

Étude originale

Caractérisation de l'agrobiodiversité de l'agrosystème aux gènes

Adaptation des sorghos du Mali à la variabilité climatique

Mamoutou Kouressy¹
Seydou Traoré²
Michel Vaksman³
Mikkel Grum⁴
Ibrahim Maikano⁵
Mamy Soumaré¹
Pierre Sibiry Traoré⁶
Didier Bazile⁷
Michael Dingkuhn⁷
Amadou Sidibé¹

¹ Institut d'économie rurale (IER),
Sotuba,
BP 438,
Bamako
Mali
<Mamoutou.kouressy@ier.ml>
<mamy.soumare@ier.ml>

² AGRHYMET,
BP 11011,
Niamey,
Niger
<S.Traore@agrhyment.ne>

³ Centre de coopération internationale
en recherche agronomique
pour le développement (Cirad),
BP 1813,
Bamako
Mali
<michel.vaksman@cirad.fr>

⁴ Biodiversity International,
PO Box 30677,
Nairobi
Kenya
<m.grum@cgiar.org>

⁵ International Crops Research Institute
of the Semi-Arid Tropics (ICRISAT),
BP 12404,
Niamey
Niger
<i.maikano@cgiar.org>

⁶ International Crops Research Institute
of the Semi-Arid Tropics (ICRISAT),
BP 320, Bamako
MALI
<P.S.Traore@cgiar.org>

⁷ Centre de coopération internationale
en recherche agronomique
pour le développement (Cirad),
Département Environnements & Sociétés,
UPR 47 « GREEN »,
Campus international de Baillarguet
TA C-47/F,
34398 Montpellier cedex 5
<didier.bazile@cirad.fr>
<dingkuhn@cirad.fr>

Résumé

Il est couramment admis que la sécheresse en Afrique de l'Ouest a entraîné l'adoption par les paysans de variétés de sorgho plus précoces que les cultivars traditionnels. Pour mesurer l'évolution récente du cycle des sorghos du Mali, nous avons étudié la phénologie de deux collections de variétés locales prospectées à 20 ans d'intervalle en 1978 et en 2000. Les dates de début et de fin de saison des pluies ont été calculées pour tous les villages échantillonnés. La sensibilité des cultivars à la photopériode a été mesurée à l'aide d'un essai comportant deux dates de semis. Un modèle permet d'étudier l'adaptation des variétés au climat en tenant compte de la latitude et du régime des pluies de leurs zones d'origines. Le déficit pluviométrique n'a pas entraîné un raccourcissement important des cycles végétatifs. En 20 ans, le cycle moyen des cultivars locaux s'est raccourci de 5 jours. Pour des latitudes inférieures à 14° N, la grande majorité des cultivars sont photopériodiques, la floraison des variétés se produit dans les 20 jours qui précèdent la date moyenne de fin de la saison des pluies. Ce caractère permet d'optimiser l'alimentation en eau des cultures et d'éviter de nombreuses contraintes biotiques. Pour des latitudes supérieures ou égales à 14° N, la floraison moyenne coïncide avec la fin de saison. On note la présence simultanée de variétés tardives et précoces. Dans ces régions, la culture du sorgho dépend moins de la pluviométrie car les systèmes traditionnels valorisent des situations diversifiées et les reports d'eau sur les toposéquences. Cette diversité des cycles contribue à sécuriser la production agricole en zone aride. Ce travail permet de guider les programmes de sélection dans la définition d'idéotypes spécifiquement adaptés à la gamme d'environnements climatiques rencontrés dans la région.

Mots clés : Mali ; photopériode ; sécheresse ; sorgho ; variabilité génétique.

Thèmes : climat ; productions végétales ; ressources naturelles et environnement.

