

Développement reproducteur du maïs et réponses aux contraintes environnementales



Olivier TURC
MONTPELLIER
FRANCE

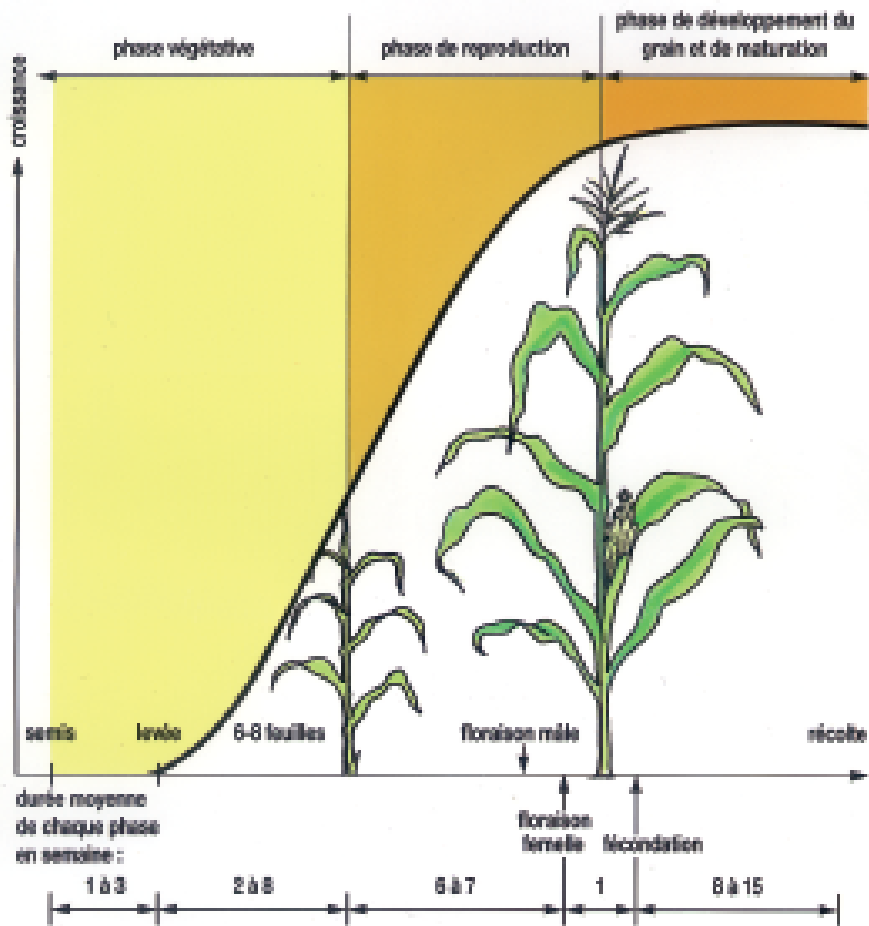
Les étapes du développement reproducteur du maïs

Séparation spatiale des inflorescences mâle (panicule) et femelle (épi)



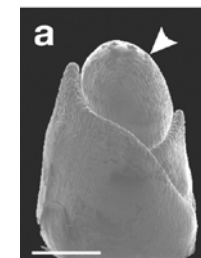
Arvalis 2009

Les étapes du développement reproducteur du maïs



1^{er} événement reproducteur : le bourgeon terminal devient reproducteur

- *Le nombre de feuilles est fixé*
- *Lien avec la précocité*

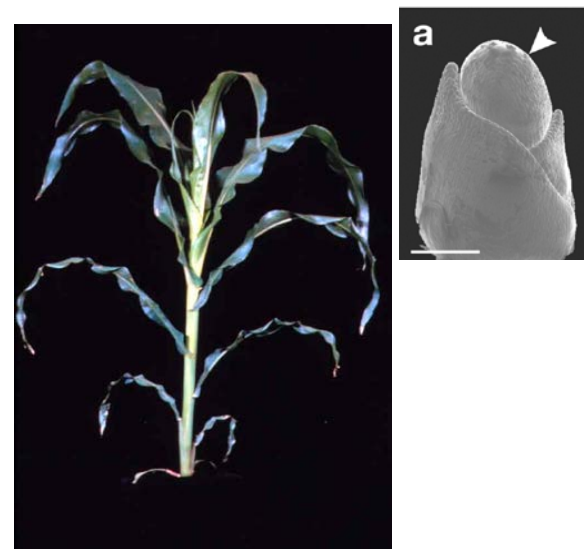
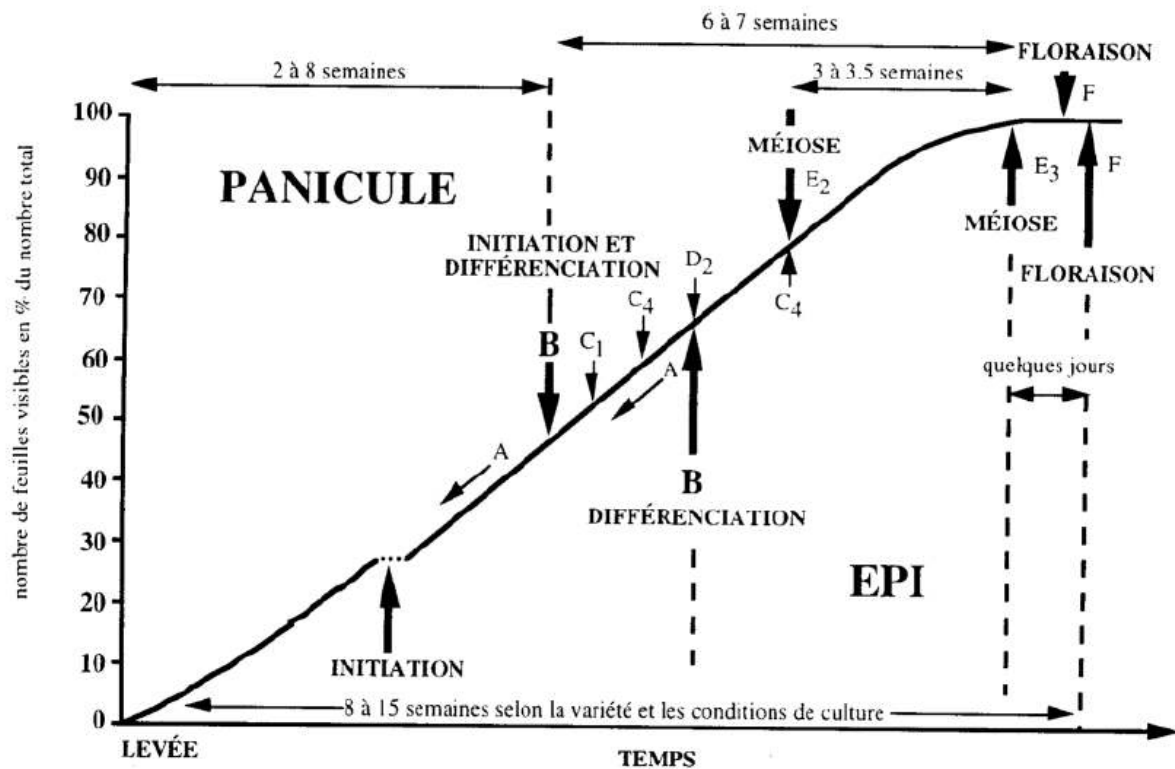


Source : *gnis-pedagogie*

Arvalis 2009

Les étapes du développement reproducteur du maïs

CORRESPONDANCE APPROXIMATIVE ENTRE LES STADES DE DÉVELOPPEMENT DE LA PANICULE ET DE L'ÉPI PRINCIPAL (D'APRÈS GAY ET MENETRIER, 1978).



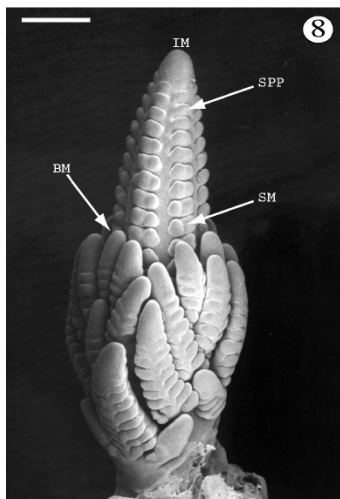
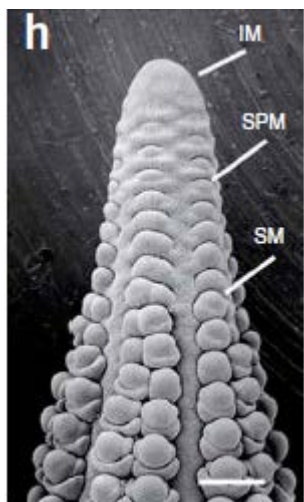
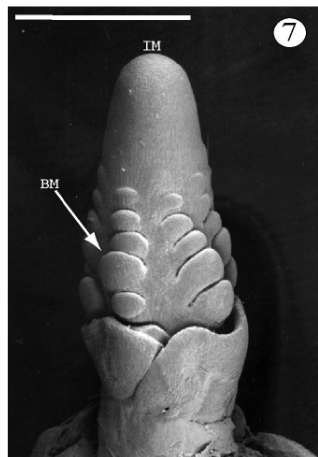
200 - ECOPHYSIOLOGIE DU MAÏS - PHILIPPE GIRARDIN

50 % des feuilles sont visibles à l'initiation de la panicule

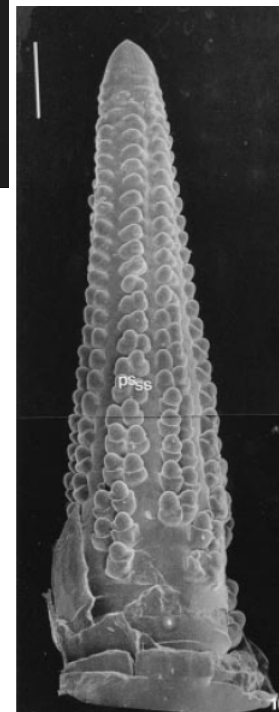
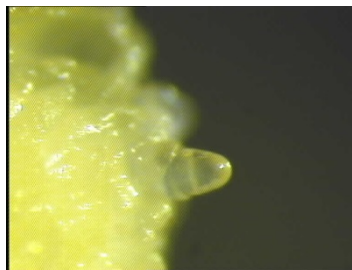
L'initiation de l'épi se produit un peu plus tard sur un bourgeon axillaire

