



**HAL**  
open science

## **Etude des mélanges de variétés de blé tendre avec une approche interdisciplinaire entre expérimentation au champ et modélisation mécaniste**

Meije Gawinowski, Jérôme Enjalbert, Paul-Henry P.-H. Cournède, Timothée Flutre

### ► **To cite this version:**

Meije Gawinowski, Jérôme Enjalbert, Paul-Henry P.-H. Cournède, Timothée Flutre. Etude des mélanges de variétés de blé tendre avec une approche interdisciplinaire entre expérimentation au champ et modélisation mécaniste. ECOScience, Mar 2023, Palaiseau, France. <hal-04936903>

**HAL Id: hal-04936903**

**<https://hal.science/hal-04936903v1>**

Submitted on 9 Feb 2025

**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.



HAL Authorization

# Etude des mélanges de variétés de blé tendre avec une approche interdisciplinaire entre expérimentation au champ et modélisation mécaniste

Meije Gawinowski<sup>1,2,3</sup>, Jérôme Enjalbert<sup>1</sup>, Paul-Henry Cournède<sup>2</sup>,  
Timothée Flutre<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, INRAE, CNRS, AgroParisTech, GQE - Le Moulon, 91190 Gif-sur-Yvette, France

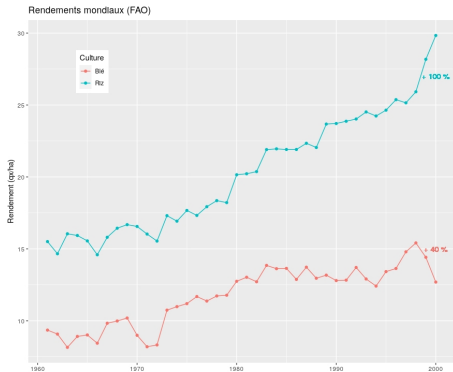
<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Lab MICS, 91190 Gif-sur-Yvette, France

<sup>3</sup> Université de Paris

# La Révolution Verte

## Augmentation des rendements

- Sélection
- Intrants de synthèse
- Mécanisation, irrigation



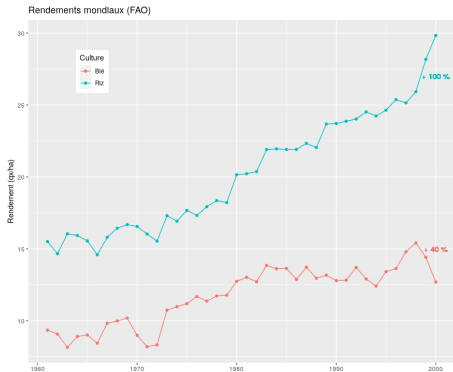
# La Révolution Verte

## Augmentation des rendements

- Sélection
- Intrants de synthèse
- Mécanisation, irrigation

## Conséquences

- Homogénéisation du paysage
- Perte d'agrobiodiversité
- Pollution → biodiversité, environnement, santé humaine



# Stagnation des rendements

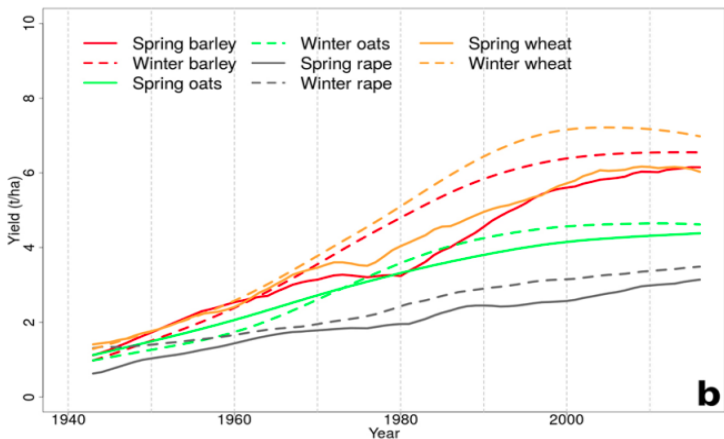


Figure issue de [Schauberger et al. \(2018\)](#)

# Agroécologie

- **Agroécologie** : maximisation des processus écologiques pour minimiser l'utilisation d'intrants

# Agroécologie

- **Agroécologie** : maximisation des processus écologiques pour minimiser l'utilisation d'intrants
- **Diversification spatio-temporelle** : rotation d'espèces, mosaïques paysagères, mélanges de variétés et d'espèces, agroforesterie

# Agroécologie

- **Agroécologie** : maximisation des processus écologiques pour minimiser l'utilisation d'intrants
- **Diversification spatio-temporelle** : rotation d'espèces, mosaïques paysagères, mélanges de variétés et d'espèces, agroforesterie
- Importance des interactions plante-plante dans la **diversification intra-parcelle**
  - négatives → compétition
  - positives → complémentarité et facilitation

# Agroécologie

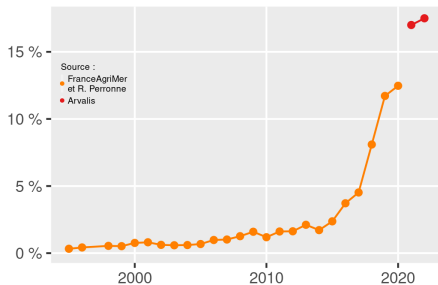
- **Agroécologie** : maximisation des processus écologiques pour minimiser l'utilisation d'intrants
- **Diversification spatio-temporelle** : rotation d'espèces, mosaïques paysagères, mélanges de variétés et d'espèces, agroforesterie
- Importance des interactions plante-plante dans la **diversification intra-parcelle**
  - négatives → compétition
  - positives → complémentarité et facilitation
- Focus ici sur les **mélanges de variétés**
  - cas d'étude : blé tendre d'hiver

# Les mélanges de variétés de blé

- 17.5 % de la surface cultivée de blé en France en 2022

## Mélanges de blé tendre en France

en % de la surface totale semée avec cette espèce

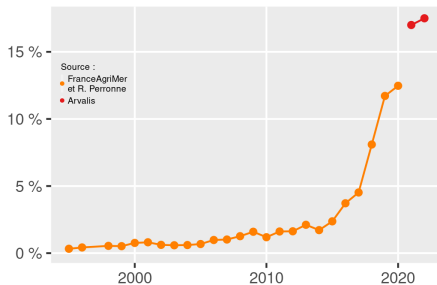


# Les mélanges de variétés de blé

- 17.5 % de la surface cultivée de blé en France en 2022
- Peu de règles d'assemblage
  - hors les résistances aux maladies fongiques

## Mélanges de blé tendre en France

en % de la surface totale semée avec cette espèce

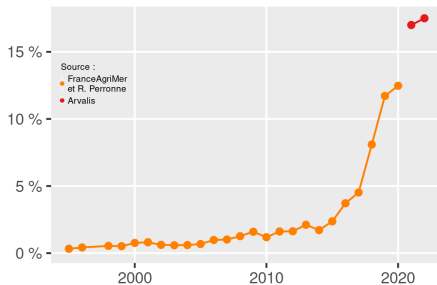


# Les mélanges de variétés de blé

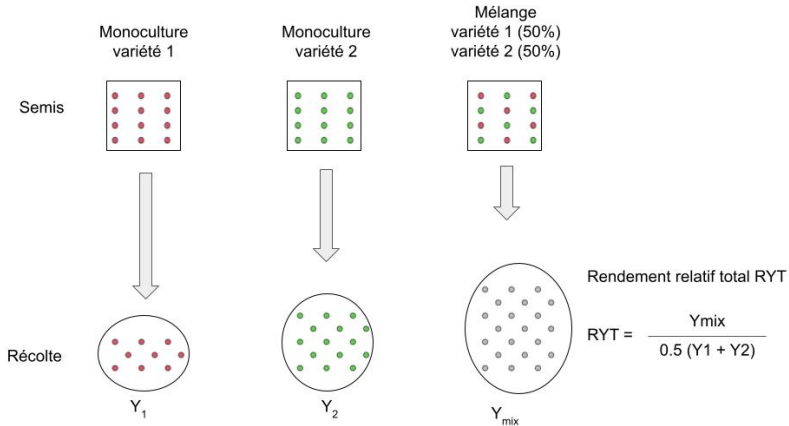
- 17.5 % de la surface cultivée de blé en France en 2022
- Peu de règles d'assemblage
  - hors les résistances aux maladies fongiques
- Mélanges difficiles à étudier
  - explosion combinatoire
  - distinction difficile des variétés

## Mélanges de blé tendre en France

en % de la surface totale semée avec cette espèce



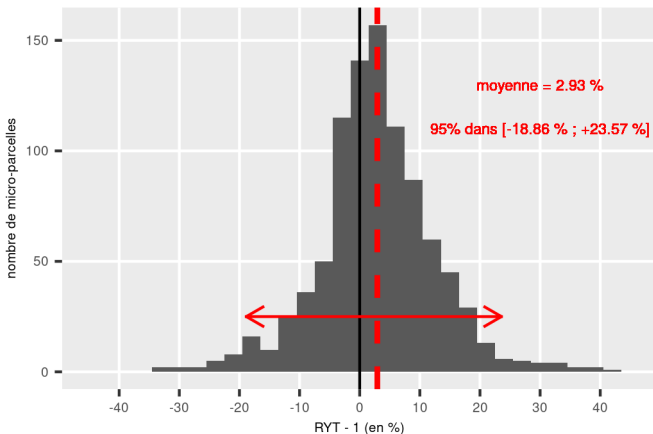
# Principe du rendement relatif total



# Distribution du rendement relatif total

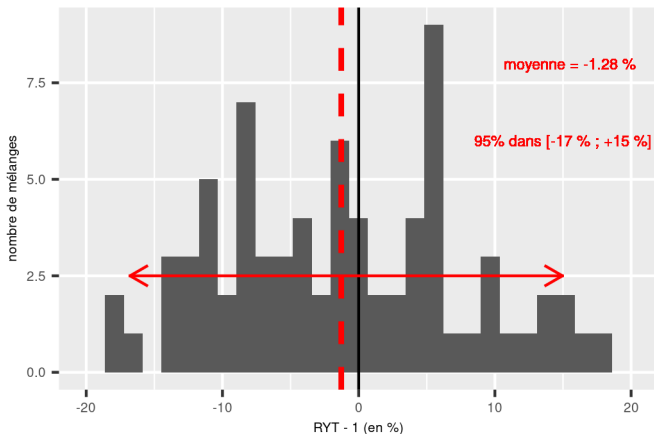
Méta-analyse sur les mélanges de variétés de blé (Borg et al. 2018) :

- RYT : moyenne  $> 1$  mais large variance



# Distribution du rendement relatif total

Variance large également pour un même environnement, ex. essai de 75 mélanges de blé tendre d'hiver au Moulon en 2014-2015 (Forst 2018) :



# Causes possibles de la large variance du RYT

Rendement observé  
du mélange

versus  
↔

Rendement attendu à partir  
des proportions au semis  
et du rendement des monocultures

# Causes possibles de la large variance du RYT

Rendement observé  
du mélange

versus  
↔

Rendement attendu à partir  
des proportions au semis  
et du rendement des monocultures

Différences possibles :

- de proportions variétales entre semis et récolte
- de rendement par variété entre monoculture et mélange

# Causes possibles de la large variance du RYT

Rendement observé  
du mélange

versus  
↔

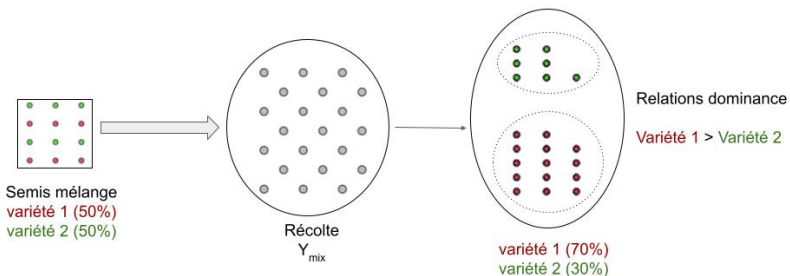
Rendement attendu à partir  
des proportions au semis  
et du rendement des monocultures

Différences possibles :

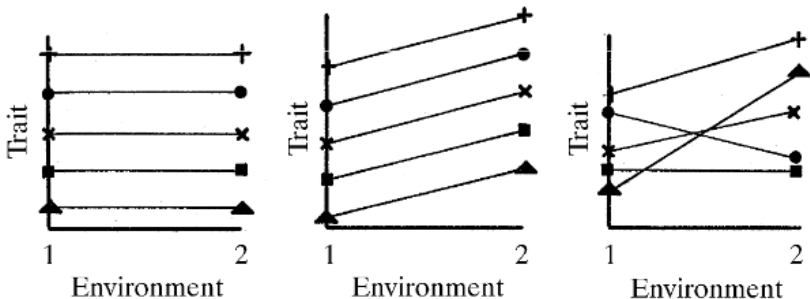
- de proportions variétales entre semis et récolte
- de rendement par variété entre monoculture et mélange

**Hypothèse** : ces différences sont causées par les processus éco-physiologiques sous-tendant les interactions plante-plante