Abstract

Adaptation of Malian sorghums to climate variability

The phenology of Malian sorghum varieties was studied to understand the impact of climate constraints on their cycle duration. We hypothesized that with recent droughts, farmers had shifted to varieties with shorter cycle durations. The studied germplasm was drawn from two different collections: one made in 1978 and the other in 2000. A phenology model adapted for photoperiod-sensitive sorghums was used to predict cultivar behaviour in their original environment as a function of latitude and rainfall regimes. The average cycle duration of the ecotypes changed little in 20 years. This point negates our assumption, because the rainfall deficit did not result in a shortening of the average cycle duration of the sorghums. A vast majority of ecotypes from humid areas were found to be photoperiod sensitive. This trait allows for optimal use of water supply by the crop and most importantly to evading specific biotic constraints (mold, bird pressure). As one moves towards the northern, drier areas, both late- and early-maturing ecotypes are encountered. This diversity is an important element in securing production in arid regions. Genetic diversity appears to be an important factor in the resilience of the cropping systems in areas with higher climatic risks. This work can guide the breeding programs in defining ideotypes specifically adapted to the range of climatic environments of the area.

Key words: drought; genetic variability; Mali; photoperiod; sorghum grain.

Subjects: climate; natural resources and environment; vegetal productions végétales.

Tirés à part : M. Vaksman

La durée du cycle d'une plante est un caractère essentiel de l'adaptation au milieu. C'est particulièrement vrai dans les conditions soudano-sahéliennes où la saison des pluies s'interrompt brusquement et où sa durée est très variable d'une année à l'autre. Les sécheresses des années 1970 et 1980 ont été caractérisées par une diminution importante des quantités d'eau tombée et par un mouvement vers le sud des isohyètes sur l'ensemble du pays (Diop, 1996). Pour de nombreux auteurs, il est évident que la diminution de la pluviométrie a entraîné l'adoption par les paysans de variétés de cycles plus courts que les cultivars traditionnels (Lacy *et al.*, 2006). Au Burkina Faso, le cycle des variétés de sorgho utilisées par les paysans serait même passé de 120-150 jours à 70-90 jours durant les 15 dernières années (Ingram *et al.*, 2002).

Le premier objectif de ce travail est de préciser les conditions d'adaptation des variétés du Mali au climat spécifique de leur zone d'origine. Le second objectif est de voir si la sécheresse a provoqué un bouleversement dans la diversité des variétés locales par élimination des cultivars tardifs au profit de variétés plus précoces.

Matériel et méthode

Analyses agroclimatiques

Une des principales caractéristiques du climat soudano-sahélien est l'existence d'une relation étroite et linéaire entre la date d'installation des pluies et la durée de la période de culture (Sivakumar, 1988). La durée de la saison de pluies et donc le potentiel de production diminuent lorsque les pluies s'installent tardivement. La connaissance des dates de début et de fin de saison constitue une base essentielle de la caractérisation climatique. Ces dates ont été déterminées à l'aide d'un modèle simple de bilan hydrique et sont définies comme suit (Traoré *et al.*, 2000) :

- la date de début de la saison est le moment où, à partir du 1^{er} mai, le stock d'eau disponible atteint 30 mm sans redescendre en dessous de 10 mm dans les 30 jours qui suivent. Cette date correspond généralement aux périodes de préparation du sol et aux premiers semis dans les systèmes traditionnels ;
- la date de fin de saison correspond au moment où la pluviométrie ne compense

plus l'évapotranspiration. Après la fin de saison, le sol s'assèche progressivement. Dans les champs paysans, cette période correspond généralement à la maturation du grain qui se fait grâce à l'eau stockée dans le sol et aux dernières pluies.

Les caractéristiques du climat ont été étudiées pour la période de 20 ans qui précèdent la prospection de 1978 (1958-1977) et sur les 20 ans qui suivent (1979-1998).

Matériel végétal

Les variétés étudiées proviennent de deux prospections des cultivars locaux réalisées au Mali à 20 ans d'intervalle (figure 1). Le premier lot de 472 variétés provient de 188 villages prospectés en 1978 par l'Institut de recherche pour le développement (Clément et Leblanc, 1980). Le second lot de 275 variétés provient d'une prospection réalisée en 1999 et 2000 par l'Institut d'économie rurale du Mali (IER) dans 46 villages situés sur 2 transects nord-sud (Kouressy, 2002). Les conditions d'échantillonnage des 2 prospections ont été comparables. L'époque de prospection a été choisie en fonction de la période de maturation des variétés les plus tardives afin de pouvoir collecter en un seul passage les cultivars précoces et tardifs.

