

La climatologie fréquentielle en agriculture tropicale

L'expression fréquentielle des phénomènes relevant du climat s'impose en agriculture tropicale du fait de la grande variabilité de durée et de position dans le temps de la période physique de végétation. Cette expression fréquentielle s'applique aussi bien au modèle le plus perfectionné de bilan hydrique qu'aux seules pluies. Entre le premier terme généralement trop compliqué et le deuxième souvent trop rudimentaire, l'auteur propose un intermédiaire, avec exemple d'application au problème de l'ajustement du cycle de végétation d'un riz pluvial aux conditions hydriques du Dahomey central.

Que ce soit en planification, en recherche ou en pratique agricole, les conditions hydriques seront formulées, selon le besoin, en simples termes de *pluviosité* ou en termes de *bilan hydrique*, lequel rend compte aussi des pertes par évapotranspiration.

Aussi conviendra-t-on de désigner par saison « pluvieuse », évidemment, la période qui va des premières aux dernières pluies et par saison « humide » celle durant laquelle le déficit en eau du sol n'est pas maximal. Caractérisée donc par la permanence d'eau disponible pour la culture (quel que soit d'ailleurs à tout moment le degré de disponibilité), la saison humide s'étend de l'instant où, sous l'effet des premières pluies, le déficit du sol nu (en cas de cultures annuelles) commence à diminuer, jusqu'à l'instant où, passées les dernières pluies et sous l'effet de l'évapotranspiration, ce déficit est redevenu maximal. On distinguera donc bien une saison pluvieuse notée A_1-C_1 , d'une saison humide notée A_2-C_2 (fig. 1).

En agriculture tropicale, un point très important est que, dans un cas comme dans l'autre, cette formulation soit établie de façon fréquentielle.

La saison pluvieuse

Les limitations d'application, en agriculture, du concept de pluie « moyenne » ou de saison pluvieuse « moyenne » ont conduit à

la notion de pluie « utile » et de saison pluvieuse « utile » délimitée par les première et dernière pluies « efficaces », dont les termes doivent être analysés statistiquement.

L'efficacité

L'efficacité peut être caractérisée — de bien des manières — en fonction soit de conditions moyennes et générales, valables pour l'ensemble du système de culture, soit au contraire de conditions particulières à chacun des éléments composants de ce système, telles que les exigences d'une variété donnée cultivée sur un type de sol particulier, en vue d'un certain niveau de rendement, etc. Dans le dessein de délimiter la durée et la position de la saison pluvieuse utile, on considérera par exemple comme première pluie efficace celle de 20 mm au moins en 24 heures ou de 30 mm en 48 heures ou de 35 mm en 72 heures, pourvu qu'elle soit suivie dans un délai fixé d'une pluie susceptible de la relayer, etc.

Or une définition aussi large vaut sans doute au niveau de la planification régionale mais une telle démarche générale fondée sur des caractéristiques moyennes de végétation et de sol ne peut prétendre rendre tous les services qu'on en attend parfois dans la pratique agricole, l'efficacité d'une lame de pluie étant contingente non seulement aux conditions climatiques locales mais tout autant aux exigences propres de la variété, aux caractères du sol, aux impératifs économiques...

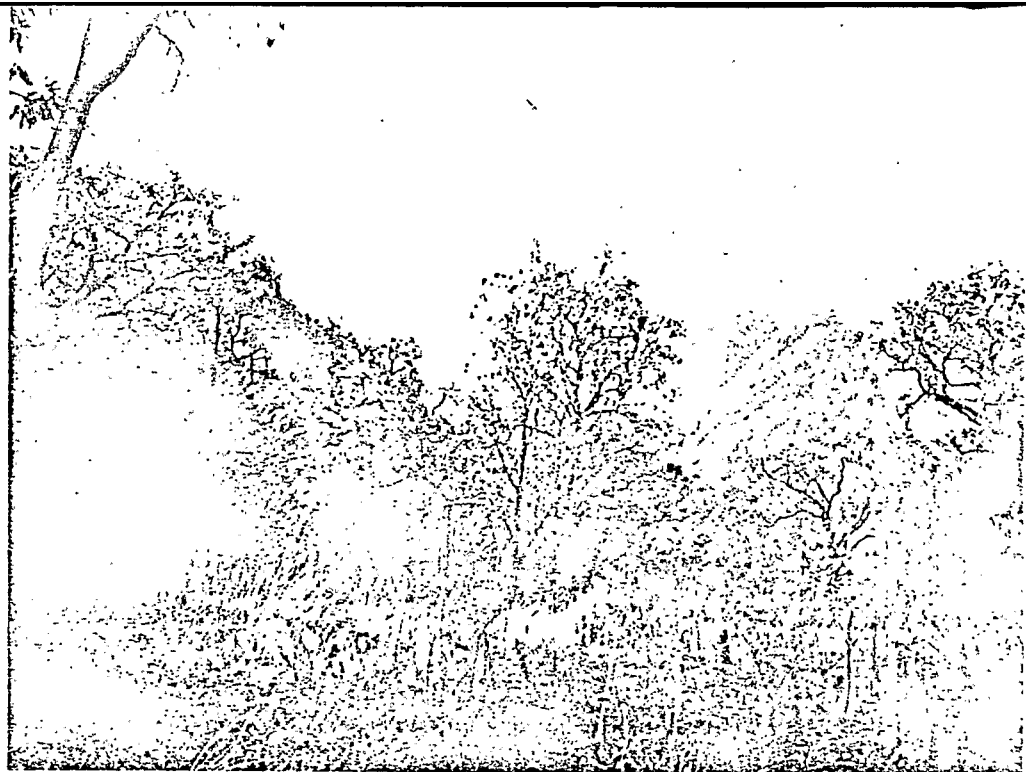
En conséquence, au plan de la pratique agricole, la définition de l'efficacité des pluies devra être ajustée aussi étroitement que possible à des objectifs limités bien déterminés. Exemple : le riz pluvial sur sol sableux du Centre-Dahomey, le cotonnier sur terres lourdes de l'Office du Niger... Les moyens de traitement de l'information sont devenus assez puissants (sinon peu onéreux) pour qu'il soit possible d'envisager la programmation d'autant de modèles d'analyse fréquentielle à objectif limité bien défini qu'il est nécessaire. La difficulté majeure réside dans le choix des critères, dont on ne parlera pas ici.

Mais un modèle de traitement fréquentiel complexe permet, au moins dans un premier temps, de répondre à nombre de problèmes, relatifs à la distribution temporelle de la pluviosité ponctuelle, qui se posent au niveau de la pratique agricole ou à celui de la planification, comme à ceux de la recherche et de l'expérimentation agromonomique.

