

Adaptation des mils et sorghos à la photopériode, au parasitisme et à la capacité hydrique du sol

P. Franquin*

Résumé

Adaptation des mils et sorghos à la photopériode, au parasitisme et à la capacité hydrique du sol : La productivité d'une culture de mil ou de sorgho résulte, parmi d'autres, d'une combinaison de trois facteurs indépendants : réaction photopériodique, sensibilité au parasitisme, capacité hydrique du sol. La date de plantation et la réaction photopériodique commandent la durée et la position dans le temps des phases de développement des cultivars (phases végétative, florale, fructifère), par rapport aux disponibilités hydriques et à l'occurrence du parasitisme, celles-ci étant déterminées par la répartition des pluies et par la capacité en eau du sol. La démonstration repose sur deux outils : un modèle probabiliste de la période climatique de végétation et un modèle d'évaluation, en termes de rendement relatif R/100, du calage des cultivars.

Introduction

Il n'y a pas de relation apparente entre ces trois conditions de l'environnement que sont la durée du jour (photopériode), la capacité du sol pour l'eau et le parasitisme. Or, pour une grande part, la productivité d'un mil ou d'un sorgho résulte de l'interférence de ces trois conditions, ainsi qu'il peut être montré au moyen de deux modèles :

– un modèle fréquentiel de la période climatique de végétation. Ce modèle géométrique, qui intègre ensemble des caractéristiques physiques de l'atmosphère et du sol, rend compte en termes probabilistes des durées et positions dans le temps de cette période de végétation. Le principe de ce système a été présenté ici-même à l'ICRISAT en 1978, à l'occasion d'une conférence (International Workshop on the Agroclimatological Research Needs of the Semi-Arid Tropics);

– un modèle d'évaluation des effets, sur la productivité, du "calage" des cycles des cultivars par rapport aux caractéristiques statistiques de durée et de position de la période, établies au moyen du modèle précédent.

Ce dernier modèle est fondé sur la supposition que la production de matière sèche (M.S.) est une fonction de l'intégrale des valeurs instantanées de l'évapotranspiration relative ETR/ETP (Franquin 1980) :

$$\text{Rendement (M.S.)} = f\left(\int_{t_1}^{t_2} \frac{\text{ETR}}{\text{ETP}} dt\right) \quad (1)$$

Pour l'ensemble du cycle de végétation d'un cultivar et pour des intervalles de temps d'un jour, le rendement en matière sèche peut alors être formulé comme suit :

$$R(\text{M.S.}) = \bar{m}d \frac{\bar{\text{ETR}}}{\text{ETP}} \quad (2)$$

Cette formulation diffère de celle de de Wit [$Y = m(T/E_0)$, 1958], qui néanmoins la confirme, en ce que ETR et ETP se substituent respectivement à la transpiration T et à l'évaporation-bac E_0 ; en ce que aussi le paramètre "temps", c'est-à-dire la durée d, en jours, du cycle de végétation, est explicite; \bar{m} est alors, pour ETR = ETP, le taux journalier moyen de M.S., taux qui dépend de la

*Agroclimatologue à l'ORSTOM, Paris, France.

photosynthèse (en rapport avec le rayonnement et la température) et de la fertilité du sol.

Le produit $\bar{m}d$ représente donc, pour une année particulière, le rendement R_o qui eut été obtenu cette année-là pour $ETR = ETP$. D'où :

$$R/\bar{m}d = R/R_o = \frac{E\bar{T}R}{E\bar{T}P} \quad (3)$$

Si on admet que \bar{m} ne varie pas sensiblement d'une année à l'autre en régions tropicales (sol et densité de plantation identiques; saturation de la photosynthèse par la lumière et la température), le rendement R_o varie chaque année avec d . En effet, la durée de cycle d'un cultivar photopériodique, par exemple, varie avec la date de plantation, c'est-à-dire avec la photopériode. Soit d_o la durée de cycle optimale pour le rendement : le rendement potentiel interannuel est $\bar{m}d_o$. Soit 100 ce rendement potentiel : alors la durée relative variable du cycle est $\delta = d/d_o$, avec $0 \leq \delta \leq 1$. D'où :

$$R/100 = \delta \frac{E\bar{T}R}{E\bar{T}P} \quad (4)$$

On admettra ici que le rendement R est linéairement proportionnel à δ , durée relative du cycle de végétation, du moins en première approximation.

Mais toutes les phases de développement d'une plante ne varient pas en durée de la même façon, certaines même pouvant rester constantes. Soit, par exemple, trois phases. A condition de pondérer, relativement aux exigences en eau, chacune des phases par un exposant k_i , on écrira :

$$R/100 = \delta_1 \left(\frac{E\bar{T}R}{E\bar{T}P}\right)_1^{k_1} \cdot \delta_2 \left(\frac{E\bar{T}R}{E\bar{T}P}\right)_2^{k_2} \cdot \delta_3 \left(\frac{E\bar{T}R}{E\bar{T}P}\right)_3^{k_3} \quad (5)$$

ou, plus généralement :

$$R/100 = \prod_{i=1}^p \delta_i \left(\frac{E\bar{T}R}{E\bar{T}P}\right)_i^{k_i} \quad (6)$$

Les coefficients k_i notent, eu égard au facteur eau, l'importance relative de chacune des phases dans le déterminisme du rendement (Jensen 1968).

Si donc on admet qu'en régions tropicales \bar{m} reste interannuellement à peu près constant, cette formulation est généralisable à toute plante, qu'elle soit ou non photopériodique, que les δ_i varient ou non avec la photopériode et/ou la température. Dans le cas d'un cultivar non-photopériodique en conditions de température

optimales pour la durée, les δ_i sont égaux à 1. D'où, pour un développement en trois phases :

$$R/100 = \left(\frac{E\bar{T}R}{E\bar{T}P}\right)_1^{k_1} \cdot \left(\frac{E\bar{T}R}{E\bar{T}P}\right)_2^{k_2} \cdot \left(\frac{E\bar{T}R}{E\bar{T}P}\right)_3^{k_3} \quad (7)$$

On retrouve ici la formulation de Jensen (1968), qui s'applique de même au cas d'un cultivar photopériodique que l'on planterait chaque année à date fixe, considérant que les δ_i sont égaux à 1.

Chez les mils et sorghos, on considèrera trois phases de développement :

- une phase "végétative", de la germination à l'initiation florale, de durée relative δ_1 ;
- une phase "florale", de l'initiation florale à la nouaison (fruit setting), de durée relative δ_2 ;
- une phase "fructifère", de la nouaison à la maturation (grain filling), de durée relative δ_3 .

