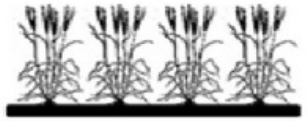
Mobiliser et Sélectionner la diversité cultivée intra- et inter-spécifique

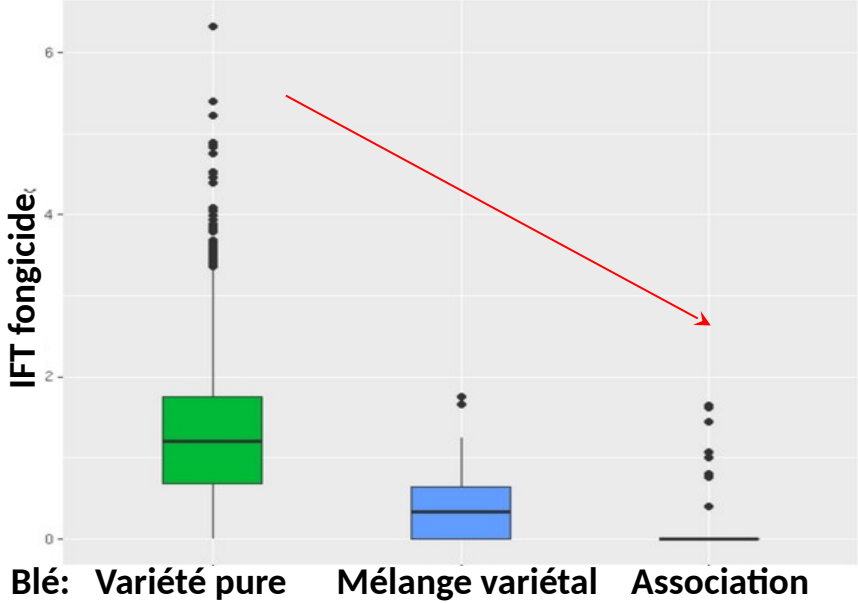
pour un changement systémique vers une agriculture zéro-pesticide

Jérôme Enjalbert, Aline Fugeray-Scarbel

Réunion ASF, Dijon, 10 Mai 2022

Mélanger des variétés et des espèces pour une agriculture zéro-pesticides

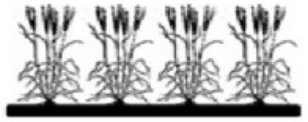


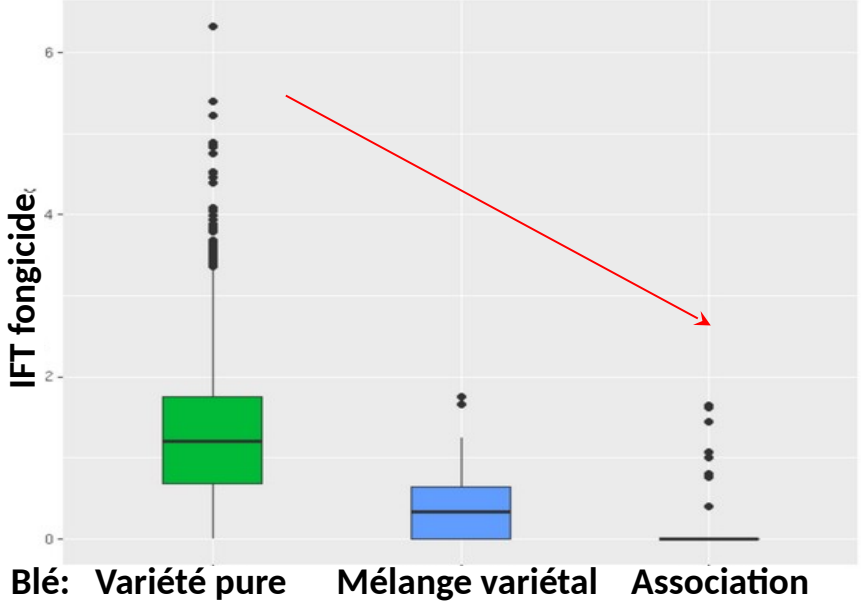


Réseau DEPHY
stat. 2005 - 2018
6600 obs.
Merhben et al. unpublished

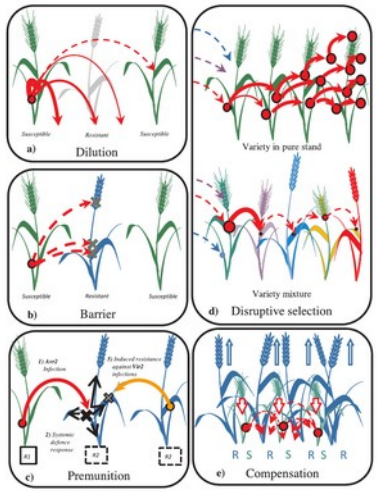
→ Augmenter la diversité intra-parcelle réduit l'utilisation des pesticides

Mélanger des variétés et des espèces pour une agriculture zéro-pesticides





Réseau DEPHY
stat. 2005 - 2018
6600 obs.
Merhben et al. unpublished



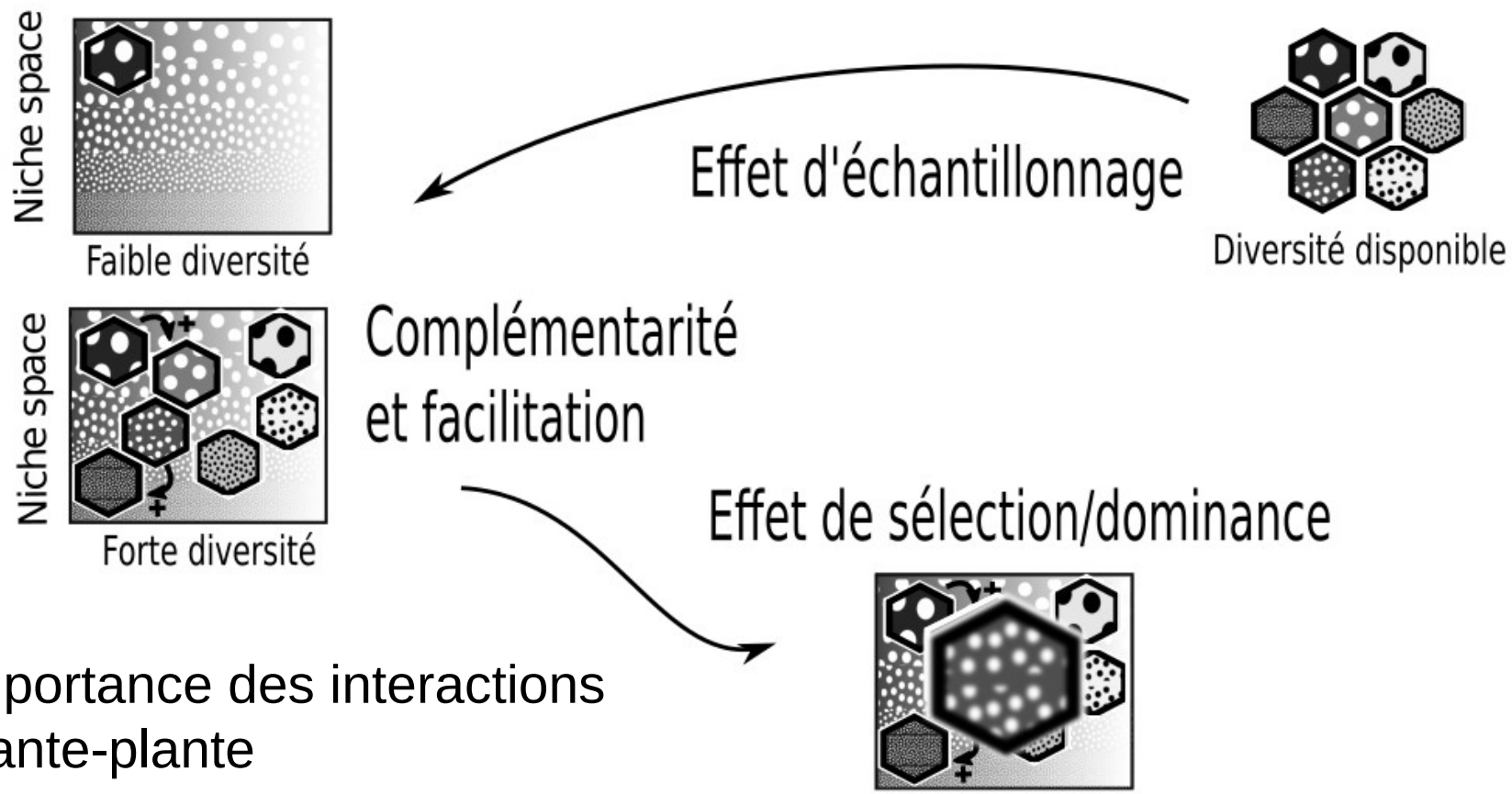
→ Augmenter la diversité intra-parcelle réduit l'utilisation des pesticides