Il consiste à rechercher, non pas les fréquences de réalisation de hauteurs d'eau fixées arbitrairement ou considérées comme représentant les exigences supposées des cultures aux stades successifs de leur développement et pour des conditions de climat, de sol et d'économie déterminées — donc en très grand nombre, pratiquement illimité — mais au contraire à rechercher les hauteurs d'eau à espérer, pour un certain nombre de niveaux de probabilité, dans des périodes de durée quelconque (1 à 365 jours) pouvant glisser à un rythme quelconque (1 en 1, 2 en 2, 3 en 3... jours), à partir d'une date quelconque jusqu'à une autre date quelconque.

Parmi ces hauteurs probables relatives à des fréquences suffisamment nombreuses, estimées dans des périodes glissantes plus ou moins longues, et pluvieuses couvrant si l'on veut, tout le champ de

Savane
au nord de Tchadourou



l'année, chacun peut trouver, concernant une station donnée, des valeurs voisines de celles considérées par lui comme nécessaires à une culture particulière, durant une phase précise de son développement, et notamment comme représentant pour cette culture : le début ou la fin de la saison pluvieuse utile, une période trop sèche ou trop humide...

Ce modèle d'analyse fréquentielle programmé par l'ORSTOM (1) (pour exploitation sur ordinateurs de puissance au moins équivalente à IBM 360/50 ayant la fonction de Pearson III incorporée), dans le cadre de l'opération de normalisation de la climatologie en Afrique, permet en particulier de répondre à la dernière des trois questions que pose l'irrigation de complément : 1) Quel est, au jour le jour, le déficit; 2) Concernant ce déficit, quelles sont les normes d'intervention : seuil inférieur à ne pas dépasser et seuil supérieur de restauration de l'humidité; 3) Dans le cadre de ces normes, quelle quantité d'eau apportera-t-on, *compte tenu des probabilités de précipitations* à plus ou moins court terme?

Cette réponse sera plus précise encore si l'on dispose en même temps d'un modèle d'analyse fréquentielle des séquences de jours secs, modèle dont la programmation, sur la base de la distribution de Polya par exemple, trouverait encore d'autres applications.

L'analyse fréquentielle

Sous climats tropicaux humides, pluviosité annuelle et pluviosités mensuelles des mois bien arrosés sont généralement distribuées en loi normale. Mais sous climats tropicaux secs, pluviosités annuelle et mensuelles, de même que, sous climats humides, les pluviosités des mois peu pluvieux sont distribuées de façon dissymétrique. Sous tous

climats enfin les pluviosités des périodes courtes comme la décade, la semaine, la pentade, le jour sont généralement réparties dissymétriquement, limitées que sont les distributions par le zéro d'un côté tandis que de l'autre s'inscrivent les précipitations de fréquences rares : moyenne, médiane et mode ne coïncident plus, moyenne et variance ne sont plus indépendantes.

Il y a deux types de solutions possibles à cette difficulté, selon que l'on opère avec des moyens de calcul statistique à performances faibles (papier et crayon; machines mécaniques, électro-mécaniques ou électroniques de bureau) ou fortes (ordinateurs), ou selon que la tâche est limitée ou considérable.

Dans un cas, on fait, selon une expression comme $\log x$ ou $\log(x + a)$, $\sqrt{x}$ ou $\sqrt{x + a}$, une transformation de la variable aléatoire qui permettra de retrouver une distribution normale. Pour tracer la droite de Henri, notamment, on emploiera un papier gauss-logarithmique.

Dans l'autre cas, on peut avoir recours à une loi de distribution mieux adaptée que la loi normale (ou log-normale), mais nécessitant généralement des calculs laborieux que seule peut exécuter une machine électronique programmable. Par exemple, le modèle d'analyse fréquentielle programmé par l'ORSTOM utilise la fonction gamma incomplète (de Pearson III) tronquée, à qui sa flexibilité permet de s'ajuster à la plupart des distributions observées unimodales.

Ainsi, dans l'hypothèse où la recherche agronomique met au service de la pratique agricole un matériel végétal et des techniques adaptés aux conditions de climat et de sol (donc de bilan hydrique réel), le praticien pourra, en culture strictement pluviale, se satisfaire d'une analyse fréquentielle des précipitations telle qu'elle est envisagée ci-dessus. La connaissance des aléas de pluviosité lui permettra notamment d'user au mieux de ces techniques et de ces variétés, selon un calendrier cultural où les opérations qui vont de la préparation du sol à la récolte seront ajustées aux conditions statistiquement prévisibles. En irrigation complémentaire, cette analyse sera indispensable.

La saison humide

Les applications de la notion de bilan hydrique sont multiples : *estimation du déficit* en eau du sol, de l'évapotranspiration réelle, du ruissellement, du drainage, du lessivage des sols, du niveau de la nappe... à partir de la formule :

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

où P : précipitations; (I) : irrigation de complément éventuelle; R : ruissellement; Dr : drainage ou remontées capillaires; ΔH : variation d'humidité du sol; ETR : évapotranspiration réelle.

De l'estimation en temps réel du déficit découle l'évaluation des besoins actuels en eau d'irrigation,

(1) O.R.S.T.O.M. Office de Recherches Scientifiques et Techniques Outre-Mer (Paris-Bondy) qui dispose aussi pour l'Outre-Mer de l'information pluviométrique susceptible d'être traitée selon ce programme.

LES MÉTHODES

totale ou complémentaire. Du traitement fréquentiel de ce déficit résulte, pour l'irrigation complémentaire, au niveau de la planification, la connaissance des besoins globaux et celle des besoins de pointe, en réponse aux questions : y a-t-il un besoin d'irrigation en général, compte tenu des pluies, relativement à la demande telle qu'elle est représentée par l'évapotranspiration potentielle (climatique) ? Si oui, quelle quantité d'eau et combien d'applications seront-elles nécessaires et quel sera le besoin de pointe ?

En culture strictement pluviale, le traitement fréquentiel du même déficit est sans doute le meilleur procédé de délimitation de la période de végétation, que l'on identifiera à la saison humide telle qu'elle a été définie dans l'introduction : temps continu de l'année durant lequel le stock d'eau disponible n'est pas nul. Ce procédé ne va cependant pas sans difficultés. La principale n'est plus, avec les moyens modernes, dans l'analyse statistique elle-même. Elle réside dans l'élaboration du modèle de bilan, qui en régions tropicales doit simuler la réhumectation du profil. En outre, hormis les précipitations, les termes de la formule ci-dessus sont généralement d'évaluation difficile. Enfin, le coût des opérations d'informatique, lors de l'utilisation, est toujours élevé.

Aussi proposera-t-on, pour la délimitation de la période de végétation et ses applications habituelles (ajustement des cycles des variétés, établissement prévisionnel du calendrier cultural...) une méthode fréquentielle qui, bien que fondée dans une certaine mesure sur le bilan puisqu'intervient, relativement aux pluies, l'évapotranspiration potentielle, est extrêmement simple, n'exigeant même aucun moyen d'analyse statistique. Elle peut se montrer suffisamment efficace, au moins dans un premier temps, pour aborder maint problème.

