

## ANALYSE AGROCLIMATIQUE EN RÉGIONS TROPICALES SAISON PLUVIEUSE ET SAISON HUMIDE APPLICATIONS

PAR

P. FRANQUIN\*

### RÉSUMÉ

*La caractérisation des conditions hydriques, dans les régions tropicales, peut être formulée, selon l'échelle où se situent les besoins (planification, recherche, pratique agricole), en termes de saison « pluvieuse » ou de saison « humide », celle-ci distincte de celle-là, qui ne rend compte que des apports, parce que fondée sur le bilan hydrique.*

*Dans les deux cas, cette formulation, nécessairement établie de manière fréquentielle, sera plus ou moins fine selon l'objectif.*

*La saison humide, en particulier, pourra être caractérisée aussi exactement qu'il est possible dans l'état des connaissances par l'évolution du déficit réel du sol ou, à l'opposé, par la seule détermination de quelques événements climatiques remarquables ( $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_2$ ), diverses situations intermédiaires pouvant être imaginées.*

*Des exemples d'application à l'analyse de la productivité et du rendement des cultures démontrent l'intérêt de cette dernière conception.*

### SUMMARY

*Definition of the hydric conditions that prevail in tropical regions may be formulated, according to the sort of the needs (planning, research, agricultural extension) in terms of « rainy » or « wet » season, the latter being different from the former, that takes in account only the rainfall, because it is based upon the water balance.*

*In both cases, the definition, which is necessarily established on a frequency basis, will be more or less accurate according to the object in view.*

*The wet season, in particular, may be described, with all the exactitude possible in the present state of our knowledge, by means of the changes in the real water deficit of the soil, or, on the other hand, by a few important climatic events ( $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_2$ ), the various intermediate stages being imagined.*

*Examples of its application to the analysis of the productivity and yields of crops will demonstrate the interest this latter idea may provide.*

---

\* Maître de recherche. — S.S.C. de l'O.R.S.T.O.M., 70-74, route d'Aulnay, 93-Bondy (France).

On a proposé récemment (FRANQUIN, 1967a) de différencier saison « pluvieuse » et saison « humide », en grande partie confondues sans doute dans le temps, mais dont les phases de départ et d'arrêt, de même que la formulation, bien distinctes, ont des significations agronomiques considérables.

La saison *pluvieuse* ne rend compte que des apports, c'est-à-dire des précipitations, de la première pluie à la dernière.

La saison *humide* rend compte du bilan des apports et des pertes. Elle va, par définition, de l'instant où le déficit maximal du sol, au point de flétrissement en principe, commence à décroître sous l'effet des premières pluies, jusqu'au moment où, ce déficit étant de nouveau atteint dans la tranche d'exploitation racinaire, l'évapotranspiration réelle ETR de la culture s'annule.

Cette distinction répond à des besoins de l'agriculture qui se situent à des niveaux différents, la notion de saison pluvieuse pouvant suffire dans la pratique agricole et la planification régionale en culture strictement pluviale, alors que la notion de bilan s'impose évidemment dans la pratique et la planification de l'irrigation, mais aussi dans la plupart des branches de la recherche et de l'expérimentation agronomiques en culture sèche.

## SAISON PLUVIEUSE

On passera rapidement sur cette question qui ressortit d'ailleurs plus à l'agro-météorologie qu'à l'agroclimatologie.

Les limitations d'application en agriculture du concept de saison pluvieuse *moyenne*, couvrant le champ de la première à la dernière pluies moyennes, ont conduit à celui de saison pluvieuse « utile », limitée par les première et dernière pluies « efficaces » et dont les termes sont analysés *fréquemment*.

### Efficacité.

La définition du début et de la fin — et donc de la durée et de la position — de la saison pluvieuse *utile* est ainsi assujettie à la notion d'efficacité.

Cette efficacité peut être caractérisée en fonction soit de conditions *moyennes* ou *générales* soit, au contraire, de conditions *particulières*, telles que les exigences d'une espèce définie cultivée sur un type de sol déterminé en vue d'un niveau de rendement espéré, etc...

Par exemple, la station de Bambey, au Sénégal, afin de déterminer la durée de « l'hivernage utile » à Bambey même, tient (Section de Bioclimatologie, rapport 1966) pour « premières pluies utiles celles dont le total est au moins égal à 20 mm et qui permettent des semis corrects », et cela jusqu'au 15 juillet ; après quoi, « les quantités supérieures à 15 mm » ; enfin, à compter du 1<sup>er</sup> août, « les quantités supérieures à 10 mm ». Mais « la première pluie utile n'est retenue que si la période de sécheresse qui suit ne compromet pas la réussite des semis et si la survie des jeunes plantes est assurée pendant n jours, à raison de 2 mm par jour environ de consommation en eau... La deuxième pluie utile doit permettre aux plantes de reprendre activement... La dernière pluie utile, dans notre région, doit surtout permettre l'arrachage de l'arachide dans de bonnes conditions et, éventuellement, les labours de fin de cycle »

Autre exemple, DUBREUIL (1965), « participant, en qualité d'expert consultant, aux études générales qui doivent aboutir à l'élaboration d'un plan de développement

agricole d'un bassin hydrographique d'environ 70 000 km<sup>2</sup>, situé dans le nord-est du Brésil, le bassin du Jaguaribe, ... » propose une définition qui suppose que soit d'abord choisie une date avant laquelle la saison des pluies ne peut commencer (le 1<sup>er</sup> octobre dans la région considérée). Alors, « le changement de rythme d'occurrence des pluies peut se préciser en choisissant comme seuil une certaine quantité d'eau représentant le total cumulé des pluies depuis le 1<sup>er</sup> octobre. Ce seuil ne doit être choisi ni trop élevé, car on risque de ne l'atteindre qu'au cœur même de la saison des pluies, ni trop bas, car il risque alors d'être franchi à l'occasion d'un orage précoce auquel succédera une longue période sèche... Il nous semble raisonnable de situer ce seuil entre 5 et 15% de la hauteur moyenne des pluies au lieu considéré ». Ainsi, « le principe d'un seuil quantitatif cumulé de hauteur d'eau est recommandable pour définir la date de début de la saison des pluies ». Mais « dans l'optique agronomique..., ce critère nous a paru améliorable... Nous avons adopté un nouveau critère, à savoir le jour où sont tombés, à partir du 1<sup>er</sup> octobre les n premiers millimètres de pluie non isolés du reste de la saison pluvieuse par une sécheresse supérieure à 20 jours... La définition de la fin des pluies pose des problèmes comparables... »

Comme l'indique d'ailleurs DUBREUIL (1965) dans son cas, une définition aussi large est valable au niveau de la planification régionale. Elle l'est aussi pour comparer des régions. Mais de telles définitions générales fondées sur des caractéristiques moyennes ne peuvent prétendre rendre tous les services qu'on en attend parfois dans la pratique agricole, l'efficacité d'une lame de pluie étant contingente non seulement aux conditions climatiques régionales mais tout autant aux exigences propres de l'espèce cultivée (et même de la variété, selon la durée du cycle de végétation), aux caractéristiques hydriques des sols, aux impératifs socio-économiques...

Un pénicillaire, par exemple, et un cotonnier à la rigueur peuvent être semés « en sec », ce qui paraît exclu pour une arachide. Par ailleurs, le départ de la végétation est possible sur sols légers avec des lames d'eau très notablement insuffisantes en sols lourds. Sur ces derniers, au contraire, l'état de végétation pourra se prolonger bien plus longtemps que sur les premiers. On ne saurait, enfin, tolérer d'une culture de subsistance qu'elle supporte le même risque ou fréquence d'échec qu'une culture de rapport.

En conséquence, au plan de la pratique agricole, la définition d'efficacité des pluies devrait être ajustée aussi étroitement que possible à des objectifs limités bien déterminés.

Ainsi, dans une « Étude pluviométrique pour la Culture du Riz dans le delta du Sénégal » (Ministère de la Coopération et O.R.S.T.O.M., 1965), la caractérisation des pluies efficaces a été énoncée comme suit. « La première pluie utile est la quantité de pluie nécessaire pour assurer la levée du riz. Elle correspond à une hauteur de 40 mm en 10 jours. Elle doit survenir après une pluie de 15 mm en 24 heures ou de 20 mm en 48 heures et n'être pas suivie de décade ayant reçu moins de 15 mm... La dernière pluie utile... » En fait, pour la culture du riz dans le delta du Sénégal, la notion de dernière pluie utile s'est révélée sans intérêt.

Il en va de même concernant, non plus la détermination du début et de la fin de la saison pluvieuse mais la localisation, au cours de cette saison, des périodes trop sèches ou trop humides. Selon la culture, le sol, le rendement attendu (l'intensivité du système cultural), intensité et durée tolérables de ces périodes, comme leur fréquence, pourront varier grandement, pour un maïs, par exemple, relativement à un sorgho.

Les moyens de traitement de l'information sont devenus assez puissants et rapides (sinon peu onéreux) pour qu'il soit permis aujourd'hui d'envisager la programmation

d'autant d'analyses à objectif limité bien défini que nécessaire. *La difficulté majeure réside dans le choix des critères.*

Il y a pourtant un modèle de traitement complexe qui permettrait de répondre de façon suffisamment précise, dans un premier temps tout au moins, à nombre de problèmes relatifs à la distribution temporelle de la pluviosité ponctuelle, qui se posent au niveau de la pratique agricole et à celui de la planification régionale comme à ceux de la recherche et de l'expérimentation agronomiques, et même à certains besoins du génie civil.

L'analyse en question aurait aussi cet *avantage de ne pas imposer la connaissance préalable des exigences écologiques des cultures.*

Elle consisterait à rechercher, non pas les fréquences de réalisation de hauteurs d'eau fixées arbitrairement ou considérées comme représentant les exigences supposées des espèces aux stades successifs de leur développement et pour des conditions de climat, de sol et d'économie déterminées — donc en très grand nombre, pratiquement illimité — mais au contraire, en retournant la question, les hauteurs d'eau à attendre, pour un certain nombre de niveaux de probabilités entre 0,01 et 0,99, dans des périodes glissantes, de  $n$  pentades par exemple.

Parmi ces hauteurs relatives à des fréquences suffisamment nombreuses, dans des périodes glissantes plus ou moins longues et pluvieuses couvrant tout le champ de l'année, chaque intéressé pourra trouver, concernant une station pluviométrique donnée, des valeurs voisines de celles considérées par lui comme nécessaires à une culture particulière durant une phase précise de son développement, et notamment comme représentant pour cette culture : le début ou la fin de la saison pluvieuse, une période trop sèche ou trop humide \*...

#### **Analyse fréquentielle.**

Sous climats humides, pluviosité annuelle et pluviosités mensuelles des mois bien arrosés sont distribuées en loi normale.

Mais sous climats secs, pluviosités annuelle et mensuelles, de même que, sous climats humides, les pluviosités des mois peu pluvieux, sont distribuées de façon dissymétrique.

Sous tous climats, enfin, les pluviosités des périodes courtes comme la décade, la semaine et la pentade, sont généralement réparties dissymétriquement, limitées que sont leurs distributions par le zéro d'un côté, alors que de l'autre s'inscrivent les précipitations élevées de fréquence rare. Moyenne, médiane et mode ne coïncident plus, variance et moyenne ne sont plus indépendantes, et cette dernière, comme toutes les valeurs correspondant à d'autres probabilités, est faussée.

Il y a deux types de solutions possibles à cette difficulté, selon que l'on opère avec des moyens de calcul statistique à faibles (électromécaniques) ou à hautes (électroniques) performances, c'est-à-dire selon que la tâche est limitée ou considérable.

---

\* Ce modèle d'analyse, dont l'étude méthodologique et la programmation, inscrites au programme de financement du Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H.) pour 1968, sont en cours de réalisation à la Section d'Hydrologie de l'O.R.S.T.O.M., a été conçu dans le cadre de la mission C.I.E.H. de normalisation de la climatologie en Afrique (FRANQUIN, 1967 b). Le programme en sera mis à la disposition des organismes intéressés qui l'utiliseront selon leurs besoins et sur leur budget.

