

ANALYSE AGROCLIMATIQUE EN RÉGIONS TROPICALES

MÉTHODE DES INTERSECTIONS ET PÉRIODE FRÉQUENTIELLE DE VÉGÉTATION

par
P. FRANQUIN
(ORSTOM)

Les conditions hydriques peuvent être caractérisées, en agriculture, soit très simplement par la pluviométrie, soit de façon très complète, s'il est possible et nécessaire, par l'établissement, selon une échelle de temps plus ou moins fine, du bilan hydrique dans tous ses termes :

$$P + (I) \mp R \mp Dr \mp \Delta H - ETR = 0$$

où P : précipitations ; (I) : irrigation complémentaire éventuelle ; R : ruissellement ; Dr : drainage ou remontée capillaire ; ΔH : variation d'humidité du sol ; ETR : évapotranspiration réelle.

Entre ces deux extrêmes, selon le niveau opérationnel (planification, recherche, pratique agricole) et l'information disponible, diverses autres possibilités sont imaginables, l'une d'elles faisant l'objet de l'étude qui suit. Dans tous les cas, cependant, étant donné la grande variabilité des phénomènes climatiques, il importe que le modèle choisi se prête bien à l'expression fréquentielle. D'ailleurs, l'expression moyenne de la relation ci-dessus ne correspond à aucune réalité et son traitement fréquentiel n'est plus vraiment un problème avec les moyens modernes d'analyse statistique. Mais d'autres difficultés demeurent, la principale résidant dans l'élaboration du modèle qui, en régions tropicales, doit simuler la réhumectation du profil. En outre, hormis les précipitations, les termes du bilan sont généralement d'évaluation difficile. Enfin, le coût des opérations d'informatique, lors de l'utilisation du programme, est d'autant plus élevé que le modèle est plus raffiné, constituant un luxe pour bien des applications en agroclimatologie.

Aussi proposera-t-on une méthode qui, bien que fondée dans une certaine mesure sur le bilan, reste très simple, n'exige aucun moyen d'analyse statistique et se montre suffisamment efficace pour une première approche de mainte question.

DESCRIPTION DE LA METHODE

1) PRINCIPES

Les principes qui sont à la base de cette méthode ont été exposés dans des études antérieures (FRANQUIN, 1968 et 1969). Elle consiste à ne considérer dans le bilan, lors du déroulement de la saison humide, que quelques événements remarquables et les périodes qu'ils délimitent, ces événements étant choisis aussi indépendants que possible des conditions de sol et de végétation afin de pouvoir être déterminés sans ambiguïté par intersection de courbes climatiques.

La construction sur une même figure des courbes de pluviométrie P et d'évapotranspiration potentielle ETP (fig. 1) * détermine les positions de deux événements de nature purement climatique (dans la mesure où l'ETP peut être considérée comme telle) : B₁ et B₂, projections sur l'axe des temps des points d'intersection des deux courbes. L'intervalle B₁B₂ délimite ce qu'on appellera la « période humide », caractérisée par cette condition que P y est globalement supérieure à ETP, et donc ETR, l'évapotranspiration réelle, égale en principe à ETM, l'évapotranspiration maximale de la culture.

* Les figures sont données en Annexe.

Cette **période** humide est une fraction de la **saison** humide définie, distinctement de la saison pluvieuse, comme le temps continu de l'année durant lequel le stock d'eau disponible dans une profondeur de sol donnée n'est pas nul. Caractérisée, en d'autres termes, par la **permanence d'eau disponible** dans le sol (quel qu'en soit le degré de disponibilité), la saison humide débutera donc au moment, noté A_2 , où le déficit maximal du sol (supposé nu à cette époque en cas de cultures annuelles), atteint durant la saison sèche, commence à décroître sous l'effet des pluies. Elle se terminera au moment, noté C_2 , où ce déficit maximal se trouvera de nouveau réalisé, la culture ayant épuisé les réserves utilisables. Les points A_1 et C_1 situent approximativement la première et la dernière pluies (fig. 1).

Contrairement à celles de B_1 et B_2 , la position de C_2 est contingente non seulement au climat, mais aussi à la végétation et au sol, ne pouvant donc être obtenue par intersection de courbes climatiques. Sans grand intérêt pour des cultures annuelles, cet événement ne sera donc déterminé que si nécessaire en faisant, à partir de B_2 , le bilan climatique entre : d'une part, l'ETP (ou l'ETM) ; d'autre part, les pluies postérieures à B_2 , augmentées de l'excès de P sur ETP (ou ETM) entre B_1 et B_2 , excès supposé stocké dans le sol en tout ou partie.

Le cas de A_2 , début de la saison humide, n'est pas aussi net. On pourra, en première approximation, le considérer comme indépendant de la nature du sol. Sans doute, l'évaporation d'un sol nu dépend-elle de son albedo (coefficient de réflexion pour la radiation), de sa texture et de ses micro- et macro-structures. Mais on peut justifier (FRANQUIN, 1969) de situer sa position **au moment où la pluviosité croissante devient égale à la moitié de l'évapotranspiration potentielle** : $P = ETP/2$.

Compte tenu donc de ce que l'évaporation d'un sol nu dépend aussi de ses caractères spécifiques et de ce que les formules d'estimation de l'ETP se vérifient à 10 % à 15 % près, on admettra en première analyse que, quelle que soit la formule (TURC et PENMAN, notamment), le déficit du sol nu en général commence à diminuer, en régions tropicales, au moment approximatif où P devient égale à $ETP/2$, lui restant ensuite supérieure. Les positions dans le temps de l'événement A_2 étant, on le verra, figurées en fréquence, on aura d'ailleurs toujours la ressource de se fixer une fréquence tenant compte des caractères du sol.

Ainsi, les événements remarquables A_2 , B_1 , B_2 , C_2 découpent la saison humide en trois périodes (fig. 1) :

- la période « préhumide » A_2B_1 , durant laquelle P est globalement inférieure à ETP (mais supérieure à $ETP/2$) et donc ETR à ETP ;
- la période « humide » B_1B_2 , durant laquelle P est globalement supérieure à ETP, et donc ETR égale à ETM (évapotranspiration maximale de la culture) ;
- la période « posthumide » B_2C_2 , durant laquelle P redevient globalement inférieure à ETP, et ETR généralement à ETM en dépit des réserves accumulées dans le sol entre B_1 et B_2 .

II) INTERPRETATION AGRONOMIQUE

Ce modèle de découpage de la saison humide d'après ses événements climatiques majeurs s'interprète bien au plan agronomique. Cette interprétation ayant déjà été développée, on rappellera seulement que :

— la période **préhumide** A_2B_1 est celle des semis ; le semis devient en effet possible sans aléas, en principe, dès l'instant où le sol reconstitue son stock d'eau utile, c'est-à-dire dès l'instant A_2 , qu'il est possible de situer à **tout niveau de probabilité** ; la considération de cet événement donne du début de la période de végétation active une définition plus concrète que la fixation d'une première pluie dite « efficace » (pour des conditions déterminées) ; l'analyse fréquentielle de la position de A_2 est d'ailleurs faite une fois pour toutes, quels que soient la culture, le sol, le niveau de technicité, le rendement minimal espéré, etc., en sorte que l'on dispose d'une gamme de probabilités sur laquelle jouer selon les exigences ;

— la période antérieure A_1A_2 est celle du semis dit « en sec », qui bénéficiera des faux-départs de la saison humide (lorsque, après avoir dépassé $ETP/2$, P redevient significativement inférieure) ; c'est surtout celle de préparation du sol, en début de saison, quand il n'est pas possible de l'effectuer en fin de saison humide précédente ; cette préparation devient de plus en plus aisée en direction de A_2 , puis de B_1 , pour devenir très difficile et même impossible au-delà en sol lourd ;

— la période **humide** B_1B_2 est celle où les besoins en eau des cultures, alors en état de végétation très active, peuvent en principe être satisfaits entièrement, au moins globalement sinon à tout

instant ; ou bien alors ils ne le seront pas, du fait du ruissellement, ou bien ils le seront et il pourra y avoir comblement du déficit dans la zone exploitée par les racines, et même drainage au-delà ; le rendement photosynthétique et donc l'efficacité de l'eau seront d'autant plus élevés que les cultures présenteront, au temps B_1 , un indice de surface foliaire plus fort, ce qui est une des raisons de la supériorité généralement constatée des semis précoces ;

d'autre part, B_2 détermine la **fraction utile** de la floraison des plantes à type de floraison axillaire indéfinie, comme le cotonnier et l'arachide ; on constate aussi que les variétés photopériodiques (ou de cycle long) de mil et de sorgho (type de floraison terminale finie) traditionnellement cultivées, donc bien adaptées, épient au voisinage de la position moyenne de B_2 ; cet événement représente donc dans la plupart des cas la fin de la « période de végétation active » commencée en A_2 , les phénomènes de fructification-maturation se déroulant pour l'essentiel après B_2 ;

— la période **posthumide** B_2C_2 , durant laquelle se développe la fructification-maturation, s'ouvrira en conditions d'autant meilleures pour le maintien d'un état de végétation favorable au rendement que les pluies de cette période seront plus prolongées, mais surtout que le sol aura été plus profondément humecté par l'excès d'eau de la période B_1B_2 ; un point D d'intersection (fig. 1) entre les courbes de P et de ETP/2 peut encore être considéré postérieurement à B_2 , bien qu'il n'ait pas une signification agronomique aussi forte que celle de son symétrique A_2 ; on peut admettre, en effet, que tant que les pluies, après B_2 , ne sont pas redevenues inférieures à ETP/2, l'addition à la lame de ces pluies d'une lame d'eau puisée dans le sol par la culture permet à celle-ci de satisfaire son évapotranspiration maximale (ETM) ; la fin de la période de végétation active sera dans ce cas non pas B_2 mais D.

