

Étude originale

Création variétale décentralisée

Prévision de l'aire de diffusion des sorghos photopériodiques en Afrique de l'Ouest

Mamy Soumaré¹
Mamoutou Kouressy¹
Michel Vaksman²
Ibrahim Maikano³
Didier Bazile⁴
Pierre Sibiry Traoré⁵
Seydou Traoré⁶
Michael Dingkuhn⁴
Aboubacar Touré¹
Kirsten Vom Brocke⁷
Léopold Somé⁸
Clarisse Pulchérie Barro-Kondombo⁸

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

² Centre de coopération internationale
en recherche agronomique
pour le développement (Cirad),
BP 1813, Bamako, Mali
<michel.vaksman@cirad.fr>

³ International Crops Research Institute
for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT),
BP 12404, Niamey, Niger
<i.maikano@cgiar.org>

⁴ 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>

⁵ ICRISAT, BP 320, Bamako, Mali
<P.S.Traore@cgiar.org>

⁶ AGRHYMET,
BP 11011, Niamey, Niger
<S.T@hyt.n>

⁷ Cirad,
01 BP 596,
Ouagadougou
Burkina Faso
<vbrocke.cirad@fasonet.bf>

⁸ Institut de l'environnement
et des recherches agricoles (Inera),
04 BP 8645,
Ouagadougou
Burkina Faso
<lisme@liptinfor.bf>
<clarissebk@yahoo.fr>

Tirés à part : M. Soumaré

Résumé

Le photopériodisme des variétés locales de sorgho permet la synchronisation de la floraison avec la fin de la saison des pluies. La prise en compte de ce caractère par les programmes d'amélioration est très récente. L'intégration du photopériodisme dans un modèle de culture et l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) permettent d'identifier les zones optimales de culture des différents cultivars en combinant les caractéristiques variétales, l'incertitude climatique et les pratiques culturales des paysans. Une variété est considérée adaptée à une zone si elle fleurit dans les 20 jours qui précèdent la date moyenne de fin de saison. L'analyse prend en compte la grande incertitude sur les dates de semis qui peuvent s'étaler sur plus d'un mois à partir de l'installation des pluies. L'étude du comportement de 52 variétés locales et améliorées au Mali et au Burkina Faso montre que les variétés précoces possèdent une large adaptation géographique mais nécessitent de maîtriser la date de semis. Les variétés photopériodiques sont spécifiquement adaptées à une zone géographique mais tolèrent une large gamme de dates de semis, ce qui est un caractère primordial pour les paysans africains. Les cartes d'adaptation issues de ce travail peuvent aider les sélectionneurs à définir des idéotypes adaptés à la diversité des situations agroclimatiques d'Afrique soudano-sahélienne.

Mots clés : Afrique occidentale, amélioration des plantes, date de semis, interaction génotype environnement, saison humide, sorgho.

Thèmes : productions végétales, ressources naturelles et environnement.

Abstract

Predicting the photoperiod-sensitive sorghum diffusion area in West Africa

Photoperiod sensitivity of sorghum landraces allows the synchronization of their flowering time with the end of the rainy season. Sorghum improvement programs have just started considering this trait. Integrating photoperiod sensitivity into a crop model and using a Geographic Information System (GIS) make it possible to identify optimum growing areas for different cultivars by combining varietal traits, climatic uncertainty and farmers' practices. The study of the behavior of 52 landraces in Mali and Burkina Faso shows that early-maturing varieties have a large geographic adaptation area but a very narrow sowing window. On the other hand, photoperiod-sensitive varieties are specifically adapted to a given geographical zone but can cope with a large variation in sowing date, which is very important for African farmers. Adaptation maps derived from this study can help plant breeders define ideotypes adapted to the diverse agroclimatic situations of sudano-sahelian Africa.

Key words: genotype environment interaction, plant breeding, sorghum grain, sowing date, West Africa, wet season.

Subjects: natural resources and environment, vegetal productions.