Antérieurement, le National Weather Records Center (Ashville, N.C.) de l'U.S. Weather Bureau avait bien voulu programmer, à la demande de COCHEME et FRANQUIN (1967), une analyse fréquentielle dont la variable indépendante était, non pas la fréquence, mais la hauteur de pluie, et donc de portée bien plus limitée.

Dans la première éventualité, on fait, selon une expression comme :  $\log x$  ou  $\log(x + a)$ ,  $\sqrt{x}$  ou  $\sqrt{x + a}$ , une transformation de la variable indépendante qui permettra de retrouver une distribution normale (MANNING, 1951 et 1956 ; BRUNET-MORET, 1966 ; ROCHE, 1963).

Dans la deuxième, on peut avoir recours à une loi de distribution mieux adaptée que la loi normale, mais nécessitant généralement des calculs laborieux. Plusieurs ont été proposées (HUFF et NEIL, 1959 ; ROCHE, 1963, notamment), mais aujourd'hui, à la suite des études (THOM, 1958 ; BRUNET-MORET, 1966) qui ont permis d'explicitier la fonction gamma (ou de Pearson III), celle-ci donne toute satisfaction du fait de sa flexibilité qui lui permet de s'ajuster à des formes de distribution allant de la forme en J, où le maximum est au zéro, jusqu'à celle d'une loi normale (fig. 1, reprise de BARGER et THOM, 1949) \*.

Une importante littérature a été publiée sur ces questions. Il faut citer encore au moins l'application de la distribution de POLYA (*Climatologie*, de GRISOLLET, GUILMET, ARLERY, GAUTHIERS-VILLARS, 1962), avec ses trois caractéristiques : moyenne, dispersion et persistance, utilisée notamment par DUBREUIL (1965), pour l'étude de la persistance des jours secs et pluvieux.

Ainsi, dans l'hypothèse où la recherche agronomique appliquée met au service de la pratique agricole un matériel végétal et des techniques adaptés aux conditions de climat et de sol (donc de bilan hydrique *réel*), le praticien pourra, en culture strictement pluviale (non irriguée, fût-ce en complément), se satisfaire d'une analyse fréquentielle des précipitations telle qu'envisagée ci-dessus.

La connaissance des aléas de pluviosité lui permettra notamment d'user au mieux de ces variétés et de ces techniques, selon un calendrier cultural où les opérations qui vont de la préparation du sol à la récolte seront ajustées aux conditions statistiquement prévisibles et aux conditions réelles. Par exemple, une variété de céréale adaptée aura, en culture principale (non dérobée), un cycle de développement aussi long que possible localement, parce que plus productif. La prévision statistique fondée sur l'analyse fréquentielle des pluies permettra de fixer, à la fréquence désirable, la date optimale du semis et, en conséquence, l'époque de préparation du sol. Le sol étant supposé prêt, le semis interviendra dès que seront réalisées les conditions d'humidité indispensables, dût-il être recommencé si la probabilité calculée d'obtenir un rendement meilleur a pu être considérée comme justifiant le risque, lui aussi calculé, d'une dépense supplémentaire, etc.

## SAISON HUMIDE

Pour la pratique de l'irrigation, par contre, la connaissance du déficit hydrique s'impose évidemment, comme aussi dans la plupart des branches de la recherche agronomique appliquée. Les applications de la notion de bilan sont en effet multiples : estimation des besoins en eau, délimitation de la période de végétation, estimation du ruissellement, du drainage, du lessivage des sols, du niveau de la nappe, évaluation des possibilités de sécheresse ou d'humidité excessive, etc.

---

\* Le problème de l'inversion de cette fonction, quand la variable indépendante est la probabilité, est à l'étude à la Section d'Hydrologie de l'O.R.S.T.O.M., en vue de la programmation de l'analyse fréquentielle de pluviosité projetée ci-avant.

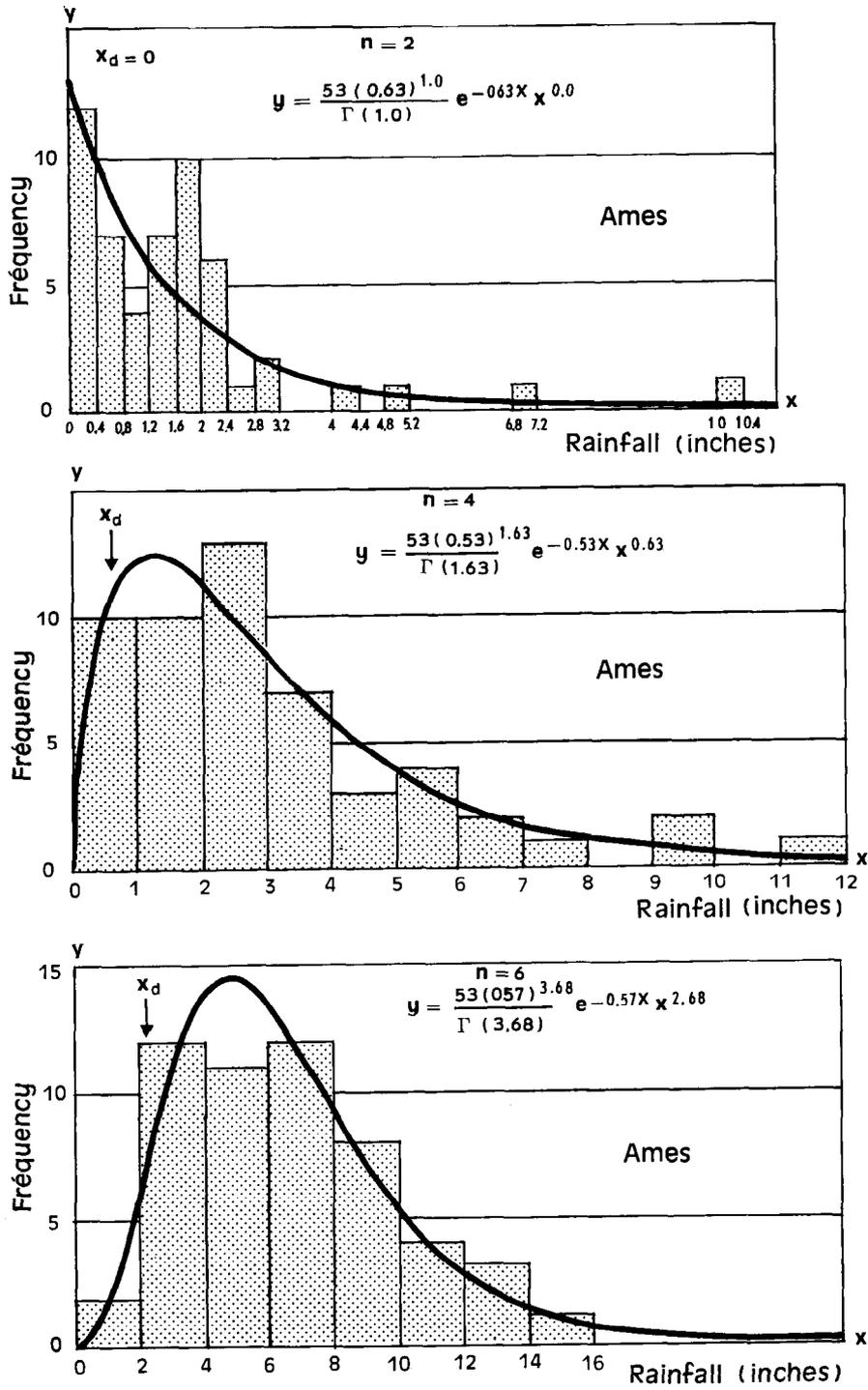


Fig. 1. — Distribution of n-week rainfall totals beginning with week 18 (June 28 through July 4).  
 D'après BARGER et THOM, 1949.

Il y a cependant lieu, ici encore, de considérer des degrés dans les besoins et notamment de distinguer, parmi les applications, celles qui se rapportent respectivement aux notions de déficit *réel* et de déficit *théorique*.

### Déficit réel.

En culture irriguée, comme au terme de la recherche en matière de variétés et de techniques, c'est-à-dire dans la phase d'expérimentation en conditions de sol variées (dans le cadre de la région agroclimatique définie comme une unité de climat recouvrant une possible diversité de sols, FRANQUIN, 1967a), on doit, évidemment, se référer au bilan hydrique *réel* (établi pour des périodes successives de l'ordre de la décade), car le sol et la végétation jouent des rôles spécifiques dans la détermination des quantités d'eau ruisselée, drainée et, finalement, évapotranspirée suivant l'équation :

$$P \mp R - D \mp \Delta W - ETR = 0$$

Hormis cependant pour les précipitations P et, à un moindre degré, pour les variations  $\Delta W$  de l'humidité du sol déterminées par dosage sur prélèvements ou par la sonde à neutrons, les termes de cette équation sont de mesure difficile. L'agroclimatologie reste toujours confrontée à la difficulté d'estimer ETR.

Mais compte tenu d'hypothèses simplificatrices plus ou moins nombreuses selon le type de climat, les caractéristiques du sol, la nature et l'état de la culture ou de la végétation naturelle, l'importance de l'information disponible, etc., des bilans hydriques réels suivant l'équation ci-dessus peuvent aujourd'hui être calculés avec une bonne approximation d'intérêt pratique véritable.

SLATYER (1966), FITZPATRICK, SLATYER et KRISHNAN (1967), notamment, proposent des modèles, les plus récents et les plus avancés peut-être, selon lesquels les apports P et/ou I, plus ou moins le ruissellement R, s'ajoutent à la réserve du sol, laquelle est, d'autre part, déprimée par drainage profond D et par évapotranspiration ETR.

Ces modèles, qui peuvent être programmés pour exploitation par calcul électronique, permettent de répondre à nombre de questions de l'agronomie impliquant les caractéristiques physiques du sol.

### Déficit théorique.

Pour la planification régionale encore, en culture irriguée (et a fortiori en culture pluviale), dans le cadre de la région agroclimatique, et à un certain niveau de la recherche, la connaissance du déficit théorique pourra constituer une approximation suffisante, à l'échelle des temps mensuelle par exemple.

C'est à ce niveau que DARVES-BORNOZ, BESANVAL, LECARPENTIER et KHOBZI (1959, 1964a, 1964b, 1967) ont situé leurs travaux d'évaluation des besoins annuels, mensuels et mensuels de pointe en eau d'irrigation à partir de l'analyse fréquentielle des données climatiques, sur la base des évapotranspirations potentielles estimées par la formule de TURC (1961).

En fait, ces dernières études constituent un terme intermédiaire entre celles qui sont fondées sur le déficit réel et celles qui se réfèrent au déficit théorique (purement climatique) puisqu'elles intègrent quatre valeurs de la réserve facilement utilisable (RFU = 50, 100, 150 ou 200 mm) et qu'elles prennent en considération non seulement le cas d'une végétation permanente mais aussi ceux de quatre cycles végétatifs types (de régions tempérées).

A un niveau plus élevé encore de la planification ou de la recherche, il pourra même suffire de ne considérer, dans le déroulement de la saison humide, que *quelques événements climatiques remarquables aussi indépendants que possible des différences de nature du sol et de végétation*, étant bien entendu que lorsque les précipitations sont quantitativement supérieures aux évapotranspirations potentielles et que la végétation est parfaitement couvrante, l'évapotranspiration réelle est supposée égale à l'évapotranspiration potentielle.

### Evénements remarquables.

La construction sur une même figure (fig. 2) des courbes de pluviosité  $P$  et d'évapotranspiration potentielle  $ETP$ , mensuelles ou décadales selon les besoins, détermine la position de deux événements de nature *purement climatique* (dans la mesure du moins où l'évapotranspiration potentielle peut être considérée comme telle) :  $B_1$  et  $B_2$ , projections des points d'intersection, qui découpent la saison *pluvieuse* en trois parties :

- $A_1B_1$ , durant laquelle  $P$  est globalement inférieure à  $ETP$  et donc  $ETR$  inférieure à  $ETP$ .
- $B_1B_2$ , durant laquelle  $P$  est globalement supérieure à  $ETP$  et donc  $ETR$  égale, en principe, à  $ETP$ .
- $B_2C_1$ , durant laquelle  $P$  redevient globalement inférieure à  $ETP$  et donc  $ETR$  inférieure à  $ETP$  en dépit des réserves hydriques du sol constituées durant  $B_1B_2$ .