Étude du photopériodisme

La sensibilité photopériodique d'une céréale de « jour court » comme le sorgho

se traduit par l'allongement de la phase végétative lorsque les jours sont longs. En Afrique subsaharienne les cultures pluviales se déroulent surtout en conditions de jours décroissant ; c'est pourquoi le photopériodisme des sorghos provoque un raccourcissement du cycle de la plante si les pluies s'installent tardivement et que le semis est retardé. Le photopériodisme assure ainsi la synchronisation de la floraison avec la fin de la saison des pluies (Traoré *et al.*, 2007).

Le photopériodisme des variétés a été mesuré par des essais implantés à la station de Sotuba (12° 39' N, 7° 56' O). Les semis ont été réalisés le 17 juin et le 17 juillet. Ces dates encadrent la période de semis couramment pratiquée au Mali. Elles sont aussi placées de part et d'autre du solstice d'été (20 juin) et permettent d'étudier le cycle des variétés semées en jours longs (semis du 17 juin) et en jours courts et décroissants (semis du 17 juillet).

Le stade phénologique observé est la date d'apparition de la ligule de la dernière feuille (feuille-drapeau). La floraison débute en moyenne 10 jours après ce stade. La photosensibilité des variétés est évaluée par la diminution de la durée de la période végétative entre les deux semis. Pour classer les variétés, on utilise un coefficient de photopériodisme (Kp) défini par le rapport du raccourcissement de la période semis-feuille-drapeau sur le nombre de jours entre les 2 semis

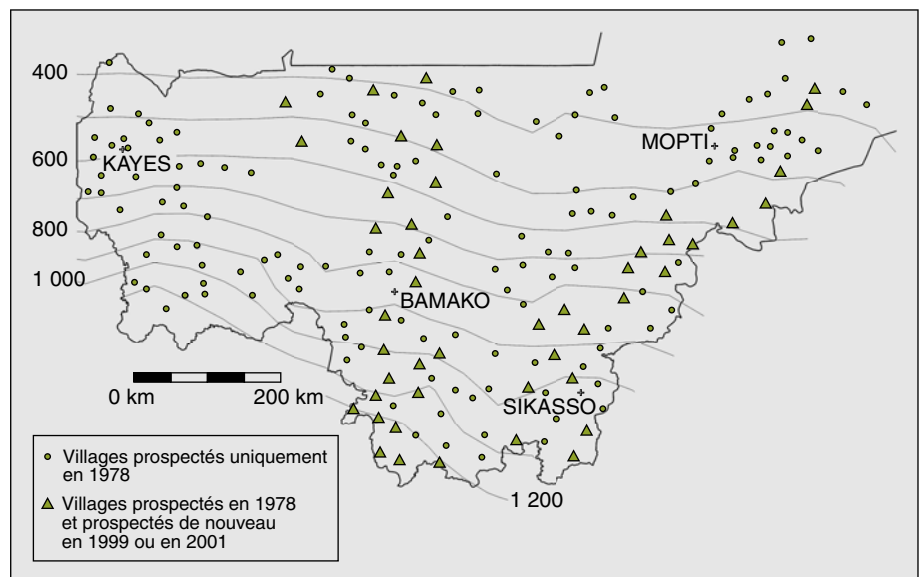


Figure 1. Localisation des villages dont les variétés ont été caractérisées.

Figure 1. Localization of villages from which varieties were collected and characterized. Les isohyètes donnent la pluviométrie moyenne sur la période normale 1971-2000.

(Vaksmann *et al.*, 1996). Kp varie de 0 (pour les variétés insensibles à la photopériode) à 1 pour les variétés strictement photopériodiques car le raccourcissement de la période végétative compense totalement le retard de semis.

On ne peut pas extrapoler directement le cycle de la variété mesuré en station à son comportement dans son milieu d'origine. Entre deux localités, la structure de la saison des pluies et les différences de latitudes peuvent modifier la durée du cycle. C'est pourquoi nous avons utilisé un modèle de prévision de la phénologie spécifiquement mis au point pour les sorghos photopériodiques (Folliard *et al.*, 2004). Les mesures expérimentales ont permis de calculer les coefficients variétaux du modèle. Le cycle de chaque variété a ensuite été évalué en tenant compte des conditions climatiques et de la latitude du village d'origine. Pour chaque variété, on a considéré un semis réalisé au début de saison et on a calculé la date d'apparition de la feuille-drapeau correspondante.

