



**HAL**  
open science

## Les mélanges de génotypes vus par la génétique quantitative (et un peu par l'écologie)

Timothée Flutre

► **To cite this version:**

Timothée Flutre. Les mélanges de génotypes vus par la génétique quantitative (et un peu par l'écologie). Doctorat. Réunion du projet CoBreeding, Lusignan, France. 2023, pp.54. hal-04240813

**HAL Id: hal-04240813**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04240813v1>**

Submitted on 13 Oct 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

# Les mélanges de génotypes vus par la génétique quantitative (et un peu par l'écologie)

Timothée Flutre

Unité "Génétique Quantitative et Evolution"  
Université Paris-Saclay — INRAE — CNRS — AgroParisTech

02/10/2023

Réunion du projet CoBreeding à Lusignan

# Plan

Omniprésence des interactions sociales

Sélection de groupe vs parentèle

Effets génétiques indirects (*IGE*)

- Exemples historiques en agriculture

- Modélisation

- Cas avec données au niveau du génotype

- Cas avec données au niveau du groupe

Assemblage de mélanges

# Plan

## Omniprésence des interactions sociales

Sélection de groupe vs parentèle

Effets génétiques indirects (*IGE*)

Exemples historiques en agriculture

Modélisation

Cas avec données au niveau du génotype

Cas avec données au niveau du groupe

Assemblage de mélanges

# Catégorisation écologique des interactions

|               | Entité 1 | Entité 2 |
|---------------|----------|----------|
| Compétition   | -        | -        |
| Mutualisme    | +        | +        |
| Antagonisme*  | +        | -        |
| Amensalisme   | 0        | -        |
| Commensalisme | 0        | +        |
| Neutralisme   | 0        | 0        |

\* Prédation, parasitisme, herbivorie

# Importance en évolution

Classiquement en génét. quanti. :

$$\sigma_P^2 = \sigma_G^2 + \sigma_E^2 + \sigma_{G \times E}^2$$

Interactions écologiques : une partie du  $E$  est héritable

et donc aussi présence de  $G \times G$  et de  $G \times G \times E$

# Plan

Omniprésence des interactions sociales

Sélection de groupe vs parentèle

Effets génétiques indirects (*IGE*)

Exemples historiques en agriculture

Modélisation

Cas avec données au niveau du génotype

Cas avec données au niveau du groupe

Assemblage de mélanges

## Sélection de parentèle (*kin*)

Supposons un groupe de 2 individus,  $i$  et  $j$  :

$$W_i = \text{constant} + \beta_{W_D,P} P_i + \beta_{W_S,P} P_j + e_i$$

- ▶  $W_i$  : fitness du génotype focal
- ▶  $P_i$  ( $P_j$ ) : phénotype du caractère chez le focal (le voisin)
- ▶  $\beta_{W_D,P}$  : effet direct
- ▶  $\beta_{W_S,P}$  : effet social



## Sélection de parentèle (*kin*)

Supposons un groupe de 2 individus,  $i$  et  $j$  :

$$W_i = \text{constant} + \beta_{W_D,P} P_i + \beta_{W_S,P} P_j + e_i$$

- ▶  $W_i$  : fitness du génotype focal
- ▶  $P_i$  ( $P_j$ ) : phénotype du caractère chez le focal (le voisin)
- ▶  $\beta_{W_D,P}$  : effet direct
- ▶  $\beta_{W_S,P}$  : effet social

Si caractère = comportement altruiste (ex. Hamilton, 1964) :

- ▶  $\beta_{W_D,P}$  : mesure du “coût” pour le focal (si  $< 0$ )
- ▶  $\beta_{W_S,P}$  : mesure du “bénéfice” pour le voisin (si  $> 0$ )

## Sélection de groupe / multi-niveaux

$$W_i = \text{constant} + \beta_{W, \bar{P}_g} \bar{P}_g + \beta_{W, \Delta P} \Delta P_i + e_i$$

- ▶  $\bar{P}_g$  : moyenne du caractère dans le groupe
- ▶  $\Delta P_i$  : différence entre  $P_i$  et  $\bar{P}_g$
- ▶  $\beta_{W, \bar{P}_g}$  : effet du groupe
- ▶  $\beta_{W, \Delta P}$  : effet intra-groupe

