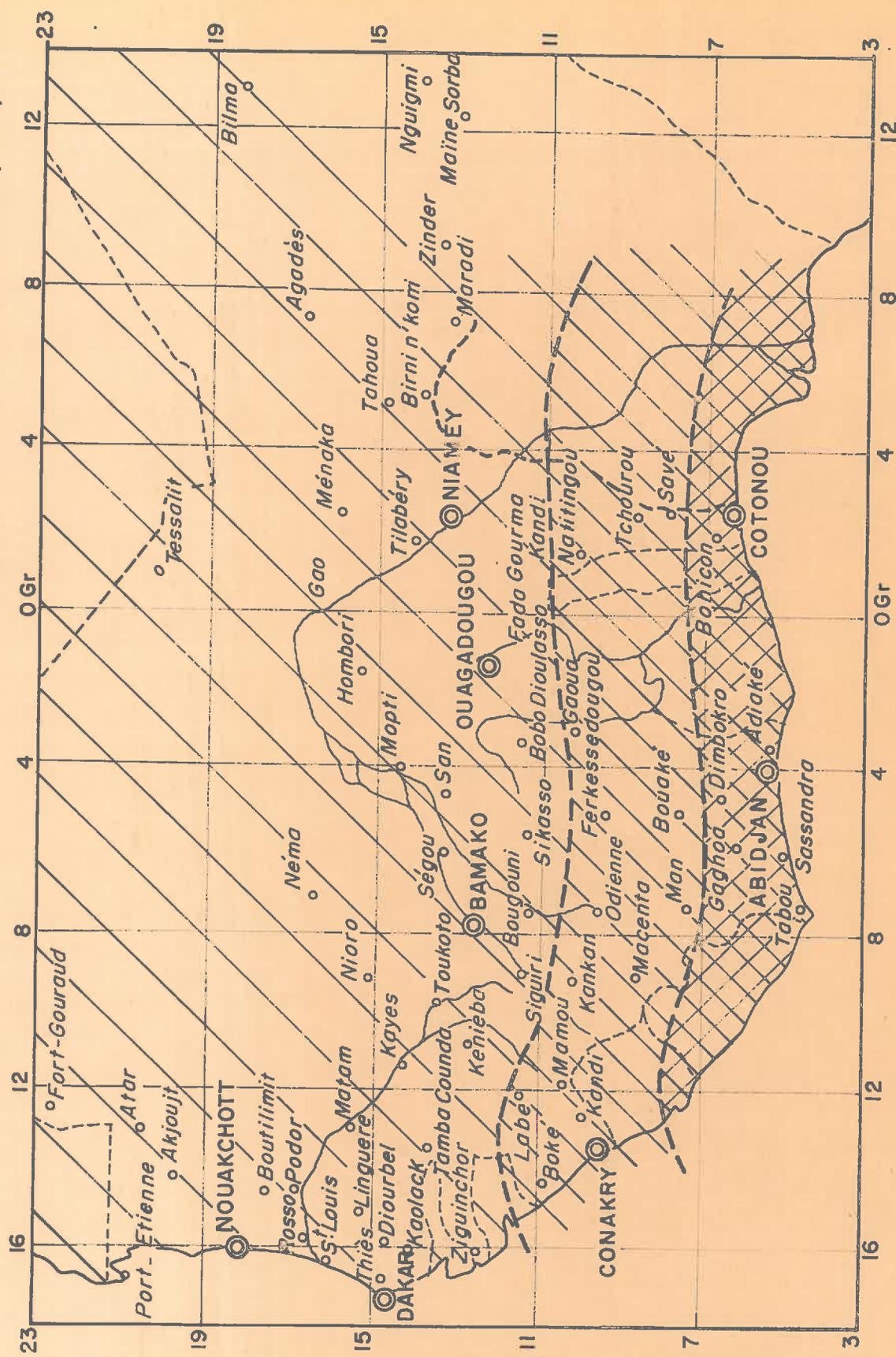


Fig. 36

INTRODUCTION AUX CHAPITRES IV & V

Pour bien situer l'échelle des différents phénomènes orageux, il est opportun de donner une idée de l'étendue recouverte par ces orages.

A titre de référence, nous donnons un tableau d'échelles des mouvements de l'atmosphère extrait du Cours de 3ème Cycle de P. Queney (D.E.A; de Météorologie 1968).

E	ECHELLE HORIZONTALE	MOUVEMENTS LES MIEUX DEFINIS
Petite Echelle (locale)	$E < 5 \text{ Km}$ (force de Coriolis négligeable)	Turbulence des basses couches
Moyenne Echelle	$5 \text{ Km} < E < 200 \text{ Km}$ (force de Coriolis peu importante)	Mouvements orageux (Brises-Perturbations de relief)
Grande Echelle (synoptique)	$E > 200 \text{ Km}$ (force de Coriolis très importante)	1) cyclones ----- 2) circulation générale et marée atmosphérique

(Tableau n° 2.2) (P. Queney 1968)

C H A P I T R E IV

ORAGES LOCAUX

Evolution d'un orage par débordement marin à Douala (petite échelle)

Les lignes de grains rencontrées dans la région occidentale de l'Afrique prennent souvent naissance au voisinage du méridien de Greenwich, ou plus rarement à l'est de celui-ci.

Bien que le Cameroun soit en dehors des limites de cette étude, nous y avons choisi un cas typique d'orage par débordement marin, cas assez rare dans la région occidentale de l'Afrique. En effet, dans cette zone, les orages les plus observables sont, d'une part ceux qui éclatent l'après midi et sont d'origine thermique, d'autre part ceux qui se produisent la nuit et accompagnent les lignes de grains. Rares sont ceux qui se développent localement le matin, alors que la convection thermique diurne n'a pas encore commencé.

Situé à 04° 01' Nord et 09° 43' Est, à une altitude de 11 m au dessus du niveau de la mer, Douala subit l'influence de la mousson. Son climat est caractérisé par deux saisons pluvio-orageuses identiques à celles d'Abidjan, Cotonou etc.

L'orage qui est décrit ici a eu lieu le 28 mai 1964 avant le lever du soleil ; il a duré envdron une heure,

a été sans liaison avec une ligne de grains ; il s'est formé en mer, de la façon suivante : pendant la nuit, la mer est une véritable chaudière d'évaporation car elle absorbe de l'énergie le jour et se refroidit peu par rapport à l'atmosphère la nuit. Si bien que le matin, alors que l'air en surface est froid, la mer reste encore chaude et il y a évaporation. L'atmosphère saturée qui en résulte se trouve alors en contact avec le continent plus froid le matin, se condense et précipite. Ces orages, formés par le passage d'un cumulonimbus local, durent quelques minutes et éclatent surtout le long des côtes.

Pour permettre de bien suivre l'orage nous passons en revue les données météorologiques (relevés, observations, photographies de l'état du ciel) fournies entre 5h et 7h30 (heures de Greenwich) soit 6h et 8h30 (heures locales) .

IV. 1. Le vent au sol : (fig. 37)

Avant le passage de l'orage c'est le calme équatorial caractéristique. L'orage provoque un coup de vent avec changement de direction d'Est en Ouest ; la force du vent atteint 3 à 4 m/s. Puis on retourne au calme après l'orage.