# Changements de proportions variétales



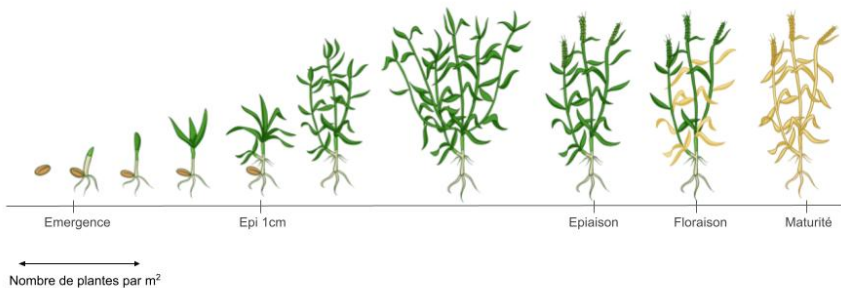
# Plasticité phénotypique



Source : [Guntrip & Sibly \(1998\)](#)

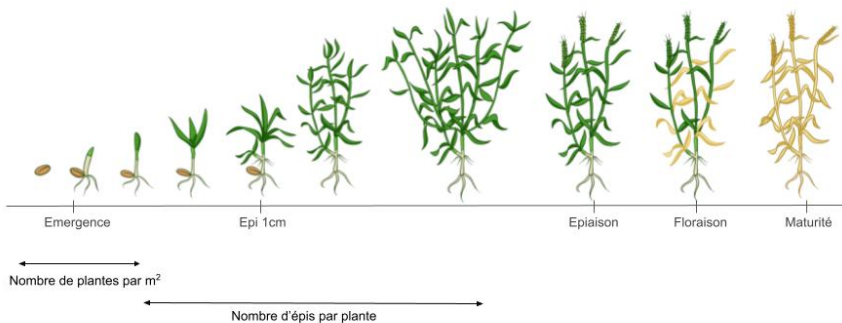
# Les composantes du rendement du blé

Rendement = densité plantes x #épis/plante x #grains/épi x poids grain



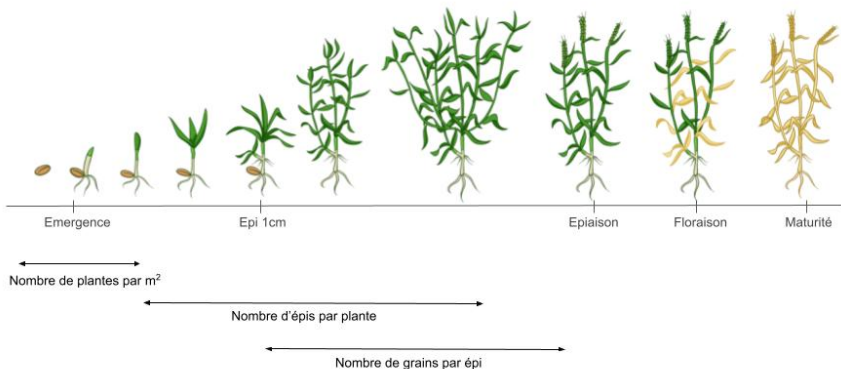
# Les composantes du rendement du blé

Rendement = densité plantes x #épis/plante x #grains/épi x poids grain



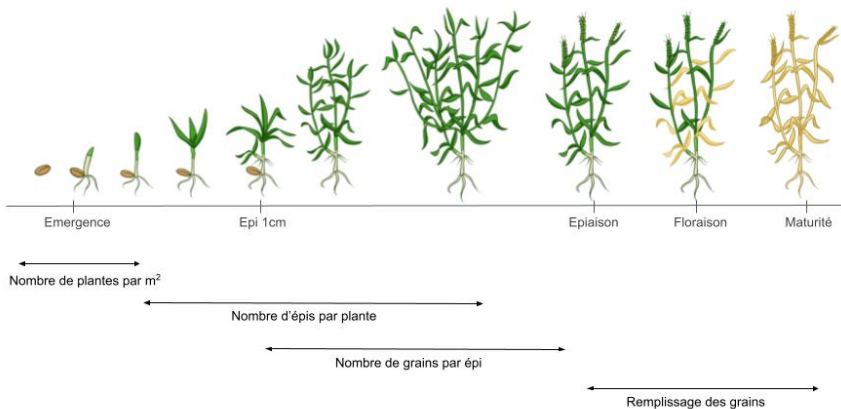
# Les composantes du rendement du blé

Rendement = densité plantes x #épis/plante x #grains/épi x poids grain

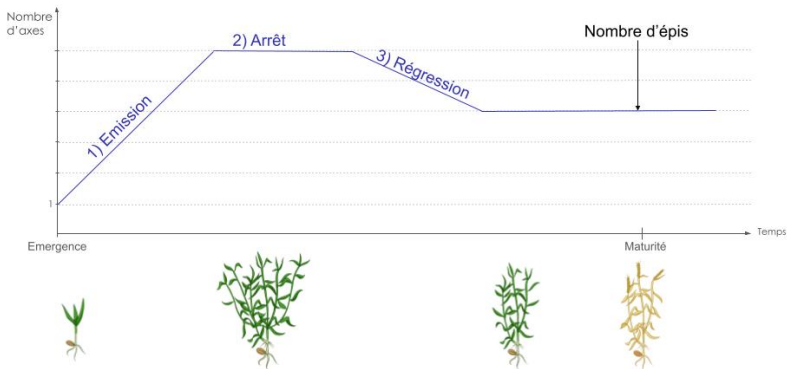


# Les composantes du rendement du blé

Rendement = densité plantes x #épis/plante x #grains/épi x poids grain



# Dynamique de tallage



→ Focus sur la compétition pour la lumière et son effet sur le tallage en conditions conventionnelles

# Problématique

Comprendre la performance des mélanges de variétés à partir de l'évolution des proportions variétales entre le semis et la récolte en se focalisant sur la compétition pour la lumière :

- Quels traits sont importants pour la performance des mélanges ?
- Quelle est l'importance de la plasticité phénotypique pour ces traits et comment est-elle modélée par les interactions plante-plante ?
- Quelle différence de plasticité entre génotypes ?

# Plan

- 1 Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique**
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - Résultats
  - Discussion
  
- 2 Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante**
  - Introduction
  - Conception de WHEAMM
  - Calibration en pur
  - Simulations en mélange
  - Discussion
  
- 3 Perspectives**

# Plan

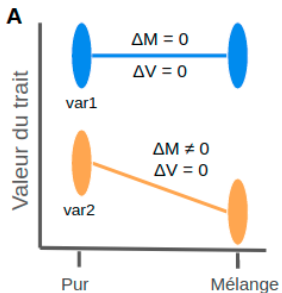
- 1 Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - Résultats
  - Discussion
- 2 Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante
  - Introduction
  - Conception de WHEAMM
  - Calibration en pur
  - Simulations en mélange
  - Discussion
- 3 Perspectives

# Plan

- 1** Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - Résultats
  - Discussion
  
- 2** Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante
  - Introduction
  - Conception de WHEAMM
  - Calibration en pur
  - Simulations en mélange
  - Discussion
  
- 3** Perspectives

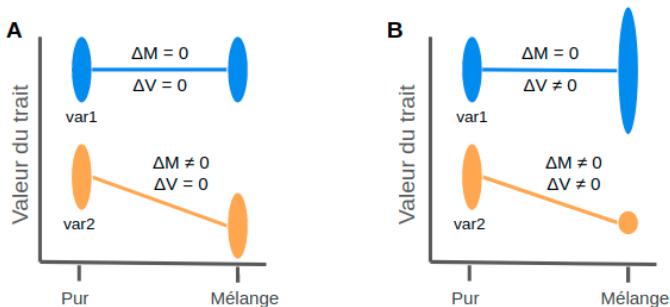
# Plasticité à l'échelle intra-génotypique

- Différences de moyenne pur vs mélange



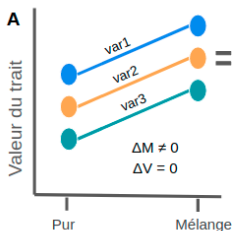
# Plasticité à l'échelle intra-génotypique

- Différences de moyenne pur vs mélange
- Différences de variabilité → (dé)canalisation environnementale



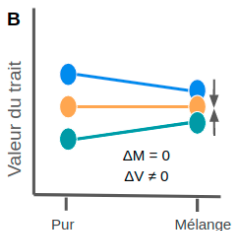
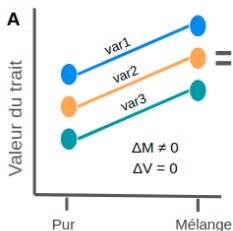
# Plasticité à l'échelle inter-génotypique

- Différences de variabilité pur vs mélange → différences de canalisation génétique (canalisation génétique en mélange = convergence phénotypique)



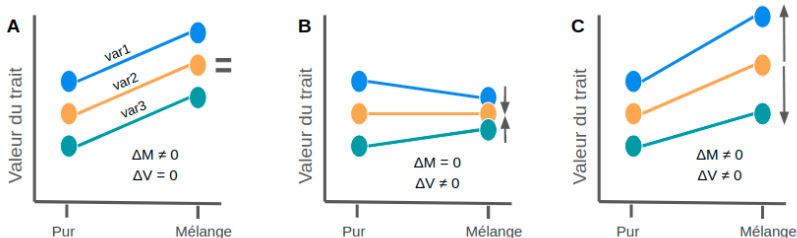
# Plasticité à l'échelle inter-génotypique

- Différences de variabilité pur vs mélange → différences de canalisation génétique (canalisation génétique en mélange = convergence phénotypique)



# Plasticité à l'échelle inter-génotypique

- Différences de variabilité pur vs mélange → différences de canalisation génétique (canalisation génétique en mélange = convergence phénotypique)



# Problématique

## Hypothèses

- Échelle intra-génotypique → augmentation des moyennes et réduction de la variabilité en mélange pour les variétés dominantes
- Échelle inter-génotypique → divergence phénotypique en mélange (décanalisation génétique)

## Motivations scientifiques

- Documenter la plasticité phénotypique en mélange et évaluer son impact sur la productivité des mélanges
- Étudier les différences de moyennes et de variabilité
- Analyser les composantes du rendements + dynamiques de hauteur et de tallage pendant la croissance

# Plan

- 1** Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - Résultats
  - Discussion
  
- 2** Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante
  - Introduction
  - Conception de WHEAMM
  - Calibration en pur
  - Simulations en mélange
  - Discussion
  
- 3** Perspectives

# Matériel végétal

- Blé tendre d'hiver : 8 variétés élités du panel BreedWheat
- Deux mélanges **quaternaires** différents
  - Un mélange quaternaire avec hétérogénéité de précocité
  - Un mélange quaternaire avec hétérogénéité de hauteur

| Mélange   | Variété  | Epiaison<br>(nb jours après 01/01) | Hauteur finale<br>(cm) |
|-----------|----------|------------------------------------|------------------------|
| Mélange 1 | Accroc   | 128.4                              | 87.02                  |
|           | Aubusson | 129.9                              | 87.03                  |
|           | Bergamo  | 145.3                              | 92.17                  |
|           | Expert   | 144.1                              | 90.93                  |
| Mélange 2 | Bagou    | 136.7                              | 82.97                  |
|           | Belepi   | 138.1                              | 100.93                 |
|           | Boregar  | 140.7                              | 84.08                  |
|           | Kalahari | 141.9                              | 115.19                 |

# Essai au champ

- Le Moulon ; 2019 et 2020
- Nano-parcelles de 1.5-2 m<sup>2</sup> ; densité de 160 plantes.m<sup>-2</sup>
  - 8 variétés en pur
  - 2 mélanges quaternaires répliqués deux fois
- Distribution spatiale prédéfinie en mélange puis semis de précision

|   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| C | Ber | Aub | Acc | Ber | Exp | Acc | Aub | Exp | Aub | Ber | Ber | Exp | 22 |
| D | Exp | Exp | Acc | Aub | Aub | Exp | Ber | Acc | Exp | Aub | Acc | Exp | 21 |
| E | Acc | Acc | Exp | Exp | Ber | Acc | Aub | Aub | Ber | Aub | Exp | Ber | 20 |
| F | Exp | Acc | Ber | Aub | Aub | Exp | Acc | Ber | Exp | Acc | Aub | Acc | 19 |
| G | Acc | Acc | Aub | Exp | Acc | Ber | Exp | Aub | Acc | Exp | Ber | Exp | 18 |
| H | Exp | Ber | Ber | Aub | Aub | Acc | Exp | Ber | Acc | Exp | Acc | Aub | 17 |
| A | Aub | Acc | Exp | Acc | Ber | Exp | Aub | Acc | Acc | Ber | Exp | 16  |    |
| B | Ber | Acc | Acc | Exp | Ber | Acc | Aub | Exp | Ber | Acc | Aub | Ber | 15 |
| C | Aub | Exp | Ber | Aub | Aub | Ber | Ber | Aub | Aub | Ber | Aub | Exp | 14 |
| D | Ber | Aub | Exp | Acc | Exp | Aub | Ber | Ber | Exp | Exp | Acc | Ber | 13 |
| E | Acc | Acc | Exp | Acc | Ber | Acc | Acc | Aub | Acc | Acc | Aub | Exp | 12 |
| F | Exp | Aub | Ber | Aub | Aub | Exp | Ber | Acc | Exp | Exp | Acc | Ber | 11 |
| G | Ber | Acc | Acc | Exp | Acc | Aub | Acc | Ber | Aub | Ber | Exp | 10  |    |
| H | Exp | Acc | Ber | Aub | Ber | Exp | Ber | Ber | Aub | Aub | Acc | Ber | 9  |
| A | Aub | Exp | Exp | Acc | Acc | Exp | Aub | Exp | Acc | Ber | Aub | Exp | 8  |
| B | Ber | Ber | Aub | Ber | Aub | Ber | Acc | Acc | Exp | Acc | Ber | 7   |    |
| C | Acc | Acc | Exp | Acc | Acc | Exp | Ber | Exp | Ber | Acc | Aub | 6   |    |
| D | Ber | Exp | Ber | Aub | Exp | Aub | Aub | Acc | Aub | Ber | Ber | Exp | 5  |
| E | Aub | Acc | Aub | Aub | Acc | Ber | Acc | Exp | Acc | Aub | Exp | 4   |    |
| F | Acc | Exp | Acc | Exp | Aub | Acc | Ber | Exp | Aub | Ber | Exp | 3   |    |
| G | Exp | Aub | Aub | Acc | Aub | Ber | Exp | Aub | Acc | Exp | Acc | Ber | 2  |
| H | Acc | Exp | Ber | Aub | Exp | Aub | Acc | Ber | Aub | Ber | Ber | Exp | 1  |
|   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |    |