La méthode des intersections

Cette méthode 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 (fig. 1) des courbes de pluviosité P et d'évapotranspiration potentielle ETP (mensuelles, ou décadales), détermine les positions de deux événements de nature purement climatique : B_1 et B_2 , projections sur l'axe des temps des intersections des deux courbes.

Ces deux événements encadrent la fraction de la saison humide durant laquelle P est globalement (sinon à tout instant) supérieur à ETP , et donc l'évapotranspiration réelle ETR égale en principe à l'évapotranspiration maximale ETM de la culture. Caractérisée par la *permanence d'eau disponible* (au-dessus du point de flétrissement) dans le sol, la saison humide débutera au moment, noté A_2 (A_1 situant théoriquement la première pluie) où le déficit maximal du sol (supposé nu à cette époque) atteint durant la saison sèche, commence à diminuer sous l'effet des pluies. Elle se terminera au moment, noté C_2 (C_1 situant la dernière pluie), où ce déficit maximal se trouve de nouveau atteint, la végétation ayant épuisé les réserves utilisables.

Les événements A_2 , B_1 , B_2 et C_2 découpent ainsi la saison humide A_2-C_2 , distincte de la saison pluvieuse A_1-C_1 , en trois « périodes » :

- La période « préhumide » A_2B_1 , durant laquelle P est inférieure à ETP (mais supérieure, on le verra, à $ETP/2$), et donc ETR à ETM .

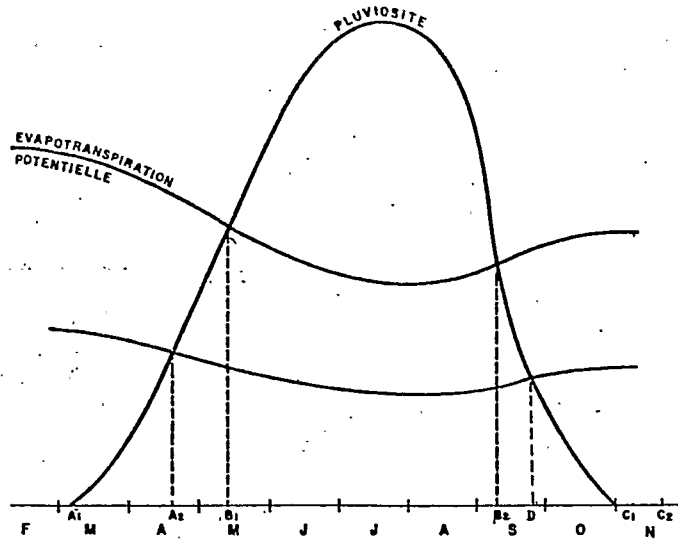
- La période « humide » B_1B_2 , où P est supérieure à ETP et donc ETR égale à ETM .

- La période « posthumide » B_2C_2 , durant laquelle P redevient inférieure à ETP et donc ETR à ETM , en dépit des réserves accumulées dans le sol entre B_1 et B_2 .

Pour des motifs déjà développés ailleurs (FRANQUIN 1967 et 1968), on peut justifier de situer A_2 à l'instant où la pluviosité devient égale à la moitié de l'évapotranspiration potentielle, quelle que soit la formule d'estimation d' ETP . L'évaporation d'un sol nu dépend en fait de son albedo, de ses micro et macro-structures, mais il s'agit là d'un repère approximatif. L'événement A_2 sera donc déterminé par l'intersection des courbes P et $1/2 ETP$ (fig. 1).

Le point C_2 , par contre, ne peut être obtenu simplement par intersection et ne sera donc déterminé que si nécessaire en faisant, à partir de B_2 le bilan climatique entre : d'une part, les pluies postérieures à ce dernier événement, augmentées de l'excès de P sur ETP entre B_1 et B_2 (supposé stocké dans le sol); d'autre part, de l' ETP . L'intérêt de C_2 ne se manifestera d'ailleurs guère que dans le cas de végétation permanente, naturelle ou non, et non de cultures annuelles auxquelles s'adresse plus volontiers la méthode.

En ce qui concerne ces cultures annuelles, en effet, la connaissance des trois événements A_2 , B_1 et B_2 suffira généralement pour la plupart des applications. Un point D , d'intersection entre les courbes de P et $1/2 ETP$ peut encore être considéré postérieurement à B_2 , bien qu'il ait une signification agronomique plus faible que son symétrique A_2 . On peut admettre en effet que tant que les pluies ne sont pas redevenues inférieures à $1/2 ETP$, l'addition à la lame de pluie 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*, que l'on va délimiter maintenant, sera dans ce cas non pas B_2 mais D .



La période de végétation active

De l'interprétation agronomique de ce découpage simple de la saison humide (2), nous rappellerons seulement que :

□ A_2 est l'événement à partir duquel le semis devient en principe (ce qui paraît assez bien vérifié par l'expérience) possible sans aléas. Son importance est donc considérable. C'est le point de départ de la « période de végétation active » d'une culture annuelle. La considération de cet événement, qu'il est possible, on le verra, de situer à tout niveau de probabilité, donne du début de la période de végétation une définition nettement plus concrète que la fixation d'une première pluie dite efficace. La période antérieure A_1A_2 est celle du semis dit « en sec » qui bénéficie des faux départs de la période préhumide A_2B_1 .

□ La période B_1B_2 est celle où les besoins des cultures, alors en état de végétation très active, peuvent en principe, au moins globalement, être satisfaits. 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. L'efficacité de l'eau, durant cette période, alors qu'elle est en principe disponible sans contrainte du sol, sera d'autant meilleure, par voie de photosynthèse, que l'indice de surface foliaire sera plus fort au moment de B_1 , ce qui est une des raisons de la supériorité générale des semis précoces, notamment quand la saison humide est courte.

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 d'autre part 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 (ou D, si l'on préfère) la fin de la « période de végétation active », notée A_2B_2 (ou A_2D), les phénomènes de fructification-maturation se déroulant pour l'essentiel à partir de cet instant, grâce aux quelques pluies de la période posthumide B_2C_2 et à la lame d'eau stockée dans le sol durant la période humide B_1B_2 en excès de l'ETM de la culture.

□ La période posthumide B_2C_2 s'ouvrira en effet 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 et que le profil aura été plus profondément saturé par cet excès d'eau $P - ETP$.

L'intérêt, finalement, de cette représentation très simple des conditions hydriques est qu'elle se prête bien au traitement fréquentiel, chacun des événements et les périodes qu'ils délimitent pouvant être analysés statistiquement.