Les étapes du développement reproducteur du maïs

Panicule



Epi



Irish 1997

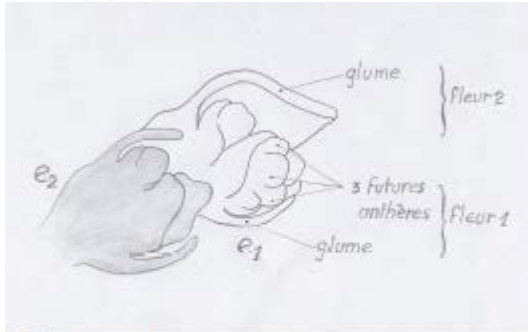
Photos LEPSE

Inflo ramifiée

Ritter 2002

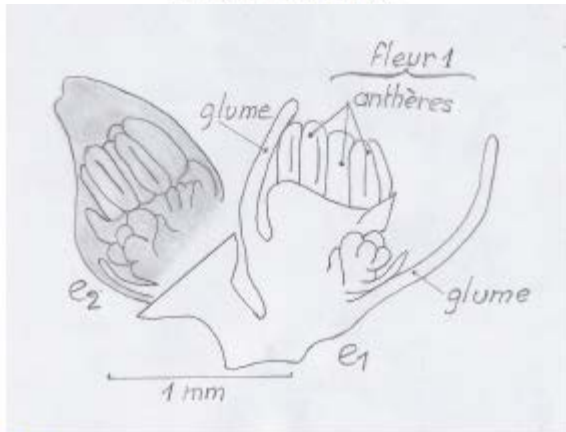
Les étapes du développement reproducteur du maïs

Panicule



© Toule

Apparition des futures anthères dans la fleur la plus avancée



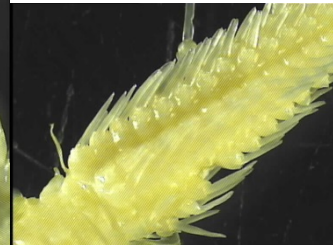
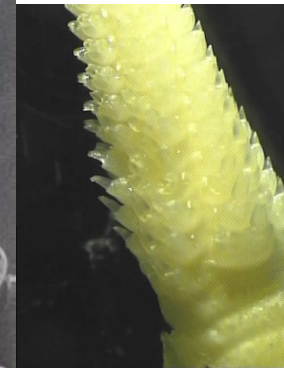
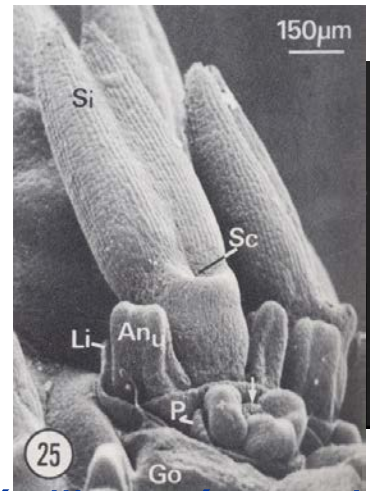
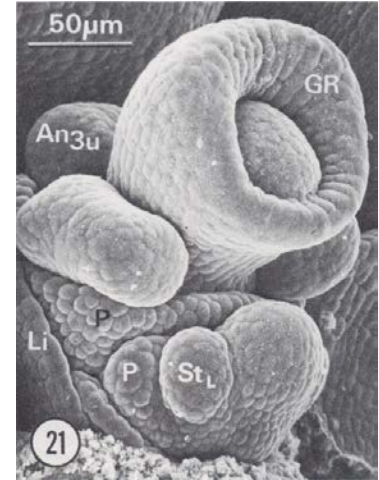
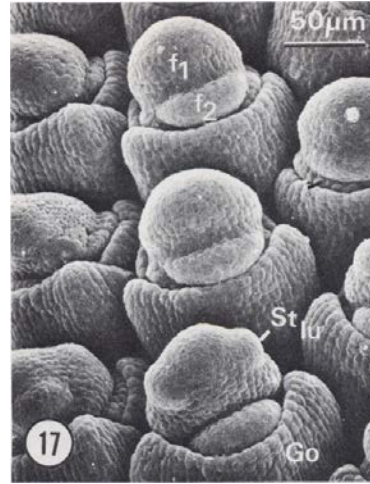
© Balz

Différentiation des sacs polliniques

2 fleurs/épillet ; anthères

Arvalis 2009

Epi



Cheng 1983

1 fleur/épillet ; régression anthères

Les étapes du développement reproducteur du maïs

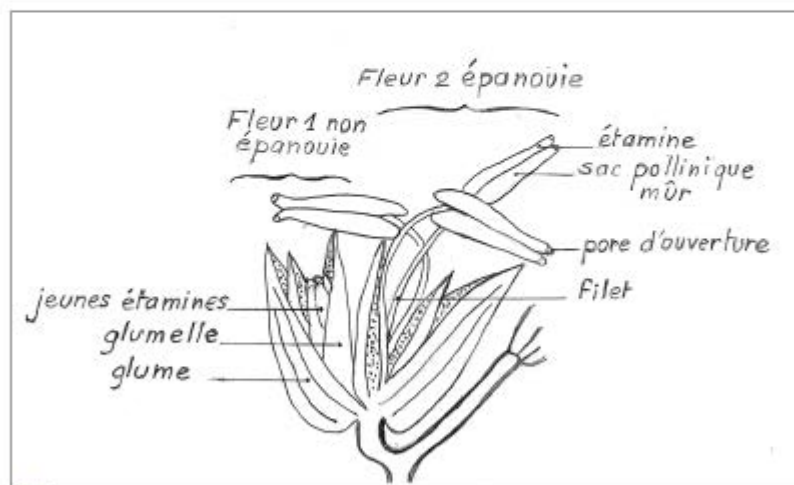
Panicule



© B. Escalé



© B. Escalé



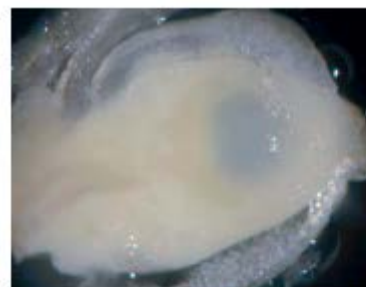
© Toula

Chaque **épillet** de la panicule est composé de deux fleurs, chaque fleur possédant trois **étamines**.

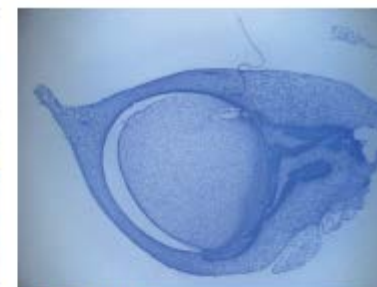
Pour une seule panicule, la libération totale du pollen dure 8 à 10 jours.

Une panicule peut produire plusieurs millions de **grains de pollen**.

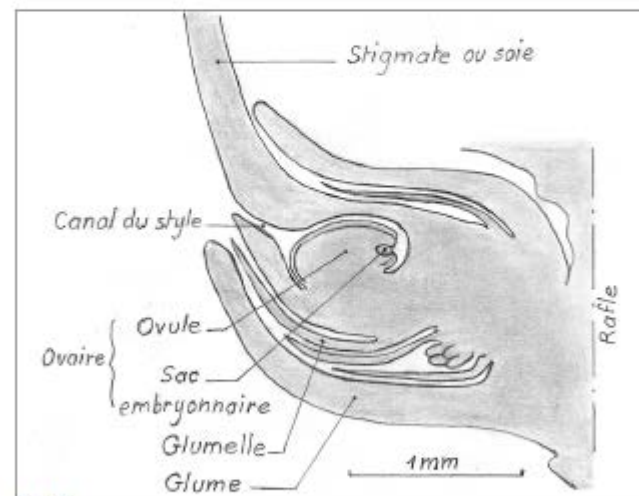
Epi



Source: C. Dumas Laboratoire RDPENS Lyon
Coupe d'ovaire vue à la loupe binoculaire



Coupe d'ovaire observée au microscope



© Toula

La fleur femelle de maïs est organisée selon le modèle général chez les végétaux. Le **pistil**, organe femelle comporte 3 parties: l'**ovaire** prolongé d'un **style** et d'un **stigmate** nommé soie chez le maïs. L'ovaire comporte une loge contenant un **ovule**. L'ovule abrite le **sac embryonnaire** dans lequel se trouve le **gamète femelle** ou **oosphère**.

Arvalis 2009

Les étapes du développement reproducteur du maïs

Panicule



Epi



*How a Corn Plant Develops
Iowa State University Press*

Les étapes du développement reproducteur du maïs



© B. Escafe

Pollen viable

Soie réceptive

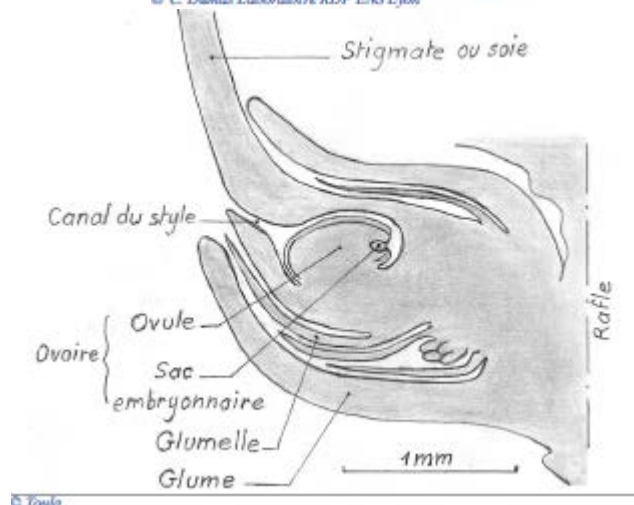
*Soie accessible :
Émergence,
synchronisme*