# Equivalence

Bijma & Wade (2008) (aussi Hamilton 1975, Queller 1992, etc) :

- ▶  $\beta_{W, \bar{P}_g} = \beta_{W_D, P} + \beta_{W_S, P}$ 
  - ▶ force de la sélection inter-groupe = coût + bénéfice
  
- ▶  $\beta_{W, \Delta P} = \beta_{W_D, P} - \beta_{W_S, P}$ 
  - ▶ force de la sélection intra-groupe = coût - bénéfice

# Réponse à la sélection

Pré-requis :

- ▶ Fisher :  $P_i = A_i + E_i$ ;  $A \perp E$ ;  $\text{cov}(A_i, A_j) = r \text{var}(A)$
- ▶ Price-Robertson :  $\Delta \bar{A} = \text{cov}(W_i, A_i)$

$$\Delta \bar{A} = \frac{1}{2} \left[ \beta_{W, \bar{P}_g} (1 + r) + \beta_{W, \Delta P} (1 - r) \right] \text{var}(A)$$

# Réponse à la sélection

Pré-requis :

- ▶ Fisher :  $P_i = A_i + E_i$  ;  $A \perp E$  ;  $\text{cov}(A_i, A_j) = r \text{var}(A)$
- ▶ Price-Robertson :  $\Delta \bar{A} = \text{cov}(W_i, A_i)$

$$\Delta \bar{A} = \frac{1}{2} \left[ \beta_{W, \bar{P}_g} (1 + r) + \beta_{W, \Delta P} (1 - r) \right] \text{var}(A)$$

L'apparementement entre génotypes intra-groupe,  $r$  :

- ▶ augmente la réponse à la sélection inter-groupe
- ▶ diminue la réponse à la sélection intra-groupe

## En résumé

Deux paramètres importants :

- ▶  $r$  : apparentement entre génotypes intra-groupe
  - ▶ Sans apparentement ( $r = 0$ ), la sélection de groupe ne contribue pas.

# En résumé

Deux paramètres importants :

- ▶  $r$  : apparentement entre génotypes intra-groupe
  - ▶ Sans apparentement ( $r = 0$ ), la sélection de groupe ne contribue pas.
- ▶  $g = \beta_{W_S,P} / \beta_{W_D,P}$  : force de la sélection inter-groupe par rapport à la sélection individuelle
  - ▶ Sans sélection de groupe ( $g = 0$ ), l'apparentement ne contribue pas.

## En résumé

Deux paramètres importants :

- ▶  $r$  : apparentement entre génotypes intra-groupe
  - ▶ Sans apparentement ( $r = 0$ ), la sélection de groupe ne contribue pas.
- ▶  $g = \beta_{W_S,P} / \beta_{W_D,P}$  : force de la sélection inter-groupe par rapport à la sélection individuelle
  - ▶ Sans sélection de groupe ( $g = 0$ ), l'apparentement ne contribue pas.

→ mais ces modèles ne considèrent généralement que les effets sociaux sur la fitness et ignore les effets sociaux/indirects sur les caractères...



# Plan

Omniprésence des interactions sociales

Sélection de groupe vs parentèle

Effets génétiques indirects (*IGE*)

- Exemples historiques en agriculture

- Modélisation

- Cas avec données au niveau du génotype

- Cas avec données au niveau du groupe

Assemblage de mélanges

# Plan

Omniprésence des interactions sociales

Sélection de groupe vs parentèle

Effets génétiques indirects (*IGE*)