Mais au début de cet article, on a, par définition, caractérisé la saison *humide* par la permanence d'eau disponible dans le sol (donc en-deçà du point de flétrissement). Cette saison débutera par conséquent au moment, noté  $A_2$ , où le déficit maximal du sol (supposé nu à cette époque dans le cas de cultures annuelles), atteint durant la saison sèche, commence à décroître sous l'effet des premières pluies. Et elle se terminera au moment, noté  $C_2$ , où ce déficit maximal se trouve de nouveau atteint, la culture ayant épuisé les réserves utilisables du sol.

La position de  $C_2$  est ainsi, dans la réalité, contingente non seulement au climat, mais aussi au sol et à la végétation. On pourra évidemment fixer cette position théoriquement en considération du seul climat, c'est-à-dire en fonction de la lame d'eau supposée passée en réserve entre  $B_1$  et  $B_2$ , de la lame de pluie postérieure à  $B_2$  et de  $ETP$ . Mais la position *réelle* de  $C_2$  pourra être très différente de cette position *théorique*, question qui ne se pose pas pour  $B_1$  et  $B_2$  dont le seul climat détermine les positions, si du moins on admet, en première approximation, que  $ETR = ETP$ .

Le cas de  $A_2$  n'est pas aussi net. On pourra, en première approximation encore, le considérer comme indépendant de la nature du sol (supposé nu à cette époque). Sans doute l'évaporation d'un sol nu dépend-elle de son albedo, de sa texture, de ses macro et micro-structures. Mais on peut justifier de situer sa position *au moment où la pluviosité croissante devient égale à la moitié de l'évaporation potentielle* :  $P = 0,5 ETP$ . En effet :

— HUTCHINSON *et al.* (1959), constatent en Ouganda, sur 6 années d'observations, que l'évaporation du sol nu, en début de saison, quand il n'est que sporadiquement arrosé par les pluies, est égale au tiers de l'évaporation potentielle  $E_0$  de PENMAN, valeur voisine de celle, égale à  $0,30 E_0$ , donnée déjà par TRUMBLE (1937), en Australie du Sud.

— SLATYER (1966), par ailleurs, rapporte que, dans la région de Katherine, en Australie, les précipitations consistent, lors de l'établissement des pluies, en averses isolées qui se manifestent à intervalles irréguliers de 5 à 15 jours. Durant 24 heures et plus, la surface du sol reste humide et le sol évapore au niveau potentiel. Mais quand

sa surface est devenue sèche, l'évaporation diminue considérablement. L'auteur estime alors que, dans les pentades mouillées par une averse, l'évaporation du sol nu est égale à  $0,40 E_0$ , tandis que dans les pentades sèches elle est de  $0,20 E_0$ , ce qui ramène encore sensiblement, en moyenne, à  $0,30 E_0$ .

Or  $E_0$  de PENMAN (1948, 1963), est calculé avec un albedo de 0,05. Bien que, dans la formule, seul le terme radiatif soit modifié par la valeur de l'albedo, on peut estimer que  $1/3 E_0$  est voisin de  $1/2 E_T$ ,  $E_T$  étant l'évapotranspiration potentielle selon PENMAN calculée, habituellement, avec un albedo de 0,25. En réalité, on trouve des valeurs qui se situent entre 0,40 et 0,45  $E_T$ .

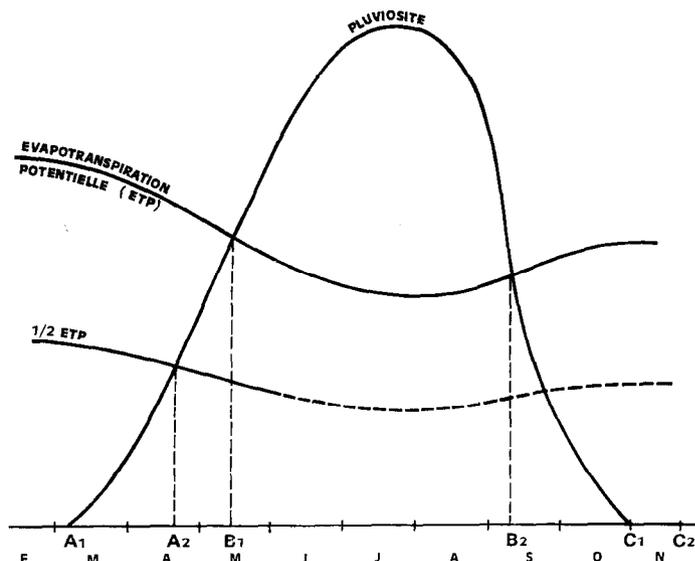


Fig. 2. —  $A_1-C_1$  : saison « pluvieuse ».

$A_2-C_2$  : saison « humide »

}	$A_2B_1$ : période pré-humide
}	$B_1B_2$ : période humide
}	$B_2C_2$ : période post-humide

— On obtient une valeur comparable, mais plutôt légèrement supérieure à  $0,50 E_T$  avec les formules proposées par TURC pour évaluer l'évapotranspiration potentielle (1961), et l'évaporation du sol nu (1953). Les calculs indiquent en effet que, dans les régions considérées, c'est lorsque la précipitation mensuelle dépasse la moitié de l'évapotranspiration potentielle ETP, selon TURC, que le sol nu reconstitue ses réserves.

Compte tenu de ce que l'évaporation d'un sol nu particulier dépend aussi de ses caractéristiques spécifiques, on considérera donc en première analyse que, quelle que soit la formule d'estimation de l'évapotranspiration potentielle, le déficit du sol nu, en général, commence à diminuer, en régions tropicales, quand la pluviosité  $P$  devient égale à  $1/2 ETP$ , les pluies antérieures ayant servi à reconstituer le stock d'eau de la tranche superficielle asséchée au-delà du point de flétrissement ou ayant été évaporées.

Ainsi les événements remarquables  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_2$ , découpent la saison *humide* en trois périodes (fig. 2) :

— La période « pré-humide »  $A_2B_1$ , durant laquelle  $P$  est globalement inférieure à ETP, et donc  $ETR$  à ETP.

— La période « humide »  $B_1B_2$ , durant laquelle P est globalement supérieure à ETP, et donc ETR égale en principe à ETP.

— La période « post-humide »  $B_2C_2$ , durant laquelle P redevient globalement inférieure à ETP, et donc ETR à ETP, en dépit des réserves accumulées dans le sol durant la période « humide ».

On a fait déjà (FRANQUIN, 1967a) l'interprétation agronomique de ce découpage théorique, dont il est possible de tirer un certain nombre de variables déterminantes de la productivité de la plante et du rendement de la culture, comme il sera vu plus loin sur des exemples.

Mais il faut remarquer aussi que cette façon, sans doute la plus simple, de figurer les conditions hydriques et de les évaluer schématiquement, ne s'oppose nullement à leur expression fréquentielle.

Les moments  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  (et  $C_2$ , mais d'un bien moindre intérêt dans le cas de cultures annuelles, FRANQUIN, 1967a) peuvent, en effet, être situés à n'importe quel seuil de probabilité, pourvu que l'effectif de l'échantillon soit suffisant.

L'analyse pourra même être poussée jusqu'à l'estimation des durées probables de périodes commençant avec une probabilité donnée à telle date.

Aussi est-il intéressant d'examiner la variabilité des positions dans le temps de ces événements climatiques remarquables.

#### VARIABILITÉ.

COCHEME et FRANQUIN (1967), ont établi pour Fort-Lamy (Tchad), sur un échantillon de 10 ans, que la variabilité relative et la déviation maximale étaient quatre à cinq fois plus grandes pour la pluviosité que pour l'évapotranspiration potentielle *annuelles*. A Fort-Archambault (Tchad), où la pluviosité P est plus constante, ETP variant de la même façon qu'à Fort-Lamy, variabilité relative et déviation maximale, sont environ deux fois plus importantes pour P que pour ETP.

Mais à Fort-Archambault, ces deux caractéristiques sont, pour le *mois de mai*, par exemple, six à sept fois plus fortes pour P que pour ETP (tableau I).

TABLEAU I  
Variabilités annuelle et mensuelle comparées de P et de ETP à Fort-Lamy et Fort-Archambault (Tchad).

	Fort-Lamy 1953-62		Fort-Archambault 1953-62		Fort-Archambault mai 1953-62	
	P	ETP	P	ETP	P	ETP
Moyenne (mm)	683	1 789	1 071	1 295	100	126
Variabilité relative( %)	18	4	9	4	42	6
Ecart maximal (%)	45	9	18	11	73	14

On pourra donc généralement (sauf étude très fine, en cas d'analyse du rendement, par exemple) se contenter d'établir la variabilité des moments  $A_2$ ,  $B_1$  et  $B_2$  à partir de celle de  $P$ , ETP restant *constant* à sa valeur *normale*.

Par exemple, on a déterminé les positions chaque année variables de ces événements remarquables pour Zinder (Niger), Bambey et Thiès (Sénégal), Fort-Archambault et Moundou (Tchad), à partir des courbes *variables* de  $P$  décadaire ou mensuelle (selon les besoins) et des courbes *normales* d'ETP mensuelle.

#### POSITION DE $A_2$ .

##### Zinder.

En  $P$  *décadaire* variable (30 années) et ETP mensuelle normale, on constate (tableau II) que  $A_2$  varie de la première décade de juin à la troisième décade de juillet, la date *médiane* (qui sera dite « médiane décadaire ») tombant dans la première pentade de juillet, tandis que la position déterminée (fig. 4) par intersection des courbes mensuelles normales de  $P$  et de  $1/2$  ETP (position qui sera dite « normale mensuelle ») se situe le 25 juin environ, soit 5 à 10 jours plus tôt que la médiane décadaire.

Mais pour ce résultat, on a éliminé les *faux-départs* de la période pré-humide. Il y a faux-départ lors d'un retour de  $P$  à une valeur inférieure à  $1/2$  ETP, comme c'est le cas sur la figure 3. Le tableau II indique qu'à Zinder, il y a faux-départ une année sur deux, mais *jamais à partir de la pentade médiane* (1-5/7).

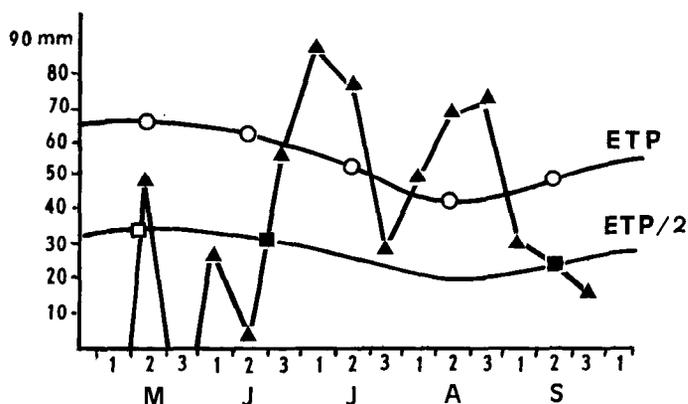


Fig. 3. — Faux départs de la période pré-humide en mai et de la période humide en juin  
D'après COCHEME et FRANQUIN, 1967.

Ces faux-départs semblent d'ailleurs liés, à Zinder, à des pluies très précoces plutôt qu'à une interruption passagère comme il peut s'en produire plus tard, en sorte que, sur les 30 années de 1931 à 1960, on ne courait apparemment aucun risque en semant, à l'occasion d'une pluie convenable, à partir du 1<sup>er</sup> juillet, soit 5 jours après la « normale mensuelle » (fig. 4), étant bien entendu, comme expliqué déjà précédemment (FRANQUIN, 1967a), que le moment  $A_2$ , où le sol nu commence à reconstituer ses réserves, est celui où le semis devient théoriquement possible.