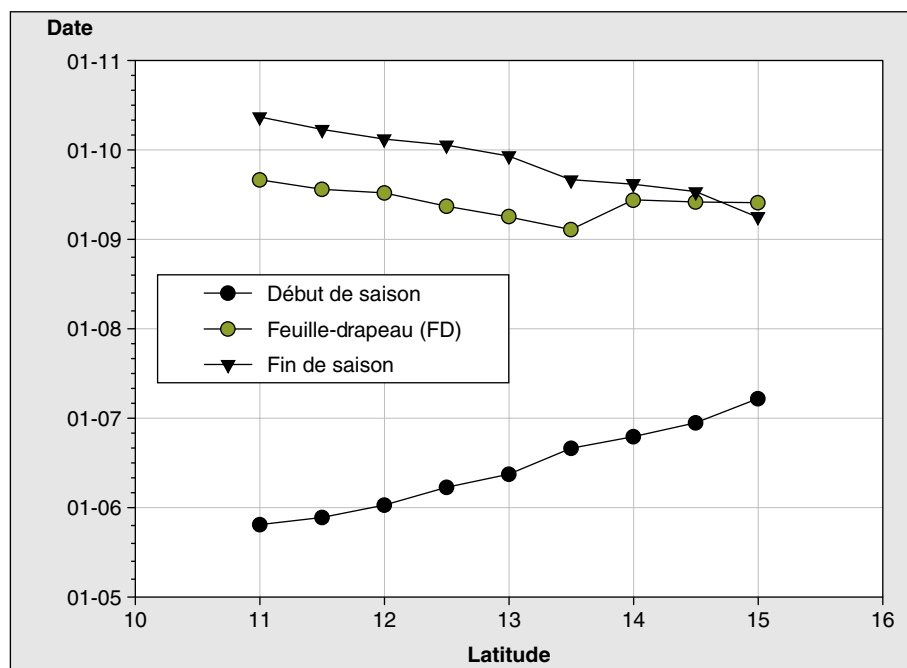


Figure 2. Évolution en fonction de la latitude des dates de fin et de début de la saison des pluies et date moyenne d'apparition de la feuille-drapeau (FD) des variétés locales.

Figure 2. Evolution with latitude of the starting and cessation dates of the rains and the local varieties average flag leaf appearance date (FD).

Résultats et discussion

Relation phénologie-climat

Les variétés sont toutes photopériodiques et la valeur moyenne de Kp passe de 0,81 à 0,41 quand la latitude passe de 11 à 14° N (tableau 1). Ce résultat n'est pas étonnant car au sud la saison des pluies est plus longue et le photopériodisme est, avant tout, un mécanisme permettant de rallonger le cycle de la plante.

Sur les 20 années qui suivent la prospection de 1978 on note une baisse impor-

tante de la pluviométrie, de 108 mm en moyenne. Toutefois les répercussions de cette sécheresse sur les dates de début et de fin de saison ont été plus faibles. La durée moyenne de la saison n'a diminué que de 6 jours (tableau 1).

La figure 2 donne, en fonction de la latitude, l'évolution des dates moyennes de début et de fin des pluies ainsi que la date moyenne d'apparition de la feuille-drapeau des variétés locales de chaque zone. Lorsque l'on se déplace vers le nord, la durée de la saison se raccourcit : elle démarre plus tardivement et se termine

plus tôt, ce qui délimite une durée de saison utile qui diminue avec la latitude.

En dessous de 14° de latitude, la fin de l'expansion des feuilles se produit toujours dans les 20 jours qui précèdent la fin des pluies avec un écart type de 8,5 jours. Plus au nord, les durées de saisons plus courtes ne permettent pas aux sorghos d'épier 3 semaines avant la fin des pluies. La date moyenne d'apparition de la feuille-drapeau correspond à la fin de la saison avec un écart type de 10,5 jours. Les variétés de ces zones épient donc après les pluies, l'essentiel du rem-

Tableau 1. Évolution de la pluviométrie (PL), du début (DEB), de la fin (FIN) et de la durée de la saison des pluies 20 ans avant et 20 ans après la prospection de 1978.