- Effet documenté sur le contrôle des maladies, ravageurs et adventices (Borg et al. 2018)
- Effet reconnu de la diversification sur la stabilité des productions

(eg. Li,..., van der Werf 2020; Paut et al. 2020)

Diversité intra-parcelle : bénéfices attendus

Barot et al. 2017

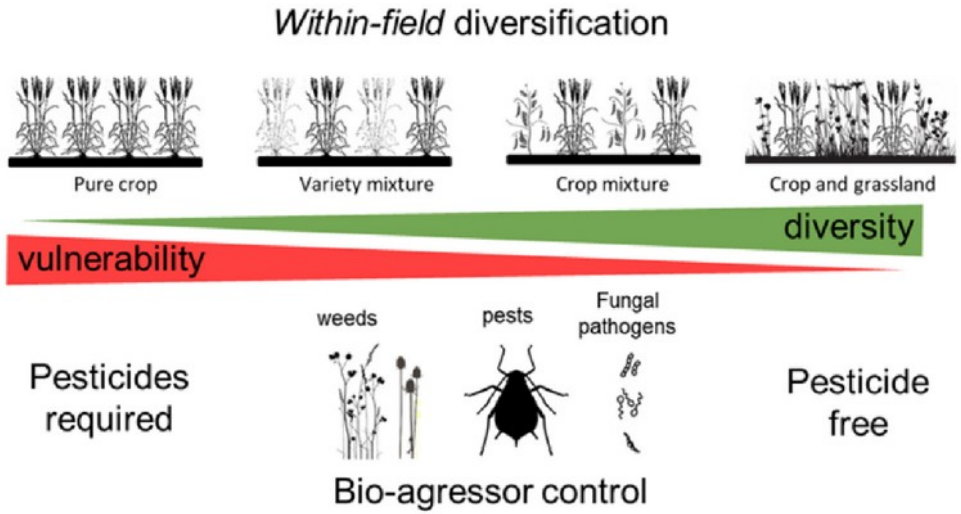


- Importance des interactions plante-plante

→ Complémentarité, facilitation/synergies et effets de sélection
→ Repose sur la disponibilité en semences diversifiées

MoBiDiv: Mobiliser la diversité intra-parcelle tout au long des systèmes semenciers

- Principe central en agroécologie: mobiliser la diversité intra-parcelle booste les régulations naturelles et réduit la dépendance aux pesticides



- Objectif du projet: créer des méthodes et outils pour sélectionner, assembler, inscrire et évaluer des variétés pour une agriculture zéro-pesticide

- Centré sur quelques espèces modèles:
  - Le blé, fort utilisateur de pesticides en France
  - Le pois, une bonne légumineuse partenaire
  - Les plantes fourragères, emblématiques pour la biodiversité et les services ecosytémiques

Objectifs clé des WorkPackages

WP1: BDD nationales

Analyse des dynamiques de diversification intra-parcelle en France, impact sur les pressions biotiques, la biodiversité et l'usage des pesticides.

Méthode: *Statistiques - Données: réseaux DEPHY, OAB, RPG + utilisation phytos*

WP2: En laboratoire

Identification des mécanismes d'interaction plante-plante et impact sur le contrôle des ravageurs, adventices et maladies

Méthode: *Modélisation, approches génétiques et moléculaires*

WP3: Au champ

Evaluation de l'impact de la diversification sur le contrôle des bioagresseurs

Méthode: *Essais au champ: 4 essais communs et 2 essais spécifiques*

WP4: En entreprise / exploitation

Conception de méthodes utilisables pour sélectionner et assembler des mélanges de variétés et d'espèce

Méthode: *Modélisation, analyse de données dans les réseaux d'agriculteurs et les stations expérimentales*

WP5: Acteurs / Filière

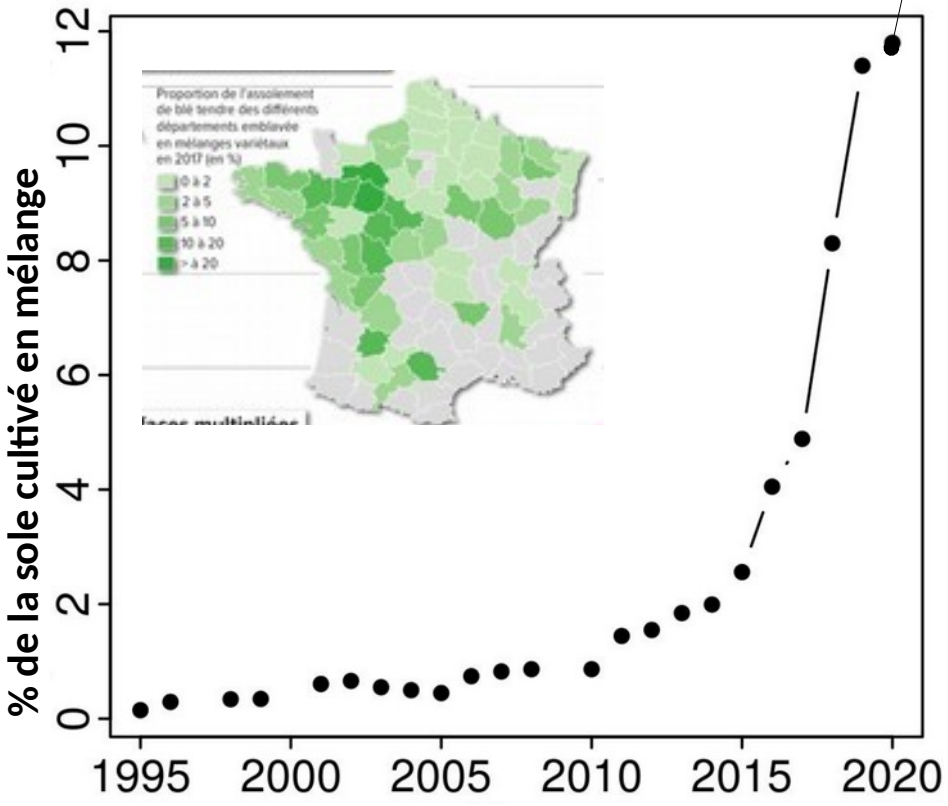
Définition d'outils et de politiques pour favoriser l'implication des acteurs économiques dans une stratégie de diversification

Méthode: *Approches participatives (sélectionneurs, réseaux d'agriculteurs), enquêtes filière, modélisation micro-économique*

Focus sur les associations variétales de blé tendre

Actualité des mélanges variétaux en blé tendre :

Mélange variétal blé tendre en France



Variétés	Année inscription	Classe technologique ARVALIS	Avis de la meunerie 2021		% des surfaces nationales	Nombre d'hectares
			Agriculture conventionnelle	Agriculture biologique		
Mélanges intraspécifiques					17,0	822 996
CHEVIGNON	2017	BPS	BPMF	BPMF	13,8	669 687
KWS EXTASE	2018	BPS	VRM	-	6,5	313 123
LG ABSALON	2016	BP	VRM	BPMF	5,9	284 585
COMPLICE	2016	BPS	BPMF	-	3,5	167 647
RGT SACRAMENTO	2014	BPS	BPMF	-	2,8	135 164
RGT CESARIO	2016	BPS	BPMF	-	1,9	92 231
OREGRAIN	2012	BPS	VRM	-	1,9	91 207
FILON	2017	BPS	BPMF	BPMF	1,9	90 549
FRUCTIDOR	2014	BPS	VRM	-	1,8	88 493
RUBISKO*	2012	BP	BPMF	VRM	1,8	85 051