Mélange 1

|   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| C | Bel | Bag | Bel | Bag | Bag | Dor | Bag | Bor | Kal | Bel | Bor | Bor | 22 |
| D | Bor | Bel | Kal | Bor | Bel | Bel | Kal | Kal | Bel | Bag | Bor | Kal | 21 |
| E | Bag | Bor | Bel | Bag | Kal | Bor | Bag | Kal | Kal | Bel | Bor | Bel | 20 |
| F | Bel | Kal | Bel | Kal | Dor | Bag | Kal | Kal | Bel | Bor | Kal | Bag | 19 |
| G | Bag | Bag | Bel | Kal | Dor | Kal | Bag | Bor | Bag | Kal | Bel | Bor | 18 |
| H | Kal | Kal | Bor | Bag | Bag | Bag | Bel | Kal | Bag | Bor | Bag | Kal | 17 |
| A | Bor | Bag | Kal | Bel | Bor | Kal | Bor | Bag | Kal | Bel | Bel | Bag | 16 |
| B | Bel | Bel | Bor | Bor | Bag | Bel | Kal | Bel | Bor | Bag | Bag | Bel | 15 |
| C | Bel | Kal | Bel | Bor | Kal | Bel | Bor | Bel | Bel | Bor | Bor | Bor | 14 |
| D | Bor | Bag | Kal | Bag | Bor | Bel | Bag | Bel | Bag | Kal | Bel | Bel | 13 |
| E | Bag | Kal | Bor | Bel | Bel | Bel | Kal | Bag | Bor | Bag | Kal | Bag | 12 |
| F | Bel | Kal | Bel | Bor | Bag | Bor | Bel | Kal | Bag | Bag | Bel | Bor | 11 |
| G | Bag | Bor | Kal | Bor | Bor | Bel | Bel | Kal | Bel | Bor | Bor | Bag | 10 |
| H | Bor | Bel | Bor | Bel | Bag | Kal | Bel | Bag | Bor | Kal | Kal | Bag | 9  |
| A | Bel | Bag | Kal | Bag | Bel | Kal | Bor | Kal | Bor | Bel | Bag | Kal | 8  |
| B | Bor | Bor | Bag | Bor | Kal | Bor | Bag | Bag | Bel | Bel | Bor | Bel | 7  |
| C | Kal | Bor | Kal | Bel | Bag | Dor | Kal | Bel | Bor | Bag | Bag | Kal | 6  |
| D | Bag | Bel | Bag | Bor | Kal | Bor | Kal | Bor | Bag | Bag | Kal | Bel | 5  |
| E | Bor | Kal | Bel | Bag | Bel | Kal | Bel | Kal | Bel | Kal | Kal | Bor | 4  |
| F | Kal | Bag | Bor | Kal | Bor | Bel | Bag | Bag | Bag | Bor | Bag | Bag | 3  |
| G | Kal | Bel | Kal | Bag | Dor | Kal | Bel | Bag | Bel | Bor | Bel | Bag | 2  |
| H | Bag | Bor | Bel | Kal | Bel | Kal | Bag | Kal | Bor | Bag | Kal | Bor | 1  |
|   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |    |

Mélange 2

# Phénotypage

- Croissance (1/mois)
  - Peuplements purs : hauteur, biomasse, nombre de talles sur échantillon de 20 plantes
  - Mélanges : hauteur et nombre de talles (mesures non-destructives) sur toutes les plantes



Semis (30/10/2019)



Mesures destructives  
(04/02/2020)



Dispositif au 23/04/2020



Mesures non-destructives (27/02/2020)



Dispositif au 17/03/2020



Dispositif au 20/05/2020

# Phénotypage

- Récolte : hauteur, biomasse, nombre d'épis, poids des épis, nombre de grains, poids de grains



Mélange (03/06/2020)



Dispositif au 17/06/2020



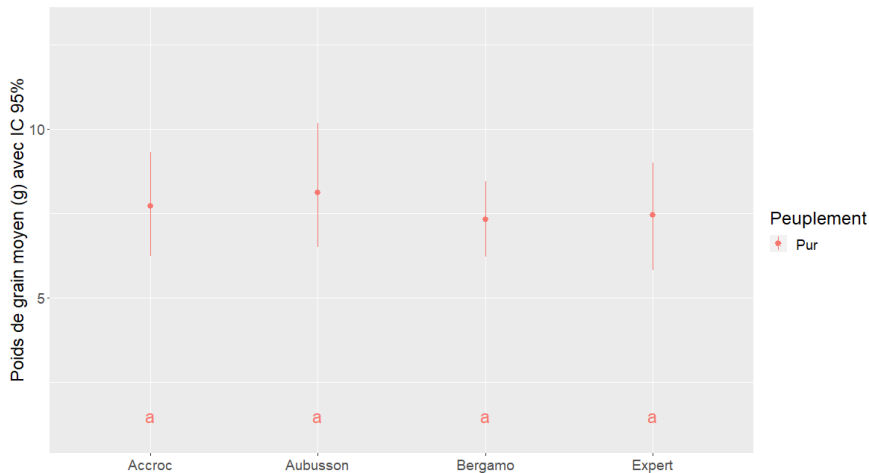
Récolte (20/07/2020)

# Plan

- 1** Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - **Résultats**
  - Discussion
  
- 2** Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante
  - Introduction
  - Conception de WHEAMM
  - Calibration en pur
  - Simulations en mélange
  - Discussion
  
- 3** Perspectives

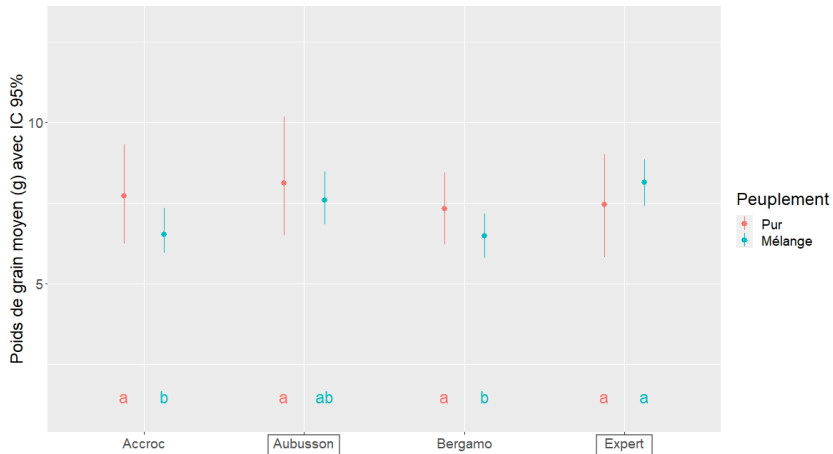
# Rangs de dominance en mélange

Exemple du mélange 1 (2019) :



# Rangs de dominance en mélange

Exemple du mélange 1 (2019) :



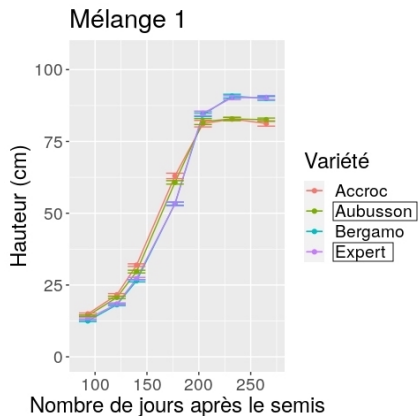
→ variétés Aubusson et Expert dominantes en mélange

# Rangs de dominance en mélange

- Rendement
  - Dominance mélange 2 : variétés Bagou et Belepi dominantes
  - Rangs de dominance constants entre les deux années pour les deux mélanges
  - Performance : un cas d'overyielding pour le mélange 1 en 2020
  
- Composantes du rendement
  - Mise en évidence de plasticité phénotypique à l'échelle intra-génotypique en terme de moyenne et de variabilité
  - Rendements et comportements plastiques différents entre les deux années → contraste climatique important

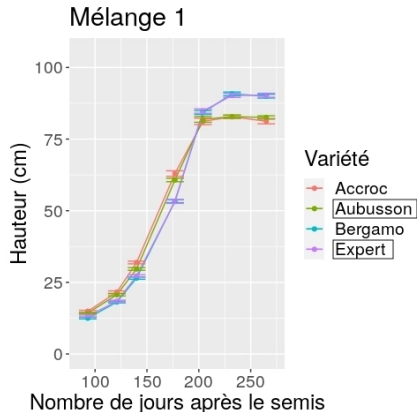
# Dynamique de hauteur

En mélange (2019) :



# Dynamique de hauteur

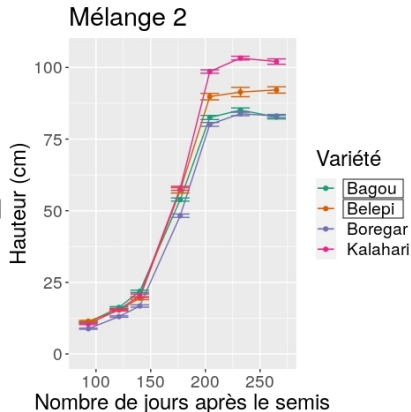
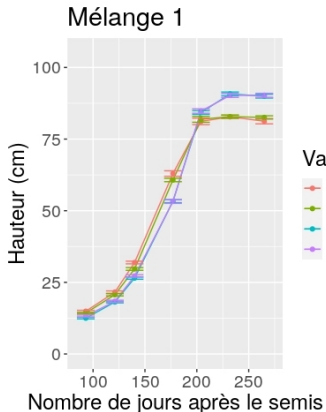
En mélange (2019) :



→ Pas de lien entre précocité et dominance en mélange

# Dynamique de hauteur

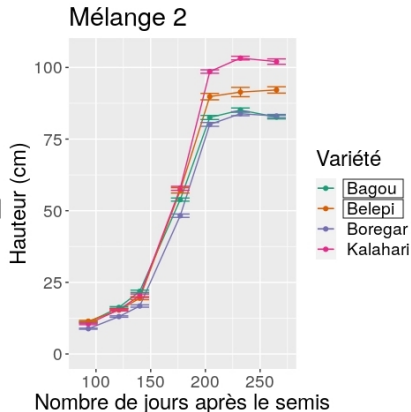
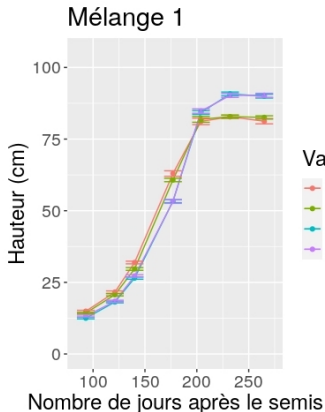
En mélange (2019) :



→ Pas de lien entre précocité et dominance en mélange

# Dynamique de hauteur

En mélange (2019) :

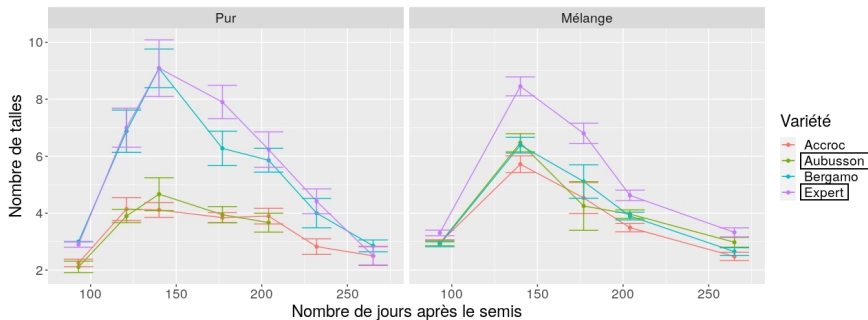


→ Pas de lien entre précocité et dominance en mélange

→ Pas de lien entre hauteur finale et dominance en mélange

# Dynamique de tallage

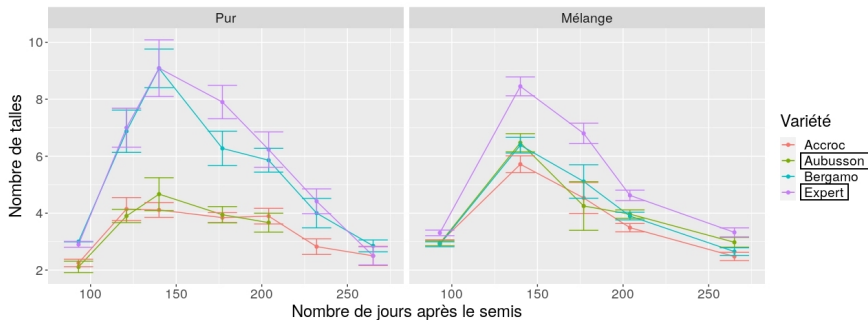
Exemple du mélange 1 en 2019 :



→ Convergence du tallage en mélange

# Dynamique de tallage

Exemple du mélange 1 en 2019 :