© C. Dumas Laboratoire RDP ENS Lyon



A. J. B. 1977

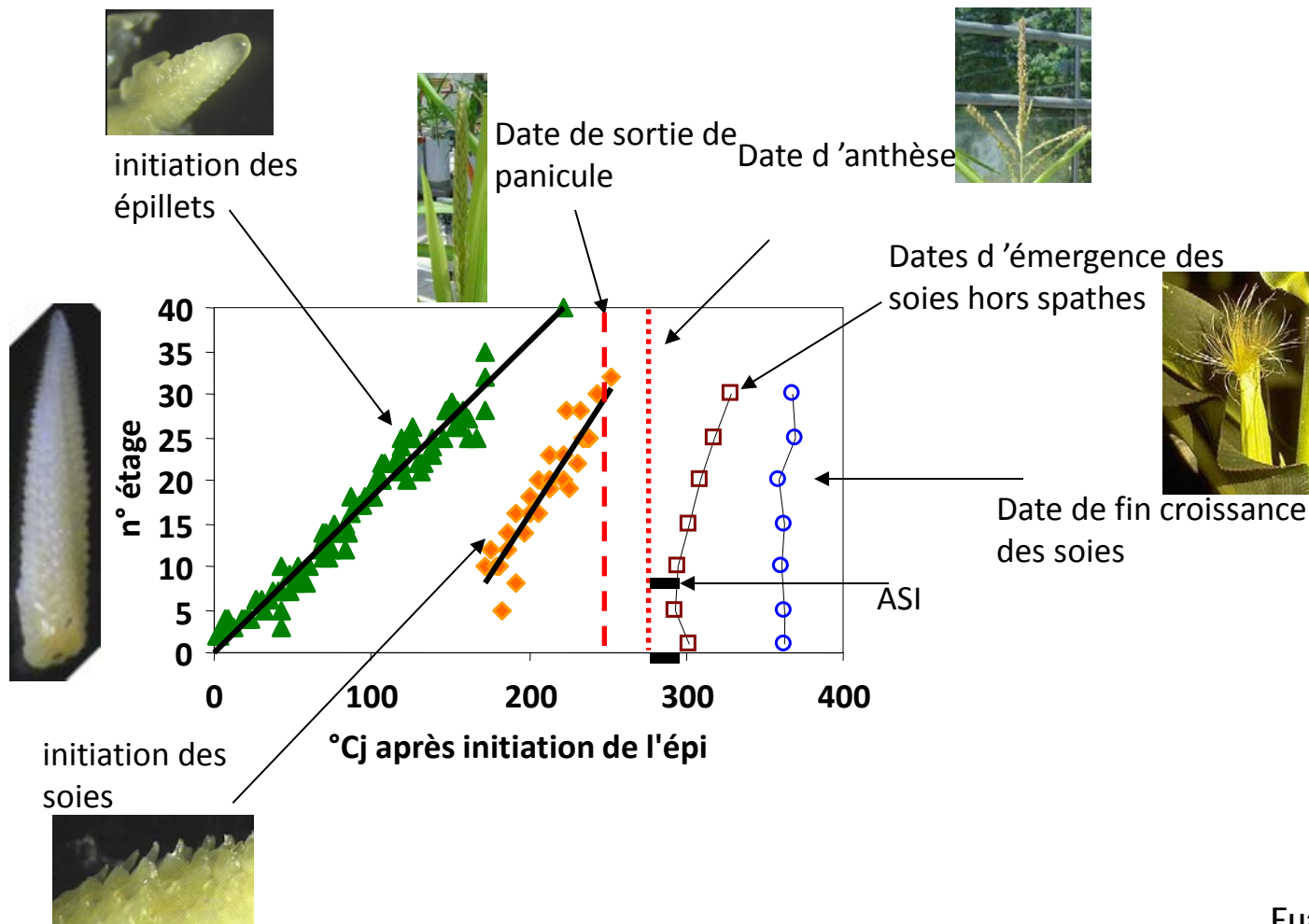


© Trufo

Arvalis 2009

Les étapes du développement reproducteur du maïs

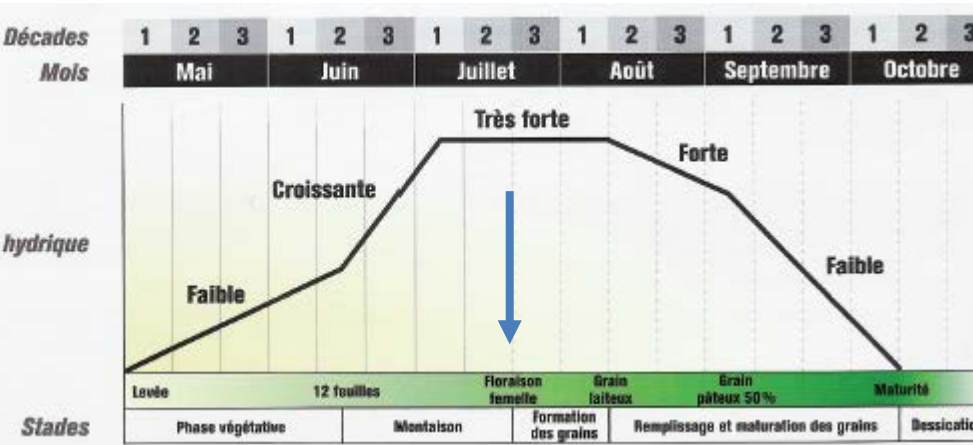
Cinétique de développement des organes reproducteurs de l'épi



Fuad Hassan, 2006

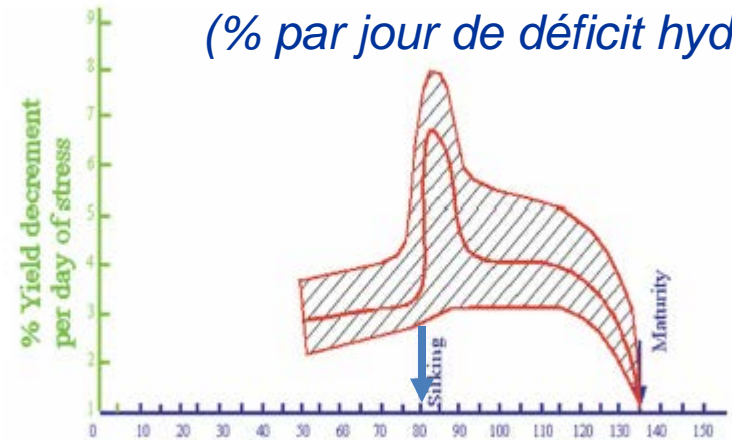
Période de sensibilité

La sensibilité au déficit hydrique est maximale autour de la floraison



Arvalis 2009

*Perte de rendement
(% par jour de déficit hydrique)*

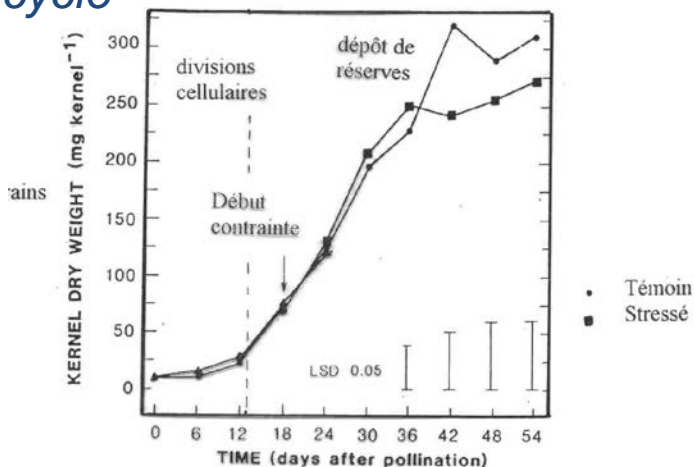


Jours après semis

Araus 2012

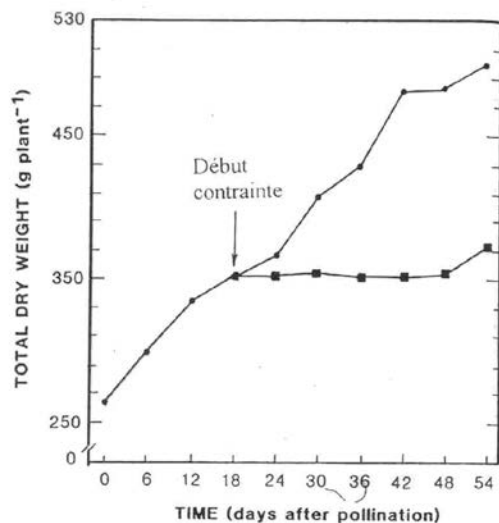
Période de sensibilité

Le remplissage des grains est peu sensible aux conditions environnementales de fin de cycle



La croissance des grains n'est pas affectée de façon significative

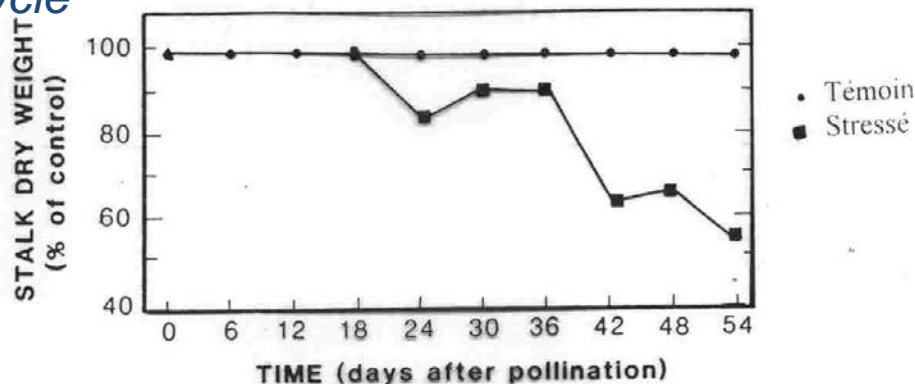
*alors que
la production totale
de biomasse est
fortement pénalisée*



*Contrainte hydrique
pendant la période de
remplissage des grains de
maïs
Ouattar 1987*

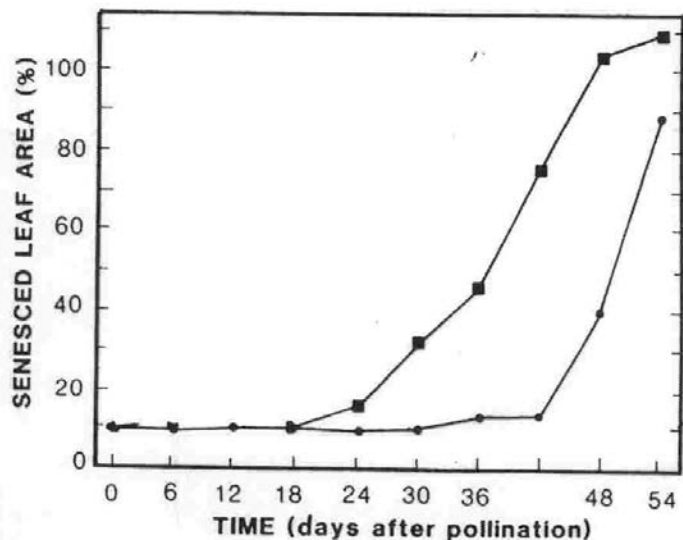
Période de sensibilité

Le remplissage des grains est peu sensible aux conditions environnementales de fin de cycle