Une autre observation concernant le Niger confirme d'ailleurs l'intérêt du point  $A_2$  comme indicateur théorique du début de la période pré-humide (ou encore de la saison humide telle que définie ici), et donc de la possibilité de semer. TOURANCHEAU (rapports

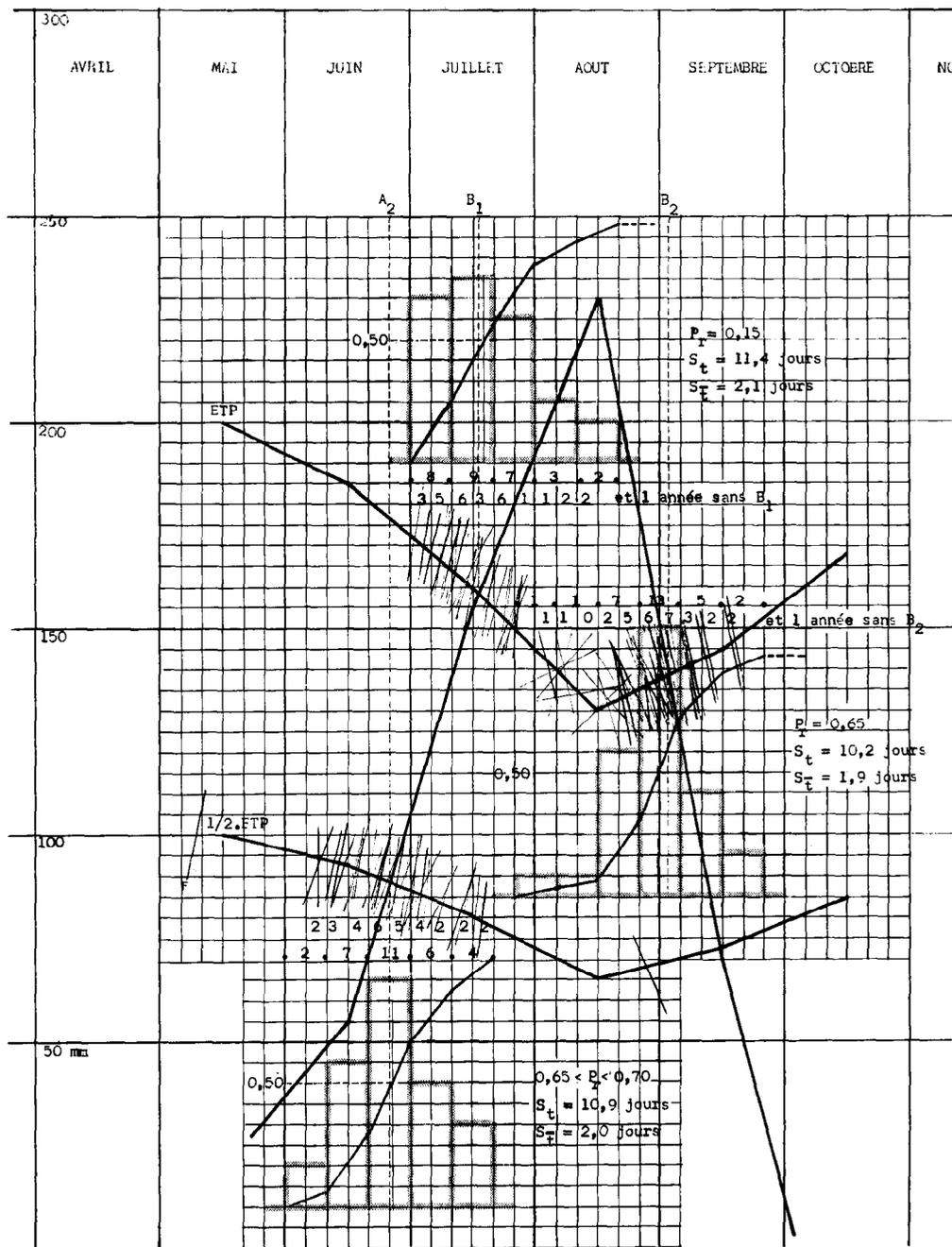


Fig. 4. — Détermination, par intersection des courbes mensuelles variables de  $P$  et des courbes mensuelles normales (donc constantes) de ETP et  $1/2$  ETP, des positions fréquentielles des événements  $A_2$ - $B_1$ - $B_2$ , à ZINDER. Le seuil de probabilité  $P_r$  correspond à la valeur du  $\chi^2$ .  $S_t$  et  $S_{\bar{t}}$  sont les écarts-types de la variable « position de  $A_2$ , ou  $B_1$ , ou  $B_2$  » et de sa moyenne. L'ordonnée 0,50 détermine, par intersection avec la courbe cumulée, la position de la médiane observée. Les lettres F indiquent les faux-départs.

CFDT pour le Niger), étudiant les possibilités d'extension de la culture cotonnière, par l'examen détaillé des pluies décadaires, estime que tous les semis de la première décade de juillet, sur 12 ans, à Maradi, auraient été réussis (sauf, peut-être, une année) et qu'ils l'auraient été sept fois sur douze dans la dernière décade de juin. Il eût donc été pratiquement possible de semer toujours avec succès à partir du 1<sup>er</sup> juillet, à l'occasion d'une pluie favorable. Or, à Maradi comme à Zinder, la position normale mensuelle de  $A_2$  tombe le 25 juin.

En P mensuelle variable (ETP toujours mensuelle et normale), sur 55 ans, la médiane (qui sera dite « médiane mensuelle ») se situe dans la cinquième pentade de juin, en accord avec la normale mensuelle et 10 jours plus tôt que la médiane décadaire.

#### *Bambey et Thiès.*

Après le sud du Niger, qui appartient à une zone dont la pluviosité se montre relativement régulière (C.V. = coefficient de variation de la hauteur annuelle = 20%,

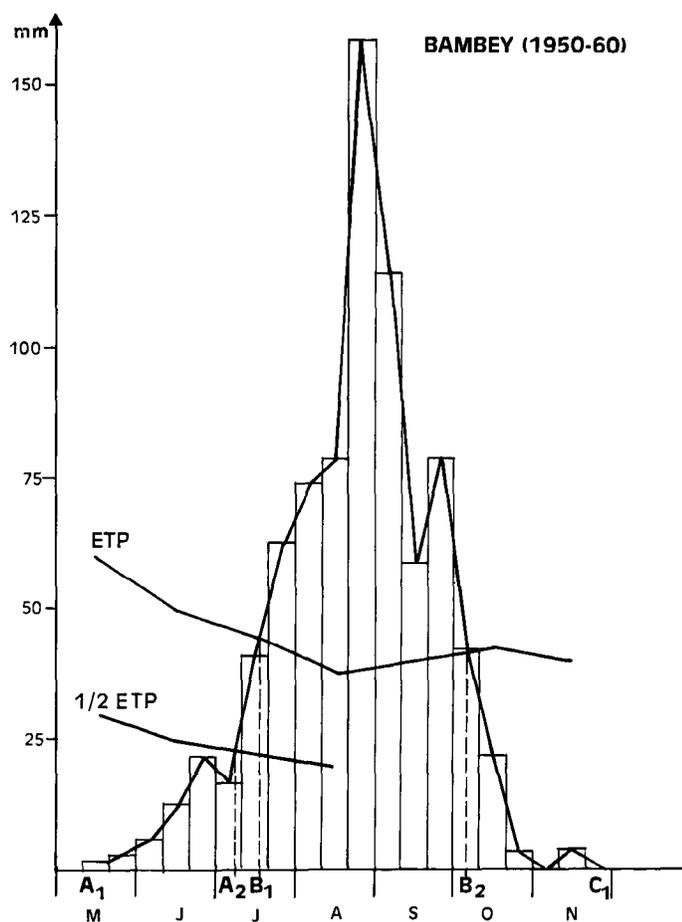


Fig. 5. — Détermination, par intersection des courbes mensuelles ou décadaires normales de P d'une part et des courbes mensuelles normales de ETP et 1/2 ETP d'autre part, de la position des « normales » décadaires de  $A_2$ - $B_1$  et  $B_2$  à Bambeï.

COCHEME et FRANQUIN, 1967), on considère l'ouest du Sénégal, plus irrégulier (C.V. = 30%), dont sont représentatifs Bambey (station IRAT) et Thiès.

A Bambey, en P *décadaire*, on constate (tableau II) que, sur 11 ans,  $A_2$  varie de la troisième décade de juin à la troisième de juillet si on élimine les faux-départs, qui se sont produits sept fois sur onze (mais, comme à Zinder, jamais à partir de la décade médiane). Cette médiane décadaire tombe dans la deuxième décade de juillet (de façon plus précise, dans la troisième pentade), tandis que la position « normale décadaire » se situe dans la deuxième pentade de ce même mois, soit 5 jours plus tôt environ (fig. 5).

En P *mensuelle*, médiane mensuelle (tableau II) et normale mensuelle (fig. 6), pratiquement confondues, se placent une décade plus tôt qu'en P *décadaire*.

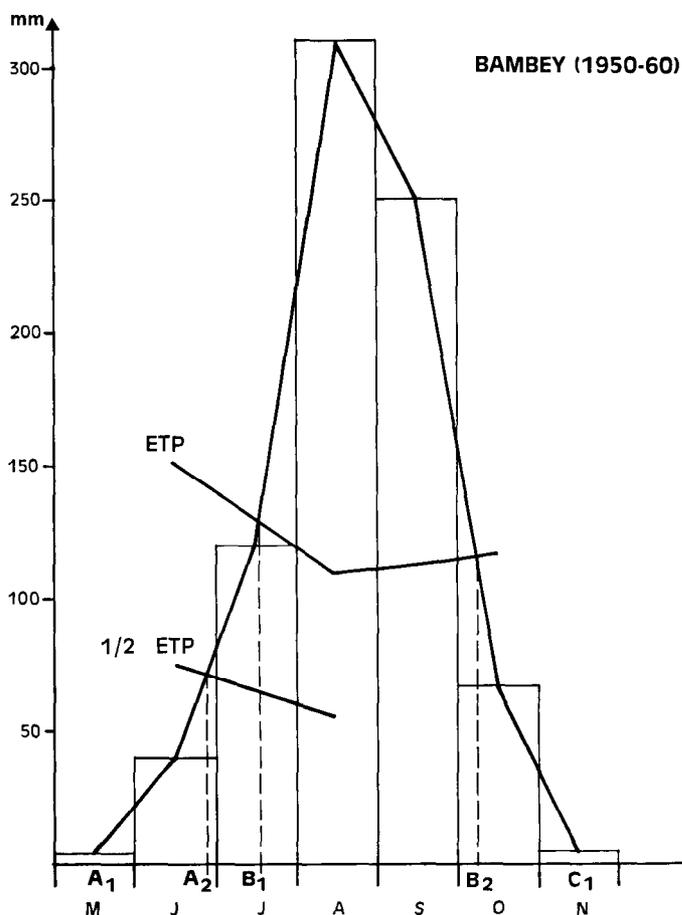


Fig. 6. — Détermination, par intersection des courbes mensuelles ou décadaires normales de P d'une part et des courbes mensuelles normales de ETP et 1/2 ETP d'autre part, de la position des « normales » mensuelles de  $A_2$ - $B_1$  et  $B_2$  à Bambey.

A Thiès, en P mensuelle, sur 50 ans, médiane mensuelle et normale mensuelle (tableau II et fig. 7) se placent 5 à 10 jours plus tard qu'à Bambey (ce qui est normal, Thiès étant plus occidental), mais en restant distinctes de 5 jours.