III) EXPRESSION FREQUENTIELLE

Le principal intérêt de cette figuration simple des conditions hydriques est sans doute qu'elle se prête bien au traitement fréquentiel, événements et périodes qu'ils délimitent pouvant être analysés statistiquement.

Si, en effet, on fait varier annuellement courbes de pluviométrie et d'évapotranspiration potentielle, on aura pour chaque année une position (déterminée par intersection) particulière, dans la saison, de chacun des événements A_2 , B_1 , B_2 , D (C_2 ayant une importance moindre et se prêtant mal à cette détermination parce que trop contingent au sol et à la végétation).

Pour chacun de ces événements, on construit un histogramme de fréquences d'intersections, histogramme qui se rapprochera plus ou moins de celui d'une loi normale. Normal ou non, on en tirera la courbe (ajustée, en cas de normalité, empirique sinon) de probabilité totale ou fréquences relatives cumulées, courbe de répartition en S, plus ou moins régulière si elle n'est qu'empirique (fig. 2, 4, 5), mais que l'on pourra dans une certaine mesure lisser de ses irrégularités mineures.

En pratique, on ne fera généralement varier, d'année en année, que la courbe P des pluies, celle d'ETP, beaucoup plus stable, étant fixée à sa valeur moyenne, et on ne tracera chaque année, au moyen d'une pointe fine, que les intersections de la courbe P variable avec les courbes fixes d'ETP et d'ETP/2 (fig. 2). Après quoi, on dénombre les intersections dans chaque pentade calendaire (période de 5 jours représentée par le côté d'un carreau) et on les totalise, afin d'obtenir des diagrammes plus réguliers, par périodes successives de 10 ou 15 jours, en choisissant la position de ces périodes (à partir des pentades, on peut constituer les décades de deux façons et les quinzaines de trois) qui fournit l'histogramme de distribution le plus symétrique. De cet histogramme, on passe par cumul à la sigmoïde (courbe en S) des fréquences cumulées, relatives de préférence afin de les rendre comparables.

Bien que, pour leur exploitation, il ne soit pas indispensable (on le verra, figures 4 et 5) que les distributions d'intersections répondent à la loi normale, cette circonstance sera plus favorable et, pour certaines applications du moins, l'hypothèse en sera testée. En cas d'ajustement significatif, il sera en effet possible d'affecter des limites de confiance à la moyenne, à la médiane ou à tout autre quantile (l'erreur sur la médiane, par exemple, est égale à l'erreur sur la moyenne multipliée par $3,1416/2$) et de travailler avec les courbes de densité, et surtout de répartition ajustées et non plus empiriques (observées). Les fonds de graphiques employés pour ces constructions pourront avantageusement comporter une bande graduée en échelle gaussienne (fig. 3) permettant de traduire la sigmoïde ajustée de fréquences cumulées en sa droite de Henri : la probabilité que l'événement considéré (A_2 , B_1 , B_2 ou D) soit réalisé au plus tard (ou déjà réalisé) à une date donnée (en abscisse) sera lue en ordonnée. On opérera de même avec la sigmoïde empirique si la distribution n'est pas gaussienne.

IV) INTERET DESCRIPTIF

A titre d'exemple, ces opérations ont été effectuées à l'échelle **mensuelle** pour la station agronomique de Bambey (IRAT/Sénégal, fig. 2 et 3). L'ETP calculée selon PENMAN, avec albedo de 0,20 et coefficients, recalculés par cette station (Rapport de la section de bioclimatologie de Bambey, 1970), de $0,32 + 0,40 \frac{m}{N}$, est en excellent accord avec la moyenne de trois années de mesures (même document que ci-avant) par évapotranspiromètre (courbe en tirets, fig. 2), surtout sachant que PENMAN surestime quelque peu en saison pluvieuse et sous-estime en saison sèche.

On remarquera que les étendues des distributions sont de 80 jours environ, les écarts-types étant de l'ordre de 13 jours, de sorte que 95 % des intersections se situent dans un intervalle d'une cinquantaine de jours (25 de chaque côté de la moyenne ou de la médiane). Moyennes et médianes observées et ajustées, avec des écarts-types de respectivement 2 et 3 jours, se retrouvent à l'intérieur d'une même pentade : celles du 5 au 10 juillet pour A_2 , du 25 au 30 juillet pour B_1 , du 20 au 25 septembre pour B_2 . Ainsi, les périodes de végétation active A_2B_2 et humide B_1B_2 moyennes et médianes comptent respectivement 75 jours et 55 jours. On retrouve ces mêmes caractéristiques de position et de durée sur les droites de Henri tracées en gaussio-arithmétique sur la figure 3, du fait que les distributions observées sont assez voisines d'une loi normale.

Les sigmoïdes de fréquences relatives cumulées sont ici (fig. 2 et 3) les courbes **observées** lissées de leurs irrégularités mineures.

Celle de A_2 , comme sa droite de Henri (fig. 3), indique les probabilités que P devienne (et reste) supérieure à ETP/2 **au plus tard** à toute date donnée. Ce sont encore les probabilités que l'on a de réussir le semis au plus tard à telles dates, et, réciproquement, on en tirera les **dates limites** attachées à telles probabilités de le réussir. Ce sont enfin, selon notre définition, les probabilités d'ouverture de la saison humide A_2C_2 , ainsi que de celle de la période de végétation active A_2B_2 .

Celle de B_1 , comme sa droite de Henri (fig. 3), donne les probabilités que P devienne (et reste) supérieure à ETP à toute date donnée, **au plus tard**. Ce sont donc les probabilités d'ouverture de la période humide B_1B_2 au plus tard à toute date donnée, ou encore les probabilités qu'elle soit **déjà ouverte**. La sigmoïde de B_2 , enfin, fournit les probabilités que P redevienne (et reste) inférieure à ETP, ou probabilités de fermeture **au plus tard** de cette même période.

Dans ce dernier cas, cependant, on s'intéressera plutôt à la probabilité complémentaire ($q=1-p$) de celle de « fermeture au plus tard », qui est « fermeture au plus tôt », ou probabilité que la période humide B_1B_2 soit **encore ouverte**. Elle sera donnée par la sigmoïde (et sa droite de Henri, fig. 3) **symétrique** de la première par rapport à l'horizontale (fig. 2), courbe que l'on construira (fig. 3) sur le même axe des temps que celle de B_1 (d'ouverture au plus tard), de façon à constituer un espace clos délimité par : ces courbes de B_1 et de B_2 , la base 0 % sur laquelle elles sont construites et la parallèle 100 % (à moins qu'elles ne se recoupent au-dessous comme ici). Cette surface, mieux que l'intervalle de temps entre les positions moyennes ou médianes de B_1 et de B_2 , puisqu'elle **intègre l'expression fréquentielle**, aura valeur d'indice de productivité climatique relative, ou encore de productivité primaire si on l'affecte d'un coefficient représentatif de l'intensité de la photosynthèse entre B_1 et B_2 (ou entre A_2 et B_2 si on considère la période de végétation active).

Si alors il y a indépendance des éventualités de réalisation des événements B_1 et B_2 (ce qu'en cas de doute on pourra vérifier, quoique assez laborieusement, en notant pour chaque intersection le numéro de la pentade dans laquelle elle intervient), la probabilité que la période humide (durant laquelle, rappelons-le, $ETR = ETM$) soit **déjà ouverte** (B_1) à telle date fixée et le soit **encore** (B_2) à telle autre sera égale au **produit** des probabilités totales relatives à ces deux dates. Si de plus les éventualités de réalisation de B_1 et de B_2 sont indépendantes de celles de A_2 , ce dernier produit pourra être multiplié lui-même par la probabilité que la période de végétation active soit déjà ouverte (A_2) à la date arrêtée pour la réalisation du semis.

Droites ou sigmoïdes empiriques permettront encore d'estimer la probabilité d'occurrence d'une période de végétation active (A_2B_2) ou d'une période humide (B_1B_2) de durée supérieure ou inférieure à une valeur déterminée (probabilité au dépassement ou au non-dépassement), et inversement, à condition toutefois de ne pas s'attacher aux probabilités extrêmes, pour lesquelles les ajustements sont rarement satisfaisants.

Par exemple, à Bambey, d'après les droites de A_2 et de B_2 (fig. 3), la probabilité d'occurrence d'une période de végétation active d'au moins 130 jours ou d'au plus 20 jours serait 1/50 : on constate que si, en 50 ans, une période a bien été inférieure à 20 jours, aucune n'a dépassé 110 jours. Pour

au moins 120 et au plus 30, probabilité $1/20$: la première n'a pas été atteinte en 50 ans mais deux ont été inférieures à 30. Au moins 105 et au plus 40, probabilité $1/10$: on observe en fait 4 périodes de 105 jours et 4 périodes de 45 ou moins, en 50 ans, ce qui est bon. Au moins 95 et au plus 50, probabilité $1/5$: on dénombre 11 périodes de 95 jours au moins et 9 périodes de 55 au plus en 50 ans, ce qui est excellent, etc. Pour la médiane, elle est de 75 jours, avec 3 cas égaux à 75, 23 cas supérieurs et 24 inférieurs. Si l'on admet une incertitude de ∓ 5 jours sur la durée estimée d'une période, l'accord est tout à fait convenable.

