

Les enjeux de la génétique pour l'adaptation au changement climatique



François TARDIEU *Directeur de recherche, laboratoire d'écophysiologie des plantes sous stress environnementaux, INRAE*

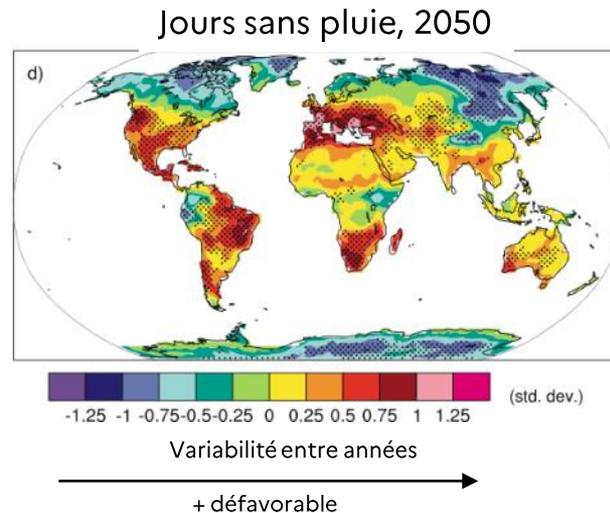


La génétique de la sécheresse dans son contexte

Impact de la sécheresse: combinaison de:

- Conditions climatiques (Météo variable entre années)
- Exposition (Agronomie, par ex position du cycle dans l'année)
- Vulnérabilité (Génétique : espèces et variétés)

Tardieu et al 2018, Ann Rev Plant Biol



IPCC (GIEC)

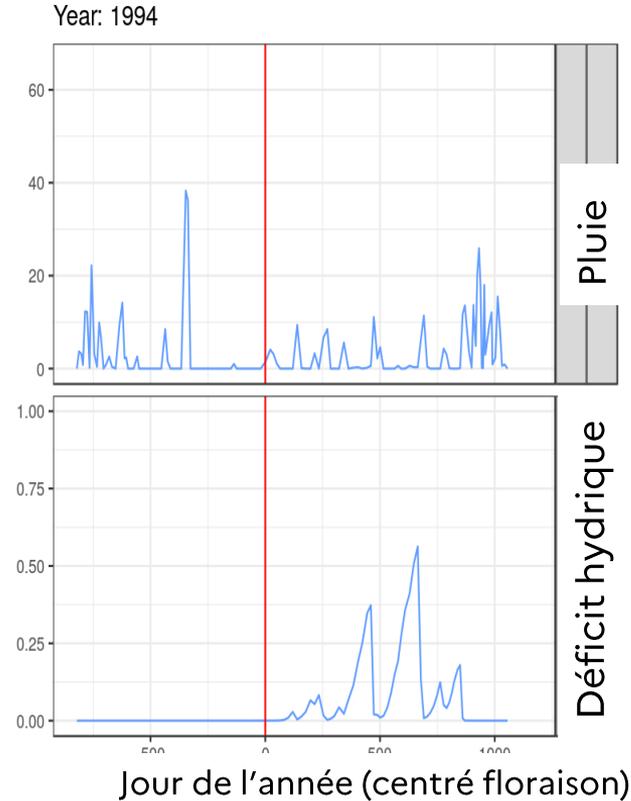
La génétique de la sécheresse: incertitude entre années

En un lieu donné, l'année peut être sèche, humide, chaude, fraîche...

Les variations interannuelles plus fortes que le changement climatique



P Casadebaig 2016 EJA

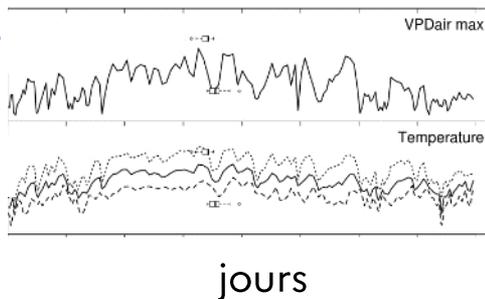


La génétique de la sécheresse: incertitude entre jours

Température, sécheresse de l'air et des plantes,
variables entre jours

Sécheresse air

Température



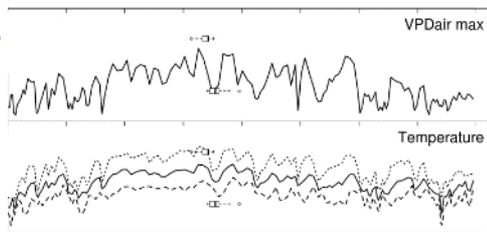
La génétique de la sécheresse: incertitude entre heures

Température, sécheresse de l'air et des plantes, variables entre jours

Chaque jour, chaque cellule va de 11 à 35°C de "humide" à "sec"