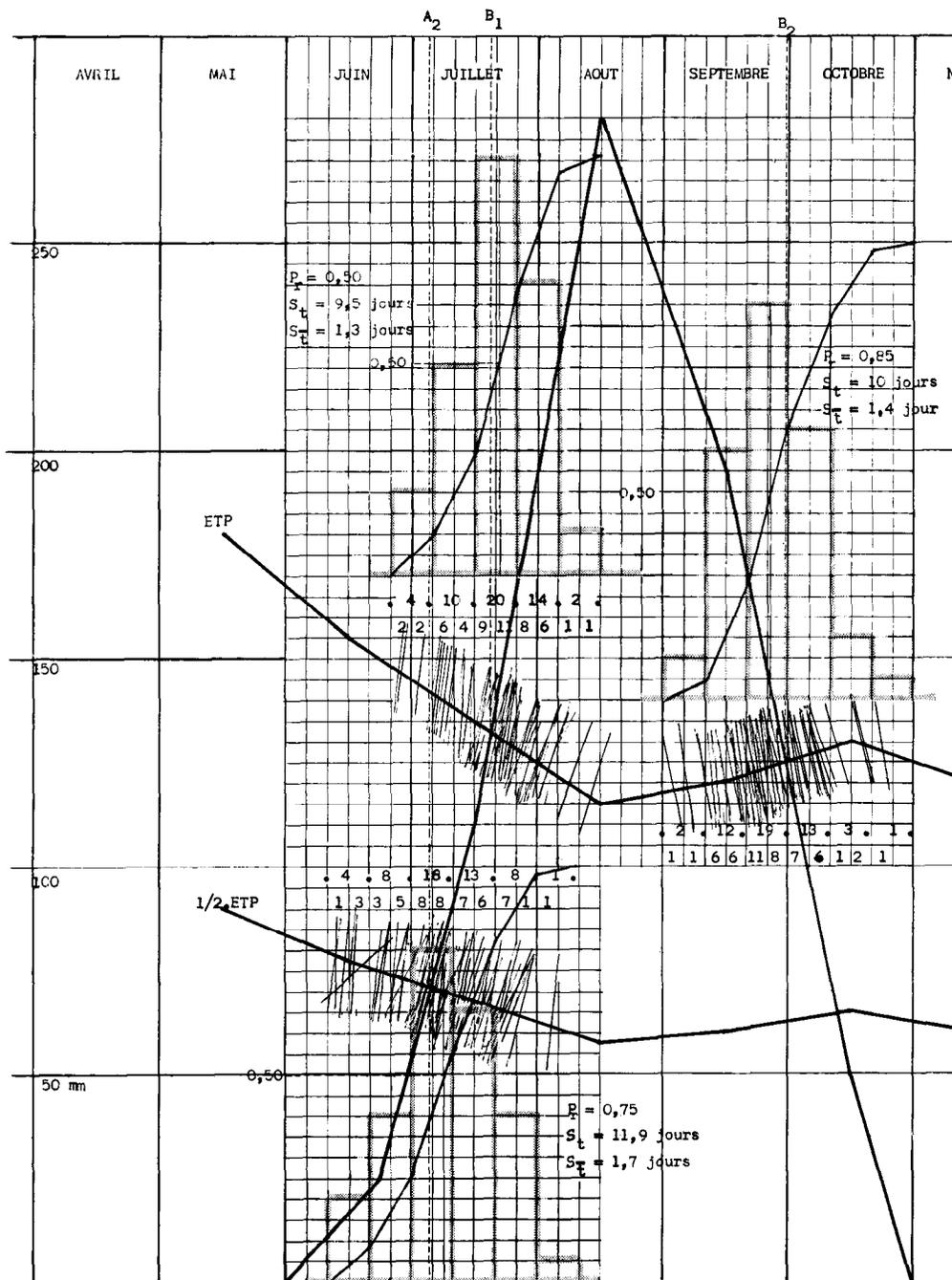


Fig. 7. — Détermination, par intersection des courbes mensuelles variables de P et des courbes mensuelles normales (donc constantes) de ETP et 1/2 ETP, des positions fréquentielles des événements A<sub>2</sub>-B<sub>1</sub>-B<sub>2</sub>, à Thiès. Le seuil de probabilité Pr correspond à la valeur du  $\chi^2$ . S<sub>t</sub> et S<sub>T</sub> sont les écarts-types de la variable « position de A<sub>2</sub>, ou B<sub>1</sub> ou B<sub>2</sub> » et de sa moyenne. L'ordonnée 0,50 détermine, par intersection avec la courbe cumulée, la position de la médiane observée. Les lettres F indiquent les faux départs.

En résumé, comme à Zinder en *P décadaire* et si on élimine les faux-départs, le semis réel semble pouvoir être effectué sans risques dès la décade ou la pentade où se situe la médiane.

Comme à Zinder encore, la position normale mensuelle est presque confondue avec la médiane mensuelle, ces deux positions étant antérieures de 10 jours à celles déterminées en *P décadaire*.

#### *Fort-Archambault et Moundou.*

Après ces exemples pris au nord de la zone semi-aride, il convient de se reporter dans sa frange sud où la pluviosité est environ deux fois plus forte, à Fort-Archambault et à Moundou, notamment, où la variabilité est particulièrement forte (C.V. = 25%) pour la hauteur d'eau annuelle.

A Fort-Archambault, l'examen des *P décadaires* fait apparaître une fréquence de 5 faux-départs sur 15 ans, mais qui ne se produisent plus dès la date médiane (tableau II). Ces faux-départs éliminés,  $A_2$  varie de la deuxième décade d'avril à la deuxième de juin, la médiane tombant le 10 mai et la position normale décadaire (fig. 8) au voisinage du 30 avril, soit 10 jours d'écart.

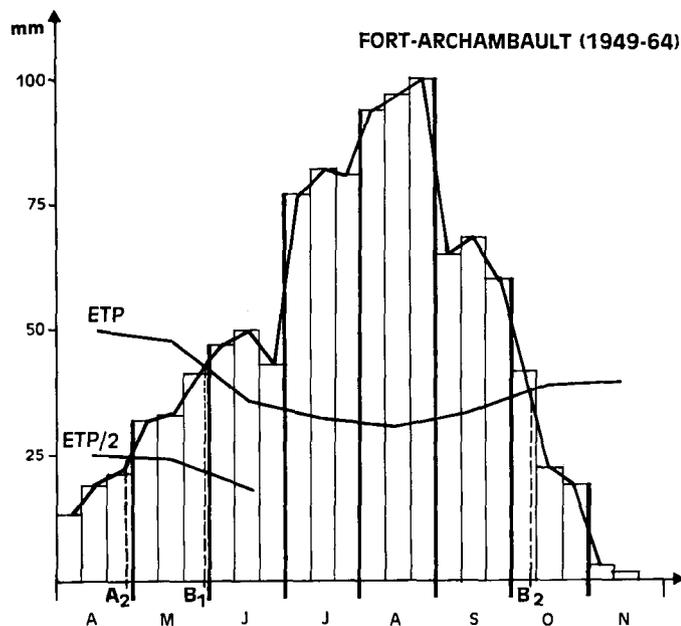


Fig. 8. — Détermination, par intersection des courbes mensuelles ou décadaires normales de P d'une part et des courbes mensuelles normales de ETP et 1/2 ETP d'autre part, de la position des « normales » décadaires de  $A_2$ - $B_1$  et  $B_2$  à Fort-Archambault.

En *P mensuelle*, la médiane se situe encore 5 à 10 jours plus tôt qu'en *P décadaire*, se confondant presque avec la normale mensuelle, le 1<sup>er</sup> mai (tableau II et fig. 9).

A Moundou, en *P mensuelle*, sur 34 ans, médiane et normale coïncident presque comme à Fort-Archambault.

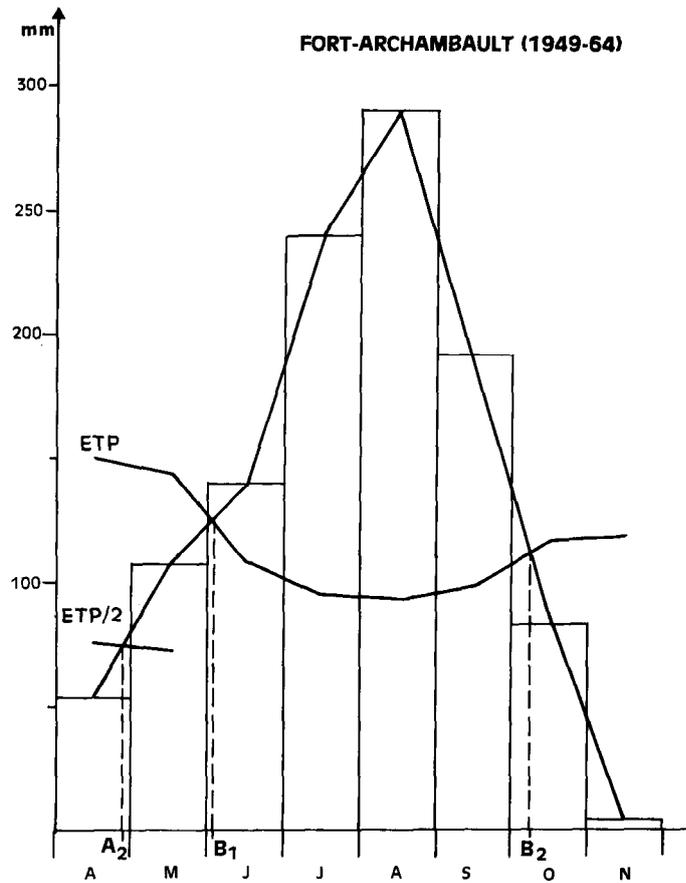


Fig. 9. — Détermination, par intersection des courbes mensuelles ou décadaires normales de P d'une part et des courbes mensuelles normales de ETP et 1/2 ETP d'autre part, de la position des « normales » mensuelles de  $A_2$ - $B_1$  et  $B_2$  à Fort-Archambault.

Finalement, les points communs à ces trois situations variées peuvent ainsi s'énoncer:

— à condition d'éliminer les faux-départs, il semble que la « médiane décadaire » de  $A_2$ , postérieure de 5 à 10 jours à la « normale décadaire », puisse indiquer la date moyenne du semis réel ;

— la « médiane mensuelle », postérieure de O (Zinder) à 5 jours (Thiès) à la « normale mensuelle », se situe environ 10 jours plus tôt que la « médiane décadaire » ;

— il en résulte que la « médiane décadaire », qui est la médiane vraie (donc à considérer dans le cas du semis) est postérieure de 10 jours environ à la « normale mensuelle », laquelle est la plus immédiate puisqu'elle ne requiert que la connaissance des normales mensuelles de P et de ETP, et constitue une caractéristique assez significative dans bien des cas, notamment à titre comparatif.

On a vérifié que ces résultats restent valables quand on fait varier annuellement ETP comme P, au lieu de considérer seulement sa valeur normale.

Néanmoins, dans les études fines telles que l'analyse du rendement et de la productivité, on pourra avoir recours aux valeurs variables de ETP.







POSITION DE B<sub>1</sub>.

De la considération du tableau III et des figures 4 à 10, concernant les mêmes situations géographiques, il ressort que :

— la médiane *décadaire* précède ou suit de peu la normale *mensuelle* ou coïncide avec elle ;

— la médiane *mensuelle* coïncide pratiquement avec la normale *mensuelle*.

Il faudrait examiner un plus grand nombre de cas pour définir les positions relatives des médianes décadaire et mensuelle.

POSITION DE B<sub>2</sub>.

On constate (tableau IV et fig. 4 à 10) que les médianes décadaire et mensuelle précèdent de 0 à 5 jours les normales décadaire et mensuelle. La médiane mensuelle a tendance à être postérieure à la médiane décadaire qui est la médiane *vraie*, à considérer dans les études fines.

Ainsi la *normale mensuelle*, dont l'avantage est d'être d'obtention immédiate à partir des courbes mensuelles normales de P et ETP, a tendance à « surestimer » les positions des médianes mensuelle et surtout décadaire de A<sub>2</sub> et de B<sub>2</sub>, *anticipant* celle de A<sub>2</sub> et *retardant* celle de B<sub>2</sub>. Mais bien souvent on pourra se contenter de cette caractéristique commode. Quant à la normale mensuelle de B<sub>1</sub>, elle doit en moyenne coïncider avec la médiane.