Si le cultivar est strictement photopériodique (absolu) et en admettant que les températures varient peu interannuellement, les durées relatives δ_2 et δ_3 peuvent être égalées à 1 (les phases 2 et 3 sont à peu près fixes dans le temps). Seule varie, avec la date de plantation, la durée relative δ_1 de la phase végétative. Si, par ailleurs, on considère non pas le rendement en matière sèche, mais le rendement en grain, ETM (évapotranspiration maximale) se substituant à ETP, on aura :

$$R/100 = \delta_1 \left(\frac{E\bar{T}R}{E\bar{T}M}\right)_1^{k_1} \cdot \left(\frac{E\bar{T}R}{E\bar{T}M}\right)_2^{k_2} \cdot \left(\frac{E\bar{T}R}{E\bar{T}M}\right)_3^{k_3} \quad (8)$$

La durée optimale de la phase végétative peut être tirée d'une expérience sur le terrain ou déterminée par la première date possible de plantation ou obtenue par un ensemble de relations données en Annexe (voir à la fin).

On considèrera, dans la suite, d'abord les cultivars absolument photopériodiques, puis, ensemble, les cultivars non-photopériodiques et ceux qui sont relativement photopériodiques.

Cultivars absolument photopériodiques

A condition de semer ces mils ou sorghos dans un certain intervalle de temps (qui peut aller jusqu'à 2 mois), les phases florale et fructifère restent approximativement stables en durée et fixes dans le temps. Seule varie, avec la date de

plantation, la durée d_1 de la phase végétative, cette durée étant un facteur très important de la productivité.

Curtis (1968) a montré que les populations de sorgho photopériodiques traditionnellement cultivées au Nigeria "épient" généralement vers la fin des grosses pluies. Cette observation peut être précisée si l'on trace, pour une station, la courbe mensuelle moyenne des pluies et qu'on l'intersecte par les courbes moyennes de ETP et ETP/2 (Fig. 1). Numérotant de 1 à 4 les intersections, on constate que les populations en question épient aux environs proches de l'intersection 3, et donc "fleurissent" entre les intersections 3 et 4.

Or cette situation se retrouve en Haute-Volta pour les mils photopériodiques. Des échantillons de mils, prélevés dans des villages de Haute-Volta, ont été collectés en 1976 par Clément, Perret et al. Ces échantillons ont été semés le 1 juillet à l'ICRISAT à Kamboinsé, stations proche de Ouagadougou. Puis les dates de floraison femelle ont été relevées. La Figure 1 rapporte aux événements 3 et 4 les dates de floraison des échantillons prélevés près de Ouahigouya ($13^{\circ}55'$) dans le Nord, Ouagadougou ($12^{\circ}21'$) dans le Centre, Bobo-Dioulasso ($11^{\circ}10'$) dans le Sud. On constate que les dates de floraison femelle à Kamboinsé se situent très généralement dans l'intervalle entre les intersections 3 et 4, si du moins on ajoute plus ou moins 5 jours selon que la station est plus au nord ou au sud de Kamboinsé.

Par ailleurs, Cochemé et Franquin (1967), Franquin (1969) a montré que le rendement d'un mil photopériodique (Sanio) de Bambey (Sénégal) était maximal dans les années où la date d'épiaison, à peu près fixe (le 20/09), se trouvait proche de l'intersection 3. L'écart entre la date variable de cette intersection et la date du 20/09 explique à lui seul 55% de la variance du rendement.

Cochemé et Franquin (1967), Franquin (1969), Curtis (1968), Kassam (1974), et Wien et Summerfield (1980) qui rapportent les mêmes observations pour des niébés photopériodiques, donnent l'explication suivante de l'effet sur le rendement de la date de floraison par rapport à la fin des pluies : si la date de floraison est trop précoce, le grain est endommagé par des maladies et parasites; si, par contre, la floraison est trop tardive, échappant par là aux effets de l'impact direct des pluies sur l'épi, le remplissage des grains et la maturation sont incomplètes en

raison de l'insuffisance d'eau dans le sol pour assurer la fructification.

Les variétés photopériodiques locales sont partout mieux adaptées à ces exigences contraires que les variétés d'origine plus méridionale ou plus septentrionale. L'adaptation répond à la nécessité, pour la culture du mil ou du sorgho, d'échapper d'une part à l'impact direct des pluies sur la plante et d'autre part à l'insuffisance d'eau dans le sol. Cette adaptation, qui constitue un compromis entre deux risques opposés, résulte d'une sélection ancestrale en rapport avec la réaction photopériodique et la température, qui ne changent guère interannuellement au plan local. Il convient donc de "caler", dans toute situation géographique, des cultivars dont la date de floraison est compatible avec la susceptibilité aux parasites et avec la capacité hydrique du sol.

Calage de cultivars absolument photopériodiques

La floraison d'un cultivar photopériodique absolu se réalisant à date à peu près fixe (si le semis n'est pas trop tardif), la durée du cycle de végétation varie avec la date de plantation.

En fait, seule varie la durée d_1 de la phase végétative, les durées d_2 et d_3 des phases florale et fructifère restant constantes et à peu près fixes dans le temps. Toutes autres choses égales, la productivité de la culture est fonction de cette durée d_1 de la phase végétative et sa productivité "relative" ($R/100$), de la durée relative δ_1 de cette phase.

En rapport avec la formulation (8), le calage du cycle d'un tel cultivar (absolument photopériodique) de mil ou sorgho, se présente comme dans l'exemple ci-après :

– La durée de la phase "florale" est constante ($d_2 = 50$ jours) et fixe dans le temps, de la 2ème décennie d'août à la 3ème de septembre, l'épiaison s'étant déterminée dans la 2ème décennie de septembre (cas réel à Ouagadougou).

– La durée de la phase "fructifère", qui suit la phase florale, est constante ($d_3 = 30$ jours) et fixe, s'étendant sur la totalité d'octobre.

– La durée d_1 de la phase "végétative", qui précède la phase florale, est variable avec la date de semis. Cette date de semis est simulée au départ de chacun des 50 bilans hydriques annuels, eux-mêmes simulés selon un pas de temps de 10 jours (voir exemple Fig. 2). La

