



HAL
open science

Améliorer la tolérance du maïs à la sécheresse ou la productivité du sorgho : enjeux et limites

Claude Welcker, Jean François Rami

► To cite this version:

Claude Welcker, Jean François Rami. Améliorer la tolérance du maïs à la sécheresse ou la productivité du sorgho : enjeux et limites. *Innovations Agronomiques*, 2008, 2, pp.125-130. 10.17180/t4y7-v792 . hal-02654620

HAL Id: hal-02654620

<https://hal.inrae.fr/hal-02654620>

Submitted on 29 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Améliorer la tolérance du maïs à la sécheresse ou la productivité du sorgho : enjeux et limites

Claude Welcker¹, Jean François Rami²

¹Laboratoire d'Ecophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux (LEPSE), UMR INRA – SupAgro, Institut de Biologie Intégrative des Plantes (IBIP - Bât 7), 34060 Montpellier

²CIRAD, 34398 Montpellier cedex

avec l'aide de François Tardieu, Michael Dingkuhn, Jacques Chantereau et Jean Christophe Glaszmann

Le changement global du climat est maintenant considéré certain et se traduira probablement par des températures plus élevées, une plus grande évapotranspiration, une distribution plus aléatoire des pluies et une incidence plus grande de la sécheresse (Amigues et al., 2006). Dans certains grands bassins de production, les sols et les réserves en eau se dégradent alors que la demande en eau pour satisfaire les besoins alimentaires de la population mondiale va croissante (Casman, 1999).

Le Sorgho est généralement considéré comme tolérant à la sécheresse, au contraire du maïs qui consomme la moitié de l'eau d'irrigation en France. Cependant, les deux espèces montrent une efficacité intrinsèque d'utilisation de l'eau semblable, et exceptionnellement haute, qui leur permet de produire davantage de biomasse par unité d'eau transpirée que la plupart des autres espèces grâce à leur métabolisme en C4. Les grandes quantités d'eau d'irrigation utilisées sur maïs ne sont donc pas liées à une plus forte demande en eau que le sorgho, mais à sa sensibilité au déficit hydrique notamment lors de la formation des grains. Est-ce que, pour autant, il faut renoncer à son utilisation au profit de celle du sorgho dans les régions à risques de déficit hydrique ?

La presse rapporte depuis une dizaine d'années des expériences de transferts de gène qui montrent qu'il est possible d'améliorer le comportement de plantes soumises au déficit hydrique (Xu et al., 1996 ; Garg et al., 2002 ; Heard et al., 2005). Cependant, ces expériences sont le plus souvent réalisées dans des conditions éloignées de celles subies par les plantes en champ et elles n'ont débouché sur aucune variété commerciale jusqu'à présent (Campos et al., 2004). Une variété est actuellement en cours d'homologation par Monsanto, mais les résultats sur lesquels cette certification est fondée sont à notre avis peu convaincants (Nelson et al., 2007). Inversement, des travaux moins médiatisés ont permis l'obtention de génotypes tolérants qui sont actuellement utilisés par les agriculteurs notamment au Mexique et en Afrique de l'Est pour le maïs (Ribaut et al., 2002 ; Bruce et al., 2007), en Inde et en Australie pour le sorgho (Hash et al., 2003 ; Borrell et al., 2004). Il importe donc de faire le point sur les progrès déjà réalisés et sur les voies possibles d'amélioration, et d'évaluer la complémentarité entre les deux espèces soit pour créer des variétés des deux espèces adaptées au déficit hydrique, soit pour améliorer la productivité du sorgho sans perdre ses caractères, réels ou supposés, de tolérance.

Chez les deux espèces, on distingue classiquement les phases de déficit pré-floral, qui intervient avant et au moment de la floraison et le déficit post-floral, qui intervient au cours du remplissage du grain. Parmi les symptômes d'un stress post-floral, on retrouve une sénescence prématurée des feuilles et de la plante, une verse de fin de cycle, et la réduction de la taille des grains, le déficit pré-floral aboutissant quant à lui à une réduction du nombre de grains et un allongement du cycle. La plus grande partie des travaux de recherche sur la sécheresse ont concerné jusqu'ici les phases florales et post florales, si bien que des indications suggèrent que les phases précédant la floraison pourraient être devenues aussi limitantes que les phases ultérieures (Bruce et al. 2002).