L'expression fréquentielle

Si en effet on fait varier annuellement courbes de P et d'ETP, on aura pour chaque année une position (déterminée par intersection) de chacun des événements A_2 , B_1 et B_2 . En fait, on ne fera générale-

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_2B_2 (ou A_2D) : période physique « de végétation active »

ment varier, d'année en année, que la courbe des pluies, celle d'ETP, comparativement beaucoup plus stable, étant fixée à sa valeur moyenne. Et par souci de clarté dans le dessin on ne tracera, au moyen d'une pointe fine (fig. 2) que les intersections de la courbe P variable avec les courbes fixes d'ETP et d'ETP/2. Après quoi on dénombre les intersections dans chaque pentade calendaire (représentée par un intervalle d'un carreau) et on les somme par décades ou quinzaines afin d'obtenir des histogrammes plus réguliers.

Pour chacun des événements en question, on construira en effet un histogramme des fréquences d'intersections, lequel se rapprochera plus ou moins de celui d'une loi normale. On passera ensuite à la courbe des fréquences relatives cumulées (ajustée en cas de normalité, empirique sinon), sigmoïde plus ou moins régulière si elle n'est qu'empirique mais que l'on pourra dans une certaine mesure lisser.

En cas d'ajustement significatif à la loi normale (histogrammes de la figure 2 mais non ceux de la figure 3), il sera possible d'attribuer des limites de confiance à la moyenne, à la médiane ou à tout autre quantile et de travailler avec les sigmoïdes de fréquences relatives cumulées ajustées et non plus empiriques. On pourra même transformer ces courbes ajustées en leurs droites de Henri respectives, au moyen d'une échelle gaussienne.

La probabilité qu'un événement (A_2 , B_1 , B_2) soit réalisé au plus tard (ou déjà) à une date donnée (en abscisse) sera lue en ordonnée de la sigmoïde de fréquences relatives cumulées empirique ou ajustée. Inversement, on tirera de ces mêmes courbes les dates-limites attachées à telles probabilités totales données. La sigmoïde de A_2 indiquera donc les probabilités totales d'ouverture de la saison humide A_2-C_2 ou de la période de végétation active A_2B_2 . Celle de

(2) Voir Franquin 1967-1968.

LIEU BAMBEY (Station agronomique)
 PAYS SÉNÉGAL
 PÉRIODE 1970 - 1972 (50 ans)

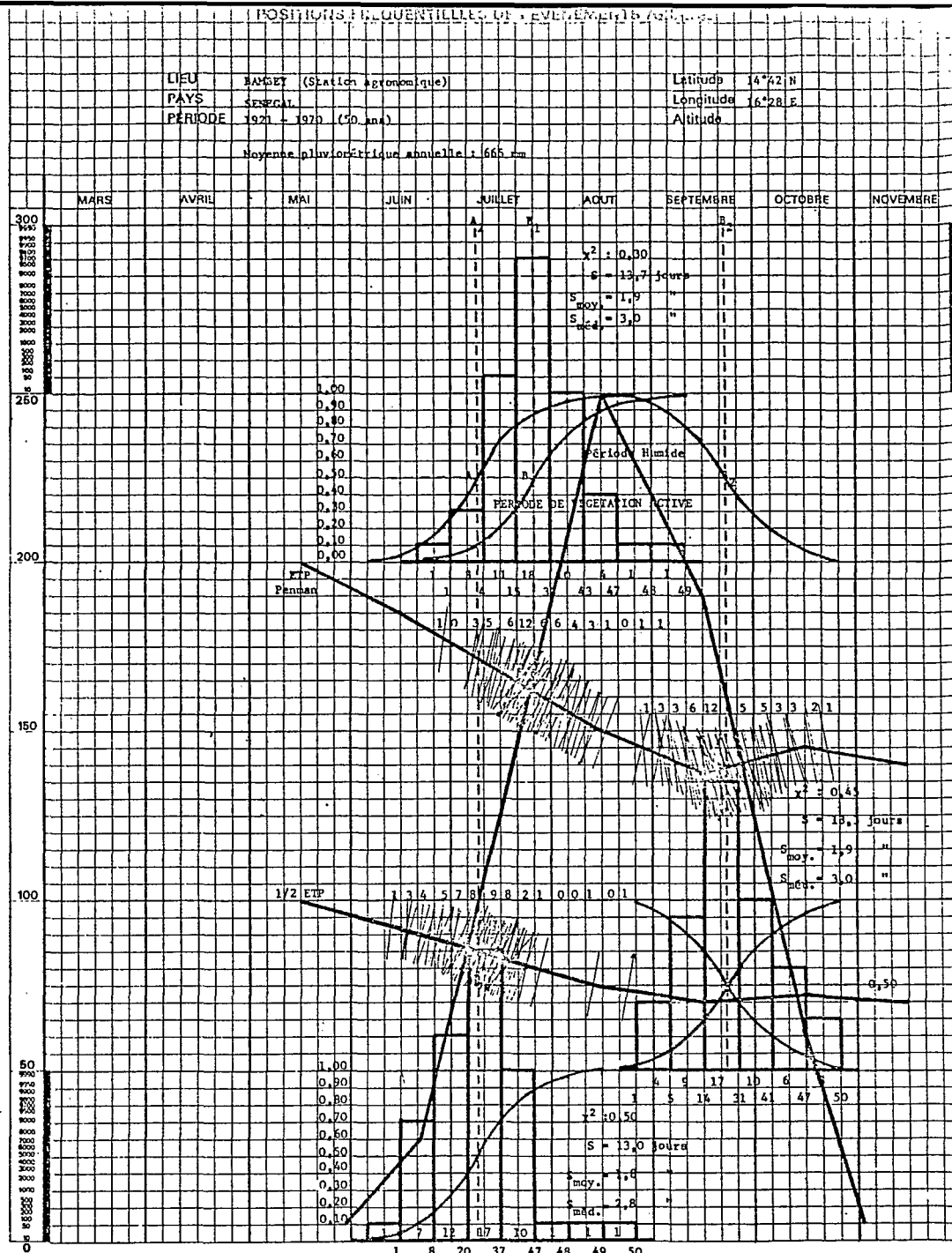
Latitude 14°42'N
 Longitude 16°28'E
 Altitude

Moyenne pluviométrique annuelle : 665 mm

LES MÉTHODES

Figure 2

Période fréquentielle de végétation active à Bambey (Station agronomique). Les histogrammes de fréquences rappellent la loi normale : il a été possible d'estimer les écarts-types d'une intersection (S), de la moyenne ($S_{\text{moy.}}$), de la médiane ($S_{\text{méd.}}$). La surface délimitée par les sigmoïdes de fréquences relatives cumulées des événements A_2 et B_2 -symétrique est une représentation de la période « de végétation active » qui intègre la fréquence de ses variations de position et de durée. La surface délimitée par les sigmoïdes de B_1 et B_2 -symétrique figure la « période humide » (où P est supérieure à ETP).



B_2 , les probabilités de fermeture de cette même période à telle date au plus tard.

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 soit *encore* ouverte. Elle sera donnée par la courbe symétrique de celle de B_2 par rapport à l'horizontale (fig.2).

Ces trois sigmoïdes de A_2 , B_1 et B_2 -symétrique devront finalement être construites sur la même base ou axe des temps (fig. 2 et 3).