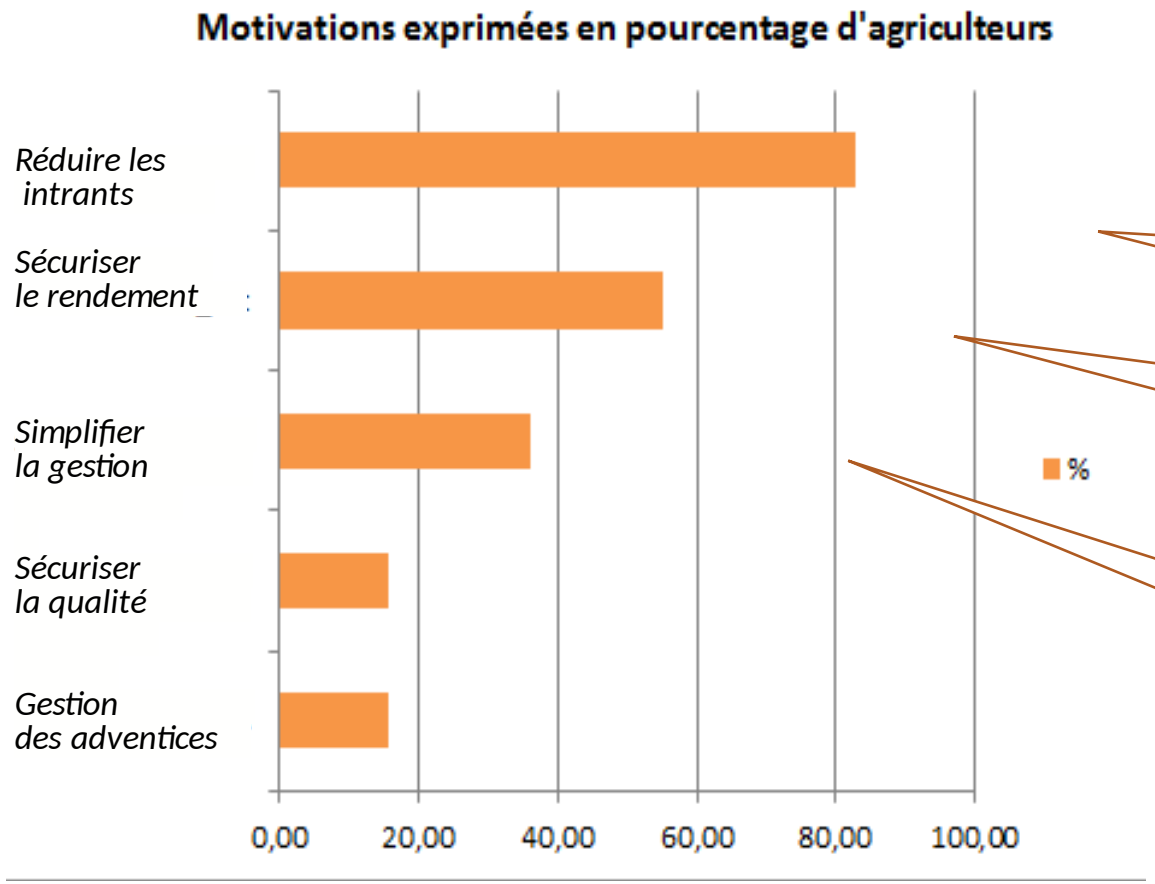
VRM : Variété Recommandée par la Meunerie / BPMF : Blé pour la Meunerie Française
**Ces variétés, en cumul, ne doivent pas dépasser 15 % dans les mélanges BPMF panifiables*

Blé tendre : 17 % mélanges intraspécifique,
1 % de mélange interspécifique

(Triticale : 20 % de mélanges)

→ Source : Arvalis BVA

Pourquoi les agriculteurs mélangent-ils leurs variétés?



Enquête diffusée aux « mélangeurs » (58 réponses) + Analyse de 3 forums (ACE, Agricool et Agriavis)

- Moins d'incidence des maladies
- Moins de risque de contournement
- Progression plus lente de la maladie

- Moins d'impact des maladies
- Rattrapage sur stress précoces
- Plus de variétés sur la parcelle et l'exploitation

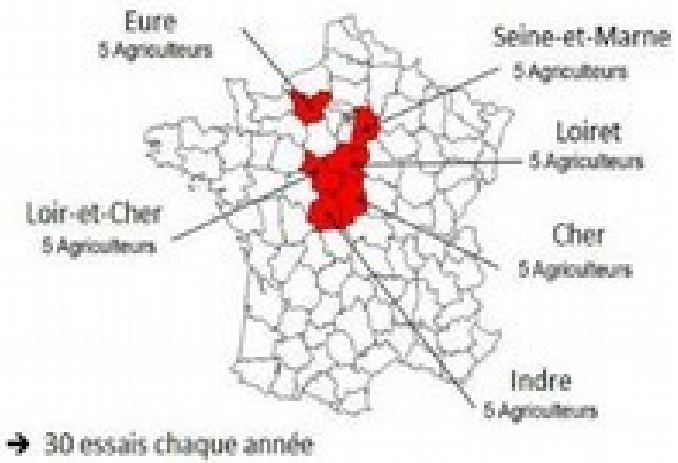
- Simplification semis, récolte, stockage
- Plus de temps pour traiter

30 enquêtes détaillées : Stage M1 Bintou DIOP

→ recherche d'une stabilité plus que de produire les derniers quintaux

Idéotypage participatif

- **Assembler des variétés pour s'adapter au contexte local**
  - Démarche d'idéotypage participatif:
    - Co-conception de règles d'association (techniciens/agriculteurs/chercheurs)
    - Évaluation à la ferme des mélanges : 6 CA, 36 agriculteurs, 2015-2018



