

MODELES FREQUENTIELS DE LA PERIODE CLIMATIQUE DE VEGETATION.  
POTENTIALITES CULTURALES.

Pierre FRANQUIN

Agroclimatologue à l'O.R.S.T.O.M., 70, route d'Aulnay, 93140 BONDY

C'est pour beaucoup grâce à l'informatique que la modélisation en agroclimatologie va en se diversifiant, pour répondre à des questions de plus en plus spécifiques et délimitées. Cet état de choses, évidemment à encourager, ne doit pas faire perdre de vue ce problème très général qu'est la caractérisation de la "période climatique de végétation des cultures".

Des progrès très importants ont été réalisés depuis l'époque où l'on devait se contenter de ne se donner, de la période de végétation, que des courbes de pluviométrie, de thermométrie et d'hygrométrie moyennes, voire même de durées d'insolation ou de rayonnement global. Ont suivi ensuite des courbes d'évapotranspiration potentielle (ETP) et de bilans climatiques (ETP-P).

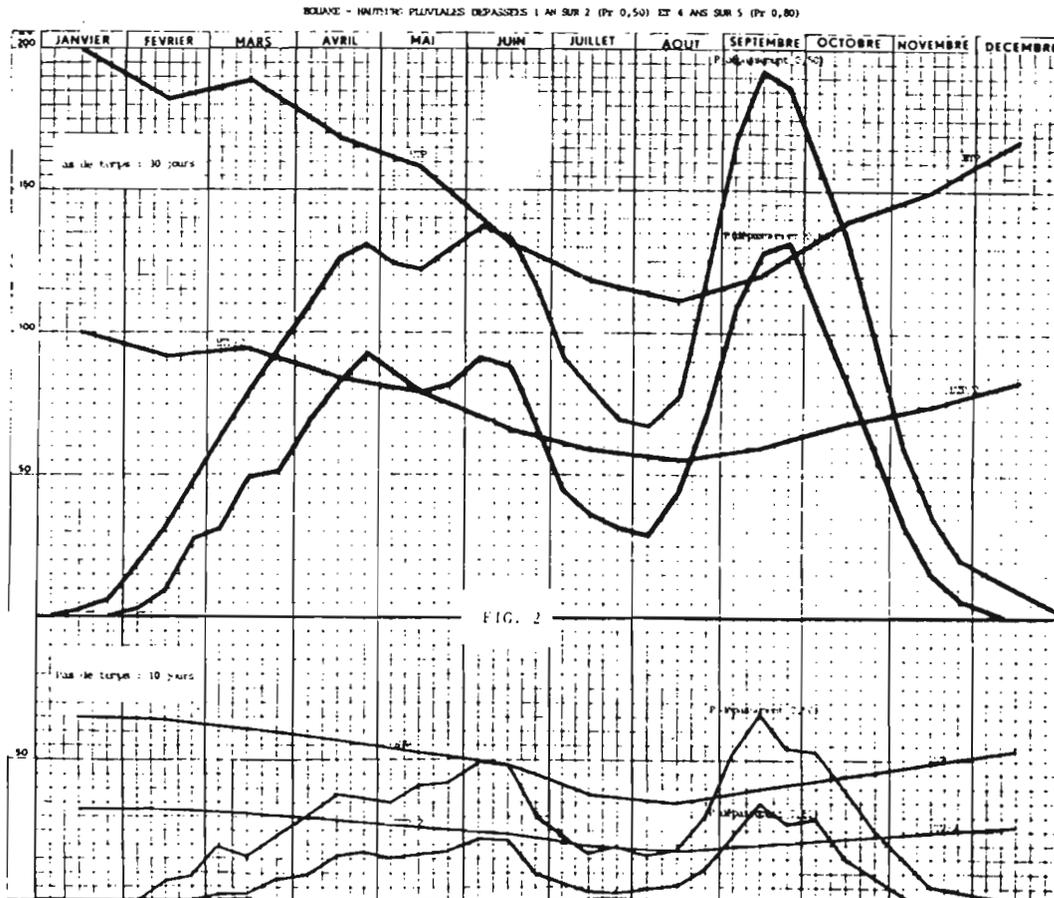
Mais c'est moins aux progrès des connaissances en agroclimatologie qu'à l'application de la technique informatique à des opérations de nature statistique que l'on doit de pouvoir discuter ici de modèles fréquentiels de la période de végétation.

Cela dit, on peut énoncer a priori les exigences auxquelles doit satisfaire une "expression fréquentielle" interannuelle de la période en question :

- rendre compte de façon aussi étroite que possible, sinon de jour en jour, de la variabilité intraannuelle des conditions climatiques considérées.
- se présenter de façon continue dans le temps, comme l'est elle-même la période de végétation, laquelle intègre en continuité les éléments climatiques qui concourent au déterminisme de la production végétale.
- rendre compte de façon simple mais très efficace des possibilités, en termes de probabilité, de développement d'une part, de croissance d'autre part, des cultures.
- ne pas se limiter à n'être qu'une figuration visuelle mais constituer un outil opérationnel en planification, recherche et développement agricoles.

STATION N°0200238					HAUTE VOLTA					OUAGADOUGOU VILLE				
DUREE DU GLISSEMENT 5					NOMBRE DE JOURS CONSECUTIFS 10									
DATE DU PREMIER JOUR	101	106	111	116	121	DATE DU PREMIER JOUR	101	106	111	116	121			
HAUTEUR MOYENNE	7.69	6.57	6.99	12.66	15.62	PARAMETRE GAMMA	0.750	0.840	0.986	0.991	0.981			
OBSERVATIONS RANGEES	83.5	83.5	55.2	47.0	66.5	S	17.080	14.575	13.025	15.958	19.426			
42.5	48.0	46.2	45.8	54.7		FO	0.400	0.300	0.300	6.200	0.180			
41.2	36.6	39.4	45.1	50.9		X0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
33.6	30.0	30.9	44.9	46.7		PROBABILITE 0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
30.0	26.3	24.0	37.9	44.6		PROBABILITE 0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
18.4	20.1	23.0	36.2	33.1		PROBABILITE 0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
16.9	19.0	20.6	34.8	30.8		PROBABILITE 0.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
14.6	16.9	20.0	27.8	30.7		PROBABILITE 0.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.44		
11.9	14.6	17.1	26.5	29.1		PROBABILITE 0.25	0.0	0.0	0.0	1.00	1.64			
9.3	11.0	16.9	25.3	29.1		PROBABILITE 0.30	0.0	0.0	0.0	2.08	2.93			
9.2	10.7	16.3	25.0	28.6		PROBABILITE 0.40	0.0	1.41	1.94	4.51	5.84			
8.8	9.9	15.5	24.2	27.4		PROBABILITE 0.50	1.47	3.47	4.26	7.39	9.31			
8.6	9.8	12.7	24.0	25.6		PROBABILITE 0.60	4.02	6.16	7.13	10.93	13.58			
7.5	9.3	10.5	23.4	24.5		PROBABILITE 0.70	7.76	9.94	10.84	15.49	19.09			
7.2	8.8	9.8	21.0	24.0		PROBABILITE 0.75	10.27	12.22	13.19	18.39	22.60			
6.7	8.9	8.9	14.1	23.4		PROBABILITE 0.80	13.45	15.17	16.07	21.93	26.89			
5.6	7.5	8.7	13.2	22.2		PROBABILITE 0.90	23.76	24.53	25.05	32.95	40.25			
4.6	6.2	8.6	12.6	21.8		PROBABILITE 0.95	34.48	34.08	34.03	43.99	53.64			
4.6	6.0	8.5	12.4	20.2		PROBABILITE 0.98	48.99	46.85	45.92	58.58	71.35			
4.0	5.9	8.2	9.6	18.0		PROBABILITE 0.99	60.12	56.60	54.93	69.62	84.76			
3.6	5.6	8.1	8.7	15.5										
3.5	5.6	6.1	7.2	14.1										
1.8	4.6	5.0	7.6	13.4										
1.4	4.4	4.6	7.0	12.5										
1.3	4.0	4.3	6.5	12.1										
1.2	3.6	4.0	5.6	12.1										
1.2	2.4	3.8	5.3	12.1										
0.8	2.3	2.7	5.0	10.1										
0.4	1.8	2.6	4.9	10.1										
0.4	1.5	2.4	4.5	5.4										
0.0	1.2	2.1	3.2	4.2										
0.0	1.1	1.7	2.7	3.2										
0.0	0.6	0.9	2.6	3.0										
0.0	0.4	0.4	2.4	2.4										
0.0	0.4	0.2	2.4	1.9										
0.0	0.0	0.0	1.9	1.9										
0.0	0.0	0.0	1.4	1.3										
0.0	0.0	0.0	0.9	0.9										
0.0	0.0	0.0	0.6	0.7										
0.0	0.0	0.0	0.6	0.7										
0.0	0.0	0.0	0.0	0.3										
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0										

FIG. 1



- s'appliquer à une formulation aussi synthétique que possible des éléments qui constituent la période de végétation, y compris caractéristiques hydriques du sol. Cela, ne serait-ce qu'en raison des difficultés que soulèvent les probabilités composées.

Au plan probabiliste, d'ailleurs, toute situation en agriculture est complexe, même considérée au seul plan climatique et même à celui des seules conditions hydriques - dont il sera question exclusivement ici - et même si l'on réduit ces conditions hydriques à la seule pluviométrie considérée en termes d'analyse fréquentielle.

#### ANALYSE FREQUENTIELLE DES PLUIES

En vue de caractériser la variabilité des conditions hydriques au cours de la période de végétation, la démarche la plus simple consiste à traiter statistiquement les pluies. Si l'on ne perd pas de vue qu'une modélisation fréquentielle de la période de végétation doit rendre compte à la fois des variabilités intra et interannuelles, on devra se donner un intervalle ou pas de temps susceptible de rendre compte de façon satisfaisante de la variabilité intrannuelle. On ne peut donc, à cette fin, se contenter d'établir la distribution de fréquences des totaux pluviométriques annuels. Il sera déjà plus intéressant de s'adresser aux distributions de totaux mensuels; et plus efficace encore de prendre en considération les distributions de totaux décadaires, hebdomadaires ou même pentadaires.

Cette discrétisation du temps est une condition de discontinuité qui répond à cette nécessité qu'un fait agronomique doit être fixé dans le temps à l'intérieur d'un intervalle de 10 jours environ ; cela en rapport avec les événements du calendrier cultural : préparation du sol (jours de travail), semis, façons culturales, traitements phytosanitaires, irrigations, etc...

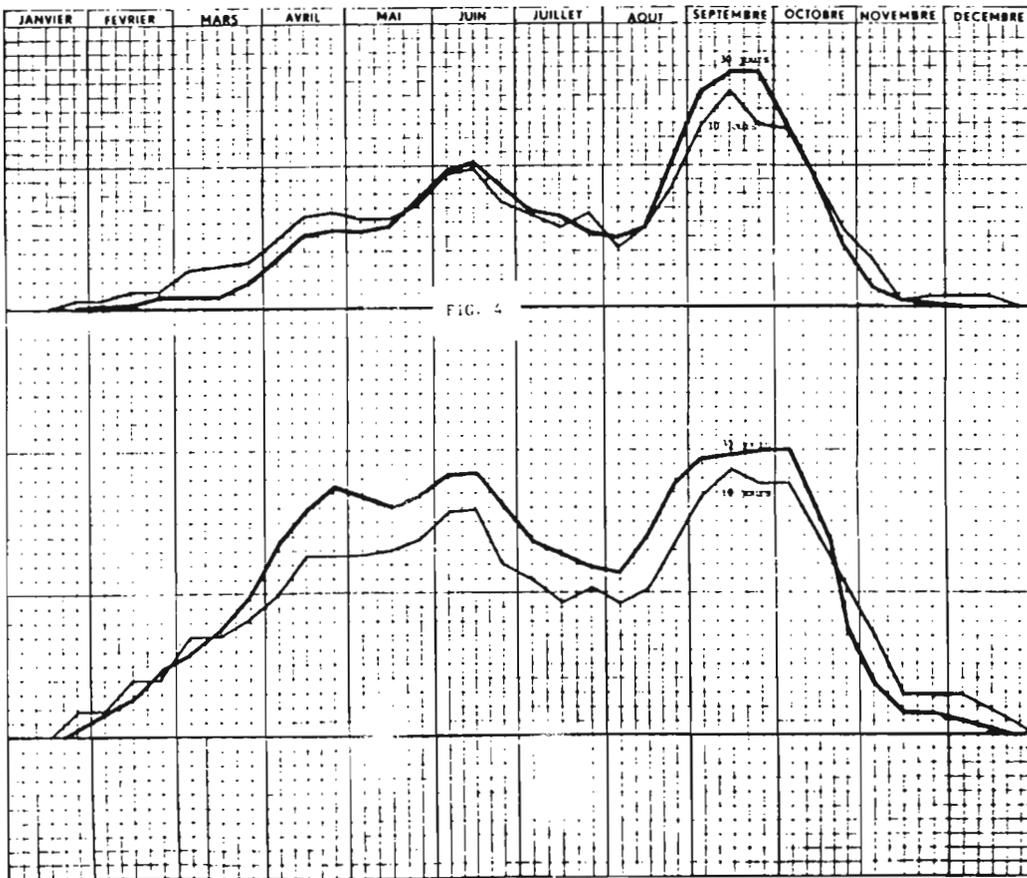
Mais, par ailleurs, la période de végétation est elle-même continue, comme le sont les phases de développement des cultures dont il convient d'estimer les probabilités de réussite. C'est donc là une condition de continuité.