Table 1. Evolution of total rainfall (PL), starting (DEB) and cessation (FIN) dates and duration of the rainy season 20 years before and 20 years after the 1978 collection.

Latitude	Période 1958-1977				Période 1979-1998				Kp
	PL	DEB	FIN	Durée	PL	DEB	FIN	Durée	
11	1 214	146	292	146	1 080	145	287	142	0,81
12	1 004	157	282	125	878	155	279	124	0,81
13	904	163	279	116	793	164	276	112	0,75
14	650	176	269	93	562	179	262	83	0,59
15	480	187	257	70	398	192	253	61	0,41
Moyenne	850	166	276	110	742	167	271	104	0,67

Kp : coefficient moyen de photopériodisme des variétés.

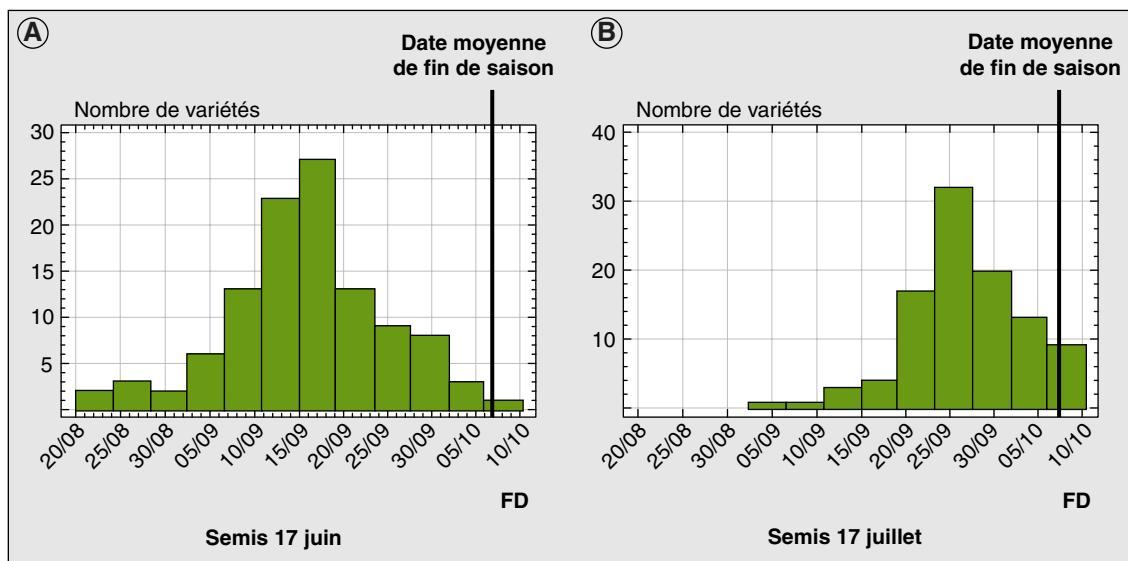


Figure 3. Distribution des dates de fin de l'expansion du système foliaire.

Figure 3. Distribution of ending dates of flag leaf expansion (FD) of varieties collected between 12 and 13° of latitude sown on 17th June (A) and on 17th July (B). Feuille-drapeau (FD) des variétés provenant des latitudes comprises entre 12 et 13° pour A) le semis de juin et B) le semis du 17 juillet. La FD moyenne passe du 14 au 25 septembre alors que le semis a été retardé de 30 jours.

plissage des grains se faisant sur l'eau stockée dans le sol.

Les figures 3A et 3B illustrent l'effet du photopériodisme en comparant la distribution des dates de fin d'expansion du système foliaire (FD) pour les deux dates de semis des variétés provenant des latitudes comprises entre 12 et 13°.

Le cycle des variétés se raccourcit lorsque le semis est retardé. Pour les deux semis, espacés d'un mois, la durée moyenne de la période végétative des variétés a été réduite de 20 jours. L'épiaison des variétés locales reste groupée avant la date moyenne de fin de saison des pluies, quelle que soit la date de semis.