IV. 2. La pression : (fig. 38)

Nous avons un cas d'orage bénin, très peu violent,

5 h 00	calme
5 h 30	100/06
6 h 00	060/08
6 h 30	calme
7 h 00	calme
7 h 30	200/04

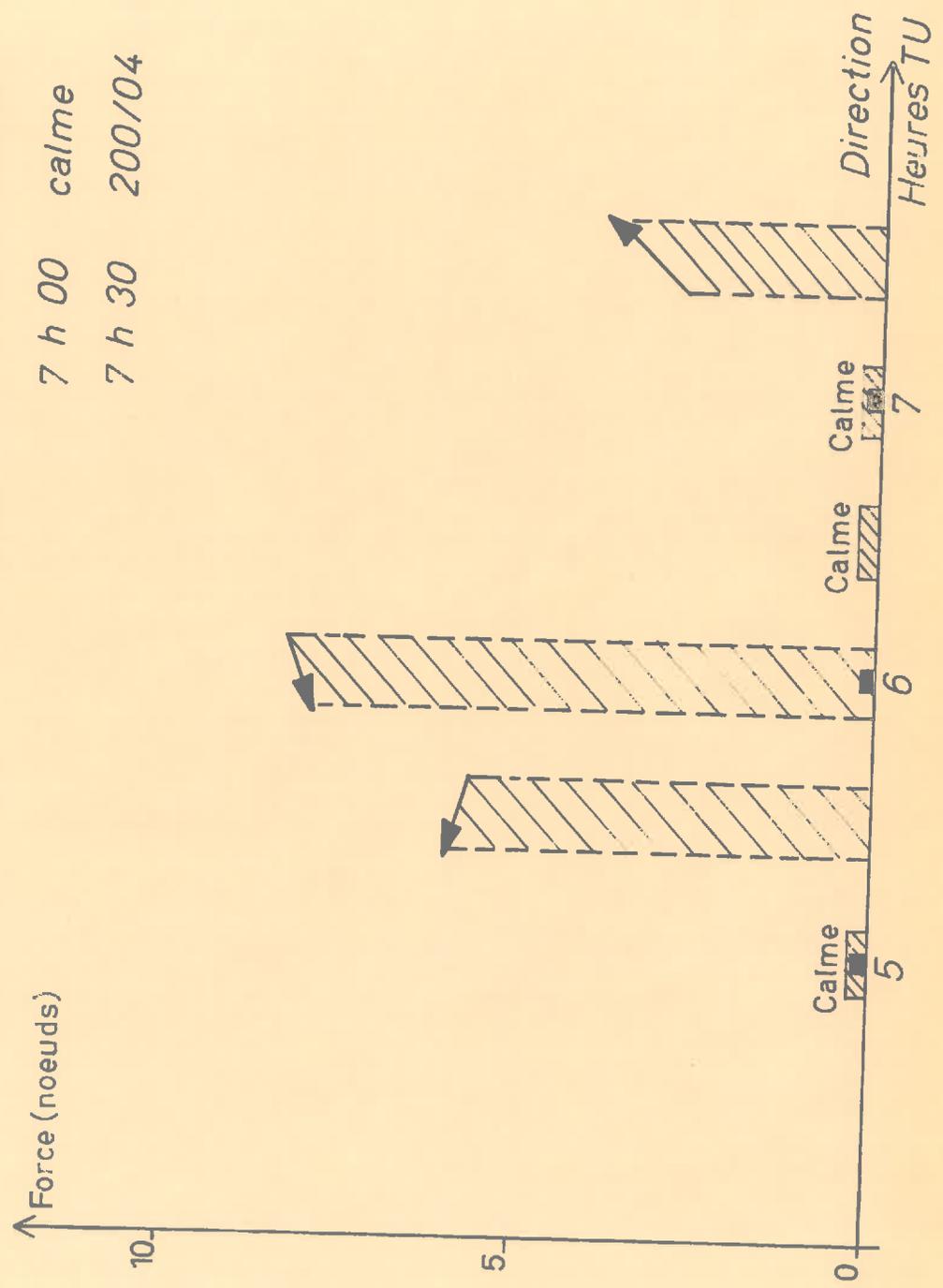


Fig . 37

Vent au sol

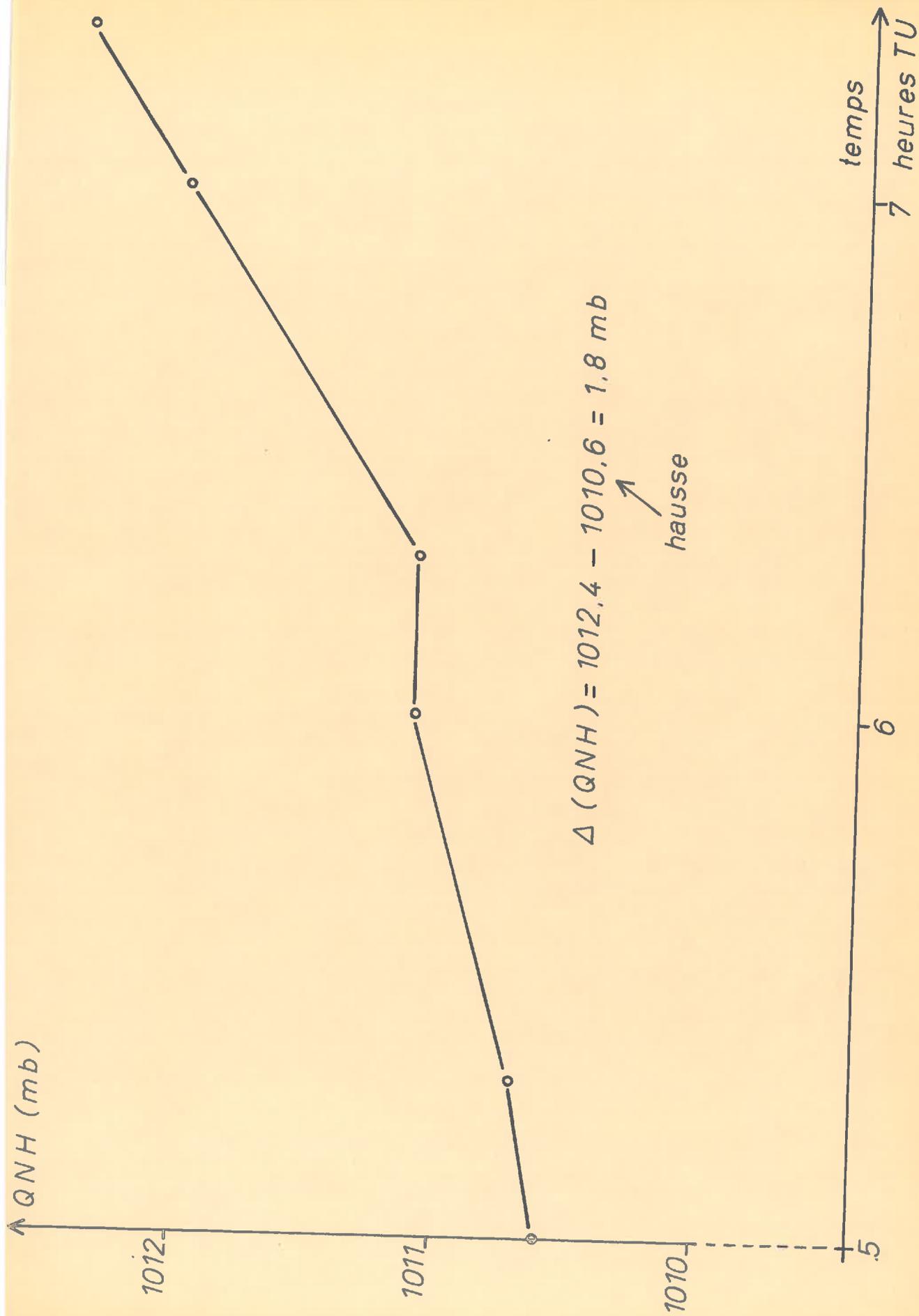


Fig - 38
 Pression au sol

qui ne donne lieu à aucune variation brutale de pression, contrairement à ce qui se passe pour les lignes de grains. Du fait de sa situation au bord de la mer, Douala a un gradient de pression très faible car l'effet de la mer rend les masses d'air relativement homogènes. En 2h 30 on ne note qu'une variation de pression de 1,8 mb.

Signalons que pour des raisons de commodité, les pressions seront exprimées en QNH qui est la pression à laquelle un avion doit caler son altimètre pour que celui-ci indique l'altitude de la station en touchant le sol de cette station ; cela revient presque au même que d'utiliser la pression au niveau de la mer.

IV. 3. Humidité relative (fig. 39)

Elle est quasiment stationnaire pendant et après l'orage et vaut 96 à 98 %. Ce n'est donc ni grâce à l'humidité ni grâce à la pression que nous pouvons connaître l'évolution de l'orage.

IV.4. Température des thermomètres sec et mouillé (fig.40)

Ces deux thermomètres indiquent deux températures très voisines (les écarts sont de l'ordre de 0,2 à 0,9°C) par suite de la forte humidité de l'air. Au passage de la perturbation, il n'y a pas de variation brusque de température, mais seulement une légère baisse très peu sensible.

IV. 5. Nébulosité et visibilité (fig. 41)

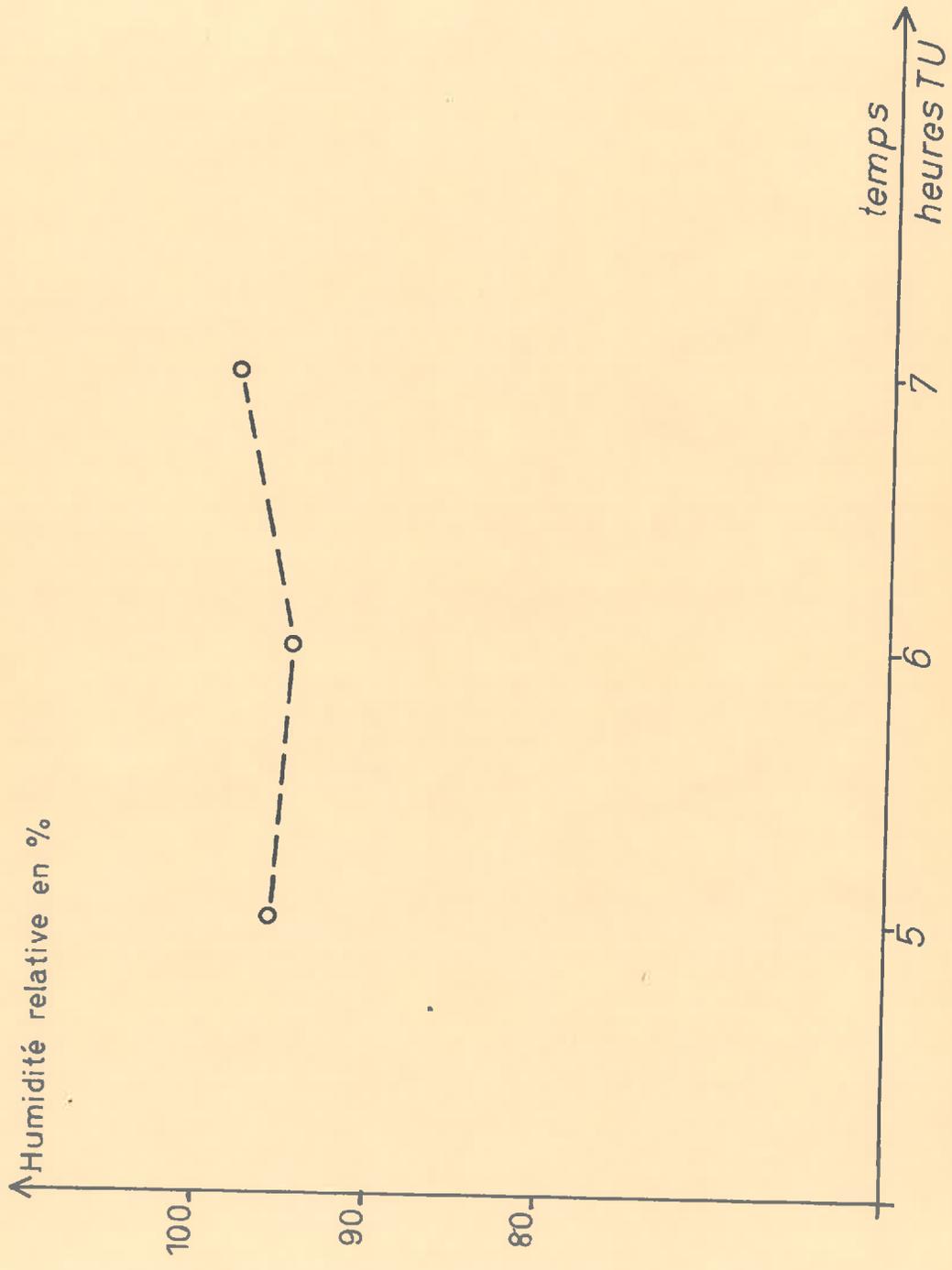


Fig. 39

Humidité relative au sol

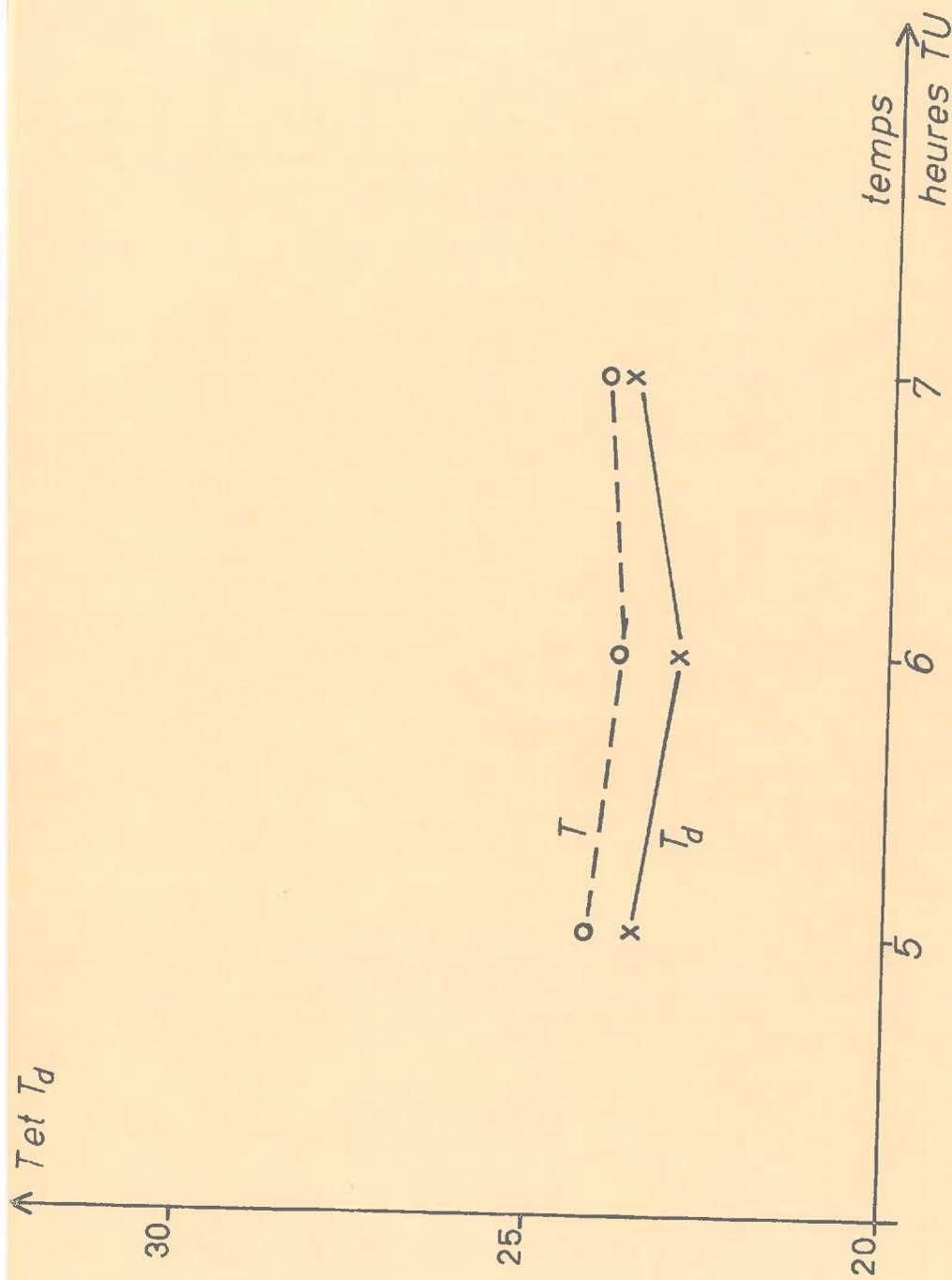
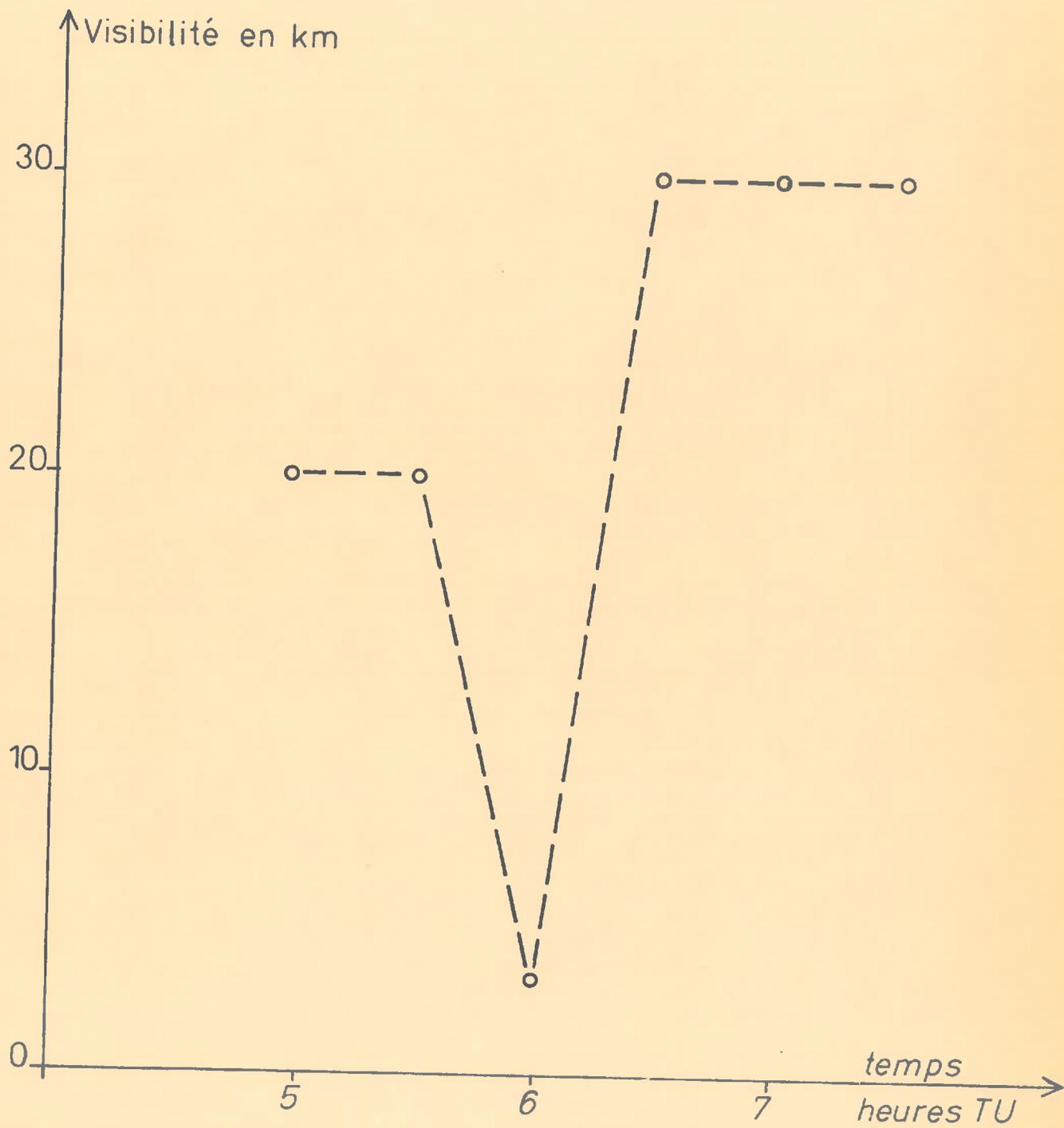