En climat soudano-sahélien le potentiel de production est déterminé très tôt par les premières pluies et la date de semis des paysans (Sivakumar, 1988). La durée de la saison de culture décroît linéairement avec la date d'installation des pluies. Ce phénomène résulte de l'indépendance entre les deux événements que sont les dates de début et de fin de la saison (Traoré *et al.*, 2000). Les sécheresses des années 1970 et 1980 ont provoqué une importante diminution de la pluviométrie, mais les conséquences sur les dates de début et de fin de saison ont été plus faibles (Barbe et Lebel, 1997 ; Traoré *et al.*, 2000). Les variétés locales possèdent un caractère d'adaptation essentiel, le photopériodisme, qui assure la synchronisation de la floraison avec la fin de la saison des pluies quelle que soit la date de semis (Andrews, 1973 ; Cochemé et Franquin, 1967 ; Vaksman *et al.*, 1996). C'est pourquoi les paysans restent dans une grande majorité, attachés à leurs variétés traditionnelles de cycles plus longs que les variétés modernes (Lambert, 1983).

L'amélioration du sorgho en Afrique n'a pas tiré profit de la très grande plasticité phénologique que confère le photopériodisme. Le matériel précoce issu des programmes de sélection devait être capable de supporter des saisons des pluies plus courtes (Dancette, 1983). Par la suite, l'élimination du photopériodisme est aussi devenue un postulat fondamental de la « révolution verte » (Swaminathan, 2006).

Les essais multilocaux sont traditionnellement utilisés pour aborder l'adaptation d'un cultivar à travers différents environnements, mais si l'interaction génotype x environnement (GxE) est forte, les essais permettent difficilement d'identifier des génotypes bien adaptés. Pour le sorgho, une grande part de l'interaction GxE provient de la longueur variable du cycle en fonction des conditions de culture : latitude et dates de semis (Kouressy *et al.*, 2005). Des caractères essentiels comme la taille, l'indice de récolte et la durée du cycle deviennent très variables d'une année sur l'autre ou entre deux situations géographiques. Dans ce cas, les modèles de culture peuvent aider les sélectionneurs car ils permettent d'optimiser la combinaison des génotypes et des pratiques agronomiques associées pour chaque environnement cible (Messina *et al.*, 2006). L'objectif de ce travail est de prévoir la zone d'adaptation des sorghos photopériodiques pour anticiper leur possible diffusion en milieu paysan. Nous estimons que l'intégration du

photopériodisme dans un modèle de culture et la combinaison avec un SIG permettra de répondre à cet objectif en tenant compte des variétés, des conditions climatiques et des pratiques paysannes.

Matériel et méthode

La méthode utilisée est une combinaison entre un modèle de développement des sorghos photopériodiques et une base de données géographiques issue des analyses agroclimatiques en tenant compte des pratiques observées en milieu paysan en matière de semis.

Modélisation du développement des sorghos

Un modèle permettant de prévoir le développement des sorghos photopériodiques a été utilisé (Folliard *et al.*, 2004). Le modèle considère que les photopériodes élevées inhibent la mise à fleur. L'initiation paniculaire se produit donc lorsque la durée du jour descend en dessous d'un seuil qui dépend de l'âge de la plante. Le modèle nécessite le calcul de trois coefficients variétaux qui ont été évalués pour 23 variétés locales et 29 variétés améliorées du Burkina Faso et du Mali. Les variétés ont été caractérisées à partir d'essais comportant plusieurs dates de semis à la station agronomique de Sotuba pour le Mali (7° 56' Ouest et 12° 39' Nord) et de Saria pour le Burkina Faso (2° 9' Ouest et 12° 16' Nord).

Détermination des zones optimales de culture

Le Mali possède un climat de type tropical sec soumis à l'influence de la mousson. Le climat est caractérisé par l'alternance de deux saisons : une saison pluvieuse en été et une saison sèche sur le reste de l'année. Dans la zone de culture du sorgho, la pluviométrie moyenne annuelle varie de 1 400 mm au sud à moins de 200 mm au nord. La durée de la saison des pluies est aussi très variable en fonction de la latitude. Pour chaque poste pluviométrique, les dates du début et de fin de la saison des pluies sont définies à l'aide d'un modèle simplifié de bilan hydrique (Soumaré *et al.*, 2005 ; Traoré *et al.*, 2000). L'adéquation