OBTENTION DES DISTRIBUTIONS DE A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub> ET B<sub>2</sub>.

A condition de ne considérer ETP qu'en valeurs normales, P mensuelle ou décadaire variant au contraire annuellement, les distributions des événements climatiques remarquables de la saison humide peuvent être obtenues rapidement sur papier quadrillé dont un élément représente une pentade.

Après avoir tracé les courbes *normales* partielles de ETP et ETP/2, on se contente de dessiner, avec une pointe très fine, les éléments des courbes *variables* (annuellement) de P mensuelle ou décadaire qui recoupent les premières. On élimine les faux-départs s'il y a lieu, puis on compte, dans chaque pentade, le nombre d'intersections (fig. 4, 7 et 10).

## ANALYSE FRÉQUENTIELLE.

On n'a, jusqu'ici, considéré que la position ou date *médiane* des événements A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub>, qui correspond à la fréquence 50% — 50%. Mais on peut être amené à s'intéresser à d'autres quantiles plus ou moins sévères (concernant A<sub>2</sub> principalement) selon la susceptibilité de la culture à la sécheresse, selon la nature du sol, l'importance économique de la récolte, le rendement espéré, etc. Notamment, la date du semis dit « en sec », lequel bénéficiera des faux-départs, sera définie à des fréquences inférieures à 50% et pourra même être envisagée avant toute possibilité d'occurrence de A<sub>2</sub>.

Dans l'échantillon, s'il est suffisamment important, A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub> ou B<sub>2</sub>, classé par intervalles généralement décadaires (un intervalle hebdomadaire ou pentadaire exigera un effectif plus élevé), sera distribué ou non en loi normale. Divers tests, plus ou moins rigoureux selon le cas, pourront être appliqués. Dans le cas des figures 4, 7 et 10, sont indiquées les probabilités P correspondant aux valeurs du  $\chi^2$ .

En cas de distribution normale, le recours à une table  $\Pi(x)$  permettra d'estimer —

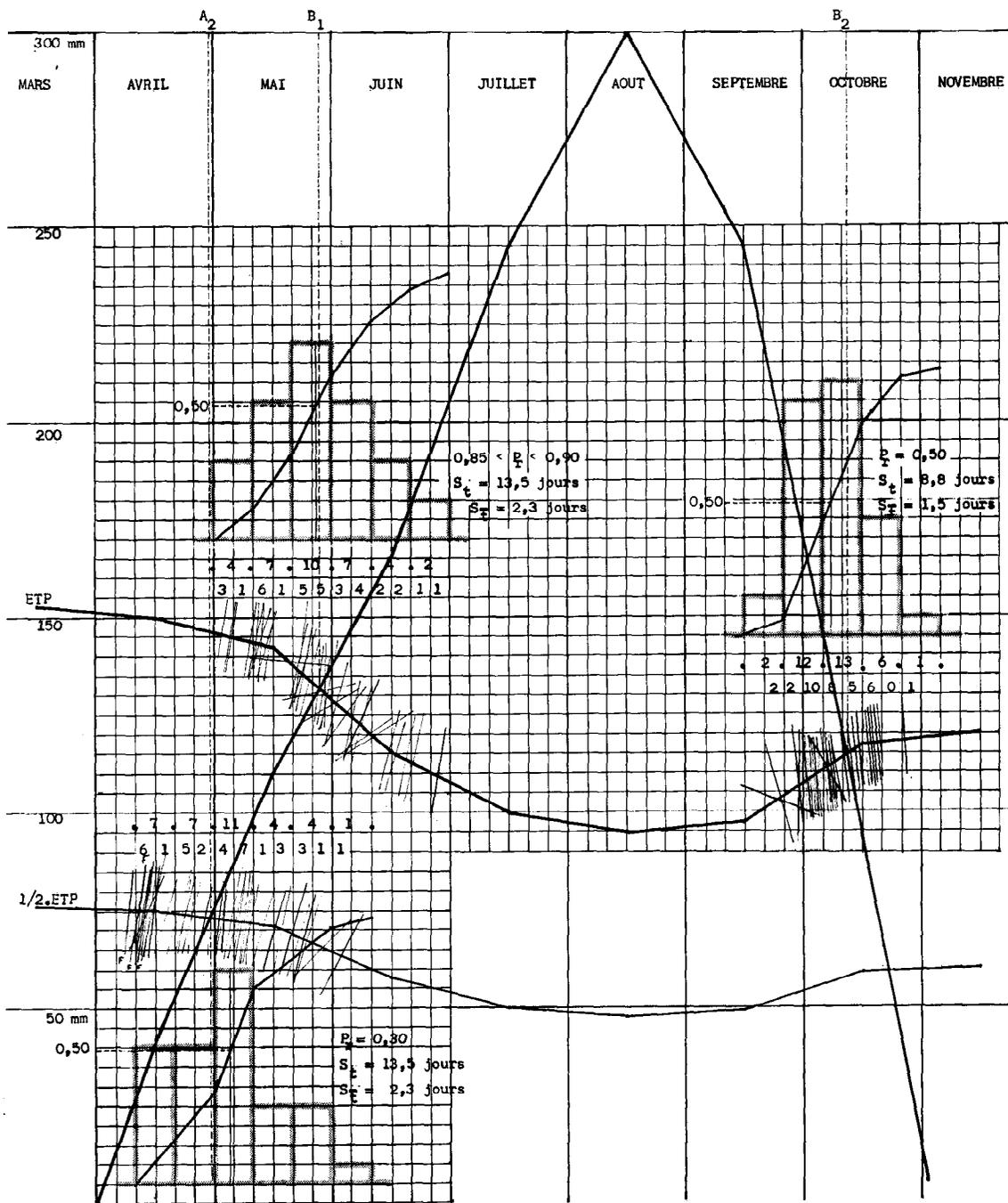


Fig. 10. — Détermination, par intersection des courbes mensuelles variables de P et des courbes mensuelles normales (donc constantes) de ETP et 1/2 ETP, des positions fréquentielles des événements  $A_2$ - $B_1$ - $B_2$ , à Moundou. Le seuil de probabilité  $P_r$  correspond à la valeur du  $\chi^2$ .  $S_t$  et  $S_{\bar{t}}$  sont les écarts-types de la variable « position de  $A_2$ , ou  $B_1$  ou  $B_2$  » et de sa moyenne. L'ordonnée 0,50 détermine, par intersection avec la courbe cumulée, la position de la médiane observée. Les lettres F indiquent les faux-départs.

entre 5% et 95% du moins — les positions de l'événement qui ont des chances données d'être atteintes ou dépassées, ou inversement les fréquences correspondant à des positions déterminées.

Si la distribution n'est pas normale, on pourra essayer tout d'abord de l'améliorer en faisant glisser de 5 en 5 jours (et même de jour en jour dans les études fines) les décades. Ainsi, concernant par exemple la distribution de  $B_2$  à Zinder (tableau IV et fig. 4), on fera en sorte d'amener le mode, la médiane et la moyenne à coïncider plus ou moins étroitement à l'intérieur d'une décade centrée sur la frontière entre les mois d'août et de septembre.

Au cas où ce procédé ne serait pas suffisamment efficace, la distribution, supposée unimodale, restant trop dissymétrique, on pourra encore tenter de la normaliser en effectuant un changement de variable, selon  $\log(x + a)$  notamment (voir ci-avant le paragraphe concernant l'analyse fréquentielle de la pluviosité).

Mais certaines distributions ne peuvent être rendues normales, parce qu'elles sont plurimodales notamment. Alors — et ceci est toujours faisable, que la distribution soit ou non normale — on pourra se contenter d'opérer empiriquement en traçant la courbe des fréquences cumulées observées. Mais on ne pourra pas déterminer l'incertitude affectant une interpolation. Un exemple d'analyse fréquentielle exhaustive sera publié ultérieurement.

## APPLICATIONS

On ne peut mieux justifier l'intérêt de cette représentation simple des conditions hydriques, fondée sur la seule considération de trois événements climatiques :  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ , définis ci-avant, qu'en en montrant l'efficacité, dans l'analyse de la productivité et du rendement des cultures tropicales par exemple.

### Productivité.

La productivité  $G$  ( $G$  = nombre de grains de la panicule) d'un sorgho est une fonction parabolique (FRANQUIN, 1966a et 1966b) du temps ou encore, de façon plus précise, de la somme des températures  $X$  comptée du semis à l'épiaison  $E$  (fig. 11) \* :

$$G = aX^2 + bX + c \quad (\text{avec } a \text{ négatif})$$

Cette expression fournira la valeur *optimale*  $X_M$  (abscisse du maximum) de la somme des températures qui déterminera la productivité *maximale*  $G_M$  (ordonnée du maximum) d'une variété déterminée.

Connaissant, à la latitude considérée, la date d'épiaison  $E$ , à peu près fixe, de la variété, on déduira de ces données la *date de semis optimale*  $S_0$ , dont la position sera comparée aux positions fréquentielles de  $A_2$  (fig. 10 et tableau II, Moundou).

Inversement, étant donné la somme des températures entre les moments  $A_2$  et  $E$ , la fonction parabolique permettra d'estimer les productivités absolue  $G$  et relative  $G/G_M$  à attendre d'un sorgho semé théoriquement à la position fréquentielle désirable de  $A_2$ .

\* Il s'agit ici d'un ajustement purement statistique, l'origine des températures étant prise à 0 °C et non pas au zéro de végétation de la variété.

Pour ce faire, on pourra se contenter, en première approximation — dans le cadre d'une zone ou dans celui d'un même pays recouvrant plusieurs régions agroclimatiques — de déterminer les positions fréquentielles de  $A_2$  à partir des valeurs de  $P$  mensuelle variable et de ETP mensuelle normale, dont la position « médiane mensuelle » (voir ci-avant les définitions).

En seconde approximation — dans le cadre notamment de la région agroclimatique : unité de climat recouvrant une possible diversité de sols — on aura intérêt à considérer les valeurs de  $P$  décadaire (ETP pouvant rester mensuelle et normale) afin d'avoir de la situation une vue non plus globale et relative (inter-régionale) mais particulière et réelle. Les positions intéressantes, utiles, de  $A_2$  seront alors choisies non seulement en fonction de la nature de la culture, de son importance économique, du rendement espéré, mais en fonction aussi du type physique de sol.

Pour plus de précision encore, à cette époque de l'année où les valeurs de ETP peuvent varier beaucoup d'une année à l'autre selon que la saison pluvieuse est déjà ou non commencée, on pourra être amené à travailler aussi sur les valeurs mensuelles (ou même décadaires) variables de ETP.

Nous plaçant au deuxième temps, dans le cadre de la région agroclimatique, supposons qu'à Moundou la parabole de la figure 12 \* soit l'expression de la productivité  $G$ , en fonction de la somme des températures  $X$ , d'une variété déterminée à la latitude du lieu, son épiaison se plaçant au 15 octobre à cette même latitude \*\*.

Les coordonnées du maximum étant approximativement :  $X_M = 5\ 000^\circ$  et  $G_M = 900$  grains, ces  $5\ 000^\circ$  de températures moyennes cumulées, comptées à rebours de la date d'épiaison  $E$  (le 15/10), situeraient la date de semis optimale  $S_0$  au 5 avril.

Or, les positions fréquentielles de  $A_2$  à Moundou, en  $P$  mensuelle (tableau II), se distribuent entre le 10 avril et le 5 juin, normale et médiane mensuelles tombant le 1<sup>er</sup> juin, comme à Fort-Archambault. Comme à Fort-Archambault, on admettra donc, pour le traitement de cet exemple, que la médiane décadaire, ou médiane vraie, tombe à Moundou le 10 mai et les extrêmes les 10 avril et 10 juin.

Du 10 mai au 15 octobre, on compte environ  $4\ 100^\circ$  de températures moyennes cumulées, correspondant (fig. 11) à une productivité absolue  $G = 820$  grains et à une productivité relative  $G/G_M = 820/900 = 0,90$  environ. La pente de la courbe se rapprochant ensuite très rapidement de l'horizontale, on constate qu'il faudrait semer environ 35 jours plus tôt, c'est-à-dire dans la première décennie d'avril, pour exploiter la productivité à 100%, ce qui ne paraît guère possible, même si le sol a été préparé à la fin du précédent cycle pluvieux, à moins qu'on ne mise, pour les cultures résistantes à la sécheresse, sur les faux-départs de la période « préhumide » dont la fréquence n'est que de 2/15 dans la décennie en cause.