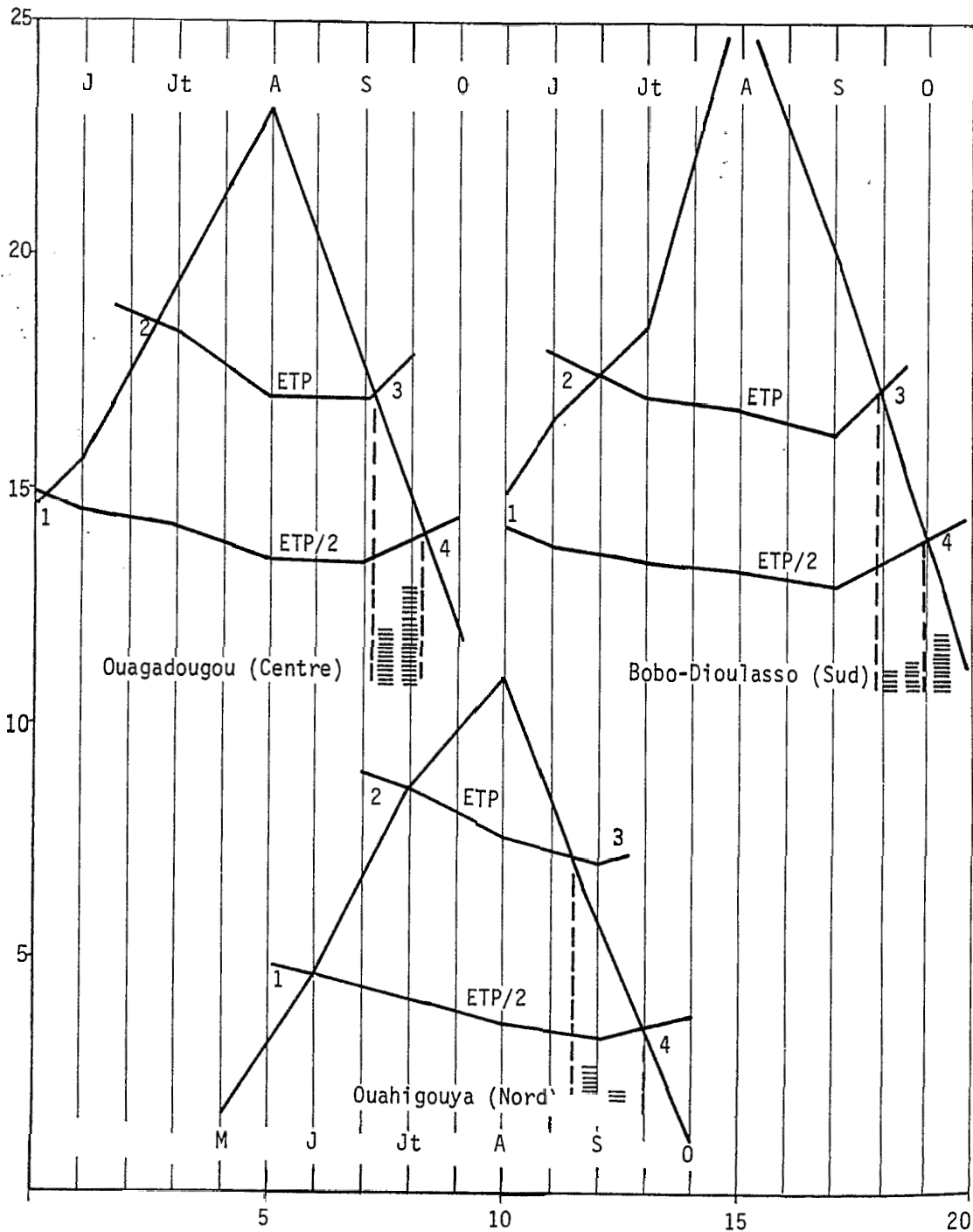


Figure 1. Fréquences, à la station de Kamboisé (proche de Ouagadougou), des dates de floraison femelle d'échantillons de mils collectés dans des villages voisins de Ouahigouya (Nord), Ouagadougou (Centre), Bobo-Dioulasso (Sud). Les instants de floraison tombent entre les intersections 3 et 4 des courbes pluviométriques mensuelles moyennes et des courbes de ETP et ETP/2. A Bobo-Dioulasso, les mils devraient fleurir un peu plus tôt qu'à Kamboisé; à Ouahigouya, un peu plus tard.

	Périodes		P	HD	HR	ETP	K	ETM	ETR	RS	RDR	RDRC	D(RS)	ETM- ETR/ETM	ETR/ETP	ETM-ETR	RU
1	Janvier	1ère	0.0	0.0	0.0	54.0	0.50	27.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	27.0	0.0
2	Janvier	2ème	0.0	0.0	0.0	56.0	0.50	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	28.0	0.0
3	Janvier	3ème	0.0	0.0	0.0	56.1	0.50	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	28.0	0.0
4	Février	1ère	0.0	0.0	0.0	62.0	0.50	31.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	31.0	0.0
5	Février	2ème	0.5	0.5	1.00	63.0	0.50	31.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	31.5	0.5
6	Février	3ème	0.0	0.5	1.00	57.6	0.50	28.8	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	28.8	0.5
7	Mars	1ère	0.0	0.5	1.00	67.0	0.50	33.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	33.5	0.5
8	Mars	2ème	0.0	0.5	1.00	69.0	0.50	34.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	34.5	0.5
9	Mars	3ème	0.0	0.5	1.00	71.5	0.50	35.7	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	35.7	0.5
10	Avril	1ère	0.0	0.5	1.00	71.0	0.50	35.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	35.5	0.5
11	Avril	2ème	0.4	0.9	1.00	71.0	0.50	35.5	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	1.00	0.0	35.5	0.9
12	Avril	3ème	5.0	5.9	1.00	71.0	0.50	35.5	5.9	0.0	0.0	0.0	5.9	0.83	0.08	29.6	5.9
13	Mai	1ère	20.8	20.8	1.00	70.0	0.50	35.0	20.8	0.0	0.0	0.0	20.8	0.41	0.30	14.2	20.8
14	Mai	2ème	44.0	44.0	1.00	69.0	0.50	34.5	34.5	9.5	0.0	0.0	34.5	0.0	0.50	0.0	44.0
15	Mai	3ème	47.8	50.0	1.00	72.6	0.50	36.3	36.3	13.7	7.3	7.3	36.3	0.0	0.50	0.0	50.0
16	Juin	1ère	25.7	39.4	0.79	64.0	0.55	35.2	35.2	4.2	0.0	7.3	45.8	0.0	0.55	0.0	50.0
17	Juin	2ème	69.9	50.0	1.00	60.0	0.65	39.0	39.0	11.0	23.8	31.1	39.0	0.0	0.65	0.0	50.0
18	Juin	3ème	24.0	35.0	0.70	58.0	0.80	46.4	35.0	0.0	0.0	31.1	50.0	0.25	0.60	11.4	50.0
19	Juillet	1ère	38.5	38.5	0.77	56.0	1.00	56.0	38.5	0.0	0.0	31.1	50.0	0.31	0.69	17.5	50.0
20	Juillet	2ème	50.6	50.0	1.00	55.0	1.10	60.5	50.0	0.0	0.6	31.7	50.0	0.17	0.91	10.5	50.0
21	Juillet	3ème	23.1	23.1	0.46	56.1	1.10	61.7	23.1	0.0	0.0	31.7	50.0	0.63	0.41	38.6	50.0
22	Août	1ère	158.0	50.0	1.00	47.0	1.10	51.7	50.0	0.0	108.0	139.7	50.0	0.03	1.06	1.7	50.0
23	Août	2ème	176.1	50.0	1.00	45.0	1.10	49.5	49.5	0.5	126.1	265.8	49.5	0.0	1.10	0.0	50.0
24	Août	3ème	88.9	50.0	1.00	49.5	1.10	54.4	50.0	0.0	39.4	305.2	50.0	0.08	1.01	4.4	50.0
25	Septembre	1ère	36.9	36.9	0.74	46.0	1.10	50.6	36.9	0.0	0.0	305.2	50.0	0.27	0.80	13.7	50.0
26	Septembre	2ème	30.4	30.4	0.61	48.0	1.10	52.8	30.4	0.0	0.0	305.2	50.0	0.42	0.63	22.4	50.0
27	Septembre	3ème	20.8	20.8	0.42	50.0	1.10	55.0	20.8	0.0	0.0	305.2	50.0	0.62	0.42	34.2	50.0
28	Octobre	1ère	10.3	10.3	0.21	56.0	0.90	50.4	10.3	0.0	0.0	305.2	50.0	0.80	0.18	40.1	50.0
29	Octobre	2ème	0.0	0.0	0.0	59.0	0.70	41.3	0.0	0.0	0.0	305.2	50.0	1.00	0.0	41.3	50.0
30	Octobre	3ème	2.2	2.2	0.04	60.5	0.50	30.2	2.2	0.0	0.0	305.2	50.0	0.93	0.04	28.0	50.0
31	Novembre	1ère	0.0	0.0	0.0	56.0	0.50	28.0	0.0	0.0	0.0	305.2	50.0	1.00	0.0	28.0	50.0
32	Novembre	2ème	0.0	0.0	0.0	57.0	0.50	28.5	0.0	0.0	0.0	305.2	50.0	1.00	0.0	28.5	50.0
33	Novembre	3ème	0.0	0.0	0.0	54.0	0.50	27.0	0.0	0.0	0.0	305.2	50.0	1.00	0.0	27.0	50.0
34	Décembre	1ère	0.0	0.0	0.0	52.0	0.50	26.0	0.0	0.0	0.0	305.2	50.0	1.00	0.0	26.0	50.0
35	Décembre	2ème	0.0	0.0	0.0	52.0	0.50	26.0	0.0	0.0	0.0	305.2	50.0	1.00	0.0	26.0	50.0
36	Décembre	3ème	0.0	0.0	0.0	55.0	0.50	27.5	0.0	0.0	0.0	305.2	50.0	1.00	0.0	27.5	50.0
Totaux			873.6			2116.9		1388.2	568.4							819.8	
Moyennes														0.66	0.29		