Ces figures montrent aussi l'étalement des durées des cycles du mode principal. Il existe de nombreuses variétés, destinées à des utilisations particulières, plus précoces et plus tardives que le comportement moyen. À une même latitude, les variétés précoces sont souvent destinées à assurer l'approvisionnement en grains avant les récoltes principales (période de soudure) tandis que les variétés tardives sont cultivées dans des sols à forte réserve en eau.

Comparaison du comportement des deux prospections

Les distributions de la durée semis-feuille-drapeau (SFD) pour le semis de

juin des variétés prospectées en 1978 et après 1999 sont comparées en figure 4. Les variétés ont été regroupées par degré de latitude, de 11 à 15°. Les changements des durées moyennes de cycles entre les deux prospections sont faibles, de l'ordre de 5 jours, mais ils sont statistiquement significatifs entre 12 et 14° de latitude.

Pour les latitudes supérieures ou égales à 14°n les distributions de SFD sont très étalées. On trouve en proportions comparables des variétés précoces (SFD = 45 à 70 jours), intermédiaires (SFD = 75 à 85 jours) et tardives (SFD = 90-105 jours). L'écart type de SFD passe de 4 jours à 11° de latitude à plus de 19 jours à 15°.

La présence de variétés tardives peut sembler surprenante dans ces zones arides mais les stratégies culturales adoptées par les paysans expliquent la préservation d'écotypes très divers dans ces environnements à pluviométrie contraignante (Eldin et Milleville, 1989). Les paysans se prémunissent contre la sécheresse en répartissant les risques dans l'espace (nombreuses parcelles en situations différentes : utilisation des reports d'eau sur les toposéquences et mise en valeur des bas-fonds) et dans le temps (semis échelonnés ou recommencés, mélange de variétés à longueurs de cycles différentes...). Il faut aussi noter l'apparition récente, en faible proportion, de variétés plus précoces que toutes celles prospectées en 1978. Il s'agit probablement de la

diffusion de variétés améliorées provenant de la recherche.

Pour les latitudes inférieures à 14°, le cycle des variétés est nettement plus ramassé autour de la moyenne. La plupart des cultivars sont photopériodiques et il y a peu de variétés très précoces car le sorgho est sensible à l'excès d'eau. Une variété précoce mûrira sous la pluie et souffrira de maladies (moississures) et d'attaques d'oiseaux. Il y a aussi peu de variétés très tardives car les bas-fonds au sud sont destinés à d'autres cultures que le sorgho (riz, tubercules, etc.).

Conclusion

La sécheresse de 1968-1983 a sévèrement affecté le niveau d'eau des mares et les crues des fleuves au Sahel mais a moins touché le cycle des cultivars de sorghos. La variation de durée moyenne du cycle n'a pas dépassé 5 jours.

Dans la zone sahélienne, pour des latitudes supérieures ou égales à 14°, la grande diversité des cycles est un outil essentiel de l'adaptation aux risques climatiques. Elle participe à la résilience des systèmes de culture dans ces zones où les risques climatiques sont importants. On note aussi l'apparition de quelques variétés très précoces qui proviennent probablement des opérations de vulgarisation du matériel amélioré de la recherche.