- Conventionnel et Agriculture Biologique

Résultats de l'idéotypage

→ une grande diversité de mélanges co-construits

	Mélange	Pure
Moyenne	103%	100%
Ecart-type	6%	8%
Rdt < 95%	6%	25%

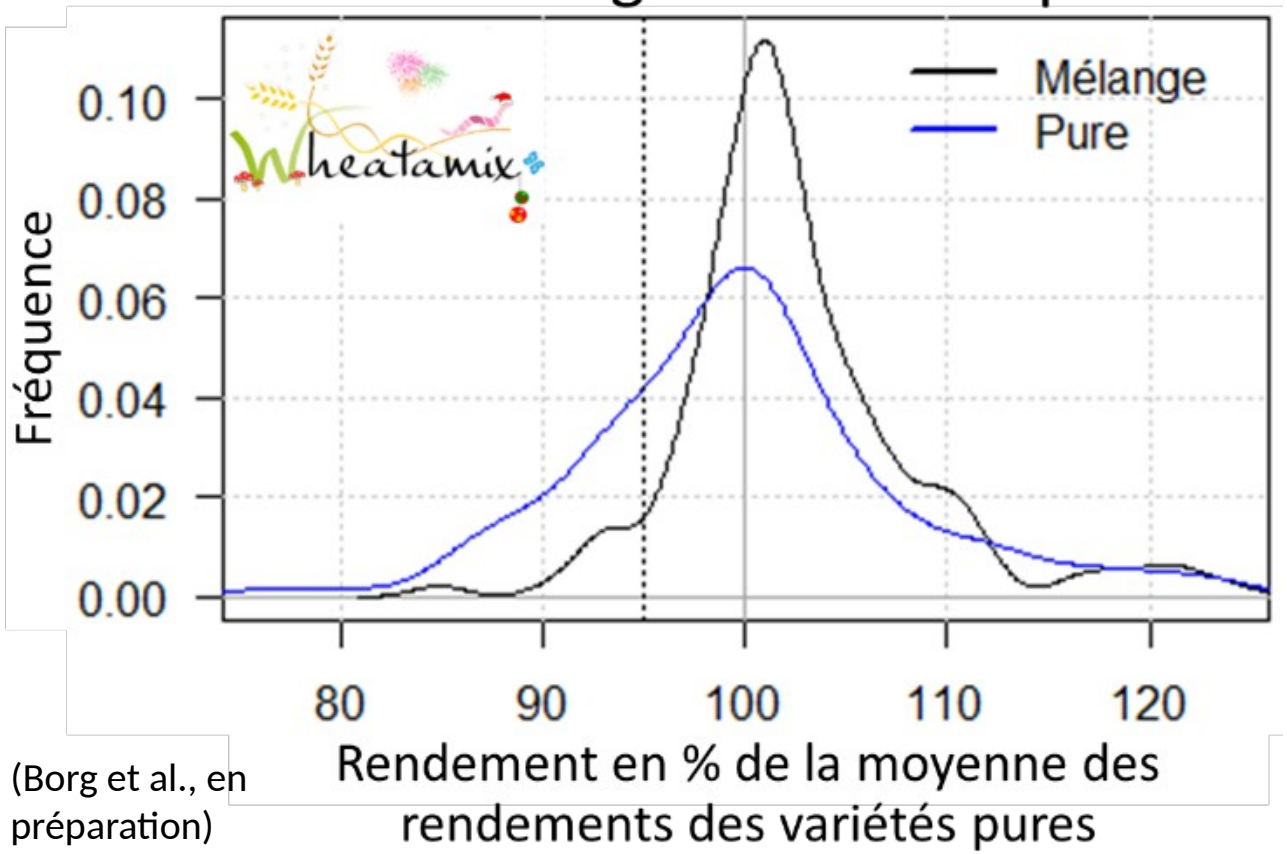
→ Gains de rendement dans 2/3 des cas

→ Effet stabilité /gestion du risque prépondérant

→ Mélange > variété pariée par l'agriculteur

- 90% des cas en 2015 et 2016
- 35% des cas en 2017

135 mélanges + variétés pures



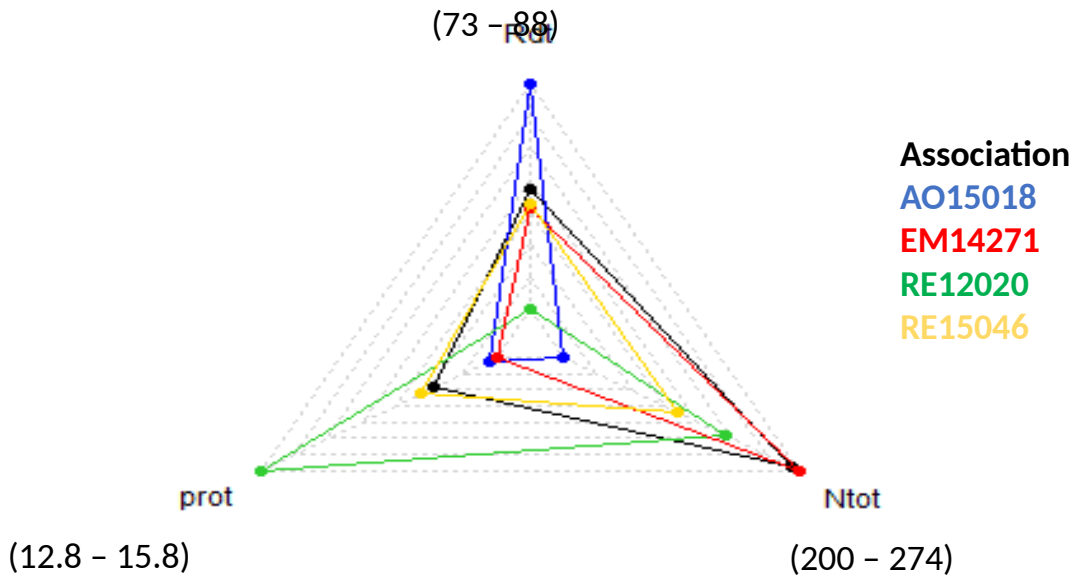
(Borg et al., en préparation)

→ Augmenter la diversité intra-parcelle augmente la stabilité du rendement

Les mélanges limitent les risques d'accidents en limitant les risques de mauvais choix.

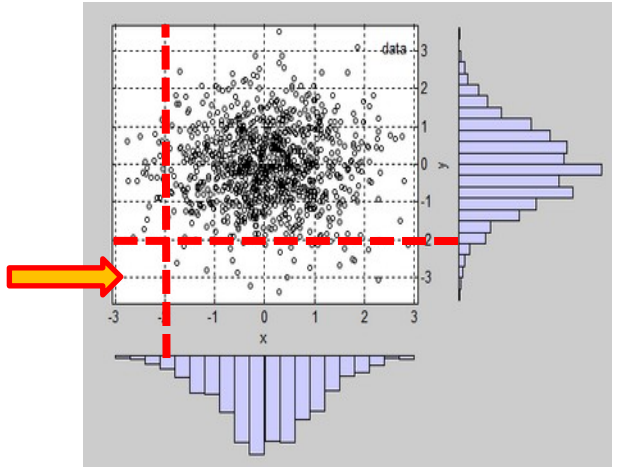
Qualité et associations variétales de blé tendre

Projet IVD Blade
INRAE - AgriObtention



- Bonne qualité de panification
- Moyen pour concilier production et qualité
- Mettre un blé de force pour sécuriser la TP → peu efficace

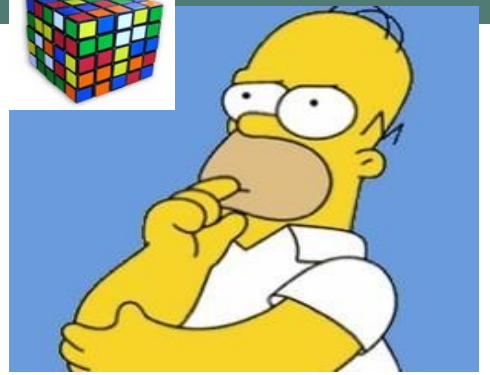
Intérêt génétique des associations variétales vs. lignées



- **Relâche la contrainte de sélection** en multitrait (et multiservices)
- Permet la combinaison de traits génétiquement incompatibles ou **négativement corrélés**
- Permet la combinaison de **valeurs contrastées** pour un trait
- Permet de valoriser des variétés d'intérêt dont les résistances ont été contournées

→ **Nouveaux objectifs de sélection: l'aptitude au mélange**

Sélectionner pour l'aptitude au mélange



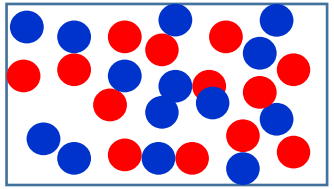
- *Sélectionner pour les mélanges: un casse tête…*
  → combinatoire infernale, quasi-infinité de combinaisons

- <u>Première stratégie : estimer l'aptitude au mélange</u> : Modèle GMA/SMA Forst et al. 2019

	G1	G2	G3	G4	G5
G1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}
G2	SMA_{12}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}	Y_{25}
G3			Y_{33}	Y_{34}	Y_{35}
G4				Y_{44}	Y_{45}
G5					Y_{55}

→ GMA_1

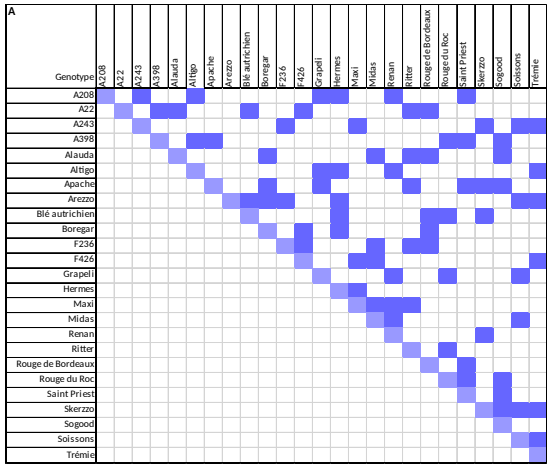
Evaluation sur composantes en mélange



$$Y_{12} = \mu + \tfrac{1}{2}\,(GMA_1 + GMA_2) + SMA_{12}$$

Application en mélange binaire

Emma Forst,
I. Goldringer
T. Mary-Huard
C. Ambroise,
S. Robin



- <u>Panel de</u> ***25 genotypes***
- Variétés élites, AB, landraces, et MAGIC INRAE
- <u>Mélanges:</u> ***75 mélanges binaires***

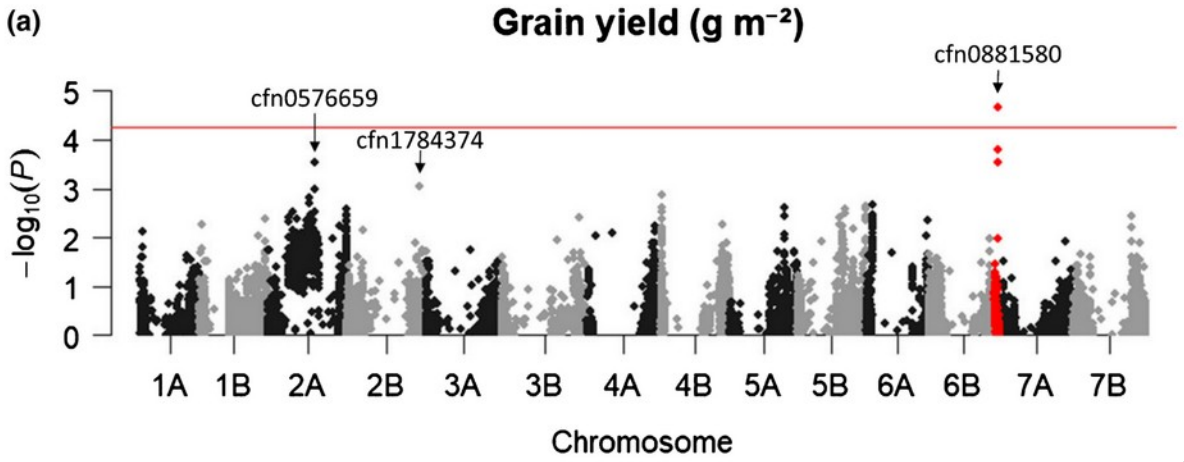
- Correlation entre **rendement** des mélanges et rendement moyen des composantes en pures: **0.51**
- Correlation entre rendement observé de mélanges *vs* prédit: **0.88** (basé sur GMA-SMA)