On remarquera encore que les pentes des droites de Henri sont, comme des écarts-types, des mesures comparables de la dispersion des dates d'ouverture et de fermeture de ces périodes. Enfin, à ces surfaces intégrant l'expression fréquentielle de la durée, il est encore possible d'intégrer les conditions énergétiques.

APPLICATIONS

I) GENERALITES

On vient de juger de l'intérêt descriptif général de cette méthode, intérêt qui découle essentiellement de l'expression fréquentielle simple et immédiate des phénomènes, accessible sans aucun moyen matériel de calcul statistique (une table des probabilités totales de la loi normale, pour des ajustements éventuels). Son intérêt va cependant plus loin, que ce soit en planification, pour la comparaison des possibilités régionales notamment, ou en pratique agricole, pour l'établissement d'un calendrier cultural. Même dans le domaine de la recherche, cette méthode peut constituer une première voie d'approche efficace de maint problème.

Pour la pratique agricole, un avantage de la méthode réside aussi dans son pouvoir de vulgarisation : du découpage des saisons pluvieuse et humide au moyen des trois seuls événements A_2 , B_1 , B_2 , peuvent être tirées des variables agroclimatiques codifiées qui s'identifient bien, et avec souplesse, car chacune est pondérée fréquentiellement, au langage même de l'agriculture tel qu'on le parle au ras du sol : période A_2B_2 : période de végétation active au sens physique, à laquelle on ajustera la période de végétation active, au sens physiologique, de la culture ; positions de B_1 et B_2 : début et fin des grosses pluies ; période B_1B_2 : période de satisfaction intégrale des besoins en eau ; pluies postérieures à B_2 : pluies de fin de saison, conditionnant la fructification ; pluies antérieures à A_2 : pluies de tout début de saison, conditionnant le travail du sol ; pluies de A_2 et B_1 : pluies conditionnant le départ de la végétation, donc l'importance de la couverture du sol en B_1 ; excès des pluies sur l'évapotranspiration entre B_1 et B_2 : cause éventuelle d'engorgement du sol avec asphyxie, ruissellement, érosion, cause de développement de maladies cryptogamiques, de coulure des fleurs, etc., mais aussi réserve en principe stockée dans le sol au bénéfice de la fructification, pour la survie des pâturages...

Un exemple, à Bambeï (données aimablement communiquées par l'IRAT), confirme l'usage qui peut être fait de la connaissance des positions de l'intersection A_2 pour la délimitation de l'époque des semis. A la distribution des intersections A_2 (fig. 2, de 1923 à 1970) a été superposée celle des dates de semis de l'arachide sur cette station de 1932 à 1970 (35 années). On est en droit de penser que ces semis ont été exécutés chaque année dès que possible, le cycle de 110 jours à 120 jours de la variété 28-206 excédant largement la période physique de végétation active, qui n'est que de 75 jours à 80 jours. Or, les distributions se recouvrent de façon satisfaisante, les deux médianes notamment se retrouvant dans la même pentade, du 5 au 10 juillet, qui est donc bien, à Bambeï, le début médian de la saison humide. Les écarts-types sont respectivement de 13 jours et 10 jours pour l'intersection A_2 (ou semis potentiel) et pour le semis réel, ce qui montre qu'en 35 ans l'on n'a pas rencontré les extrêmes.

Des applications plus particulières peuvent être envisagées, ainsi qu'on l'a montré déjà dans l'analyse statistique du rendement et avec l'ajustement des cycles des variétés aux conditions de déroulement de la saison humide. Les variables indépendantes de nature climatique considérées dans l'analyse du rendement ne sont autres que celles, énumérées ci-avant, tirées du découpage de cette saison : deux, trois ou quatre d'entrées seulement peuvent rendre compte de 60 % à 90 % de la fluctuation temporelle du rendement d'un mil, d'un cotonnier ou d'une arachide.

II) L'AJUSTEMENT DES CYCLES

L'ajustement du cycle de végétation d'une variété photopériodique a été traité sur le cas d'un sorgho (FRANQUIN, 1969). Pour une variété non photopériodique, le problème est assez différent, l'épiaison ou la floraison ne survenant pas à date fixe mais dépendant de la date du semis, dont la sépare une somme de températures constante. Il paraît logique de penser que le rendement sera dans ce cas essentiellement

déterminé par les positions relatives, chaque année : de la phase (ou des phases) du cycle de végétation durant laquelle ETR doit égaler ETM, d'une part, et de la période de la saison humide durant laquelle P est supérieure à ETP (période humide B_1B_2), d'autre part.

En fait, cette phase du cycle végétatif durant laquelle ETR devrait égaler ETM, phase que l'on appellera désormais d'« exigence hydrique maximale » ou d'EHM, est ardue à délimiter et tous les essais d'irrigation, au champ comme en vases de végétation, ne seront pour cette fin que de peu d'intérêt. L'effet direct d'impact des pluies sur la partie aérienne du végétal joue en effet le plus souvent un rôle qui peut être considérable et que l'on a tendance à sous-estimer. Il se manifestera chez le cotonnier par des maladies cryptogamiques, par un parasitisme accru, par la coulure des fleurs ; chez le mil et le sorgho par des pourritures de l'inflorescence ; chez le maïs par la rouille, etc. Ces effets pourront masquer ceux du développement et de la croissance sur le rendement et feront apparaître comme défavorable, lors de son analyse statistique, l'abondance des pluies durant, par exemple, la période humide B_1B_2 , alors même que l'excès de P sur ETP durant cette même période, stocké en réserve dans le sol à portée des racines, assurera une fructification plus prolongée et une maturation meilleure, augmentant le taux de floraison utile.

Au niveau de l'appareil souterrain, l'excès de P sur ETP pourra se montrer nuisible, singulièrement chez le cotonnier par exemple, en sol peu perméable. Des essais d'irrigation pourront aussi faire apparaître bénéfique le maintien de l'eau du sol dans les limites de la RFU (réserve facilement utilisable) entre la levée et le moment où la culture couvre le sol, alors que l'analyse de rendements obtenus en conditions pluviales démentira ce besoin. Cela peut s'expliquer soit par le fait qu'un certain déficit en eau à cette époque oblige la plante à développer plus efficacement son système racinaire, le mettant en état de mieux parer aux déficits aléatoires de la phase d'EHM ; soit par cette observation que des pluies trop abondantes en début de saison, antérieurement et/ou postérieurement au semis, alors que le sol est pratiquement nu, entraînent un lessivage chimique, de l'azote en particulier, qui sera déterminant dans la réalisation du rendement. Un essai d'irrigation pourra de même indiquer l'utilité du maintien de l'eau du sol dans les limites de la RFU au cours de la maturation, tandis que l'analyse du rendement, concernant le cotonnier notamment, prouvera l'effet nuisible de pluies de fin de saison trop importantes.

Il n'est finalement pas d'autre méthode actuellement que l'analyse statistique du rendement assortie si possible de quelques observations, en cours de végétation, sur le stock d'eau du sol, pour préciser les exigences d'une culture **en conditions pluviales**. Et les conclusions auxquelles alors on aboutira se ramèneront difficilement à un schéma aussi simple et global que celui qui consisterait à délimiter, dans la vie d'une culture, une phase continue d'exigence hydrique maximale (EHM).

Cette difficulté, cependant, ne paraît pas égale a priori pour toutes les cultures. Si le cas du cotonnier peut être considéré comme un extrême, du fait de sa susceptibilité au parasitisme et du phénomène de perte (shedding) des organes de fructification qui obéit à un déterminisme parfois obscur, à l'opposé se rangent les espèces que l'on cultive pour leur appareil végétatif : plantes fourragères, canne à sucre... On peut supposer, en effet, qu'en conditions pluviales leur productivité sera maximale, sur sol suffisamment perméable, pour une ETR constamment égale à l'ETM, et donc une pluviosité largement supérieure à l'ETP, ce qui ne saurait être généralement le cas des espèces dont on exploite l'appareil reproducteur, les céréales par exemple.

CAS D'UN RIZ PLUVIAL

Dans ce dernier groupe, d'ailleurs, il faut encore nuancer : le riz inondé, en particulier, doit constituer un cas limite dont se rapproche vraisemblablement celui du riz pluvial. Par analogie, un riz pluvial devrait tirer avantage d'une couverture intégrale, du semis aux approches de la maturité, de ses besoins hydriques supposés égaux à tout instant à l'ETP. On le traitera du moins ici idéalement comme tel, afin de pouvoir procéder de façon quelque peu théorique pour répondre à un ensemble de questions relatives à cette culture posées dans les termes ci-après par une société de développement agricole outre-mer :

« 1) Est-il possible de réussir une culture de riz au Dahomey central ? Quand peut-on la réussir (première ou deuxième saison) et avec quel type de variété (100 jours ou 120 jours) ?