Fig. 40 (température au sol = thermomètre sec et point de rosée)

$$\Delta^{T1} = 0,6$$

$$\Delta^{T2} = 0,9$$

$$\Delta^{T3} = 0,3$$



g.41 - Visibilité au sol au passage de l'orage

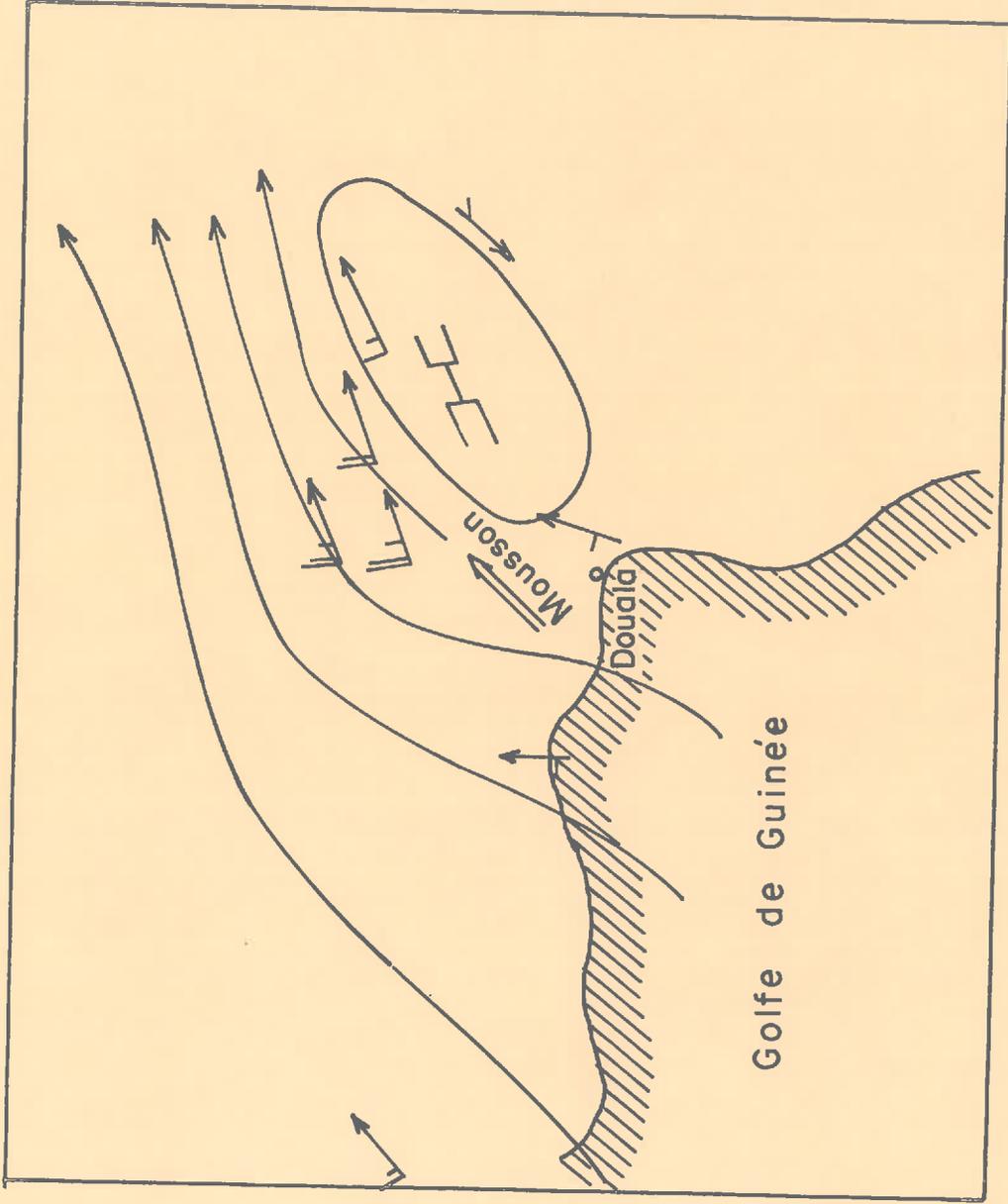


Fig. 42.- Vents à 900/1000m (#900 mb)
 pendant l'orage
 Douala 28_5_64 à 0600 TV
 (d'après les pilotes)

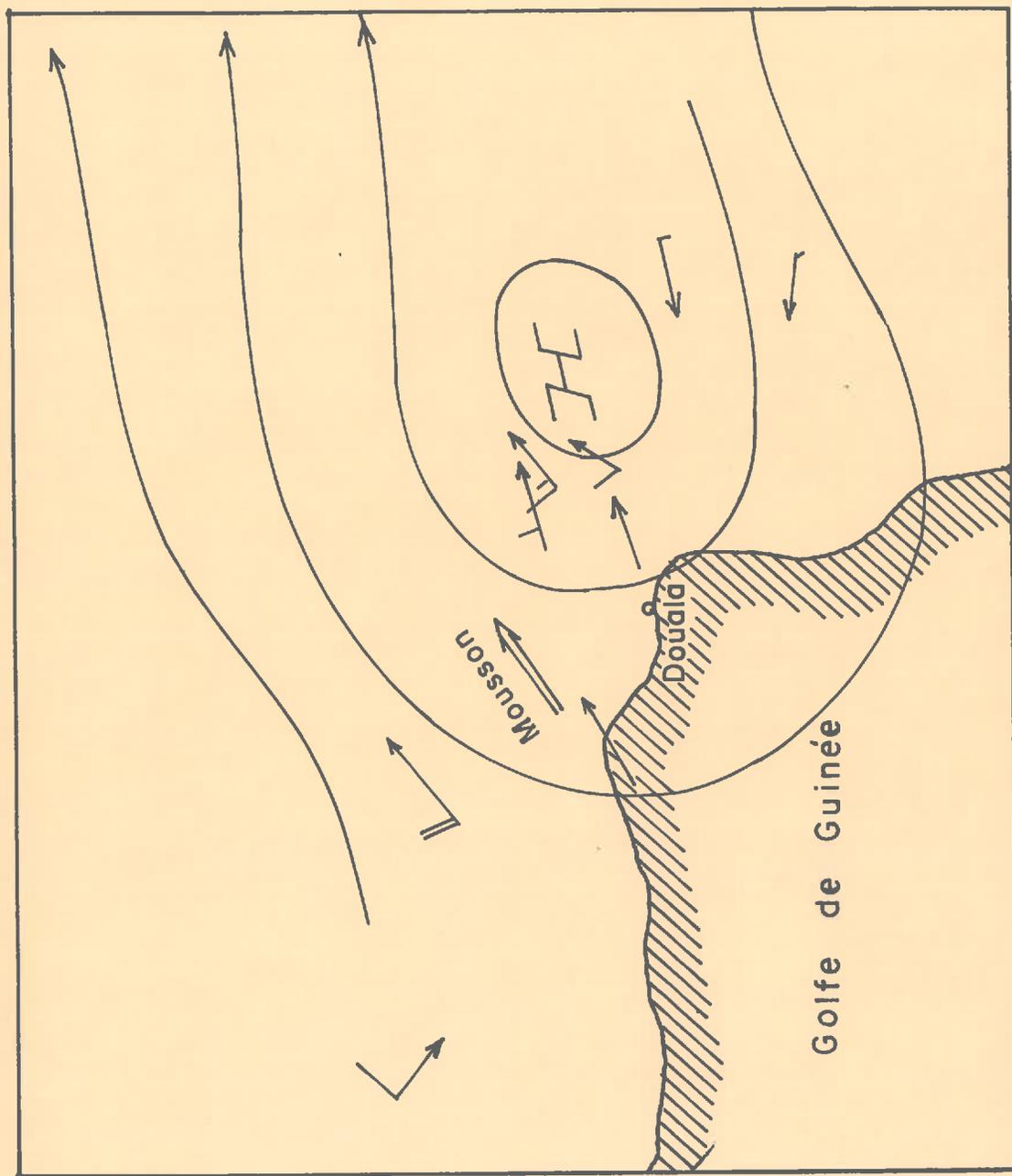


Fig. 43.- Vents à 1500 (# 850 mb) pendant l'orage

Douala 28_5_64 à 0600 TV

(d'après les pilotes)