entre la date de floraison d'une variété et la date d'arrêt de la saison des pluies est un caractère explicatif essentiel de la productivité des sorghos. Une variété est adaptée au climat si la floraison débute dans les 20 jours qui précèdent la fin moyenne de saison (Kouressy *et al.*, 2005). Cette condition assure un équilibre entre la satisfaction des besoins en eau et l'évitement de nombreuses contraintes biotiques (oiseaux et moisissures). On définit un indice d'adaptation (d) comme l'écart entre les dates de fin d'expansion de la dernière feuille (feuille-drapeau : FD) et de fin de saison (FS). La floraison débute 10 jours après l'apparition de cette feuille.

$$d = FD - FS$$

L'indice (d) est calculé pour chacun des 205 postes pluviométriques disponibles au Mali et au Burkina Faso sur la période 1971-2000. Les zones pour lesquelles le modèle prévoit une floraison se produisant en moyenne dans les 20 jours qui précèdent la fin de saison des pluies sont déterminées, ce qui correspond à un écart « d » compris entre - 10 et - 30.

Prise en compte des pratiques de semis

Dans les champs paysans, le rendement est maximisé la plupart des années si les semis sont réalisés tôt avec les premières pluies substantielles (de Rouw, 2004). Mais toutes les parcelles sont rarement semées simultanément. Les contraintes d'exploitation comme le manque de main-d'œuvre, de matériel agricole ou l'ordre d'implantation des différentes spéculations ne permettent pas aux paysans de semer rapidement l'ensemble de leurs champs. Les semis débutent au moment de l'installation des pluies et s'étalent souvent sur plus d'un mois. L'étalement des semis dépend aussi de la structure de la saison des pluies. Des précipitations erratiques entraînent la succession de plusieurs vagues de semis à chaque pluie. Il n'est pas rare que les paysans ressemement deux ou trois fois, soit à cause de mauvaises levées, soit à cause d'attaques de déprédateurs.

Pour être adaptée, une variété doit pouvoir supporter un étalement important des semis. Pour éviter que le calcul de la zone optimale de diffusion d'une variété dépende de la date de semis, nous définissons la zone d'adaptation comme l'intersection des deux zones optimales de cultures pour un semis précoce au début de saison des pluies et un semis retardé de 30 jours. Pour illustrer la démarche nous comparons les résultats obtenus pour deux variétés

locales du Mali aux comportements bien contrastés. La variété Jacumbe originaire de la zone sahélienne est peu photopériodique, précoce (durée moyenne du cycle 90 jours). La variété Kalla Foulou, originaire de la zone soudanienne, est photopériodique, tardive (durée moyenne du cycle 130 jours). Cette démarche est ensuite étendue à quelques variétés des programmes de sélection du Mali et du Burkina Faso. La cartographie des zones d'adaptations utilise un modèle d'interpolation linéaire par krigeage.

Résultats et discussion

Large adaptation géographique ou adaptation spécifique

Les figures 1 et 2 délimitent, pour le Mali et le Burkina Faso, les zones optimales de culture de deux variétés aux comportements bien distincts. La zone d'adaptation de la variété précoce Jacumbe descend nettement au sud lorsque le semis est retardé de 30 jours (figure 1). Inversement, la zone d'adaptation de la variété photopériodique Kalla Fulu varie très peu avec le retard de semis (figure 2). Les zones correspondantes aux semis précoces et tardifs se recoupent largement. La variété précoce possède une large adaptation géographique. Il suffit de retarder son semis pour que sa culture soit possible sur l'ensemble du territoire. Les variétés photopériodiques semblent, en revanche, inféodées à une zone spécifique de culture. Ces résultats justifient la logique suivie par les programmes d'amélioration du sorgho depuis un demi-siècle. Une variété précoce est susceptible de produire quelle que soit la zone climatique. Les efforts de sélection peuvent ainsi être valorisés sur la totalité du territoire. Ce raisonnement a été à l'origine de l'élimination systématique du photopériodisme des variétés modernes destinées à répandre la révolution verte. Mais l'utilisation de variétés précoces nécessite souvent de retarder le semis après l'installation des pluies. Cette contrainte peut ne pas sembler grave, voire même être considérée comme bénéfique (Sultan *et al.*, 2005). Pourtant, ce choix apparemment anodin, est, en réalité, lourd de conséquences. Le début de saison est toujours une course de vitesse pour les paysans. Les semis retar-