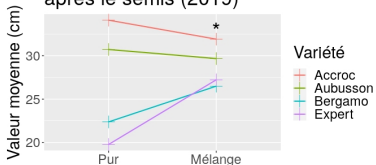


→ Convergence du tallage en mélange

→ Régression moins forte en mélange pour les variétés dominantes

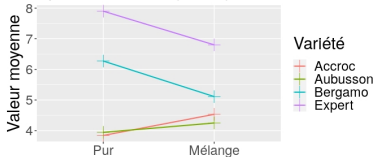
# Échelle inter-génotypique

Hauteur à 140 jours  
après le semis (2019)



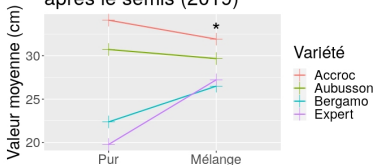
- Nombreux cas de convergence phénotypique

Nombre de talles à 177 jours  
après le semis (2019)



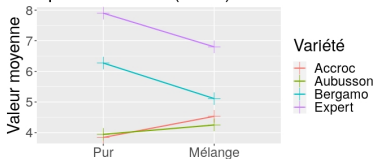
# Échelle inter-génotypique

Hauteur à 140 jours  
après le semis (2019)

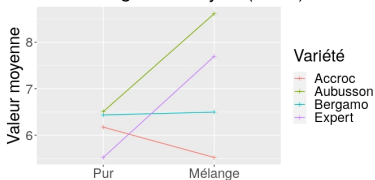


- Nombreux cas de convergence phénotypique
- Divergence à la récolte pour mélange 1 en 2020 → overyielding

Nombre de talles à 177 jours  
après le semis (2019)



Poids de grains moyen (2020)



# Plan

- 1** Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - Résultats
  - Discussion
  
- 2** Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante
  - Introduction
  - Conception de WHEAMM
  - Calibration en pur
  - Simulations en mélange
  - Discussion
  
- 3** Perspectives

## Points importants

- Dispositif innovant pour une étude à l'échelle de la plante et collecte d'un jeu de données unique

## Points importants

- Dispositif innovant pour une étude à l'échelle de la plante et collecte d'un jeu de données unique
- Effet année important, mise en évidence interactions GxExM

## Points importants

- Dispositif innovant pour une étude à l'échelle de la plante et collecte d'un jeu de données unique
- Effet année important, mise en évidence interactions GxExM
- Dominance des variétés en mélange
  - Ø hauteur/précocité des variétés
  - Ø canalisation environnementale
  - → plasticité du tallage

## Points importants

- Dispositif innovant pour une étude à l'échelle de la plante et collecte d'un jeu de données unique
- Effet année important, mise en évidence interactions GxExM
- Dominance des variétés en mélange
  - Ø hauteur/précocité des variétés
  - Ø canalisation environnementale
  - → plasticité du tallage
- Exemple de divergence phénotypique à la récolte etoveryielding → complémentarité de niche ?

## Points importants

- Dispositif innovant pour une étude à l'échelle de la plante et collecte d'un jeu de données unique
- Effet année important, mise en évidence interactions GxExM
- Dominance des variétés en mélange
  - Ø hauteur/précocité des variétés
  - Ø canalisation environnementale
  - → plasticité du tallage
- Exemple de divergence phénotypique à la récolte etoveryielding → complémentarité de niche ?
- Dispositif limité ⇒ modélisation mécaniste
  - Tenir compte de la plasticité pour prédire en mélange
  - Élargir le champ des possibles par simulation

# Plan

- 1 Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - Résultats
  - Discussion
- 2 Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante
  - Introduction
  - Conception de WHEAMM
  - Calibration en pur
  - Simulations en mélange
  - Discussion
- 3 Perspectives

# Plan

- 1** Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - Résultats
  - Discussion
  
- 2** Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante
  - Introduction
  - Conception de WHEAMM
  - Calibration en pur
  - Simulations en mélange
  - Discussion
  
- 3** Perspectives

# Intérêt des modèles de plantes pour étudier les mélanges de variétés

- Modèle : représentation simplifiée d'un système pour le décrire, l'expliquer et prédire son évolution

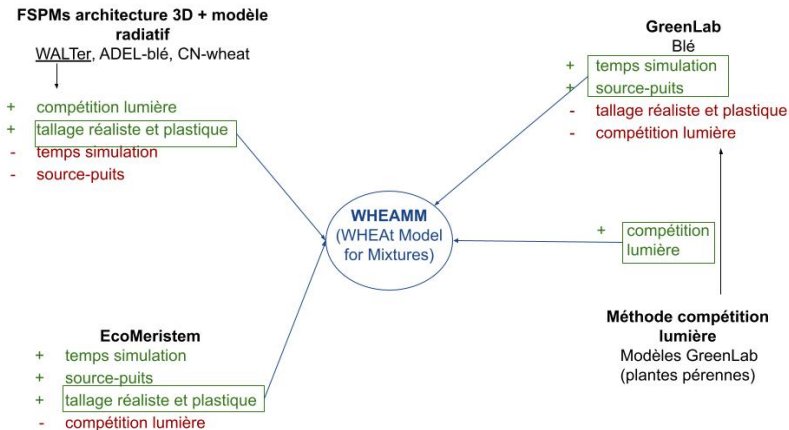
# Intérêt des modèles de plantes pour étudier les mélanges de variétés

- Modèle : représentation simplifiée d'un système pour le décrire, l'expliquer et prédire son évolution
- Modèles de plantes
  - Modèles de culture (parcelle)
  - Modèles structure-fonction (FSPM) individu-centrés → adaptés pour étudier des couverts hétérogènes et les interactions plante-plante

# Intérêt des modèles de plantes pour étudier les mélanges de variétés

- Modèle : représentation simplifiée d'un système pour le décrire, l'expliquer et prédire son évolution
- Modèles de plantes
  - Modèles de culture (parcelle)
  - Modèles structure-fonction (FSPM) individu-centrés → adaptés pour étudier des couverts hétérogènes et les interactions plante-plante
- FSPM
  - Architecture 3D détaillée + modèle radiativité → temps de simulations longs (ADEL-wheat, CN-wheat, WALTer)
  - Modèles GreenLab : architecture simplifiée + fonctionnement source-puits → temps de simulations courts

# Conception de WHEAMM



# Plan

- 1** Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - Résultats
  - Discussion
  
- 2** Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante
  - Introduction
  - **Conception de WHEAMM**
  - Calibration en pur
  - Simulations en mélange
  - Discussion
  
- 3** Perspectives

# WHEAMM : production de biomasse

- Organes : feuilles, entrenoeuds, épis (pas de système racinaire)
- Organogénèse → calendrier de temps thermique
- Production de biomasse par photosynthèse d'après la loi de Beer puis allocation aux organes

$$q(n) = PAR_n \cdot S_{fu}(n) \cdot RUE$$

$n$  : Jour

$q$  : Biomasse produite (g)

$PAR$  : Rayonnement photosynthétiquement actif ( $MJ \cdot m^{-2}$ )

$S_{fu}$  : Surface foliaire utile ( $m^2$ )

$RUE$  : Radiation Use Efficiency ( $g \cdot MJ^{-1}$ )

# WHEAMM : production de biomasse

- Organes : feuilles, entrenoeuds, épis (pas de système racinaire)
- Organogénèse → calendrier de temps thermique
- Production de biomasse par photosynthèse d'après la loi de Beer puis allocation aux organes

$$q(n) = PAR_n \cdot S_{fu}(n) \cdot RUE$$

$n$  : Jour

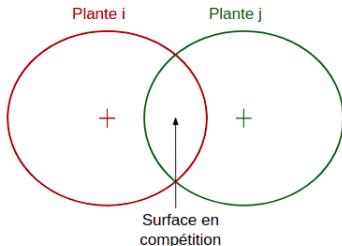
$q$  : Biomasse produite (g)

$PAR$  : Rayonnement photosynthétiquement actif ( $MJ \cdot m^{-2}$ )

$S_{fu}$  : Surface foliaire utile ( $m^2$ )

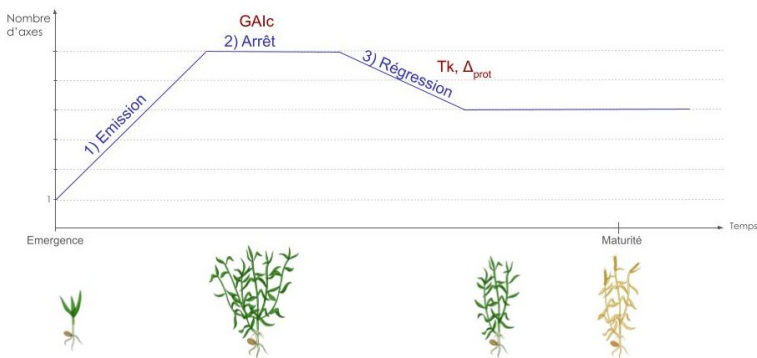
$RUE$  : Radiation Use Efficiency ( $g \cdot MJ^{-1}$ )

- Approximation de  $S_{fu}$  avec une méthode dédiée pour la compétition pour la lumière sur la partition de disques ([Cournède et al. 2007](#))



# WHEAMM : tallage

- Émission
- Arrêt : approximé par le "Green Area Index de proximité critique",  $GAI_c$  (Lecarpentier et al. 2019)
- Régression : quand l'allocation de biomasse à un axe est en dessous d'un seuil,  $T_k$  (Larue et al. 2019), avec un délai de protection,  $\Delta_{prot}$  (Lecarpentier et al. 2019)



# Plan

- 1** Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - Résultats
  - Discussion
  
- 2** Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante
  - Introduction
  - Conception de WHEAMM
  - **Calibration en pur**
  - Simulations en mélange
  - Discussion
  
- 3** Perspectives

# Calibration automatique en pur

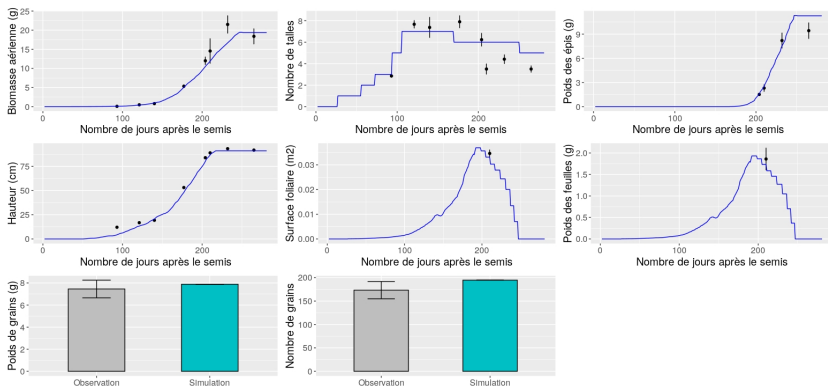
- Données : issues de l'expérimentation PerfoMix pour deux saisons (2019, 2020) et 8 géotypes en pur
  - biomasse aérienne, nombre de talles, hauteur, surfaces et poids de feuilles, nombre d'épis, poids et nombre de grains
- Paramètres : 16 à calibrer conjointement
  - pour chaque géotype et année séparément
- Fonction de coût :

$$RMSE = \frac{1}{N_V} \sum_{v=1}^V \frac{1}{N_{T_v}} \sum_{t=1}^{T_v} \sqrt{\sum_{i=1}^{I_{vt}} \left( \frac{y_{vti,obs} - y_{vt,sim}}{\sigma_{vt}} \right)^2}$$

- Algorithme : optimisation globale par recuit simulé avec bornes (Goffe et al. 1994)

# Calibration automatique en pur

Exemple pour la variété Expert en pur en 2019 :



# Calibration automatique

- Meilleure calibration en 2019 qu'en 2020

# Calibration automatique

- Meilleure calibration en 2019 qu'en 2020
- Paramètres calibrés :
  - Estimations contrastées entre génotypes et années
  - 10% des estimations aux bornes supérieures
  - Valeurs élevées : coefficient d'extinction  $k_b$ , temps thermique d'émergence  $\tau_{init}$ , seuil de biomasse activant la régression d'un axe  $T_k$

# Calibration automatique

- Meilleure calibration en 2019 qu'en 2020
- Paramètres calibrés :
  - Estimations contrastées entre géotypes et années
  - 10% des estimations aux bornes supérieures
  - Valeurs élevées : coefficient d'extinction  $k_b$ , temps thermique d'émergence  $\tau_{init}$ , seuil de biomasse activant la régression d'un axe  $T_k$
- Identification de misspécifications sur les dynamiques de tallage → rendre la régression irréversible et progressive

# Calibration automatique

- Meilleure calibration en 2019 qu'en 2020
- Paramètres calibrés :
  - Estimations contrastées entre géotypes et années
  - 10% des estimations aux bornes supérieures
  - Valeurs élevées : coefficient d'extinction  $k_b$ , temps thermique d'émergence  $\tau_{init}$ , seuil de biomasse activant la régression d'un axe  $T_k$
- Identification de misspécifications sur les dynamiques de tallage → rendre la régression irréversible et progressive
- Validation non satisfaisante
  - Une autre année → calibration conjointe
  - Une autre densité de semis → misspécifications tallage, calibration sur plusieurs densités

# Plan

- 1** Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - Résultats
  - Discussion
  
- 2** Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante
  - Introduction
  - Conception de WHEAMM
  - Calibration en pur
  - **Simulations en mélange**
  - Discussion
  
- 3** Perspectives

# Simulations en mélange

- Implémentation de stochasticité sur la date d'émergence → variabilité inter-individuelle entre plantes d'un même génotype