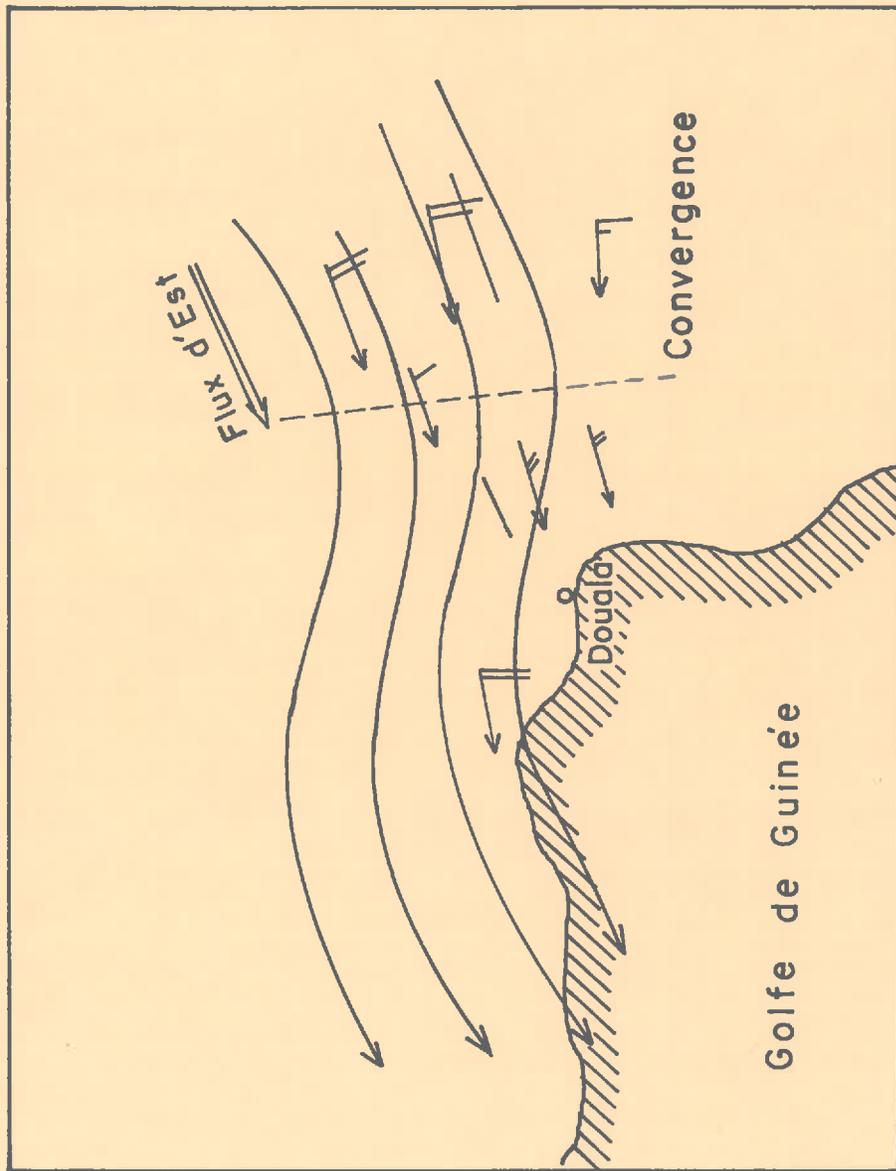


Fig. 44 — Vents à 2000/2100 m (#800 mb)

Douala 25.5.64 à 0600 TV
 (d'après les pilotes)

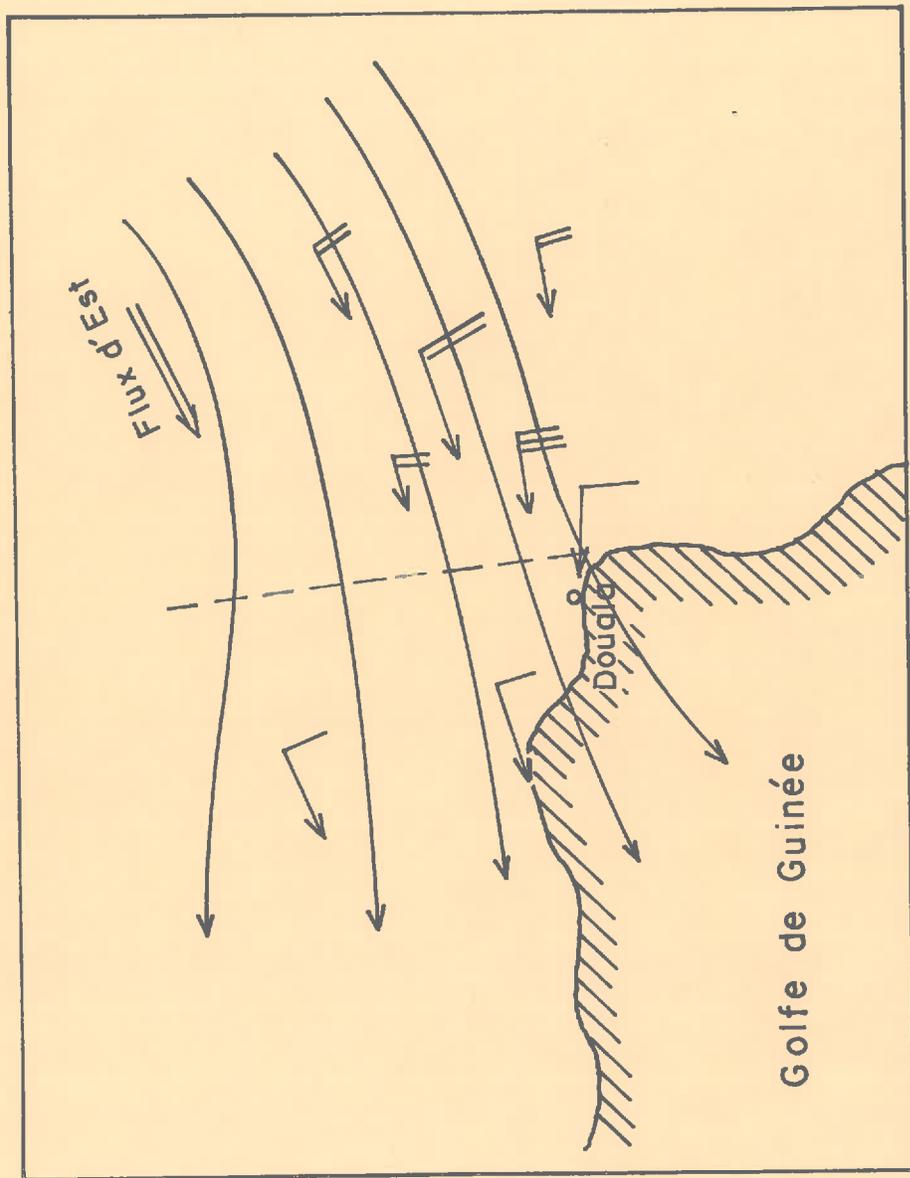


Fig. 45.— Vents à 3000 m. (#700 mb)
 Douala 28-5-64 à 0600 TV
 (d'après les pilotes)

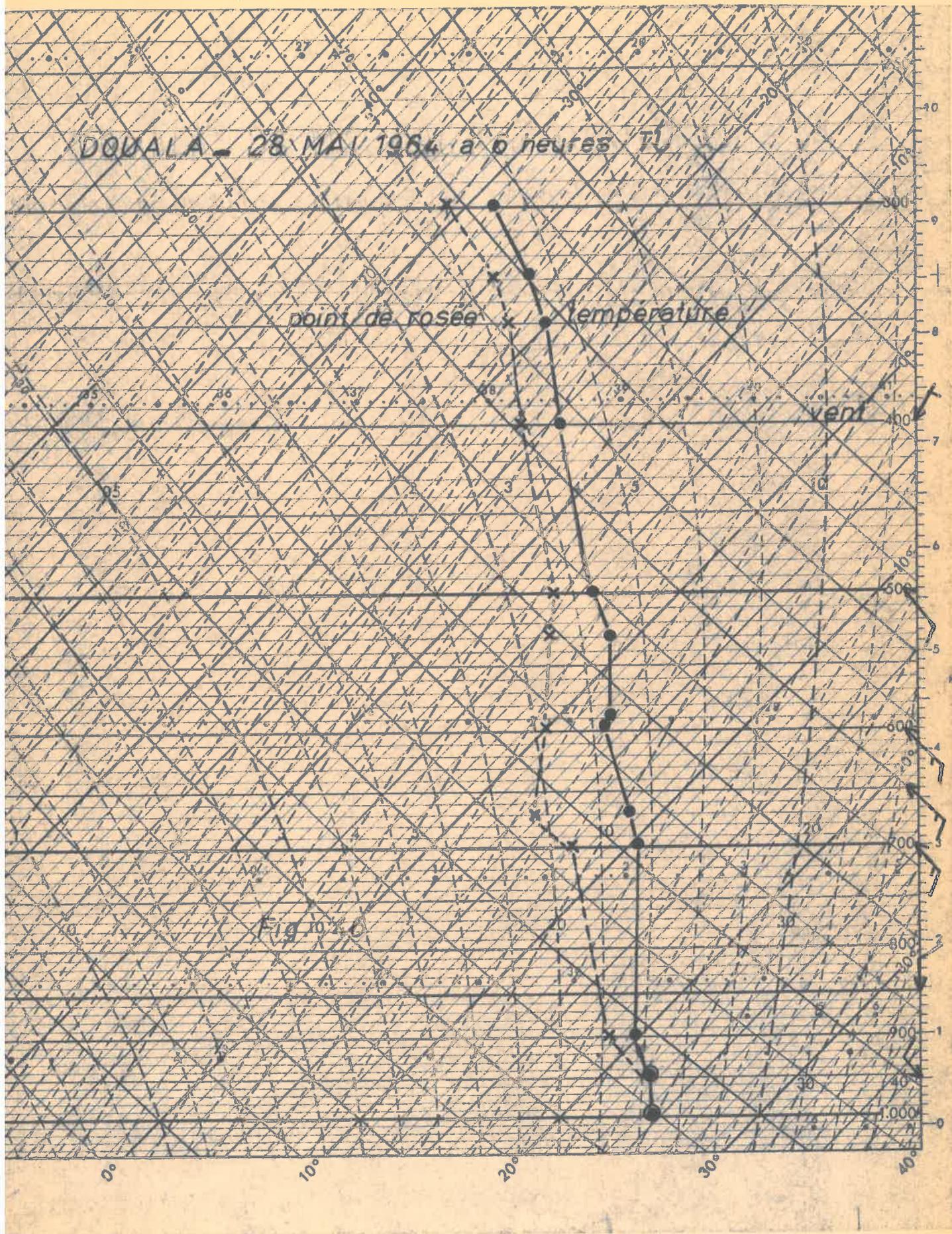
DOUALA - 28 MAI 1964 a 0 heures TL

point de rosée

temperature

vent

Fig 10.20



Tout naturellement la nébulosité croît de 6 à 8 lors de l'arrivée de l'orage sur la station. La visibilité elle, passe brusquement de 20 à 3km au passage du cumulonimbus ; puis, à cause des fortes averses qui suivent et lessivent l'atmosphère, cette visibilité remonte à 30 Km après le passage de l'orage vers 7h. Ceci est très fréquent dans les pays tropicaux.

IV. 6. Vents entre 600 et 3000m, mesurés par pilotes

L'analyse est très délicate à cause du manque de stations et du mauvais temps qui rendent très difficiles les observations par pilotes. On peut néanmoins constater approximativement un flux de Sud-ouest à 6h entre le sol et 1500m ; ceci précise peut-être et même sûrement l'épaisseur de la mousson (fig. 42 et 43).

Au dessus de 1500m, c'est par contre un flux de secteur Nord-Est assez fort qui prend naissance, et fait apparaître une petite zone de convergence sur Douala. (fig. 44 et fig. 45)

IV.7. Vents à des niveaux supérieurs à 3000m (fig. 46)

Un radiosondage est effectué à 6h, heure de Greenwich, juste au moment où l'orage se produit. On note une forte humidité relative du sol à 250mb avec une faible instabilité à tous les niveaux et des vents rela-

tivement faibles. L'activité de cet orage est donc assez limitée.

IV. 8. Nuages en présence :

Si le vent, la pression, l'humidité relative et même la température ne donnent aucun indice pour suivre l'orage, les nuages, eux, défilent avec des aspects caractéristiques de l'évolution du temps.

Pendant l'orage, on note le passage de stratus bas accompagnés de stratocumulus et des cumulonimbus isolés. L'ensemble est doublé d'altocumulus instables et d'altostratus se dirigeant sensiblement du Nord-Est au Sud, sous l'effet des fux en altitude.

Des photographies ont été prises du début à la fin de cet orage.

Analyse des photos

N° 1 -2 : Apparition de l'orage à l'horizon

N° 3-4-5 : Envahissement total de la station par l'orage

N° 6-7-8 : Eclaircies en fin d'orage et disparition progressive des cumulonimbus ; présence de résidus orageux : bancs de stratus, stratocumulus et cumulus noyés dans les altostratus et altocumulus.