Afin de répondre à la fois aux nécessités de continuité et de discontinuité, l'ORSTOM a depuis longtemps (BRUNET-MORET 1968) élaboré un programme d'analyse fréquentielle des pluies (POH 109) dont la souplesse d'application réside en ce qu'il traite (selon la fonction incomplète gamma tronquée) les pluies fréquemment dans tout intervalle de temps de  $n$  jours ( $n$  de 1 à 365, au choix) pouvant glisser de  $m$  en  $m$  jours ( $m$  de 1 à  $n$ , au choix). Ainsi (fig. 1) pour des intervalles, ou pas de temps, de 10 jours glissant de 5 en 5 jours à OUAGADOUGOU.

CUMULATIF - N. JOURS PLUVIEUX DEPASSÉS 1 AN SUR 2 (Pr 0,50) ET 4 ANS SUR 5 (Pr 0,80)



BOULZE - PRIMAIRETTS DE DEPASSMENT D'ETP (en hauci), D'ETP/2 (en Las)



Parmi les applications possibles de ce programme d'analyse statistique des pluies, on s'en tiendra ici à celles qui se rapportent à la modélisation fréquentielle de la période de végétation. Par exemple, on se rapportera aux fig. 2 et 3 relatives aux stations de BOUAKE (Côte d'Ivoire, 7°41'N, en climat subéquatorial, à deux maximums pluviaux) et de OUAGADOUGOU (Haute-Volta, 12°21'N, en climat tropical, à un seul maximum). Ce sont, en termes de pluviométrie fréquentielle et d'évapotranspiration, des modèles de la période de végétation.

Les fig. 2 et 3 présentent la pluviométrie fréquentielle selon deux échelles de temps : le pas de temps de 10 jours glissant de 10 en 10 jours et le pas de 30 jours glissant de même de 10 en 10. Sont figurées dans chaque cas (BOUAKE et OUAGADOUGOU) :

- la courbe des hauteurs pluviales médianes dépassées 1 an sur 2 (probabilité 0,50 de dépassement).

- la courbe des hauteurs pluviales dépassées 4 ans sur 5 (probabilité 0,80 de dépassement).

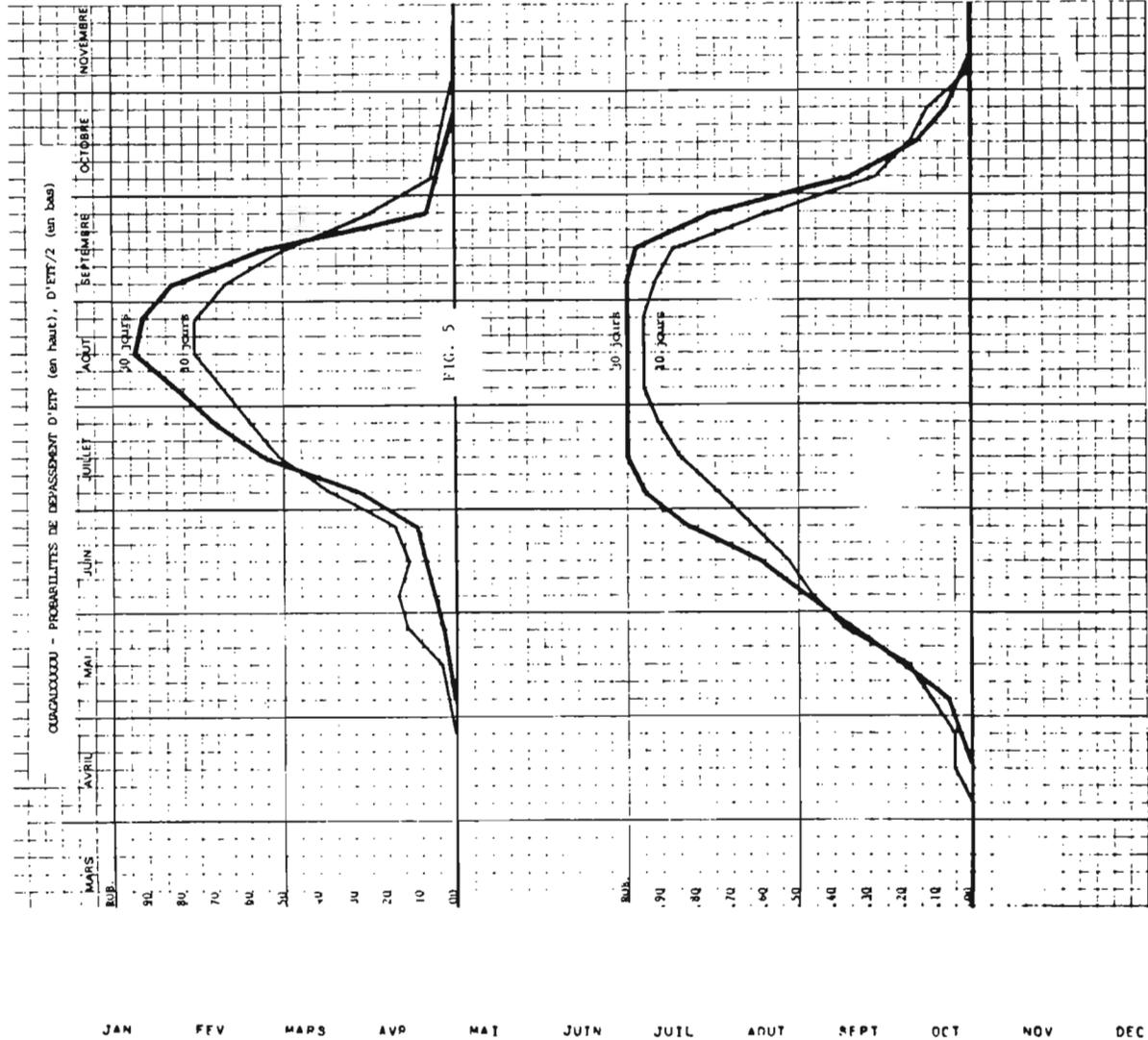
- les courbes d'évapotranspiration potentielle moyenne, pour ETP et ETP/2, calculées selon Penman, par MONTENY à BOUAKE et par BALDY à OUAGADOUGOU. En raison de sa variabilité bien moindre, relativement à celle des pluies, l'ETP n'est pas traitée fréquemment.

Courbes fréquentielles de pluviométrie et courbes d'ETP et ETP/2 concourent à décrire la période de végétation, du fait notamment de leurs intersections, lesquelles découpent dans cette période des sous-périodes. Or ce découpage n'est pas identique selon que le pas de temps est de 10 jours ou de 30 jours, deux sous-périodes correspondantes pouvant différer, en position et durée, de 20 jours. Il arrive même qu'en pas de 10 jours, la courbe d'ETP ne recoupe pas la courbe de pluviométrie fréquentielle 0,80. Or il ne fait pas de doute que le pas de 10 jours, plus étroit, décrit de façon plus adéquate la période de végétation, dans sa variabilité, que celui de 30 jours; et de façon moins adéquate que le ferait un pas de 7 ou de 5 jours.

Mais une autre représentation fréquentielle de la période de végétation, plus élaborée, facilite la discussion de cette question. C'est celle des probabilités de dépassement d'ETP.

#### PROBABILITES DE DEPASSEMENT D'ETP

Sur les fig. 2 et 3, on vient de représenter, relativement à ETP et ETP/2, des hauteurs pluviales dépassées aux probabilités données 0,50 et 0,80. Inversement (au moyen du programme ORPROB), on peut représenter (fig. 4 et 5) les probabilités de dépassement de hauteurs données, ici égales à ETP et ETP/2.



	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
ETP	65	65	65	66	64	63	62	61	59	58	56	54
ETP/2	32	32	32	33	32	31	31	30	29	29	28	27
46 P	0	17	0	0	26	44	69	3	2	14	66	8
P>ETP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P>ETP/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ETP	65	65	65	66	64	63	62	61	59	58	56	54
ETP/2	32	32	32	33	32	31	31	30	29	29	28	27
17 P	0	0	1	24	34	6	12	7	20	54	28	1
P>ETP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P>ETP/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ETP	65	65	65	66	64	63	62	61	59	58	56	54
ETP/2	32	32	32	33	32	31	31	30	29	29	28	27
8 P	0	0	0	0	9	0	14	32	57	17	29	12
P>ETP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P>ETP/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ETP	65	65	65	66	64	63	62	61	59	58	56	54
ETP/2	32	32	32	33	32	31	31	30	29	29	28	27
9 P	0	0	0	0	34	35	10	11	11	11	11	63
P>ETP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P>ETP/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

FIG. 6

On constate alors que les courbes reliant ces probabilités de dépassement (à supposer même qu'il soit licite de les tracer) relatives respectivement aux pas de 10 et de 30 jours ne coïncident pas.

Pourtant, que le pas soit de 10 ou de 30 jours, on a bien calculé, aux erreurs près, les probabilités vraies, réelles. Mais les courbes sont distinctes parce que la probabilité calculée dans un intervalle de 30 jours ne rend pas compte de la répartition des pluies dans chacune des 3 décades. Et l'on n'a pas de règle qui permettrait de passer des 3 probabilités élémentaires (relatives aux 3 décades) à une probabilité composée pour 30 jours qui rendrait compte de la répartition des pluies entre ces décades. Cette possibilité est par ailleurs exclue du fait que si, comme on peut le vérifier, il n'y a pas dépendance statistique entre pluies des décades conjointes, ce sont les éventualités de dépassement d'ETP (auxquelles se rapportent en fait les probabilités) qui, elles, sont liées. On peut le constater (fig. 6) au fait que les séquences, observées dans les décades successives, de signes + et - figurant le dépassement ou non de l'ETP et de l'ETP/2 par les pluies, ne sont pas aléatoires.

Donc, si l'on réduit le pas de temps dans le sens de la discontinuité, afin de décrire de façon plus réelle la répartition des pluies dans le temps - cela en rapport (et qui sera pourtant utile) avec la nécessité de planifier le calendrier cultural - on s'interdit d'extrapoler des probabilités élémentaires du pas de temps à des probabilités composées relatives à des pas plus larges.

Si, par contre, on augmente le pas de temps dans le sens de la continuité, afin d'encadrer les phases continues de développement des cultures pour en évaluer les probabilités de réussite, on s'interdit de le faire en rendant compte de la répartition des pluies dans le temps durant le déroulement de ces phases.

A ce dilemme "continuité-discontinuité", il y a au moins une solution, que l'on désignera de "période fréquentielle de végétation". Elle tire justement parti du fait que (fig. 6) les séquences d'éventualités de dépassement ou non de niveaux d'ETP (mieux encore, on le verra, de niveaux d'ETR/ETP) ne sont pas aléatoires.

## LA "PERIODE FREQUENTIELLE DE VEGETATION"

### Principe

Il s'agit de procéder à une description fréquentielle de la période de végétation qui réponde aux exigences posées dans l'introduction. Ce ne sera pas, notamment, une expression discontinue dans le temps, à l'image des modèles pré-

cédents, mais une expression continue, permettant d'évaluer, pour tout intervalle de temps, la probabilité d'occurrence d'un niveau de disponibilités hydriques (par exemple).

Dans ce système, fondé sur la signification de la figure 6, on ne s'intéresse plus aux fréquences d'apparition mais à la succession des apparitions de l'évènement attendu, dans les intervalles successifs du pas de temps. On ne s'intéresse en fait aux fréquences que dans le premier et le dernier intervalles d'une séquence homogène, premier et dernier intervalles que marquent des passages de seuils, lesquels passages de seuils constituent des évènements remarquables. A ces évènements remarquables, qui caractérisent la période de végétation, en délimitant notamment des sous-périodes, on confèrera de façon indépendante l'expression fréquentielle avant de les associer.

Est un évènement remarquable, pour le découpage, dans le cycle annuel, de la période de végétation, tout évènement climatique ou phénologique (critère de développement de la culture lié à un évènement climatique) dont l'intérêt répond à un objectif technique, économique, théorique, expérimental ... C'est dire qu'il y a en fait, en un même lieu, autant de périodes de végétation particulières que de projets spécifiques.

Il est possible, pourtant, de donner à cette entité rationnelle qu'est, dans cette conception, la période de végétation, un caractère de généralité si l'on considère des évènements valables dans tous les cas; notamment, parce qu'ils se rapportent non pas à la phénologie - laquelle est très spécifique d'un végétal - mais à la croissance ou production de matière sèche (en rapport avec ETR/ETP) dont les lois sont beaucoup plus générales.