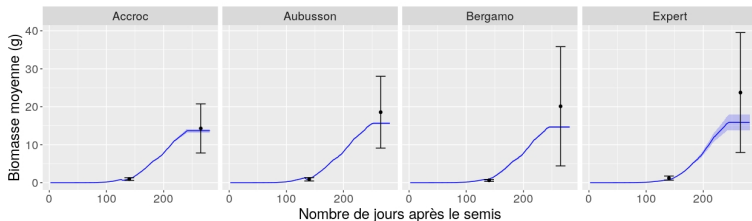
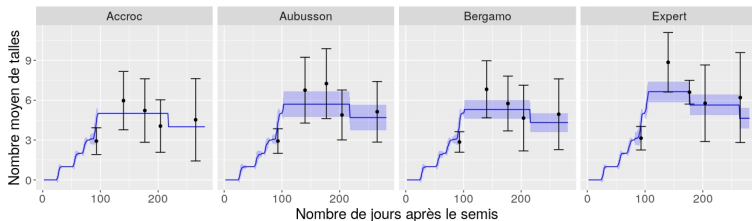
# Simulations en mélange

- Implémentation de stochasticité sur la date d'émergence → variabilité inter-individuelle entre plantes d'un même génotype
- Analyse de sensibilité en mélange

# Simulations en mélange

- Implémentation de stochasticité sur la date d'émergence → variabilité inter-individuelle entre plantes d'un même génotype
- Analyse de sensibilité en mélange
- Simulations en mélange
  - Utilisation des paramètres calibrés en pur en 2019
  - Simulation des mélanges du dispositif Perfomix en 2019
  - Mélange 1

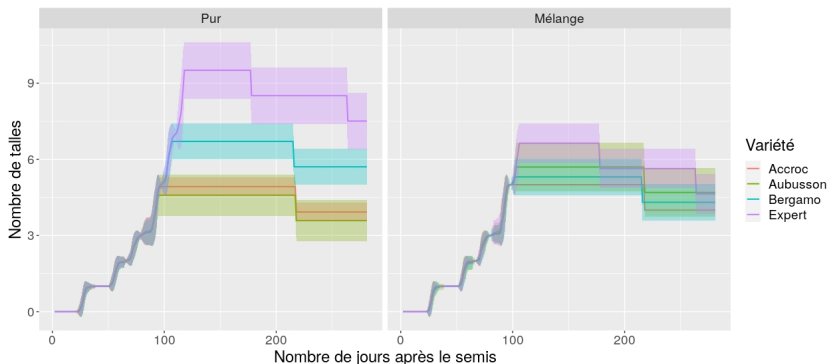
# Validation pour le mélange 1 en 2019



→ Tallage satisfaisant (bien que pic trop précoce et régression trop faible pour Expert) mais biomasse souvent sous-estimée

# Convergence du tallage en mélange

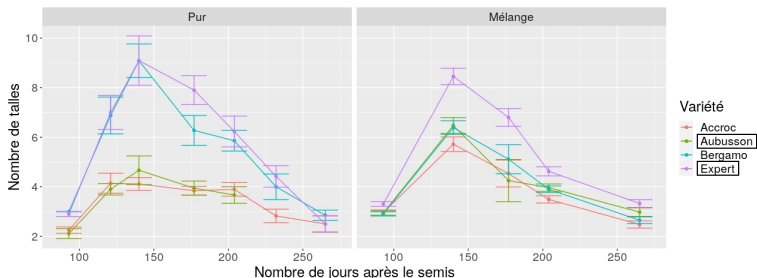
Données simulées mélange 1 en 2019



→ Convergence en mélange des dynamiques de tallage

# Convergence du tallage en mélange

Rappels des données observées pour le mélange 1 en 2019 :



→ Convergence en mélange des dynamiques de tallage comme sur les données observées

# Plan

- 1** Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - Résultats
  - Discussion
  
- 2** Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante
  - Introduction
  - Conception de WHEAMM
  - Calibration en pur
  - Simulations en mélange
  - Discussion
  
- 3** Perspectives

# Points importants

- WHEAMM → contraintes respectées
- Confrontation du modèle à la réalité
  - WHEAMM n'est pas complètement validé sur le dispositif PerfoMix
  - Calibration satisfaisante pour certaines variétés en pur
  - Simulation de comportements plastiques variés
  - Émergence de la convergence du tallage en mélange pour le mélange 1 en 2019
- Importance du cycle de modélisation : utilisation de méthodes d'analyse de sensibilité et de calibration automatique pour identifier les misspécifications

# Plan

- 1 Expérimentation PerfoMix : impact de la plasticité phénotypique
  - Cadre conceptuel
  - Matériels et Méthodes
  - Résultats
  - Discussion
  
- 2 Modélisation : dynamiques des interactions plante-plante
  - Introduction
  - Conception de WHEAMM
  - Calibration en pur
  - Simulations en mélange
  - Discussion
  
- 3 Perspectives

# Perspectives

- Résoudre les misspécifications identifiées, ajouter sources de stochasticité, étendre le modèle (ajout puits racinaire, module de précocité)

# Perspectives

- Résoudre les misspécifications identifiées, ajouter sources de stochasticité, étendre le modèle (ajout puits racinaire, module de précocité)
- Améliorer la méthodologie de calibration

# Perspectives

- Résoudre les misspécifications identifiées, ajouter sources de stochasticité, étendre le modèle (ajout puits racinaire, module de précocité)
- Améliorer la méthodologie de calibration
- Nombreuses applications possibles de WHEAMM → couplage avec des modèles de génétique des populations

# Perspectives

- Résoudre les misspécifications identifiées, ajouter sources de stochasticité, étendre le modèle (ajout puits racinaire, module de précocité)
- Améliorer la méthodologie de calibration
- Nombreuses applications possibles de WHEAMM → couplage avec des modèles de génétique des populations
- Approfondir l'étude des bases génétiques de la plasticité phénotypique à une diversité plus grande de génotypes et le long du gradient d'hétérogénéité de voisinage (ex. mélanges d'espèces)

# Mon postdoc à ECOSYS

- 01/02/2023 - 31/07/2024 voire 31/01/2025
- Projet REGARD (INRAE, QAAFI, Arvalis, LSCE) → utilisation d'analogues climatiques et de modèles de culture pour évaluer la pertinence (ou les limites) d'avoir recours à des sites étrangers pour sélectionner les variétés françaises de demain.
- Avec MO. Bancal, M. Launay (Agroclim), K. Chenu (QAAFI), JC. Deswartes (Arvalis)
- Analyse de la prise en compte du  $CO_2$  et des hautes températures dans les modèles de culture de blé (STICS, APSIM) pour proposer d'éventuelles améliorations et faire des prédictions de performance.

**Merci pour votre attention !**

# Remerciements

## Directeurs de thèse

Paul-Henry Cournède  
Timothée Flutre

## Jury de thèse

Hélène Fréville  
Bénédicte Quilot-Turion  
Sébastien Barot  
Véronique Letort

## Comité de suivi

Vincent Allard  
Christian Fournier  
Jean-Marc-Gilliot  
Pierre Roumet

## GQE - Le Moulon

Jérôme Enjalbert  
Emmanuelle Blanc  
Noa Vazeux-Blumental  
Fatma Ammar  
Didier Tropée  
Gaël Vieceli  
Isabelle Goldringer  
Gaëlle Van Frank  
Emma Forst  
Tatiana Randrianarisoa  
Adèle Hospital  
Baptiste Rouger  
Michel Turbet-Delof  
Roma Hooge  
Marjolaine Colas  
Hernance Louis  
Adrien Belny  
Vincent Le Goff  
Aboubakar Meite  
Katell Ménard  
Nellyne Tinomme  
Christine Dillman  
Valérie Lespinas

## MICS - CentraleSupélec

Gautier Viaud  
Agathe Le Galiot

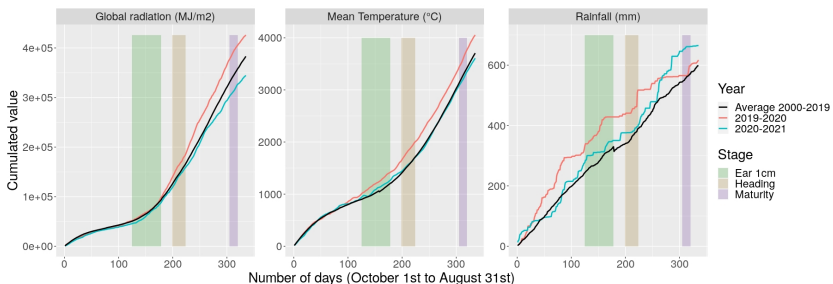
## Collaborateurs

Christophe Pradal  
Christophe Lecarpentier

## Institutions

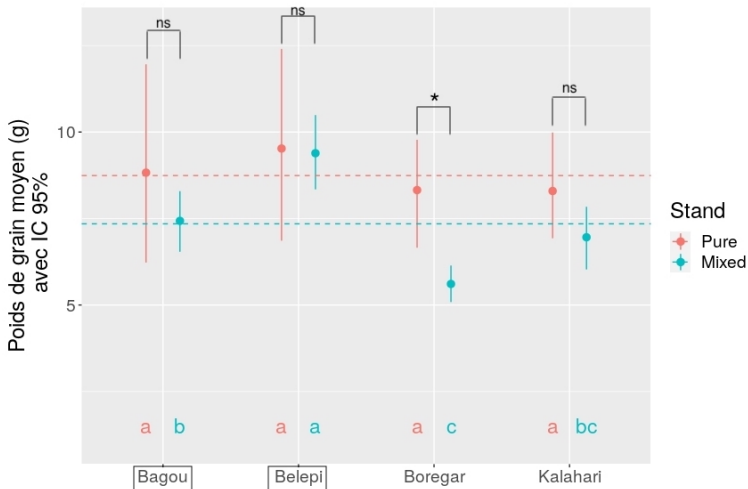
INRAE  
CentraleSupélec  
ED FIRE  
LPI  
Université Paris Cité  
Université Paris-Saclay