Exemples historiques en agriculture

Modélisation

Cas avec données au niveau du génotype

Cas avec données au niveau du groupe

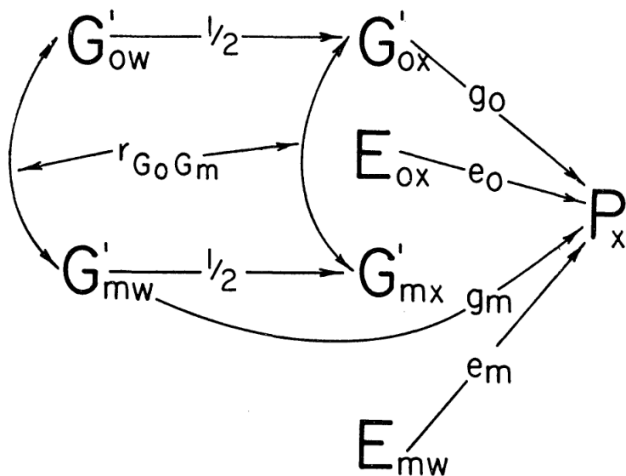
Assemblage de mélanges

## Sélection “animale” : effet maternel



<https://www.slu.se/en/departments/animal-nutrition-management/education/undergraduate-and-master-studies/>

## Sélection "animale" : effet maternel



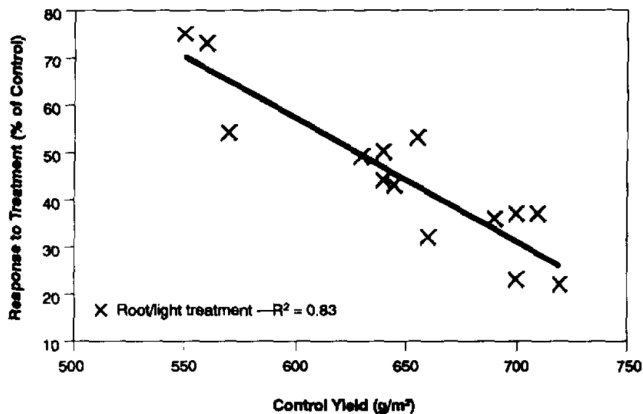
Willham (1963)

# Sélection "végétale" : compétition pour les ressources



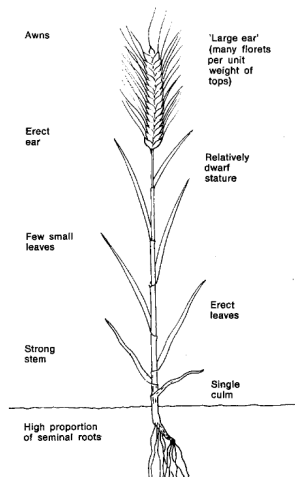
Pépinière de blé tendre, projet MoBiDiv, Saclay, 14/06/2021 ©T. Flutre

## Sélection "végétale" : compétition pour les ressources



Reynolds et al (1994)

# Sélection "végétale" : compétition pour les ressources



Donald (1968) : un idéotype de blé conçu pour obtenir le rendement le plus élevé au niveau du groupe (*crop community*)

# Plan

Omniprésence des interactions sociales

Sélection de groupe vs parentèle

**Effets génétiques indirects (*IGE*)**

Exemples historiques en agriculture

**Modélisation**

Cas avec données au niveau du génotype

Cas avec données au niveau du groupe

Assemblage de mélanges



## Griffing (1967)

Groupe de  $n$  génotypes :

$$\begin{aligned}P_i &= A_i + E_i \\&= A_{D,i} + \sum_{j \neq i}^{n-1} P_{S,j} + E_{D,i} \\&= A_{D,i} + \sum_{j \neq i}^{n-1} (A_{S,j} + E_{S,j}) + E_{D,i}\end{aligned}$$

## Valeur génétique additive totale

Classiquement,  $A_i$  est la somme des effets de substitution des gènes du génotype  $i$  sur la valeur du caractère de  $i$  lui-même.

Mais là,  $totA_i$  représente l'effet héritable de  $i$  sur la valeur moyenne du caractère *de la population* :

$$totA_i = A_{D,i} + (n - 1)A_{S,i}$$

→  $A_{S,i}$  n'affecte pas la valeur du caractère du génotype  $i$  mais de ses voisins  $j \neq i$

## Valeur génétique additive totale

Classiquement,  $A_i$  est la somme des effets de substitution des gènes du génotype  $i$  sur la valeur du caractère de  $i$  lui-même.