Remarque

L'intérêt de cette étude est de montrer la nature très variée des orages dans nos pays ; contrairement à ce que pensent la plupart des gens, un orage peut se produire le matin sans être du tout lié, ni à la convection diurne, ni au déplacement d'une ligne de grains, ni même à l'orographie.

Ici nous assistons à un phénomène orageux assez rare dans la région occidentale de l'Afrique, mais très fréquent dans le golfe de Guinée en bordure de la mer. Il est connu sous le nom d'orage par débordement marin et peut se déclencher à n'importe quel moment de la journée et surtout le matin.

C H A P I T R E V

ORAGES SYNOPTIQUES

Evolution d'une ligne de grain sur la région occidentale de l'Afrique

18 & 19 Juillet 1963

(Moyenne et Grande échelles : P. Queney 1968)

A très grande échelle, une ligne de grain s'est formée le 18 Juillet 1963 à 12h 00 (heure de Greenwich) au Nord du Dahomey. Son déplacement vers l'Ouest a été suivi grâce aux cartes synoptiques tracées toutes les 3 heures au Centre Météorologique de Dakar Yoff. L'auteur a personnellement suivi cette ligne de grain pendant plus de 24 heures en traçant toutes les 3 heures l'isobronte correspondant à sa position. Voici comment cette étude a été menée.

V.1. Déplacement et vitesse (fig. 47)

Le sens de déplacement est sensiblement Est-Ouest ; sa vitesse est évaluée, sur une moyenne de 3 heures, à environ 55 à 60 km/h. Même au-dessus du Fouta-Djallon la variation de la vitesse de déplacement n'est pas suffisante pour perturber nos prévisions en vitesse et en direction.

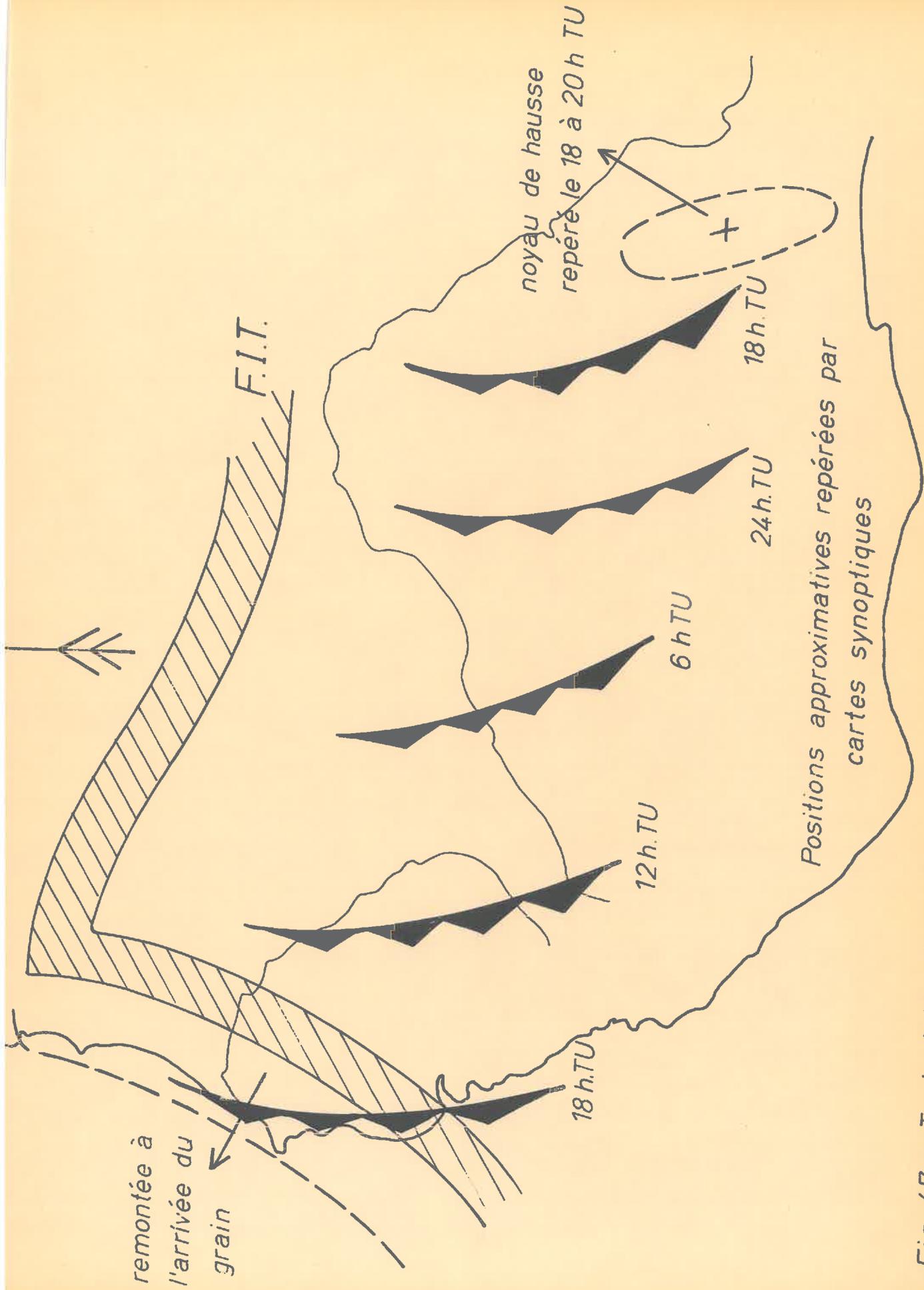


Fig. 47 - Trajectoire du grain

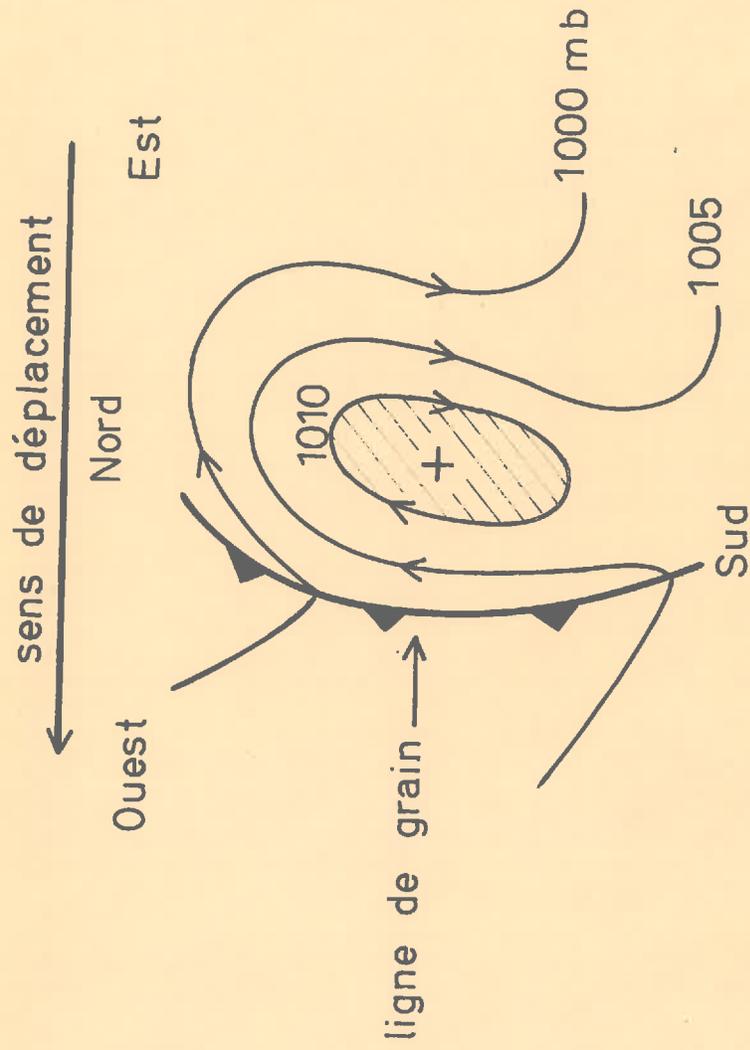


Fig.47 bis : allure des isobares au passage d'une ligne de grain

V.2. Observations faites par le Centre de Yoff

Des stations intérieures au Sénégal ont communiqué à la station Centrale de Yoff des messages d'avis de variation brusque, signalant le passage du grain :

Ziguinchor	13h 25
Bathurst (Gambie)	15h 10
Linguéré	15h 08
Thiès	17h 50
Kaolack	17h 55
St Louis	19h 23
Dakar	20h 25

Si l'on tient compte de la situation géographique des stations, ces temps de passage amènent déjà deux conclusions :

- Tout d'abord le grain n'est pas orienté rigoureusement Est-Ouest, mais plutôt Nord-Ouest --Sud-Est.
- De plus, sa trace au sol s'étend sur une surface de plusieurs dizaines de km de large.

La section "Prévision" du Centre de Yoff qui avait repéré les positions du grain avant son passage à Dakar, avait prévenu ce dernier à 21h. Voici un extrait du message envoyé aux différentes stations et aérodrômes étrangers intéressés par des vols sur Dakar vers cette heure :

Evolution probable entre 18h 00 et 6h 00 T U

"Une ligne d'instabilité centrée à 12h 00 le long"
"du 12ème méridien Ouest semble devoir atteindre Dakar"
"vers 21h. Déplacement à une vitesse de 20 à 25 noeuds"
" en cours de nuit."

Dakar, le 19 juillet 1963 à 15h 05.

L'orage était prévu vers 21h. Or ses premières manifestations ont été enregistrées à 20h 25 ; c'est à dire que vers 21h Dakar était en plein orage conformément à la prévision (message technique) rédigée à 15h 05.

Il faut profiter de ce cas pour insister sur le degré de validité des prévisions faites à Yoff, notamment en ce qui concerne les lignes de grain prévues par la méthode des cartes synoptiques tracées toutes les 3 heures. Dans le cadre de l'exploitation aéronautique actuelle, vu les moyens techniques que possèdent nos stations et vu l'état des connaissances en matière de météorologie tropicale appliquée, cette méthode est presque entièrement satisfaisante.

V.3. Enregistrement des données

Dans ce qui suit nous passons en revue, comme pour Douala, les différentes variations des paramètres météorologiques à l'arrivée du grain :

V.3. -1 Pression (fig. 48 ~~et tableau 4~~)

Ici encore, par mesure de commodité, nous utilisons le Q.N.H.

On constate, à partir de 20h, une variation très brutale de la pression ; on a enregistré une hausse de 4,40 mb qui met en évidence l'existence d'une masse d'air froid plus dense, se traduisant toujours par un noyau de hausse de pression derrière la ligne de grain.

L'explication de ce noyau de hausse pourrait être la suivante :

Nous avons vu qu'une ligne de grain débute par un orage local formé de cumulonimbus riches en eau qui, lorsqu'ils sont pris dans le courant d'Est, se déplacent d'Est en Ouest et s'épaississent avec les autres nuages qui se trouvent sur leur trajectoire. Finalement, il se forme un "mur" plus ou moins épais de cumulonimbus d'autant plus rapprochés ou "soudés" que le grain est plus violent.