Il en va ainsi, par exemple, (fig. 7), des deux évènements que sont les intersections d'une courbe pluviométrique croissante puis décroissante avec une courbe d'ETP. Ces deux évènements ont, pour toutes espèces végétant en couvert fermé, la même signification : celle de délimiter la sous-période durant laquelle, en principe, ETR = ETP et la production de matière sèche optimale. En principe car, étant donné l'incertitude qui entâche la notation de l'instant de réalisation de l'évènement, il convient d'insister sur son caractère relatif. C'est le cas pour les deux évènements précités dont les instants de notation sont contingents à la finesse de résolution des phénomènes (échelles d'espace et de temps, précision des mesures, représentativité des formules ...), à la plante, à son évapotranspiration maximale (ETM), à la nature du sol, etc...

### Construction

L'expression fréquentielle en question de la période de végétation s'inscrit, comme les précédents modèles (fig. 4 et 5), dans un système de coordonnées dont l'axe des abscisses est celui du temps et l'axe des ordonnées est une échelle de fréquences relatives ou de probabilités. Dans ce système, la variabilité d'occurrence interannuelle de chacun des évènements remarquables considérés peut être figurée :

- par un histogramme de densité de fréquences. La distribution, dans la saison, des positions que prend, lors des années successives, un évènement définissant soit le début soit la fin soit un état intermédiaire de la période de végétation est figurée par un histogramme de fréquences construit sur un intervalle ou pas de temps égal à la quinzaine, la décade, la semaine, la pentade même (bien que notée en valeurs discrètes pour les besoins de la statistique, la variable "temps" est continue).

Les distributions empiriques d'évènements peuvent être très diverses mais pour leur exploitation pratique il n'est pas indispensable qu'elles rappellent des lois de distribution théoriques (ce sera rarement le cas concernant des évènements en rapport avec les pluies mais plus fréquemment concernant des évènements en rapport avec les températures). La période de végétation sera ainsi jalonnée (fig. 8) de distributions de fréquences d'évènements qui, prises deux à deux, successivement ou non, caractérisent fréquemment le début et la fin de la période et de chaque sous-période. Le nombre de ces évènements se trouvera néanmoins limité par leur degré d'indépendance, deux évènements ayant d'autant plus de chances d'être liés qu'ils seront plus proches dans le temps.

- par un polygone intégral de fréquences relatives, obtenu en cumulant les fréquences relatives figurées dans l'histogramme de densité. Supposant que l'intervalle de temps tende vers zéro, on pourra passer, si l'on dispose en outre d'un échantillon suffisant, à la courbe continue des fréquences relatives cumulées (analogue à la courbe représentant une fonction de répartition de probabilités). Cette sigmoïde est tracée par simple lissage des irrégularités mineures, éventuellement par ajustement d'une loi théorique.

Mieux que les histogrammes, leurs intégrales donnent de la période de végétation une expression fréquentielle bien plus efficace. En effet, ces intégrales (polygones ou courbes sigmoïdes) ayant été construits comme en fig. 8, on lira en ordonnées, pour chaque évènement, la probabilité que cet évènement soit déjà réalisé à une date donnée en abscisses. Ainsi la sigmoïde de l'évènement "début"

d'une période donnera les probabilités qu'elle soit déjà ouverte et la sigmoïde de l'évènement "fin" les probabilités qu'elle soit déjà fermée. Mais, dans ce dernier cas, on s'intéressera plutôt à la probabilité complémentaire, qui est que la période soit encore ouverte : elle sera donnée par la sigmoïde symétrique par rapport à l'horizontale (fig. 8). De même on pourra construire les symétriques des sigmoïdes intermédiaires qui délimitent des sous-périodes.

### Interprétation

Ce modèle géométrique fréquentiel donne de la période de végétation une "vue" statistique, à la fois analytique et synthétique, figurant toutes les durées et positions possibles de la période, cadre dans lequel se déroulent les opérations du calendrier culturel et les phases phénologiques d'un cycle de développement d'une culture convenablement "calé".

L'aire et la forme de la surface délimitée par deux sigmoïdes, que l'on dira "d'ouverture" et de "fermeture", intègrent la position et la durée de la période considérée.

La probabilité que la période soit déjà ouverte à une date donnée, quelle que soit sa durée (c'est à dire sa fin), est donnée par la sigmoïde d'ouverture; la probabilité qu'elle soit encore ouverte, quelle que soit sa durée (c'est à dire son début), est donnée par la sigmoïde (symétrique) de fermeture. Cela dit, qu'il y ait ou non indépendance entre début et fin. Mais la probabilité que la période soit ouverte entre deux dates données (c'est à dire déjà ouverte avant la 1ère date et encore ouverte après la 2ème date) sera le produit des probabilités attachées à ces deux dates, si du moins début et fin sont indépendants ou peuvent être considérés comme tels. En cas de dépendance, on peut construire les sigmoïdes de fermeture conditionnelles de la sigmoïde d'ouverture (programme ORPFVC).

Ce modèle peut être construit en termes hydriques (ce sera généralement le cas en régions tropicales) ou en termes de conditions énergétiques (en régions tempérées) ou encore en termes à la fois de conditions hydriques et de conditions énergétiques à la fois (en régions subtropicales, tropicales d'altitude ou méditerranéennes).

En matière hydrique, le modèle peut être établi simplement à partir d'une information très élémentaires, celle de la connaissance de la pluviométrie, si du moins celle-ci est suffisamment importante pour donner lieu à des séquences non aléatoires : il conviendra de se donner des seuils de hauteur pluviale caractérisant l'ouverture et la fermeture de chaque période ou sous-période.

Il sera déjà meilleur de caractériser début et fin en termes de seuils de niveaux d'ETP à dépasser par les pluies. Mais c'est sur la base des évapotranspirations relatives ETR/ETP, tirées d'une simulation de bilans hydriques, que le modèle se montrera le plus efficace. ETR/ETP étant un indice de production de la matière sèche, l'aire de la surface du modèle géométrique représente une capacité de production de matière sèche et a donc valeur d'indice climatique relatif de productivité (toutes autres choses égales par ailleurs). Cette aire pourra être encore pondérée par des caractéristiques de nature énergétique (températures, rayonnements global, photosynthétique ...).

Mais à aire égale peuvent correspondre des dimensions et donc des formes de surfaces variées. De ces dimensions dépend, pour un cultivar, son adaptation aux conditions ainsi figurées. En effet, les dimensions horizontales (temps, sommes de températures, de rayonnements) rendent compte, en termes de probabilité, des possibilités de développement des cultures, tandis que les dimensions verticales (probabilités de dépassement de niveaux d'ETR/ETP) rendent compte des possibilités de croissance en matière sèche.

Ainsi cette expression fréquentielle répond déjà aux trois premières exigences posées dans l'introduction : le pas de temps, entre 5 et 10 jours, sur lequel construire les histogrammes de densité, rend bien compte de la variabilité intraannuelle des conditions climatiques considérées; néanmoins, au niveau des sigmoïdes et dans leur intervalle, cette expression fréquentielle est continue dans le temps, permettant d'évaluer des probabilités composées pour tout intervalle de temps; elle rend bien compte, en termes de probabilité, des possibilités de développement d'une part, de croissance d'autre part, des cultures.

Avant de passer aux applications (4<sup>ème</sup> exigence) qui résultent du caractère opérationnel de cette expression fréquentielle, on va montrer maintenant sur des exemples (OUAGADOUGOU et BOUAKE) qu'elle s'applique bien à l'information la plus synthétique qui soit en matière hydrique, celle des valeurs de ETR/ETP (de ETR/ETM, éventuellement) qui résultent du bilan hydrique.

#### EXEMPLES D'ELABORATION DU MODELE

L'évaluation de l'évapotranspiration relative ETR/ETP résulte de l'évaluation de l'évapotranspiration réelle ETR par voie de bilan hydrique. Ce bilan hydrique, compte tenu des pluies P, des irrigations éventuelles I, du ruissellement R, du drainage DR (ou des remontées capillaires), de la variation  $\Delta H$  de l'eau disponible du sol et de l'évapotranspiration ETR, s'écrit :