Mais là,  $totA_i$  représente l'effet héritable de  $i$  sur la valeur moyenne du caractère *de la population* :

$$totA_i = A_{D,i} + (n - 1)A_{S,i}$$

→  $A_{S,i}$  n'affecte pas la valeur du caractère du génotype  $i$  mais de ses voisins  $j \neq i$

$$\sigma_{totA}^2 = \sigma_{A_D}^2 + 2(n - 1)\sigma_{A_{DS}} + (n - 1)^2\sigma_{A_S}^2$$

# Réponse à la sélection

Bijma & Wade (2008) :

$$\overline{\Delta totA} = \beta_{W_D, P} [(g + r + (n - 2)gr)\sigma_{totA}^2 + (1 - g)(1 - r)(\sigma_{A_D}^2 + (n - 1)\sigma_{A_{DS}})]$$

- ▶ 1er terme : contribution de l'apparement et de la sélection de groupe ; toujours dans le même sens que la sélection
- ▶ 2e terme : complément ; peut être négatif
  - ▶ négatif typiquement quand compétition pour ressources
  - ▶ stratégie : sélectionner des groupes ( $g = 1$ ) de clones ( $r = 1$ )
    - ▶ ex. "végétal" : parcelles de lignées pures

# Plan

Omniprésence des interactions sociales

Sélection de groupe vs parentèle

**Effets génétiques indirects (*IGE*)**

Exemples historiques en agriculture

Modélisation

**Cas avec données au niveau du génotype**

Cas avec données au niveau du groupe

Assemblage de mélanges

## Exemple “animal” : poulet



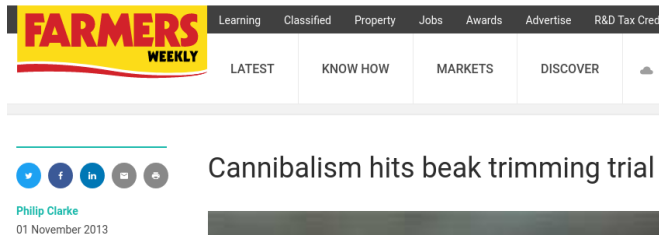
<https://www.dailymail.co.uk/news/article-8086869/Shoppers-urged-buy-white-eggs-come-aggressive-hens.html>

## Exemple "animal" : poulet



<https://www.britannica.com/topic/poultry-farming>

# Exemple “animal” : poulet

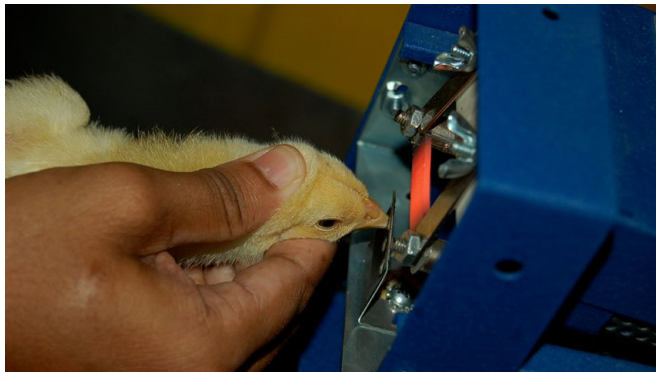


The screenshot shows the top navigation bar of the Farmers Weekly website. The logo is on the left, and navigation links include Learning, Classified, Property, Jobs, Awards, Advertise, and R&D Tax Cred. Below the navigation bar are four main content categories: LATEST, KNOW HOW, MARKETS, and DISCOVER. The article title "Cannibalism hits beak trimming trial" is prominently displayed, along with the author's name "Philip Clarke" and the date "01 November 2013". Social media sharing icons for Twitter, Facebook, LinkedIn, Email, and Print are visible to the left of the article title.

