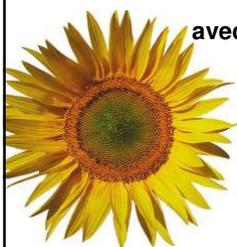


## Améliorer la tolérance du maïs à la sécheresse ou la productivité du sorgho : enjeux, limites et perspectives

Claude Welcker & Jean-François Rami

avec M Dingkuhn, J Chantereau, JC Glaszman, F Tardieu

INRA & CIRAD Montpellier



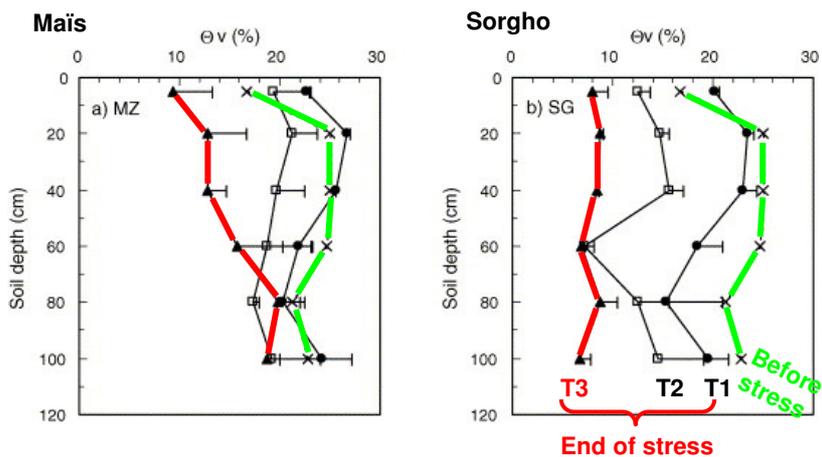
Production végétale et sécheresse  
Toulouse – 6 juin 2008

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



Maïs vs Sorgho

Maïs : l'extraction de l'eau du sol reste superficielle  
Sorgho : l'extraction est homogène sur > 1 m (et peut atteindre 2-3 m)



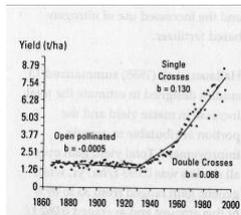
Farré I & Faci JM 2006

Production végétale et sécheresse  
Toulouse – 6 juin 2008

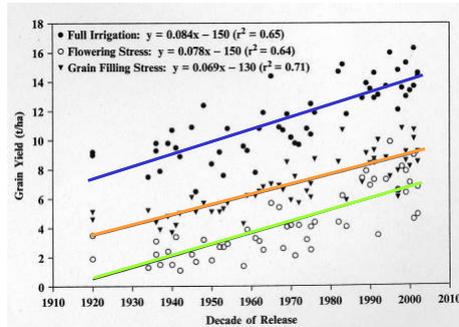
ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



« Le progrès pour le rendement potentiel ne s'est pas fait au détriment de la tolérance au déficit hydrique »  
 Duvick (1999, 2005) et Campos (2004) et Cooper (com. pers. 2008)



Rendements moyens aux USA de 1860 à nos jours : part de la génétique (+ 1.1 q/ha/an)



Rendements d'hybrides de 1920 à 2003 en Irrigué, déficit à floraison ou pendant le remplissage des grains

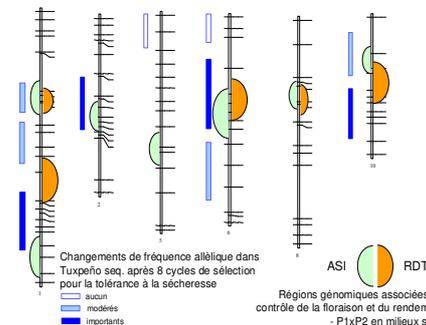
Production végétale et sécheresse  
 Toulouse – 6 juin 2008

ALIMENTATION  
 AGRICULTURE  
 ENVIRONNEMENT

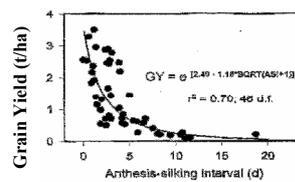


"Tolérance à la sécheresse chez les maïs tropicaux : une expérience réussie" - CIMMYT