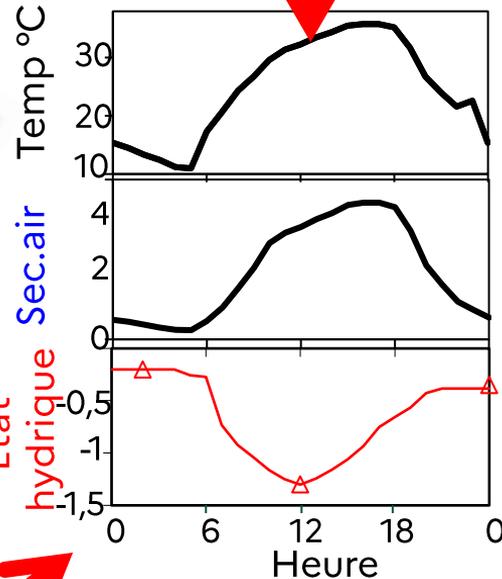


Sécheresse air



Température

jours



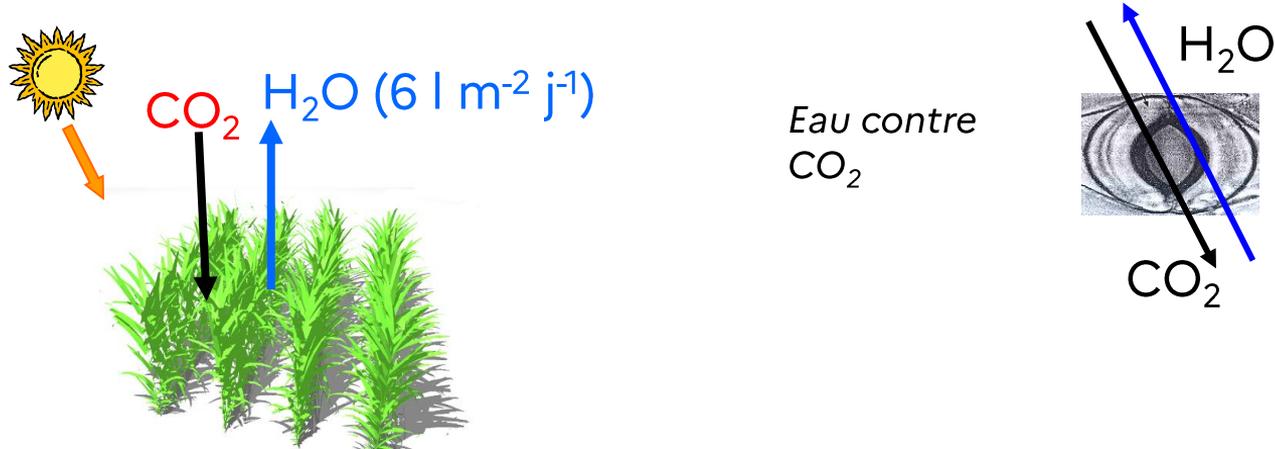
Caldeira et al 2014,
Nature Com



La génétique de la sécheresse: optimiser des contradictions

La génétique de la sécheresse: optimiser des contradictions

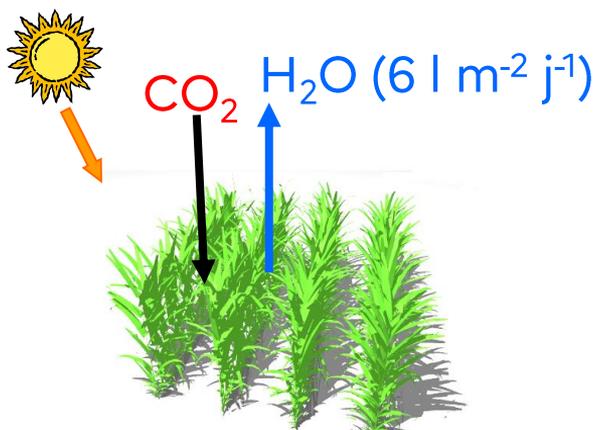
Quantité d'eau transpirée chaque jour = 100% poids de plante



Les stomates (trous dans les feuilles) servent à la fois à transpirer et à capter le gaz carbonique

La génétique de la sécheresse: optimiser des contradictions

Quantité d'eau transpirée chaque jour = 100% poids de plante



Les stomates (trous dans les feuilles) servent à la fois à transpirer et à capter le gaz carbonique
Pas de transpiration, pas de croissance

La génétique de la sécheresse: optimiser des contradictions



Survivre et récupérer



Résistance



Cultiver au bon moment
Désert d'Atacama après une pluie



Echappement



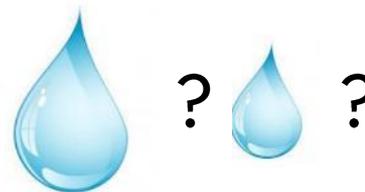
Economiser de l'eau
Un rang sur deux, Australie



Évitement



Obtenir le meilleur rendement possible
Optimiser risque vs rendement maximum



Produire quand même

La génétique peut beaucoup, mais pas tout à la fois...

Que faire ? Optimiser des contradictions



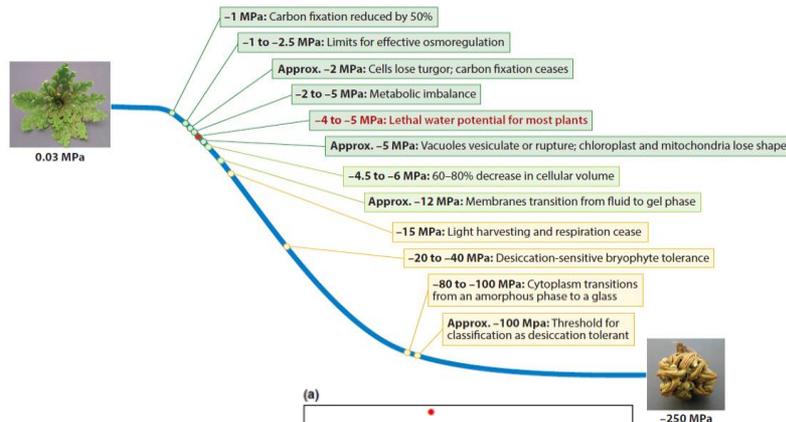
Survivre et récupérer
Gènes de résistance

Annual Review of Plant Biology

Desiccation Tolerance:
Avoiding Cellular Damage
During Drying and
Rehydration

Melvin J. Oliver,^{1,2} Jill M. Farrant,³
Henk W.M. Hilhorst,⁴ Sagadevan Mundree,⁵
Brett Williams,⁵ and J. Derek Bewley⁶

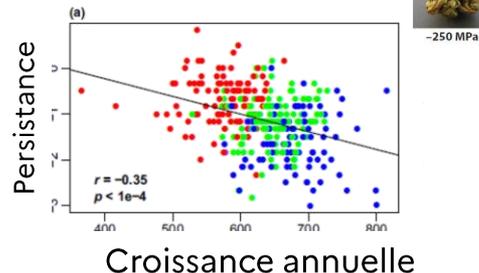
Annu. Rev. Plant Biol. 2020. 71:435–60



To grow or survive: Which are the strategies of a perennial grass to face severe seasonal stress?