<https://www.fwi.co.uk/livestock/poultry/cannibalism-hits-beak-trimming-trial>

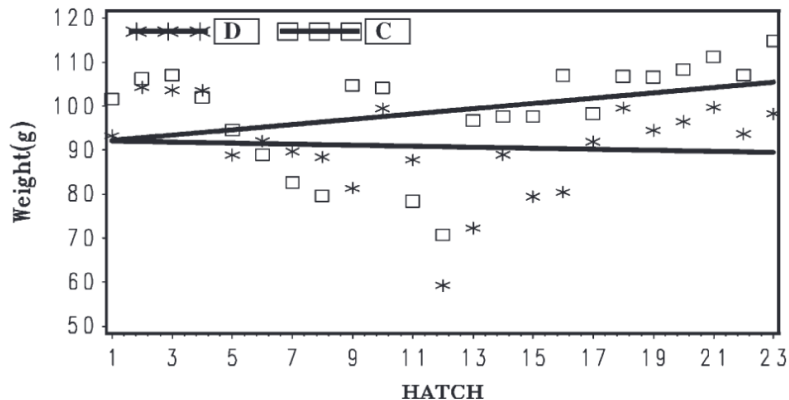


## Exemple “animal” : poulet



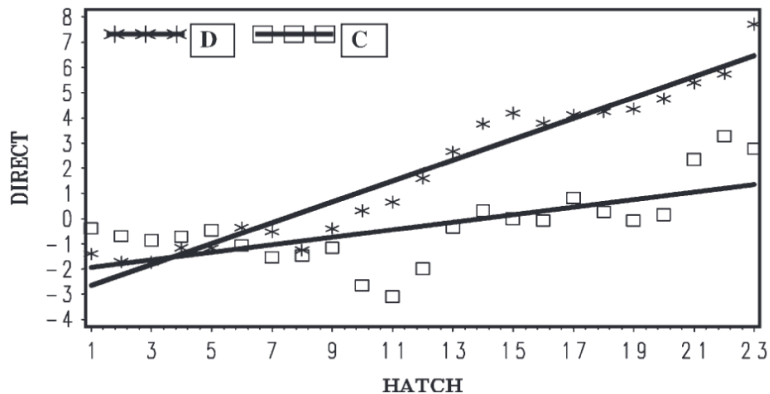
<https://www.hightoppoultry.com/debeak-chickens-debeaking-beak-trimming-tips/>

# Comparaison expérimentale



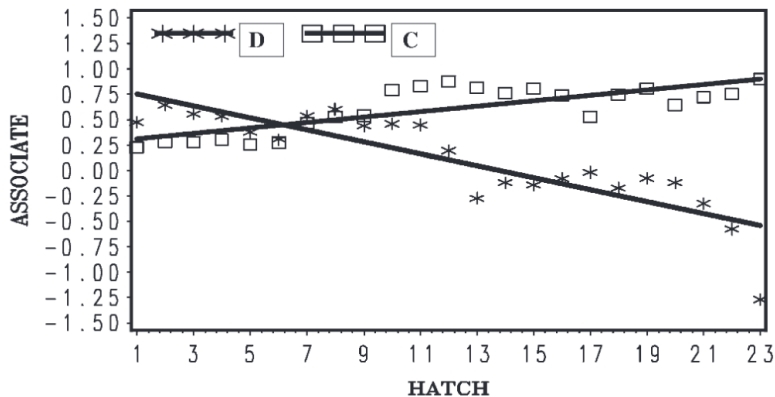
Muir (2005)

# Comparaison expérimentale



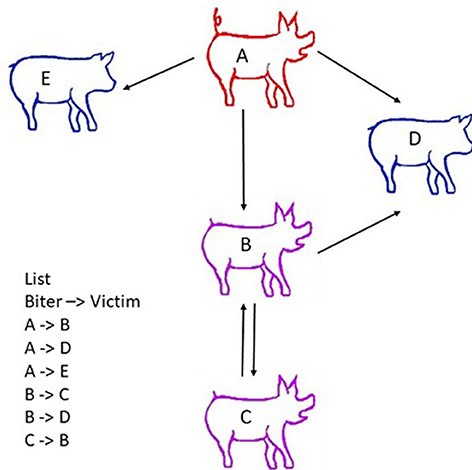
Muir (2005)