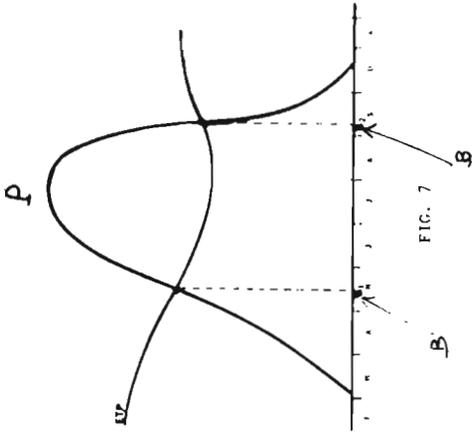


FIG. 7

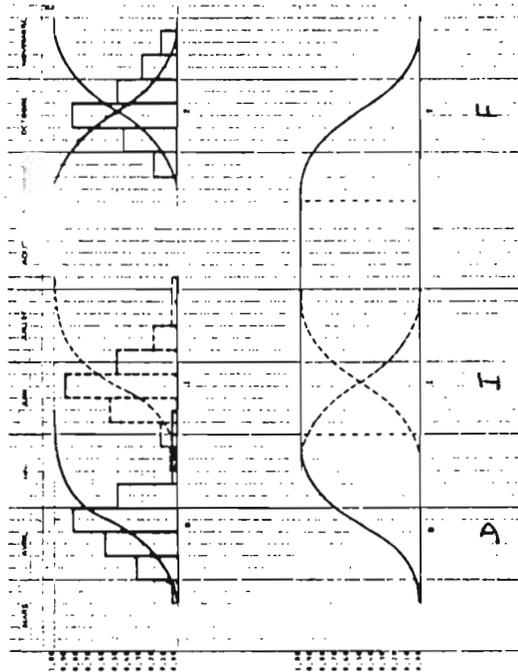


FIG. 8

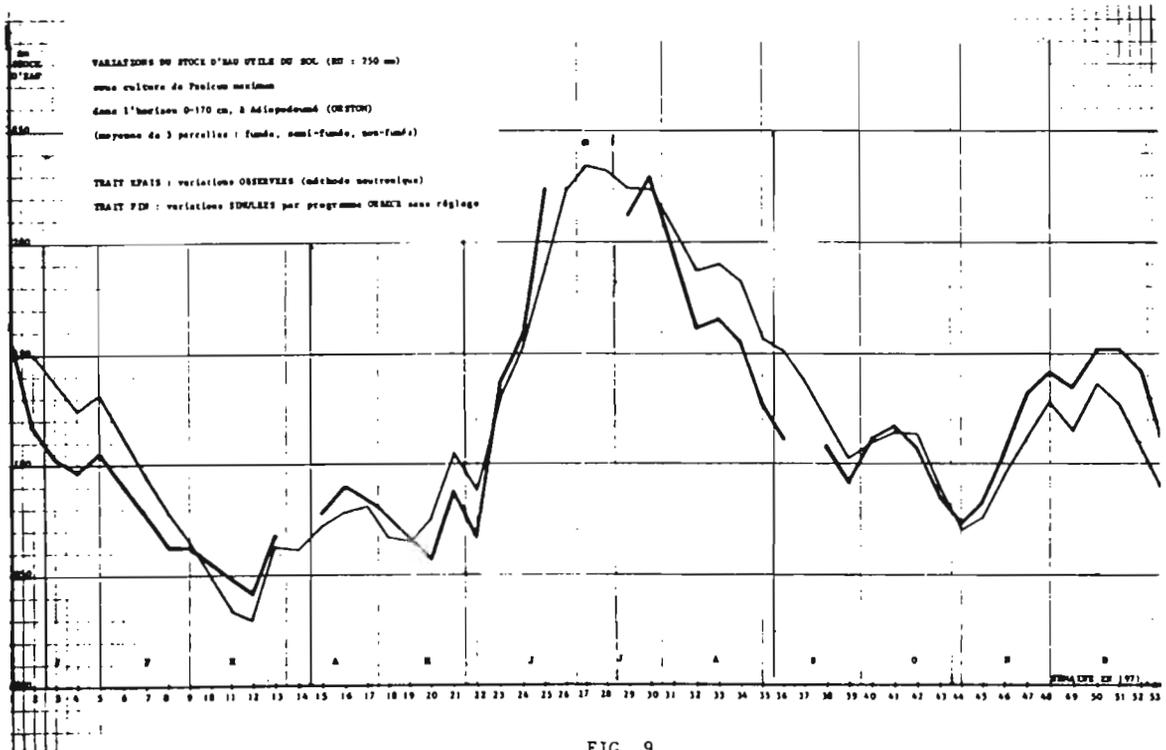


FIG. 9

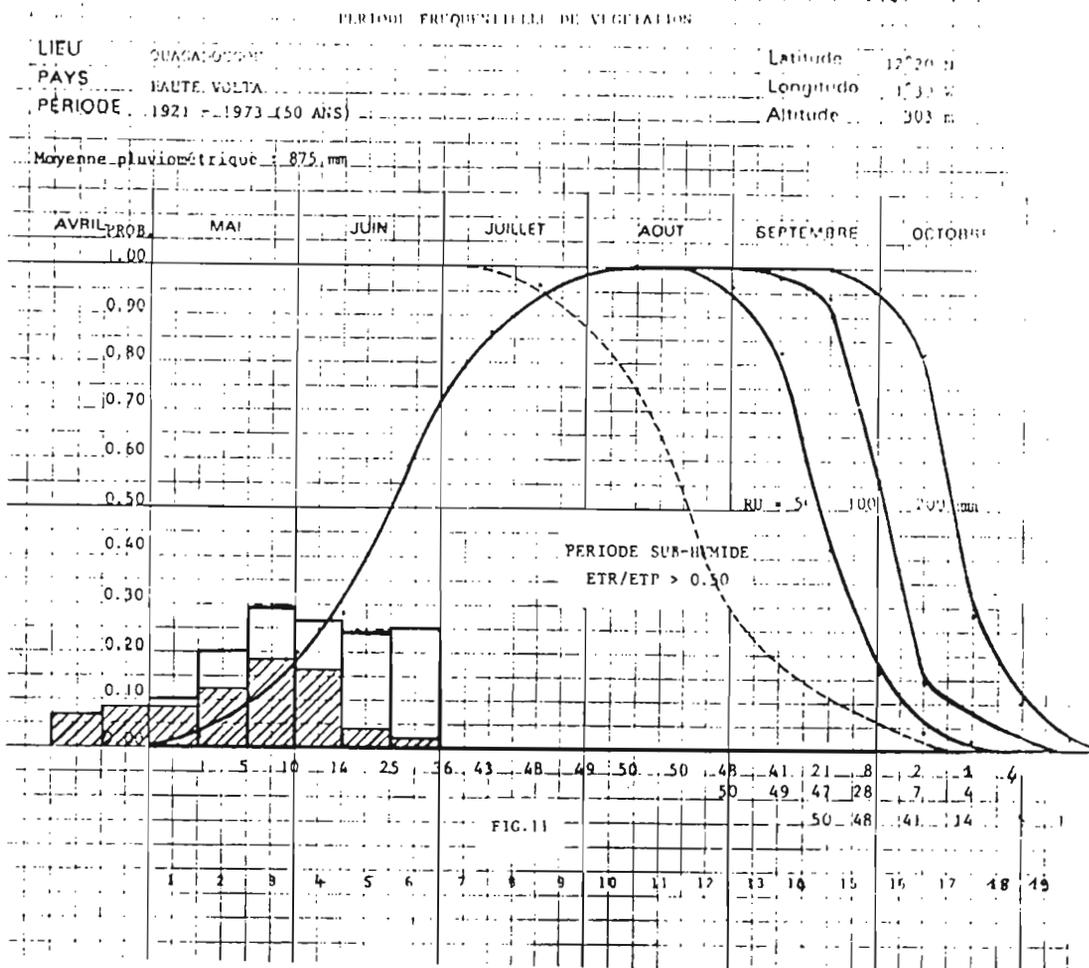
ANNEE : 1970

RU MAXIMALE : 100. MM

PERIODES :	P	I	MO	HR	FTP	K	ETH	FTR	RS	RDR	RDRC	D(RS)	D(RS)/RU	ETR/ETP	FTM-ETP	RU
*MAI ** 3EME	111.4	.0	100.0	1.00	80.3	.50	40.1	40.1	59.9	11.4	11.4	40.1	.40	.50	.0	100.0*
*JUN ** 1ERE	11.6	.0	71.5	.71	69.0	.50	34.5	34.5	37.0	.0	11.4	63.0	.63	.50	.0	100.0*
*JUN ** 2EME	76.4	.0	63.4	.63	64.0	.55	35.2	35.2	28.2	.0	11.4	71.8	.72	.55	.0	100.0*
*JUN ** 3EME	16.0	.0	44.2	.44	62.0	.60	37.2	35.9	8.2	.0	11.4	91.8	.92	.58	1.3	100.0*
*JUL ** 1ERE	94.2	.0	100.0	1.00	60.0	.70	42.0	42.0	58.0	2.4	13.8	42.0	.42	.70	.0	100.0*
*JUL ** 2EME	84.2	.0	100.0	1.00	58.0	.85	49.3	49.3	50.7	46.2	60.0	49.3	.49	.85	.0	100.0*
*JUL ** 3EME	66.5	.0	100.0	1.00	60.5	1.00	60.5	60.0	40.0	17.2	77.2	60.0	.60	.99	.5	100.0*
*AOUT ** 1ERE	67.1	.0	100.0	1.00	53.0	1.00	53.0	52.7	47.3	7.1	84.3	52.7	.53	.99	.3	100.0*
*AOUT ** 2EME	68.8	.0	100.0	1.00	50.0	1.00	50.0	49.8	50.2	16.1	100.5	49.8	.50	1.00	.2	100.0*
*AOUT ** 3EME	43.3	.0	93.5	.94	55.0	1.00	55.0	54.2	39.3	.0	100.5	60.7	.61	.98	.8	100.0*
*SEPT ** 1ERE	56.4	.0	95.7	.96	51.0	1.00	51.0	50.4	45.3	.0	100.5	54.7	.55	.99	.6	100.0*
*SEPT ** 2EME	62.2	.0	100.0	1.00	51.0	1.00	51.0	50.8	49.2	7.5	108.0	50.8	.51	1.00	.2	100.0*
*SEPT ** 3EME	11.5	.0	60.7	.61	53.0	1.00	53.0	43.0	17.7	.0	108.0	82.3	.82	.81	10.0	100.0*
*OCTO ** 1ERE	9.1	.0	26.8	.27	56.0	1.00	56.0	23.8	3.1	.0	108.0	96.9	.97	.82	32.2	100.0*
*OCTO ** 2EME	10.2	.0	13.3	.13	58.0	1.00	58.0	13.3	.0	.0	108.0	100.0	1.00	.23	44.7	100.0*
*OCTO ** 3EME	.0	.0	.0	.00	61.6	1.00	61.6	.0	.0	.0	108.0	100.0	1.00	.00	61.6	100.0*
*NOVE ** 1ERE	.0	.0	.0	.00	53.0	1.00	53.0	.0	.0	.0	108.0	100.0	1.00	.00	53.0	100.0*
*NOVE ** 2EME	.0	.0	.0	.00	51.0	1.00	51.0	.0	.0	.0	108.0	100.0	1.00	.00	51.0	100.0*
*NOVE ** 3EME	.0	.0	.0	.00	50.0	1.00	50.0	.0	.0	.0	108.0	100.0	1.00	.00	50.0	100.0*
*DECF ** 1ERE	.0	.0	.0	.00	50.0	1.00	50.0	.0	.0	.0	108.0	100.0	1.00	.00	50.0	100.0*
*DECF ** 2EME	.0	.0	.0	.00	49.0	1.00	49.0	.0	.0	.0	108.0	100.0	1.00	.00	49.0	100.0*
*DECF ** 3EME	.0	.0	.0	.00	56.1	1.00	56.1	.0	.0	.0	108.0	100.0	1.00	.00	56.1	100.0*
TOTAL	742.9	.0			1251.5		1096.5	634.9							461.6	

HILAN CLIMATIQUE : TOTAL PLUIE - TOTAL ETP : -506.6 MM

FIG.10



$$P + (I) + R + DR + \Delta H = ETR$$

Cette équation, valable au niveau de la parcelle cultivée comme à celui du bassin versant, est plus ou moins réellement approximée par les modèles de bilan hydrique - aujourd'hui nombreux - proposés dans la littérature spécialisée.

Quels que soient ces modèles, ils procèdent selon un pas de temps qui peut aller du jour (idéalement) au mois. Pour des raisons pratiques, leur pas de temps est généralement fixé à 10, 7 ou 5 jours.

C'est le cas du modèle ici présenté (fig. 9 et 10), déjà publié dans AGRONOMIE TROPICALE (FRANQUIN et FOREST, 1977), dont les termes s'énoncent ainsi :

- P : lame de pluie durant l'intervalle du pas de temps : décade, semaine ou pentade (naturelle ou calendaire).
- HD : eau disponible du sol en-deçà du point de flétrissement (pF 4,2); c'est la plus petite de deux valeurs : (RS + P) et RU.
- HR : humidité relative du sol = HD/RU.
- ETP : évapotranspiration potentielle climatique, limite d'ETM.
- ETM : évapotranspiration maximale du couvert (variable avec le développement de la culture), limite supérieure d'ETR.
- K : coefficients culturaux = ETM/ETP.
- ETR : évapotranspiration réelle = f(HR, ETP).
- RS : eau résiduelle du sol = HD - ETR.
- RDR : ruissellement-drainage = (RS + P) - RU.
- RDRC : ruissellement-drainage cumulé.
- D(RS) : déficit en eau du sol = RU - RS.
- ETR/ETP : évapotranspiration relative, indice de production de la matière sèche.
- ETM-ETR : déficit d'évapotranspiration de la culture, à combler par l'irrigation.
- (ETM-ETR)/ETM : déficit de la culture.
- RU : capacité maximale d'eau disponible du sol, variable ou constante selon que le système racinaire est annuel ou permanent.

Au moyen de ce modèle, le bilan hydrique peut être simulé pour chacune des années de l'échantillon pluviométrique, si l'on convient que les ETP, bien moins variables que les pluies, restent interannuellement constantes. L'intérêt de simuler le bilan sur un aussi grand nombre d'années que possible est d'en déduire une information de caractère probabiliste.

A cette fin, on ne traite pas fréquemment le bilan au niveau de ses variables d'entrée (pluies, irrigations éventuelles) mais au niveau des variables de sortie : RS, D(RS), RDR, ETR, ETM-ETR, et, pour ce qui nous concerne ici, ETR/ETP. Le programme ORSTAT opère, dans chacun des intervalles du pas de temps, un classement fréquentiel (par fractiles = quantiles) des valeurs interannuellement prises par chacune des variables, ce qui permet de construire des courbes analogues à celles des figures 4 et 5. (en particulier pour ETR/ETP), donc entachées des mêmes insuffisances.

Mais on peut appliquer à la variable ETR/ETP le principe de "période fréquentielle de végétation", par exemple pour les stations de OUAGADOUGOU et de BOUAKE. L'exemple de OUAGADOUGOU se rapportera au cas d'une culture annuelle; celui de BOUAKE au cas d'une culture permanente (prairie ou végétation naturelle pérenne, par exemple).

#### Exemple d'une culture annuelle à OUAGADOUGOU

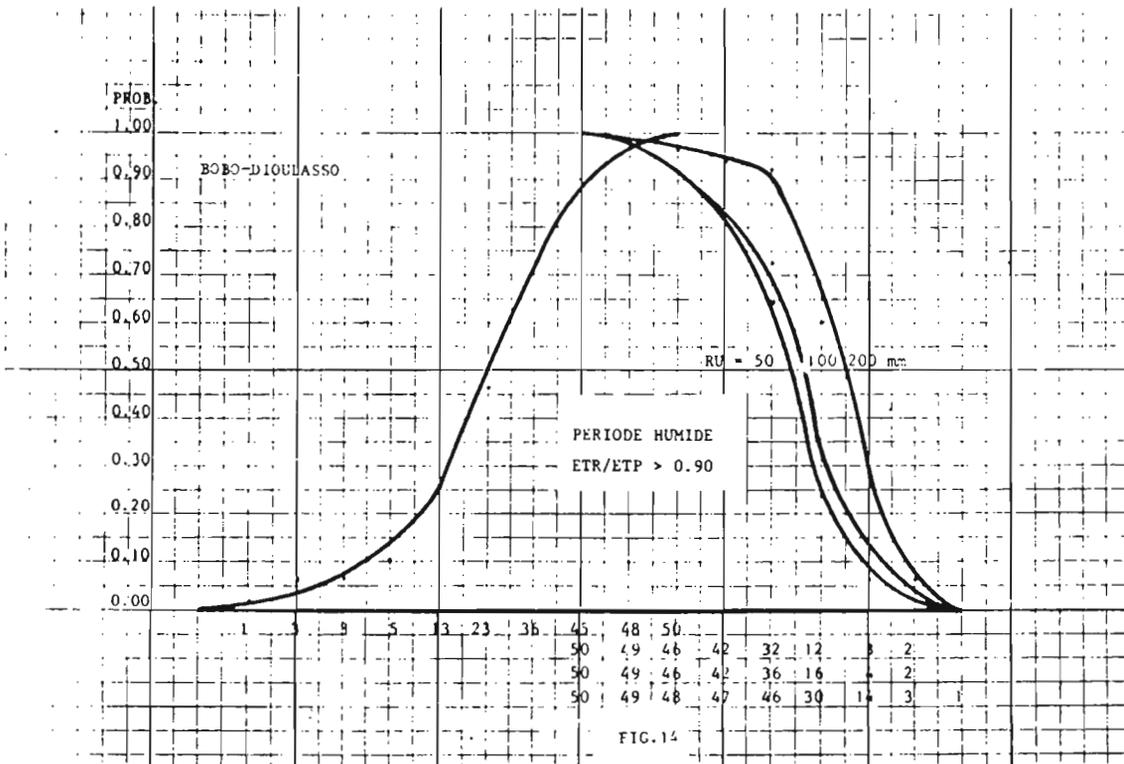
Le problème majeur, dans le cas d'une culture annuelle, est d'évaluer les valeurs d'ETM (limites d'ETR) de la culture au cours de son cycle de développement, c'est à dire les coefficients culturaux  $K = ETM/ETP$ . Cela fait, on peut procéder à une simulation du semis, en rapport avec les exigences supposées de l'espèce cultivée. Dans le cas présent, on s'est simplement fixé de semer, à compter du 1er Mai, dans la 1ère décade totalisant une lame pluviale de 35 mm, égale à  $ETP/2$  (bien d'autres combinaisons peuvent être imaginées).