« 2) Quelle chance a-t-on de réussir une culture de riz de 100 jours qui serait récoltée avant le 1^{er} juillet afin de faire, à la suite, une culture de cotonnier ? »

Besoins du riz pluvial (en sols sableux)	Variété de 120 jours	Variété de 100 jours
Jamais 15 jours de sécheresse totale.	Du semis au 60 ^e jour	Du semis au 40 ^e jour
P — ETP ≥ 0 en bilan sur 8 jours.	Du 60 ^e au 100 ^e jour	Du 40 ^e au 80 ^e jour
Pluie inutile	Du 100 ^e au 120 ^e jour	Du 80 ^e au 100 ^e jour

Du Dahomey central (dont le cas est traité dans une publication de la revue *Techniques et Développement*, sous le titre : « La Climatologie fréquentielle en agriculture tropicale »), on transposera à la moyenne Côte-d'Ivoire, où se pratique déjà la culture du riz pluvial. A Bouaké, en climat soudano-guinéen d'AUBRÉVILLE (agroclimat tropical subhumide pour nous), deux maximums pluvieux alternent avec une véritable saison sèche, de novembre-décembre à février-mars, d'une part, et avec un ralentissement plus ou moins prononcé des pluies, centré sur juillet-août, d'autre part. Ce dernier minimum, bien apparent sur la courbe moyenne de P (fig. 4), semble en moyenne supérieur à l'ETP alors qu'en réalité, d'après les sigmoïdes de fréquences cumulées des intersections des courbes de P et d'ETP, cette éventualité n'est que de 35 % environ. Dans 65 % des cas, on aura donc **quatre** intersections de la courbe annuelle de P avec la courbe moyenne d'ETP : B₁ et B₂ pour la première saison pluvieuse, B'₁ et B'₂ pour la seconde. Dans 37 % des cas (fig. 5), ce minimum pluvial sera même inférieur à ETP/2.

Contrairement au cas de Bambeï (fig. 2), les distributions de ces intersections ne rappellent pas la loi normale. Il n'est donc pas possible de passer de distributions ajustées aux droites de Henri. Aussi s'est-on contenté de construire sur le même axe des temps (fig. 4 et 5) les sigmoïdes de fréquences relatives cumulées de B₁ et B₂ (première saison) et de B'₁ et B'₂ (deuxième saison) simplement lissées. On dispose alors d'une représentation fréquentielle de la période humide B₁B'₂, compte tenu de son interruption dans 65 % des cas. Cette interruption sera par exemple de 75 jours au moins 20 années sur 100, de 25 jours au moins une fois sur deux, etc. De même, la durée sans interruption de la période B₁B'₂ sera de 190 jours au moins une fois sur cinq, etc.

Un examen plus attentif de la figure que définissent ces quatre sigmoïdes construites sur le même axe des temps est très instructif. On constate, en effet, qu'en dépit d'une pluviosité moyenne de 620 mm en première saison contre 515 mm en deuxième saison, les durées **médianes** de ces deux saisons sont pratiquement égales : 70 jours environ. Mais surtout, les surfaces délimitées par la partie supérieure de ces courbes et l'horizontale 50 % par exemple sont d'importance inégale, celle de deuxième saison l'emportant nettement sur la première. En conséquence, on va le voir, les conditions d'ajustement des cycles de végétation des variétés de riz pluvial vont se montrer meilleures en deuxième saison qu'en première.

On supposera que les variétés en question, de 100 et 120 jours, ne présentent pas de réaction photopériodique notable, sinon la démarche d'ajustement serait évidemment autre. On supposera aussi que, pourvu que la phase végétative (de 40 jours ou 60 jours selon la variété) soit assurée de se dérouler sous pluviosité supérieure à ETP/2 (ce qui répond à l'exigence : « Jamais 15 jours de sécheresse totale »), la condition absolument déterminante du rendement sera la satisfaction de sa phase d'EHM (ou d'« exigence hydrique maximale »), ici de 40 jours, que la variété soit de 100 jours ou 120 jours). Ces approximations permettront, en outre, d'introduire plus loin la notion de « rendement modal ».

Sur ces bases, l'essentiel de l'ajustement consistera à intercaler à la **meilleure fréquence** cette phase de 40 jours d'EHM entre les limites fréquentielles de la « période humide », ces limites étant définies par les sigmoïdes de fréquences relatives cumulées des événements B₁ et B₂ pour la première saison (fig. 4 et 5 a) et par celle des événements B'₁ et B'₂ pour la deuxième saison (fig. 4 et 5 b). Entre ces courbes, le long de l'axe des temps à leur base, on fait glisser de jour en jour (en pratique, de 5 en 5 jours) une droite dont la longueur représente, à l'échelle de cet axe, une durée de 40 jours, soit huit carreaux. L'indépendance des distributions de B₁ et B₂ étant vérifiée ou admise, ainsi que de B'₁ et B'₂, le produit des probabilités lues en ordonnées, pour les points d'intersection des sigmoïdes avec les verticales passant par les extrémités de la droite, donnera chaque fois la probabilité d'occurrence d'une « période humide » d'au moins 40 jours recouvrant cette même période particulière de 40 jours. L'une de ces probabilités composées aura la valeur **maximale**, les autres étant de part et d'autre décroissantes (tableau I).

TABLEAU I

Première saison		Deuxième saison	
Période	Probabilités	Période	Probabilités
25/04-05/06	0,42 × 0,80 = 0,34	01/08-10/09	0,42 × 0,94 = 0,40
01/05-10/06	0,50 × 0,77 = 0,39	05/08-15/09	0,49 × 0,93 = 0,46
05/05-15/06	0,58 × 0,74 = 0,43	10/08-20/09	0,56 × 0,92 = 0,51
10/05-20/06	0,64 × 0,70 = 0,45	15/08-25/09	0,64 × 0,90 = 0,58
15/05-25/06	0,72 × 0,66 = 0,48	20/08-30/09	0,77 × 0,87 = 0,67
20/05-30/06	0,77 × 0,60 = 0,46	25/08-05/10	0,88 × 0,83 = 0,73
25/05-05/07	0,82 × 0,54 = 0,44	01/09-10/10	0,94 × 0,75 = 0,71
01/06-10/07	0,85 × 0,48 = 0,41	05/09-15/10	0,95 × 0,63 = 0,60
05/06-15/07	0,88 × 0,43 = 0,38	10/09-20/10	0,96 × 0,38 = 0,36
10/06-20/07	0,90 × 0,39 = 0,35	15/09-25/10	0,97 × 0,24 = 0,23

Il est possible, quoique laborieux, de vérifier la validité de ces probabilités composées, produits des probabilités simples de deux événements considérés comme indépendants : B_1 et B_2 pour la première saison, B'_1 et B'_2 pour la deuxième saison. Pour cela, on délimite les périodes humides effectives, B_1B_2 d'une part, $B'_1B'_2$ d'autre part, dans chaque année ; puis on établit les fréquences relatives de celles qui recouvrent effectivement les périodes de 40 jours listées dans le tableau I, ce qui donne les résultats des tableaux II et III :

— **En première saison** (tableau II), l'écart moyen arithmétique z entre fréquences observées O et probabilité calculée C est égal à 0,050 (ou 5 %), avec un écart-type de 0,058. Mais si l'on décale d'un rang l'une des deux colonnes de chiffres pour faire correspondre fréquence (0,50) et probabilité (0,48) maximales, l'accord devient bien meilleur, la moyenne arithmétique de z' étant égale à 0,032 et son écart-type à 0,037. La période de 40 jours assurant le meilleur ajustement est donc celle du 20 mai au 30 juin si l'on considère les fréquences observées et celle du 15 mai au 25 juin si l'on se réfère aux probabilités calculées, mais l'incertitude sur cette dernière peut être estimée à ± 5 jours. Il est possible aussi que le décalage de 5 jours entre ces deux périodes provienne de ce que l'on a regroupé par quinzaines, un trop grand intervalle de classe, les intersections dénombrées par pentades. Quoiqu'il en soit, ne connaissant pas en principe les fréquences réelles, on s'en tiendra à la période du 15 mai au 25 juin, figurée (fig. 4) par une droite horizontale, équivalente à 40 jours, qui touche au 25 juin la courbe de B_2 . Mais il faut remarquer encore que les fréquences O sont **systématiquement** supérieures aux probabilités C : il est donc probable que les événements B_1 et B_2 ne sont pas absolument indépendants, mais l'erreur est acceptable.

TABLEAU II
PREMIÈRE SAISON

Période	Fréquence observée O	Probabilité calculée C	$O - C$ z	Probabilité calculée C	$O - C$ z'
01/05-10/06	0,31	0,39	- 0,08	0,34	- 0,03
05/05-15/06	0,40	0,43	- 0,03	0,39	+ 0,01
10/05-20/06	0,46	0,45	+ 0,01	0,43	+ 0,03
15/05-25/06	0,50	0,48	+ 0,02	0,45	+ 0,05
20/05-30/06	0,50	0,46	+ 0,04	0,48	+ 0,02
25/05-05/07	0,50	0,44	+ 0,06	0,46	+ 0,04
01/06-10/07	0,48	0,41	+ 0,07	0,44	+ 0,04
05/06-15/07	0,46	0,38	+ 0,08	0,41	+ 0,05
10/06-20/07	0,40	0,35	+ 0,05	0,38	+ 0,02
Moyenne arithmétique			0,050		0,032
Ecart-type			0,058		0,037

— **En deuxième saison** (tableau III), probabilité (0,73) et fréquence (0,77) maximales sont aussi décalées d'un rang : on s'en tiendra à la première, qui correspond à la période du 25 août au 5 octobre, figurée (fig. 4) par une horizontale « 40 jours » touchant au 5 octobre la courbe de B'_2 . Comme en première saison, le sens systématique des écarts et l'importance de certains d'entre eux laissent penser qu'il n'y a pas indépendance stricte des distributions des événements B'_1 et B'_2 . Cette dépendance n'est pas telle, pourtant, qu'elle puisse mettre en cause la validité de l'ajustement optimal, à 5 jours près, de la période de 40 jours d'EHM de nos variétés de riz.