- \* Des sources de tolérance avérées
- \* ASI caractère-clé utilisé en sélection
- \* Contrôle génétique connu



Ribaut et al., 1996, 1997



+ 80 à 100 kg/ha/cycle sur 8 cycles

Bolaños et Edmeades, 1996

- \* Semences pour 2 Mha en Afrique

Ribaut et Bänziger, 2002

Production végétale et sécheresse  
 Toulouse – 6 juin 2008

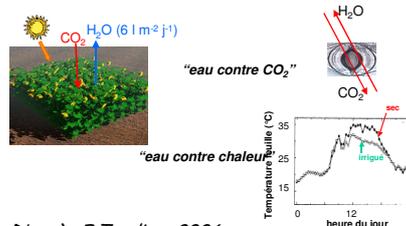
ALIMENTATION  
 AGRICULTURE  
 ENVIRONNEMENT



## vers des stratégies génétiques renouvelées

- Un changement de pluviométrie très inégalement réparti, une compétition pour l'eau exacerbée et une demande de production soutenue
- On a besoin d'eau pour produire !

Deux échanges :



⇒ Quoi améliorer ?

D'après F Tardieu, 2006

Esquive : géotypes plus précoces ou semis plus tôt

Adaptation : optimiser les échanges plutôt que résistance

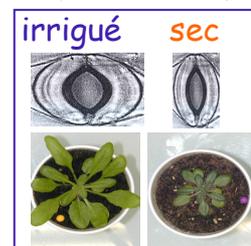
## "Echange" : moindre consommation d'eau contre rendement maximum réduit

### Esquive

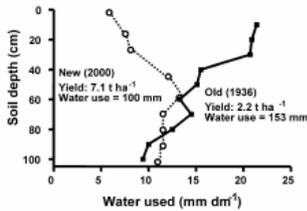
- Géotypes plus précoces, ou semés plus tôt  
*le cycle cultural se termine plus vite, avant la sécheresse*
- Sélectionner pour la tolérance aux basses températures  
*QTL du photosystème et QTL de croissance = QTL de rendement via meilleures interception et conversion du rayonnement (Giauffret, 2007)*

### Evitement :

- Réduire la transpiration (plantes plus petites ..)
- Capturer l'eau (racines plus profondes)



**Améliorer l'exploration du sol par les racines : possible mais pas gratuit...**

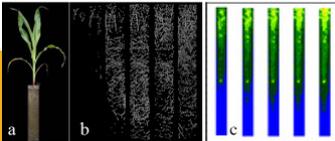


Les anciens hybrides souffraient plus de la sécheresse à floraison car ils avaient épuisés les réserves du sol avant ! (Campos et al. 2004)



Résultats spectaculaires en sol profond ou en présence de nappe d'eau  
QTLs d'enracinement = QTL de rendement (Tuberosa et al. 2002)

Résultats négatifs sinon (Bolanos et al. 1993, Bruce et al. 2002)  
les assimilats vont vers les racines au lieu des grains



ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



**vers des stratégies génétiques renouvelées**

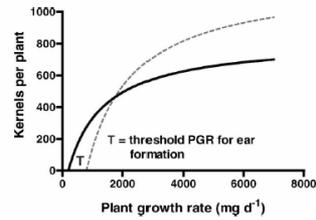
- ✓ Maïs - espèce en C4 - bonne efficacité d'utilisation de l'eau
- ✓ Les racines, de fausses amies ? (Tuberosa 1992 vs J Bolanos 1996)
- ✓ ASI, une expérience réussie au CIMMYT (Ribaut, Bänziger, 2002)
- ✓ Les variétés récentes de moins en moins sensibles pendant la floraison ? (Bruce 2002)

⇒ **Considérer conjointement la sensibilité des développements végétatif et reproducteur au déficit hydrique**

⇒ **Repenser la sélection : pas de stratégie unique, dépend des scénarios et du risque accepté par l'agriculteur**