Thomas Keep¹ | Jean-Paul Sampoux¹ | Philippe Barre¹ |
José-Luis Blanco-Pastor¹ | Klaus J. Dehmer² | Jean-Louis Durand¹ |
Matt Hegarty³ | Thomas Ledauphin¹ | Hilde Muyile⁴ | Isabel Roldán-Ruiz⁴ |
Tom Ruttink⁴ | Fabien Surault¹ | Evelin Willner² | Florence Volaire⁵

Functional Ecology. 2021;35:1145–1158.



Une utilisation intensive des biotech, NBT: pas de vraies limitations
Une utilité agronomique/écologique
PAS pour augmenter les rendements des cultures en sécheresse !

Que faire ? Optimiser des contradictions

Cultiver au bon moment
Désert d'Atacama après une pluie



Les plantes poussent rapidement après la pluie produisent des grains qui germent à la prochaine pluie (pas "résistantes")

"Echappement du stress"

Equivalent en génétique: fournir aux agriculteurs un choix de durées de cycle et des outils pour ce choix

PNAS

Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time

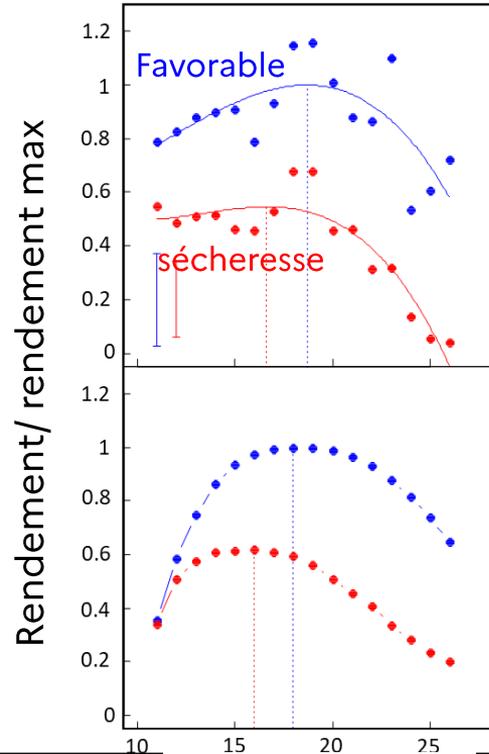
Boris Parent^a, Margot Leclere^{a,1}, Sébastien Lacube^a, Mikhail A. Semenov^b, Claude Welcker^a, Pierre Martre^a, and François Tardieu^{a,2}

10642–10647 | PNAS | October 16, 2018 | vol. 115 | no. 42

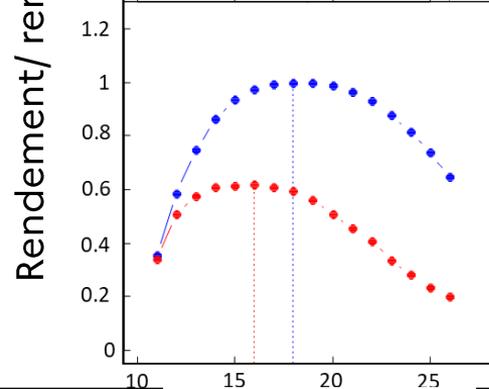
Que faire ? Optimiser des contradictions Cultiver au bon moment

On perd si le cycle est trop court (photosynthèse cumulée plus faible)
si le cycle est trop long (fin du cycle en sécheresse/excès d'eau)

Expériences



Optimisation

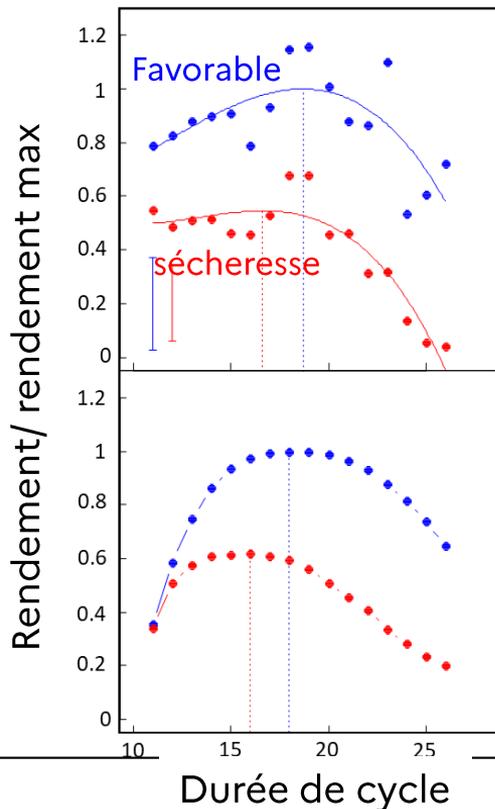


Durée de cycle

Que faire ? Optimiser des contradictions Cultiver au bon moment

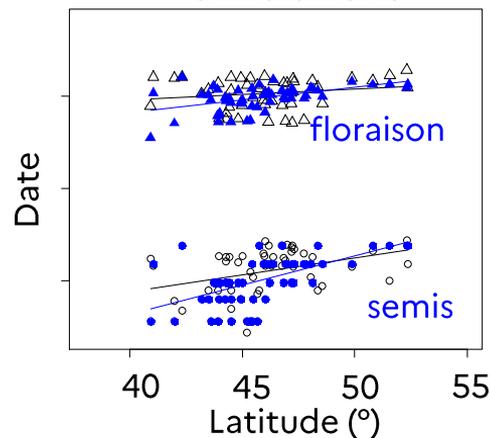
On perd si le cycle est trop court (photosynthèse cumulée plus faible)
si le cycle est trop long (fin du cycle en sécheresse/excès d'eau)