A fortiori ne peut-elle mettre en doute ce résultat remarquable que ne permet pas de prévoir le seul examen de la courbe moyenne des pluies (sinon leur analyse fréquentielle) : **la probabilité maximale de réussir cet ajustement est d'environ 75 % en deuxième saison pluvieuse contre 50 % seulement en première, soit une différence très considérable.**

TABLEAU III
DEUXIÈME SAISON

Période	Fréquence observée O	Probabilité calculée C	$O - C$ z	Probabilité calculée C	$O - C$ z'
01/08-10/09	0,42	0,40	+ 0,02	0,33	+ 0,09
05/08-15/09	0,46	0,46	0,00	0,40	+ 0,06
10/08-20/09	0,46	0,51	- 0,05	0,46	0,00
15/08-25/09	0,54	0,58	- 0,04	0,51	+ 0,03
20/08-30/09	0,60	0,67	- 0,07	0,58	+ 0,02
25/08-05/10	0,75	0,73	+ 0,02	0,67	+ 0,08
01/09-10/10	0,77	0,71	+ 0,06	0,73	+ 0,04
05/09-15/10	0,63	0,60	+ 0,03	0,71	+ 0,08
10/09-20/10	0,46	0,36	+ 0,10	0,60	- 0,14
15/05-25/10	0,31	0,23	+ 0,08	0,36	- 0,05
Moyenne arithmétique			0,047		0,060
Ecart-type			0,058		0,074

Il y aurait ainsi 50 chances sur 100 en première saison pluvieuse et 75 chances en deuxième saison, le semis étant supposé **toujours réussi** entre certaines limites de temps qu'on déterminera plus loin, d'obtenir **au moins** le rendement (le même dans les deux saisons, toutes autres choses égales) correspondant à la satisfaction de cette phase de 40 jours d'EHM.

Mais il faut encore compter avec les aléas du semis. Ces probabilités ne valent en effet que pour des cultures dont le semis serait effectué en principe chaque année **strictement** 40 jours et 60 jours respectivement (selon la variété, de 100 jours ou 120 jours) avant le 15 mai en première saison et avant le 25 août en deuxième saison, soit aux dates **optimales** ci-après :

Première saison :

variété de 100 jours	5 avril
variété de 120 jours	15 mars

Deuxième saison :

variété de 100 jours	15 juillet
variété de 120 jours	25 juin

Or, il n'est pas concevable de semer chaque année à même date fixe. Il faut donc consentir à perdre quelque peu sur le rendement afin de disposer d'un intervalle de temps, contenant la date optimale, à l'intérieur duquel on aura toute latitude de semer sous réserve de la probabilité totale correspondant à sa borne supérieure.

En première saison, où l'on n'a qu'une chance sur deux de faire au moins le rendement correspondant à la satisfaction intégrale des besoins de la phase de 40 jours d'EHM, on ne peut se permettre de perdre beaucoup. En se fixant de ne céder que 5 % (ce qui est d'ailleurs vraisemblablement de l'ordre de l'erreur) sur la probabilité calculée 0,48 de faire au moins ce rendement, on définit d'abord, de part et d'autre du 15 mai, un intervalle de 20 jours dont les bornes sont (tableau II) le 5 mai (prob. 0,43) et le 25 mai (prob. 0,44). A cet intervalle correspondent : 40 jours plus tôt (variété de 100 jours), celui du 25 mars au 15 avril, et 60 jours plus tôt (variété de 120 jours), celui du 5 mars au 25 mars. En se reportant alors à la sigmoïde des fréquences cumulées des intersections A_2 (fig. 5), on constate qu'à la date du 15 avril correspond la probabilité totale 0,86 (d'avoir réussi le semis) et à la date du 25 mars la probabilité 0,67.

La latitude de semer **en première saison** serait ainsi de 20 jours, avec la probabilité :

de réussir 8 années à 9 années sur 10 en semant dès que possible à partir du 25 mars la variété de 100 jours, le risque d'avoir à semer ou ressemer 1 année à 2 années sur 10 après le 15 avril étant bien tolérable ;

de réussir 6 fois à 7 fois sur 10 en semant dès que possible à partir du 5 mars la variété de 120 jours, le risque d'avoir à semer ou ressemer 3 années à 4 années sur 10 après le 25 mars étant peu acceptable ; la question est alors de savoir dans quelle mesure ce risque de perte sur le rendement est compensé par la différence potentielle de rendement à l'avantage de la variété de 120 jours.

En deuxième saison, céder 5 % sur la probabilité 0,73 de faire au moins le même rendement (toutes autres choses égales) qu'en première saison, donne : $0,73 - 0,05 = 0,68$, ce qui ne détermine qu'un intervalle de 10 jours environ (tableau III) à cheval sur le 25 août. La chance de faire au moins le rendement en question est bien meilleure qu'en première saison, mais elle décroît très rapidement quand on s'écarte de la date optimale. Pour se donner un intervalle de 20 jours, comme en première saison, il faut céder environ 15 %, ce qui délimite celui du 15 août au 5 septembre. A cet intervalle correspondent : 40 jours plus tôt (variété de 100 jours), celui du 5 juillet au 25 juillet, et 60 jours plus tôt (variété de 120 jours), celui du 15 juin au 5 juillet. En se reportant alors (fig. 5 b) à la répartition de l'événement « P supérieure à ETP/2 » durant l'époque du ralentissement des pluies entre les deux saisons, on constate qu'à la date du 25 juillet la probabilité totale est de 0,80 et à la date du 5 juillet de 0,63. Une latitude de semer de 20 jours en deuxième saison impliquerait donc : pour la variété de 100 jours, qu'on le fasse dès que possible à partir du 5 juillet, avec le risque d'avoir à semer ou ressemer 2 années sur 10 après le 25 mai, et, pour la variété de 120 jours, qu'on le fasse dès que possible à partir du 15 juin, avec le risque d'avoir à le faire ou refaire 3 années à 4 années sur 10 après le 5 juillet. Une tactique pourrait être de semer la variété de 120 jours si possible avant le 5 juillet ou, sinon, celle de 100 jours à partir de cette même date.

Dans ce dernier cas, avec une fréquence double des meilleures années et de moitié des plus mauvaises, le rendement moyen serait de un tiers supérieur en deuxième saison (rapport des moyennes de la variation climatique : $50,8/37,6 = 1,35$).

Mais la proportionnalité est une supposition gratuite, la productivité de la plante ayant toute chance de varier non proportionnellement à la durée de la période humide. On voit bien ici l'intérêt que prendrait un modèle mathématique de la structure fructifère du riz (dont on possède déjà un modèle pour l'appareil végétatif ; FRANQUIN, 1972), modèle qui permettrait de pondérer la durée de cette période ou le facteur de transformation.

REMARQUES.

— Pour une exigence culturale quelconque vis-à-vis de la variabilité interannuelle du climat, le rendement modal sera donc le même, toutes choses égales par ailleurs, entre stations et entre saisons d'une même station. En conséquence, la méthode sera plus indiquée pour des études de caractère relatif que pour juger d'une situation dans l'absolu. Une probabilité voisine de 50 %, pour le rendement modal, d'être atteint ou dépassé caractérisera cependant un état d'assez bonne adaptation d'une variété au climat local, la situation étant donc d'autant plus favorable ou défavorable, au plan climatique, que la probabilité attachée à ce rendement sera supérieure ou inférieure à 50 %. Mais la décision de pratiquer ou non une culture dépendra du niveau absolu de ce rendement modal, lequel sera pour l'essentiel (au potentiel photosynthétique près) une question de sol, c'est-à-dire de fertilité naturelle ou artificielle. Supposons qu'à Abomey, le rendement modal soit de 15 q/ha sans fertilisation. Si, au premier cycle des pluies, on se contente, par exemple, de 10 q/ha trois années sur quatre, la situation sera convenable ; mais si on se fixe 20 q/ha avec la même fréquence, elle sera inacceptable, **sauf peut-être avec une fumure économique**. Une situation de rendement modal à 50 % méritera toujours d'être examinée du point de vue de la fertilisation, pour autant cependant que le critère d'évaluation de la probabilité soit sûr.

— Dans le cas d'une seule exigence fortement dominante vis-à-vis du climat, comme il vient d'être supposé pour le riz pluvial, une distribution de rendements annuels aura toute chance de ne pas se montrer gaussienne, quoique vraisemblablement unimodale, parce que dissymétrique, le mode pouvant prendre toute valeur de l'étendue de la distribution. Mais **plusieurs** variables aléatoires de nature climatique pourront être déterminantes de la fluctuation interannuelle du rendement. Alors sa distribution de fréquences résultera de la composition des distributions relatives à chacune de ces variates respectivement, chaque distribution étant caractérisée notamment par un mode propre : elle sera plurimodale, ne répondant pas au théorème central-limite, d'autant que les variates ne seront généralement pas indépendantes. Ce n'est que dans le cas d'exigences très nombreuses à l'égard de variables climatiques indépendantes et d'effet faible mais additif qu'une distribution de rendements annuels pourrait se montrer gaussienne.