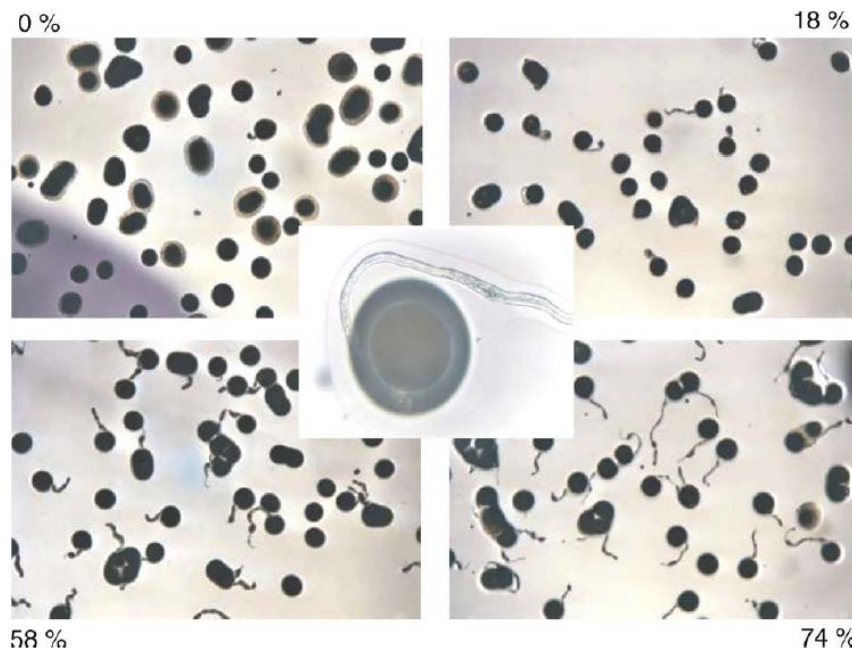
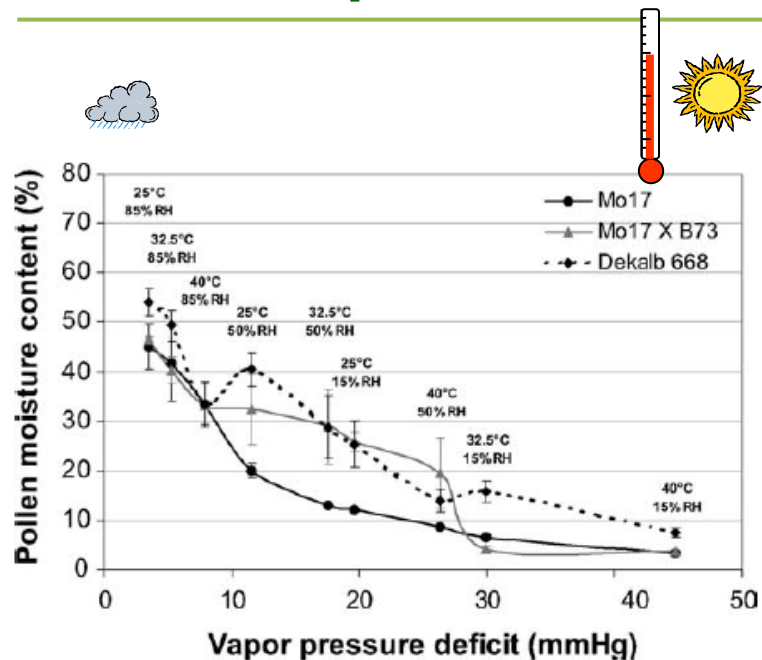
Maintien de la croissance en biomasse des grains grâce à la contribution de l'appareil végétatif
Quattar 1987

Les réserves végétales (tiges) sont fortement sollicitées



Accélération de la sénescence foliaire

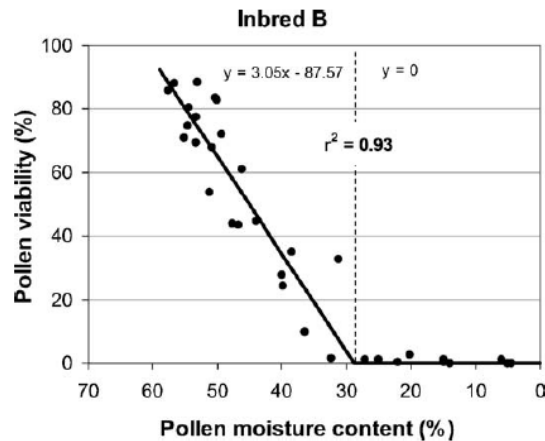
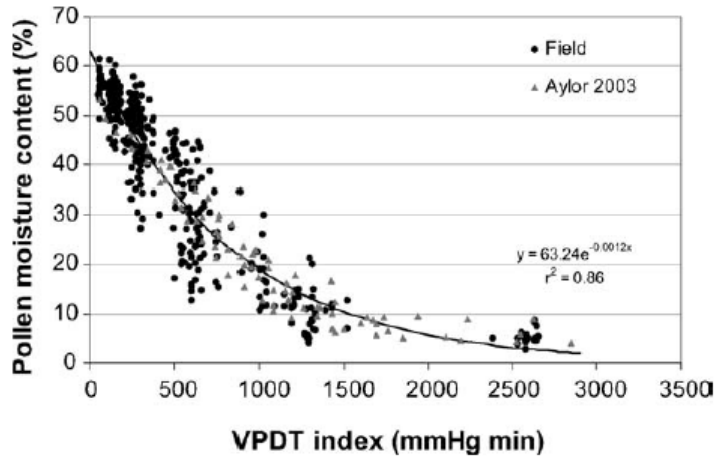
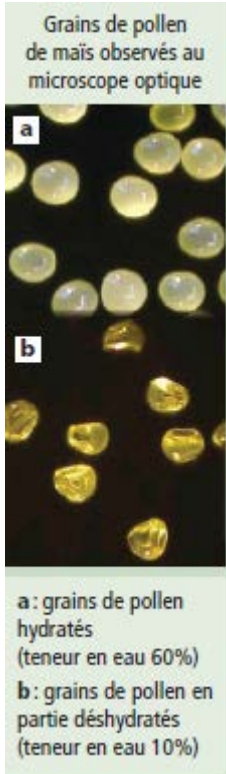
Viabilité du pollen



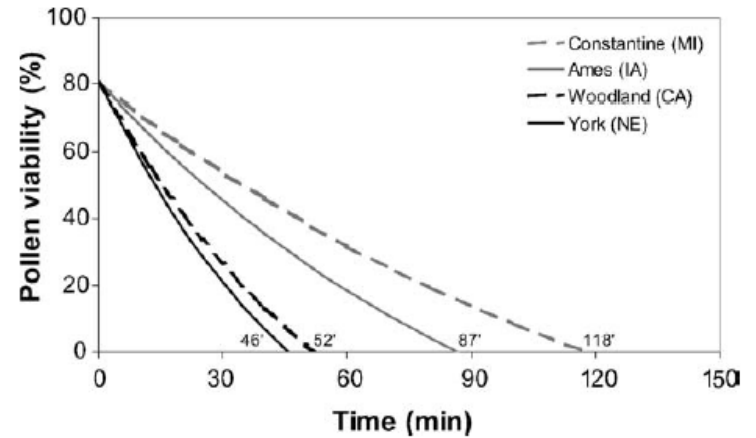
La viabilité du pollen est affectée par le déficit hydrique de l'air

Fonseca 2005

Viabilité du pollen



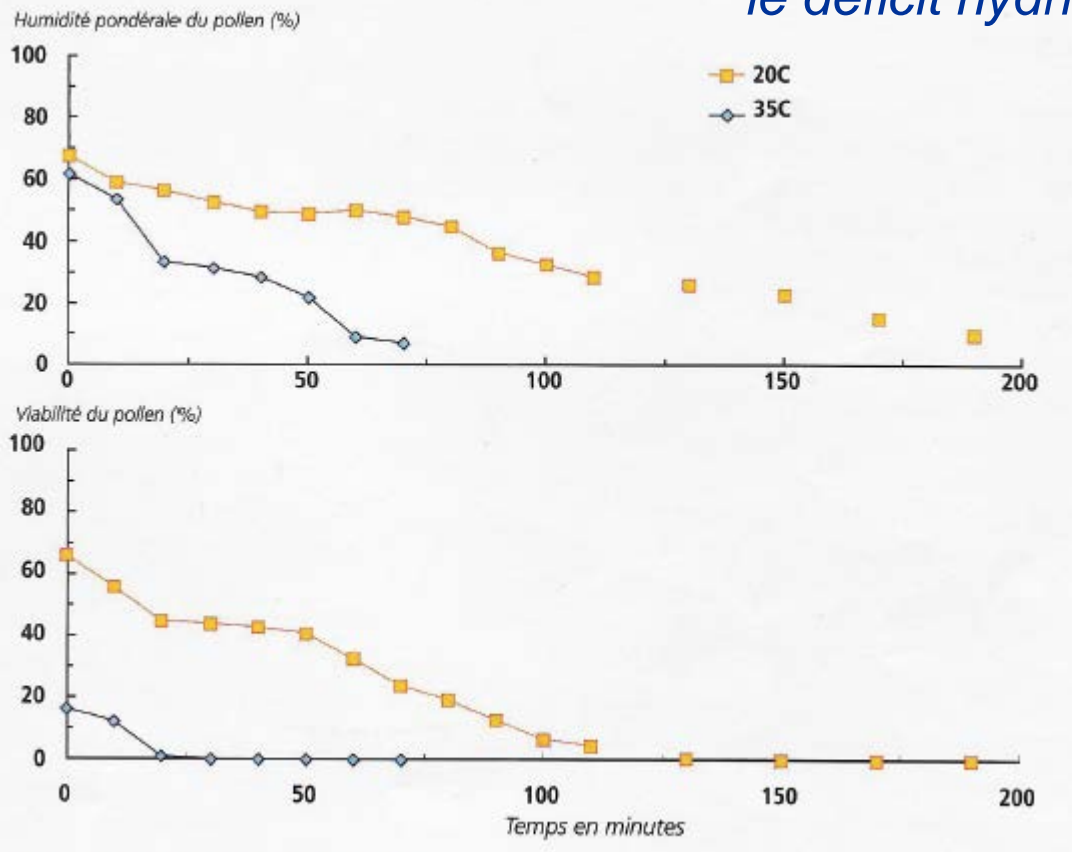
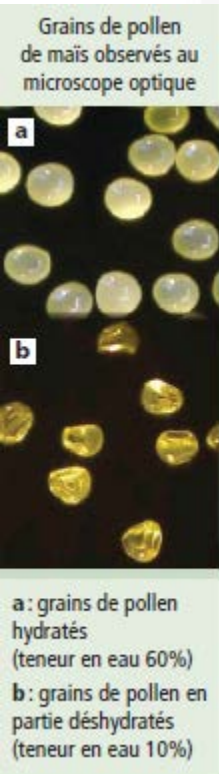
La viabilité du pollen est affectée par le déficit hydrique de l'air



Fonseca 2005

Viabilité du pollen

La viabilité du pollen est affectée par le déficit hydrique de l'air



Source : INRA et Arvalis in FNPSMS maïs'EUROP (juin2004)

Conditions expérimentales :

Mesures effectuées lors d'expositions dans un dispositif de dessèchement où l'air est maintenu à 50% d'humidité et aux températures de 20°C et 35°C.

Résultats :

- le pollen se déshydrate plus rapidement à 35°C qu'à 20°C ;
- même à 20°C, le pollen ne survit pas plus de deux heures.