1- Des marges de progrès génétique pour la tolérance à la sécheresse du maïs

La sélection a changé la tolérance du maïs au déficit hydrique, mais pas encore à la mesure des annonces médiatiques; des marges de progrès importantes existent mais il serait déraisonnable de penser qu'il y ait une solution unique face à la diversité des situations agronomiques.

Dans les régions tempérées, les comparaisons de variétés de différentes générations de sélection montrent que les génotypes récents ont généralement une meilleure production en conditions de sécheresse que les génotypes anciens ou du moins que l'augmentation générale du rendement observée en régions tempérées ne s'est pas faite au détriment de la tolérance au déficit hydrique (Duvick et al., 1999 ; Campos et al., 2004). Des variétés de maïs tolérantes à la sécheresse ont été obtenues par le CIMMYT pour les régions tropicales par sélection ciblée à partir de populations locales. Ces génotypes ne sont pas utilisables en France, mais un travail est en cours pour transférer les allèles d'intérêt dans du matériel européen (INRA). On peut donc penser trouver dans les maïs tropicaux traditionnels régulièrement soumis à des conditions sèches des sources nouvelles d'adaptation. Les Téosinte, espèce dont dérive le maïs, ou les *Tripsacum* constituent également des ressources intéressantes pour l'amélioration du maïs (Barrière et al., 2006).

Les scénarios de sécheresse sont multiples, quant à leur calendrier et leur sévérité. La tolérance à la sécheresse ne peut pas se définir par des critères universels pour tous les scénarios. Un caractère donné peut avoir des effets positifs dans un scénario, avoir peu d'effet dans un autre et même être néfaste dans un troisième (Chapman et al., 2003). Par exemple, le maintien du nombre de grains obtenu dans les variétés améliorées de maïs du CIMMYT est généralement une stratégie utile pour des déficits moyens. Elle peut se révéler négative en cas de très fort déficit hydrique car l'acquisition des assimilats par la photosynthèse n'est pas suffisante par rapport à la demande des grains. On risque alors d'obtenir un grand nombre de grains de très faible qualité. De même, le maintien de la transpiration par amélioration de l'efficacité du système racinaire n'est pas une stratégie "gratuite", et n'a un intérêt que dans certaines conditions pédologiques notamment quand elle permet à la plante d'accéder à des couches profondes ou à une nappe d'eau (Tuberosa et al., 2002, Edmeades et al., 1999). Il n'y a donc pas de solution unique. La tolérance à la sécheresse peut être vue comme une optimisation de la photosynthèse, de la croissance et du développement des plantes pour maximiser la production de biomasse avec une quantité d'eau (Tardieu, 2003). Il faut au sélectionneur bien appréhender les conditions dans lesquelles seront cultivées ses futures variétés pour rechercher des caractères adéquats et construire une palette de variétés dans laquelle les agriculteurs feront leur choix en fonction de leur système de culture et des risques qu'ils sont prêts à prendre.

On peut opter pour des stratégies « conservatrices », qui échangent une limitation du potentiel de rendement contre une réalisation de rendement en conditions sèches. L'esquive consiste à réduire la durée du cycle de la plante pour l'adapter au scénario climatique attendu aux dépens du rayonnement intercepté. La réduction de la conductance stomatique et de la croissance foliaire permet de conserver l'eau du sol mais aux dépens de la photosynthèse et de la transpiration.

Le maintien de la croissance foliaire permet d'augmenter la photosynthèse cumulée, mais il augmente aussi la transpiration. Cependant, il évite aussi l'évaporation directe du sol, si bien qu'une forte croissance foliaire est généralement retenue comme un caractère favorable pour la tolérance au déficit hydrique avec des effets généralement positifs sur le rendement (Zhang et al., 1999, Condon et al., 2004). C'est la stratégie « dépensière », elle favorise le rendement potentiel en conditions modérément sèches, tout en augmentant le risque d'une perte totale de rendement en conditions extrêmes (Tardieu, 2003). Une variabilité génétique importante existe chez le maïs pour le maintien de la croissance foliaire en déficit hydrique et la compréhension des mécanismes génétiques en jeu ouvre des pistes nouvelles pour la sélection (Reymond et al., 2003 ; Welcker et al., 2007).

2- La tolérance à la sécheresse du sorgho

Le sorgho est généralement reconnu comme une plante tolérante à la sécheresse, mais à productivité faible.