GENERALISATION DE LA METHODE

— Il y a lieu de remarquer d'abord que le procédé de représentation fréquentielle de la période de végétation est indépendant de la méthode des intersections elle-même. On aurait pu fonder l'ouverture et la fermeture de la saison humide par exemple sur la réalisation de simples seuils pluviométriques. De façon générale, tout système conduisant à répartir dans le temps l'occurrence d'événements aléatoires définissant l'ouverture et la fermeture d'une période quelconque peut faire appel au présent mode de figure fréquentielle. Ces événements pourront consister en seuils relatifs aux facteurs thermique, radiatif... aussi bien qu'hydrique. Il sera même possible de combiner des sigmoïdes de fréquences cumulées correspondant à plusieurs facteurs...

— Ce modèle d'ajustement d'un riz pluvial n'est pas extrapolable sans modifications majeures à une autre culture. Ce cas paraît simple si l'on admet que la culture bénéficiera d'une période humide (P supérieure à ETP) recouvrant la totalité de la phase de végétation active, du semis à l'entrée de la phase terminale de maturation (20 jours avant maturité complète, ici), ce qui serait inexact pour un cotonnier, et aussi que l'extension de cette même condition aux derniers 20 jours ne compromettra pas, au moins quantitativement, la récolte, ce qui ne saurait s'appliquer à un mil sujet aux pourritures de l'épi. Or, il est vraisemblable que la gravité d'une maladie cryptogamique comme la piriculariose du riz (si la variété n'est pas résistante) sera modulée par le régime des pluies. Un modèle assez voisin serait peut-être celui d'une culture fourragère annuelle dont on attend le maximum de matière verte : son cycle serait ajusté de telle sorte qu'en outre la culture utilise au maximum l'excès des pluies (sur l'ETP) stocké dans le sol en période humide B₁B₂. Il convient donc d'établir dans chaque cas un schéma d'ajustement spécifique fondé sur l'expérience et, si possible, sur une analyse statistique de rendements. Ce schéma pourra comporter plus d'une variable aléatoire de nature climatique.

— Pour une étude fine, afin par exemple de caractériser aussi précisément que possible les conditions hydriques d'une station, et ce, à de multiples fins, il faudra opérer non pas à l'échelle mensuelle (concevable dans une perspective *relative*, comme ici pour comparer des saisons ou des stations), mais à l'échelle de la quinzaine ou à celle de la décade. La durée de la période humide apparaîtra alors plus courte qu'à l'échelle mensuelle, du fait que cette dernière échelle masque des déficits ($ETP - P$) qui peuvent porter sur 15 jours. L'échelle de la quinzaine dissimulera encore des déficits de l'ordre de la semaine, seule la décade étant sûre. On choisira donc la quinzaine ou la décade selon, notamment, la capacité-tampon du sol à stocker l'eau.

— Aux échelles de la quinzaine et de la décade, les fausses intersections (ou faux-départs des périodes préhumide, humide, posthumide...) sont fréquentes, la courbe des pluies pouvant revenir **au-dessous** des courbes d'ETP ou d'ETP/2 après être passée **au-dessus** une, deux et même trois fois. Les déficits correspondants ($ETP - P$ ou $ETP/2 - P$) seront cependant d'importance variable : les plus faibles seront négligeables, leur limite de signification étant estimée d'après la capacité-tampon du sol, la lame d'eau de la quinzaine ou décade précédente, la résistance de la plante à la sécheresse, le niveau de rendement attendu, etc. L'important est de se fixer une norme et de s'y tenir. Pour plus de souplesse encore, et donc d'efficacité, dans l'application de la méthode à des problèmes variés, on pourra se tracer des courbes d'évapotranspiration de niveau supérieur ou inférieur à ETP et à ETP/2. Certains spécialistes considèrent par exemple que l'ETR (et même l'ETM) ne dépasse jamais 0,8 ETP à 0,9 ETP, quoique peut-être seulement en moyenne et non de façon instantanée. Pour tenir compte au contraire de ces valeurs instantanées, on pourra se tracer une courbe de niveau égale à 1,1.ETP ou 1,2.ETP, ou 1,3.ETP... Pour se montrer plus exigeant concernant le semis, on se donnera ETP/1,75 ou ETP/1,50... encore que, la distribution des fréquences d'intersections ayant été établie pour ETP/2, on disposera déjà du choix de la probabilité de réussite ou de la date-limite. Avec certains objectifs : date à laquelle un pâturage permanent peut être livré au bétail en début de saison, date à laquelle pourront commencer les travaux du sol (de caractéristiques données), il pourra être utile de se tracer aussi, par exemple, les courbes ETP/5, ETP/4, ETP/3...

— En toute rigueur, il conviendrait d'évaluer cycles et périodes non pas en nombres de jours, mais en « sommes de températures », une différence de un à deux degrés durant la phase de végétation active pouvant présenter une signification considérable pour le développement de la culture (et donc sa production « de nombre »), d'où l'intérêt d'élaborer des modèles mathématiques de la structure et du développement des espèces cultivées (FRANQUIN, 1966, 1970, 1972), permettant d'intégrer les conditions énergétiques aux conditions hydriques.

— On parvient aux mêmes ajustements* qu'avec la méthode des intersections, à 5 jours près, de façon plus directe (mais plus onéreuse), au moyen d'une analyse fréquentielle des pluies (par décades ou quinzaines, ou vingtaines... glissant de 5 jours en 5 jours) et connaissant les évapotranspirations potentielles moyennes. Mais ce procédé ne donne pas de la période fréquentielle de végétation active cette « vue » de ses caractéristiques (position, durée, dispersion des événements liée à la pente des sigmoïdes, potentiel...) que procure la méthode des intersections. Les deux approches d'ailleurs se complètent, l'analyse fréquentielle des pluies permettant l'exploration des conditions hydriques à l'intérieur des diverses périodes délimitées par la méthode des intersections. L'information tirée de cette combinaison devrait même pouvoir rivaliser avec celle que produirait une analyse fréquentielle du déficit hydrique.

— Une difficulté réside dans l'évaluation du stock d'eau du sol dans cette construction justement rendue possible par le fait que l'on considère des événements indépendants (au moins en première approximation) des conditions de sol et de végétation. L'eau du sol est théoriquement égale à l'excès de P sur ETP (ou ETM) entre B_1 et B_2 . Cet excès se trouve représenté en moyenne, sur la figure 1, par la surface comprise entre les courbes de ces deux termes et peut être évalué aisément de date en date, pour toute année particulière, à condition de tracer entièrement la courbe de P de cette même année (celle d'ETP restant constante). De cette évaluation, il sera encore possible de retrancher éventuellement les parts du drainage profond, du ruissellement, sur la base d'hypothèses ou d'observations concernant tel sol particulier. Ce qu'il en restera au moment B_2 pourra dès lors faire l'objet d'un bilan climatique en vue de la détermination de la position de C_2 , comme déjà expliqué plus avant.

Mais, en général, la contrainte du sol à l'égard de l'eau pourra être interprétée plus simplement du fait que tout événement, caractérisé fréquentiellement, offre une gamme de choix de probabilités et de dates-limites. C'est ainsi que le début de la période de végétation pourra être estimé à un niveau de probabilité plus faible pour un sol léger, exigeant moins d'eau pour assurer le départ de la végétation,

* Voir « La climatologie fréquentielle en agriculture tropicale » dans *Techniques et Développement*.

que pour un sol lourd ; que sur sol à forte capacité de rétention, la fin de la période de végétation active, en B_2 , pourra être située à un niveau de probabilité plus faible que sur sol de petite capacité... Il en ira d'ailleurs de même concernant tout autre phénomène : par exemple, on se fixera de semer un mil, très résistant à la sécheresse après levée, au plus tard à la date correspondant à la probabilité 25 % ou 30 %, etc., tandis que pour une arachide la probabilité pourra être supérieure à 80 %.

— Enfin, on ne saurait exclure des modifications et des perfectionnements à cette méthode conçue pour rester non seulement souple, mais évolutive.

BIBLIOGRAPHIE

FRANQUIN (P.), 1966. Les équations climatiques du développement. Intérêt agronomique.

L'Agron. Trop., 1966 (12), 1370-81.

—, 1967. Analyse agroclimatique en régions tropicales. Les conditions hydriques.

Cah. ORSTOM, sér. Biol., n° 5, 15-24.

—, 1968. Analyse agroclimatique en régions tropicales. Saison pluvieuse et saison humide. Applications.

Cah. ORSTOM, sér. Biol., n° 9, 65-95.

—, 1970. Modèles mathématiques de structures chez les végétaux. I. Principes de structure et production de nombre.

Cah. ORSTOM, sér. Biol., n° 14, 77-126.

—, 1972. Modèles mathématiques de structures chez les végétaux. II. Relations de structure.

Cah. ORSTOM, sér. Biol., n° 17, 3-21.