**maintien de la croissance  
= maintien du rendement**

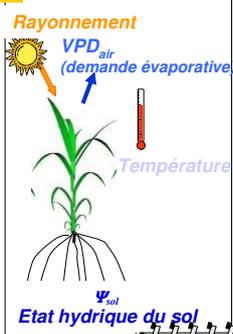


**Croissance foliaire**

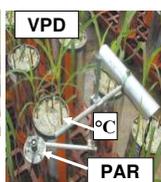
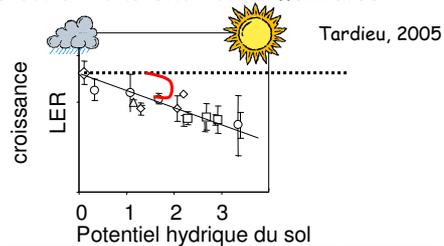
- processus le plus sensible au DH (Wesgate & Boyer, 1983)
- capacité de la plante à intercepter l'énergie lumineuse et à la convertir en biomasse (Monteith, 1977)
- fermeture rapide du couvert pour une économie d'eau du sol (moins évaporation)



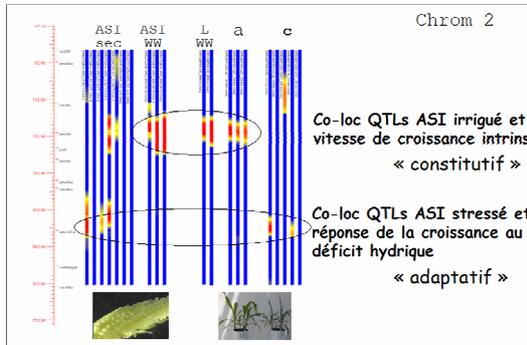
**Analyser et modéliser la croissance**



Exprimer la transpiration et la croissance comme une fonction des conditions environnementales



vers des stratégies génétiques renouvelées



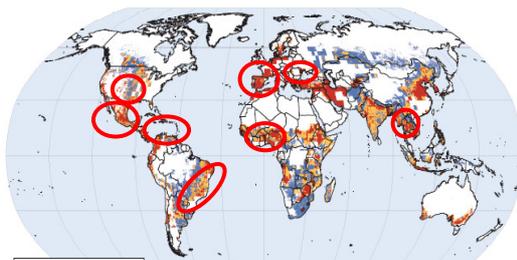
ASI : essais au champ en conditions contrastées Feuilles : paramètres de mesure Welcker et al., 2007, JEB

- Des mécanismes communs entre organes végétatifs (source) et reproducteurs (forces de puit)
- Des régions du génome qui contrôlent la sensibilité de la croissance au déficit hydrique

- Idéotypes - marche aux gènes et sélection assistée par marqueurs

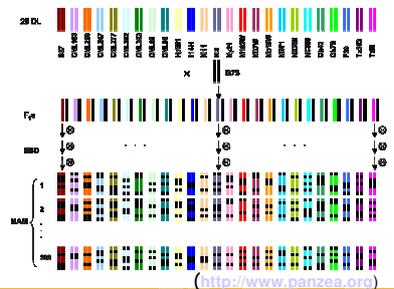


Explorer la diversité à grande échelle



(Projet GCP)

- Rechercher des formes de gènes chez les espèces ancêtres ?
- Hoisington, 1999



- Valoriser les ressources génétiques
- Valider la fonction de gènes
- Découvrir des formes d'adaptation



**Sorgho**

## Intérêt du "stay-green"

(d'après A. Borrell et al.)

(d'après M. Kouressy et al.)

- Tolérance au stress hydrique terminal
- Augmentation de l'indice de récolte
- Tolérance aux densités fortes ?

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA

Production végétale et sécheresse  
Toulouse – 6 juin 2008

**Sorgho**

## Vers la découverte des gènes de la tolérance au déficit hydrique post-floral (Stay Green)

Harris et al. 2007

Harris, K., Subudhi, P., Borrell, A., Jordan, D., Rosenow, D., Nguyen, H., Klein, P., Klein, R., et Mullet, J. (2007). Sorghum stay-green QTL individually reduce post-flowering drought-induced leaf senescence. *J. Exp. Bot.* 58, 327-338.

Hausmann, B., Mahalakshmi, V., Reddy, B., Seetharama, N., Hash, C., et Geiger, H. (2003). QTL mapping of stay-green in two sorghum recombinant inbred populations. *Theoretical and Applied Genetics* 106, 133-142.