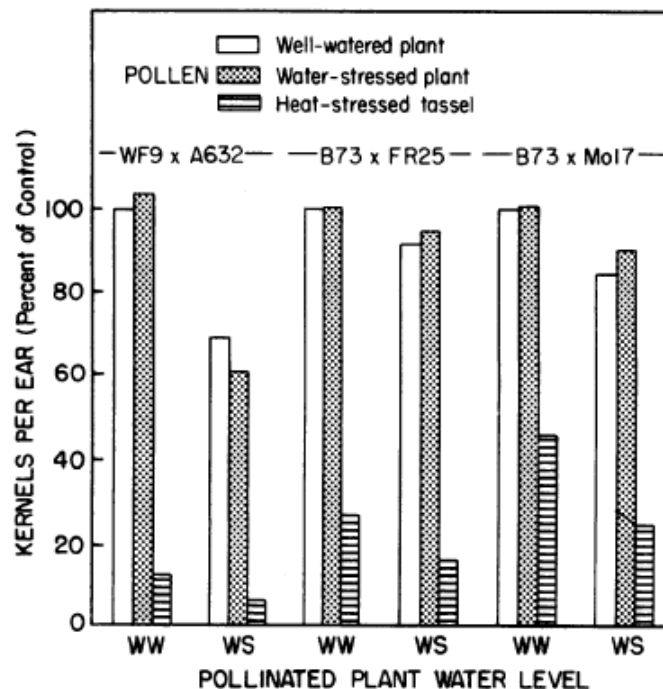
Arvalis 2009

Viabilité du pollen et réceptivité des soies

La viabilité du pollen est affectée par les hautes températures, mais pas par l'état hydrique du sol et de la plante

Le stress thermique subi par le pollen (sur la plante pollinisatrice) affecte la production de grains, indépendamment de l'état hydrique de la plante pollinisée

Comportements différents selon les hybrides



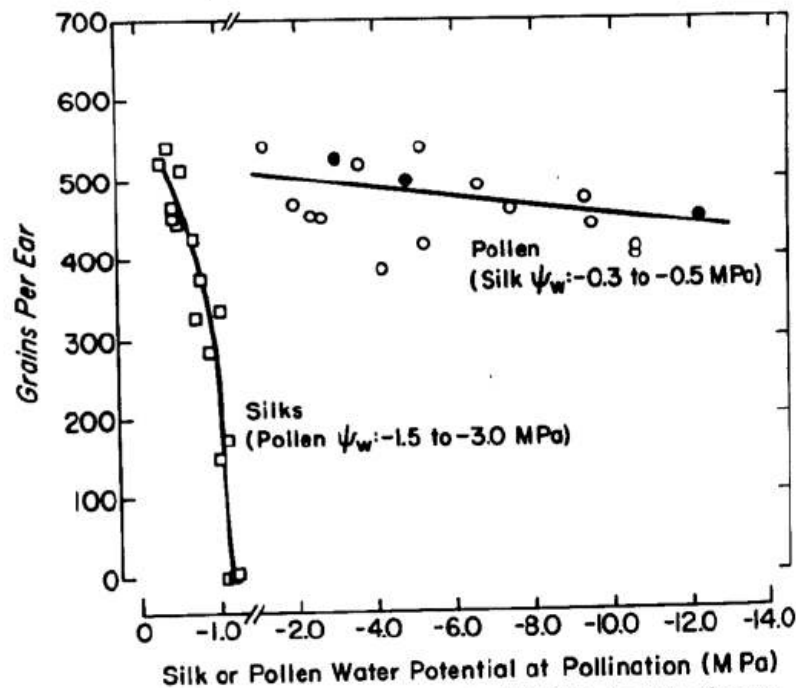
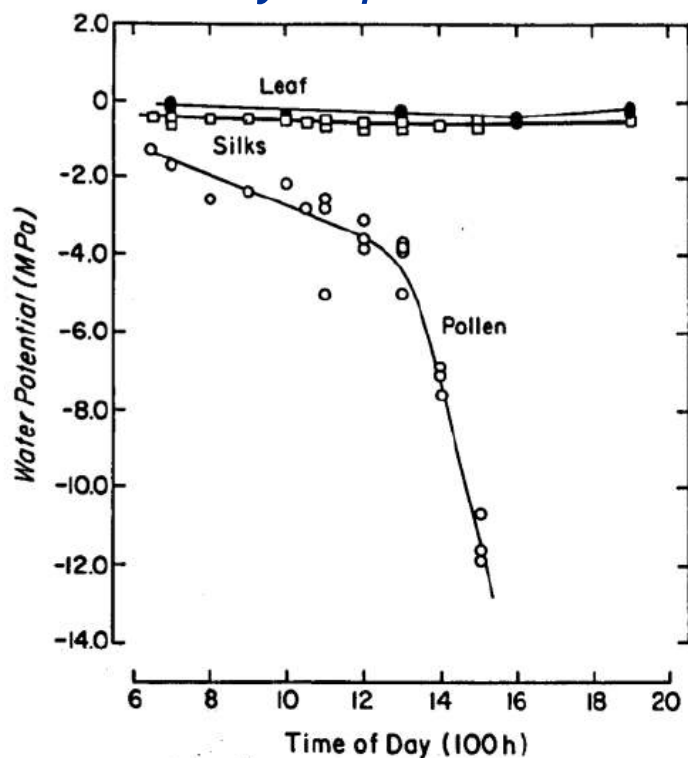
*Schooper 1987
Plant Phy*

Viabilité du pollen et réceptivité des soies

L'état hydrique du pollen est beaucoup plus affecté que celui des soies au cours de la journée

Cependant, la production de grains est beaucoup plus sensible à l'état hydrique de la soie qu'à celui du pollen.

Un déficit hydrique affecte fortement la réceptivité des soies



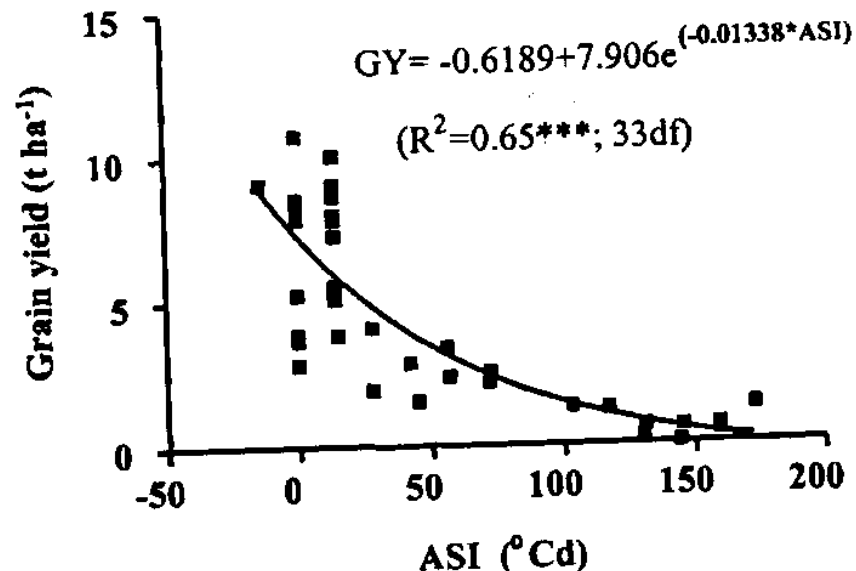
Westgate 1986

Accessibilité des soies : synchronisme avec le pollen

ASI = Anthesis Silking Interval = délai de floraison femelle

La floraison femelle est beaucoup plus sensible aux contraintes environnementales que la date de diffusion du pollen.

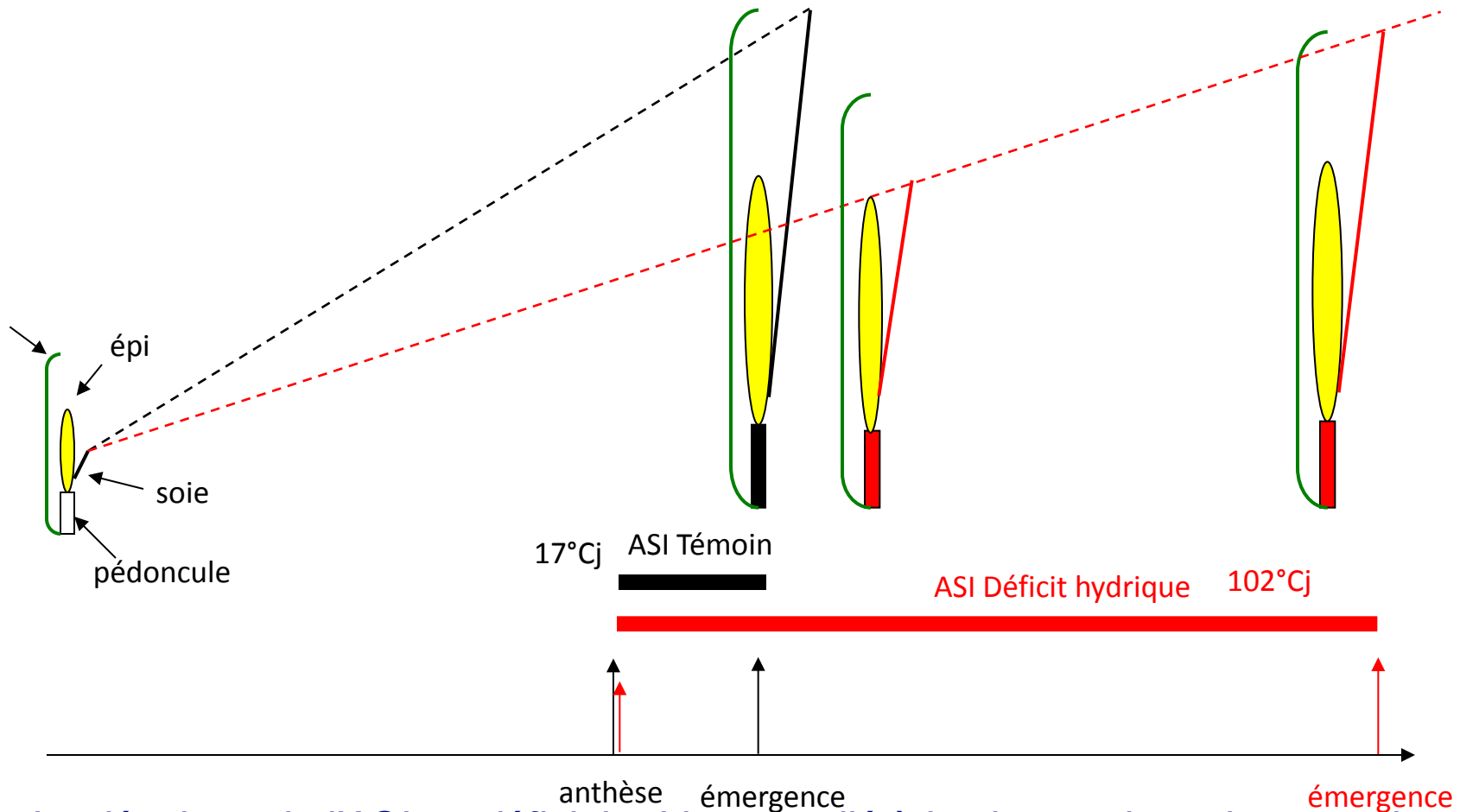
L'ASI est un symptôme de la contrainte subie par la plante.



Rendement et ASI sont corrélés négativement (Edmeades et al. 2000).