Expériences



Les pratiques des agriculteurs
sont proches de l'optimum

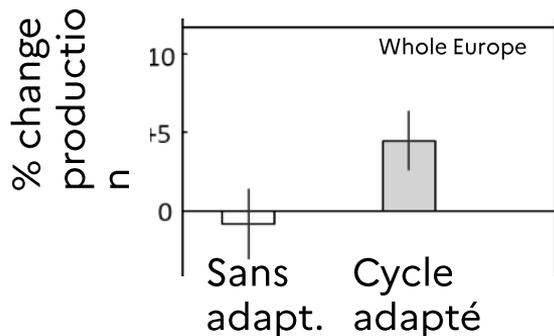
Bases de données
Simulations



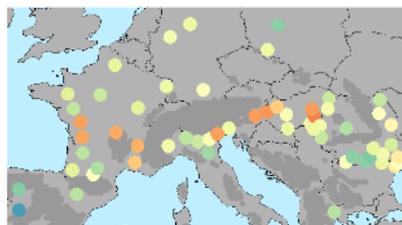
Que faire ? Optimiser des contradictions Cultiver au bon moment

Changement climatique : calcul en 60 champs 30 ans 600 variétés

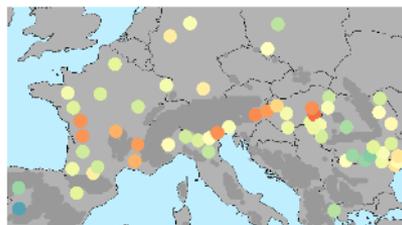
Les rendements baissent si on suppose que les génotypes seront les mêmes
maintenus si on suppose que les agriculteurs choisiront des génotypes adaptés,
avec les mêmes règles qu'actuellement



actuel
1980-2010



2050
30 ans
RCP4.5



Rendement (t ha⁻¹)



La variabilité génétique de la floraison participe à l'adaptation au changement climatique : sélection génomique et NBT

Que faire ? Optimiser des contradictions Economiser de l'eau



Economiser de l'eau
Un rang sur deux, Australie

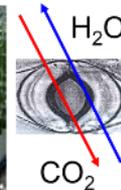
+ On garde de l'eau pour la fin du cycle
- On perd du rendement

Equivalent en génétique: Efficience d'utilisation de l'eau

PNAS

Reduced nighttime transpiration is a relevant breeding target for high water-use efficiency in grapevine

Aude Coupel-Ledru^{a,1}, Eric Lebon^b, Angélique Christophe^a, Agustina Gallo^a, Pilar Gago^b, Florent Pantin^a, Agnès Doligez^c, and Thierry Simonneau^{a,1}

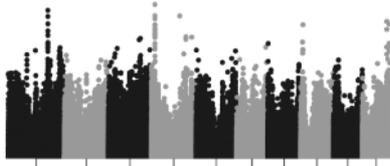


Des genes pour une faible transpiration nocturne
(on conserve de l'eau pour la fin du cycle)
Gènes d'intérêt (NBT)

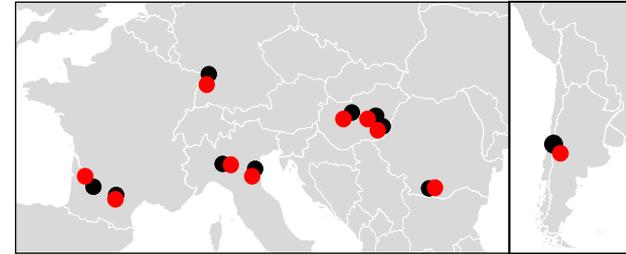
Que faire ? Optimiser des contradictions Augmenter les rendements

Que faire ? Optimiser des contradictions Augmenter les rendements

Génétique d'association



16 champs
X
2 ans
X
Irrigué ou non

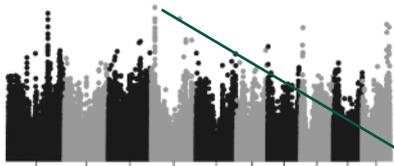


Chaque pic, une région du génome
qui contrôle le rendement

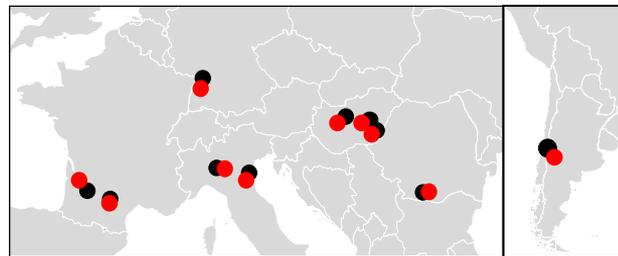


Que faire ? Optimiser des contradictions Augmenter les rendements

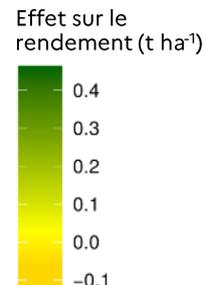
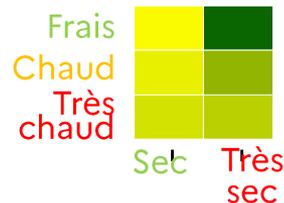
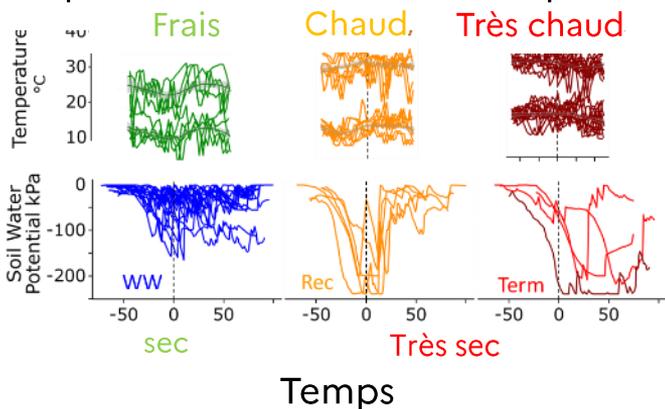
Génétique d'association