S'il y a indépendance des éventualités de réalisation des événements A_2 , B_1 et B_2 (ce qu'en cas

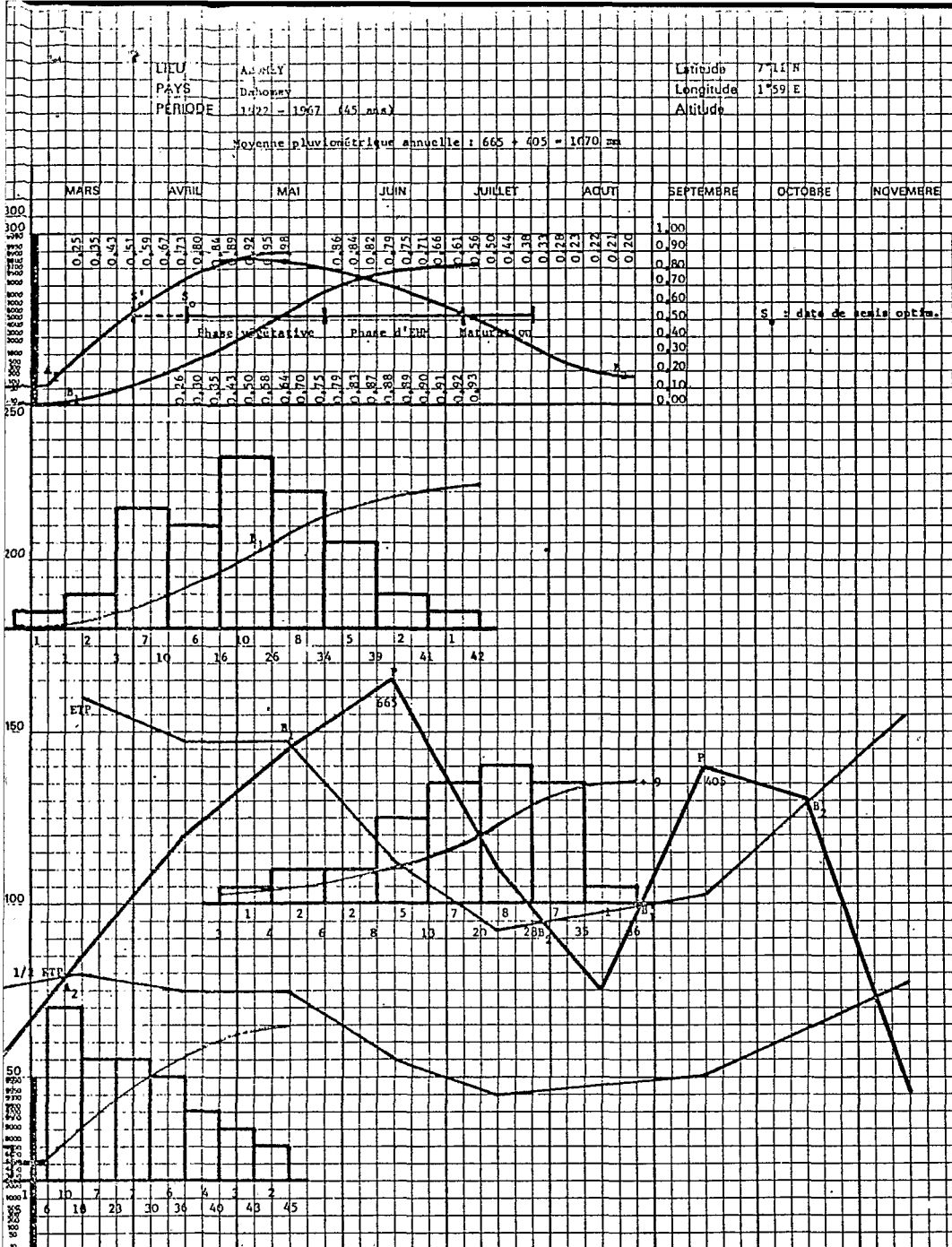
de doute on pourra vérifier), la probabilité qu'une période soit *déjà* ouverte à telle date fixée (pour A_2 ou B_1) et le soit *encore* à telle autre (pour B_2) sera le produit des probabilités totales relatives à ces deux dates. Les sigmoïdes permettront encore d'estimer la probabilité d'occurrence d'une période de durée supérieure ou inférieure à une durée-limite donnée, indépendamment de sa position dans le temps, et inversement.

La surface comprise entre les sigmoïdes d'ouverture et de fermeture de la période de végétation active A_2B_2 (ou A_2D) est une représentation de cette période qui intègre l'expression fréquentielle et figure un potentiel auquel on pourra encore, si nécessaire, incorporer les caractéristiques énergétiques déterminant le développement et la croissance des cultures.

Il est à noter, cependant, que ce potentiel ne tient pas compte du stock d'eau utilisable du sol au moment B_2 , stock qui résulte de l'excès de P sur ETP entre B_1 et B_2 dont une partie alimente le ruissellement et une autre le drainage profond.

Les applications au Dahomey

La méthode des intersections peut trouver des applications variées, en régions tropicales, à tous les plans de l'agriculture. Elle se prête particulièrement bien, étant connues les caractéristiques de végétation d'une variété, à l'ajustement de son cycle aux conditions



LES MÉTHODES

Figure 3

Période fréquentielle de végétation active relative au 1^{er} cycle des pluies à Abomey. Les histogrammes de fréquences ne rappellent pas la loi normale : on utilise alors les sigmoïdes de fréquences relatives cumulées non ajustées (empiriques ou observées). Ces sigmoïdes ont été construites sur la même base des temps dans le haut de la figure, celle de B₂ étant prise symétriquement par rapport à l'horizontale. La droite segmentée surimposée à ces sigmoïdes figure le cycle de végétation de la variété de riz pluvial de 100 jours, S₀ étant la date de semis optimale et S₀' la date à partir de laquelle on peut semer sans perte importante sur le rendement « modal »

de la saison humide et à l'estimation au moins relative des chances de la réussir.

On traitera théoriquement, pour l'exemple, un cas concret proposé par la SATEC - celui de la possibilité de réussir une sole de riz pluvial en sol sableux au Dahomey central. Les questions étaient posées comme suit :

« 1 — Est-il possible de réussir une culture de riz au Dahomey central? Quand peut-on la réussir (1^{re} ou 2^e saison) et avec quel type de variété (100 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	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

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 ou 60 jours selon la variété) soit assurée de se développer 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'exigence hydrique maximale » (ou EHM), ici de 40 jours, que la variété soit de 100 ou 120 jours.