Figure 2. Exemple de simulation du bilan hydrique décadaire pour un cultivar photopériodique de mil ou de sorgho qui fleurit à date à peu près fixe. La durée de la phase végétative (ici 90 jours) varie avec la date de semis; les phases florale (50 jours) et fructifère (30 jours) restent à peu près stables en durée et en position: Cette simulation permet d'évaluer les indices ETR/ETP et ETR/ETM.

décade de semis est ici, par convention, la première décade pour laquelle la pluie P est égale ou supérieure à ETP/2 (35 mm en moyenne à Ouagadougou). Dans ces conditions, la période de semis s'étend sur 2 mois, de la lère décade de mai (M1) à la lère décade de juillet (Jt1). De M1 à la 2ème décade d'août, la phase végétative est de 10 décades : c'est la durée "optimale" d_0 à laquelle se rapportent les durées d_1 variables. Ainsi, quand le semis tombe en Jt1, la phase végétative recouvre 4 décades, d'où : $\delta_1 = 0.4$; la décade moyenne de semis étant la lère de juin (J1), d_1 est alors égale à 7 décades, d'où : $\delta_1 = 0.7$; etc.

Les bilans hydriques ont été calculés respectivement selon des RU de 50, 100 et 150 mm.

Dans le cas extrême où le semis tombe en M1, les coefficients culturaux K appliqués au bilan hydrique de la culture constituent la suite ci-après, les parenthèses délimitant les phases :

(0.50-0.50-0.55-0.65-0.80-1.00-1.10-1.10-1.10-1.10) (1.10-1.10-1.10-1.10-1.10) (0.90-0.70-0.50).

Dans l'autre cas extrême où le semis tombe en Jt1, la suite des K est ainsi :

(0.50-0.50-0.55-0.65) (0.80-1.00-1.10-1.10-1.10) (0.90-0.70-0.50).

La Figure 2 présente un bilan annuel établi sur ces principes, avec RU de 50 mm, pour la station de Ouagadougou tout proche de celle de Kamboinsé.

Enfin, à défaut de rendements de mil ou sorgho qui permettraient d'estimer les coefficients k_1 , k_2 , k_3 de la formule (8), on adopte ici ceux qui ont été obtenus pour un sorgho irrigué par Jensen et Sletten (1965) : 0.5-1.5-0.5.

L'opération consiste maintenant, pour chacun des 50 bilans annuels établis respectivement sur la base des trois RU (50, 100 et 150 mm). à évaluer l'expression :

$$R/100 = \delta_1 \left(\frac{\overline{ETR}}{\overline{ETM}}\right)_1^{0.5} \cdot \left(\frac{\overline{ETR}}{\overline{ETM}}\right)_2^{1.5} \cdot \left(\frac{\overline{ETR}}{\overline{ETM}}\right)_3^{0.5} \quad (9)$$

La Figure 3 présente, pour chacune des trois RU, les valeurs moyennes - sur 50 années - de chacun des trois termes multiplicatifs de l'expression (9) et les valeurs moyennes de R/100.

On comparera aussi les distributions de fréquences de RU/100 établies pour chacune des trois RU (Tab. 1).

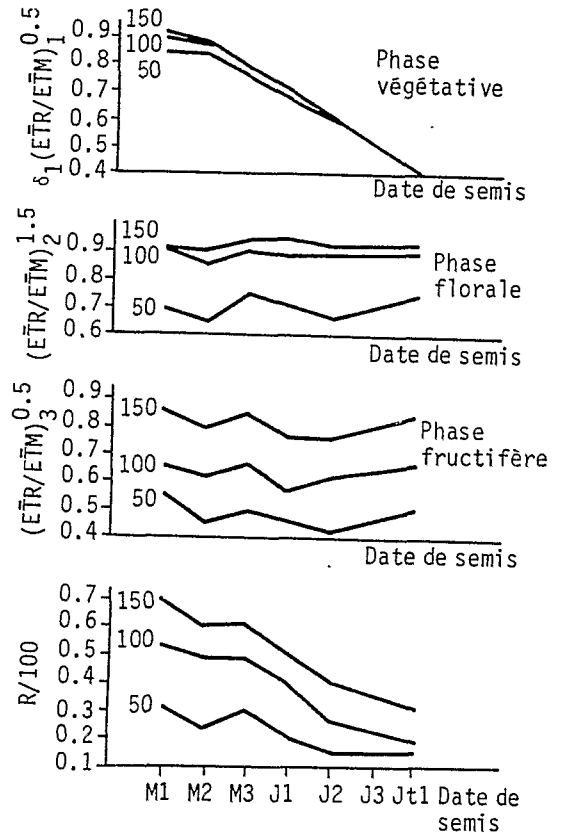


Figure 3. Variations, selon la RU (50, 100, 150 mm) et selon la date de semis (M1 : lère décade de mai, etc.), des termes relatifs du rendement propres aux phases végétative, florale et fructifère. Les variations du rendement relatif ($R/100$) résultent de la combinaison des variations de ces trois termes. δ_1 varie avec la date de semis, de 0.4 (Jt1) à 1.0 (M1). Le rendement diminue avec la date de semis, c'est-à-dire avec δ_1 ; par ailleurs, le rendement augmente avec la RU (50, 100, 150 mm) au niveau des phases florale et fructifère.