L'expression fréquentielle de cet événement "semis" se traduit par la sigmoïde "d'ouverture" de la période de végétation considérée, période caractérisée en outre par trois autres événements remarquables dont les instants d'occurrence sont les décades pour lesquelles (fig. 10), soulignées dans le cas de l'année 70 :

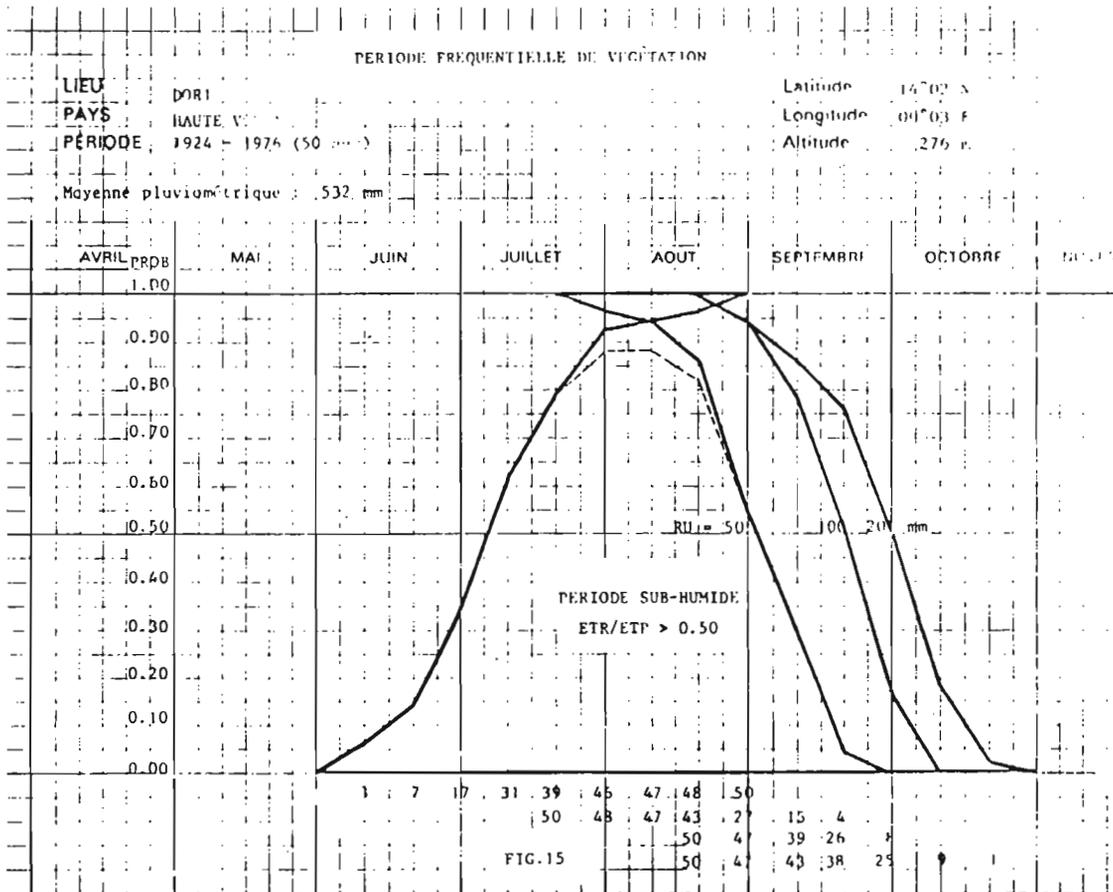
- ETR/ETP devient et reste supérieure à 0,90 (ne fût-ce que le temps d'une seule décade).
- ETR/ETP redevient inférieure à 0,90.
- ETR/ETP redevient inférieure à 0,50.

La variabilité interannuelle des positions de chacun de ces événements est concrétisée par un histogramme de densité de fréquences (non figuré) et par une sigmoïde. La sigmoïde du semis est évidemment la même dans les trois cas, mais selon que la RU considérée dans le bilan est de 50, 100 ou 200 mm, on aura trois cas de figure (figure 20) dans lesquels les souspériodes sont progressivement plus longues et donc plus aptes au calage de cycles de végétation plus longs ou au calage avec une meilleure probabilité de réussite d'une même durée de cycle.





BOBO-DIOULASSO



DORI

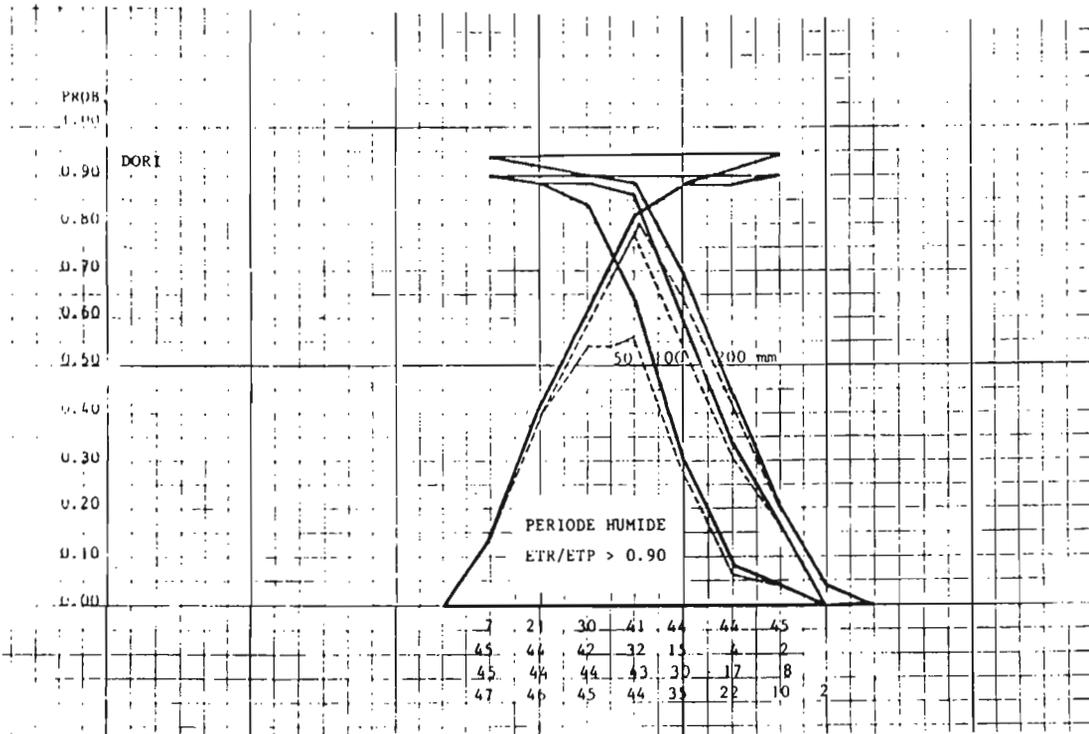


FIG. 16

ANNEE : 1955

PU MAXIMALE : 60.44

PERIODES :	0	1	HP	HR	ETP	K	ETM	ETW	RS	WDR	NDRF	D(MS)	ETM-ETP/ETM	ETR/ETP	ETM-ETR	RU
JANV	1EPE	0.0	0.0	0.1	1.00	65.0	1.00	65.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.00	0.0	65.0	0.1*
JANV	2EME	0.0	0.0	0.1	1.00	65.0	1.00	65.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.00	0.0	65.0	0.1*
JANV	3EME	7.7	0.0	7.7	1.00	70.1	1.00	70.1	7.0	0.0	0.0	7.0	0.90	0.10	70.3	7.0*
FEBV	1EPE	39.5	0.0	39.5	1.00	66.0	1.00	66.0	39.5	0.0	0.0	39.5	0.40	0.60	26.5	39.5*
FEBV	2EME	5.2	0.0	5.2	0.13	65.0	1.00	65.0	5.2	0.0	0.0	39.5	0.92	0.08	59.8	39.5*
FEBV	3EME	11.5	0.0	11.5	0.17	45.0	1.00	45.0	11.5	0.0	0.0	39.5	0.75	0.25	34.4	39.5*
MARS	1ERE	26.7	0.0	26.7	0.41	62.0	1.00	62.0	26.7	0.0	0.0	39.5	0.57	0.43	35.3	39.5*
MARS	2EME	17.5	0.0	17.5	0.31	62.0	1.00	62.0	17.5	0.0	0.0	39.5	0.78	0.22	44.5	39.5*
MARS	3EME	24.1	0.0	24.1	0.41	71.5	1.00	71.5	24.1	0.0	0.0	39.5	0.66	0.34	47.4	39.5*
AVRI	1EPE	30.3	0.0	30.3	0.77	64.0	1.00	64.0	30.3	0.0	0.0	39.5	0.48	0.52	27.7	39.5*
AVRI	2EME	57.6	0.0	57.6	1.00	64.0	1.00	64.0	57.6	0.0	0.0	39.5	0.04	0.96	2.4	57.6*
AVRI	3EME	70.8	0.0	70.8	1.00	64.0	1.00	64.0	70.8	0.0	10.4	10.4	0.01	0.99	0.4	60.0*
MAI	1EPE	32.0	0.0	32.0	0.44	53.0	1.00	53.0	32.0	0.0	0.0	60.0	0.78	0.22	14.6	60.0*
MAI	2EME	75.1	0.0	75.1	1.00	52.0	1.00	52.0	75.1	0.0	15.1	25.9	0.01	0.99	0.3	60.0*
MAI	3EME	28.9	0.0	28.9	0.62	59.4	1.00	59.4	28.9	0.0	0.0	25.9	0.77	0.23	22.2	60.0*
JUIN	1EPE	57.4	0.0	57.4	0.96	45.0	1.00	45.0	57.4	11.4	0.0	25.9	0.01	0.99	0.4	60.0*
JUIN	2EME	47.1	0.0	47.1	0.98	43.0	1.00	43.0	47.1	15.7	0.0	25.9	0.0	1.00	0.0	60.0*
JUIN	3EME	40.4	0.0	40.4	1.00	42.0	1.00	42.0	40.4	14.0	36.3	62.7	0.0	1.00	0.0	60.0*
JUIL	1EPE	9.0	0.0	9.0	0.45	39.0	1.00	39.0	9.0	0.0	0.0	62.7	0.31	0.69	12.0	60.0*
JUIL	2EME	109.4	0.0	109.4	1.00	38.0	1.00	38.0	109.4	22.0	49.8	112.0	0.0	1.00	0.0	60.0*
JUIL	3EME	26.8	0.0	26.8	0.41	45.1	1.00	45.1	26.8	5.9	0.0	112.0	0.05	0.95	2.2	60.0*
AOUT	1EPE	16.8	0.0	16.8	0.41	38.0	1.00	38.0	16.8	0.0	0.0	112.0	0.31	0.69	11.3	60.0*
AOUT	2EME	4.5	0.0	4.5	0.07	35.0	1.00	35.0	4.5	0.0	0.0	112.0	0.87	0.13	30.5	60.0*
AOUT	3EME	49.2	0.0	49.2	0.82	44.0	1.00	44.0	49.2	7.2	0.0	112.0	0.05	0.95	2.0	60.0*
SEPT	1ERE	56.4	0.0	56.4	1.00	38.0	1.00	38.0	56.4	22.0	3.0	115.6	0.0	1.00	0.0	60.0*
SEPT	2EME	39.6	0.0	39.6	1.00	40.0	1.00	40.0	39.6	20.0	1.0	117.2	0.0	1.00	0.0	60.0*
SEPT	3EME	86.5	0.0	86.5	1.00	42.0	1.00	42.0	86.5	14.0	46.5	163.7	0.0	1.00	0.0	60.0*
OCTO	1EPE	101.9	0.0	101.9	1.00	43.0	1.00	43.0	101.9	17.0	59.4	223.6	0.0	1.00	0.0	60.0*
OCTO	2EME	44.7	0.0	44.7	0.99	45.0	1.00	45.0	44.7	15.0	21.7	245.3	0.0	1.00	0.0	60.0*
OCTO	3EME	9.3	0.0	9.3	0.13	50.1	1.00	50.1	9.3	0.0	0.0	245.3	0.98	0.02	32.8	60.0*
NOVE	1ERE	16.2	0.0	16.2	0.27	40.0	1.00	40.0	16.2	0.0	0.0	245.3	0.66	0.34	31.8	60.0*
NOVE	2EME	7.8	0.0	7.8	0.13	50.0	1.00	50.0	7.8	0.0	0.0	245.3	0.96	0.04	42.2	60.0*
NOVE	3EME	19.9	0.0	19.9	0.41	51.0	1.00	51.0	19.9	0.0	0.0	245.3	0.63	0.37	32.1	60.0*
DFCE	1ERE	6.6	0.0	6.6	0.11	53.0	1.00	53.0	6.6	0.0	0.0	245.3	0.98	0.02	46.6	60.0*
DFCE	2EME	2.1	0.0	2.1	0.03	54.0	1.00	54.0	2.1	0.0	0.0	245.3	0.96	0.04	51.9	60.0*
DFCE	3EME	0.0	0.0	0.0	0.0	67.1	1.00	67.1	0.0	0.0	0.0	245.3	1.00	0.0	67.1	60.0*
TOTAL		1230.9	0.0		1465.2	1862.2		945.7							882.5	

RIAN CLIMATIQUE : TOTAL PUIE - TOTAL ETP : -837.3 MM

FIG. 17

Afin de mieux montrer l'importance de la RU dans le déterminisme des dimensions de la période de végétation, on a figuré séparément, pour OUAGADOUGOU (875 mm de pluie en moyenne) :

- d'une part (fig. 11) les sous-périodes dites "subhumides", caractérisées par les probabilités, pour ETR/ETP, d'être égales ou supérieures à 0,50.