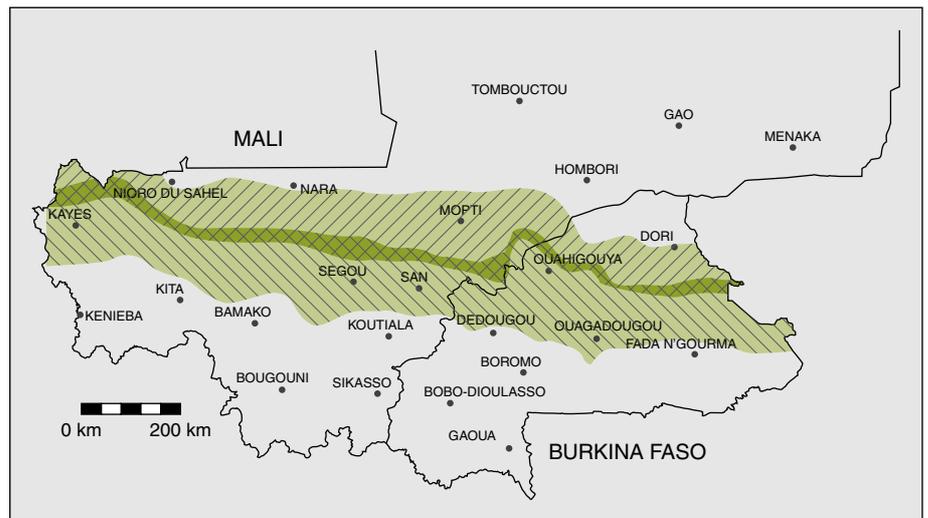


Figure 1. Zones optimales d'adaptation de Jacumbe pour un semis précoce (////) et un semis retardé (/////).

Figure 1. Optimal adaptation zones of the "Jacumbe" cultivar for early (////) and late (/////) sowing dates. Variété peu photopériodique. Exemple de large adaptation géographique. La zone optimale d'adaptation (intersection) varie avec la date de semis.

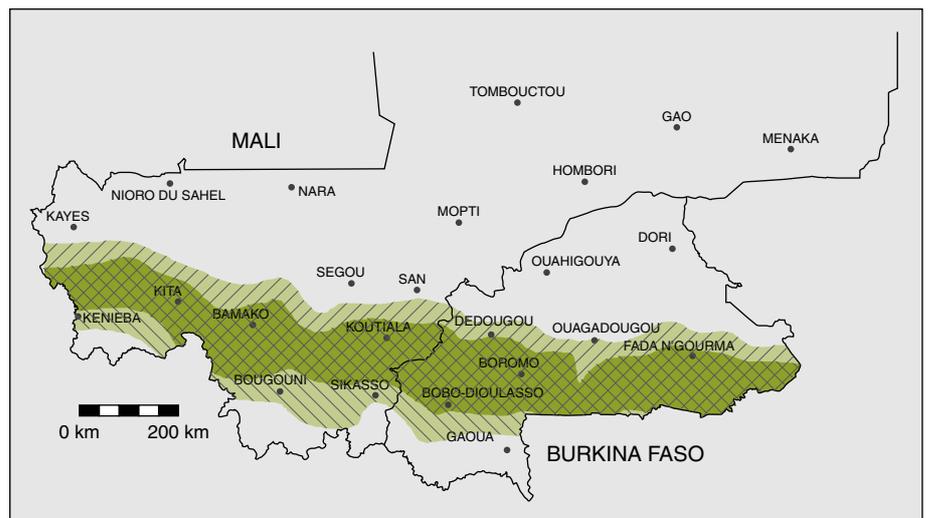


Figure 2. Zones optimales d'adaptation de Kalla Foulou pour un semis précoce (////) et un semis retardé (/////).