En semant dans la première décennie de mai, ce qui paraît possible une fois sur deux, on ne risque qu'un faux-départ en 15 ans et on utilisera encore la variété à 90% de sa productivité.

En semant systématiquement dans la première décennie de juin, ce qui paraît toujours possible (en fait, un effectif plus important de l'échantillon ferait apparaître une étendue

\* Cette courbe est en réalité représentative de la productivité moyenne de 9 variétés en essais à Deli, à 30 km à l'ouest de Moundou (BEZOT 1963, COCHEME et FRANQUIN, 1967).

\*\* Le 15/10 est la moyenne des dates d'épiaison des 9 mêmes variétés, quelle que soit la date du semis entre le 1/4 et le 1/6 approximativement (BEZOT, 1963).

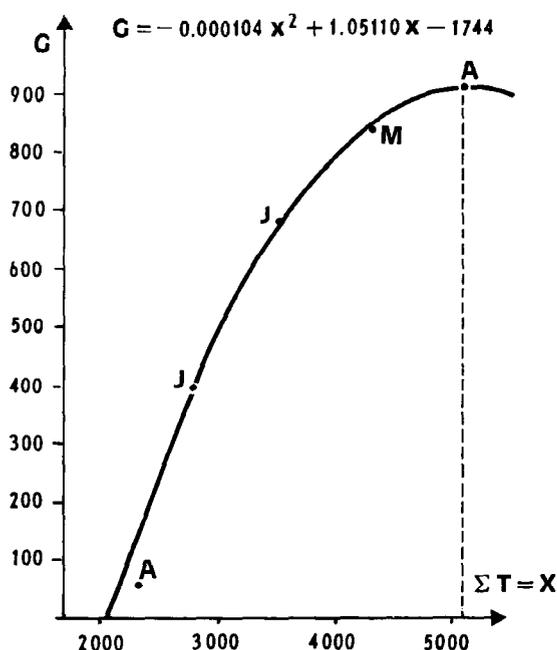


Fig. 11. — Courbe de « productivité » d'un sorgho en fonction de la somme des températures entre semis et épiaison. (Données de la station de Deli, Tchad.)

plus grande de la distribution) si ce n'est 1 année sur 15, on tirera encore de la variété 75% de sa productivité.

On voit là l'intérêt de disposer de variétés de céréales de cycle aussi long que le permettent les conditions locales, et les variétés traditionnellement cultivées répondent sans doute à ce besoin.

Il faut remarquer cependant que le rendement d'une culture n'est pas toujours une fonction étroite de la productivité de la plante : il est en effet possible, dans une certaine mesure, de planter plus densément quand on sème tard, circonstance qui intervient aussi sur le développement des talles.

### Rendement.

L'analyse statistique du rendement, qui suppose disponibles des séries chronologiques de rendements observés, peut être effectuée spatialement et/ou temporellement.

Dans les deux cas, on devra considérer trois classes de variables indépendantes : climatiques, édaphiques et technico-socio-économiques (figurant le niveau de technicité essentiellement), dont les effets respectifs devront être isolés dans la fluctuation globale du rendement.

La difficulté majeure n'est pas dans la méthodologie de l'analyse proprement dite, que l'outil statistique rend maintenant aisée, mais dans l'identification des variables et leur évaluation.

Concernant le climat, on se propose de montrer, ici-même et ultérieurement, que des variables tirées du découpage des saisons pluvieuse et humide par les trois seuls

événements climatiques remarquables  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  (fig. 2), sont susceptibles de rendre compte d'une part très importante de la fluctuation globale du rendement.

La présente analyse sera *temporelle* (un cas d'analyse spatiale, relatif au cotonnier, devant être présenté plus tard), et donc relative à un lieu déterminé : le Centre de Recherches Agronomiques (C.R.A.), de Bambey (Sénégal), géré par l'Institut de Recherches Agronomiques Tropicales (I.R.A.T.).

La série, qui va de 1950 à 1960 et qui représente « les rendements annuels moyens de l'ensemble des populations complexes de *Pennisetum* des essais comparatifs au C.R.A. de Bambey » (VIDAL, 1963), a été publiée dans *Agronomie tropicale*. Bien qu'un peu courte (11 ans, mais elle pourrait en compter 18 aujourd'hui), sa finesse permet d'en tirer des conclusions sinon définitives du moins intéressantes.

On considérera, comme l'a fait VIDAL, que le cycle de développement du Sanio 165, variété de Pénicillaire bien adaptée à Bambey, où elle épie le 20 septembre, est représentatif de la moyenne des populations complexes en cause.

On se limitera d'autre part à la considération de deux seules variables indépendantes tirées du découpage  $A_2$ - $B_1$ - $B_2$  de la saison humide :

- $x_1$  : durée, à 5 jours près, de la période  $A_2$ - $B_2$  ;
- $x_2$  : écart, à 5 jours près, entre  $B_2$  (variable) et E, date d'épiaison fixe.

La pluviométrie décadaire, aimablement communiquée par l'I.R.A.T., est effectivement celle de la station de Bambey pour les années 1950 à 1960. Mais l'évapotranspiration potentielle, qu'on a considérée variable et non normale pour plus de précision, a été calculée selon PENMAN (avec albedo  $r = 0,25$ ) à partir des valeurs des éléments climatiques à Thiès, station synoptique voisine.

Le tableau V présente les dates de réalisation de  $A_2$  et  $B_2$ , les valeurs des variables  $x_1$  et  $x_2$  et celles du rendement  $y$ . Enfin,  $x_3$  est la variable chronologique qu'on introduira dans l'analyse de régression afin d'éliminer la fluctuation à long terme.

TABLEAU V  
Explications dans le texte.

	Rendement $y$	$A_2$	$B_2$	$A_2$ - $B_2$ $x_1$	E- $B_2$ $x_2$	Temps $x_3$
1950	670	05/07	20/10	105	30	1
1951	790	10/07	30/10	110	40	2
1952	1 440	20/06	15/10	115	25	3
1953	1 330	01/07	10/10	100	20	4
1954	1 230	25/06	20/09	85	0	5
1955	1 770	20/06	30/09	100	10	6
1956	1 060	01/07	05/10	95	15	7
1957	1 100	15/07	10/10	85	20	8
1958	1 220	15/07	25/09	70	5	9
1959	910	15/07	25/09	70	5	10
1960	1 040	15/06	30/09	100	15	11

L'équation de régression linéaire de  $y$  sur  $x_1$  et  $x_2$  :

$$y = 17,86 x_1 - 27,63 x_2 - 74$$

dont le  $R^2$  est égal à 0,49 ( $R = 0,70$  étant significatif au seuil 0,05) assume déjà la moitié de la fluctuation globale du rendement.

Les *droites nettes* de régression (une des deux variables étant constante, à sa valeur moyenne) :

$$Y_1 = 17,86 x_1 - 539 \quad r_1^2 = 0,35$$

$$Y_2 = -27,63 x_2 + 1606 \quad r_2^2 = 0,55$$

ont été tracées respectivement sur les figures 12 et 13.

L'élimination de la tendance *linéaire* à long terme, de nature non climatique (COCHEME et FRANQUIN, 1967), par introduction de la variable  $x_3$  (tableau V) dans l'équation de régression linéaire, n'améliore pas la corrélation globale, l'équation :

$$y = 17,73 x_1 - 27,75 x_2 - 1,35 x_3 - 52$$

ayant en effet aussi un coefficient de détermination  $R^2$  égal à 0,49.

Mais il est fort vraisemblable que le rendement d'une variété localement adaptée passera par un *maximum* pour une valeur *optimale* de chacune des variables déterminantes du rendement : des droites ne rendront donc pas entièrement compte de la situation réelle.

Si alors, par approximations graphiques successives (EZEKIEL et FOX, 1959), on passe des *droites* des figures 12 et 13 aux *courbes* de régression, celles-ci rendent compte de 60% de la fluctuation *totale* (d'origines climatique et non climatique).

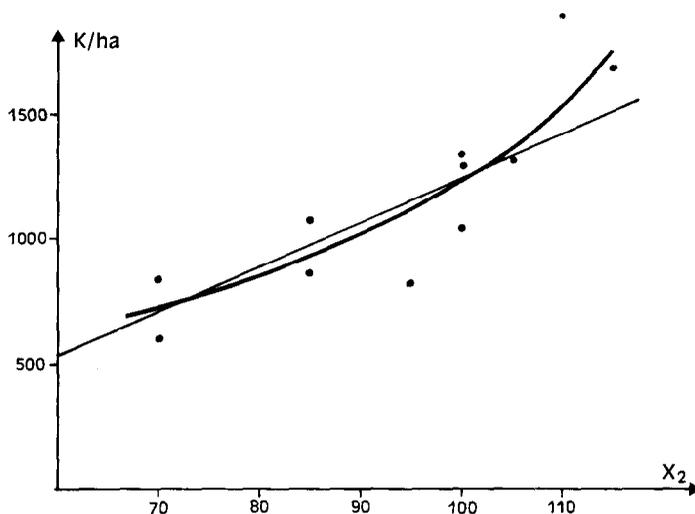


Fig. 12. — Droite et courbe dérivée représentatives du « rendement » d'un pénicillaire en fonction de la durée cumulée  $A_2-B_2$  des périodes préhumide  $A_2B_1$  et humide  $B_1B_2$ . (Données de la station de Bambey, Sénégal.)

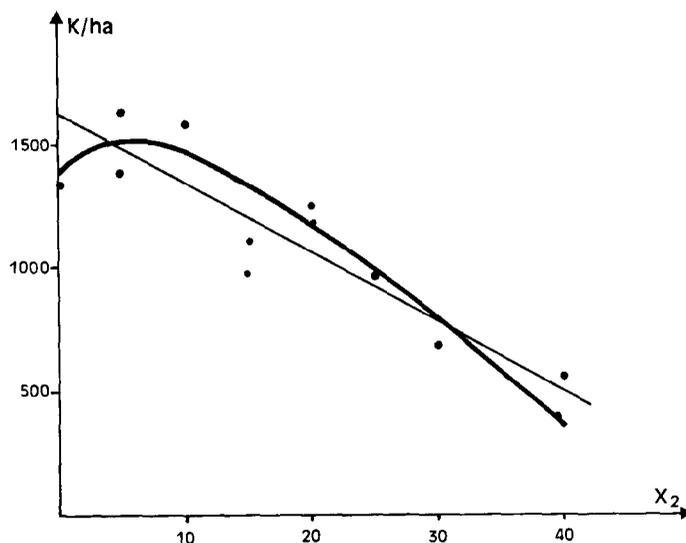


Fig. 13. — Droite et courbe dérivée représentatives du « rendement » d'un pénéillaire en fonction de l'écart  $E-B_2$  entre la fin  $B_2$  variable de la période humide  $B_1B_2$  et la date fixe d'épiaison  $E$ . (Données de la station de Bambey, Sénégal.)

L'élimination de la tendance *curvilinéaire* à long terme n'étant pas faisable sur ces seules onze années d'observations, il n'est guère possible d'aller plus loin dans l'ajustement des *courbes* des figures 12 et 13 aux rendements observés, mais la réalité, pour la figure 13, d'un maximum aux environs de la date d'épiaison, déjà indiquée par COCHEME et FRANQUIN (1967 et Colloque UNESCO de Reading 1966), se trouve confirmée par une étude de CURTIS (1968) au Nigeria.

#### Remarques.

— En considérant la durée de la période  $A_2B_2 = x_1$  comme représentant la période de végétation active, on a supposé que le semis a été effectué chaque année en  $A_2$ , ce qui ne donne qu'une approximation du temps réel de végétation. La corrélation avec le rendement serait vraisemblablement meilleure si on tenait compte de la *vraie* date du semis.