- d'autre part (fig. 12) les sous-périodes dites "humides", caractérisées par les probabilités, pour ETR/ETP, d'être égales ou supérieures à 0,90.

Dimensions horizontales et verticales sont significativement améliorées quand augmente la capacité du sol pour l'eau disponible.

On peut comparer à OUAGADOUGOU deux autres stations ayant fait l'objet, de même, d'une simulation de semis :

- BOBO DIOULASSO (1175 mm), au sud de la Haute-Volta, pour laquelle (fig. 13 et 14), en raison de l'abondance des précipitations, une RU de 100 mm n'ajoute que peu à celle de 50 mm, au contraire de celle de 200 mm.

- DORI (530 mm), au nord de la Haute Volta, pour laquelle (fig. 15 et 16), la RU de 100 mm se montre très efficace, au contraire de celle de 200 mm (pour les cultures annuelles), en raison des faibles précipitations.

On remarquera que, dans ce dernier cas, les sigmoïdes d'ouverture et de fermeture se recoupent, délimitant une surface inférieure d'une part et une surface supérieure d'autre part. On démontre que la surface supérieure est négative et qu'elle doit être soustraite de la surface inférieure qui est positive. Il résulte de cette opération une surface finale "utile" délimitée en tireté. Cette situation de recoupement des sigmoïdes, caractéristique des périodes de végétation de courte durée, se retrouve systématiquement sous les climats à double saison pluvieuse comme à BOUAKE.

#### Exemple d'une culture permanente à BOUAKE

Le recouvrement du sol étant supposé permanent, on considèrera que  $ETM = ETP$ , d'où  $K = ETM/ETP = 1$ . Un exemple de bilan hydrique est présenté (fig. 17), avec RU de 60 mm, pour une année quelconque parmi les 50 qui constituent l'échantillon pluviométrique. Ce même échantillon est repris avec des RU de 120 et de 200 mm.

La station de BOUAKE comportant généralement une double saison pluvieuse, séparées par une "petite saison sèche", les événements remarquables, au nombre de 4 à OUAGADOUGOU (un seul maximum pluvial), vont donc être ici de 8. Chacun d'eux est signalé, dans la colonne ETR/ETP, et reporté dans la colonne de désignation des décades, par une barre concrétisant le passage d'un seuil (fig. 17). Ces événements sont ainsi notés, de 1 à 8 :

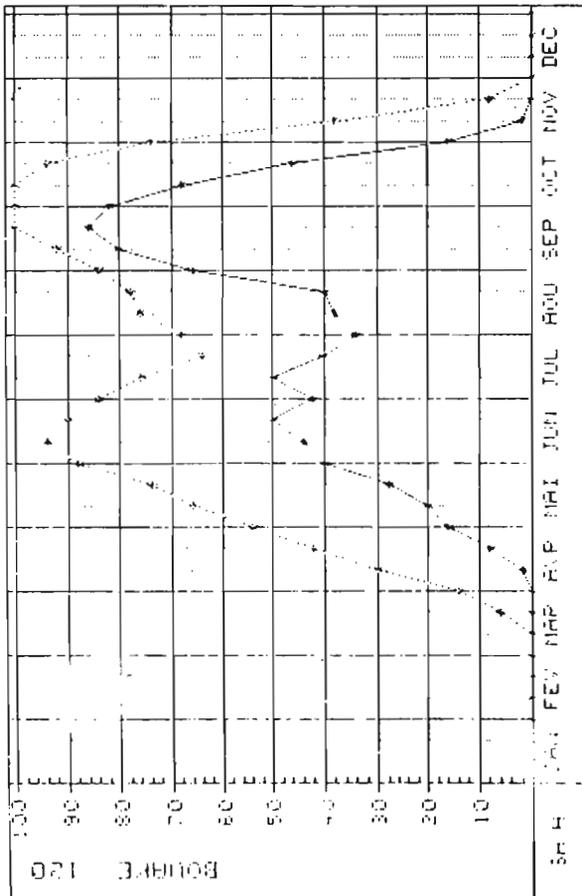


FIG. 19

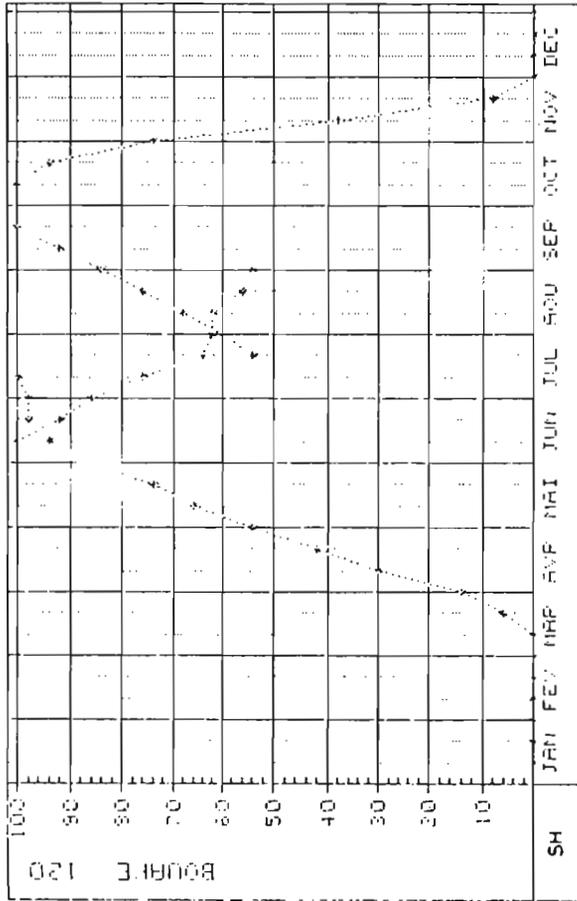
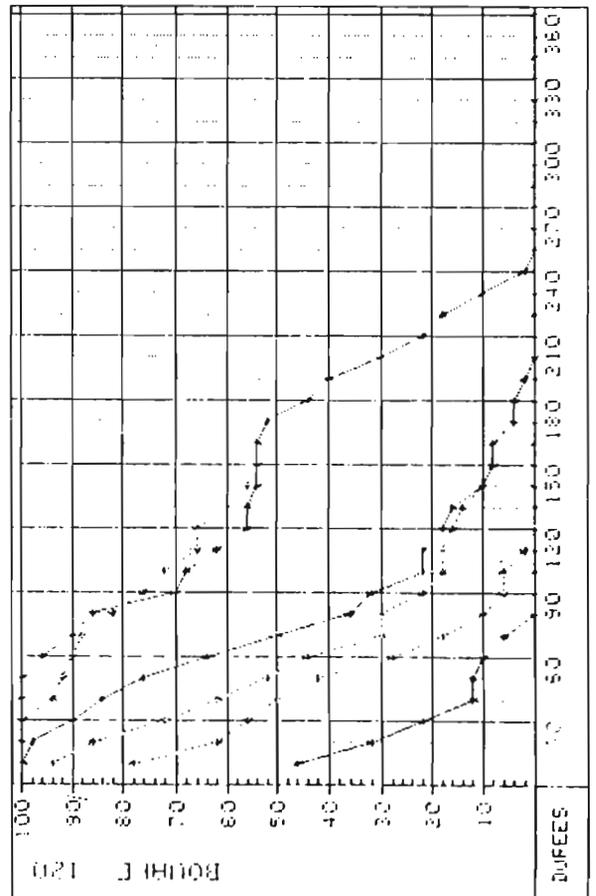
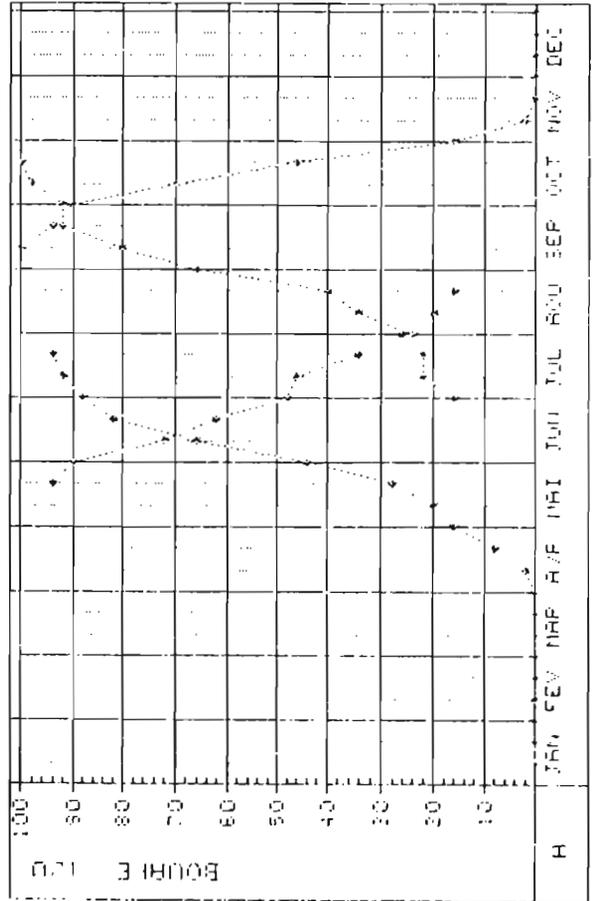


FIG. 18



	( 1 :	ETR/ETP devient et reste supérieure à 0,50.
1ère saison	( 2 :	" " " " 0,90.
pluvieuse	( 3 :	" redevient inférieure à 0,90.
	( 4 :	" " " 0,50.
	( 5 :	ETR/ETP devient et reste supérieure à 0,50.
2ème saison	( 6 :	" " " " 0,90.
pluvieuse	( 7 :	" redevient inférieure à 0,90.
	( 8 :	" " " 0,50.

Entre ces deux saisons pluvieuses, se produit généralement une "petite saison sèche" (un ralentissement des pluies) que caractérisent les fréquences d'occurrence des événements 4 et 5.

Dans les années soit très sèches soit très humides, certains de ces 8 événements ne se trouvent pas réalisés, en sorte que certaines sigmoïdes peuvent ne pas atteindre la fréquence de 100 % et/ou ne pas partir de 0 % (3, 4, 5, 6, pour ces dernières).

L'ensemble combiné de ces 8 sigmoïdes, dont les n° 3, 4, 7 et 8 sont prises symétriquement à l'horizontale, matérialise donc la période de végétation telle que définie selon les critères-seuils ici considérés : 0,50 et 0,90 de ETR/ETP. Le seuil ETR/ETP = 1 peut rarement être retenu en raison de la discontinuité de ses séquences mais tout seuil inférieur peut constituer un critère utile en rapport avec un problème spécifique.

Tandis que l'on a calculé et construit de façon manuelle les modèles fréquentiels pour OUAGADOUGOU (fig. 11 et 12), l'établissement de ceux concernant la station de BOUAKE a été entièrement réalisé par micro-ordinateur (HP 95-48), depuis l'entrée des données relatives au découpage de la période de végétation de chacune des 50 années de l'échantillon pluviométrique (8 numéros de décade, entre 1 et 36, par année-station-RU, soit 400 valeurs sur 50 ans) jusqu'au traçage des courbes. Ces courbes, qui peuvent être reproduites aisément par traceur HP 98-72-A, se présentent ainsi, pour chaque RU (ici RU120 mm à BOUAKE):

- fig. 18 : en haut, courbes brutes intersectées de la sous-période subhumide (seuils 0,50); en bas, courbes brutes intersectées de la période humide (seuils 0,90).

- fig. 19 : en haut, courbes corrigées (par soustraction des surfaces) réunies des sous-périodes subhumide et humide constituant ensemble la période de végétation; en bas, courbes de probabilités des durées des sous-périodes subhumides et humides et de la petite saison sèche, quelle que soit la position dans le temps de la durée considérée.

## LIMITES DU SYSTEME

- C'est d'abord le caractère aléatoire des séquences d'occurrence de l'évènement qui constitue la limite principale du système ici présenté. Ce n'est que dans la mesure où des séquences homogènes non aléatoires, plus ou moins longues, se retrouvent, la plupart des années, entre certaines bornes de temps, qu'il est possible d'établir des distributions de fréquences de leur début et de leur fin; c'est à dire de rendre compte statistiquement des durées et des positions dans le temps de ces séquences (voir fig. 6).