Figure 2. Adaptation zones of the "Kalla Foulou" cultivar for early (////) and late (/////) sowing dates. Variété photopériodique. Exemple d'adaptation spécifique. La zone optimale d'adaptation (intersection) reste stable quelle que soit la date de semis.

dés après l'installation des pluies entraînent une augmentation considérable des risques d'échec de la culture (Andrews, 1973). Les semis tardifs produisent des rendements plus faibles pour de nombreuses raisons (dégâts et parasites, lessivage de l'azote et des éléments minéraux, quantité plus faible de rayonnement, températures basses, excès d'humidité, compétition avec les adventices et agressivité des pluies...).

Détermination des zones optimales de culture

Le travail de délimitation des zones optimales de culture est donné pour quelques variétés des programmes de sélection du Mali et du Burkina (figure 3). Pour chaque variété on délimite une bande d'adaptation plus ou moins large.

Il est possible d'identifier des variétés adaptées à toutes les zones de cultures pluviales. Contrairement à une idée répandue, les variétés photopériodiques ne sont pas inféodées à des zones trop étroites. Leurs bandes d'adaptation peuvent dépasser 250 km de large (figure 3E) tandis que celles des variétés moins photopériodiques sont nettement plus étroites, d'une largeur inférieure à 60 km (figure 3A). Pour les variétés totalement insensibles à la photopériode, les zones correspondant aux deux semis ne se recoupent pas, ce qui signifie que leur

culture doit être impérativement associée à une date de semis précise. Dans ce cas, il serait plus judicieux de proposer une carte des dates de semis optimale pour chaque variété.

Les variétés BF97-19/11 (figure 3B) et BF97-14/11 (figure 3C) provenant du programme d'amélioration du Burkina illustrent bien l'intérêt de la photosensibilité. Ces variétés sont précoces et leurs aires d'adaptations sont centrées sur les mêmes zones, mais, en raison de son photopériodisme la bande d'adaptation de BF97-14/11 est nettement plus large.

Cette variété sera donc plus souple en ce qui concerne le choix de la date de semis et pourra être diffusée sans risques sur une plus grande surface.

Dans l'interprétation de ces cartes, il faut garder à l'esprit que nous prenons en compte le comportement moyen des variétés. Il existe de nombreuses exceptions et une variété peut réussir en dehors de sa zone optimale dans certaines conditions. Il est, par exemple, toujours possible de cultiver une variété tardive dans une région trop sèche si la plante peut profiter d'apports d'eau de ruissellement