Ces nuages sont alors le siège de précipitations, ce qui se traduit par une forte humidité de l'air relativement frais, plus dense que l'harmattan et d'une façon générale plus dense que la masse d'air située devant lui. Sur les cartes cela correspond à une hausse de pression au moment du passage de la ligne de grain. Cette hausse est d'ailleurs strictement localisée à l'endroit où se

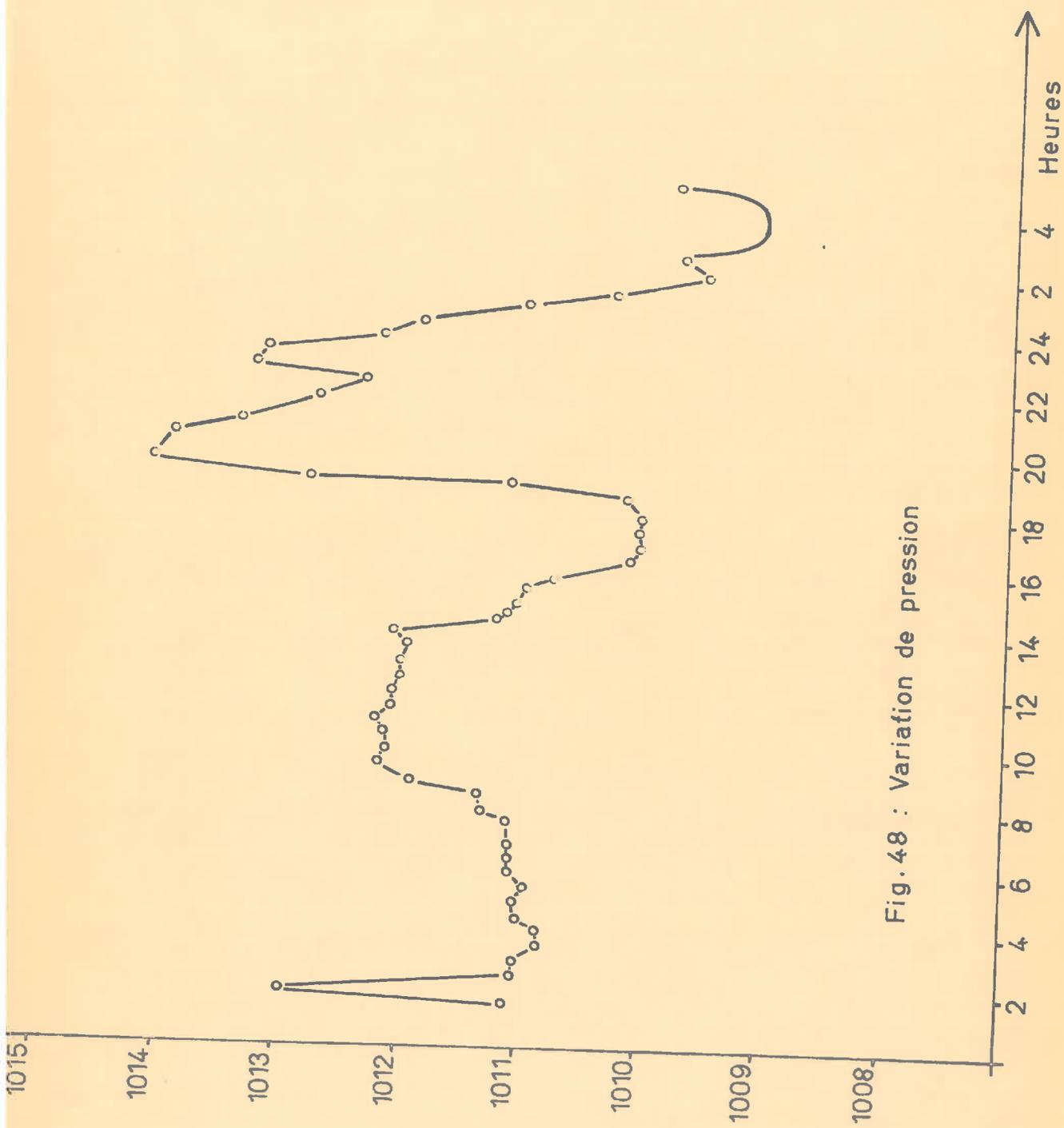


Fig.48 : Variation de pression

produit le grain et prend ainsi l'aspect d'un noyau de hausse de pression -terme utilisé en exploitation- (fig. 47bis).

V.3. -2 Humidité relative (fig. 49 ~~et tableau 5~~)

La ligne d'instabilité constitue une zone de convergence donc de perturbations ; l'air froid postérieur accompagné de précipitations fait passer l'humidité relative de 78 à 99% ; cette variation est brusque et donne bien le moment exact du passage de l'orage, ce qui n'a pas pu être précisé pour l'orage de Douala.

V.3. -3 Température des deux thermomètres
(fig. 50 ~~et tableau 6~~)

L'air humide et frais postérieur au grain provoque une baisse brutale des deux thermomètres sec et mouillé ; pour le thermomètre sec, cette baisse est de l'ordre de 6°C. Par ailleurs, l'écart entre les thermomètres sec et mouillé est nettement réduit au passage de l'orage à cause de l'augmentation de l'humidité relative.

V.3. -4 Visibilité et nébulosité

(fig. 51 ~~et tableau 7~~)

La visibilité tombe brusquement de 15 à 6km, pour remonter ensuite à 15km. Elle a été estimée la nuit et la précision est moins bonne que le jour. Néanmoins on constate que les précipitations ne sont pas très fortes, alors que les manifestations de turbulence sont assez violentes. Quant à la nébulosité, variable avant le