# Variables climatiques 2019 vs 2020



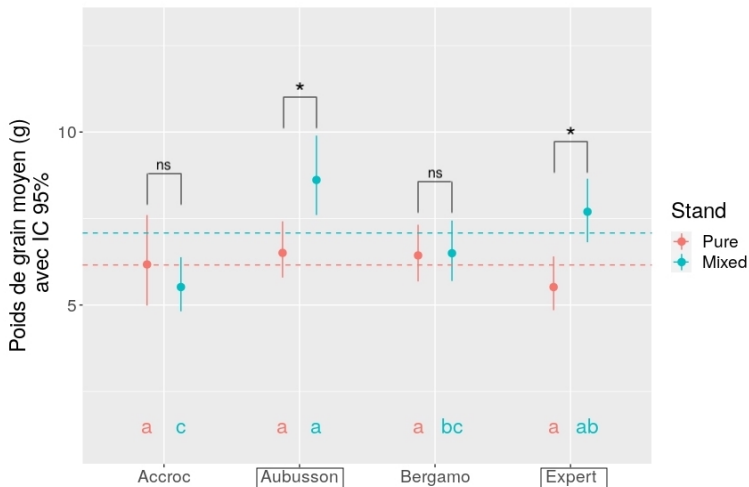
# Rangs de dominance en mélange

Exemple du mélange 2 en 2019



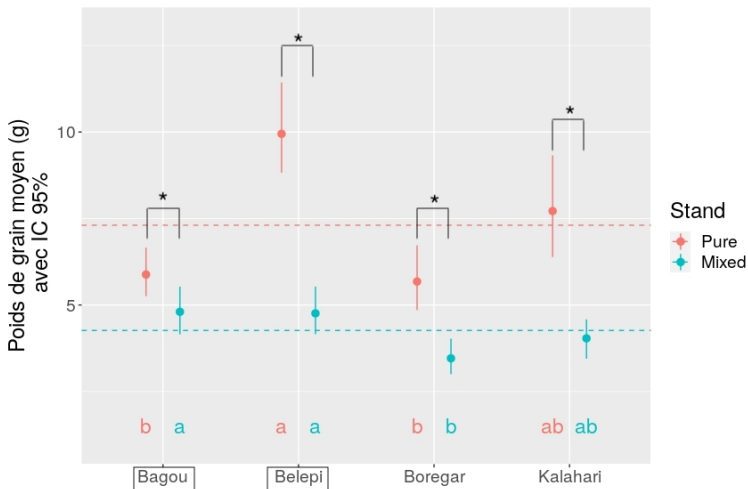
# Rangs de dominance en mélange

Exemple du mélange 1 en 2020



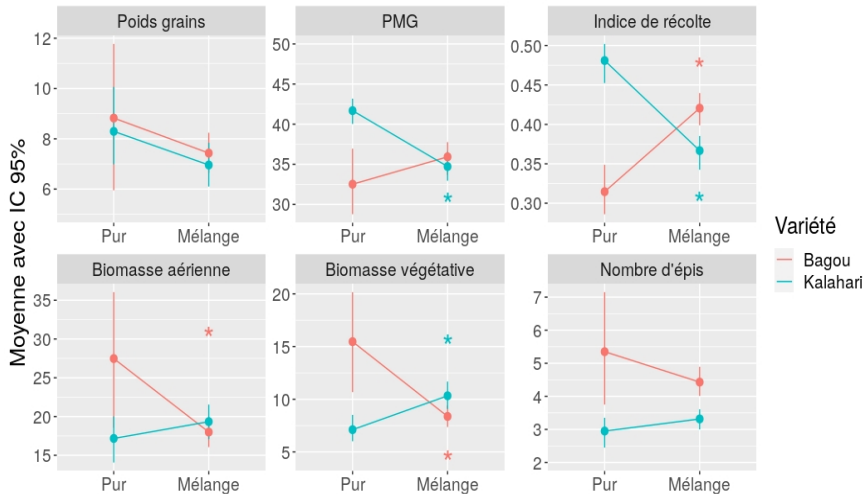
# Rangs de dominance en mélange

Exemple du mélange 2 en 2020



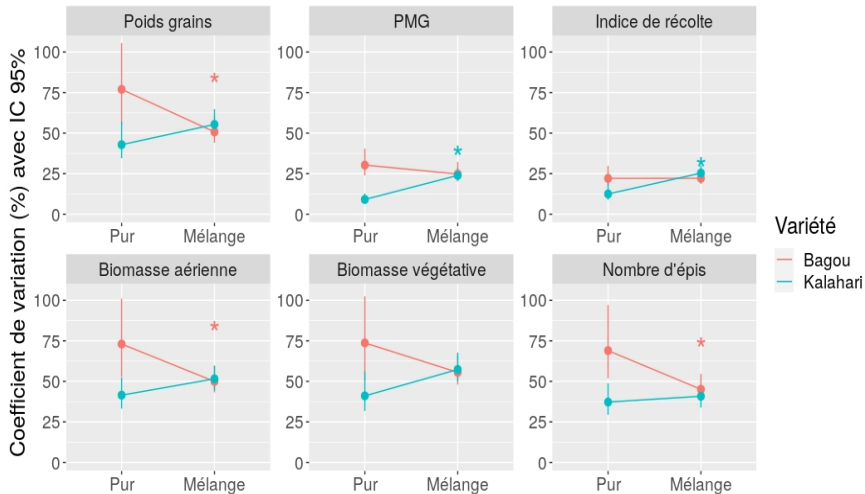
# Égalité des moyennes

## Mélange 1 (2019)



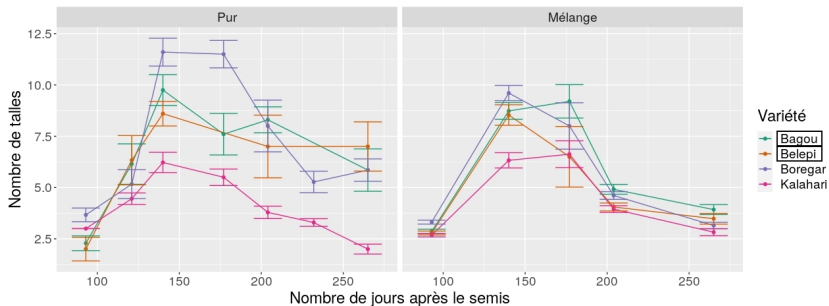
# Égalité de variabilité

## Mélange 1 (2019)



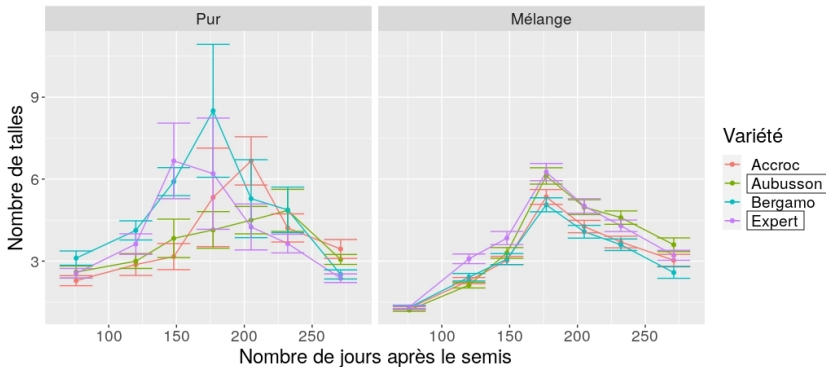
# Dynamique de tallage

Exemple du mélange 2 en 2019



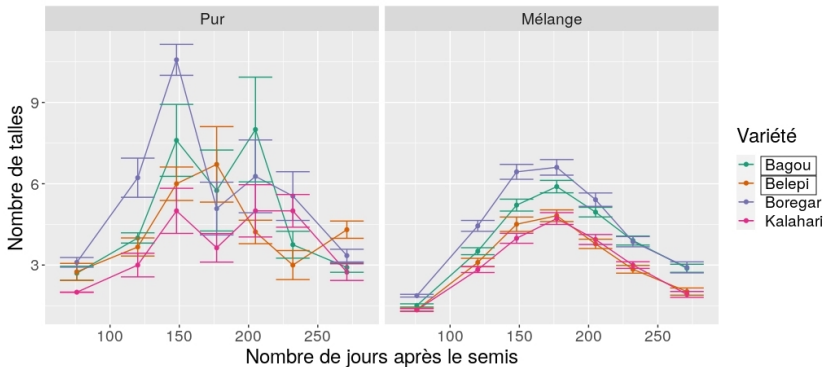
# Dynamique de tallage

Exemple du mélange 1 en 2020



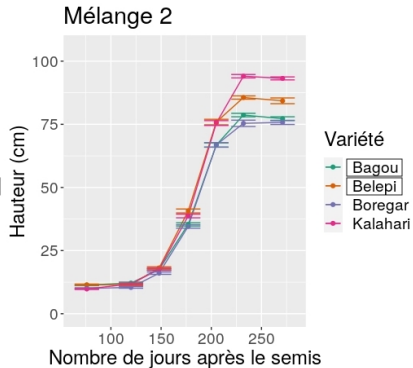
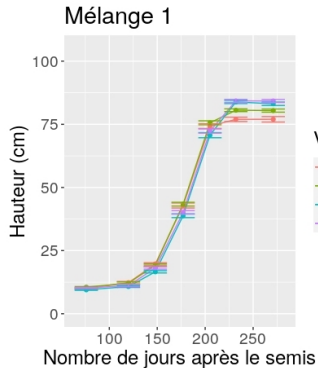
# Dynamique de tallage

Exemple du mélange 2 en 2020



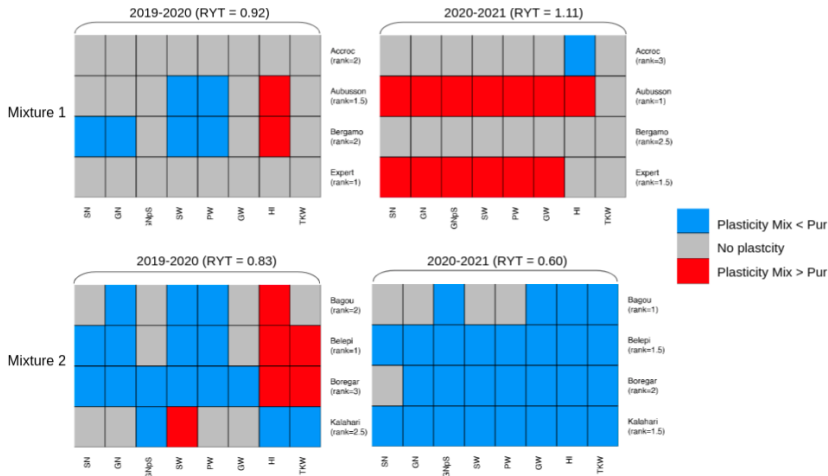
# Dynamique de hauteur

En mélange (2020)



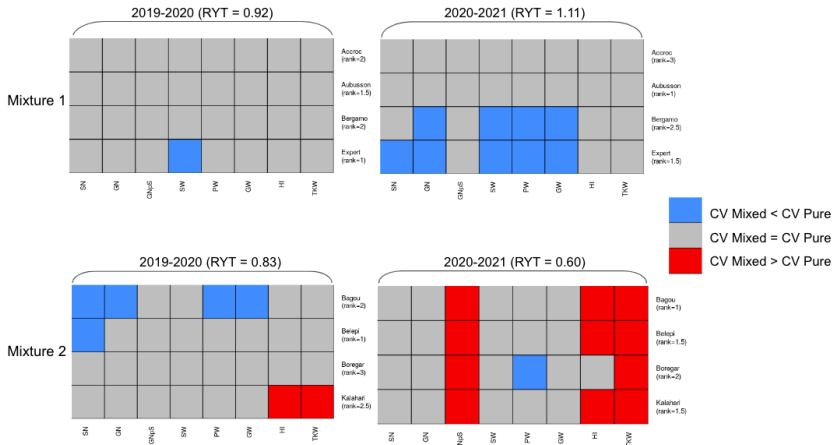
# Synthèse de la plasticité intra en mélange

## Tests égalité de moyennes

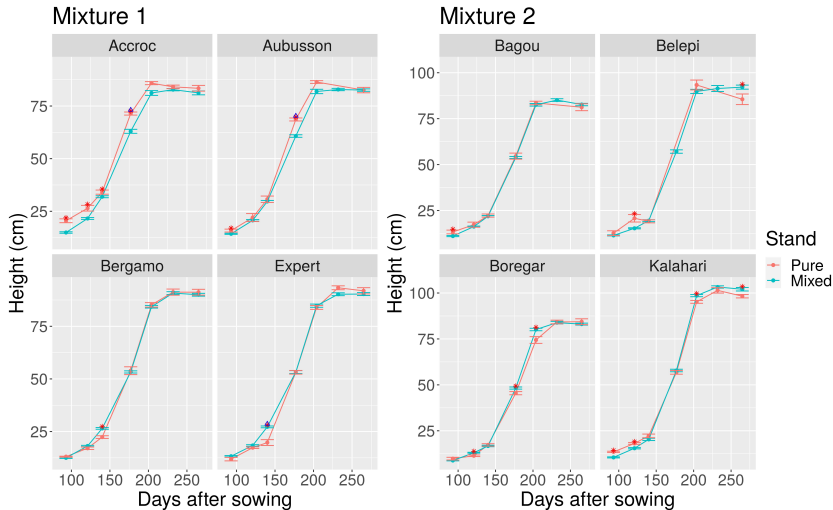


# Synthèse de la plasticité intra en mélange

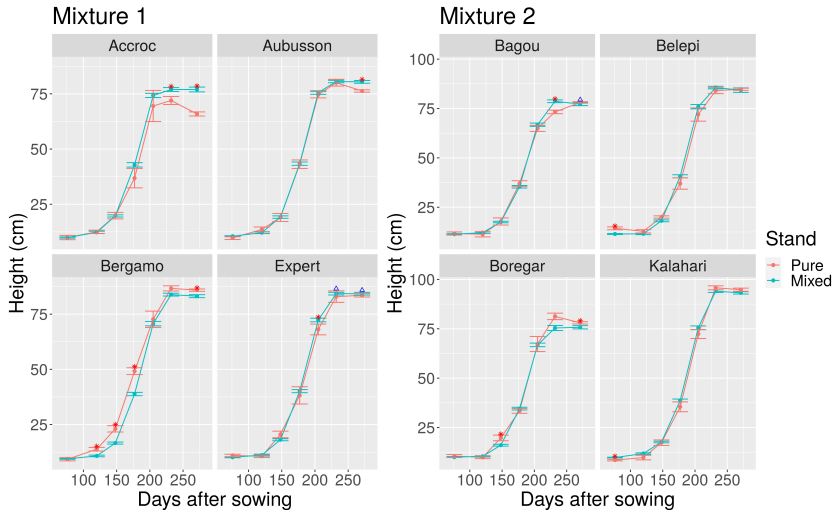
## Tests égalité de coefficients de variation