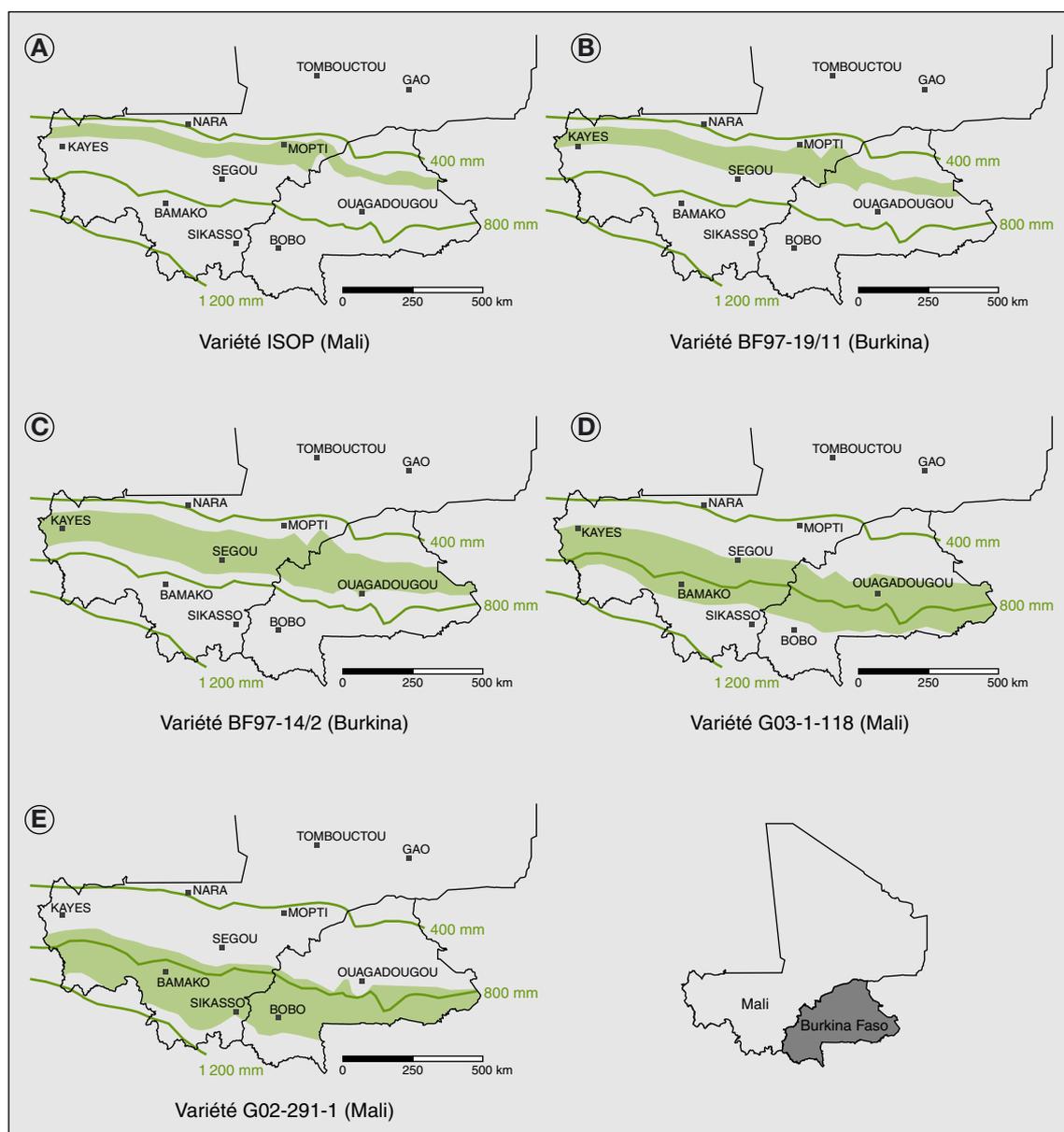


Figure 3. Zones optimales de cultures de quelques variétés de programmes d'amélioration du Mali et du Burkina Faso.

Figure 3. Optimal adaptation zones of some varieties from the Mali and Burkina Faso breeding programs.

Création de variétés spécifiquement adaptées aux différentes zones climatiques. Les isohyètes donnent la pluviométrie moyenne sur la période normale 1971-2000.

dans les bas-fonds ou de nappes phréatiques peu profondes.

Conclusion

En Afrique, l'échec des démarches classiques de sélection apparaît clairement à travers la faible diffusion des variétés modernes (Ahmed *et al.*, 2000). Aujourd'hui, les variétés très précoces sont encore prisées des programmes de vulgarisations agricoles qui estiment qu'elles permettront de mieux résister les années exceptionnellement mauvaises. L'analyse agroclimatique montre que la sélection de sorgho à cycle court et fixe fait courir des risques importants aux paysans les bonnes années, sans pour autant que le gain attendu les mauvaises années ne soit réellement prouvé.

Le comportement des variétés de sorgho est difficile à prévoir en raison des effets spectaculaires de la date de semis sur la durée du cycle et la production de biomasse. Les modèles de culture permettent d'élucider une part importante de cette interaction GxE et peuvent devenir des outils précieux pour guider le programme d'amélioration (Messina *et al.*, 2006). La nature variable et imprévisible du cycle des sorghos explique pourquoi la sélection a privilégié la recherche d'une large adaptation aux différents régimes pluviométriques plutôt que la recherche de variétés plus « étroitement adaptées ». La pondération des performances variétales par un indice d'adaptation permet de résoudre une grande part de l'interaction GxE et devrait faciliter le travail de sélection et la gestion des variétés existantes dans ces environnements variables (Chapman *et al.*, 2000).