Enfin, on peut visualiser, en les positionnant en fréquence dans le temps, les déficits hydriques des phases florale et fructifère (Fig. 4). Ces déficits sont concrétisés par les surfaces hachurées délimitées :

- à gauche, par les courbes continues résultant de l'application aux bilans hydriques du principe de "période fréquente de végétation", principe évoqué dans l'introduction. Les courbes du bas de la figure, qui se rapportent à la phase florale,

Tableau 1. Distributions de fréquences de RU/100 pour trois valeurs de RU

R/100	RU : 50 mm	RU : 100 mm	RU : 150 mm
0.01-0.10			
0.11-0.20			
0.21-0.30			
0.31-0.40			
0.41-0.50			
0.51-0.60			
0.61-0.70			
0.71-0.80			
Moy.	0.23	0.40	0.45

donnent les probabilités observées de dépassement de 0.90 ETR/ETP; les courbes du haut, qui se rapportent à la phase fructifère, donnent les probabilités observées de dépassement de 0.50 ETR/ETP; ces niveaux de ETR/ETP sont fixés quelque peu arbitrairement comme représentant des seuils inférieurs nécessaires pour l'obtention d'un rendement convenable; tous autres seuils peuvent être préférés et trouvés dans les bilans hydriques.

— à droite, par les courbes tirées correspondant à la probabilité 1.00 de dépassement des seuils 0.90 et 0.50 à la date finale de réalisation des phases florale et fructifère.

Conclusion

Il est aisé de comprendre que, pour un cultivar d'épiaison plus tardive, échappant à l'impact des pluies sur l'épi, les déficits hydriques des phases florale et fructifère seraient encore plus importants; néanmoins, les risques décroissent à mesure qu'augmente la capacité hydrique du sol.

Une autre alternative, au contraire, est de rechercher un cultivar d'épiaison plus précoce, mais de bonne tolérance au parasitisme, afin d'exploiter des sols de capacité hydrique faible.

On peut encore faire d'autres remarques :

Pour le cultivar en question, dont l'épiaison se détermine dans la 2ème décade de septembre, le taux d'augmentation de R/100 (voir les distributions de fréquence) est beaucoup plus fort de 50 à 100 mm que de 100 à 150 mm. Les Figures 3 et 4 montrent que, dans ce dernier cas, l'amélioration porte presque uniquement sur la phase fructifère.

Les disponibilités hydriques durant la phase végétative paraissent toujours convenables quelle que soit la date simulée du semis (première décade totalisant une lame de pluie dépassant ETP/2, soit 35 mm en moyenne à Ouagadougou). Cela est vrai quelle que soit la RU (Fig. 3). Si, dans la réalité, il n'en allait pas ainsi, c'est qu'il y aurait des pertes d'eau par ruissellement, pertes qu'il conviendrait de limiter. Il est vraisemblable néanmoins qu'un bilan hydrique calculé selon un pas de temps de 5 jours mettrait en évidence des déficits en eau que masque le pas de 10 jours. Enfin, des pluies excédentaires durant cette phase végétative peuvent exercer un effet déprimant sur le rendement.

Les rendements seraient d'autant plus élevés que les semis sont plus précoces (Fig. 3), en raison de l'augmentation de durée de la phase végétative. Mais ils n'augmenteraient plus, du fait des aléas pluviométriques, antérieurement à la décade M1, M1 définissant la durée optimale $d_0 = 10$ décades de la phase végétative du cultivar en question.

Cultivars non-photopériodiques et relativement photopériodiques

Exprimée en "somme de degrés-jour", la durée de cycle des cultivars strictement non-photopériodiques se montre constante. Évaluée en "nombre de jours", la durée reste constante quand la température (nocturne) varie peu elle-même, comme c'est le cas durant la saison des pluies.

La durée de cycle de ces cultivars non-photopériodiques est très courte (80/70 jours et moins). Pour cette raison, ils ne possèdent pas le potentiel de productivité des cultivars photopériodiques dont la phase végétative est extensible. Aussi rencontre-t-on des mils non-photopériodiques, en Haute-Volta, surtout dans le nord où la période de végétation des cultures est très courte; mais aussi dans le sud, dans la région de Léo par exemple, où leur intérêt est de constituer des cultures dites "de soudure".

Un autre intérêt des cultivars non-photopériodiques est leur souplesse d'emploi puisqu'ils ne fleurissent pas à date fixe, au contraire des cultivars absolument photopériodiques. Ce caractère permet de caler leurs phases de floraison et de fructification en conditions hydriques optimales; ou de les semer en tout