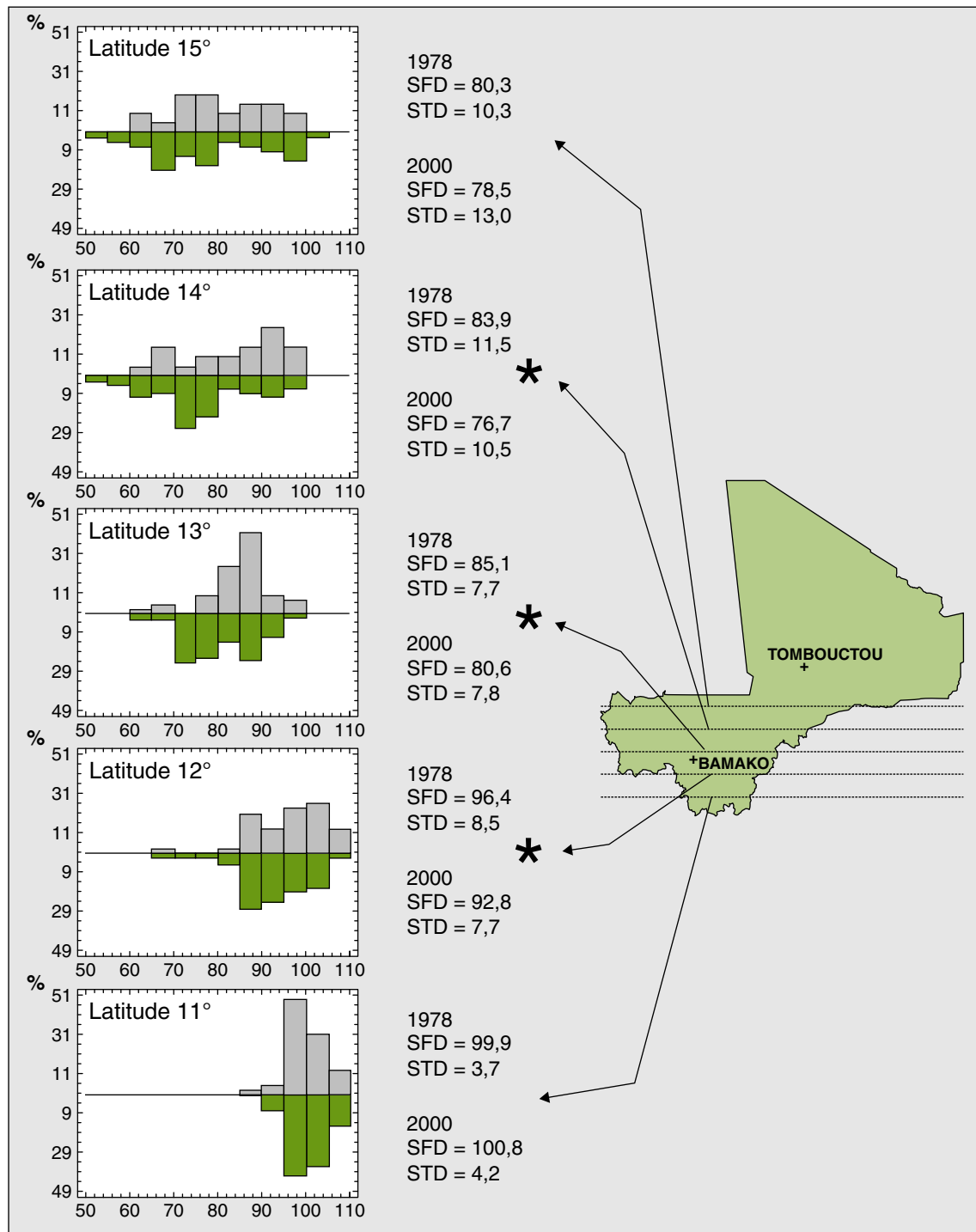


Figure 4. Distribution de la durée semis-feuille-drapeau (SFD) des variétés prospectées en 1978 et en 2000 groupées en fonction de la latitude.

Figure 4. Distribution of the duration of the sowing to flag leaf period (SFD) of varieties collected in 1978 and 2000 grouped according to latitude.

STD = écart type de SFD. Les différences entre les moyennes des deux échantillons sont significatives pour les comparaisons signalées par une étoile (test t avec un intervalle de confiance de 95 %).

Des résultats similaires ont été obtenus au Niger où la diversité génétique des variétés locales semble avoir été préservée malgré les importants changements cli-

matiques et sociaux des 25 dernières années (Pham *et al.*, 2006). Jusqu'à 13° de latitude, la contrainte pluviométrique est plus faible et il n'est pas

nécessaire de coloniser des milieux aussi variés que dans le Sahel. Le cycle des variétés a peu changé. C'est pourtant dans cette zone que l'on note d'importants

tants changements variétaux. Près de 60 % des cultivars collectés en 1978 n'ont pas pu être retrouvés en 1999 (Kouressy, 2002). Cette disparition des variétés traditionnelles n'a pas été compensée par l'adoption de nouvelles variétés ; elle correspond plutôt à une évolution des systèmes de cultures. L'intensification des pratiques agricoles et le développement consécutif du maïs provoquent la marginalisation des céréales traditionnelles sur les sols pauvres (Bazile et Soumaré, 2004).