Deux sites ont été choisis en vue de juger de l'adaptation de ces deux variétés aux conditions climatiques du Dahomey central : ABOMEY, à la limite méridionale ;

Tableau I. — ABOMEY Première saison

Période de 40 jours	Probabilité théorique estimée	Fréquence réelle observée	Date de semis correspondante	
			Var. de 100 j.	Var. de 120 j.
01/5 au 10/6	$0,43 \times 0,82 = 0,35$		20/3	01/3
05/5 au 15/6	$0,50 \times 0,79 = 0,40$	0,40	25/3	05/3
10/5 au 20/6	$0,58 \times 0,75 = 0,44$	0,44	30/3	10/3
15/5 au 25/6	$0,64 \times 0,71 = 0,45$	0,44	05/4	15/3
20/5 au 30/6	$0,70 \times 0,66 = 0,46$	0,47	10/4	20/3
25/5 au 05/7	$0,75 \times 0,61 = 0,46$	0,44	15/4	25/3
30/5 au 10/7	$0,79 \times 0,56 = 0,44$	0,51	20/4	30/3
05/6 au 15/7	$0,83 \times 0,50 = 0,42$	0,46	25/4	05/4
10/6 au 20/7	$0,87 \times 0,44 = 0,38$	0,42	30/4	10/4
15/6 au 25/7	$0,88 \times 0,38 = 0,33$	0,38	05/5	15/4

LES MÉTHODES

TCHAUROU à la limite septentrionale. Vu l'importance des gradients climatiques Ouest-Est au Dahomey, il pourrait être utile d'encadrer aussi la région suivant cet axe.

Sur les bases précédemment définies, l'essentiel de l'ajustement consistera à intercaler à la *meilleure probabilité* la phase de 40 jours d'EHM entre les limites fréquentielles de la « période humide » (durant laquelle, P étant supérieure à ETP, ETR = ETM en principe), ces limites étant figurées par les sigmoïdes de fréquences relatives cumulées des événements B_1 et B_2 pour le 1^{er} cycle des pluies (fig. 3) et par celles des événements B'_1 et B'_2 pour le 2^e cycle (non figuré). Entre ces courbes, le long de l'axe des temps à leur base, on fait glisser de 5 en 5 jours une droite dont la longueur représente une durée de 40 jours à l'échelle du graphique, soit 8 carreaux. L'indépendance des distributions de B_1 et de B_2 étant admise ou vérifiée, ainsi que de B'_1 et de 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 » ($B_1 B_2$ ou $B'_1 B'_2$) d'au moins 40 jours recouvrant cette même période particulière de 40 jours.

L'une de ces probabilités a la valeur *maximale*, les autres étant de part et d'autre décroissantes (tab. I pour le 1^{er} cycle et tab. II pour le 2^e).

Le premier cycle des pluies

A ABOMEY, durant le 1^{er} cycle des pluies la probabilité maximale, égale à 0,46, est à cheval sur deux périodes successives de 40 jours : 20/5-30/6 et 25/5-05/7 ; il y correspond des dates de semis optimales So (compte non tenu pour l'instant de leur praticabilité)

Tableau II. — ABOMEY Deuxième saison

Période de 40 jours	Probabilité théorique estimée	Fréquence réelle observée	Date de semis correspondante	
			Var. de 100 j.	Var. de 120 j.
05/8 au 15/9	$0,24 \times 0,71 = 0,17$		25/6	05/6
10/8 au 20/9	$0,27 \times 0,69 = 0,18$		30/6	10/6
15/8 au 25/9	$0,30 \times 0,63 = 0,19$		05/7	15/6
20/8 au 30/9	$0,33 \times 0,61 = 0,20$		10/7	20/6
25/8 au 05/10	$0,39 \times 0,56 = 0,22$		15/7	25/6
31/8 au 10/10	$0,45 \times 0,45 = 0,20$		20/7	30/6
05/9 au 15/10	$0,51 \times 0,33 = 0,17$		25/7	05/7
10/9 au 20/10	$0,57 \times 0,22 = 0,13$		31/7	10/7

Tableau III. — TCHAUROU

Période de 40 jours	Probabilité théorique estimée	Fréquence réelle observée	Date de semis correspondante	
			Var. de 100 j.	Var. de 120 j.
25/5 au 05/7	$0,73 \times 0,80 = 0,58$		15/4	25/3
31/5 au 10/7	$0,78 \times 0,78 = 0,61$	0,63	20/4	31/3
05/6 au 15/7	$0,82 \times 0,76 = 0,62$	0,60	25/4	05/4
10/6 au 20/7	$0,87 \times 0,73 = 0,63$	0,60	30/4	10/4
15/6 au 25/7	$0,91 \times 0,71 = 0,65$	0,60	05/5	15/4
20/6 au 30/7	$0,92 \times 0,69 = 0,63$	0,66	10/5	20/4
25/6 au 05/8	$0,93 \times 0,67 = 0,62$	0,63	15/5	25/4
30/6 au 10/8	$0,94 \times 0,65 = 0,61$		20/5	30/4
05/7 au 15/8	$0,95 \times 0,63 = 0,60$		25/5	5/5

sises 40 jours plus tôt pour la variété de 100 jours (soit 10-15/4) et 60 jours plus tôt pour celle de 120 jours (soit 20-25/3).

Par un procédé indirect, on a aussi, par souci de vérification, déterminé les fréquences réelles (tab. I) : l'accord entre probabilité théorique et fréquence observée, bon dans la moitié supérieure du tableau, l'est moins dans la moitié inférieure ; en particulier, la fréquence maximale observée (0,51) est décalée de 5 à 10 jours par rapport à la probabilité maximale estimée (0,46). Il est donc probable qu'il n'y a pas indépendance stricte entre les distributions de fréquences de B_1 et

de B_2 . Mais, on va le voir, cette erreur est tolérable parce qu'il n'est pas possible de semer chaque année à même date fixe optimale, sauf irrigation complémentaire.

Le semis étant cependant supposé réussi chaque année à la même date optimale fixe du 10-15/4 pour la variété de 100 jours et à celle du 20-25/3 pour celle de 120 jours, il y aurait donc 46 chances sur 100 d'obtenir *au moins* le rendement correspondant à la position de la phase d'EHM de 40 jours entre les 20/5 et 05/7. Mais comme, en fait, il n'est pas concevable, en culture pluviale, de semer chaque année à même date fixe, il faut

consentir à perdre quelque peu sur *ce rendement* afin de disposer d'un intervalle de temps, contenant la date de semis optimale, à l'intérieur duquel on aura toute latitude de semer.

De part et d'autre des positions 20/5-30/6 et 25/5-05/7, les probabilités vont décroissant, mais lentement d'abord (ce qui dépend de l'ouverture de l'angle que font les sigmoïdes). Si on se fixe de ne pas descendre au-dessous de 0,42, la latitude de semer en 1^{er} cycle s'étendra du 01/4 (antérieur de 40 jours au 10/5) au 25/4 (antérieur de 40 jours au 05/6) pour la variété de 100 jours. En se rapportant (en haut de la fig. 3) à la sigmoïde de l'événement A_2 construite sur la même base que celles de B_1 et de B_2 -symétrique, on constate que la probabilité d'avoir réussi le semis de cette variété au 01/4 n'est que de 50 % ; mais au 25/4 elle est de 85 % et au 30/4 de 90 %. En semant *en avril dès que l'occasion se présente*, on n'a donc qu'une à une chance et demi sur dix de devoir semer ou resemer en mai, ce qui est bien tolérable.