* Des effets SMA faibles *Forst et al. 2019*

* Des schémas de sélection sur testeurs envisageables

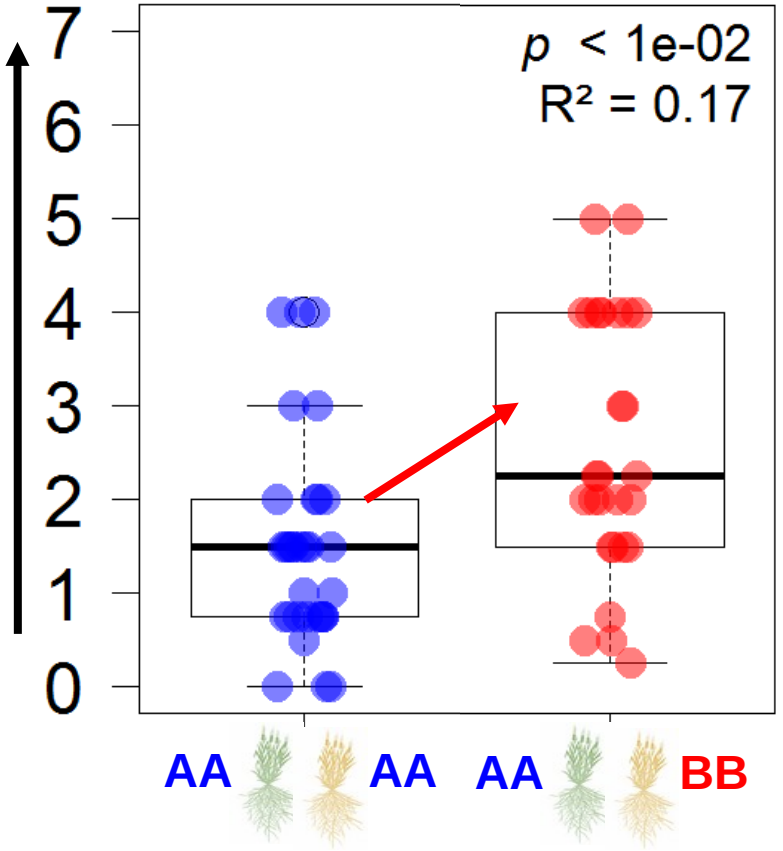
Utilisation des effets génétiques indirects: approche GWAS

Experimentation : ~350 paires aléatoires de lignées (Bé dur)



Montazeaud et al, 2022

STB symptoms



La combinaison d'allèles différents entre voisins augmente le niveau de septoriose

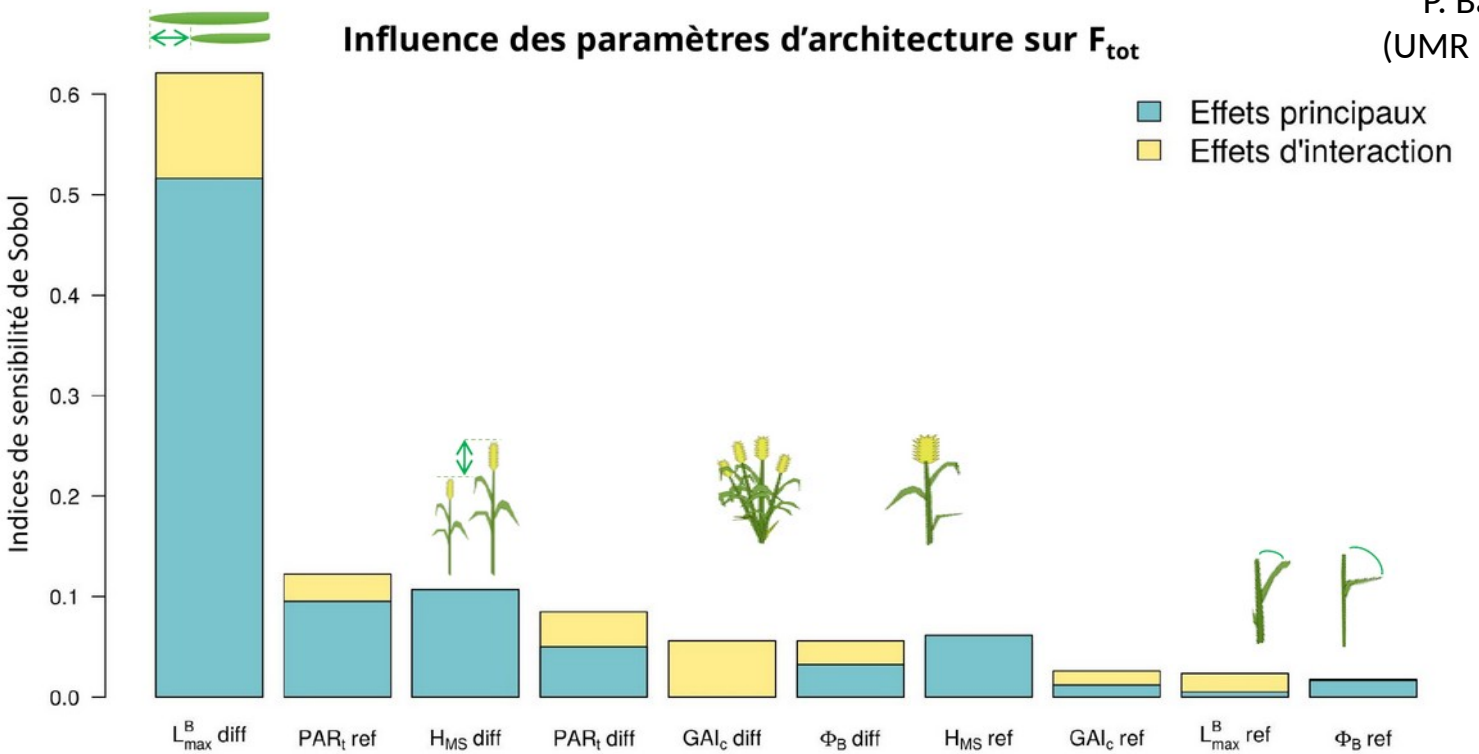
WALTer : Modéliser les mélanges de blé

E. Blanc
P. Barbillon
(UMR MIA-Paris)

Front Plant Sci. 2021; 12: 734056. PMCID: PMC8511389
Published online 2021 Sep 29. doi: 10.3389/fpls.2021.734056 PMID: 34659301

Functional–Structural Plant Modeling Highlights How Diversity in Leaf Dimensions and Tillering Capability Could Promote the Efficiency of Wheat Cultivar Mixtures

Emmanuelle Blanc,[1,*] Pierre Barbillon,[2] Christian Fournier,[3] Christophe Lecarpentier,[4] Christophe Pradal,[5,6] and Jérôme Enjalbert[1,*]



→ La modélisation peut identifier les interactions entre traits critiques pour la conception de mélanges performants