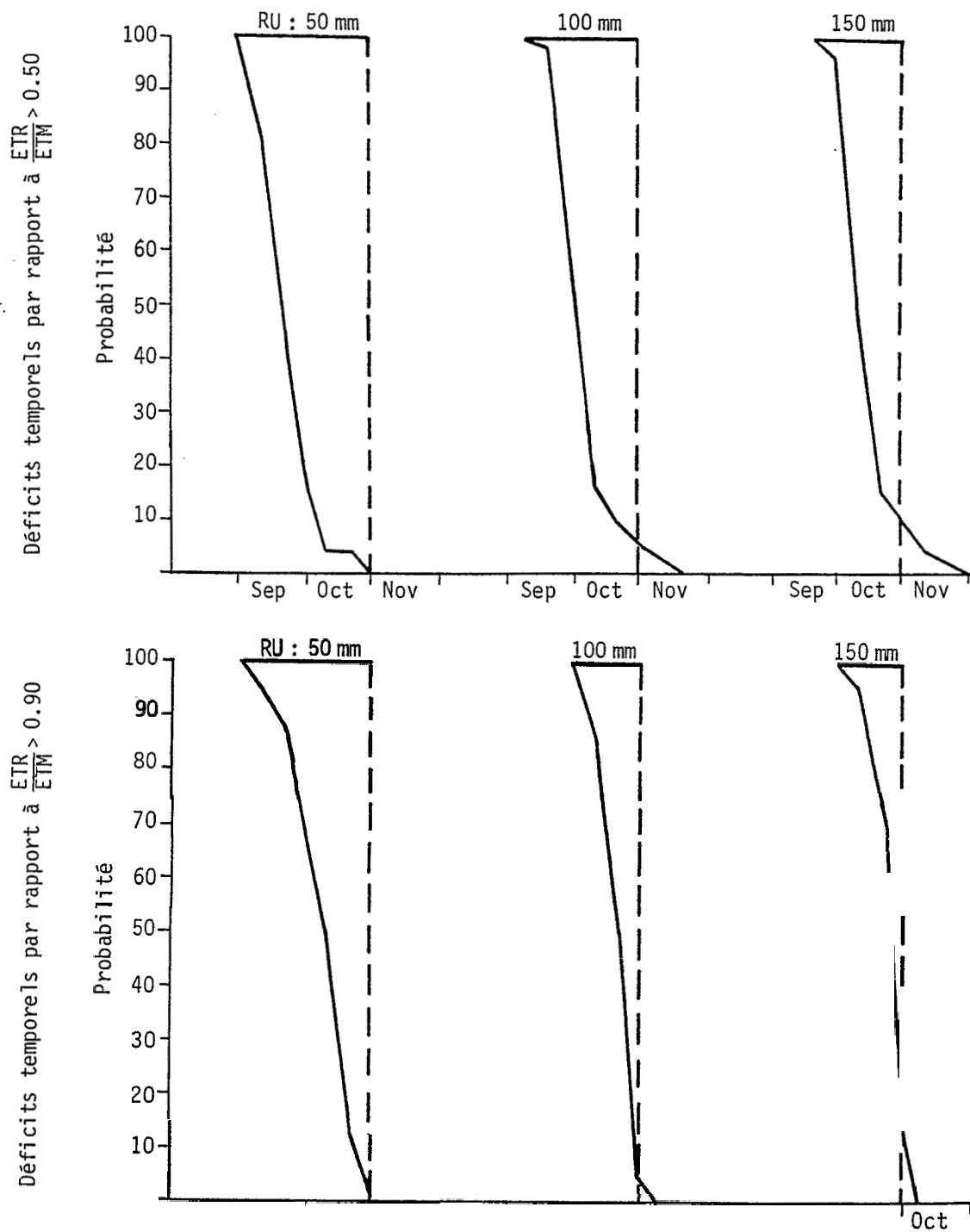


Figure 4. Représentation en fréquence et dans le temps, selon la RU (50, 100, 150 mm), des déficits en eau : en bas, concernant la phase florale, déficit par rapport au critère $\frac{ETR}{ETM} > 0.90$; en haut, concernant la phase fructifère, déficit par rapport au critère $\frac{ETR}{ETM} > 0.50$. La durée du déficit s'exprime en termes de probabilité, qui diminue avec la RU.

début de saison afin d'assurer la soudure. Il conviendrait de pouvoir allonger leur cycle, jusqu'à 100 jours par exemple, afin d'améliorer leur potentiel de productivité.

A cet égard, on peut encore s'adresser aux cultivars "relativement" photopériodiques (non absolus), dont les cycles sont de durée d'autant plus longue qu'ils sont semés plus tôt (quoique non pas trop tôt) et dont la floraison et la fructification ne sont fixes que pour une date de semis fixe, comme c'est le cas pour les non-photopériodiques. Ils se comportent donc comme ces derniers lorsque la date de semis varie peu.

Calage des cultivars non-photopériodiques ou relativement photopériodiques.

Le calage des phases florale et fructifère est grandement facilité si l'on dispose d'un modèle

de la "période climatique fréquentielle de végétation". De tels modèles ont été établis pour Ouagadougou à partir d'une simulation de bilans hydriques (Fig. 2) calculés sur la base de RU de 50 mm (Fig. 5) et 100 mm (Fig. 6). Le contour extérieur du modèle caractérise la sous-période dite "semi-humide" définie par les probabilités que ETR/ETP soit égal ou supérieur à 0.50; le contour intérieur caractérise la sous-période dite "humide" définie par les probabilités que ETR/ETP soit égal ou supérieur à 0.90.

Supposons un cultivar non-photopériodique de 100 jours dans les conditions de température de Ouagadougou; ou un cultivar relativement photopériodique dont le cycle serait de 100 jours s'il était semé aux mêmes dates que l'est le précédent. Le cycle et les coefficients culturaux se présentent comme suit :

(0.50-0.55-0.60) (0.80-1.00-1.10-1.10) (0.90-0.70-0.50)

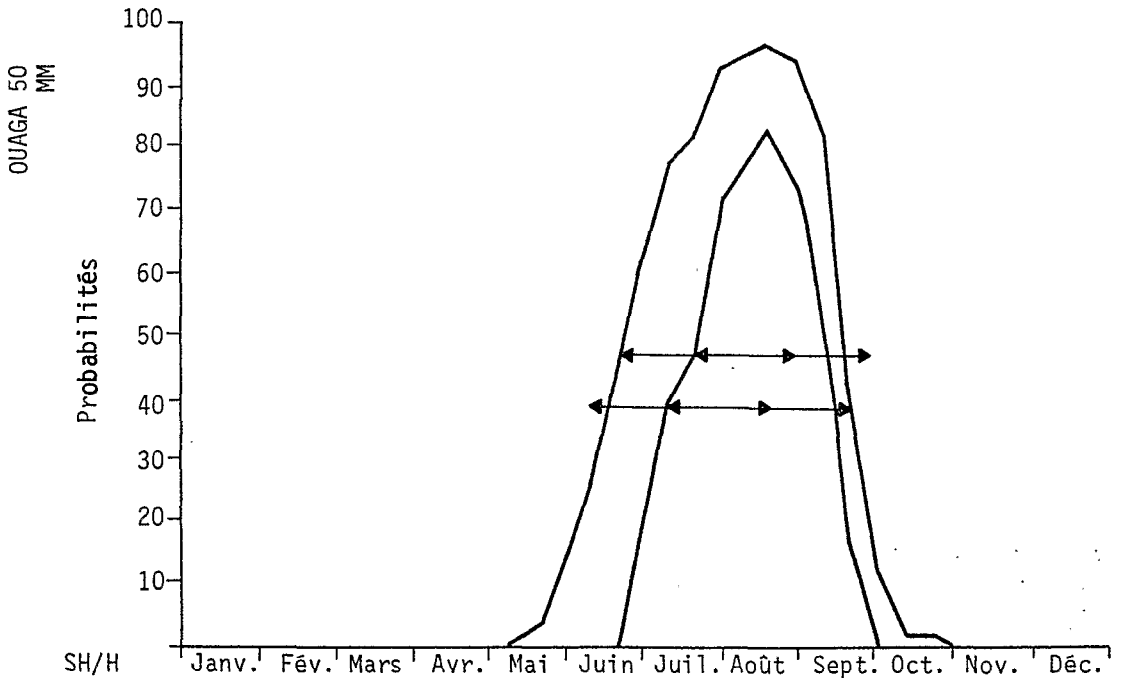


Figure 5. Calage, dans le cadre des sous-périodes fréquentielles "humide" (contour interne) et "semi-humide" (contour externe) des phases "florale" et "fructifère" d'un mil ou sorgho de 100 jours à Ouagadougou. La sous-période humide est délimitée par les probabilités que ETR/ETM soit supérieur à 0.90; la sous-période semi-humide, par les probabilités que ETR/ETM soit supérieur à 0.50. La RU est de 50 mm : l'intervalle de temps convenable pour le semis n'est que de 20 jours (J2+J3) et les probabilités de calage des phases florale et fructifère ne dépassent pas 0.38 et 0.42 respectivement.