A cet égard, les pluies se montrent souvent trop erratiques pour constituer des séquences homogènes, notamment dans les régions de faible pluviosité, en particulier aux confins nord et sud du Sahara et, semble-t-il par exemple, au Nordeste brésilien. Les dépassements par les pluies de niveaux d'ETP, dont les éventualités sont beaucoup plus liées (fig. 6), constituent des séquences déjà plus homogènes et plus longues. Mais c'est la pratique du bilan hydrique, en raison du volant d'humidité que réalise le stockage de l'eau dans le sol (et d'autant mieux que la RU est plus forte), qui se prête le plus efficacement à l'élaboration du modèle, les éventualités de dépassement de niveaux d'ETR/ETP étant, selon les périodes de l'année, plus ou moins fortement liées. Au début de la saison des pluies, par exemple, les faux départs se trouvent éliminés.

Pourtant, même dans les conditions précitées de grande discontinuité des pluies aux confins du Sahara et au Nordeste, même le bilan hydrique serait inapplicable. Il est à remarquer qu'alors les éventualités de dépassement de niveaux d'ETP sont indépendantes, ce qui permet de travailler licitement avec les courbes qui les figurent.

- Une autre limite réside dans la dépendance statistique que présentent entre elles certaines sigmoïdes. Il ne s'agit heureusement pas, généralement, de sigmoïdes "réciproques" (n° 1 et 4, 2 et 3, 4 et 5, 5 et 8, 6 et 7), qui parfois s'intersectent. Dans ce dernier cas, la dépendance des sigmoïdes, sans être forcément forte, est certaine. Pour qu'il y ait indépendance, il faut en effet que, de tout point de la sigmoïde "d'ouverture" on puisse joindre tout point de la sigmoïde "de fermeture" sans retour en arrière. Or, concernant ces sigmoïdes réciproques intersectées, il semble (bien que l'on n'ait pas encore la démonstration mathématique) que la correction de surface procède en même temps à la correction de dépendance qui est inhérente à l'intersection. La question de dépendance se pose plutôt pour des sigmoïdes successives non réciproques, plus ou moins parallèles, qui vont dans le même sens : celui de l'augmentation des pluies ou celui de leur diminution (n° 1 et 2, 7 et 8, par ex.).

## APPLICATIONS

La période fréquentielle de végétation se prête notamment à des applications dans le domaine de la planification à tous les niveaux.

Au plan national, un système d'évaluation des potentialités ou ressources naturelles doit évidemment rendre compte à la fois du niveau potentiel climatique de productivité dans l'espace et de la variabilité temporelle locale de ce niveau. La période fréquentielle de végétation répond parfaitement à cette double exigence. Elle ajoute à cela son haut degré de synthèse des éléments représentatifs, prenant en compte, sur la base du bilan hydrique, les caractéristiques du sol qui déterminent la RU. Par exemple, la Côte d'Ivoire a été décrite à partir de 50 stations pluviométriques, sur la base de 3 RU (60, 120 et 200 mm), avec établissement d'un atlas d'interpolation entre les 50 stations (BDPA 1980). En outre les surfaces que constituent les modèles peuvent être pondérées par des caractéristiques énergétiques (températures, rayonnements global, photosynthétique).

Au plan régional, les modèles pourront être élaborés de façon plus spécialisée, non seulement relativement aux différents sols couverts par une même station climatique, mais aussi relativement aux diverses cultures ayant leurs exigences propres. Grâce à l'informatique, il est possible d'établir rapidement, concernant une même station climatique, autant de modèles qu'il y a de sols et de cultures diverses portées sur ces sols, multipliés encore par le nombre de simulations de semis répondant à des risques de degré croissant.

Cette question du semis ramène enfin à celle de la planification même du calendrier cultural. Celui-ci comporte aussi la préparation du sol et son entretien (jours de travail notamment), les traitements phytosanitaires (des modèles peuvent rendre compte parallèlement de la phénologie de la plante et de celle du parasite), les conditions de récolte, la satisfaction des besoins en eau (on n'a pas ici la place de montrer comment des simulations d'irrigation se traduisent par des modifications des caractéristiques de dimensions des modèles, en rapport avec le développement et la croissance des cultivars).

D'ailleurs, une application privilégiée est celle du calage des cycles de végétation en rapport avec les possibilités de développement et de croissance en matière sèche exprimées en termes de probabilité.

Mais la procédure de calage "à la meilleure probabilité" diffèrera néanmoins selon que le cultivar est ou non photopériodique. On rappellera qu'une variété strictement photopériodique (comportant une photopériode critique) sera induite à fleurir toujours à la même date, à quelques jours près, pourvu qu'on ne la sème

pas trop tard. Par contre, une variété non ou très peu photopériodique, ayant un cycle de végétation de durée constante (en fait un cycle de somme de températures constante, contrainte que l'on peut négliger, en régions tropicales, dans le cadre d'une même station; mais dont on devra tenir compte si l'on compare des stations de régimes thermiques différents) épie à date variable selon la date de semis.

#### Calage d'un cultivar photopériodique

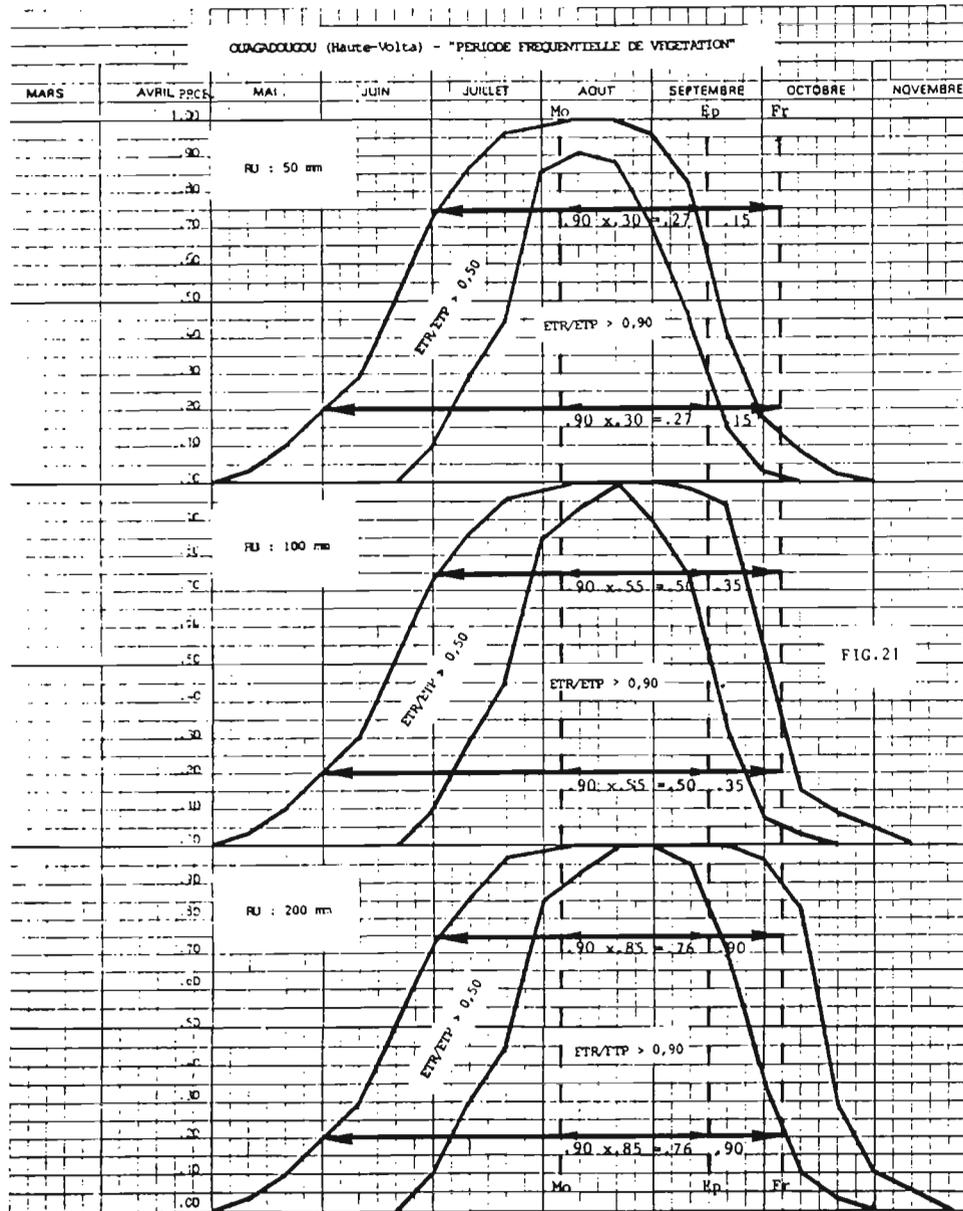
Dans la région de OUAGADOUGOU, épie autour du 15/9 les variétés traditionnelles de sorgho strictement photopériodiques, celles qui offrent le meilleur potentiel de productivité. La productivité est fonction croissante de la durée du cycle de végétation (essentiellement de celle de la phase purement végétative), durée déterminée évidemment au semis. Cette date d'épiaison, résultat d'une adaptation, correspond à la fin des grosses pluies (pluies supérieures, en total décadaire, à l'ETP), de sorte que :

- leur floraison et leur fructification échappent le plus souvent à ces pluies qui déterminent des maladies de la panicule (peut-être aussi des coulures).
- leur fructification est néanmoins assurée grâce aux lames d'eau additionnées, de provenance édaphique d'une part, d'origine pluviale directe d'autre part (dernières pluies, inférieures, en total décadaire, à l'ETP). Ces sorghos disposent de RU qui doivent varier de 50 à 100 mm et plus selon les sols.

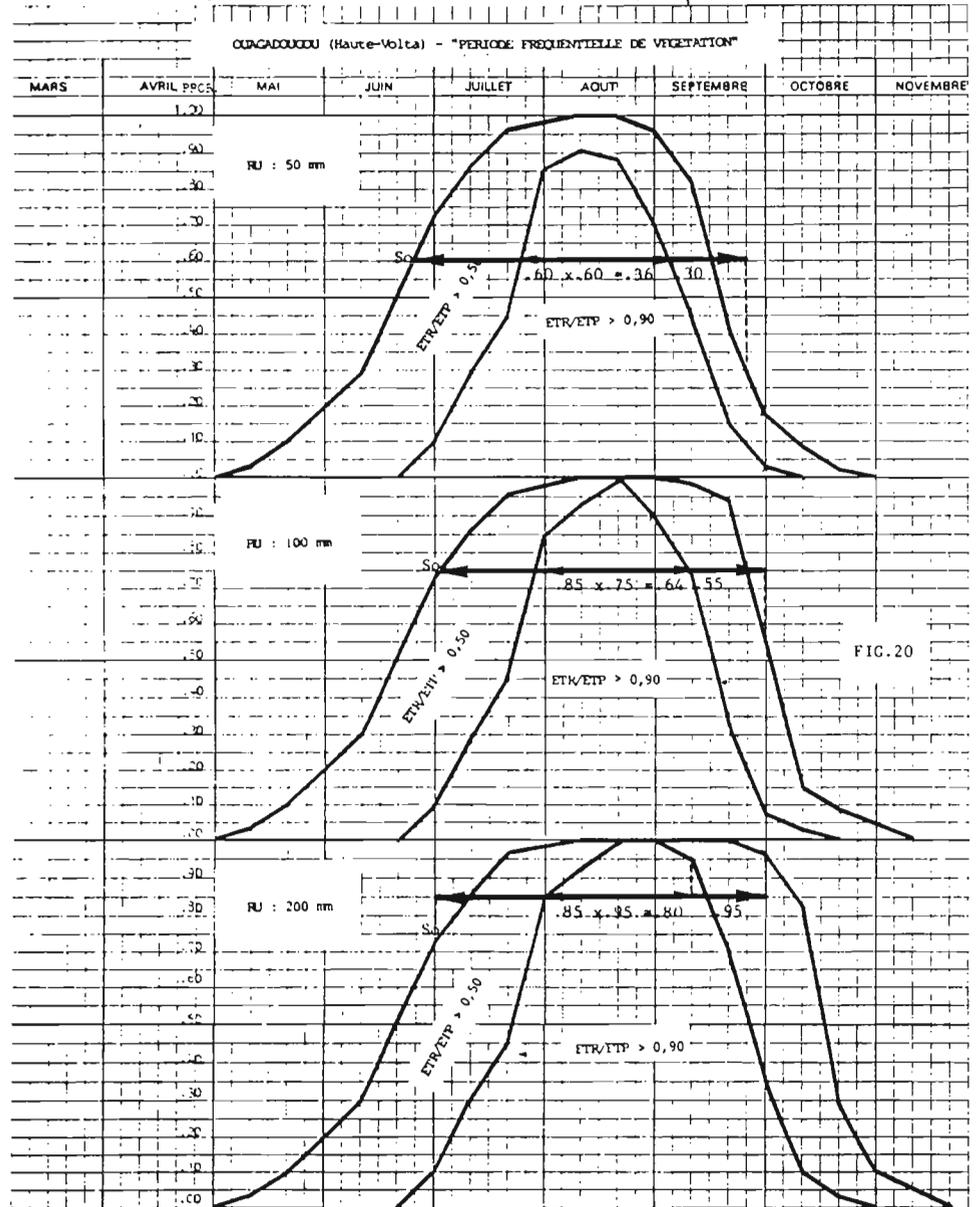
Ces cultivars sont caractérisés par une phase "montaison-épiaison/floraison" de 40 jours environ, suivie de 20 jours de fructification (stade grain pâteux, avant maturation).