Diversité intra-parcelle : interactions plante-plante

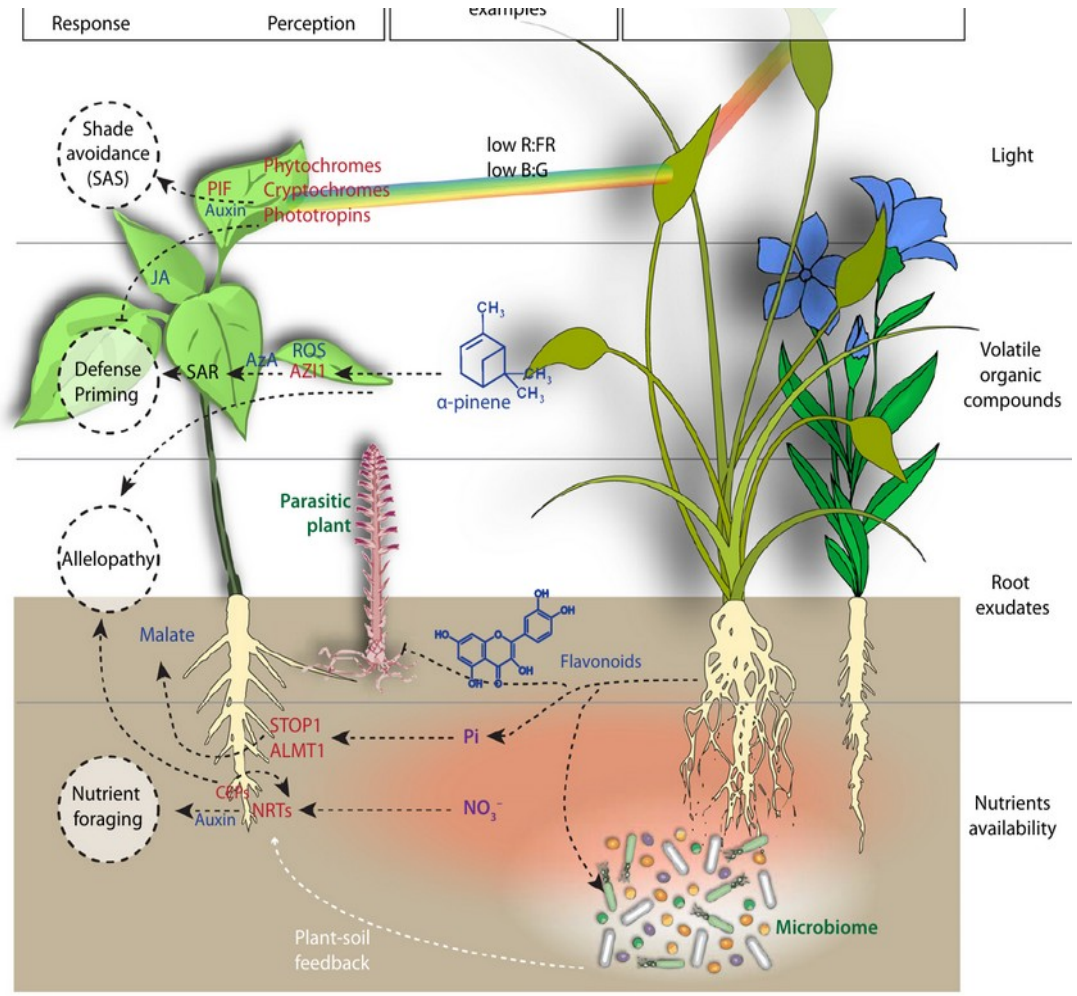
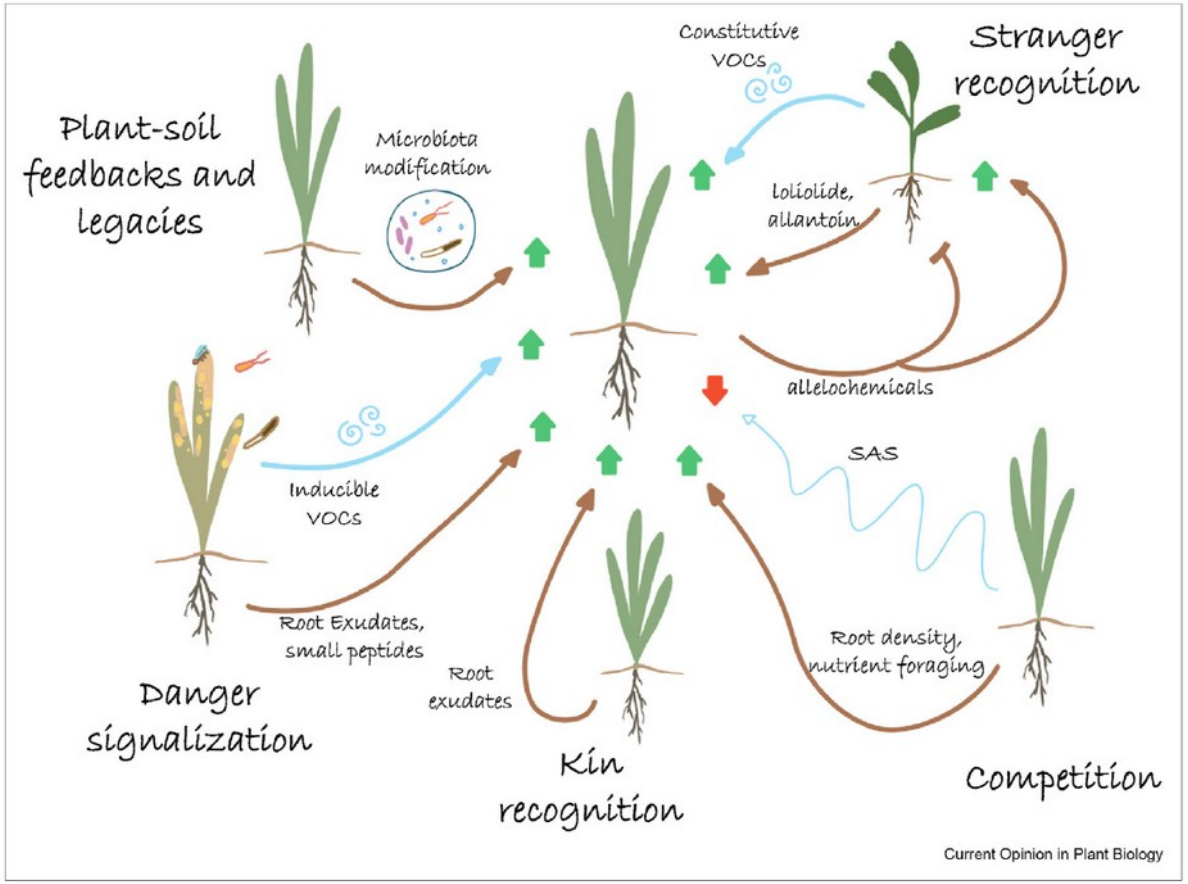


Figure 1. Neighbor detection and response strategies in plant–plant interactions.

Subrahmaniam et al. 2019

- Différents signaux perçus :
  - Lumière
  - COV
  - Exsudats racinaires
  - Éléments nutritifs
- Effets sur :
  - Accès et utilisation des ressources
  - Allélopathie
  - Croissance

Diversité intra-parcelle : interactions plante-plante



Pélissier et al. 2021

- Différents signaux perçus :
  - Lumière
  - COV
  - Exsudats racinaires
  - Éléments nutritifs

- Effets sur :
  - Accès et utilisation des ressources
  - Allélopathie
  - Croissance
  - Immunité : neighbor-mediated immunity

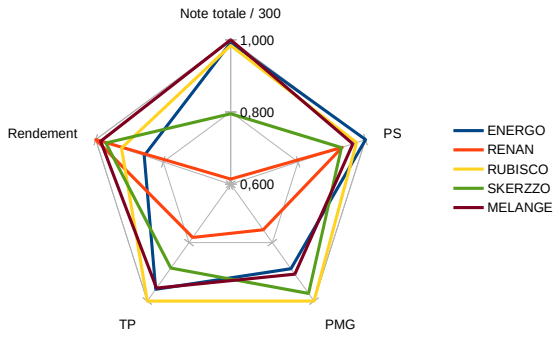
- Interactions possibles : *commensalisme, mutualisme, antagonisme, neutralisme, amensalisme, compétition*

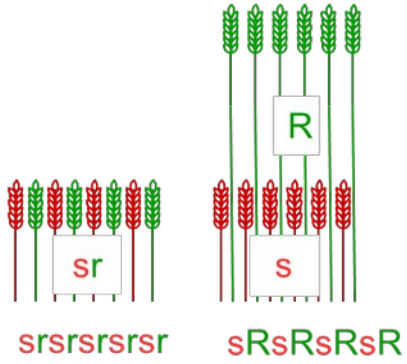
-> Comment sélectionner pour ces interactions ?

Mieux assembler les variétés

Progresser sur les règles d'assemblage :

→ Résistances aux maladies
→ Résistances aux stress (Gel, N/P, hydrique, thermique)
→ Gibier, Cécidomyie
→ Qualité

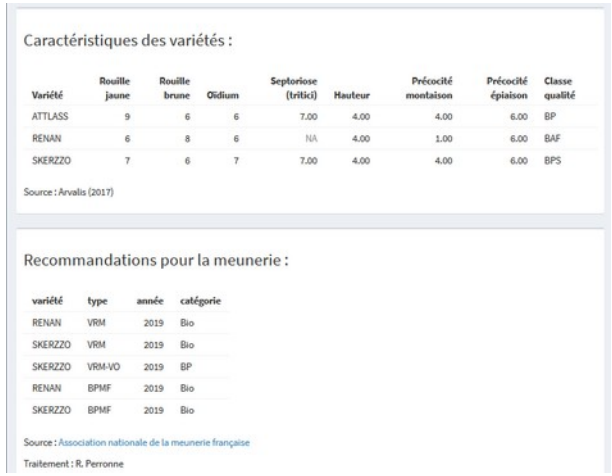




Vidal *et al.* (2017)

Co-conception d'outils : OPTIMIX

→ Outil d'Evaluation Multicritère :
assistance à l'assemblage des variétés
→ Règles transparentes et **réfutables**
→ www.inrae.fr/Optimix



Caractéristiques des variétés :