L'élimination, dans les variétés modernes, des caractères de rusticité propres aux écotypes locaux, comme le photopériodisme, explique en grande partie la faible diffusion du matériel amélioré en Afrique de l'Ouest (Vaksmann *et al.*, 1996). La diversité des situations climatiques et surtout la grande variabilité du climat dans le temps et dans l'espace montrent que l'obtention de variétés à large adaptation géographique sera difficile. Il faut, au contraire, réfléchir en termes d'adaptation à des environnements spécifiques et instables.

Ces résultats permettent d'orienter les programmes d'amélioration du sorgho en Afrique au sud du Sahara en définissant les critères d'adaptation des variétés au climat soudano-sahélien.

Pour des latitudes inférieures à 14°, la floraison est surtout centrée en fin de saison des pluies pour éviter les problè-

mes liés à l'excès d'eau (moisissures) ou à l'excès de précocité (oiseaux). La feuille-drapeau doit être pleinement déployée entre 30 et 10 jours avant la date moyenne de fin des pluies.

Au-dessus de 14° de latitude les variétés épient en moyenne après les pluies mais avec une grande variabilité des comportements. Suivant les situations, on devra proposer des variétés photopériodiques (cultures de bas-fonds et de décrues) ou du matériel précoce et insensible à la photopériode.

L'application de ces critères cohérents avec le comportement des variétés locales débouche sur la définition de nouveaux idéotypes qui allient la productivité des variétés améliorées et la stabilité des cultivars locaux. ■

Références

Bazile D, Soumaré M. Gestion spatiale de la diversité variétale en réponse à la diversité écosystémique : le cas du sorgho [*Sorghum bicolor* (L) Moench] au Mali. *Cah Agric* 2004 ; 13 : 480-7.

Clément JC, Leblanc JM. *Prospection des mils pénicillaires, sorghos et graminées mineures en Afrique de l'Ouest. Campagne 1978. République du Mali*. Paris : International Board for Plant Genetic Resources (IBPGR) ; Orstom éditions, 1980.

Diop M. À propos de la durée de la saison des pluies au Sénégal. *Sécheresse* 1996 ; 7 : 7-15.

Eldin M, Milleville P. *Le risque en agriculture*. Collection « A Travers Champs ». Paris : Orstom éditions, 1989.

Folliard A, Traoré PCS, Vaksmann M, Kouressy M. Modeling of sorghum response to photoperiod : a threshold-hyperbolic approach. *Field Crop Res* 2004 ; 89 : 59-70.

Ingram KT, Roncoli MC, Kirshen PH. Opportunities and constraints for farmers of West Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agric Sys* 2002 ; 74 : 331-49.

Kouressy M. *Étude de la durée du cycle des sorghos du Mali. Comparaison avec la durée de la saison des pluies. Évolution sur les 20 dernières années*. DEA, université du Mali, Bamako, 2002.

Lacy SM, Cleveland DA, Soleri D. Farmer choice of sorghum varieties in southern Mali. *Hum Ecol* 2006 ; 34 : 331-53.

Pham JL, Bezançon G, Chantereau J, Gerard B, Kapran I, Vigouroux Y. How does agrobiodiversity respond to global change? Assessing changes in the diversity of pearl millet and sorghum landraces in Niger between 1976 and 2003. In : DIVERSITAS, ed. *Integrating biodiversity science for human well-being*. First Diversitas Open Science Conference, Oaxaca, Mexico, 9-12 November 2005. Oaxaca (Mexique) : Diversitas-France, 2006 (cédérom).

Sivakumar MVK. Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agric For Meteorol* 1988 ; 42 : 295-305.

Traoré SB, Reyniers F-N, Vaksmann M, *et al.* Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorghos du Mali. *Sécheresse* 2000 ; 11 : 227-37.

Traoré PCS, Kouressy M, Vaksmann M, *et al.* Climate prediction and agriculture : what is different about sudano-sahelian West Africa? In : Sivakumar MVK, Hansen J, eds. *Climate Prediction and Agriculture*. Berlin ; Heidelberg : Springer Verlag, 2007.

Vaksmann M, Traoré SB, Niangado O. Le photopériodisme des sorghos africains. *Agriculture et Développement* 1996 ; 9 : 13-8.