Pour la variété de 120 jours, la latitude de semis sera antérieure de 20 jours encore à celle de la variété de 100 jours, s'étendant donc du 10/3 au 05/4, dates auxquelles sont attachées les probabilités 0,30 et 0,59. Même si cette variété peut compenser, par son potentiel de production supérieur à celui de la variété de 100 jours, le risque plus grand qu'elle encourt durant sa phase végétative (de 60 jours), il reste que son semis dans les temps requis doit être considéré comme trop aléatoire.

Si maintenant on considère non plus le semis mais la récolte, la probabilité de faire, à quelque peu près *le rendement en question* en se fixant de récolter au plus tard le 30/6, afin de semer le cotonnier en juillet, est fournie par le produit : $0,43 \times 0,82 = 0,35$,

soit 35 % de chances, avec en outre une latitude de semis qui, s'étendant pour la variété de 100 jours au mois de mars, ne correspond qu'à 50 % de réussite, ce qui est certainement trop peu.

Avant de passer au 2^e cycle des pluies, il importe de se demander ce qu'est *ce rendement* qui a les chances inscrites dans le tableau I d'être atteint ou dépassé. Si le critère « satisfaction des 40 jours d'EHM » est de loin la condition déterminante de la productivité, ce rendement — dont on ne sait rien par ailleurs — constitue *le mode* de la distribution de fréquences du rendement puisqu'il correspond à la valeur de la variable aléatoire pour laquelle la densité de probabilité est maximale. C'est donc le « rendement modal », qui n'est pas, sauf cas particulier, le rendement maximal, lequel devrait être obtenu pour une période humide B_1B_2 recouvrant la totalité de la période de végétation active, qui va du semis jusqu'à 20 jours avant récolte. Sauf cas particulier encore, ce n'est pas le rendement minimal qui correspond vraisemblablement à l'absence de période humide, observée 3 fois durant les 45 années considérées ici.

Le second cycle des pluies

Durant le 2^e cycle des pluies (non figuré), il n'est que d'intercaler au mieux les 40 jours d'EHM entre les sigmoïdes de B'_1 et B'_2 pour constater que le rendement modal, qui devrait, toutes autres choses égales par ailleurs, être *le même qu'en 1^{er} cycle*, n'a que $0,39 \times 0,56 = 0,22$, soit 22 chances sur 100 d'être atteint ou dépassé (tab. II). Au surplus, toutes autres choses ne sont pas égales : les 40 jours suivant le semis optimal correspondent juste au creux de la petite saison sèche. Quant au semis, il devrait se pratiquer non pas en pluies montantes, comme normalement, mais en pluies descendantes, quoique avec les probabilités, pour ces pluies, de rester

supérieures à ETP/2 données par la courbe de fréquences relatives cumulées de l'événement A'_2 (non figurée).

Le même ajustement peut être étudié comparativement pour TCHAUROU à 120 km au Nord, où le ralentissement des pluies de la petite saison sèche qui sépare les pluies en deux cycles est bien moins fréquent (4 années sur 10 contre 8 à ABOMEY) et moins marqué. Pour un ajustement au 1^{er} cycle des caractéristiques de végétation des variétés de 100 et de 120 jours, on se reportera au tableau III. La probabilité de faire à TCHAUROU le rendement modal, *le même qu'à ABOMEY*, toutes choses par ailleurs égales, atteint ici 65 % contre 46 % dans cette dernière situation.

Par ailleurs, les dates de semis optimales, pour les variétés de 100 et 120 jours, sont respectivement le 05/5 avec 90 % de réussite et le 15/4 avec 65 %. Mais il est possible de s'écarter de ces dates optimales sans perdre beaucoup sur la probabilité de faire le rendement modal. En se fixant de ne pas descendre au-dessous de 0,61, on pourra semer la variété de 120 jours entre le 1^{er} et le 30/4, soit, avec 89 % de chances de réussir le semis en avril, une chance seulement de devoir semer ou resemer en mai, ce qui était *la situation de la variété de 100 jours à ABOMEY*.

La même démarche pour l'ajustement des mêmes variétés à BOUAKE, en Côte-d'Ivoire, conduit pour les 1^{er} et 2^e cycles pluviens respectivement à des probabilités de 48 % et 73 % d'obtenir au moins *le même rendement modal* qu'à ABOMEY et à TCHAUROU, toutes choses égales par ailleurs.

Généralisation et remarques

□ On a supposé, en première approximation, que la distribution de fréquences du rendement n'est

LES METHODES

pas trop différente de celle de la variable aléatoire de nature climatique (durée et position de la période humide) qui détermine essentiellement sa variation, toutes autres choses égales évidemment. Une probabilité voisine de 50 %, pour le rendement modal, d'être atteint ou dépassé caractérisera un état d'assez bonne adaptation 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 et/ou artificielle. Supposons qu'à ABOMEY le rendement modal soit de 15 q/ha sans fertilisation. Si, au 1^{er} 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 de base soit sûr.

Car il ne faut pas perdre de vue que ces estimations de probabilités ne valent que ce que vaut lui-même le critère de nature climatique (ici : « satisfaction de 40 jours d'exigence hydrique maximale entre le 60^e et le 20^e jour avant maturité achevée »). Aussi la méthode aura-t-elle avant tout un *intérêt relatif*, en permettant des comparaisons : ainsi, il ne fait guère de doute que la variété de 120 jours sera mieux adaptée à TCHAUROU ($P_{\text{mod.}}$: 0,65) que la variété de 100 jours à ABOMEY ($P_{\text{mod.}}$: 0,46), les chances de réussir le semis se trouvant être identiques.

□ Ce modèle d'ajustement d'un riz pluvial n'est pas extrapolable sans modifications majeures à une autre culture, même de graminée. Le présent cas d'ailleurs ne paraît simple que si l'on admet que la culture de riz pluvial tirera bénéfice d'une période humide (P supérieure à ETP) recouvrant la totalité de la phase de végétation active (ce qui serait inexact pour un cotonnier) et que l'extension de cette même période aux derniers 20 jours ne compromettra pas quantitativement la récolte (ce qui ne saurait s'appliquer à un mil). Il convient donc d'établir dans chaque cas un schéma d'ajustement spécifique, pouvant comporter plusieurs variables, fondé sur l'expérience et, chaque fois que possible, sur une analyse statistique de séries chronologiques de rendements.