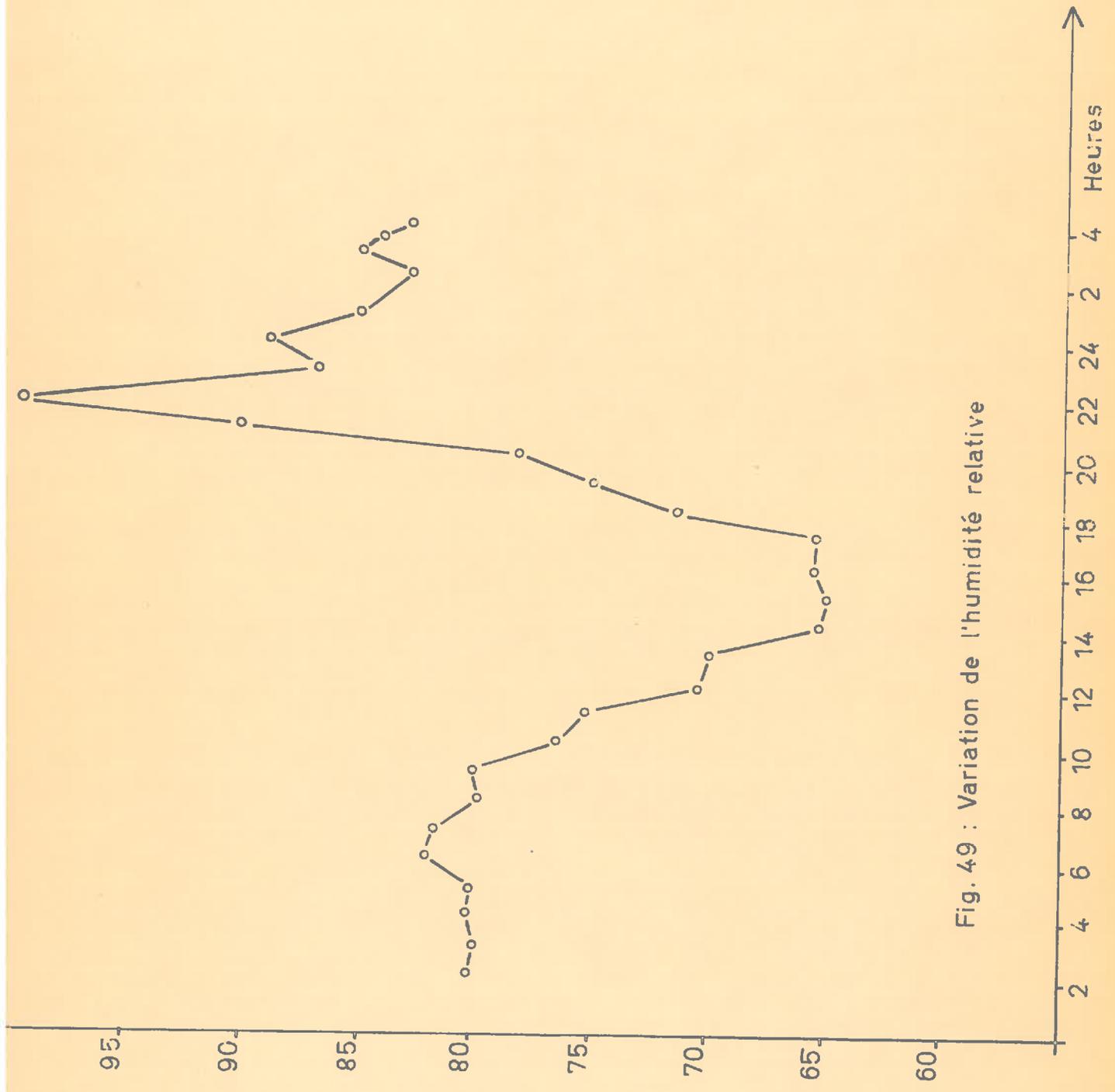


Fig. 49 : Variation de l'humidité relative

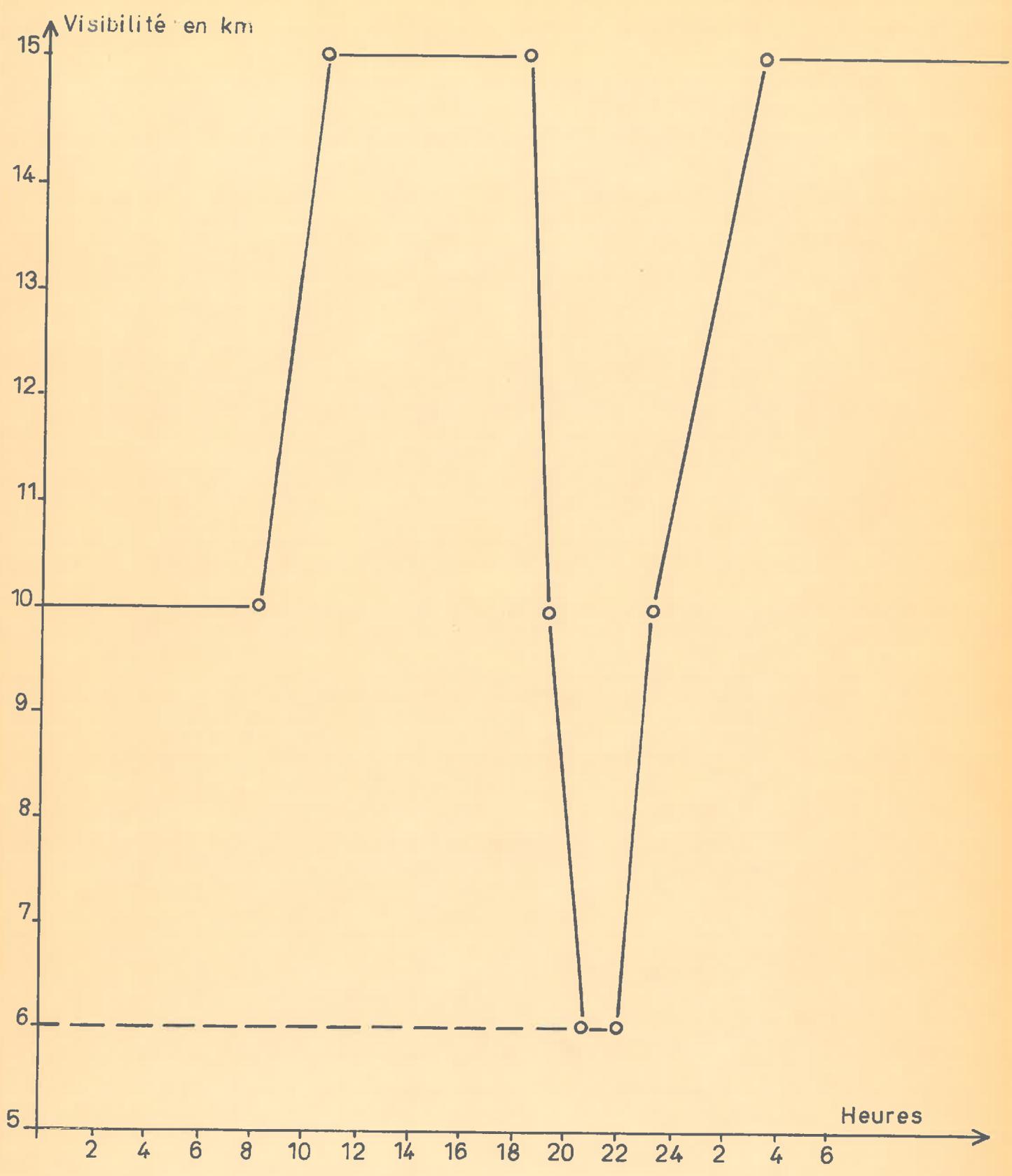


Fig. 51 : Variation de la visibilité

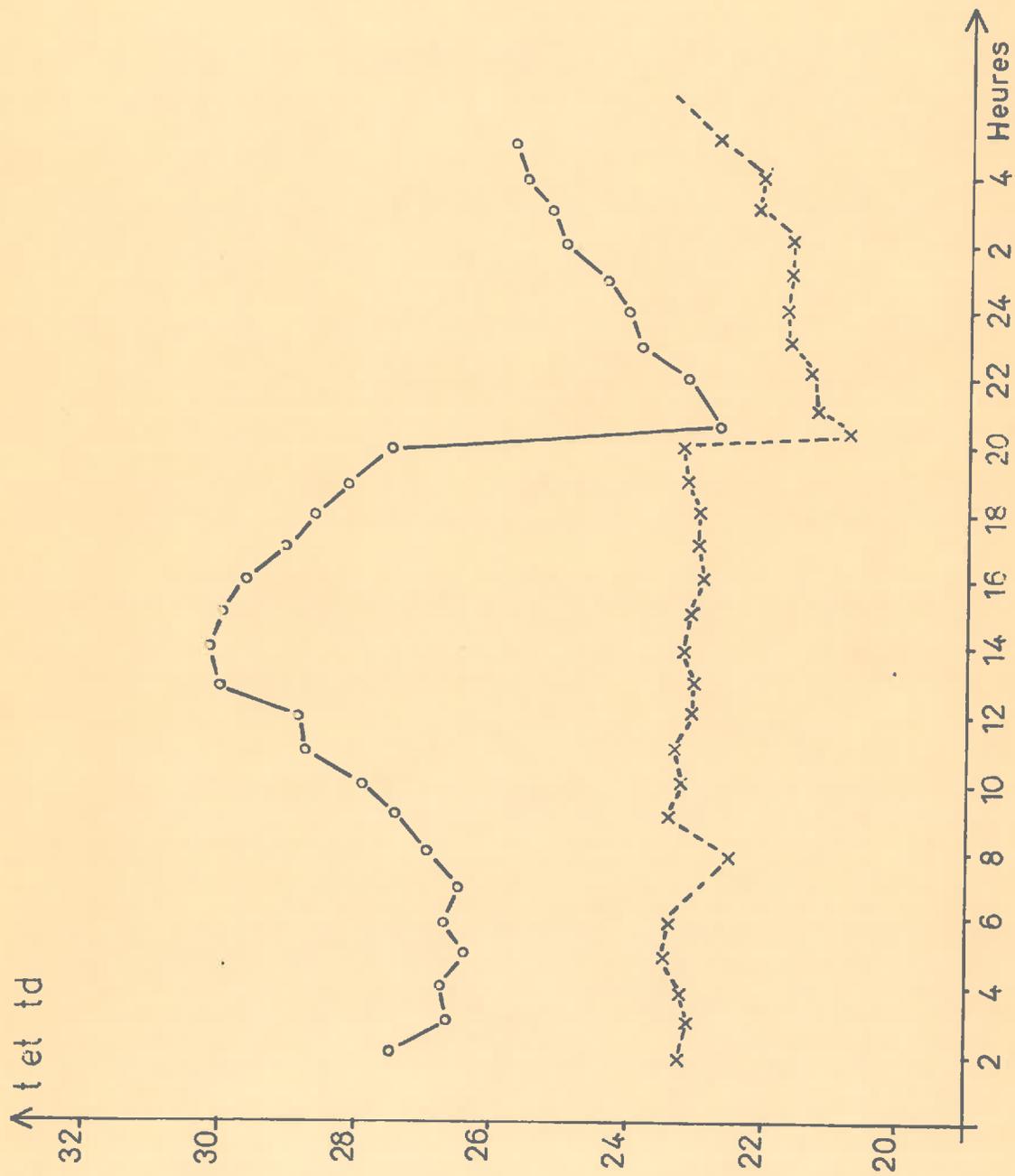


Fig.50 : Variation de température

grain, elle passe naturellement à 8/8, car ce n'est pas un orage local, mais un orage très étendu.

V.3. -5 Vent au sol : (fig. 52)

Dans ce cas précis, il y a un changement très marqué du vent aussi bien en force qu'en direction ; de secteur Nord-Ouest modéré (10 noeuds) il passe sans transition vers 20h à Sud-Est (soit une rotation de 180 degrés environ) avec un renforcement de son intensité allant jusqu'à des rafales de 50 noeuds. On peut dire que ce phénomène est caractéristique du passage d'un grain orageux. Par contre la disparition de l'orage se fait moins brutalement et le vent revient progressivement à son état initial. On voit bien ici la grande différence avec le cas de Douala qui était un orage local très modéré.

V.3. -6 Vents en altitude

Ils sont assez difficiles à connaître au moment du passage du grain sur Dakar, parce qu'on ne fait pas de sondages à cette heure. Nous donnons quand même quelques valeurs déterminées par interpolation à partir des cartes de 12h 00 et 00h 00

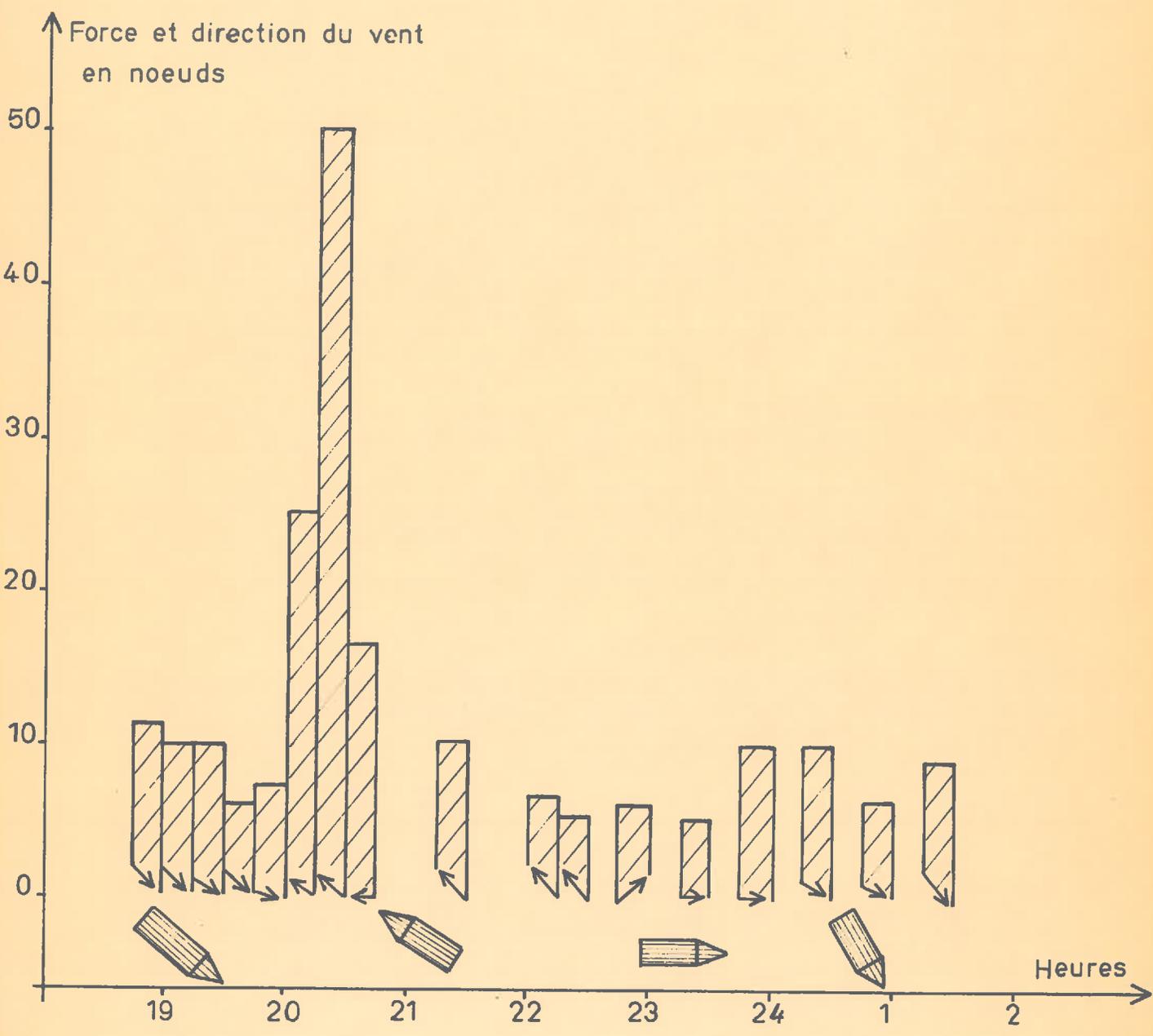


Fig. 52 : Variation du vent

date et heure	700 mb	500 mb	300 mb	200 mb
<u>18-7 -63</u> à 12h 00	0 90/10 à 20kt	040/20kt	060/15	070/20
<u>19-7 -63</u> à 00h 00	0 90/15 à 20	090/15	090/25	030/30
à 12h 00	var /15	080/20	<u>néant</u>	015/15
<u>20-7 -63</u> à 00h 00	var/ 15	090/20	100/10	090/10 à 15

tableau n° 3

En altitude nous avons des vents d'Est. Reste à déterminer maintenant la relation entre la vitesse du vent et celle du grain. Nous reviendrons sur cette question plus loin. On peut cependant dire, dès à présent, que la vitesse du vent est, en général, différente de celle du grain.

V.3. -7 Phénomènes divers :

On observe des nuages précurseurs accompagnant le grain :

-stratocumulus flocus ou castellanus et Ac lenticularis

-cirrus très abondants

A l'arrivée du grain défilent des cumulonimbus,

des cumulus et des cirrus emportés par le vent.

Parmi les autres phénomènes non mesurables on note du tonnerre accompagné de violents éclairs et une grande turbulence.

Enfin, pour se faire une idée de la durée du grain, donnons les heures d'amélioration du temps communiquées par certaines stations :

- Ziguinchor	15h 30
- Linguéré	17h 50
- Thiès	19h 40
- Dakar	22h 45

Si l'on se réfère aux heures de début, on remarque qu'en moyenne le grain orageux a duré 2h. La fin d'orage se caractérise par la disparition des différents phénomènes : hausse d'humidité, baisse de température....

V. 4 Conclusion

Depuis son apparition jusqu'à sa disparition en mer, cet orage a duré 3 heures environ. Malheureusement les observations manquent après pour permettre de continuer à le suivre. Le tracé d'isobrontes, possible grâce aux observations des différentes stations traversées, a permis de prévoir avec une bonne approximation le déplacement du grain orageux. Il arrive même que l'on puisse déterminer l'heure d'arrivée d'un grain à 5mm près, ce qui est excellent pour le moment. Ici la précision de cet exemple est de l'ordre de la demi-heure.

C O N C L U S I O N S G E N E R A L E S

Contrairement aux résultats de Pône et Bergeron, on peut classer les masses d'air dans la région occidentale de l'Afrique, en 4 catégories principales, d'après les vents associés et l'humidité spécifique :

- 1- Les masses d'air tropical convergent ou équatorial
- 2- Les masses d'air tropical maritime neutre
- 3- Les masses d'air tropical maritime subsident
- 4- Les masses d'air tropical continental

En ce qui concerne la formation des orages, on ne peut aborder cette question que très prudemment, car jusqu'à présent, on n'est pas du tout fixé sur les considérations thermodynamiques à faire à ce sujet.

L'auteur a fait des recherches sur la genèse des orages par la méthode des indices (notamment celui de Telfer) pendant plus de deux ans, sans aboutir à aucune conclusion valable.

En matière de prévisions, deux points de vue doivent être considérés :

1° Point de vue scientifique :

Pour faire progresser nos connaissances sur les orages

il faut considérer des cas particuliers comme nous l'avons fait avec la ligne de grains de Dakar, et tenir compte des données relatives aux conditions en altitude. D'où des systèmes de prévisions numériques par exemple.

2° Point de vue pratique :

Pour prévoir les orages à des fins agricoles, il est utile d'inventer des indices analogues à ceux de Telfer, Galway, etc...

Par exemple, au Centre de prévision des orages de Bordeaux, on détermine la probabilité d'orages suivant la forme des isobares à des points donnés (point K par exemple).

En fin de chapitre nous donnerons une méthode assez élémentaire qui permet, dans la région du Cap Vert (au Sénégal), de prévoir une possibilité de formation orageuse.