Malgré sa réputation, le sorgho exprime une sensibilité au déficit hydrique. Des différences pouvant aller jusqu'à 30 q/ha peuvent être observées entre cultures irriguées et non irriguées au cours d'années sèches en France. Cependant, des capacités de tolérance supérieures à celle du maïs sont attribuées à un enracinement efficace qui lui permet de maintenir son activité photosynthétique pour une gamme étendue d'états hydriques du sol. Une des explications de la différence de tolérance entre maïs et sorgho est attribuée à une capacité maintenue du prélèvement d'azote du sorgho dans le sol en condition sèche, qui n'est à l'heure actuelle, pas totalement expliquée. L'architecture du système racinaire ainsi que des propriétés intrinsèques d'absorption des racines pourraient en être la cause (Lemaire et al., 2005).

Des géotypes montrant un certain niveau de tolérance à des déficits pré- ou post-floraison ont pu être identifiés. Une importante partie des travaux de recherche, tant d'un point de vue de la sélection que du point de vue physiologique ou génétique a porté sur la résistance au déficit post-floral, également appelé le caractère « stay-green » (Tao et al., 2000 ; Xu et al., 2000 ; Haussmann et al., 2003 ; Borrell et al., 2003). Ce caractère permet de conserver une activité photosynthétique prolongée en fin de cycle.

En conditions tempérées, et en conditions hydriques peu ou pas limitantes, le sorgho montre une productivité inférieure au maïs. L'amélioration génétique du sorgho en Europe a essentiellement consisté en une sélection hybride s'appuyant sur l'utilisation d'un système de stérilité mâle cytoplasmique (Stephens et al., 1954). Cette contrainte a probablement limité les capacités d'exploration de l'aptitude à la combinaison chez le sorgho et la définition de groupes hétérotiques performants. Par ailleurs, la sensibilité à la photopériode, caractère omniprésent dans le matériel tropical, a fortement limité l'utilisation de ces ressources en zone tempérée. Le programme de conversion américain (TAES/USDA-ARS Sorghum Conversion Program) initié en 1963 et visant à éliminer par backcross la sensibilité à la photopériode et à réduire la taille de la plante a permis de générer du matériel qui est à l'origine de l'essentiel de la sélection dans le monde. Néanmoins, le large potentiel de diversité de l'espèce est probablement loin d'avoir été exploré. Enfin, des travaux récents portant sur du matériel tropical pourraient indiquer une limite intrinsèque à la productivité du sorgho. D'une part, le principal facteur d'allongement du cycle serait lié à la photosensibilité (Clerget et al., 2007) difficilement exploitable en zone tempérée. D'autre part, la durée d'élaboration de la panicule ne variant plus au delà d'une certaine durée de cycle, avec un rythme lent de production des organes fructifères, il apparaît une limite à la relation positive entre la durée de cycle et le rendement (Clerget et al., 2008). Il reste cependant envisageable de mieux exploiter la redistribution des produits de la photosynthèse entre parties végétatives et fructifères et l'efficacité photosynthétiques par la sélection de matériels tardifs, raccourcis et stay green (Kouressy et al., 2008).

Conclusion

La proximité phylogénétique du sorgho et du maïs se traduit par une forte conservation des deux génomes (Dufour et al., 1996). Celle-ci s'observe au niveau global par la composition et l'ordre des gènes (synténie) observés dans de grands fragments de chromosomes et au niveau des gènes, par une forte homologie de séquence entre les deux espèces. En pratique, cette proximité permet d'accélérer la découverte et la compréhension des mécanismes génétiques impliqués dans l'adaptation à la sécheresse par des approches de génomique comparative. Le séquençage complet du génome du sorgho est terminé depuis la fin de l'année 2007 et celui du maïs est prévu en 2008, ce qui ouvre des perspectives sans précédent pour l'identification de gènes d'intérêt chez le sorgho et les possibilités de

transfert de cette information au maïs. Cette stratégie reste cependant risquée tant que les réponses respectives de ces deux espèces au déficit hydrique ne sont pas mieux comprises.

Chez le maïs, des progrès ont été faits sur la compréhension des effets du déficit hydrique sur le fonctionnement des plantes aux échelles moléculaires et plante entière. De nombreuses études montrent qu'il existe une variabilité génétique importante sur des mécanismes impliqués dans la tolérance. Des gènes et des QTL (régions du génome contrôlant l'hérédité de caractère quantitatif, complexe) ont été identifiés (voir Tuberosa, Ribaut et Welcker), et sont actuellement transférés dans du matériel agronomique d'intérêt. La combinaison de la génétique quantitative et de la modélisation permet de prévoir quelles combinaisons d'allèles seraient favorables dans différents scénarios climatiques et de guider ainsi la sélection (Hammer et al., 2005 ; Tardieu, 2003). Des marges importantes de progrès existent donc, et on peut supposer qu'elles se traduiront par la mise à disposition de génotypes tolérants dans les prochaines années.