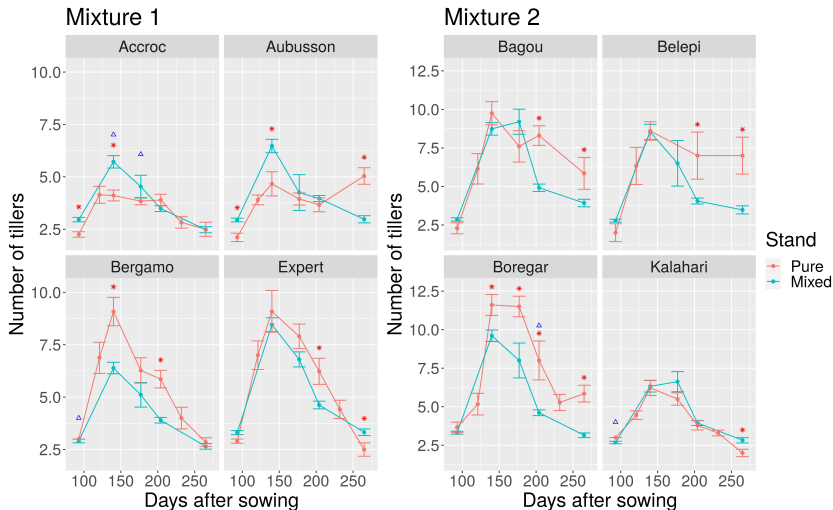
# Comparaison hauteur en 2019



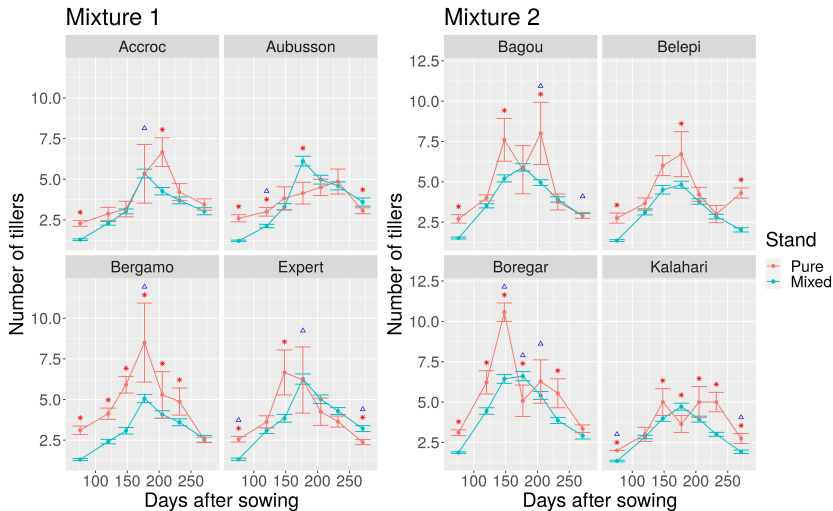
# Comparaison hauteur en 2020



# Comparison tallage 2019

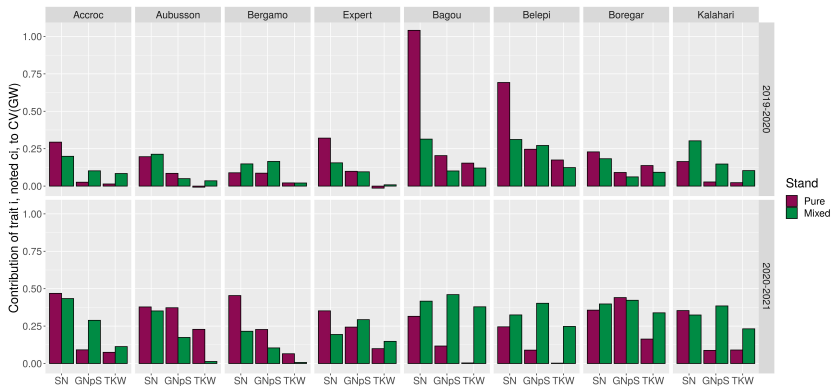


# Comparison tallage 2020



# Décomposition de la variabilité du rendement (Piepho)

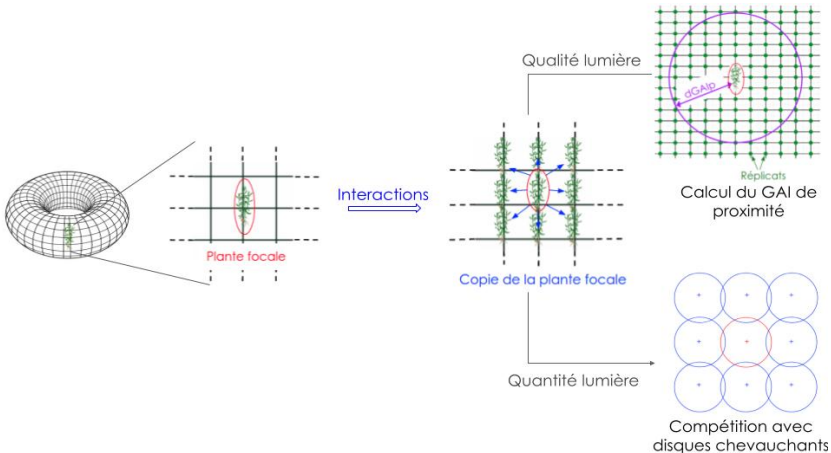
Différences significative de CV(GW) pur - mélange : Bagou 2019, Bergamo et Expert 2020



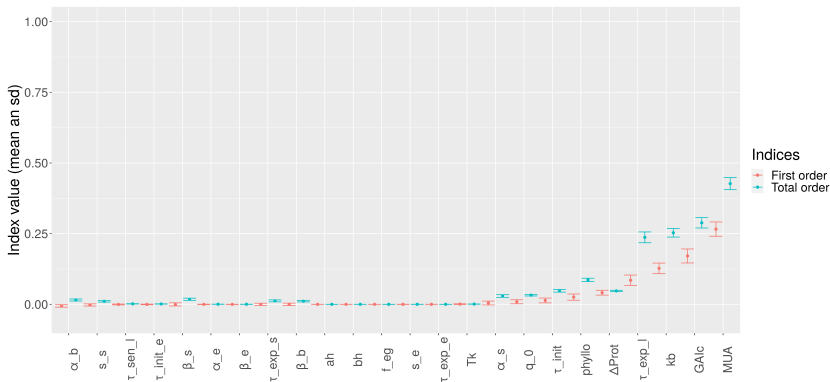
# Simulations

Deux versions du modèle

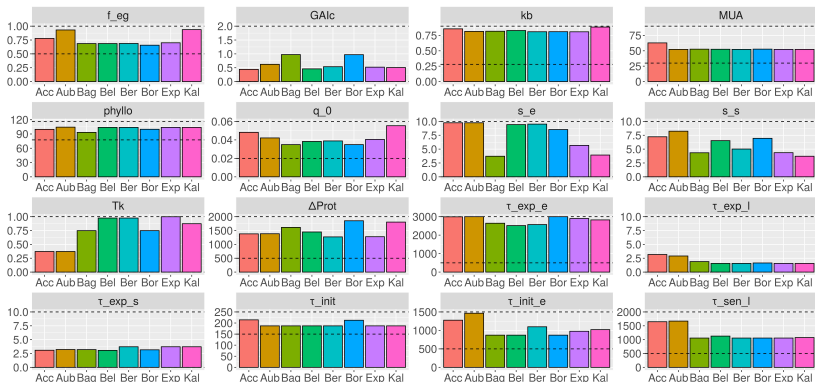
- Plantes individuelles
- Plante moyenne → couvert homogène



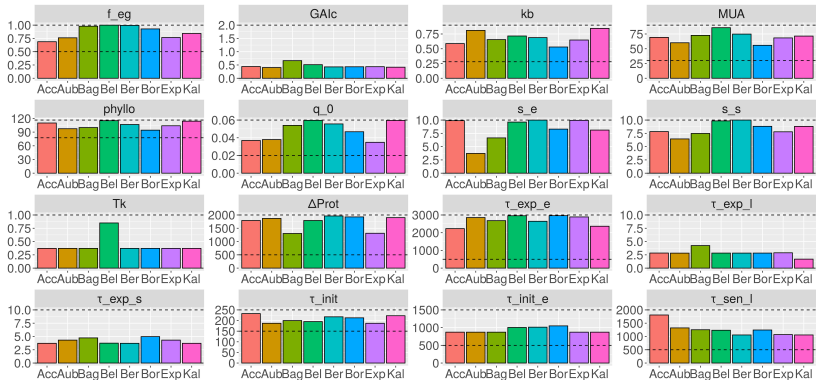
# GSA en pur : étude du tallage



# Paramètres calibrés en 2019

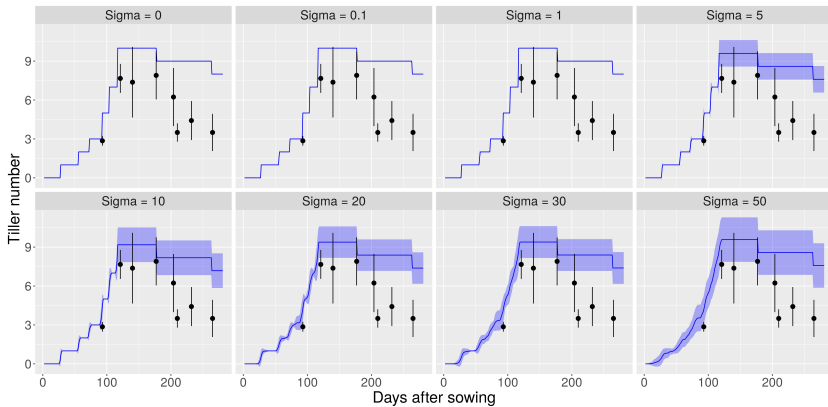


# Paramètres calibrés en 2020



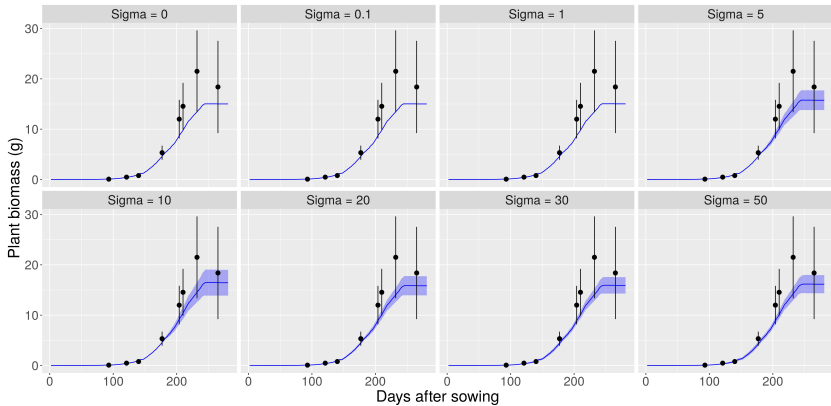
# Sources de stochasticité

## Dynamiques de tallage



# Sources de stochasticité

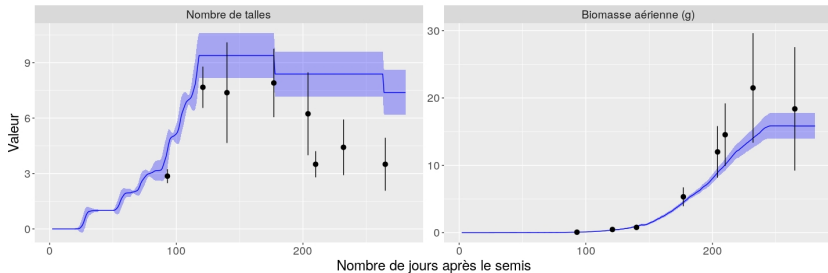
## Biomasse aérienne



# Source de stochasticité

Date de levée  $\sim \mathcal{N}(\mu_e, \sigma_e)$ , avec  $\mu_e = 200^\circ \text{Cd}$  et  $\sigma_e = 20^\circ \text{Cd}$

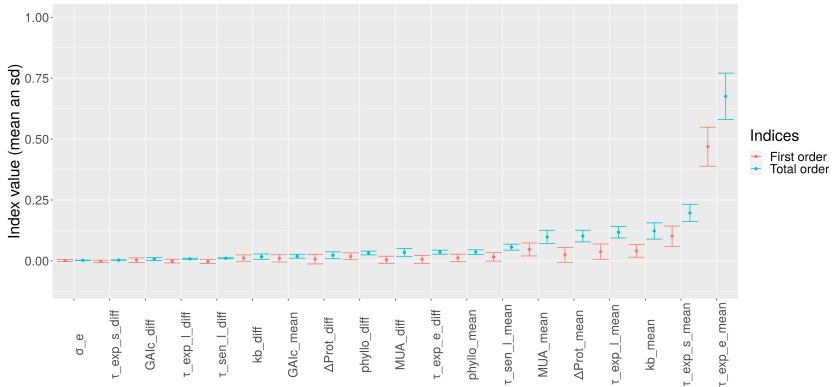
Exemple : Expert en pur en 2019



→ Variabilité simulée sous-estimée (piste : + sources stochasticité)

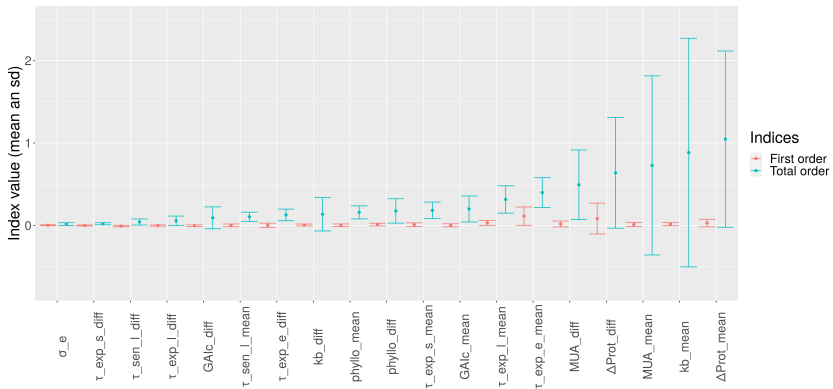
# GSA en mélange

Sortie : moyenne du poids de grains à l'échelle de la parcelle



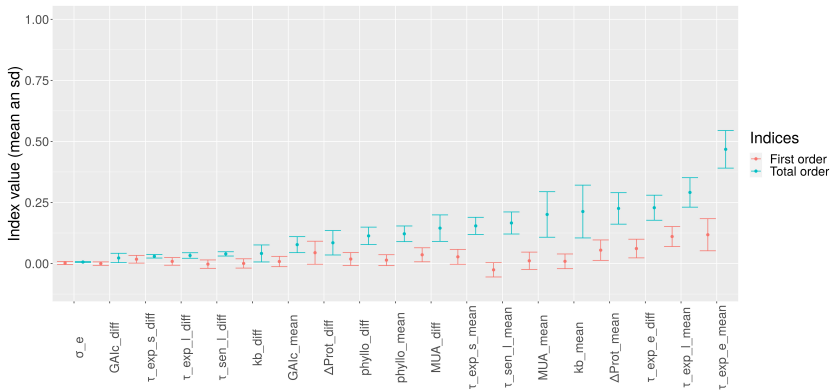
# GSA en mélange

Sortie : variance du poids de grains à l'échelle de la parcelle



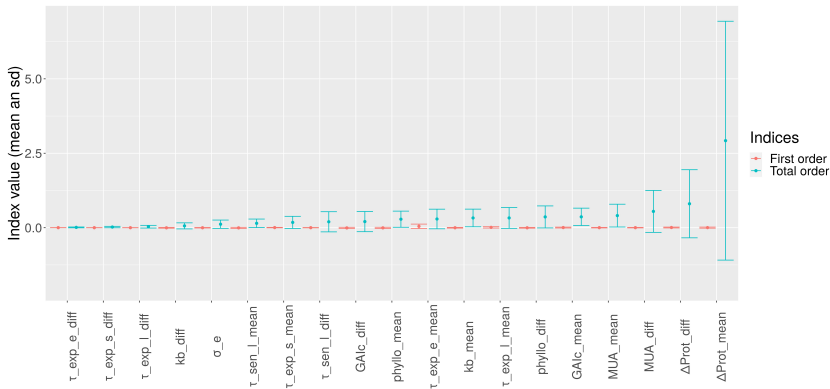
# GSA en mélange

Sortie : différence de moyenne sur le poids de grains entre les deux variétés



# GSA en mélange

Sortie : différence de variance sur le poids de grains entre les deux variétés



# Analyse de sensibilité en mélange

Étude du poids de grains dans un mélange binaire avec 9 paramètres → valeur moyenne + différentiel