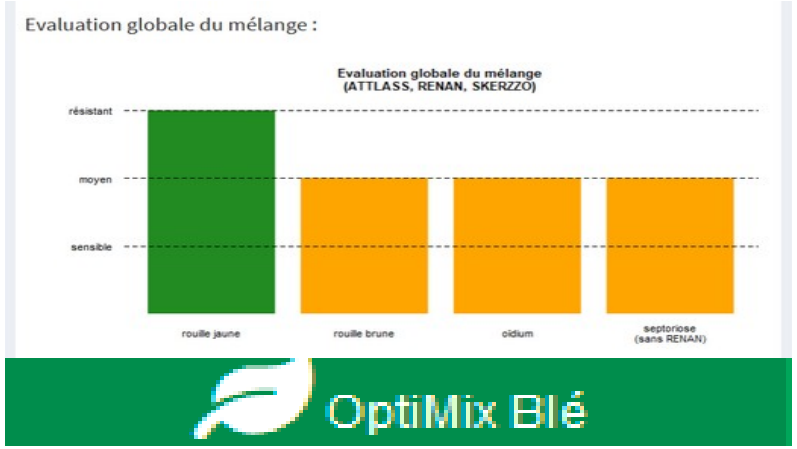
Variété	Rouille jaune	Rouille brune	Oïdium	Septoriose (tritici)	Hauteur	Précocité montaison	Précocité épiaison	Classe qualité
ATTLASS	9	6	6	7.00	4.00	4.00	6.00	BP
RENAN	6	8	6	NA	4.00	1.00	6.00	BAF
SKERZZO	7	6	7	7.00	4.00	4.00	6.00	BPS

Source : Arvalis (2017)

Recommandations pour la meunerie :

variété	type	année	catégorie
RENAN	VRM	2019	Bio
SKERZZO	VRM	2019	Bio
SKERZZO	VRM-VO	2019	BP
RENAN	BPMF	2019	Bio
SKERZZO	BPMF	2019	Bio

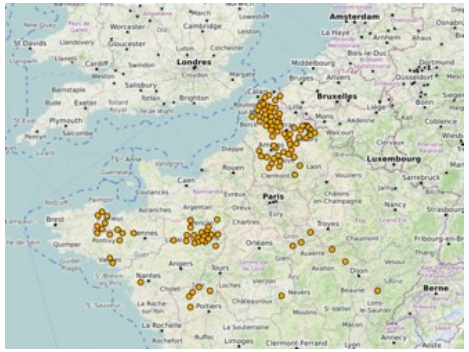
Source : Association nationale de la meunerie française
Traitement : R. Perronne



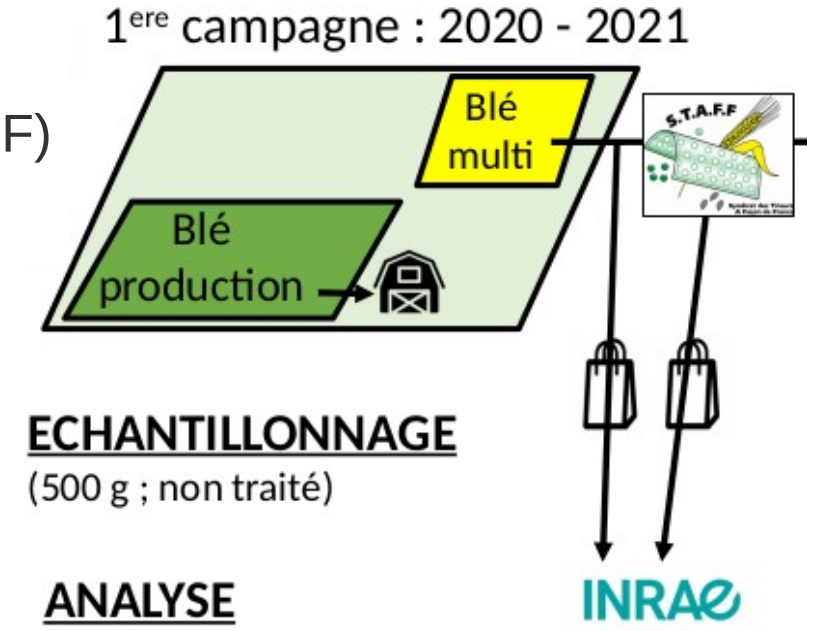
Evaluation *on farm* des mélanges

Objectifs :

- ✓ Caractériser *on farm* les mélanges pour mieux comprendre leur comportement
- ✓ Evaluer les changements de fréquence des variétés au cours du cycle de culture (entre semis et récolte) et au cours du tri



- Echantillonnages chez des agriculteurs mélangeurs (STAFF)
- **Analyse des proportions variétales**
  (méthode en cours de développement - T. Flutre)



Focus sur les questions en économie traitées dans le projet

GAEL (Grenoble): Adrien Hervouet, Stéphane Lemarié, Aline Fugeray-Scarbel
AGIR (Toulouse): Pierre Labarthe, Pierre Triboulet
GEVES: Virginie Bertoux, Aurélia Gouleau

Question centrale

Quelles politiques publiques pour adapter l'offre de semences à l'enjeu de diversification des cultures?

- **Volet réglementaire** : évolution de la réglementation encadrant la définition du produit semence et assurant un certain niveau d'information sur les produits

- **Volet financement et organisation de la recherche et du conseil** : évolution de la rémunération de la recherche et du conseil

Volet réglementaire: les standards de marché actuels sur les semences

Standards sur les semences : DHS / VATE / Certification

Objectifs de ces standards:

- Réduire l'asymétrie d'information (un manque d'information des acteurs économiques peut conduire à un dysfonctionnement du marché)
- Garantir un niveau de qualité minimum
- Orienter le progrès génétique

Des standards prévus pour des variétés homogènes:

- DHS => Homogénéité
- VATE: protocole d'évaluation sur des variétés pures
- Certification: sur variétés pures avec critère de pureté variétale

Volet réglementaire: quelles évolutions?

- **Enjeu:** assouplir les standards pour favoriser la diversification, tout en préservant la qualité et en limitant l'asymétrie d'information

- **Différents types de produits:** mélanges de variétés, mélanges d'espèces, VBAPB, MHB, variétés population, autres?
  - Comment définir et contrôler la qualité de ces produits?
  - Quels besoins de garantie de qualité selon le circuit de commercialisation (circuit formel *vs.* réseaux d'agriculteurs)?
  - Comment orienter le progrès génétique et inciter à améliorer la qualité?
  - Variétés hétérogènes: Quel impact sur la capacité à distinguer une variété d'une autre?
  - Quel impact sur la protection par COV (si assouplissement de la DHS)?
  - Quelles conditions de coexistence entre produits?

Volet financement et organisation de la recherche et du conseil

Le mode de financement conditionne les incitations à innover.

Système actuel: Incitations à innover liées à la taille de marché de l'espèce:

Volet Recherche:

- Appropriation des bénéfices de l'innovation par les Droits de Propriété (COV) ou les caractéristiques techniques (hybrides)
- Rémunération de la recherche liée à la vente de semences (royalties) et à la CRIV sur les semences fermières

Volet Conseil: Financement des instituts techniques en partie lié à la collecte de la CVO perçue sur les volumes collectés

Volet financement et organisation : quelles évolutions?

Enjeu : Quels mécanismes (financement et organisation de la R&D) mettre en place pour favoriser les innovations sur des espèces mineures (mélanges interspécifiques) et sur l'aptitude au mélange (mélanges intraspécifiques)

- Quelles alternatives sur le mode de rémunération? Ex: subventions croisées? Mise en place de taxes? Partenariats de recherche public/privé?
- Quel financement de la recherche pour les produits non protégés par DPI/COV ?
- Nouveaux produits hétérogènes: quel impact pour le conseil (production de références techniques, accompagnement des agriculteurs…)?
- Quels impacts sur l'organisation de la filière?
  - Possible évolution des acteurs prenant en charge l'innovation (distributeurs pour la création de mélanges, coops bio pour les MHB/VBAPB)
  - Evolution de l'organisation du conseil (nouveaux besoins sur produits hétérogènes + réglementation liée à la séparation des activités de vente de phytos et de conseil).