16 champs
X
2 ans
X
Irrigué ou non

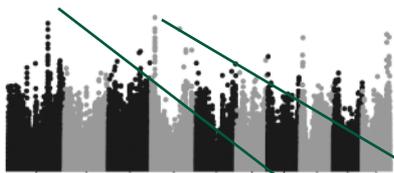


Chaque pic, une région du génome qui contrôle le rendement, positif ou négatif suivant le scénario

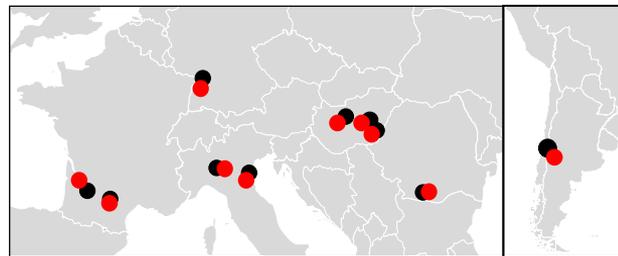


Que faire ? Optimiser des contradictions Augmenter les rendements

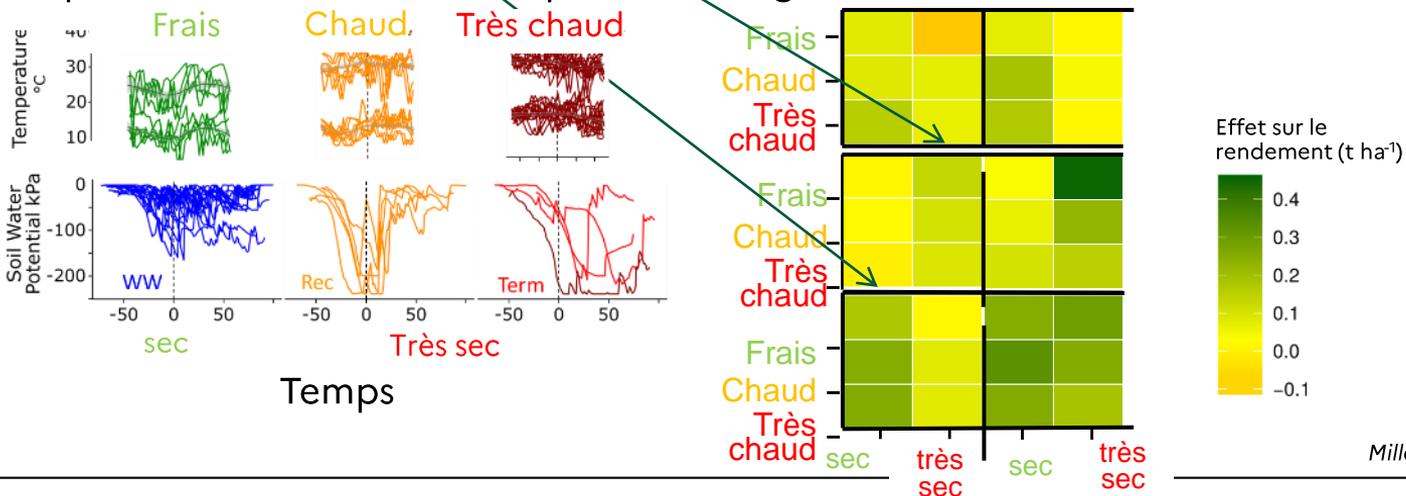
Génétique d'association



16 champs
X
2 ans
X
Irrigué ou non



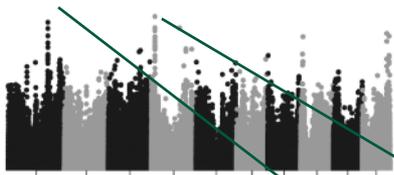
Chaque pic, une région du génome qui contrôle le rendement, positif ou négatif suivant le scénario



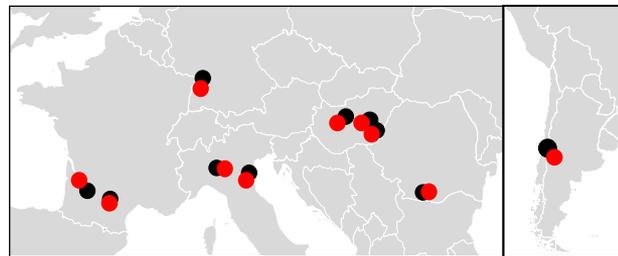
Millet et al. 2016 Plant Phys

Que faire ? Optimiser des contradictions Augmenter les rendements

Génétique d'association



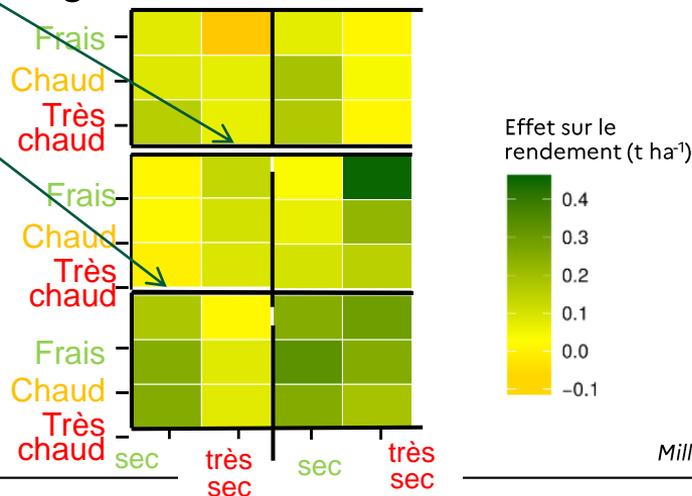
16 champs
X
2 ans
X
Irrigué ou non



Chaque pic, une région du génome qui contrôle le rendement, positif ou négatif suivant le scenario



Les formes de gènes (allèles) favorables pour un type de sécheresse peuvent être défavorables pour un autre



Millet et al. 2016 Plant Phys

Que faire ? Optimiser des contradictions Augmenter les rendements

Comment les sélectionneurs ont géré cette contradiction ? Sélection sur le rendement