Sanchez, Subudhi, Rosenow, et Nguyen (2002). Mapping QTLs associated with drought resistance in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Plant Molecular Biology* 48, 713-726.

Tao, Y., Hanzell, R., Jordan, D., Butler, D., Kelly, A., et McIntyre, C. (2000). Identification of genomic regions associated with stay green in sorghum by testing RILs in multiple environments. *TAG Theoretical and Applied Genetics* 100, 1225-1232.

Xu, W., Subudhi, P. K., Crasta, O. R., Rosenow, D. T., Mullet, J. E., et Nguyen, H. T. (2000). Molecular mapping of QTLs conferring stay-green in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Genome* 43, 461-9.

Crasta OR, Xu WW, Rosenow DT, Mullet J, Nguyen HT. (1999) Mapping of post-flowering drought resistance traits in grain sorghum: association between QTLs influencing premature senescence and maturity. *Molecular and General Genetics* 262, 579-588.

### 4 QTL majeurs identifiés à partir d'une source unique de stay-green (Btx642)

- des perspectives d'utilisation en sélection
- construction de lignées isogéniques et clonage positionnel des QTL en cours

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

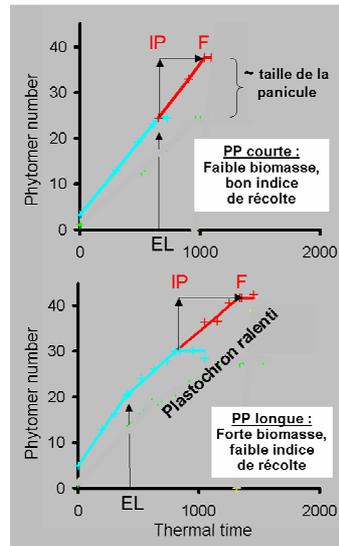
INRA

Production végétale et sécheresse  
Toulouse – 6 juin 2008

## Comment améliorer la plasticité de la taille de la panicule ?

### Problème intrinsèque des sorghos photopériodiques ou problème général ?

- ⇒ Ralentissement du développement en jours longs et allongement du cycle
- ⇒ Faible développement structural de la panicule
- ⇒ Biomasse importante mais indice de récolte faible



Clerget et al. 2007

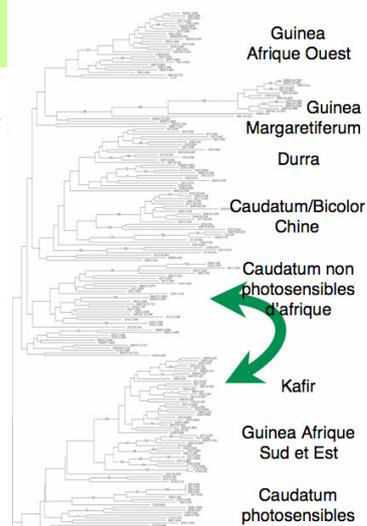
Production végétale et sécheresse  
Toulouse – 6 juin 2008

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA

## Elargir la base génétique pour la sélection hybride du sorgho

- Des programmes de sélection hybrides ont démarré dans les années 60 aux états-unis et sont maintenant menés en Australie, Europe, Brésil, Inde...
- L'hétérosis chez le sorgho est surtout exploité dans des combinaisons Kafir x Caudatum (non photo-sensibles)
- Basée sur l'utilisation du système A1 de stérilité mâle cytoplasmique
- La structuration en groupes hétérotiques est mal définie et le principal facteur de structuration reste imposé par les groupes stérile/restaurateur
- Le programme de conversion américain permet d'accéder à d'autres sources de diversité originellement photopériodique



Deu et al. 2006

Production végétale et sécheresse  
Toulouse – 6 juin 2008

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

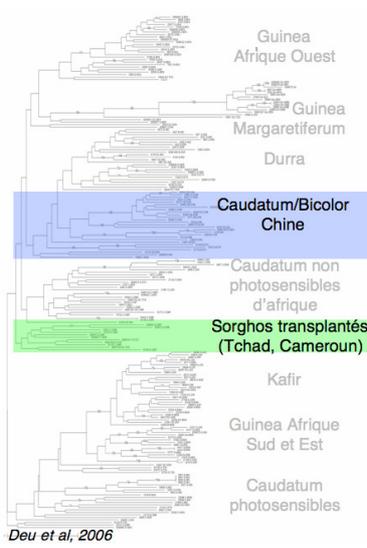
INRA

### Améliorer la productivité et la stabilité du rendement dans les conditions européennes en utilisant des sources nouvelles de diversité