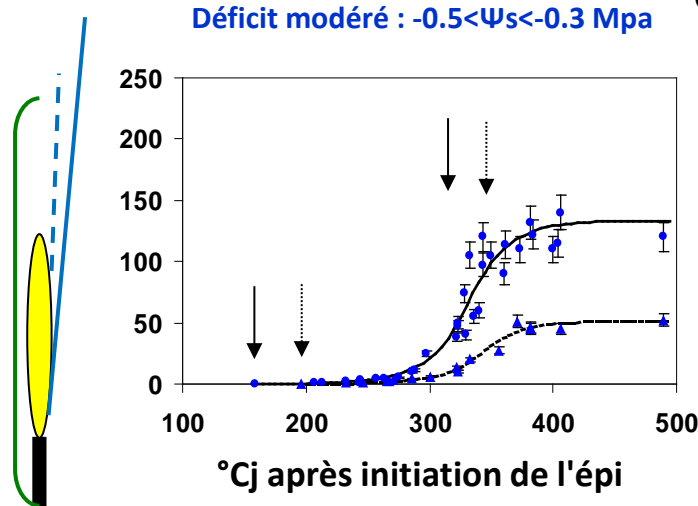
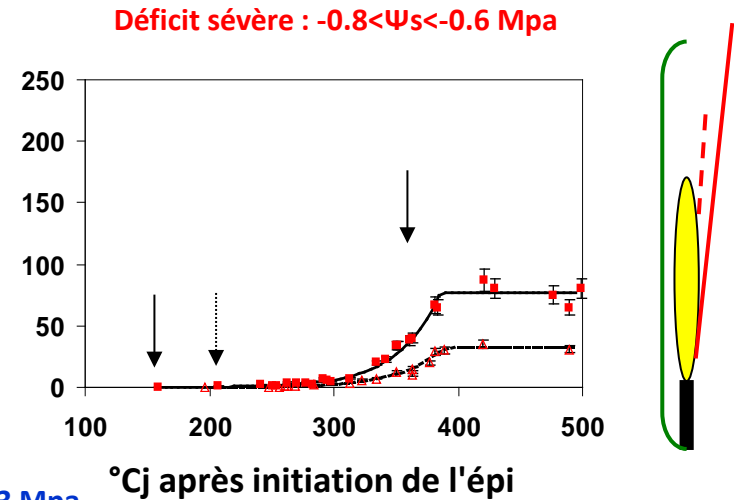
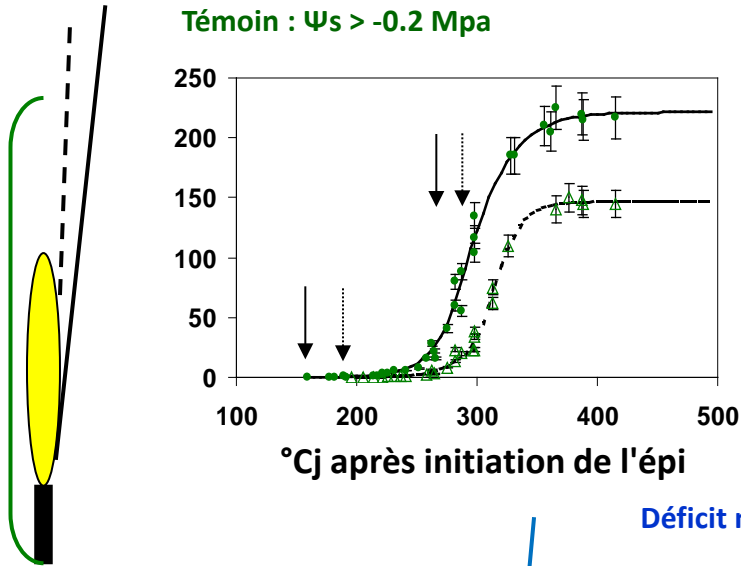
Accessibilité des soies : synchronisme avec le pollen

L'émergence des soies résulte d'une course de vitesse entre le sommet de la soie et le sommet des spathes



Le décalage de l'ASI en déficit hydrique est lié à la vitesse de croissance des soies

Accessibilité des soies : émergence hors des spathes



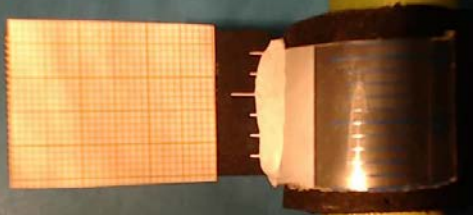
Le déficit hydrique :

- retarde la sortie des soies
- réduit le nombre de soies émergées

Fuad Hassan, 2006

Accessibilité des soies : émergence hors des spathes

Days after first SE: -1 - Time : 03:36
Water deficit period



Source: Oury et al. 2015-INRA-LEPSE

SE=silk emergence

Days after first SE: -1 - Time: 11:45
Well-watered



Source: Oury et al. 2015-INRA-LEPSE

SE=silk emergence

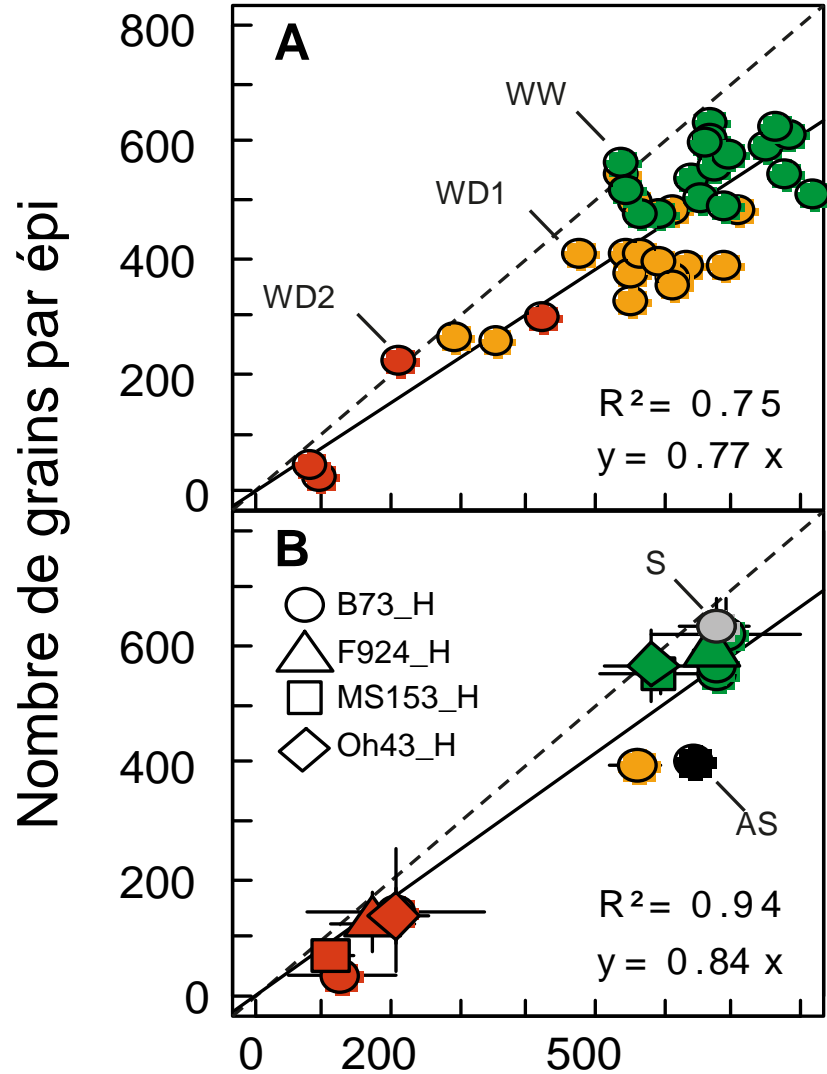
Toutes les soies stoppent leur croissance simultanément :

- dès le 2^{ème} jour en déficit hydrique

- 5-6 jours après la 1^{ère} émergence en bien irrigué

Oury et al., 2015

Accessibilité des soies : émergence hors des spathes



L'arrêt de la croissance (et de l'émergence) des soies rend compte des différences d'avortement de grains entre traitements et hybrides