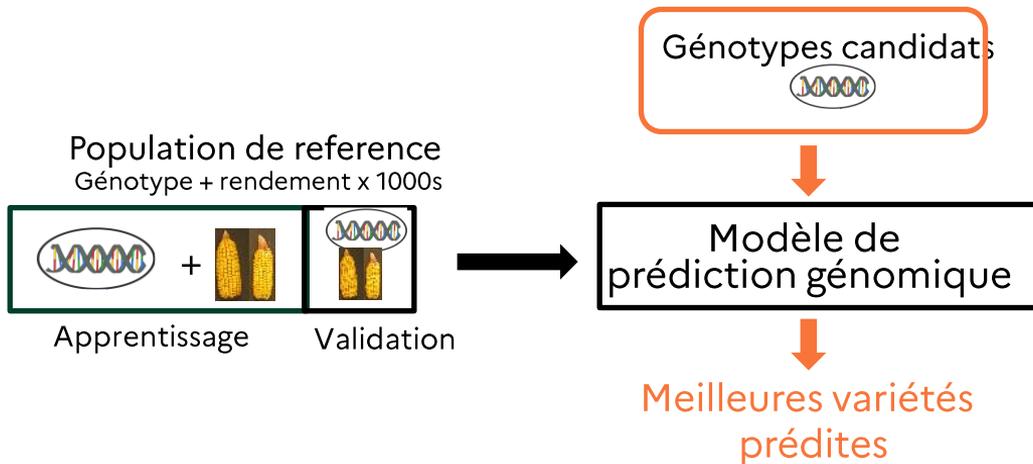
1. Mesure du rendement dans de grands réseaux d'essais (y compris en sécheresse)

Que faire ? Optimiser des contradictions Augmenter les rendements

Comment les sélectionneurs ont géré cette contradiction ? Sélection sur le rendement

1. Mesure du rendement dans de grands réseaux d'essais (y compris en sécheresse)

2. Prédiction génomique : quelles meilleures combinaisons de formes de genes (alleles) ?

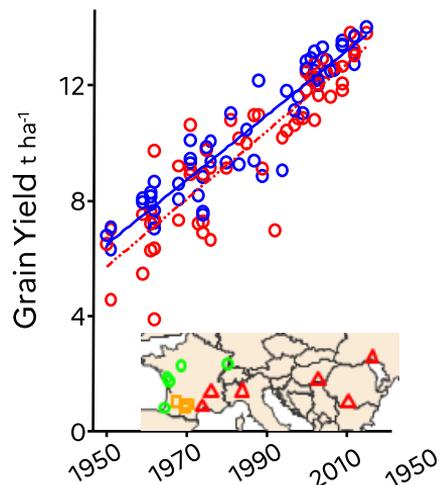


3. Identifications des meilleures variétés dans de grands réseaux d'essais

Que faire ? Optimiser des contradictions Augmenter les rendements

Comment les sélectionneurs ont géré cette contradiction ?

Les rendements ont augmenté rapidement
100 q/ha/année
75% du progrès des rendements agriculteurs



Année de commercialisation

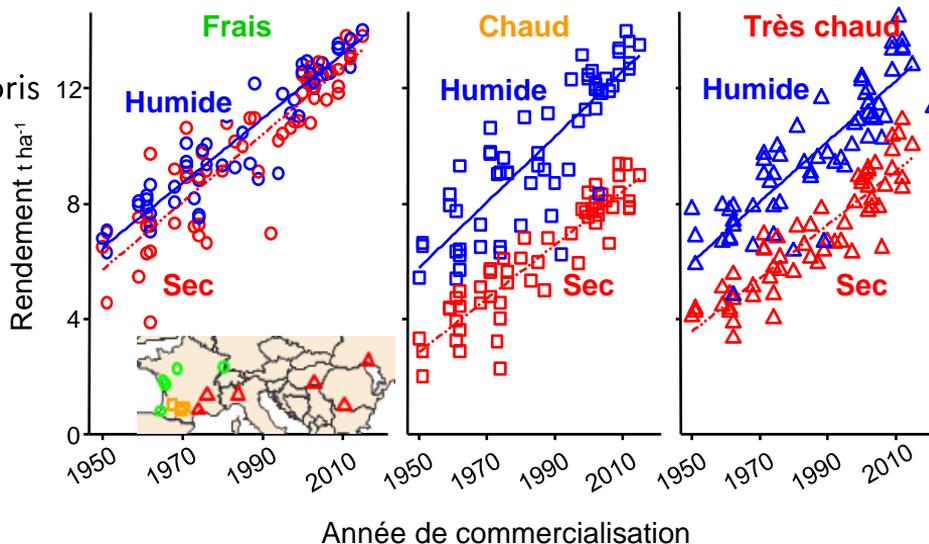
Que faire ? Optimiser des contradictions Augmenter les rendements

Comment les sélectionneurs ont géré cette contradiction ?

Les rendements ont augmenté rapidement
100 q/ha/année
75% du progrès des rendements agriculteurs



Progrès dans TOUTES les
Conditions testées, y compris
les plus défavorables



**La sélection a produit des
variétés efficaces pour
tous les milieux**

**Tolérance à la sécheresse ? Oui: les rendements augmentent en conditions sèches
Non: pas spécifiquement pour les sécheresses futures**

Que faire ? Optimiser des contradictions

Sélection indirecte pour des caractères bien liés au rendement

Phénologie, architecture, nb de grains ont un effet stable sur le rendement

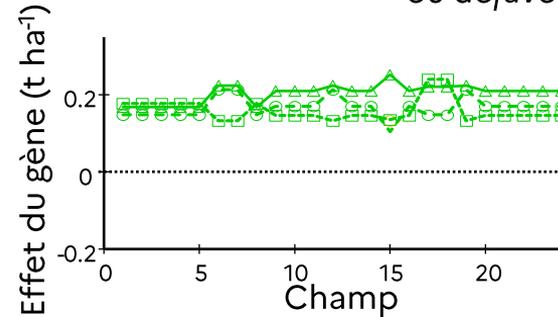
Frais
 Chaud
 T. chaud
 Frais
 Chaud
 T. chaud
 Frais
 Chaud
 T. chaud