Dans certaines régions de production, la culture du sorgho pourrait se développer. Elle repose toutefois, pour être attractive, sur l'amélioration de la productivité de cette espèce dans les conditions européennes et entre autres sur des efforts de recherches sur la valorisation du photopériodisme, l'adaptation climatique et l'exploitation de l'hétérosis.

Références bibliographiques

Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A., 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, INRA (Paris) 72 p.

Barrière Y., Alber D., Dolstra D., Lapierre C., Motto M., Ordas A., Van Waes J., Vlaswinkel L., Welcker C., Monod J.P., 2006. Past and prospects of forage maize breeding in Europe. II. History, germplasm evolution and correlative agronomic changes. *Maydica* 51, 435-449

Borrell A., Hammer G., Oosterom E., van Oosterom E., 2003. Stay-green: a consequence of the balance between supply and demand for nitrogen during grain filling? *Annals of Applied Biology* 138, 91-95.

Borrell, A. et al., 2004. Discovering stay-green drought tolerance genes in sorghum: A multidisciplinary approach. In *New directions for a diverse planet*. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia, 26 Sep – 1 Oct 2004.

Boyer J.S., 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, bean and sunflower at various leaf water potential. *Plant Physiology* 46, 233-235.

Bruce W.B., Edmeades G.O., Barker T.C., 2002. Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. *Journal of Experimental Botany* 53, 13-25.

Campos H., Cooper M., Habben J.E., Edmeades G.O., Schussler J.R., 2004. Improving drought tolerance in maize: a view from industry. *Field Crops Research* 90, 19-34.

Chapman S.C., Cooper M., Podlich D., Hammer G.L., 2003. Evaluating plant breeding strategies by simulating gene action and dryland environment effects. *Agronomy Journal* 95, 99-113.

Claassen M.M., Shaw R.H., 1970. Water deficit effects on corn. II. Grain components. *Agronomy Journal* 62, 652-655.

Condon A.G., Richards R.A., Rebetzke G.J., Farquhar G.D., 2004. Breeding for high water-use efficiency. *Journal of Experimental Botany* 55, 2447-2460

Clerget B., Rattunde H.F.W., Dagnoko S., Chantereau J., 2007. An easy way to assess photoperiod sensitivity in sorghum: Relationships of the vegetative-phase duration and photoperiod sensitivity. *SAT eJournal* 3.

Clerget B., Dingkuhn M., Goze E., Rattunde H.F.W., Ney B., 2008. Variability of phyllochron, plastochron and rate of increase in height in photoperiod-sensitive sorghum varieties. *Annals of Botany* 101, 579.