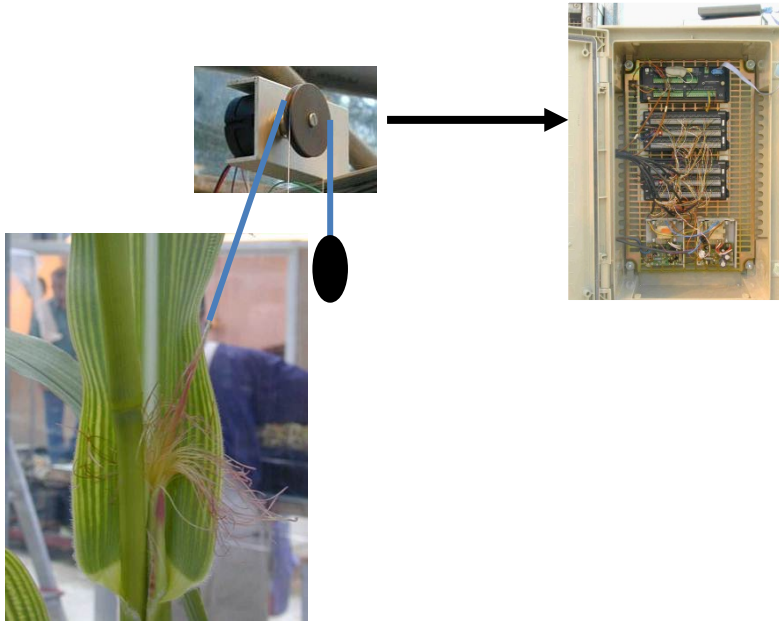
Nombre final de soies émergées

Oury et al., 2015

Phénotyper la croissance des soies

Analyse des cinétiques de croissance des soies

Poulie reliée à la centrale
d'acquisition de données

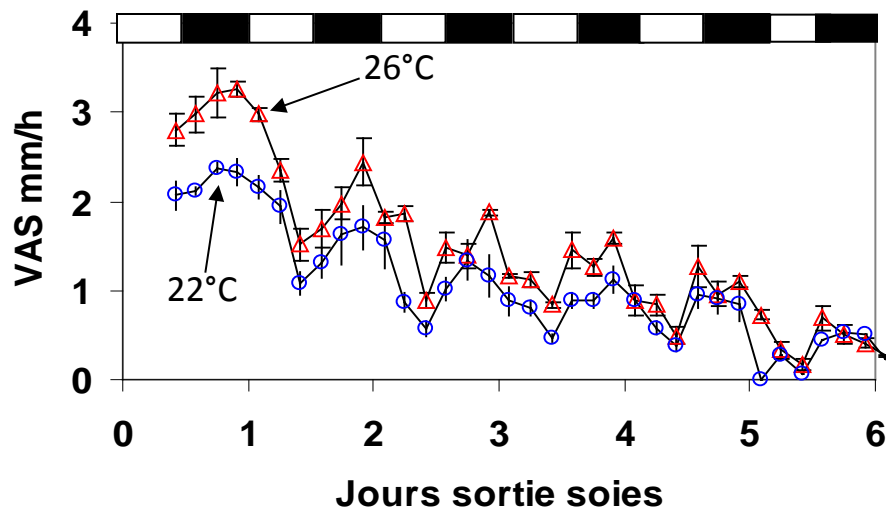


Enregistrement de la vitesse d'élongation des organes toutes les 15 minutes

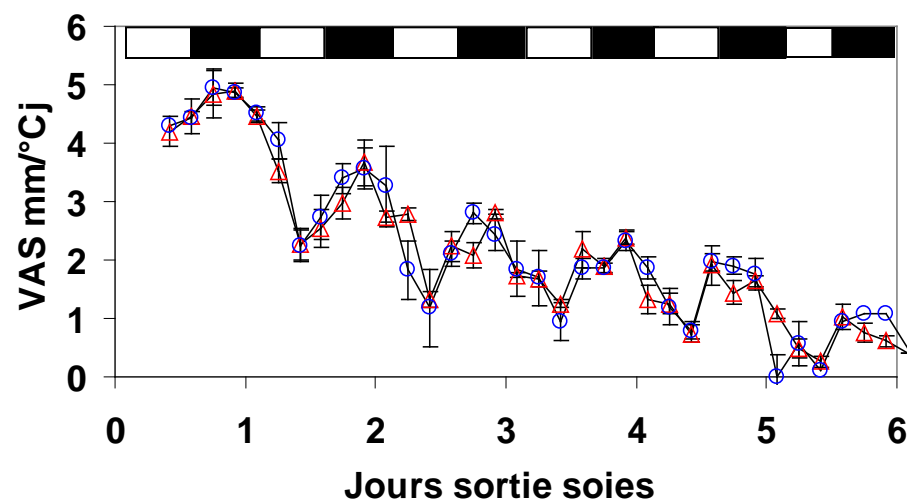
Fuad Hassan, 2006

Phénotyper la croissance des soies

Vitesse d'Allongement des Soies / temps calendaire



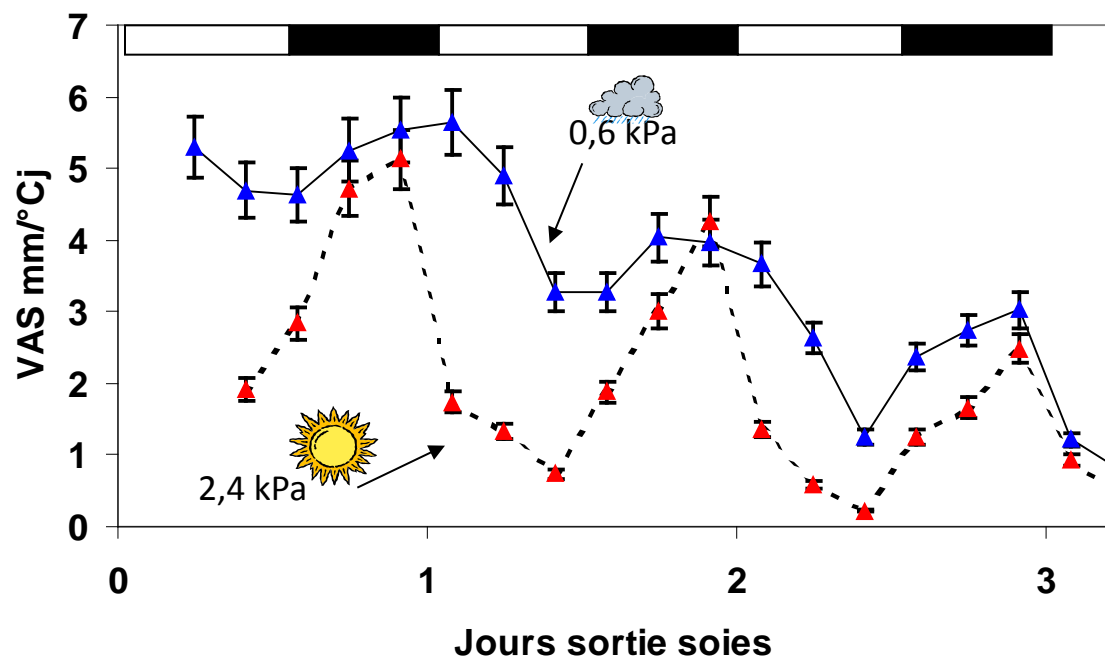
Vitesse d'Allongement des Soies / temps thermique



Une vitesse d'allongement des soies très proche entre expériences en exprimant la vitesse en temps thermique, indépendamment de la température

Fuad Hassan, 2006

Phénotyper la croissance des soies



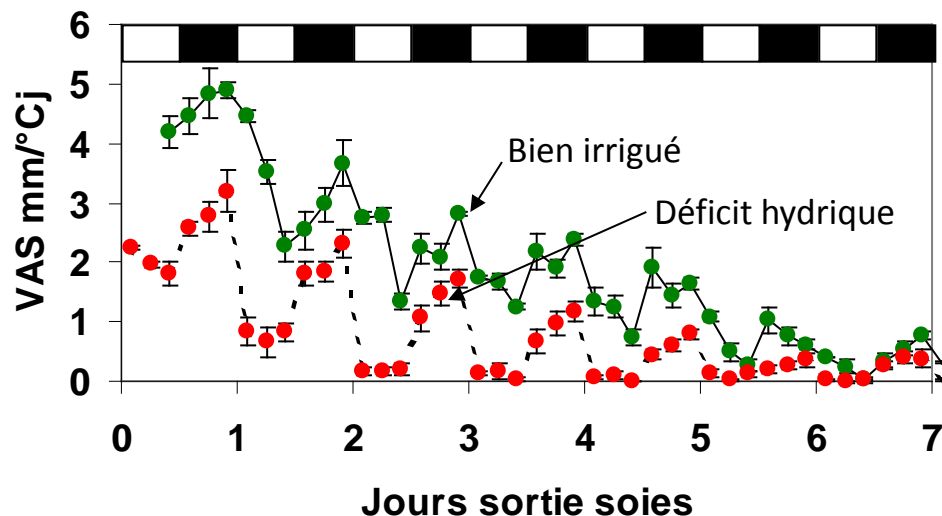
Diminution de la vitesse d'allongement des soies en période diurne

La vitesse diurne est d'autant plus faible que la demande évaporative est forte

Fuad Hassan, 2006

Phénotyper la croissance des soies

Effet de la contrainte hydrique édaphique sur la vitesse d'allongement des soies.



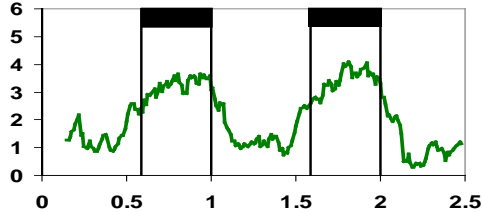
Réduction de vitesse le jour et la nuit

La réduction est plus forte le jour ; la vitesse diurne s'annule dès le 2ème jour

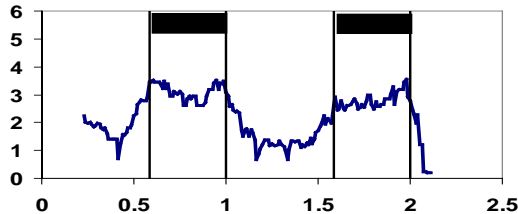
Fuad Hassan, 2006

Phénotyper la croissance des soies

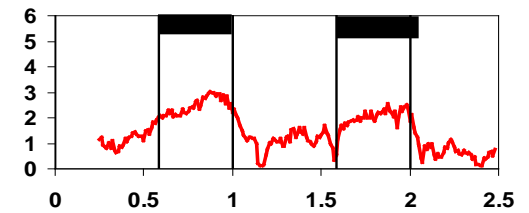
Témoin : $\Psi_s > -0.2$ Mpa



Déficit modéré : $-0.5 < \Psi_s < -0.3$ Mpa

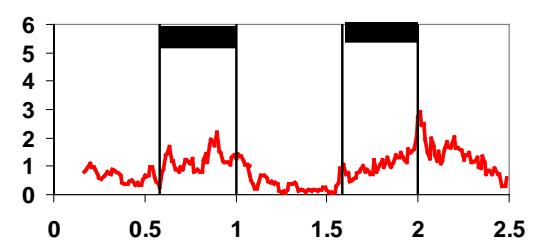
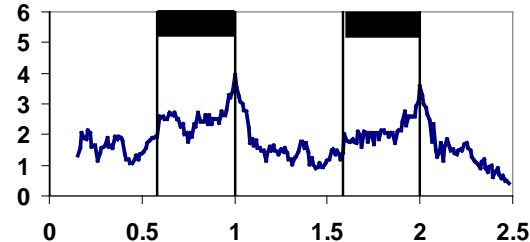
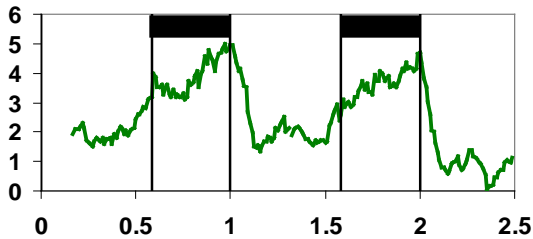


Déficit sévère : $-0.8 < \Psi_s < -0.6$ Mpa



Lignée 151: tolérante sur l'ASI et sur la croissance des soies

Vitesse d'élongation
des soies mm/°Cj



Nombre de jours après l'émergence des soies

Lignée 95: sensible sur l'ASI et sur la croissance des soies

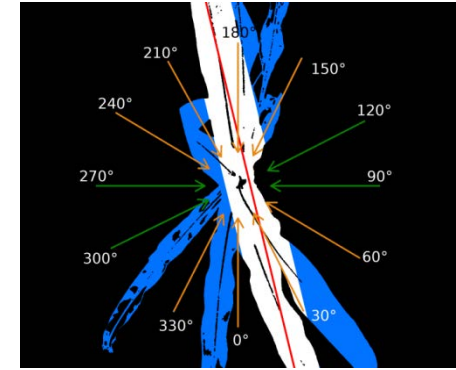
Réponse au déficit hydrique cohérente avec la réponse des feuilles et de l'ASI

Fuad Hassan, 2006

Phénotyper la durée de croissance des soies

Plateforme PhenoArch

Etape 1 : repérage automatisé de l'épi avant le début d'émergence des soies

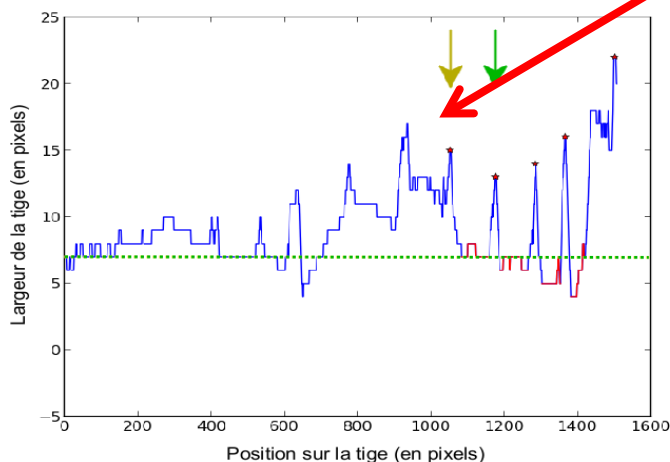
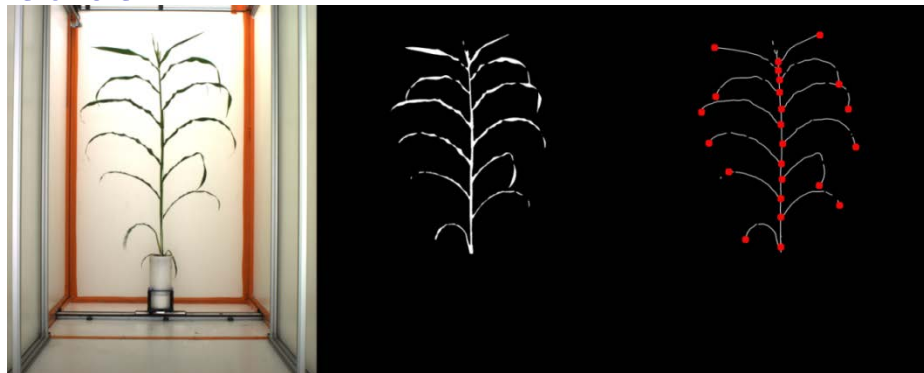


Brichet 2014

Phénotyper la durée de croissance des soies

Plateforme PhenoArch

Etape 1 : repérage automatisé de l'épi avant le début d'émergence des soies



Ici !