# Comparaison expérimentale



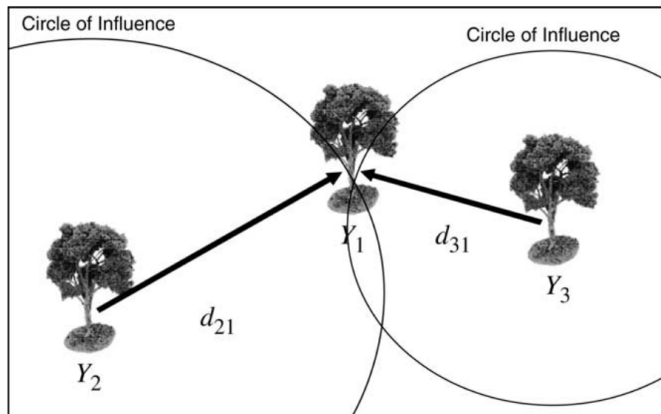
Muir (2005)

## Exemple "animal" : porc



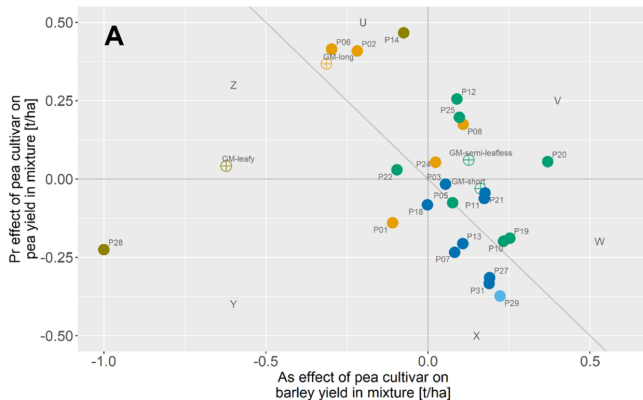
Canario et al (2020)

## Exemple “végétal” : arbres



Muir (2005) ; voir aussi Cappa & Cantet (2008)

# Exemple “végétal” : céréale-légumineuse



Haug et al (2023)

## Exemple “végétal” : céréale-légumineuse

c.f. CoBreeding C.1.c (V. Freitas, J. Enjalbert, T. Flutre, J.-M. Gilliot) et MoBiDiv 4.1.c (J. Salomon, J. Enjalbert, T. Flutre)



# Plan

Omniprésence des interactions sociales

Sélection de groupe vs parentèle

**Effets génétiques indirects (*IGE*)**

Exemples historiques en agriculture

Modélisation

Cas avec données au niveau du génotype

**Cas avec données au niveau du groupe**

Assemblage de mélanges

## Exemple "végétal" : mélanges variétaux et d'espèces

Exemple de mélanges variétaux 50/50 à partir de 5 génotypes :

|    | G1 | G2       | G3       | G4       | G5       |
|----|----|----------|----------|----------|----------|
| G1 |    | $y_{12}$ | $y_{13}$ | $y_{14}$ | $y_{15}$ |
| G2 |    |          | $y_{23}$ | $y_{24}$ | $y_{25}$ |
| G3 |    |          |          | $y_{34}$ | $y_{35}$ |
| G4 |    |          |          |          | $y_{45}$ |

Griffing (1956)

Modélisation en effets fixes :

$$E[y_{12}] = \mu + \frac{GMA_1 + GMA_2}{2} + SMA_{12}$$

$$\blacktriangleright \widehat{GMA}_1 = \frac{y_{12} + y_{13} + y_{14} + y_{15}}{4} - \hat{\mu}$$

$$\blacktriangleright \widehat{SMA}_{12} = y_{12} - \hat{\mu} - \frac{\widehat{GMA}_1 + \widehat{GMA}_2}{2}$$

## Exemple “végétal” : mélanges variétaux et d'espèces

Forst et al (2019) :

- ▶ gestion de designs incomplets (modèle mixte, ReML+BLUP)
- ▶ inclusion des pures dans l'analyse ( $SMA_{ii}$ )
- ▶ prise en compte des probabilités de voisinage
- ▶ généralisation à des mélanges d'ordre  $> 2$

## Exemple “végétal” : mélanges variétaux et d'espèces

Rendement total :

$$\blacktriangleright y_{ijk} = x_{i(j)k} + x_{j(i)k}$$

Rendements partiels :

$$\blacktriangleright x_{i(j)k} = \frac{1}{2} (\mu + DGE_i + IGE_j) + (DGE_i \times IGE_j) + \epsilon_{i(j)k}$$