- Dufour P., Grivet L., D'Hont A., Deu M., Trouche G., Glaszmann J. C., Hamon P., 1996. Comparative genetic mapping between duplicated segments on maize chromosomes 3 and 8 and homeologous regions in sorghum and sugarcane. *Theoretical and Applied Genetics* 92, 1024-1030.
- Duvick D.N., Cassman K.G., 1999. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Science* 39, 1622-1630.
- Edmeades G.O., Bolanos J., Chapman S.C., Lafitte H.R., Banziger M., 1999. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations: I. Gains in biomass, grain yield, and harvest index. *Crop Science* 39, 1306-1315.
- Hammer G., Chapman S., van Oosterom E., Podlich D. (2005). Trait physiology and crop modelling as a framework to link phenotypic complexity to underlying genetic systems. *Australian Journal of Agricultural Research* 56, 947-960.
- Hausmann B., Mahalakshmi V., Reddy B., Seetharama N., Hash C., Geiger H., 2003. QTL mapping of stay-green in two sorghum recombinant inbred populations. *Theoretical and Applied Genetics* 106, 133-142.
- Hash C., Bhasker Raj A., Lindup S., Sharma A., Beniwal C., Folkertsma R., Mahalakshmi V., Zerbini E., Blummel M., 2003. Opportunities for marker-assisted selection (MAS) to improve the feed quality of crop residues in pearl millet and sorghum. *Field Crops Research* 84, 79-88.
- Heard J., Adam T.R., Anstom G., Bensen R., Nelson D., Arner D., Ratcliffe O., Creelman R., Doston S., 2005. Increasing yield stability of corn under drought conditions: new insights from transgenic studies. *Interdrought II, abstract book.*, Univ. La Sapienza, Rome
- Hoisington D., Khairallah M., Reeves T., Ribaut J.M., Skovmand B., Taba S., Warburton M., 1999. Plant genetic resources: what can they contribute toward increased crop productivity? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 96, 5937-5943.
- Kouressy M., Dingkuhn M., Vaxsmann M., Clement-Vidal A., Chantreau J., 2008. Potential contribution of dwarf and leaf longevity traits to yield improvement in photoperiod sensitive sorghum. *European Journal of Agronomy* 28, 195-209.
- Lemaire G., Recous S., Mary B., 2005. Managing residues and nitrogen in intensive cropping systems. New understanding for efficient recovery by crops. *Proceeding of the 4th International Crop Science Congress*. Brisbane.
- Nelson D.E., Repetti P.P., Adams T.R., Creelman R.A., Wu J., Warner D.C., Anstrom D.C., Bensen R.J., Castiglioni P.P., Donnarummo M.G., Hinchey B.S., Kumimoto R.W., Maszle D.R., Canales R.D., Krolkowski K.A., Dotson S.B., 2007. Plant nuclear factor Y (NF-Y) B subunits confer drought tolerance and lead to improved corn yields on water-limited acres. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 104 16450-16455.
- Reymond M., Muller B., Leonardi A., Charcosset A., Tardieu F. (2003). Combining quantitative trait loci analysis and an ecophysiological model to analyse the genetic variability of the responses of leaf growth to temperature and water deficit. *Plant Physiology* 131, 664-675
- Ribaut J.M., Banziger M., Betran J.A., Jiang C., Edmeades G.O., Dreher K., Hoisington D.A., 2002. Use of molecular markers in plant breeding: drought tolerance improvement in tropical maize. In: *Quantitative Genetics, Genomics, and Plant Breeding*, M.S. Kang (ed). CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 85-99.
- Ribaut J.M., Hoisington D.A., Deutsch J.A., Jiang C., Gonzalez-de-Leon D., 1996. Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize. 1. Flowering parameters and the anthesis-silking interval. *Theoretical and Applied Genetics* 92, 905-914.
- Sinclair T.R., Purcell L.C., Sneller C.H., 2004. Crop transformation and the challenge to increase yield potential. *Trends in Plant Science* 9, 70-75.
- Stephens J.C., Holland R.F., 1954. Cytoplasmic male-sterility for hybrid sorghum seed production. *Agronomy Journal* 46, 20-23.
- Tao Y., Henzell R., Jordan D., Butler D., Kelly A., McIntyre C., 2000. Identification of genomic regions associated with stay green in sorghum by testing RILs in multiple environments. *Theoretical and Applied Genetics* 100, 1225-1232.

- Tardieu F., 2003. Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Trends in Plant Science* 8, 9-14.
- Tuberosa R., Salvi S., Sanguineti M.C., Landi P., Maccaferri M., Conti S., 2002. Mapping QTLs regulating morpho-physiological traits and yield: case studies, shortcomings and perspectives in drought-stressed maize. *Annals of Botany*, 89 n° spec, 941-963.
- Wang W., Vinocur B., Altman A., 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta* 218, 1-14.
- Welcker C., Boussuge B., Bencivenni C., Ribaut M., Tardieu F., 2007. Are source and sinks strenghts genetically linked in maize plants subjected to water deficit ? A QTL study of the responses of leaf growth and of the Anthesis-Silking Interval to water deficit. *Journal of Experimental Botany* 58, 339-349
- Xu D., Duan X., Wang B., Hong B., Ho T., Wu R., 1996. Expression of a late embryogenesis abundant protein gene, HVA1, from barley confers tolerance to water deficit and salt stress in transgenic rice. *Plant Physiology* 110, 249-257.
- Xu W., Subudhi P.K., Crasta O.R., Rosenow D.T., Mullet J.E., Nguyen H.T., 2000. Molecular mapping of QTLs conferring stay-green in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Genome* 43, 461-469.
- Zhang J., Nguyen H.T., Blum A., 1999. Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plants. *Journal of Experimental Botany* 50, 291-302.