□ Pour une étude plus fine, il faudrait opérer non pas à l'échelle mensuelle (concevable surtout dans une perspective *relative*, comme ici pour comparer des saisons et des sites) mais à l'échelle de la quinzaine ou à celle de la décade. La durée de la période humide alors apparaîtra plus courte qu'à l'échelle mensuelle, du fait que cette dernière échelle masque des déficits (ETP-P) pouvant porter sur 15 jours. Celle de la quinzaine dissimulera encore des déficits de l'ordre de la semaine, seule l'échelle décadaire étant sûre. On choisira donc la quinzaine ou la décade selon, notamment, la capacité-tampon du sol à stocker l'eau.

En toute rigueur, il conviendrait aussi d'évaluer phases et périodes de végétation, non pas en jours, mais en « sommes de températures », une différence de deux degrés, par exemple, sur la moyenne durant la phase de végétation active pouvant présenter une signification considérable pour le développement de la culture, d'où l'intérêt de développer des modèles mathématiques du développement des espèces et variétés

(FRANQUIN 1966, 1971, 1972) permettant d'intégrer avec les conditions hydriques les conditions énergétiques.

□ Il est possible enfin de parvenir aux mêmes ajustements de façon plus directe et rapide à condition de disposer d'une analyse fréquentielle de la pluviosité ainsi que des ETP estimées. Considérons les décades glissant de 5 en 5 jours durant le 1^{er} cycle pluvieux à ABOMEY, les ETP durant ces décades et les probabilités respectives pour que P soit supérieure à ETP, probabilités données par l'analyse fréquentielle selon modèle ORSTOM :

Décade	ETP mm	Probabilité
16-25/5	47	0,42
21-30/5	45	0,51
26-05/6	43	0,55
01-10/6	41	0,54
06-15/6	39	0,58
11-20/6	38	0,72
16-25/6	36	0,65
21-30/6	35	0,62
26-05/7	34	0,53
01-10/7	33	0,51
06-15/7	32	0,48

Si l'on sélectionne, y compris celle présentant la probabilité maximale (0,72), les quatre décades successives (soit 40 jours) caractérisées par la probabilité moyenne la plus élevée, on obtient :

21/5 au 30/6 :
 $0,51 + 0,54 + 0,72 + 0,62$
 moyenne : 0,60

01/6 au 10/7 :
 $0,54 + 0,72 + 0,62 + 0,51$
 moyenne : 0,60

Les moyennes étant égales, la période de 40 jours la mieux placée sera celle qui se trouve à cheval sur celles-ci, c'est-à-dire la période du 26/5 au 05/7, qui est la même que celle déterminée par la méthode des intersections (tab. 1).

L'analyse fréquentielle des pluies ne donne cependant pas cette « vue » de la période fréquentielle



LES MÉTHODES

Les rizières
dans le Centre Dahomey

de végétation avec ses caractéristiques : position, durée, potentiel, dispersion des événements liée à la pente des sigmoïdes, que procure la méthode des intersections. Elle nécessite aussi des moyens de traitement de performance élevée et n'est pas gratuite. Les deux procédés d'ailleurs se complètent, l'analyse fréquentielle permettant l'exploration des conditions hydriques à l'intérieur des diverses périodes délimitées par la méthode des intersections.

□ Les deux dernières décennies ont vu progresser considérablement, avec la notion d'évapotranspiration liée à l'activité photosynthétique notamment, les connaissances permettant d'évaluer les caractéristiques du milieu agroclimatique. En dehors de l'irrigation, cependant, leur application au domaine opérationnel marque le pas pour deux raisons principales. Il est difficile, du fait de la grande variabilité des conditions climatiques en régions tropicales, de faire entrer ces connaissances dans des modèles, intégrant l'expression fréquentielle et organisés avec le souci de satisfaire les besoins du non-spécialiste, qu'il soit planificateur, chercheur ou praticien.

Les démarches ici proposées ne sont que des exemples — à perfectionner, modifier, développer par les intéressés selon leurs exigences plus particulières — parmi ceux qu'il est possible d'imaginer, en fonction de l'information disponible, pour caractériser fréquemment le déficit hydrique.

Un décalage existe entre les connaissances, caractérisant le milieu, et celles relatives au végétal en soi, considéré isolément pour son développement et dans le couvert cultural pour sa croissance. Deux voies insuffisamment pratiquées jusqu'ici en milieu tropical devraient concourir à normaliser cette situation : l'étude des relations de la morphogenèse avec le développement, dont résulte la productivité de la plante ; l'analyse statistique de séries chronologiques de rendements, expression de la productivité du couvert.

La conjonction de ces deux axes de recherche devrait aboutir à l'élaboration de « modèles de végétal » à ajuster à des « modèles de milieu climatique ».

P. FRANQUIN
O.R.S.T.O.M.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

FRANQUIN (P.), 1967. — *Analyse agroclimatique en régions tropicales. Les conditions hydriques. Cahiers O.R.S.T.O.M., sér. Biol., n° 5, 15-24.*

FRANQUIN (P.), 1968. — *Analyse agroclimatique en régions tropicales. Saison pluvieuse et saison humide. Applications. Cahiers O.R.S.T.O.M., sér. Biol., n° 9, 65-95.*

FRANQUIN (P.), 1970. — *Modèles mathématiques de structures chez les végétaux. I. Principes de structure et production de nombre. Cahiers O.R.S.T.O.M., sér. Biol., n° 14, 77-126.*

FRANQUIN (P.), 1972. — *Modèles mathématiques de structures chez les végétaux. II. Relations de structure. Cahiers O.R.S.T.O.M., sér. Biol., n° 17, 3-21.*

PETIT « Lexique » DES TERMES MATHÉMATICO- STATISTIQUES

Fréquentiel : se dit d'une étude-généralement faite a posteriori par observations— des variations dans le temps ou l'espace d'une variable aléatoire. Dans le texte, « fréquentiel », s'apparente à probabilistique et s'oppose naturellement à déterministe.

Loi normale : distribution selon la loi de Gauss (« courbe en cloche »).

Moyenne :

$$m = \frac{\text{somme des observations}}{\text{nombre d'observations}}$$

Médiane : dans une population donnée, décrite à l'aide d'une variable unique, la médiane est la valeur de cette variable qui découpe la population en deux sous-populations également nombreuses.

Mode : c'est la valeur de l'observation ayant une fréquence d'apparition maximale; ex. : rendement modal, celui qui apparaît le plus souvent, ce n'est pas forcément le rendement moyen.

Variance : caractéristique de la dispersion d'une population selon une variable unique.

$$\text{Variance} = \frac{\text{somme des (écarts à la moyenne)}^2}{\text{nombre d'observations} - 1}$$

Droite de Henri : représentation sur un papier gaussien-logarithmique de la courbe des fréquences cumulées (cf. ci-dessous).

Sigmoïde : courbe de fréquences cumulées donnant la « fréquence au dépassement » d'une valeur de la variable étudiée. Cette fréquence est en fait la probabilité pour que la valeur considérée soit dépassée (sigmoïde ou courbe en S à cause de sa forme).