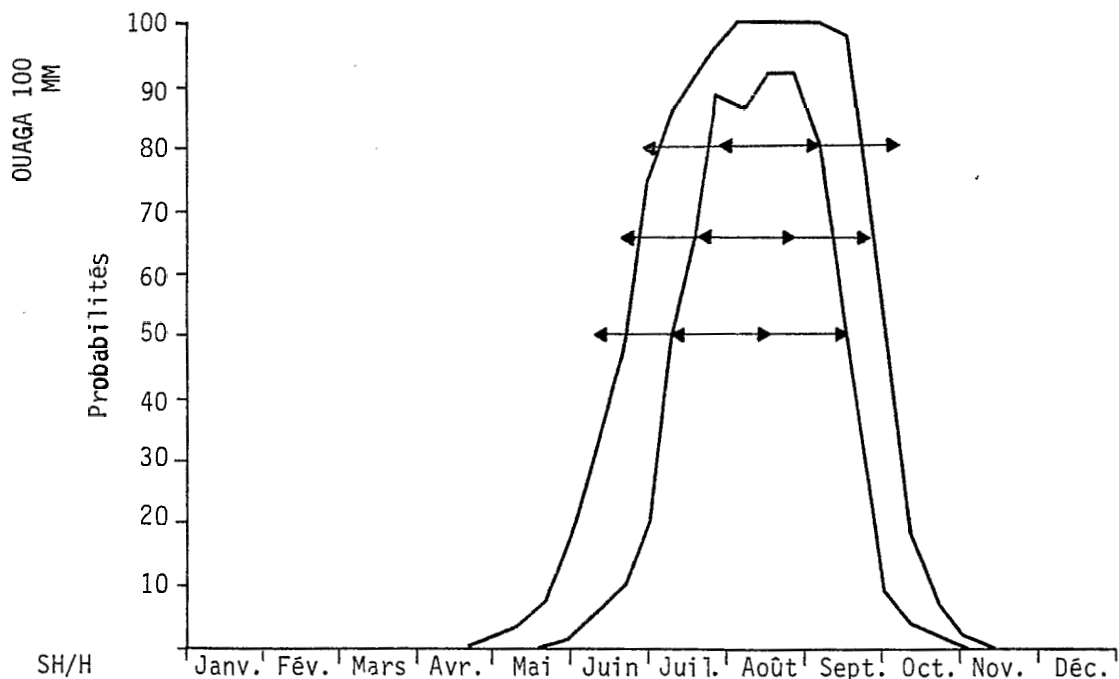


Figure 6. Idem que pour la Figure 5. Mais la RU est de 100 mm : l'intervalle de temps pour le semis est de 30 jours (J2+J3+Jt1) et les probabilités de calage des phases florale et fructifère sont respectivement de 0.70 et 0.98.

La phase florale de 40 jour est la plus critique pour le rendement à l'égard des disponibilités en eau. Il convient donc de la caler à la meilleure probabilité dans le cadre de la sous-période "humide" (contour intérieur, Fig. 5). Cette meilleure probabilité est : 0.70 (le 01/08) \times 0.54 (le 10/09) = 0.38 .

Ce calage apparemment optimal de la phase florale exigerait de semer dans la lère décade de juillet (Jt1). Mais il n'est pas concevable de semer chaque année dans une même décade. Il est indispensable de se donner un intervalle moins étroit de 20 à 30 jours. Si alors on déplace vers l'arrière (Fig. 5) la phase florale de une, deux ou trois décades – ce qui correspond à des semis effectués dans les décades J3, J2, J1 – les probabilités de calage de la phase florale sont respectivement 0.34 , 0.31 , 0.12 , cette dernière étant trop faible : ainsi l'intervalle de temps pour semer serait celui des trois décades : J2+J3/Jt1. Il est remarquable, au plan phytosanitaire, qu'un tel calage fait coïncider la phase florale avec le maximum des pluies, d'où la nécessité de disposer de cultivars tolérants à l'égard du parasitisme.

Mais il importe d'examiner encore les conditions de calage de la phase fructifère de 30 jours par rapport aux probabilités liées à la sous-période "semi-humide" (branche droite du contour extérieur, Fig. 5). Au semis Jt1 correspond une probabilité très faible (le 10/10), pour la phase fructifère, d'être réussie au mieux; au semis J3, une probabilité de 0.12 (le 30/09); au semis J2, une probabilité de 0.42 (le 20/09). L'intervalle convenable de semis est finalement réduit à deux décades : J2+J3.

Cet intervalle est impératif si l'on s'efforce d'obtenir le rendement le moins variable et le meilleur en moyenne. Supposons en effet que l'on opère une simulation de semis identique à celle qui a été pratiquée concernant le cultivar absolument photopériodique. Au moyen de la formule

$$R/100 (E\bar{T}R/E\bar{T}M)_1^{0.5} \cdot (E\bar{T}R/E\bar{T}P)_2^{1.5} \cdot (E\bar{T}R/E\bar{T}P)_3^{0.5} \quad (10)$$

appliquée aux bilans hydriques simulés, on peut comparer les distributions de fréquences de $R/100$:

- d'une part, pour des semis effectués dans la décade J2;

- d'autre part, de façon dispersée, dans les décades M1 à Jt1.

Ces distributions sont montrées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Distributions de fréquences de R/100 pour des semis effectués dans différentes décades

R/100	Semis dispersé	Semis décade J2
0.21-0.30		
0.31-0.40		
0.41-0.50		
0.51-0.60		
0.61-0.70		
0.71-0.80		
0.81-0.90		
0.91-1.00		

Supposons encore que les mêmes cultivars soient cultivés sur un sol de capacité hydrique égale non plus à 50 mm mais à 100 mm. Il suffit de se reporter à la Figure 6 pour constater que l'intervalle de temps convenable pour le semis passe de 20 à 30 jours (J2+J3+Jt1) et que les probabilités de calage des phases florale et fructifère augmentent beaucoup.

Conclusion

Un cultivar non-photopériodique ou relativement photopériodique présente une souplesse de calage meilleure que pour un cultivar absolument photopériodique, surtout s'il est cultivé sur un sol de capacité hydrique convenable. Il devra nécessairement présenter une bonne résistance au parasitisme en raison de la position variable dans le temps des phases florale et fructifère par rapport au maximum des pluies.

Remerciements

Mes plus vifs remerciements vont à MM. Clément, Perret et al. qui ont rempli la mission de collecte des échantillons de mils en Haute-Volta;

ainsi qu'à l'ICRISAT dans ce pays pour les observations de floraison de ces échantillons.

Annexe

Durée de la phase végétative et nombre de noeuds foliaires

- Chez une plante strictement non-photopériodique, la durée d de la phase végétative ne dépend (à saturation de lumière) que de la température, selon la relation :

$$d(\bar{T}_i - T_o) = \Sigma(T_i - T_o) = K \quad (A1)$$

où T_i est la température moyenne (de la nuit, chez une plante d'espèce nyctipériodique) du jour i , T_o une température de base; K est une constante variétale.