## ■ A l'échelle de la parcelle

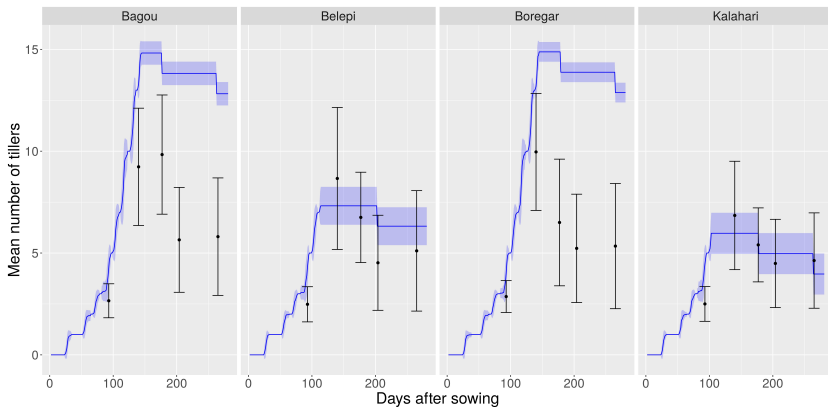
- Poids de grains moyen : valeurs moyennes de  $\tau_{exp}^e$ ,  $\tau_{exp}^s$ ,  $kb$ ,  $\Delta_{prot}$  et *SLA* (*Specific Leaf Area*)
- Variance du poids de grains : valeurs moyennes de  $kb$ ,  $\Delta_{prot}$  et *MUA* + différentiels de  $\Delta_{prot}$  et *SLA*

## ■ A l'échelle de la variété

- Différence de moyenne : valeurs moyennes de  $\tau_{exp}^e$ ,  $\tau_{exp}^l$
- Différence de variance : valeurs moyennes et différentiels de  $\Delta_{prot}$ , *SLA*,  $GAI_c$  et *phyllo*

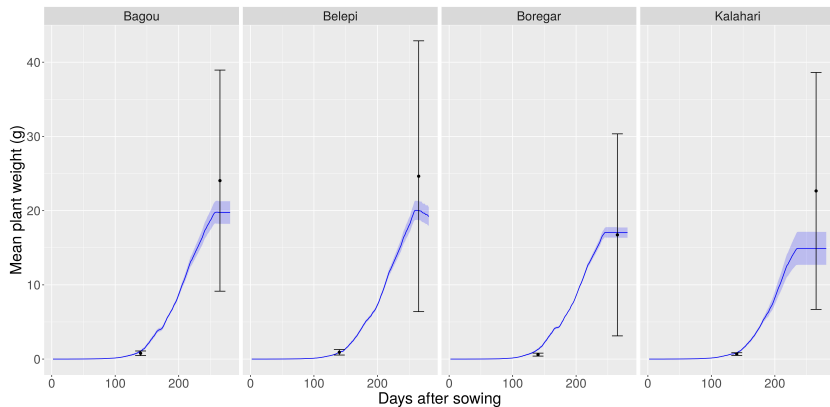
# Prédictions pour le mélange 2 en 2019

## Dynamiques de tallage



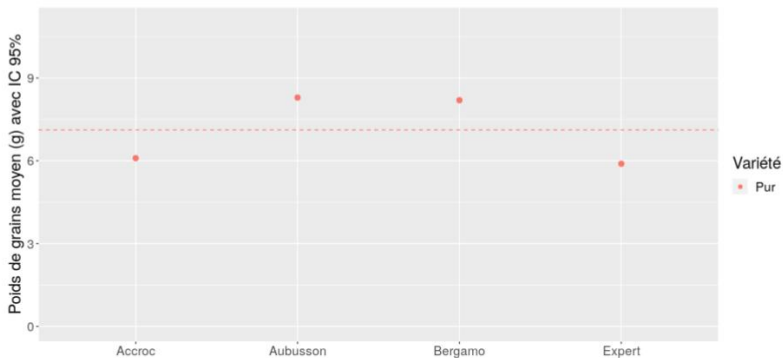
# Prédictions pour le mélange 2 en 2019

## Biomasse aérienne



# Relations de dominance

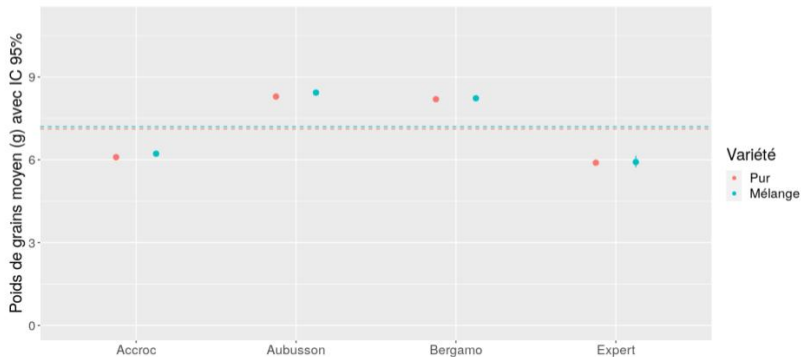
Exemple du mélange 1 en 2019 :



→ Faible variabilité simulée →  $\emptyset$  classification

# Relations de dominance

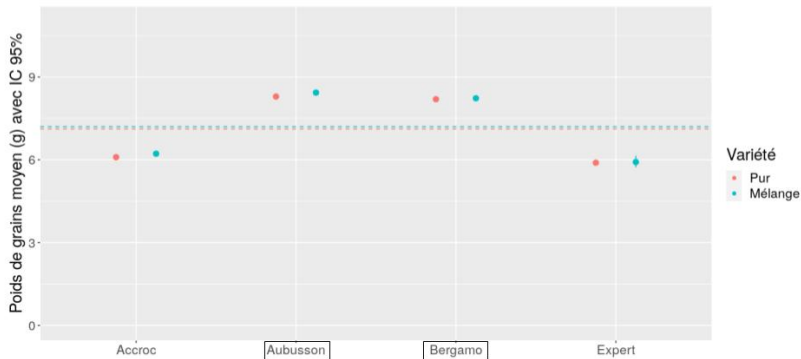
Exemple du mélange 1 en 2019 :



→ Faibles différences pur vs mélange

# Relations de dominance

Exemple du mélange 1 en 2019 :



→ Dominance en mélange calquée sur la dominance en pur

## Plasticité intra-génotypique simulée

- Calcul d'indices de plasticité pour chaque génotype  $g$  sur les variables  $v$  à la récolte → données simulées versus observées
- Sur la moyenne

$$p_{v,g} = (v_{g,mix}^- - v_{g,pur}^-) / v_{g,pur}^- \cdot 100$$

→ Faible corrélation entre plasticité simulée et observée →  
Comportements variés de plasticité en terme de moyenne

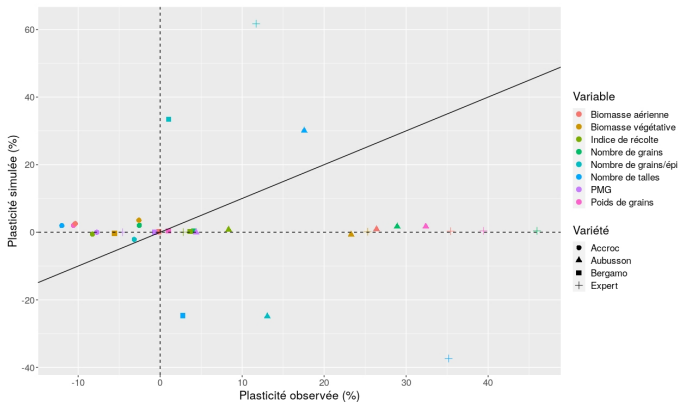
- Sur les coefficients de variation (CV)

$$p_{v,g} = (CV(v_{g,mix}) - CV(v_{g,pur})) / CV(v_{g,pur}) \cdot 100$$

→ Diversité de comportements plastiques simulées  
→ Comportements de canalisation environnementale en mélange  
(=réduction de variabilité) correctement simulés

# Indices de plasticité

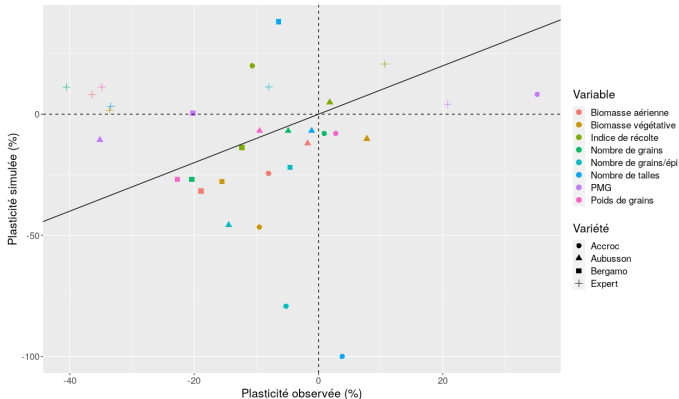
Sur les différences de moyennes sur le mélange 1, données observées vs simulées



# Plasticité intra-génotypique simulée

- Sur les coefficients de variation (CV)

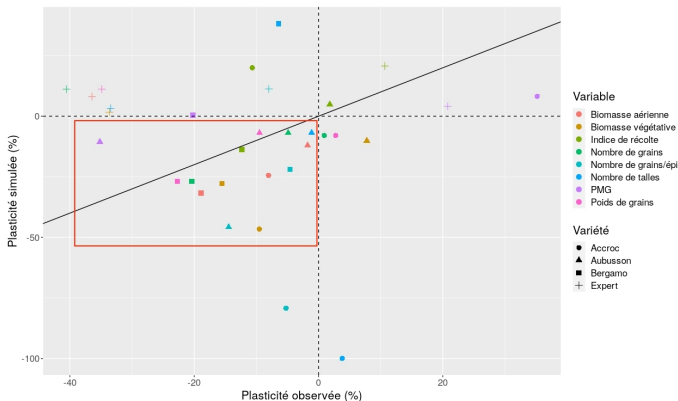
$$p_{v,g} = (CV(v_{g,mix}) - CV(v_{g,pur})) / CV(v_{g,pur}) \cdot 100$$



# Plasticité intra-génotypique simulée

- Sur les coefficients de variation (CV)

$$p_{v,g} = (CV(v_{g,mix}) - CV(v_{g,pur})) / CV(v_{g,pur}) \cdot 100$$



- Diversité de comportements plastiques simulées
- Comportements de canalisation environnementale en mélange

# Références

- Borg, J., Kiær, L., Lecarpentier, C., Goldringer, I., Gauffreteau, A., Saint-Jean, S., Barot, S. & Enjalbert, J. (2018), 'Unfolding the potential of wheat cultivar mixtures : A meta-analysis perspective and identification of knowledge gaps', *Field Crops Research* **221**, 298–313.
- Cournède, P.-H., Mathieu, A., Houllier, F., Barthelemy, D. & de Reffye, P. (2007), 'Computing Competition for Light in the GREENLAB Model of Plant Growth : A Contribution to the Study of the Effects of Density on Resource Acquisition and Architectural Development', *Annals of Botany* **101**(8), 1207–1219.
- Forst, E. (2018), Développement de méthodes d'estimation de l'aptitude au mélange pour la prédiction des performances et la sélection de mélanges variétaux chez le blé tendre et co-conception d'idéotypes de mélanges adaptés à l'agriculture biologique, PhD thesis, Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette.
- Goffe, W. L., Ferrier, G. D. & Rogers, J. (1994), 'Global optimization of statistical functions with simulated annealing', *Journal of Econometrics* **60**(1-2), 65–99.
- Guntrip, J. & Sibly, R. M. (1998), 'Phenotypic plasticity, genotype-by-environment interaction and the analysis of generalism and specialization in *Callosobruchus maculatus*', *Heredity* **81**(2), 198–204.
- Larue, F., Fumey, D., Rouan, L., Soulié, J.-C., Roques, S., Beurier, G. & Luquet, D. (2019), 'Modelling tiller growth and mortality as a sink-driven process using Ecomeristem : implications for biomass sorghum ideotyping', *Annals of Botany* **124**(4), 675–690.
- Lecarpentier, C., Barillot, R., Blanc, E., Abichou, M., Goldringer, I., Barbillon, P., Enjalbert, J. & Andrieu, B. (2019), 'WALTer : a three-dimensional wheat model to study competition for light through the prediction of tillering dynamics', *Annals of Botany* **123**(6), 961–975.
- Schauberger, B., Ben-Ari, T., Makowski, D., Kato, T., Kato, H. & Ciais, P. (2018), 'Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century', *Scientific Reports* **8**(1), 16865.