Phénologie
Architecture



Effect of B73 allele (t ha⁻¹)

Effet d'une forme de genes (allele) sur le rendement en conditions favorable ou défavorables

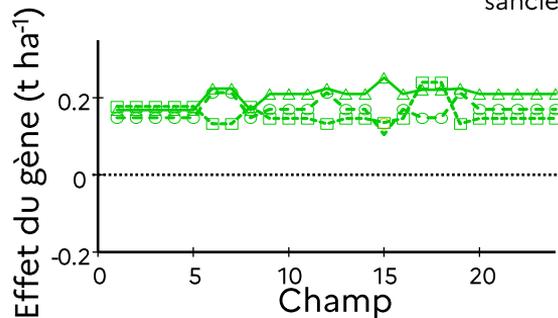
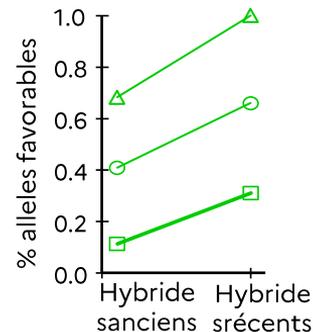
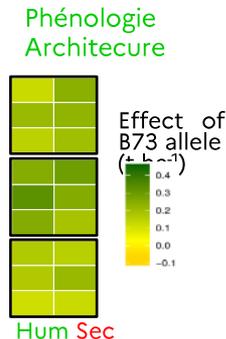


Que faire ? Optimiser des contradictions

Sélection indirecte pour des caractères bien liés au rendement

Phénologie, architecture, nb de grains ont un effet stable sur le rendement
 → Ils ont été améliorés
 (plus de formes favorable des genes)

Frais
Chaud
T. chaud
Frais
Chaud
T. chaud
Frais
Chaud
T. chaud

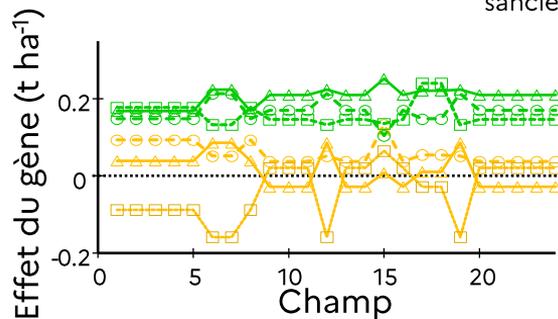
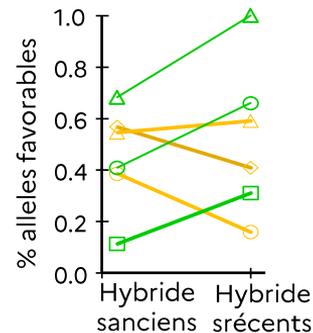
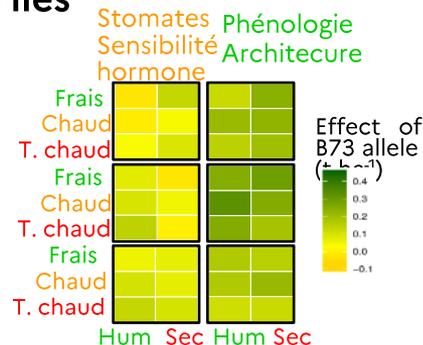


Que faire ? Optimiser des contradictions Augmenter les rendements

Sélection indirecte pour des caractères bien liés au rendement

Phénologie, architecture, nb de grains ont un effet stable sur le rendement
 → Ils ont été améliorés
 (plus de formes favorable des genes)

Hormones, controle de la transpiration ou de la croissance ont un effet positif dans certains champs seulement
 → Ils n'ont pas été améliorés



Tolérance à la sécheresse ? Oui: les rendements augmentent en conditions sèches
Non: pas spécifiquement pour les sécheresses futures

Que faire ? Optimiser des contradictions Améliorer les réponses

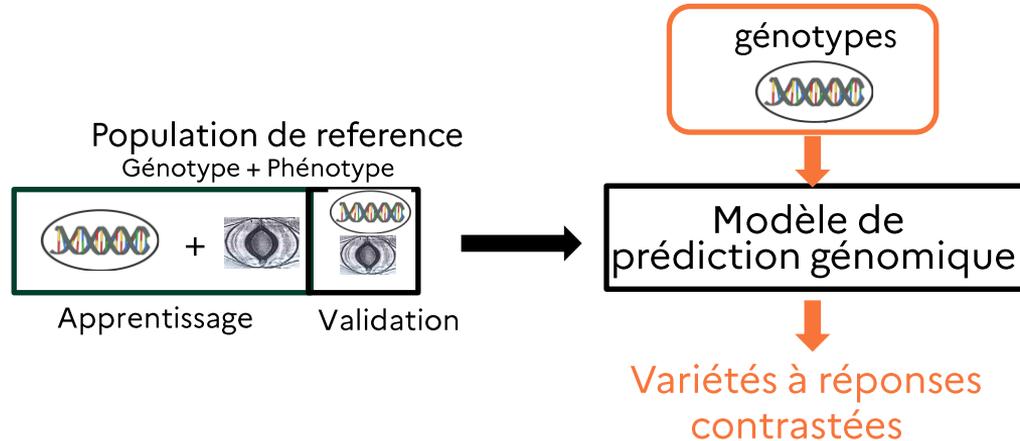
Caractériser des centaines de génotypes sur leurs réponses adaptatives

Que faire ? Optimiser des contradictions

Améliorer les réponses
Caractériser des centaines de génotypes sur leurs réponses adaptatives