- Chez une plante strictement photopériodique, la durée d dépend à la fois de la photopériode et de la température, selon la relation :

$$d(\bar{T}_i - T_o) = k_o + \frac{\pi m}{2a} [1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{N_o/H_o}{\bar{N}_i/H_i} \right)] \quad (A2)$$

Ce résultat, pour une plante nyctipériodique comme l'est un mil ou un sorgho, est établi à partir des principes suivants : la plante est le siège d'un "rythme circadien" qui comporte deux périodes en 24h, l'une de sensibilité "lumineuse" de durée H_o , l'autre de sensibilité "obscur" de durée N_o (avec $H_o + N_o = 24$). L'oscillation du système endogène N_o/H_o constitue la "base" à laquelle sont comparées, au moyen du phytochrome, les oscillations exogènes N_i/H_i des durées réelles de la nuit et du jour. Cette pulsation "forcée" N_i/H_i (à l'égard de la pulsation "propre" N_o/H_o) est pour la plante une information qui peut être effectivement introduite dans l'équation différentielle d'un oscillateur harmonique forcé, amorti par frottement de l'alternance nuit/jour :

$$u'' + \operatorname{cotg}^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{N_o/H_o}{\bar{N}_i/H_i} \right) u' + \left(\frac{\pi}{N_o/H_o} \right)^2 u = a(T_i - T_o) \frac{1}{\bar{N}_i/H_i} \sin \left(\frac{\pi}{\bar{N}_i/H_i} h \right) \quad (A3)$$

L'intégration, par rapport à h ($h = t/(24-t)$, $0 \leq t \leq 24$), de l'excitation thermique liée à

$a(T_i - T_o)$ – excitation dont un seuil minimum m est requis pour l'induction de la floraison – conduit à la relation (2), où a et m sont des paramètres.

Le nombre n de noeuds ou d'entrenoeuds foliaires de la tige, à l'initiation de la floraison, dépend de la photopériode et de la température selon les relations :

$$n = n_o + \alpha m t g^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{N_o/H_o}{\bar{N}_i/\bar{H}_i} \right) \quad (A4)$$

$$n = n_o + \alpha \frac{2a}{\pi} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{N_o/H_o}{\bar{N}_i/\bar{H}_i} \right) \Sigma (T_i - T_o) \quad (A5)$$

k_o et n_o sont respectivement la somme de température et le nombre de noeuds correspondant à la phase "juvénile"; $\pi m/2a$ peut se ramener à un seul paramètre k ; on montre que : $k_o + k = K$, k étant la somme de températures séparant 2 noeuds.

L'expérience vérifie bien ces relations, pour un sorgho par exemple, si on en juge par les ajustements statistiques des relations (2) et (4) (Fig. 7).

Bibliographie

COCHEME, J., FRANQUIN, P. 1967. Rapport technique sur une étude agroclimatique de l'Afrique sèche au sud du Sahara. Rome: FAO. 326 p.

CURTIS, D. L. 1968. The relation between the date of heading of Nigerian sorghums and the duration of the growing season. *Journal of Applied Ecology* 5:215-226.

FRANQUIN, P. 1969. Analyse agroclimatique en régions tropicales. Saison pluvieuse et saison humide. Applications. Cahiers ORSTOM série Biologie 9:65-95.

FRANQUIN, P. 1980. The water balance and frequency period of vegetation. Pages 100-105 in *Proceedings of the International Workshop on the Agroclimatological Research Needs of the Semi-Arid Tropics*, 22-26 Nov. 1978, Hyderabad, Inde. Patancheru, A. P. 502-324, Inde: ICRISAT.

FRANQUIN, P. 1980. Production de masse, production de nombre et rendement. Cah. ORSTOM, sér. biol. 42:3-7.

JENSEN, M. E. 1968. Water consumption by agricultural plants. Pages 1-22 in *Water deficits and plant growth*, II. Academic Press, N. Y. and London.

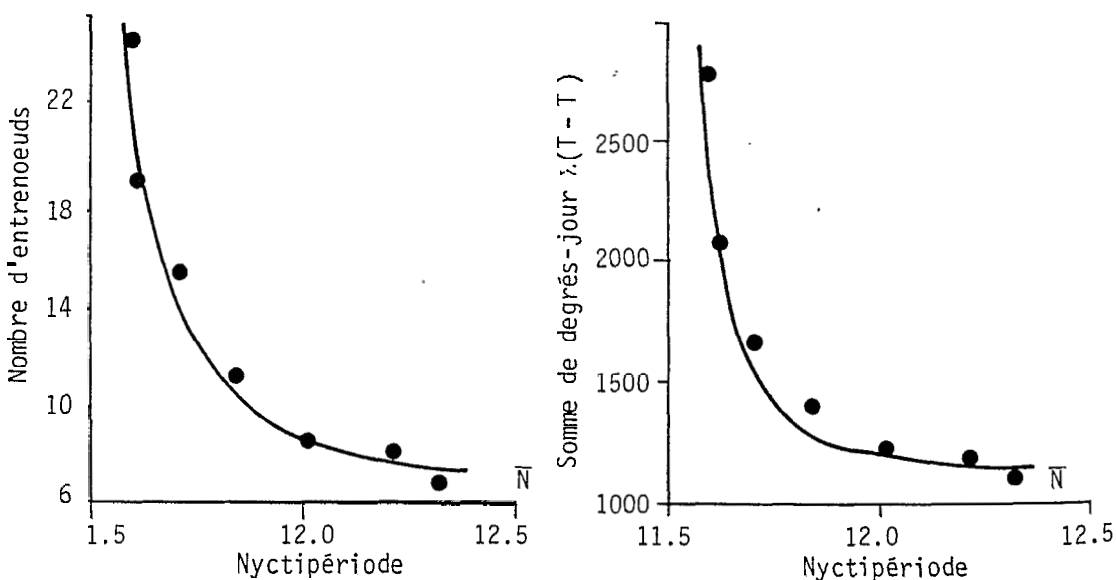


Figure 7. Données relatives à un sorgho cultivé au Tchad en conditions naturelles. A droite, ajustement de la relations (2) de l'Annexe à la somme de degrés-jour $\Sigma(T_i - T_o)$, en fonction de la nyctipériode moyenne \bar{N}_i ; à gauche, ajustement de la relation (4) au nombre de noeuds de la tige, en fonction de la nyctipériode moyenne \bar{N}_i .

JENSEN, M. E., SLETTEN, W.H. 1965. Evapotranspiration and soil moisture fertilizer interrelations with irrigated grain sorghum in the Southern Plains. Pages 5-27 in USDA Conservation Research Report. Washington.

KASSAM, A. H. 1974. Effect of date of sowing on the lengths of the developmental phases in photosensitive sorghums at Samaru. Samaru Agricultural Newsletter 16:23-29.

WIEN, H. C., SUMMERFIELD, R. J. 1980. Adaptation of cowpeas in West Africa: effects of photoperiod and temperature responses in cultivars of diverse origin. Advances in Legume Science. Eds Summerfield and Banting 1980:405-417.

WIT (de), C. T. 1958. Transpiration and crop yields. Institute of Biological and Chemical Research on Field Crops and Herbage. Wageningen, The Netherlands, Verse-Lanbouwk, onder Z. n° 64. 6-S Gravenhage.