En intégrant à la fois l'incertitude climatique interannuelle et les pratiques de semis étalés des paysans africains, on s'aperçoit que, contrairement à notre idée de départ, les variétés photopériodiques

présentent une zone d'adaptation plus large que les variétés précoces. Les programmes africains d'amélioration du sorgho commencent à intégrer le photopériodisme dans le matériel moderne, même si ce travail va à l'encontre d'un des paradigmes de la révolution verte qui associe précocité et productivité (Swaminathan, 2006). Le couplage d'un modèle de développement et d'un système d'information géographique permettra d'intégrer les interactions génotype x climat pour étudier l'adaptation des variétés dans le temps et dans l'espace. Les zones d'adaptation définies par le modèle sont souvent très différentes de celles prévues initialement par le sélectionneur, montrant l'intérêt de disposer de ce type d'information cartographique avant de lancer le processus de diffusion d'une variété.

Cette méthodologie peut être utile dans de nombreux domaines. Les sélectionneurs ont besoins de critères de choix pour des environnements spécifiques. Les services semenciers et les agronomes ont besoins d'outils pour extrapoler l'utilisation d'une variété dans l'espace en minimisant le coût des essais multilocaux. Les climatologues et les services de prévisions agronomiques ont besoin d'outils pour prévoir les conséquences des scénarios de changement climatique prenant en compte les aspects agronomiques et génétiques. ■

Références

Ahmed MM, Sanders JH, Nell WT. New sorghum and millet cultivar introduction in Sub-Saharan Africa : impacts and research agenda. *Agric Sys* 2000 ; 64 : 55-65.

Andrews DJ. Effects of date of sowing on photosensitive Nigerian Sorghums. *Exp Agric* 1973 ; 9 : 337-46.

Barbe LL, Lebel T. Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. *J Hydrol* 1997 ; (188-189) : 43-73.

Chapman SC, Hammer GL, Butler DG, Cooper M. Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. III. Temporal sequences and spatial patterns in the target population of environments. *Aust J Agric Res* 2000 ; 51 : 223-33.

Cochemé J, Franquin P. *A study of the agroclimatology of the semiarid area south of the Sahara in West Africa*. Rome ; Paris : Food and Agriculture Organisation (FAO) ; Unesco, 1967.

Dancette C. Besoins en eau du mil au Sénégal. Adaptation en zone semi-aride tropicale. *Agron Trop* 1983 ; 38 : 267-80.

de Rouw A. Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. *Agric Sys* 2004 ; 81 : 73-93.

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

Kouressy M, Vaksman M, Traoré SB, Traoré PS, Dingkuhn M. Le photopériodisme des sorghos africains, une réponse à la variabilité pluviométrique. In : AMMA-CIRAD, ed. *Monitoring and forecasting the African monsoon impacts on agriculture and vegetation (AMMA)*, Dakar, Sénégal, 28/11-2/12/2005. 2005.

Lambert C. Influence de la précocité sur le développement du mil en conditions naturelles. I Elaboration de la touffe. II Elaboration du rendement. *Agron Trop* 1983 ; 38 : 7-26.

Messina CD, Boote KJ, Löffler C, Jones JW, Vallejos CE. Model-assisted genetic improvement of crops. In : Wallach D, Makowski D, Jones JW, eds. *Working with dynamic crop models*. Amsterdam : Elsevier, 2006.

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.

Soumaré M, Vaksman M, Bazile D, Kouressy M. *Linking GIS and crop modeling to expect sorghum cultivars diffusion area in Mali*. EFITA and WCCA Joint Congress, Vila Real, Portugal, July 25-28, 2005.

Sultan B, Baron C, Dingkuhn M, Sarr B, Janicot S. La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnière et intra-saisonnière. II : applications à la sensibilité des rendements agricoles au Sahel. *Sécheresse* 2005 ; 16 : 23-33.

Swaminathan MS. An Evergreen Revolution. *Crop Sci* 2006 ; 46 : 2293-303.

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

Vaksman M, Traoré SB, Niangado O. Le photopériodisme des sorghos africains. *Agric Develop* 1996 ; 9 : 13-8.