ANNEXE

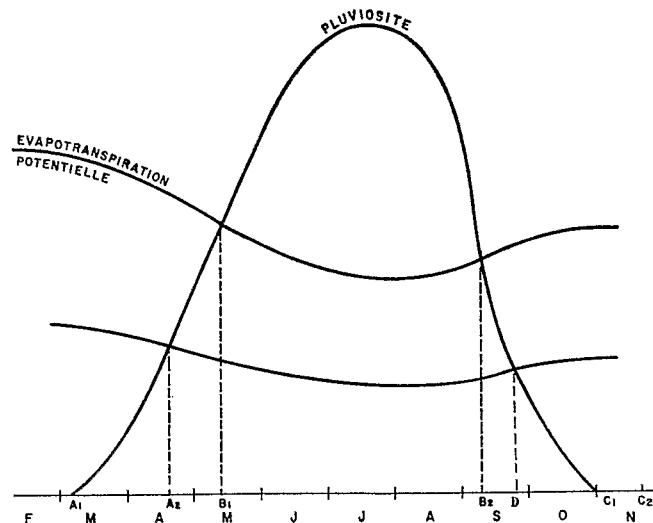


Figure 1.

A_1-C_1 : Saison « pluvieuse ».

A_2-C_2 : Saison « humide »

A_2B_1 : période préhumide.

B_1B_2 : période humide.

B_2C_2 : période posthumide.

A_2-B_2 (ou A_2-D) : période physique « de végétation active ».

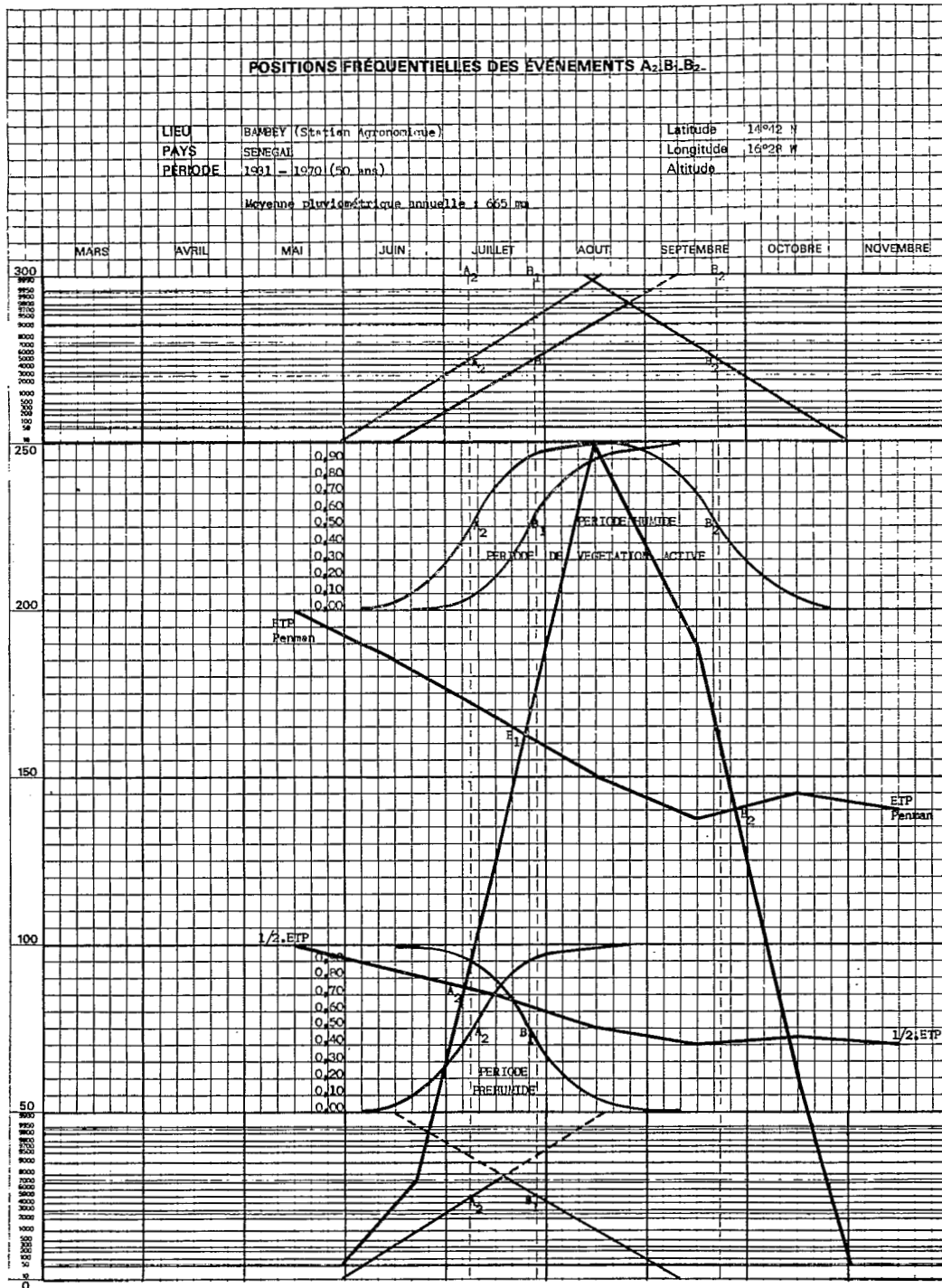


Figure 3 (500/1.000).

Périodes fréquentielles à Bambey. La surface délimitée par les sigmoïdes de fréquences relatives cumulées des événements A₂ et B₂-symétrique ou par les droites correspondantes (en échelle gaussienne) est une représentation de la période physique « de végétation active » A₂-B₂, qui intègre la fréquence de ses variations de position et de durée. La surface délimitée par les sigmoïdes ou droites de B₁ et B₂-symétrique est une représentation fréquentielle de la période humide (ETP = ETM en principe). Celle qui est délimitée par les sigmoïdes de A₂ et B₁-symétrique représente fréquentiellement la période préhumide (ETP/2 < P < ETP). Ces sigmoïdes ou les droites correspondantes permettent notamment d'estimer les fréquences au dépassement ou au non-dépassement de périodes de durée donnée, et inversement.

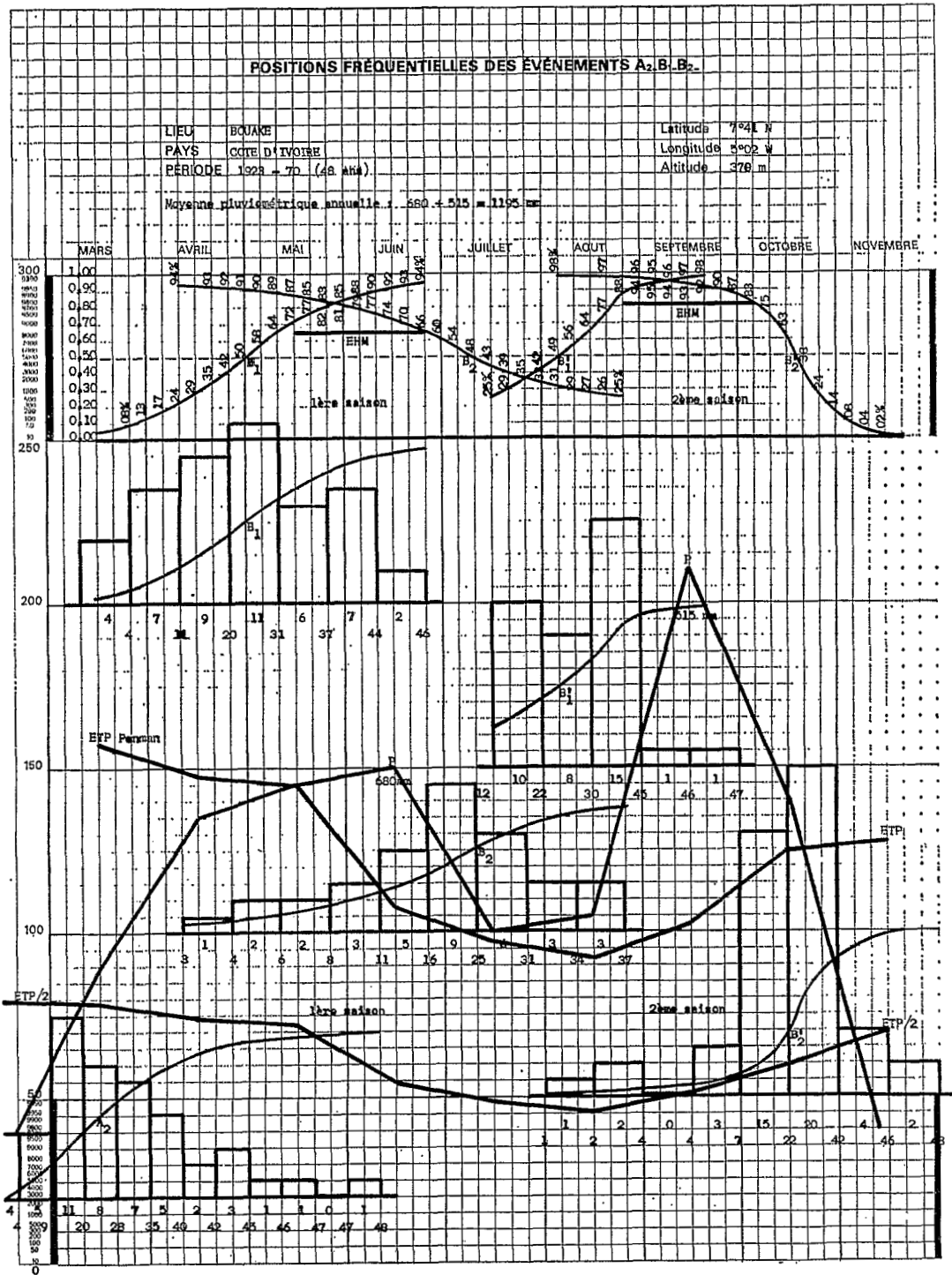


Figure 4 (500/1.000).