1. Mesure des réponses (dispositifs de phénotypage)

2. Prédiction génomique :
quelles combinaisons de formes de genes (alleles) pour quelles réponses ?



3. Quelles variétés où (modélisation et essais)

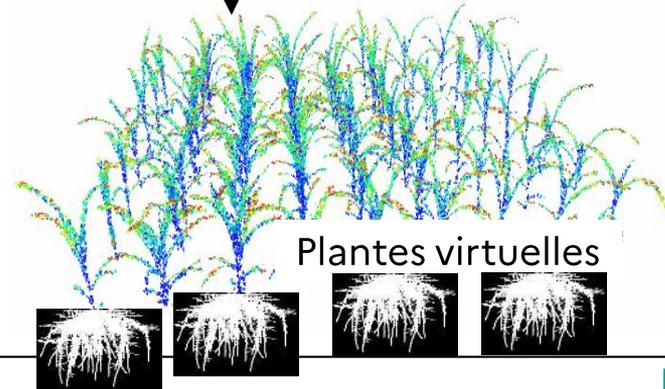


Que faire ? Optimiser des contradictions Améliorer les réponses

Caractériser des centaines de génotypes sur leurs réponses



... and watering system in order to work with more plants and acquire much more data



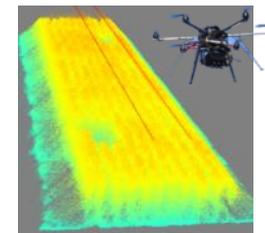
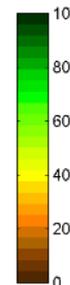
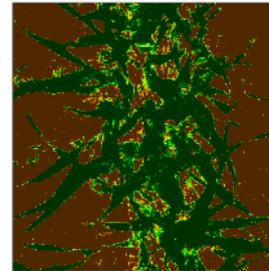
Que faire ? Optimiser des contradictions Améliorer les réponses

Caractériser des centaines de génotypes sur leurs réponses

Champ



Contrôle puie et CO₂



Que faire ? Optimiser des contradictions Améliorer les réponses

Prédiction génomique et modélisation

Millet et al 2019 Nature Genetics

Des combinaisons d'allèles pour chaque scenario climatique (present/futur)

1. Stades du cycle végétatif, 248 variétés, plateforme



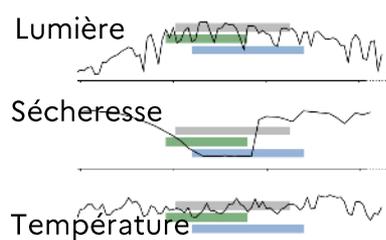

Temps corrigé par la température ('degrés jours')

2. Réseaux de capteurs :
Prévoir les stades de chaque variété dans chaque champ

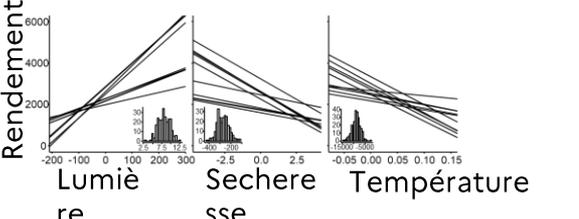
Lumière

Sécheresse

Température




3. Courbes de réponse aux conditions



Rendement

Lumière

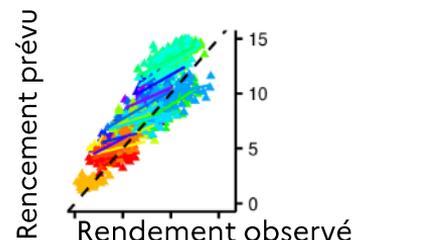
Sécheresse

Température

4. Rendement, 25 champs, 248 variétés

$$GY_{ij} = (\mu + e_j + g_i + \sum_{l=1}^s \beta_{l,i} cov_{l,i,j}) \times GW_i$$

5. Prédiction génomique



Rendement prévu

Rendement observé

100s variétés, 100s champs, 30s d'années

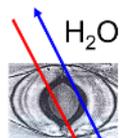
Que faire ? Conclusion



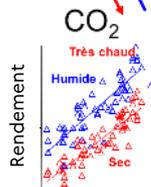
Survivre et récupérer
Paturages, couvertures



Cultiver au bon moment
Durée cycle, date semis

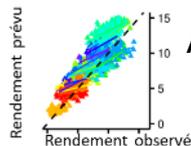


Economiser de l'eau
Pour la fin du cycle



Augmenter les rendements partout

Année de commercialisation



Améliorer les réponses à la sécheresse
Quelles variétés pour le changement climatique

Des perspectives larges
Pour la survie, pas pour les rendements !

Organiser/étendre la durée de floraison
Prédire où et quand les bons allèles de floraison
(prediction génomique et modélisation)

Régions génomiques pour le contrôle de la transpiration

Sélectionner pour le rendement,
y compris en conditions sèches
(sélection génomique)

Phénotypage
Prédiction génomique des réponses
Prédire où et quand les bons allèles (modélisation)

La génétique peut beaucoup, mais pas tout à la fois...



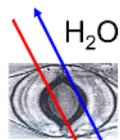
Survivre et récupérer
Paturages, couvertures

Des perspectives larges
Pour la survie, pas pour les rendements !



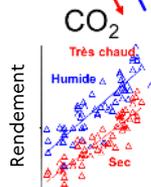
Cultiver au bon moment
Durée cycle, date semis

Organiser/étendre la durée de floraison
Prédire où et quand les bons allèles de floraison
(prédiction génomique et modélisation)



Economiser de l'eau
Pour la fin du cycle

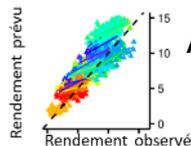
Régions génomiques pour le contrôle de la
transpiration



Augmenter les
rendements partout

Sélectionner pour le rendement,
y compris en conditions sèches
(sélection génomique)

Année de commercialisation



Améliorer les réponses à la
sécheresse
Quelles variétés pour le changement
climatique

Phénotypage
Prédiction génomique des réponses
Prédire où et quand les bons allèles (modélisation)