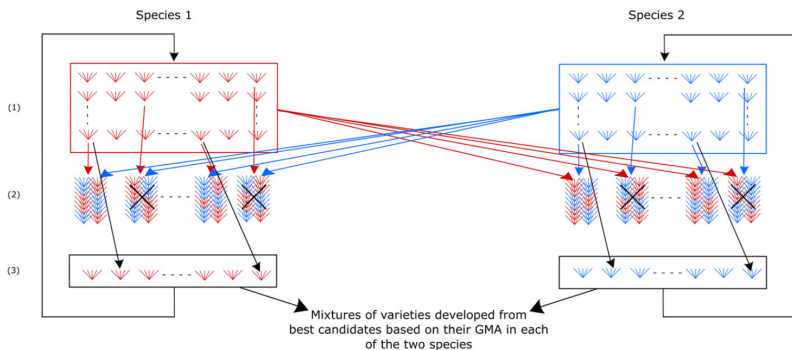
$$\blacktriangleright x_{j(i)k} = \frac{1}{2} (\mu + DGE_j + IGE_i) + (DGE_j \times IGE_i) + \epsilon_{j(i)k}$$

Lien entre les deux modélisations :

$$\blacktriangleright GMA_i = DGE_i + IGE_i$$

$$\blacktriangleright SMA_{ij} = (DGE_i \times IGE_j) + (DGE_j \times IGE_i)$$

# Exemple “végétal” : mélanges variétaux et d'espèces



**Figure 2** Parallel recurrent selections for General Mixture Ability (SGMA) in two species. (1): Populations of selection candidates at cycle  $n$ , (2): Experimental evaluation of mixtures of progeny families of selection candidates from one species with a bulk of all progeny families of candidates from the other species, (3): Recombination of the selected candidates.

Sampoux et al (2019)

## Exemple “animal” : truite

c.f. CoBreeding C.2.a (G. Rovere, F. Phocas, S. Allais, S. Pouil)

# Plan

Omniprésence des interactions sociales

Sélection de groupe vs parentèle

Effets génétiques indirects (*IGE*)

- Exemples historiques en agriculture

- Modélisation

- Cas avec données au niveau du génotype

- Cas avec données au niveau du groupe

Assemblage de mélanges

## Effet portfolio vue par l'écologie

Si les fluctuations imprévisibles de l'environnement ne peuvent plus être autant tamponnées par les intrants de synthèse, les  $\sigma_E^2$ ,  $\sigma_{G \times E}^2$  et  $\sigma_{G \times G \times E}^2$  vont augmenter.

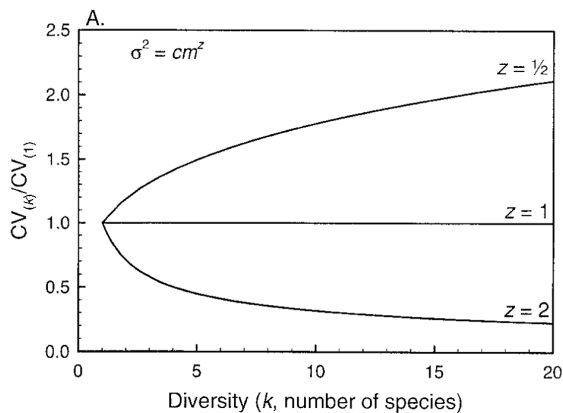
Risque = aléa  $\times$  vulnérabilité (Veyret & Reghezza, 2005)

- ▶ groupes diversifiés  $\rightarrow$  vulnérabilité diminuée ?

Exemples documentés en gestion des épidémies.