Période fréquentielle à Bouaké. Les histogrammes de fréquences ne rappellent pas la loi normale : on utilise les sigmoïdes de fréquences relatives cumulées empiriques, simplement lissées de leurs irrégularités mineures. La répartition des pluies comportant deux cycles séparés par un ralentissement (petite saison sèche), les intersections des courbes de P et d'ETP déterminent (dans 65 années sur 100) quatre événements : B₁ et B₂ pour le premier cycle, B₁' et B₂' pour le deuxième. Dans le haut de la figure, les sigmoïdes relatives à ces quatre événements délimitent en fréquence la période humide (ETM en principe). Pour faciliter la lecture, les fréquences relatives ont été notées le long de ces sigmoïdes à leurs intersections avec les limites entre pentades. Ainsi, on peut voir que 35 années sur 100 la pluie restera supérieure à ETP en petite saison sèche. Les deux droites EHM inscrites respectivement dans les surfaces relatives aux premier et deuxième cycles des pluies figurent les 40 jours d'« exigence hydrique maximale » du riz pluvial ajustées à la meilleure fréquence possible.

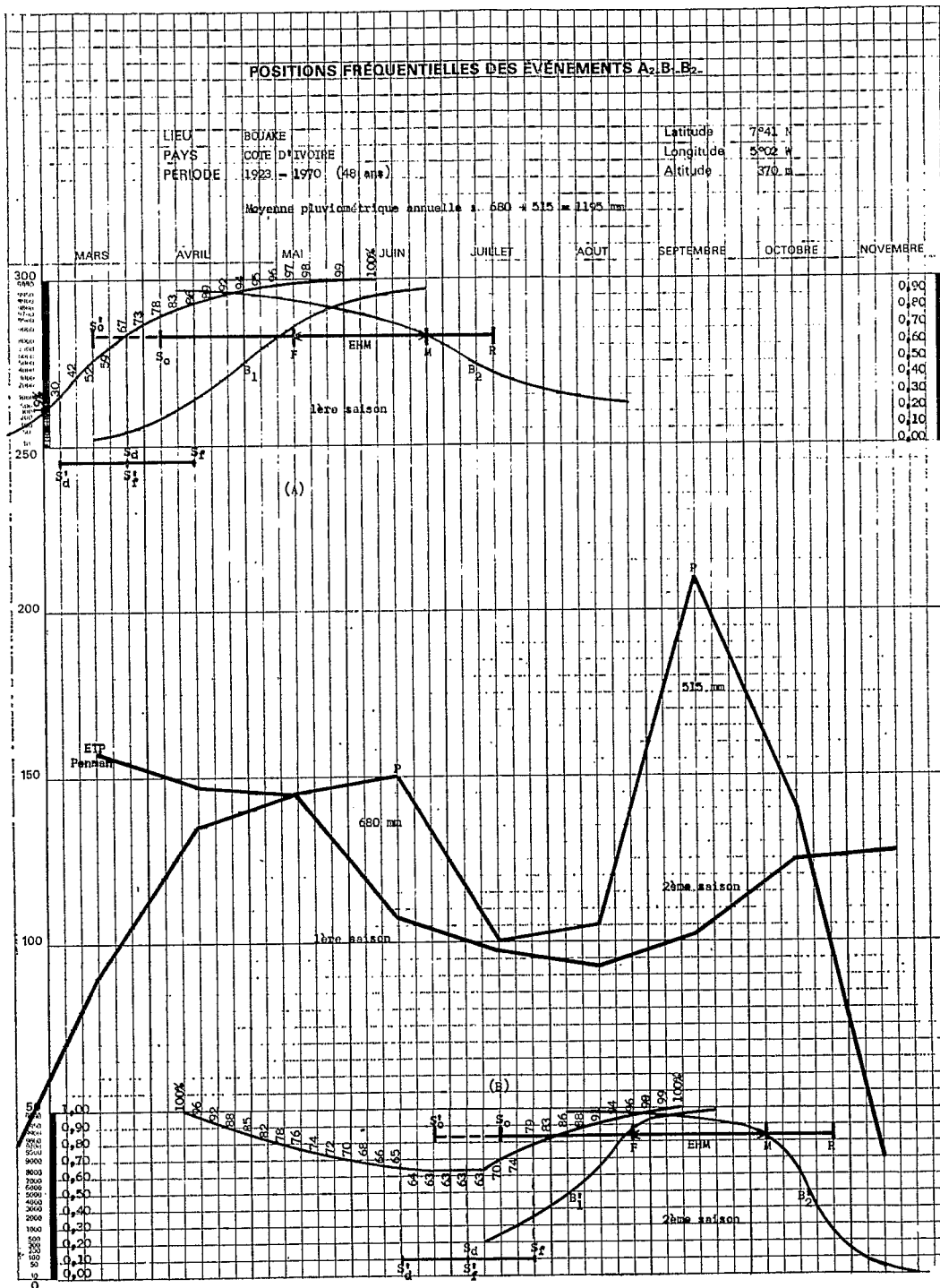


Figure 5 (500/1.000).

Représentation distincte, pour Bouaké, des périodes de végétation active du premier cycle (A, en haut) et de deuxième cycle (B, en bas), les fréquences relatives ayant été notées le long des courbes relatives à A₂ (premier cycle) et A₂' (deuxième cycle). Les droites « S₀-F-M-R » figurent le cycle de végétation total du riz pluvial de 100 jours. EHM est la phase d'« exigence hydrique maximale » de 40 jours ajustée à la plus haute fréquence entre les sigmoïdes de B₁ et B₂ (premier cycle, en haut) et celles de B₁' et B₂' (deuxième cycle en bas).

S₀ et S₀' : dates de semis optimaux des variétés de 100 jours et de 120 jours.

S₀-S₁ et S₀'-S₁' : latitudes de semis des variétés de 100 jours et de 120 jours.

RESUME. — *Que l'on caractérise les conditions hydriques par la simple pluviométrie ou par le bilan le plus complet, il importe que l'information soit traitée statistiquement étant donnée l'extrême variabilité des phénomènes climatiques. Entre la première éventualité souvent trop élémentaire et la seconde généralement trop compliquée et rarement calculable, l'auteur propose un modèle pour délimiter en position et en durée la période physique de végétation. Ce modèle, qui s'interprète bien au plan agronomique, se prête aisément à l'expression fréquentielle. Parmi ses diverses applications possibles aux différents niveaux de l'agriculture (planification, recherche, pratique agricole), l'une, l'ajustement du cycle de végétation d'une culture aux caractéristiques fréquentielles de la période de végétation, fait l'objet d'un développement important.*

SUMMARY.—**AGROCLIMATIC ANALYSIS IN TROPICAL AREAS. INTERSECTION METHOD AND "FREQUENTIAL" GROWING SEASON.**

Whether water conditions are characterized by simple rainfall or the most complete balance, information must be statistically treated because of the extreme variability of the climatic phenomena. Between the first possibility which is often too elementary and the second one which is generally too sophisticated and can rarely be calculated, the author suggests a model to define in position and time the growing season. This model which can be easily interpreted at the agricultural level is well suited to the "frequential" expression. One of its various possible applications to the different agriculture levels (planning, research, agricultural practice), the adjustment of the growth cycle of a crop to the "frequential" characteristics of the growing season, is largely discussed.

RESUMEN. — **ANALISIS AGROCLIMATOLOGICO EN LAS REGIONES TROPICALES. METODO DE LAS INTERSECCIONES Y PERIODOS FRECUENCIALES DE VEGETACION.**

Cada vez que se trata de caracterizar las condiciones hídricas, mediante un simple estudio de pluviometría o mediante un balance más completo, es necesario un tratamiento estadístico de la información, teniendo en cuenta la gran variabilidad de los fenómenos climatológicos. Entre el primer método, muchas veces demasiado elemental, y el segundo, generalmente demasiado complejo, se propone un modelo para determinar la localización y la duración del periodo físico de vegetación. Este modelo, que se interpreta bien en el plano agronómico, permite también una expresión frecuencial. Entre las diversas aplicaciones posibles a los distintos niveles de la agricultura (planificación, investigación, práctica agrícola), el autor insiste en la adaptación del ciclo vegetativo de un cultivo a las características frecuenciales del periodo de vegetación.

L'AGRONOMIE TROPICALE

—
Extrait du Vol. XXVIII, nos 6-7
JUN-JUILLET 1973
—

ANALYSE AGROCLIMATIQUE EN RÉGIONS TROPICALES MÉTHODE DES INTERSECTIONS ET PÉRIODE FRÉQUENTIELLE DE VÉGÉTATION

par
P. FRANQUIN
(ORSTOM)

26 NOV 1973

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

no 6469 Agro