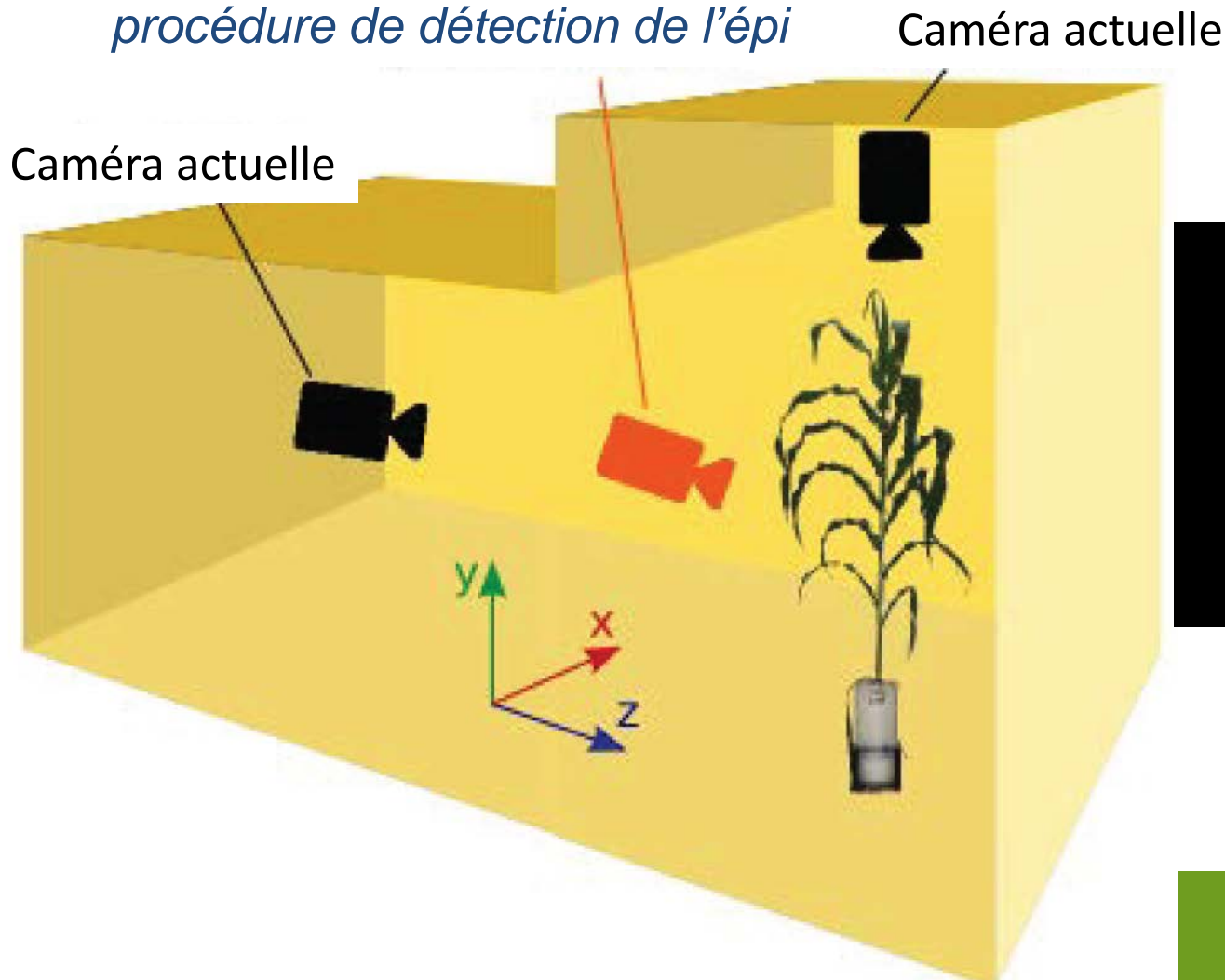
Renflement de la tige, suivi d'un rétrécissement

Détection dans 80 % des cas

Brichet 2014

Phénotyper la durée de croissance des soies

Etape 2 : pilotage d'une caméra mobile sur 3 axes x, y, z pour prendre un cliché de la zone d'intérêt repérée grâce à la procédure de détection de l'épi



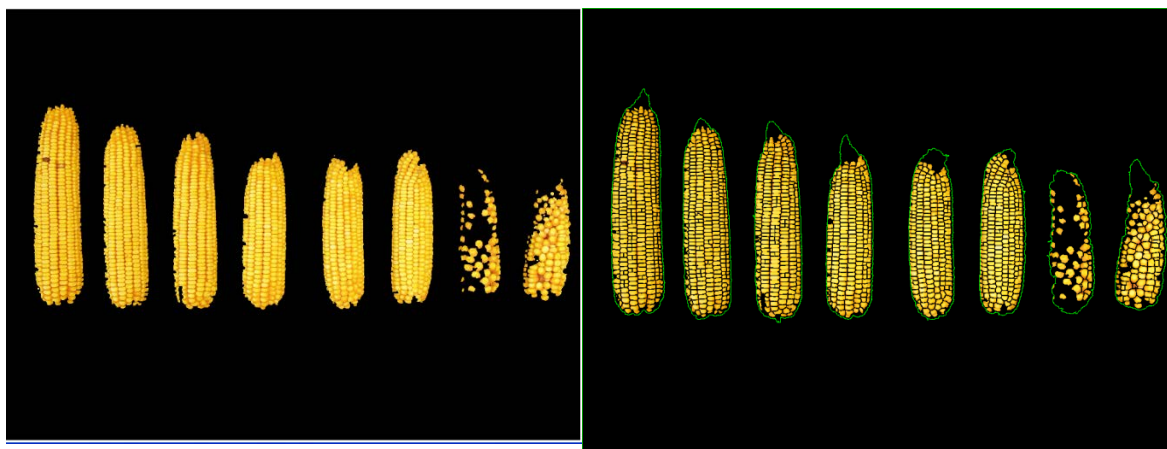
Brichet 2014

Phénotyper les épis



1) Original

2) Masque le fond



3) Masque les régions sans grain

4) Détection des grains et des contours de l'épi

*Analyse d'image des épis
à la récolte :
Comptage des grains
Dimensions de l'épi
Quantification des
« trous » (avortement)*

Fournier 2014

Phénotyper les épis



Zone sans soie émergée

Zone avec des soies émergées mais trop tard

Zone avec des grains

Analyse d'image de jeunes épis (15-25j après floraison)
Comptage des grains
Estimation nombre de soies
Quantification avortement apical

Oury 2015

Conclusions

La période de floraison est très sensible au déficit hydrique chez le maïs. Des avancées ont été faites pour caractériser la sensibilité de différents processus, dans différents organes, chez différents génotypes.

La caractérisation des réponses des plantes à l'environnement (sensibilité) requiert de mesurer ou estimer les conditions environnementales au voisinage des plantes/organes (t° organe, t° et humidité de l'air, dessèchement du sol...) ainsi que l'état hydrique et le stade de développement des organes (cf cours TD à venir).

Nouvelles pistes pour améliorer le maintien du rendement en déficit hydrique : analyse de la croissance foliaire et de la croissance reproductrice en plateformes et analyse de la cohérence avec le comportement au champ

Références bibliographiques des illustrations

- Araus JL, Serret MD, Edmeades G** (2012) Phenotyping maize for adaptation to drought. *Frontiers in Physiology* **3**: 305. doi: 310.3389/fphys.2012.00305.
- Arvalis** (2009) Maïs et développement durable. Une approche pluridisciplinaire à vocations culturelle, scientifique et pédagogique. Brochure 128p + DVD. Arvalis, Paris, France.
- Brichet N** (2014). Analyse d'image pour la détection d'organes spécifiques de plantes : l'épi de maïs au début de son développement. Mémoire M2 Université Montpellier, 38 p.
- Bruce WB, Edmeades GO, Barker TC** (2002) Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. *Journal of Experimental Botany* **53**: 13-25.
- Cheng PC, Greyson RI, Walden DB** (1983) Organ initiation and the development of unisexual flowers in the tassel and ear of *Zea mays*. *American Journal of Botany* **70**: 450-462.
- Edmeades GO, Bolanos J, Elings A, Ribaut JM, Banziger M, Westgate ME** (2000) The role and regulation of the anthesis-silking interval in maize. In ME Westgate, K Boote, eds, *Physiology and modeling kernel set in maize*, Vol 29. Crop Science Society of America, Madison, WI, USA, pp 43-73.
- Fonseca AE, Westgate ME** (2005) Relationship between desiccation and viability of maize pollen. *Field Crops Research* **94**: 114-125.
- Fuad-Hassan A** (2006) Analyse de la croissance des soies de plantes de maïs soumises à des déficits hydriques édaphiques et atmosphériques. Thèse de Doctorat Biologie Intégrative. ENSAM, Montpellier, France, 61 p.
- Hanway JJ, Ritchie SW** (1984). How a Corn Plant Develops: Special Report No. 48, Iowa State University Press, USA.
- Irish EE** (1997) Class II tassel seed mutations provide evidence for multiple types of inflorescence meristems in maize (*Poaceae*). *American Journal of Botany* **84**: 1502-1515.
- Ouattar S, Jones RJ, Crookston RK** (1987) Effect of Water Deficit during Grain Filling on the Pattern of Maize Kernel Growth and Development. *Crop Sci* **27**: 726-730.
- Oury V, Tardieu F, Turc O** (2015) Ovary apical abortion under water deficit is caused by changes in sequential development of ovaries and in silk growth rate in maize. *Soumis à Plant Physiology*.
- Ritter MK, Padilla CM, Schmidt RJ** (2002) The maize mutant barren stalk1 is defective in axillary meristem development. *American Journal of Botany* **89**: 203-210.
- Schooper JB, Lambert RJ, Vasilas BL, Westgate ME** (1987) Plant factors controlling seed set in maize. The influence of silk, pollen, and ear-leaf water status and tassel heat treatment at pollination. *Plant Physiology* **83**: 121-125.
- Welcker C, Boussuge B, Bencivenni C, Ribaut JM, Tardieu F** (2007) Are source and sink strengths genetically linked in maize plants subjected to water deficit? A QTL study of the responses of leaf growth and of Anthesis-Silking Interval to water deficit. *Journal of Experimental Botany* **58**: 339-349.
- Westgate ME, Boyer JS** (1986) Reproduction at low silk and pollen water potentials in maize. *Crop Science* **26**: 951-956.