- Adaptation aux basses températures
- Tolérance à la sécheresse



Photo S. Bracco



Deu et al, 2006

Production végétale et sécheresse  
Toulouse – 6 juin 2008

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



### - Des progrès sont en cours, permettront de repenser les systèmes de culture

- L'exemple australien (Jordan, Borrel, Hammer, Chapmann)



- Cibles d'amélioration :

Sorgho : biomasse, indice de récolte, stay-green, tolérance au froid

Mais : maintenir la croissance (racines, feuilles, ovules) en situation de déficit hydrique

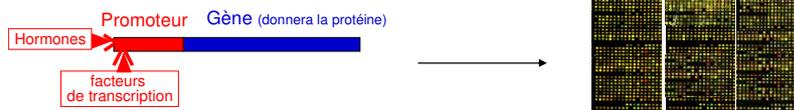
Production végétale et sécheresse  
Toulouse – 6 juin 2008

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT



- Mais pas de "miracle" par transfert de gènes isolés :

***piloter les plantes pour optimiser le risque***  
*(milieu, objectif de l'agriculteur)*



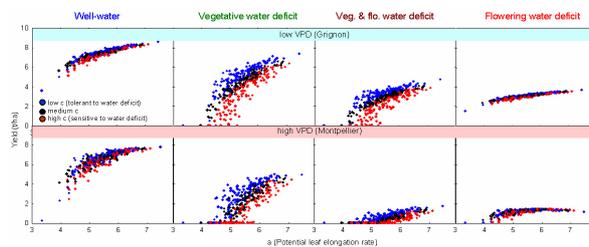
**Quelques gènes pilotent l'expression d'un grand nombre de gènes :**

- Déclencher la floraison (échappement) si nécessaire seulement ?
- Enclencher des stratégies "cigales" ou "fourmi" suivant les réserves ?

PAS DE STRATEGIE UNIQUE, dépend des scénarios et du risque accepté par l'agriculteur.



Des génotypes virtuels pour guider la sélection

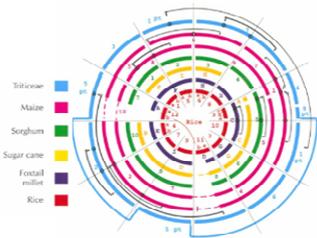


Effets des allèles de sensibilité de la croissance à la demande évaporative et au déficit du sol sur le rendement dans différents scénarios climatiques

Chenu et al. 2008

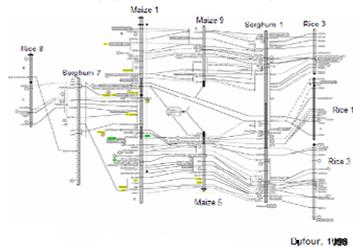
## Une nécessité scientifique : explorer la diversité à grande échelle

- Des opportunités pour analyser la diversité sur l'ensemble des génomes et identifier des allèles d'intérêt agronomique dans les populations naturelles
- La conservation des génomes entre les espèces permet d'accélérer la découverte de gènes d'intérêt par des approches comparées



Moore et al. 1995

Conservation générale des génomes au sein des graminées



Lefour, 1998

Colinéarité des chromosomes du maïs, du sorgho et du riz

Production végétale et sécheresse  
Toulouse – 6 juin 2008

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA

## Conclusion

- Des progrès sont en cours, permettront de repenser les systèmes de culture (maïs de demain = sorgho d'aujourd'hui ?)
- Mais pas de "miracle" par transfert de gènes isolés :
- PAS DE STRATEGIE UNIQUE, dépend des scénarios et du risque accepté par l'agriculteur.  
*notre rôle : proposer des stratégies pour un milieu et un niveau de risque, à l'agriculteur de choisir*
- Une nécessité scientifique :  
Evaluer le progrès génétique de la tolérance du maïs, explorer la variabilité à grande échelle (approche comparative, syntenie...)

Production végétale et sécheresse  
Toulouse – 6 juin 2008

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT

INRA