Toutefois on peut d'ores et déjà préciser à partir d'études statistiques les caractéristiques des lignes de grain orageuses.

Dans la région occidentale de l'Afrique les lignes de grain orageuses se propagent généralement d'Est en Ouest, sauf au voisinage du Front Intertropical, où elles peuvent subir des fluctuations Nord-Sud. On n'a jamais constaté, à notre connaissance, de grain de sens Ouest-Est. Ceci confirme la théorie des vents d'Est et leur influence sur l'évolution et la direction des lignes de

grain dans nos régions. Donc, contrairement à ce que l'on pense en général, l'orientation n'est pas Nord-Sud. On note une composante légèrement Nord-Ouest/Sud-Est, se traduisant par une légère avance de l'extrémité Nord sur l'extrémité Sud. L'explication de cette inclinaison pourrait faire l'objet de recherches. S'il y a un gradient de vent fort vers le Nord, et si le grain a son extrémité Nord qui se déplace plus vite que son extrémité Sud, c'est peut être qu'il existe un anticyclone en altitude (fig. 15-2)

La vitesse moyenne des lignes de grain est de 30 noeuds, c'est à dire 55 à 60 km/h environ. Ici aussi, il faudrait faire des recherches complémentaires pour essayer de préciser le rapport entre la vitesse du vent en altitude et celle des grains. Ceci permettrait de compléter la théorie des déplacements nuageux sur laquelle sera basée l'exploitation des futurs satellites "fixes". En tout cas, il semble que les deux phénomènes n'ont pas la même vitesse.

Les perturbations peuvent se déplacer sur plus de 3000 km en 2 à 3 jours, suivant les conditions atmosphériques. Leur longueur est d'environ 800 à 1200 km en moyenne et leur largeur 50 à 200 km. Mais la partie réellement active dépasse rarement 150 à 2000 km de long et 100 km de large.

Si ces perturbations sont accompagnées de précipi-

tations, elles constituent un véritable grain, au sens commun du terme.

Cependant il peut arriver qu'elles ne donnent pas de précipitations. On dit alors qu'on a affaire à un "grain blanc". Dans les deux cas, on a toujours un système orageux, au sens strict du mot.

Il faut d'ailleurs insister sur les difficultés de comparer les deux phénomènes. En effet une précipitation est enregistrée à la station même grâce à un pluviomètre qui indique la quantité d'eau tombée à cet endroit. Par contre un orage est signalé en un lieu donné, dès que l'on aperçoit un éclair, que l'on entend du tonnerre, ou même que l'on voit un cumulonimbus. Ces phénomènes n'ont pas nécessairement lieu à la station, donc on peut commettre une erreur dans leur estimation, erreur d'autant plus grande que les orages sont plus isolés.

Certaines de nos conclusions concordent avec celles de H. Hubert (1921) ce qui est très encourageant.

Pour terminer, rappelons que cette étude permet de diviser la région occidentale de l'Afrique en 3 zones principales. Cette division climatique correspond à l'instabilité thermique, qui est liée aussi bien à l'épaisseur de la couche de mousson, qu'à la nature même du sol et au flux de vents. On distingue :

- 1- La région à 2 saisons pluvio-orageuses qui est sensiblement celle que l'on appelle région équatoriale.
- 2- La région à une saison de pluies et 2 saisons d'orages ou région tropico-équatoriale, zone de transition entre les tropiques et l'équateur.
- 3- La région à une seule saison de pluies et d'orages ou région typiquement tropicale.

On remarque que cette division correspond presque à une ancienne division géographique basée sur la végétation (forêt équatoriale, savane et désert).

Voyons enfin comment, par des observations directes du ciel et en utilisant des instruments à la station; on peut, à l'échelle locale, prévoir un orage dans la région de Dakar :

Tentatives d'une prévision d'orage local dans le Cap Vert

(Orage d'évolution diurne)

D'une façon générale, l'expérience montre que les conditions les plus favorables à la formation d'orages sur le Cap Vert sont les suivantes :

- 1) Un ciel clair le matin, qui absorbe peu le rayonnement solaire et permet donc le réchauffement de l'atmosphère par convection.

2) Un vent de secteur SE à SW entre le sol et 1500 à 2000 m, apportant une humidité relative voisine de 75 à 80% (mousson)

3) Une température sous-abri au moins égale à 30°C vers 12h, à condition que l'on ne décèle pas au sondage de 12h, une couche stable importante.

Si ces conditions sont réalisées, il se forme souvent en début d'après-midi des cumulus évoluant en cumulonimbus orageux. Cette situation est encore plus confirmée à l'approche d'une onde d'Est.

Remarque

Il serait très intéressant d'avoir plus de précisions sur la structure des vents et les variations de la température suivant un méridien traversant le F.I.T. Il suffirait pour cela de voler à différents niveaux entre 500 et 1200 m, du Nord au Sud, en effectuant des mesures régulières de vent et de température. Les résultats obtenus contribueraient beaucoup au progrès en matière de Météorologie Tropicale.

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

B I B L I O G R A P H I E

- | | | | |
|---|---|--|----------------------------|
| 1) R. Arlery | Eléments de la Météorologie Agricole | Météo Nale | Paris
1957 |
| 2) R. Arlery)
H. Grisollet)
B. Guilmet) | Climatologie- Méthodes et Pratiques | Gauthier
Villars | Paris
1953 |
| 3) M. Berenger | Extrait de la Météorologie IV n° 58 | Météo Nale | Paris
1960 |
| 4) G. Dady | Cours de Météorologie Générale | Météo Nale | Paris
1950 |
| 5) P. de Félice | Cours D.E.A. | | Paris
1968 |
| 6) J. Detwiller | Advection froide vers les basses latitudes | SMM/ES | Paris
1963 |
| 7) J. Dubief | Le Climat du Sahara Tomes I et II | C N R S | Paris
1951 |
| 8) J. Dubief | Alizés-Harmattan et vents extérieurs
Tome VII | C N R S | Paris
1951 |
| 9) P. Duverger | Quelques méthodes récentes de Prévisions d'orages | Météo Nale | Paris
1958 |
| 10) R.H. Eldridge)
Hamilton et)
Archbold) | Synoptic study of West Africa Disturbance lines | Quart. J. of Londres
Roy. Meteor. Soc | 1958 |
| 11) R. Genève | Météorologie Tropicale | Météo Nale | Paris
1957 |
| 12) R. Genève | Problèmes de Météorologie Tropicale
Note EERM n° 126 | Météo Nale | Paris
1966 |
| 13) R. Genève et
J. Speich | Oscillations biennales de la circulation troposphérique au dessus de l'Amérique | J. Mec. et
Phys. II. 5.
n° 19 | Paris
juil.
Sept. 63 |
| 14) R. Genève et
J. Speich | Contribution à l'oscillation biennale-Notes EERM N°148 | Météo Nale | Paris
1963 |
| 15) D.V. Glenn | The earth's Problem Climates | | 1966 |
| 16) H. Hubert | Les masses d'air en Afrique de l'Ouest | Ann. Phys. du
Globe FOM
5 -n° 25 | Paris
1938 |
| 17) H. Hubert | Extrait des C R A S n° 26 | | Paris
1921 |
| 18) H. Hubert | Quelques particularités de l'Afrique Occidentale | La Météo
Avril 1928
P.190-192 | Paris
1928 |

- 19) D. Mandingue Les perturbations atmosphériques et les précipitations dans la région de Douala Notes de l' EERM n° 209 Météo Nale Paris 1965
- 20) P. Queney et J. Dubief Les grands traits du climat du Sahara algérien La Météo Paris Fev.35n°119 p.80-91 1935
- 21) P. Queney Régime pluviométrique de l'Algérie et son Evolution depuis 1850 La Météo Paris nov-déc37 p.427-440 1937
- 22) P. Queney Classifications Aérologiques des types de temps au Sahara Français Trav. de l'I.R.S. T.III.p3-16 Paris 1946
- 23) P. Queney Cours D E A (Mouvements atmosphériques et leurs échelles) Paris 1968
- 24) H. Voiron Quelques aspects de la Météorologie dynamique en Afrique Occidentale La Météo Paris n° 75 1964

 D I V E R S

- 25) Comité d'Etudes hist. et scien. de l'A. de l'ouest Etudes Météorologiques sur l'A O F Série B n° 3 Larose Paris 1937
- 26) Direction Fédérale du Serv.Météo de l'AOF Relevé mensuel des observations se rapportant aux Etats de l'Afrique de l'Ouest Dakar 1951-55
- 27) F.A.O. Enquête de la F A O sur l'Afrique de l'Ouest: Aspect Physique de l'Afr. Occidentale. F A O Rome 1962
- 28) Larousse en 3 vol. (en couleurs) Larousse Paris 1965
- 29) OMM Vocabulaire Météorologique International lexique n° 182. TP. 91 OMM Genève 1966
- 30) Weather vol. XXII n° 3 Washington 1967

T A B L E A U X

(1) Vents en Afrique de l'Ouest

(2-1) Les masses d'air en Afrique de l'Ouest

(2-2) Echelles des mouvements de l'atmosphère

(3) Vents en altitude sur la trajectoire de la ligne de grain des
18 et 19/7/63

λ (4) Variations de la pression lors du passage de cette ligne de grain

λ (5) " " de l'humidité relative lors du passage de cette ligne
de grain

repris
λ (6) Variations de la température lors du passage de cette ligne de grain

λ (7) Variations de la visibilité " " " " " " " "

F I G U R E S

- (1) Végétation et sol de la région occidentale de l'Afrique
- (2) Relief de la région occidentale de l'Afrique
- (3) Vents en surface dans la région occidentale de l'Afrique
- (4) Jet et descente froide
- (5) Positions du F I T au cours d'un cycle annuel
- (6) Coupe méridienne des vents en altitude
- (7) et (7bis) Oscillations biennale du courant d'ouest
- (8) Direction des vents au voisinage de Dakar pendant l'hivernage
- (9) 1 et 2 Quelques sondages de Dakar et Principes de détermination de θ'_{we} et θ'_{we}
- (10) Zones origines des masses d'air
- (11) 1 Centres de pression en hiver
2 en été
- (12) Principe du diagramme de Telfer
- (13) Orages de soulèvement à la base
- (14) Trajectoires des lignes de grains au-dessus du Fouta Djallon
- (15) Cassure d'un grain sous l'effet du relief
- (16) Glissement vers le Sud d'une ligne de grain sous l'effet du F I T
- (17) Coupes verticales d'une ligne de grain le soir et le matin
- (18) Effet mutuel de 2 lignes de grain
- (19) Précipitations et orages au Sénégal
- (20) Précipitations et orages en Côte d'Ivoire
- (21) Précipitations et orages en Haute Volta et au Dahomey
- (22) Précipitations et orages en Guinée
- (23) Précipitations et orages au Mali
- (24) Précipitations et orages en Mauritanie
- (25) Précipitations et orages au Niger
- (26) Précipitations et orages au Togo
- (27) Précipitations et orages au Ghana
- (28) Précipitations et orages au Nigéria et en Sierra Léone
- (29) Coupe méridienne du F I T selon D V Glenn
- (30) Positions des zones du F I T
- (31) Températures moyennes mensuelles à Accra
- (32) Orages précoces et tardifs
- (33) Isoplètes $R = \frac{\text{Précipitations en mm}}{\text{nbre de jours d'orage}}$

- (34) Isohyètes annuelles
- (35) Isoplètes d'orages
- (36) Distribution géographique des stations
- (37) Vents au sol lors d'un orage local à Douala
- (38) Variations de la pression lors d'un orage local à Douala
- (39) Variations de l'humidité relative lors d'un orage local à Douala
- (40) Variations de la température " " " " "
- (41) Variations de la visibilité et de la nébulosité lors d'un orage local à Douala
- (42) Flux à 900/1000 m
- (43) Flux à 1500 m
- (44) Flux à 2000 m
- (45) Flux à 3000 m
- (46) Sondage à 6h 00 T U
- (47) Tracé d'isobrontes et déplacement de la ligne de grain du 18 au 19.7.63
- (48) Variations de la pression lors du passage d'un grain à Dakar
- (49) " de l'humidité relative lors du passage d'un grain à Dakar
- (50) Variations de la température lors du passage d'un grain à Dakar
- (51) Variations de la visibilité " " " " " "
- (52) Variations du vent " " " " " "