— On pourrait introduire aussi dans l'analyse, comme déjà indiqué (FRANQUIN, 1967a), d'autres variables climatiques tirées du même découpage des saisons humide et pluvieuse : excès de  $P$  sur  $ETP$  entre  $B_1$  et  $B_2$ , pluies postérieures à  $B_2$ , pluies antérieures à  $A_2$ , etc., ce qui n'aurait cependant guère de sens vu le faible effectif de l'échantillon.

— Les courbes de régression des figures 12 et 13 représentent la relation nette entre le rendement  $y$  et chacune des variables  $x_1$  et  $x_2$ , la variation nette associée à l'autre variable étant éliminée. Il est laborieux de calculer les indices de corrélation et détermination partielles de relations obtenues par approche graphique. Aussi admettra-t-on que le passage des droites des figures 13 et 14 aux *courbes* correspondantes n'a pas avantagé l'une des relations sensiblement plus que l'autre. Or, on avait calculé, à partir des *droites*, que la variation nette de  $y$  était associée pour 35% à celle de  $x_1$  et pour 55% à celle de  $x_2$ . Cela signifierait que  $x_2$ , position variable de  $B_2$  par rapport à celle, fixe, de  $E$ , a plus d'importance, dans le déterminisme du rendement, que  $x_1$ , durée de la période

de végétation active. Mais on vient de voir que  $x_1$  ne représente qu'imparfaitement le temps réel de végétation, puisque le semis réel s'est fait à une date distincte de celle de  $A_2$ . D'autre part, on a procédé à l'analyse *temporelle* du rendement moyen de variétés en essais à Bambey, donc déjà choisies pour l'adaptation approximative de leurs longueurs de cycle à la durée de la saison humide moyenne. C'est alors la position de leur date moyenne d'épiaison relativement aux positions fréquentielles de  $B_2$  qui devient le facteur prépondérant. On a tout lieu de penser que dans une analyse *spatiale* du rendement moyen des mêmes variétés cultivées sous des latitudes différentes, c'est le facteur « durée de la saison humide » qui se fût montré le plus important.

— La courbe de la figure 12 n'a pas atteint son maximum, dans les limites des onze rendements observés de 1950 à 1960, ce qui suggère deux interprétations possibles, qui, d'ailleurs, ne s'excluent pas :

a) Les semis, de 1950 à 1960, n'ont pas été toujours effectués aussi précocement qu'il eût été possible, apparemment, à ne considérer que les positions de  $A_2$  : il serait instructif de rechercher a posteriori les dates réelles de ces semis.

b) Comme paraît l'indiquer déjà la courbe (fig. 11) de productivité moyenne des sorghos à Moundou, en fonction des sommes de température comptées du semis à l'épiaison, les variétés les plus productives en un lieu déterminé seraient, toutes autres choses égales, celles dont le cycle présente une durée de la phase semis-épiaison supérieure à la durée moyenne  $A_2B_2$ .

L'examen des conditions de réalisation des essais à Bambey, comme celui des caractéristiques phénologiques des variétés, devrait permettre d'estimer l'importance respective de ces deux facteurs.

Au contraire, la courbe de la figure 13 atteint son maximum pour un écart  $B_2$ -E de 5 à 10 jours qui situe la position optimale de  $B_2$  dans la pentade du 25 au 30 septembre. Or, on peut constater, au tableau III, que *la médiane de  $B_2$  à Bambey tombe justement le 30 septembre*. De façon générale, une variété bien adaptée devra, toutes autres conditions favorables, épier aux environs du moment de réalisation de  $B_2$  médian.

D'autre part, la pente moyenne de la courbe considérée est très forte, indiquant bien l'importance du phénomène : quand  $B_2$  se présente à plus de 10 jours environ de E, le rendement baisse rapidement. C'est ainsi qu'en dépit de valeurs de  $x_1$  égales à 105 et 110 jours, en 1950 et 1951, les rendements n'ont été que de 670 et 790 K/ha :  $B_2$  s'était situé à 30 et 40 jours postérieurement à E, favorisant vraisemblablement le développement d'un fort parasitisme. Ceci montre l'importance non seulement de la position médiane de  $B_2$ , mais aussi de la dispersion fréquentielle de ses positions.

Supposons enfin une variété témoin bien adaptée aux conditions de Bambey par sa longueur de cycle, mais aussi parce que son épiaison se fait au voisinage du 30 septembre, date médiane de l'événement  $B_2$ . Si on lui compare des variétés, par ailleurs sensiblement identiques, mais dont les dates d'épiaison se placent plus ou moins près de part et d'autre du 30 septembre, *leurs rendements s'ordonneront approximativement*, relativement au témoin affecté du rendement maximal, *selon la loi représentée par la courbe de la figure 13*.

## CONCLUSION

On a ainsi ajusté le cycle de développement d'un sorgho aux conditions hydriques et thermiques, et analysé le rendement d'un pénicillaire en se limitant à la considération

de trois événements remarquables de la saison *humide* définie, distinctement de la saison *pluvieuse*, comme le temps durant lequel le déficit du sol n'est pas maximal (au point de flétrissement) ou, encore, caractérisée par la permanence d'eau disponible dans le sol pour la culture.

Cette conception, adaptée d'autre part à la nécessité de l'expression fréquentielle des phénomènes, a donc pour elle, à certains niveaux de la recherche et de la planification, les avantages à la fois de la simplicité et de l'efficacité.

Il est d'ailleurs possible d'aller plus loin qu'ici dans ses applications si on considère les multiples variables climatiques qu'il est possible de dégager du découpage des saisons humide et pluvieuse par les trois événements en question.

Cette représentation schématique des conditions hydriques, à laquelle il est possible d'incorporer, par le moyen des sommes de températures, l'essentiel des conditions thermiques, débouche aussi, comme il sera montré ultérieurement, sur une normalisation des agroclimats tropicaux fondée d'autre part sur la nature et l'intensivité du système cultural.

Dans l'attente enfin de la conception, puis de la programmation d'une analyse fréquentielle du *déficit hydrique* où certaines caractéristiques physiques des sols interviendraient sous forme de *variables*, l'analyse fréquentielle de *pluviosité* décrite au début de cet exposé\* devrait permettre de mieux approcher la connaissance des aléas des conditions hydriques au cours des périodes délimitées par les positions fréquentielles des événements climatiques remarquables  $A_2$ ,  $B_1$  et  $B_2$ .

#### BIBLIOGRAPHIE

- BARGER (G. L.), THOM (H. C. S.) — 1949 — A method for characterizing drought intensity in Iowa. *Agron. J.*, vol. 41, 13-19.
- BEZOT (P.) — 1963 — L'amélioration des cultures céréalières au Tchad. *Agron. trop.*, vol. XVIII, n° 1, 985-1007.
- BRUNET-MORET (Y.) — 1966 — L'étude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale. Rapport O.R.S.T.O.M., Service Hydrologique.
- COCHEME (J.), FRANQUIN (P.) — 1967 — Rapport technique sur une étude agroclimatique de l'Afrique sèche au sud du Sahara. Projet conjoint FAO/UNESCO/OMM-FAO, Rome, VIII-326 p.
- CURTIS (D. L.) — 1968 — The relation between yield and date of heading of Nigerian sorghums. *Exper. Agric.*, 4, 93-101.
- DARVES-BORNOZ (R.), LECARPENTIER (C.), KHOBZI (J.) — 1967 — Les besoins en eau d'irrigation à l'échelle régionale. *Le Génie Rural*.
- DARVES-BORNOZ (R.), LECARPENTIER (C.) — 1964 — La détermination des besoins en eau d'irrigation à l'échelle régionale. Utilisation d'une calculatrice électronique. *Congr. Int. Génie Rural*, 6, 1964, Lausanne, 57-65.
- DUBREUIL (P.) — 1965 — Intérêt agronomique de l'étude statistique des pluies. O.R.S.T.O.M., Service Hydrologique, Paris, 37 p. multigr.

\* Le programme de ce modèle d'analyse fréquentielle, établi par la Section d'hydrologie de l'O.R.S.T.O.M., est maintenant disponible auprès du Secrétariat d'État des Affaires étrangères chargé de la Coopération qui en a assuré le financement. Il sera présenté dans un article ultérieur.

- FITZPATRICK (E. A.), SLATYER (R. O.), KRISHNAN (A. I.) — 1967 — Incidence and duration of periods of plant growth in central Australia as estimated from climatic data. *Agric. Meteorol.*, vol. IV, n° 6, 389-404.
- FRANQUIN (P.) — 1966 a — Le développement chez des espèces cultivées de jour court. Equations et déterminisme climatique. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Biol.*, n° 2, 74-90.
- FRANQUIN (P.) — 1966 b — Les équations climatiques du développement. Intérêt agronomique. *Agron. trop.*, vol. XXI, n° 12, 1370-1381.
- FRANQUIN (P.) — 1967 a — Analyse agroclimatique en régions tropicales. Les conditions hydriques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Biol.*, n° 5, 15-24.
- FRANQUIN (P.) — 1967 b — La Climatologie en Afrique Occidentale. Secrétariat d'Etat aux Affaires étrangères chargé de la Coopération, Paris, 153 p. multigr.
- GRISOLLET (H.), GUILMET (B.), ARLERY (R.) — 1962 — Climatologie. Méthodes et pratiques. Gauthier-Villars, Paris, 401 p.
- HUFF (F. A.), NEILL (J. C.) — 1959 — Comparison of several methods for rainfall frequency analysis. *J. Geophys. Res.*, vol. LIV, n° 5, 541-547.
- HUTCHINSON (J.), MANNING (H. L.), FARBROTHER (H. G.) — 1958 — Crop water requirements of cotton. *J. Agric. Sci.*, vol. LI, n° 2, 177-188.
- I.R.A.T.-C.R.A. de Bambey, Section de Bioclimatologie — 1966 — Rapport de campagne 1966. C.R.A., Bambey, 143 p. multigr.
- LECARPENTIER (C.), BESANVAL (G.) — 1964 1 — Étude fréquentielle des besoins en eau d'irrigation en France métropolitaine. Section technique centrale de l'aménagement des eaux, Paris, fasc. I et II, 171 p., 13 c.
- LECARPENTIER (C.), BESANVAL (G.) — 1964 b — Étude fréquentielle des besoins en eau d'irrigation du Bassin Aquitain. Section technique centrale de l'aménagement des eaux, Paris, 64 p.
- MANNING (H. L.) — 1951 — Confidence limits of expected monthly rainfall. *J. agric. Sci.*, vol. XI, 169-176.
- MANNING (H. L.) — 1956 — The statistical assessment of rainfall probability and its application in Uganda agriculture. *Proc. r. Soc., B*, vol. CILIV, 460-480.
- Ministère de la Coopération et O.R.S.T.O.M. — 1965 — Étude pluviométrique pour la culture du riz dans le delta du Sénégal. O.R.S.T.O.M., Paris, 12 p. multigr.
- ROCHE (M.) — 1963 — Hydrologie de surface. O.R.T.S.O.M., Gauthier-Villars, Paris, 430 p.
- SLATYER (R.O.) — 1966 — The use of soil water balance relationships in agroclimatology. Proc. Conf. Agrocl. Méthodes agroclimatologiques Actes du colloque de Reading. UNESCO Recherches sur les ressources naturelles, VII, Paris, 73-87.
- THOM (H. C. S.) — 1958 — Note on the gamma distribution. *Month. Weather Rev.*, n° 86, 117-122.
- TRUMBLE (H. C.) — 1937 — *Trans. r. Soc. Aust.*, vol. LI, n° 1.
- TURC (L.) — 1944-1955 — Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Thèse, Paris, 1953. *Ann. agron.*, vol. V, 491-595 et vol. VI, 5-131.
- TURC (L.) — 1961 — Évaluation des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, vol. XII, n° 1, 13-49.
- VIDAL (P.) — 1963 — Croissance et nutrition minérale des Mils (*Pennisetum*) cultivés au Sénégal. *Agron. trop.*, vol. XVIII, nos 6-7, 591-668.