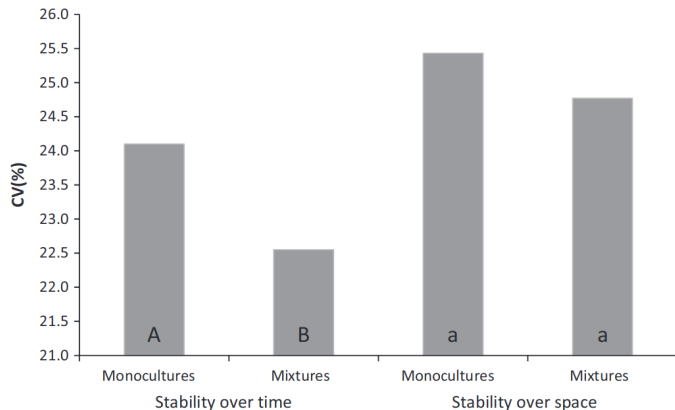


# Effet portfolio vue par l'écologie












Tilman et al (1998)

## Ex. des mélanges variétaux de céréales



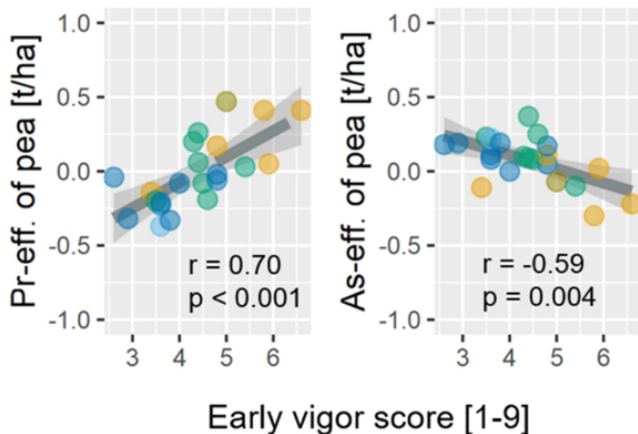
Reiss & Drinkwater (2018)

# Liens entre aptitude au mélange et caractères

| $GMA_{pea}$   | $Pr_{pea}$  | $As_{pea}$  | Biological interaction-function (BIF) of pea trait | pattern |
|---|---|---|--|---------|
|  |  |  | Commensalism                                       | +/0     |
|   |   |   | Commensalism                                       | 0/+     |
|   |   |   | Mutualism  | +/+     |
|  |  |  | Antagonism   | +/-     |
|   |   |   | Antagonism   | -/+     |
|   |   |   | Neutralism   | 0/0     |
|  |  |  | Amensalism   | 0/-     |
|   |   |   | Amensalism   | -/0     |
|   |   |   | Competition  | -/-     |

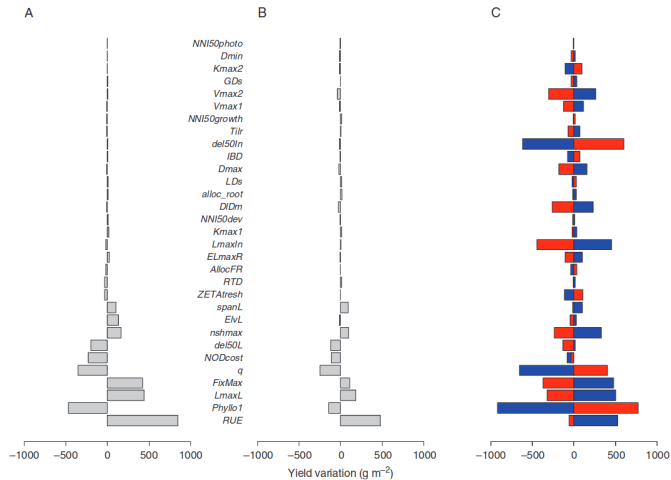
Haug et al (2023)

## Liens entre aptitude au mélange et caractères



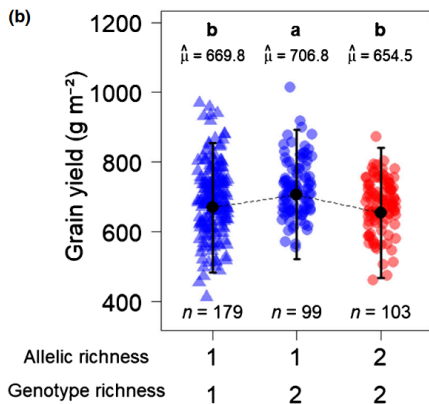
Haug et al (2023)

# Assemblage de caractères



Louarn et al (2020)

# Assemblage d'allèles



Montazeaud et al (2022)

# Remerciements

J. Enjalbert, ainsi que les partenaires du projet ANR PPR MoBiDiv