La figure 20 montre le calage du cycle d'un tel cultivar, comme le détermine la date d'épiaison/floraison au 15 septembre. Les probabilités de réussite des phases de 40 jours et de 20 jours sont inscrites le long de ces phases, matérialisées par des segments de droite (les probabilités de la phase de 20 jours ne sont qu'indicatives, en raison de la liaison statistique entre les deux dernières sigmoïdes). Pour une date donnée d'épiaison (ici le 15/9), ces probabilités ne dépendent que de la RU, indépendamment donc de la date de semis (à moins que elle ne soit trop tardive). Ce n'est que la phase purement végétative, antérieure à la montaison (ici début août) qui dépend de cette date de semis, pour sa durée, laquelle conditionne un potentiel de production fonction du nombre total de feuilles ou de noeuds; l'expression de ce nombre, fonction de la nyctipériode  $\bar{N}$  (relativement à la photopériode critique  $N_0$ ) et de la somme des températures, de la germination à la montaison, est formulée fig. 20). La durée de cette phase aura

Phase végét.: Nb noeuds =  $n_0 + \frac{2A}{\pi} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{N_0/H_0}{N/H}\right) \Sigma(T_i - T_0)$



Phase végétative : Nb noeuds =  $n_0$ . A la montaison,  $\Sigma(T_i - T_0) = k_0$



65 jours pour un semis du 1er juin, mais avec une probabilité de réussite d'environ 20 % seulement. Pour un semis du 1er juillet, elle n'aura que 35 jours, avec une probabilité de réussite d'environ 75 %, mais un potentiel de production réduit. Ce n'est là qu'un exemple théorique, la simulation du semis (sigmoïde "d'ouverture" de la période de végétation) ayant peut-être été trop sévère.

#### Calage d'un cultivar non-photopériodique

Ce cas a été traité déjà concernant des cultivars de riz pluvial de 100 et de 120 jours, dans le cadre du Centre-Bénin et celui de la Moyenne-Côte d'Ivoire (TECHNIQUES ET DEVELOPPEMENT, 1973; AGRONOMIE TROPICALE, 1973). On peut néanmoins le reconsidérer pour un sorgho non-photopériodique de cycle total d'une centaine de jours : phase purement végétative, 30 jours; "montaison-épiaison/floraison", 40 jours; fructification au terme du stade pâteux, 20 jours. (fig. 21).

Contrairement à la situation d'un cultivar photopériodique (épiant à date fixe), les probabilités de réussite des phases de 40 et de 20 jours dépendent, outre influence de la RU, de la date de semis. Cet avantage permet de semer à date telle que la phase, de loin la plus critique, de "montaison-épiaison/floraison" se trouve calée "à la meilleure probabilité" entre les deux sigmoïdes centrales délimitant la sous-période "humide" (ETR/ETP plus grand que 0,90).

Selon la RU, la meilleure probabilité de calage de cette phase critique est (les deux sigmoïdes réciproques étant indépendantes) :

- RU 50 mm : 0,60 x 0,60 = 0,36.
- RU 100 mm : 0,85 x 0,75 = 0,64.
- RU 200 mm : 0,85 x 0,95 = 0,80.

Ce calage le meilleur détermine alors :

- 30 jours plus tôt la date optimale de semis  $S_0$  : RU 50, 25/6, prob. 0,60; RU 100, 1/7, prob. 0,75; RU 200, prob. 0,75. La date de semis reste pratiquement la même dans les trois cas.

- 20 jours plus tard la date de stade pâteux : RU 50, 25/9, prob. 0,30; RU 100, 1/10, prob. 0,55; RU 200, 1/10, prob. 0,95. Ici encore les dates varient peu, au contraire des probabilités.

En fait, si les dates de semis optimales  $S_0$  et celles de stade pâteux sont réelles, aux erreurs près, les probabilités ne sont qu'indicatives, en raison de la liaison entre les deux premières sigmoïdes d'une part, entre les deux dernières sigmoïdes d'une part. Elles ne sauraient de toute façon être composées avec la probabilité composée relative à la phase critique de 40 jours, sauf encore à titre grossièrement indicatif.

Le cultivar, étant non-photopériodique, ne présente pas de photopériode critique :  $N_o = 0$ . Si alors on donne à  $N_o$  la valeur nulle dans la formule de la figure 20, qui donne le nombre de noeuds, on obtient :  $N_b \text{ noeuds} = n_o$ .

Ce paramètre correspond à celui,  $k_o$ , qui mesure la somme de températures de la phase juvénile :  $\sum(T_i - T_o) = k_o$ . La somme de températures entre deux feuilles émises successivement est alors égale à  $k_o/n_o$ . Localement, en régions tropicales, on peut cependant s'affranchir des sommes de températures pour exprimer les durées des phases en nombre de jours.

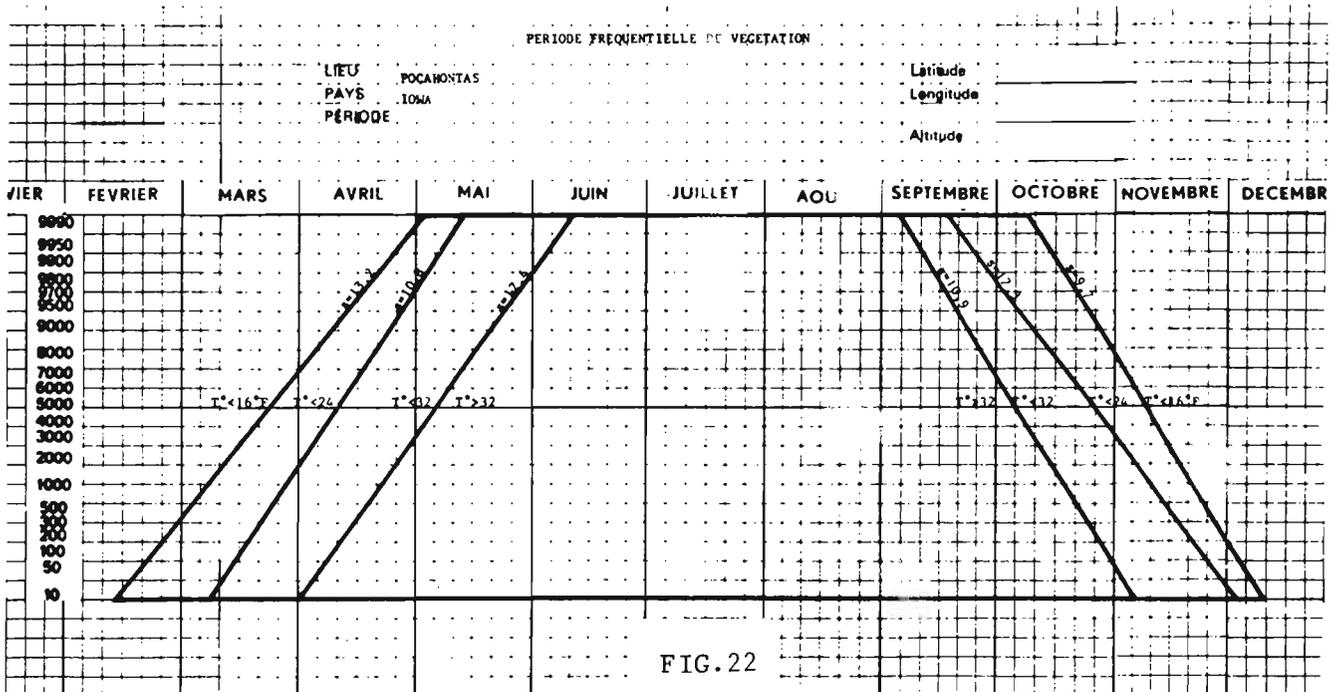
Il est enfin possible, sur la base d'une série de rendements annuels, d'évaluer l'importance relative, dans le rendement, de chacune des phases du développement de la culture, en rapport avec  $ETR/ETP$ . Ainsi JENSEN et SLETTEN (U.S. Dpt. Zgr. Conserv. Rest. Rep. 1965) ont obtenu, pour un sorgho dont les phases étaient ainsi découpées : 1, levée-montaison; 2, montaison-stade laiteux; 3, stade laiteux-maturité; l'ajustement suivant :

$$R/R_o = (\overline{ETR}/\overline{ETP})_1^{0,5} \cdot (\overline{ETR}/\overline{ETP})_2^{1,5} \cdot (\overline{ETR}/\overline{ETP})_3^{0,5}$$

où  $R$  est le rendement ajusté et  $R_o$  le rendement potentiel quand, dans chacune des trois phases,  $ETR = ETP$ . Les exposants : 0,5 - 1,5 - 0,5 mesurent l'importance relative de chaque phase dans le rendement. Il est donc légitime de caler à la meilleure probabilité, comme on l'a fait (fig. 21), dans la sous-période "humide", la phase centrale qui est la plus critique.

Supposons alors que l'on compare les calages de ce même cultivar non-photopériodique dans le cadre d'une même station mais sur des sols de RU différentes (ce que l'on vient de faire, fig. 21) quoique de fertilité identique; et aussi que l'on compare les calages du même cultivar dans des stations de régimes pluviométriques différents mais sur des sols identiques. Toutes autres choses égales théoriquement, c'est un même rendement qui serait égalé ou dépassé (36 fois sur 100 en RU 50 mm, 55 fois en RU 100 et 80 Fois en RU 200) : il correspondrait au recouvrement strict, sans débordement de part ou d'autre, par la sous-période "humide", de la phase de 40 jours d'exigence hydrique maximale (EHM :  $ETR = ETP$ ).

Si le critère "satisfaction des 40 jours d'EHM" est de loin la condition déterminante de la productivité, ce rendement identique devrait être le rendement "modal" puisqu'il correspond à la valeur de la variable aléatoire de nature hydrique (position et durée de la sous-période "humide") pour laquelle la densité de probabilité est maximale.



Ce rendement sera donc le mode de la distribution de fréquences du rendement supposée grossièrement structurée comme celle de la variable aléatoire de nature climatique (position et durée de la sous-période "humide")

Dans le cas d'une seule exigence fortement dominante vis à vis du climat, une distribution de rendements annuels devrait donc avoir toute chance de ne pas se montrer gaussienne mais dissymétrique, quoique vraisemblablement unimodale. Mais si plusieurs variables aléatoires de nature climatique sont significativement déterminantes de la fluctuation interannuelle du rendement, la distribution de fréquences de celui-ci résultera de la composition de distributions correspondant à celles de ces variates, chaque distribution étant caractérisée par un mode propre : elle pourra être plurimodale.

#### GENERALISATION AU DOMAINE ENERGETIQUE

La figure 22 présente, pour POCAHONTAS (Iowa), sous climat tempéré, une modélisation fréquentielle de périodes de végétation (plus précisément de périodes de températures non léthales) définies entre les seuils thermiques  $16^{\circ}$ ,  $24^{\circ}$  et  $32^{\circ}\text{F}$  ( $-10^{\circ}$ ,  $-4^{\circ}\text{F}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ), d'après des données de THOM et SHAW (Month. Weath. Rev., 86(7), 1958). Les distributions de fréquences des passages de seuils étant normales, les auteurs ont construit les droites de Henri correspondant aux sigmoïdes ajustées. Le long de ces droites sont inscrits les écarts-types proportionnels aux pentes.

Prises deux à deux de façon quelconque, ces droites "d'ouverture" et "de fermeture" définissent 9 périodes fréquentielles principales dans lesquelles, si nécessaire, on peut constituer des sous-périodes.

Ce système peut s'appliquer à des seuils de gelée, à des seuils de germination au début et à des seuils de non-maturation à la fin, en valeurs journalières, pentadaires, hebdomadaires, décadaires. Les seuils peuvent être des températures dites "de base" ( $T_0$ , zéro de végétation) des cultivars; des températures déterminant des événements phénologiques concernant des espèces végétales annuelles ou pérennes; et même concernant la phénologie de parasites, insectes ou cryptogames.

Des sigmoïdes relatives à des seuils de température peuvent être combinées à des sigmoïdes de seuils de rayonnement et même de seuils de conditions hydriques. Enfin, il sera possible d'incorporer à un modèle identique à celui de la fig. 22 les sommes de températures entre deux dates (de début et de fin). Pour chaque couple de dates, il y a une distribution conditionnelle de sommes de températures. Aussi nombreuses fussent-elles, l'informatique peut en venir à bout. Un tel système devrait bien convenir, en régions tempérées, à l'étude d'adaptation de cultivars de maïs, soja, etc...