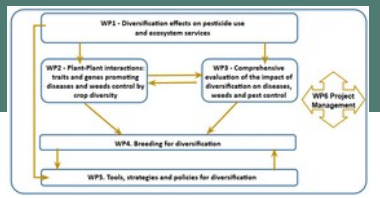
Méthodologie et calendrier

- Démarrage d'une thèse en septembre à GAEL (Grenoble) sur les volets réglementation + financement recherche
- 1 stage + 10 mois de post-doc à AGIR (Toulouse) sur le volet conseil

Volet « réglementation »	Volet « financement et organisation »
Benchmark européen	Tour d'horizon des modèles de financement et d'organisation de la recherche et du conseil dans 5 à 10 pays (Canada, Australie…)
Enquêtes qualitatives (entretiens avec les acteurs des filières)	
Modélisation sur la commercialisation de mélanges évoluant tous les ans	Modélisation sur les subventions croisées entre espèces

Mobiliser et Sélectionner la diversité intra et inter spécifique cultivée pour un changement systémique vers une agriculture zero-pesticides

Le consortium - Management du projet



GENETIQUE
ECOPHYSIOLOGI

Coordination scientifique

Jérôme ENJALBERT (GQE)

ECONOMIE

Management de projet

Aline FUGERAY-SCARBEL (GAEL)

ECONOMIE

WP5 - Stéphane LEMARIE (GAEL)

AGRONOMIE

WP1 - Philippe MARTIN (SADAPT)

GENETIQUE
PATHOLOGIE

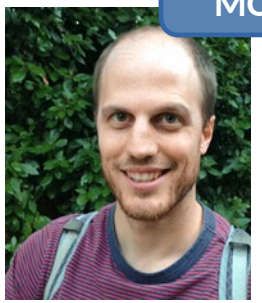
WP2 - Jean-Benoît MOREL (BGPI)

GENETIQUE
AGRONOMIE

WP3 - Nathalie MOUTIER (IGEPP)

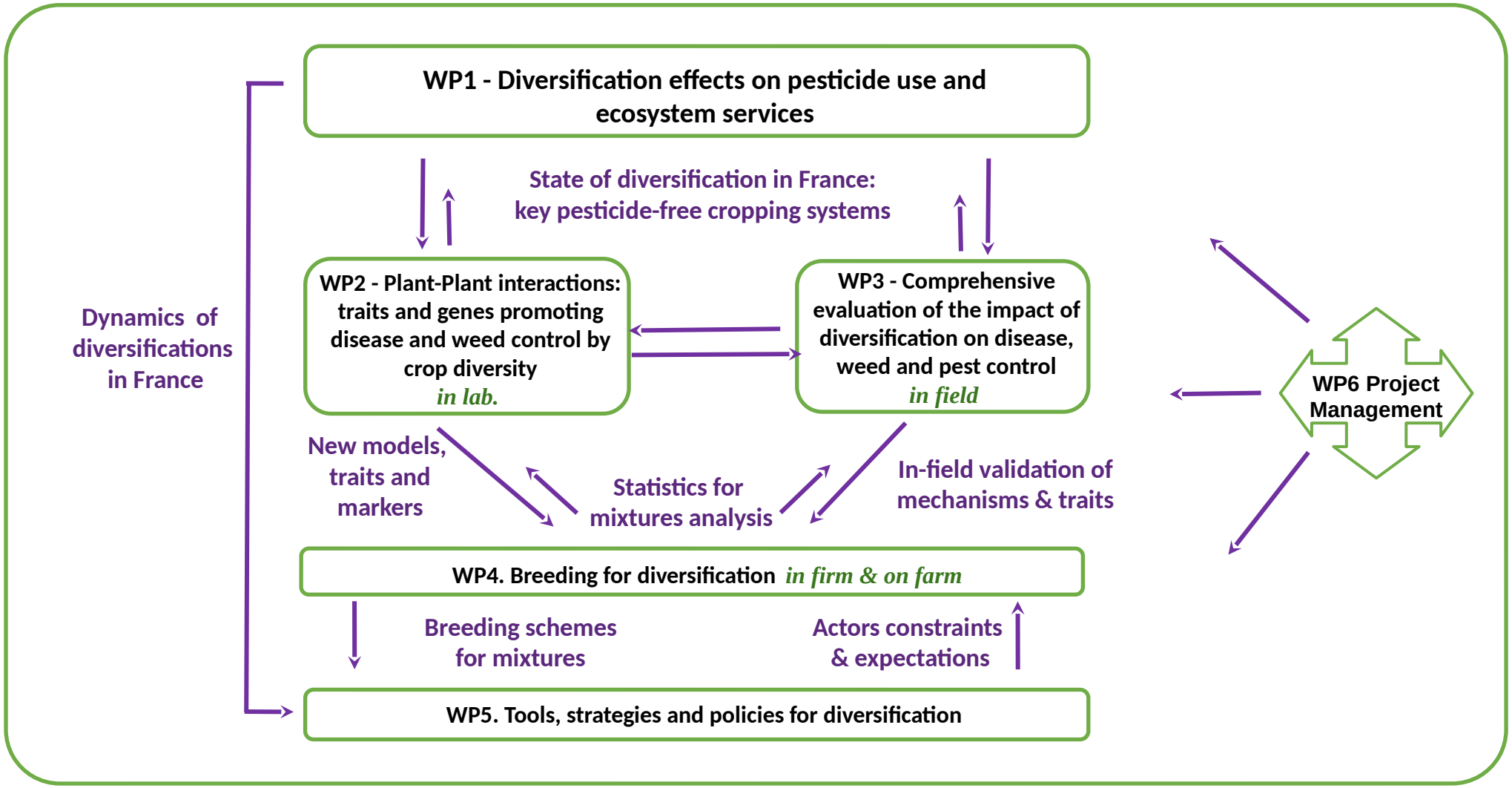
GENETIQUE

GENETIQUE
MODEL. STAT.



WP4 - Jacques DAVID (Mtpl SUPAGRO)
et Timothée FLUTRE (GQE)

MoBiDiv organization



Le consortium - disciplines, unités et partenaires impliqués

GENETIQUE

ECOLOGIE

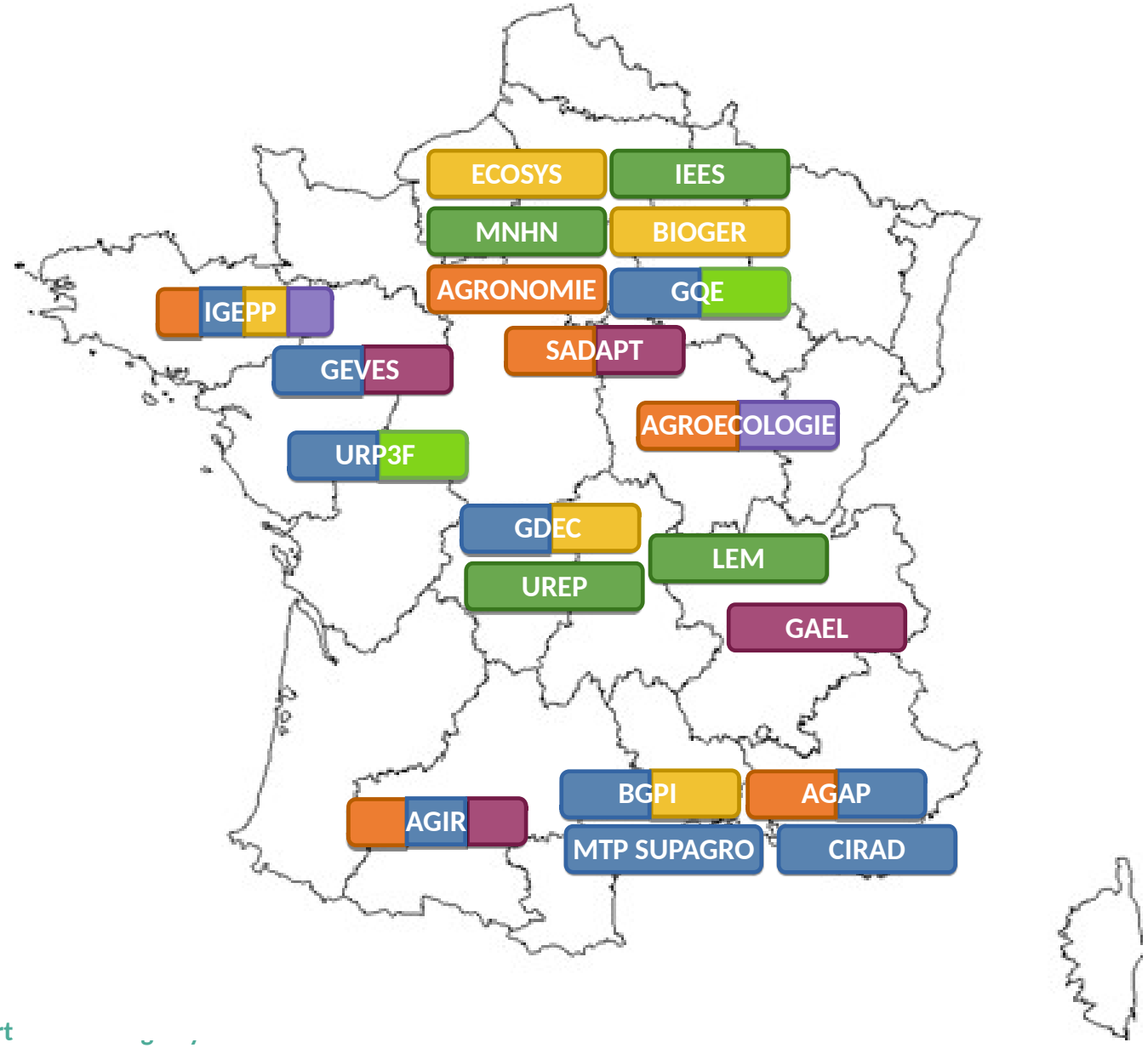
SCIENCES SOCIALES

AGRONOMIE

ECOPHYSIOLOGIE

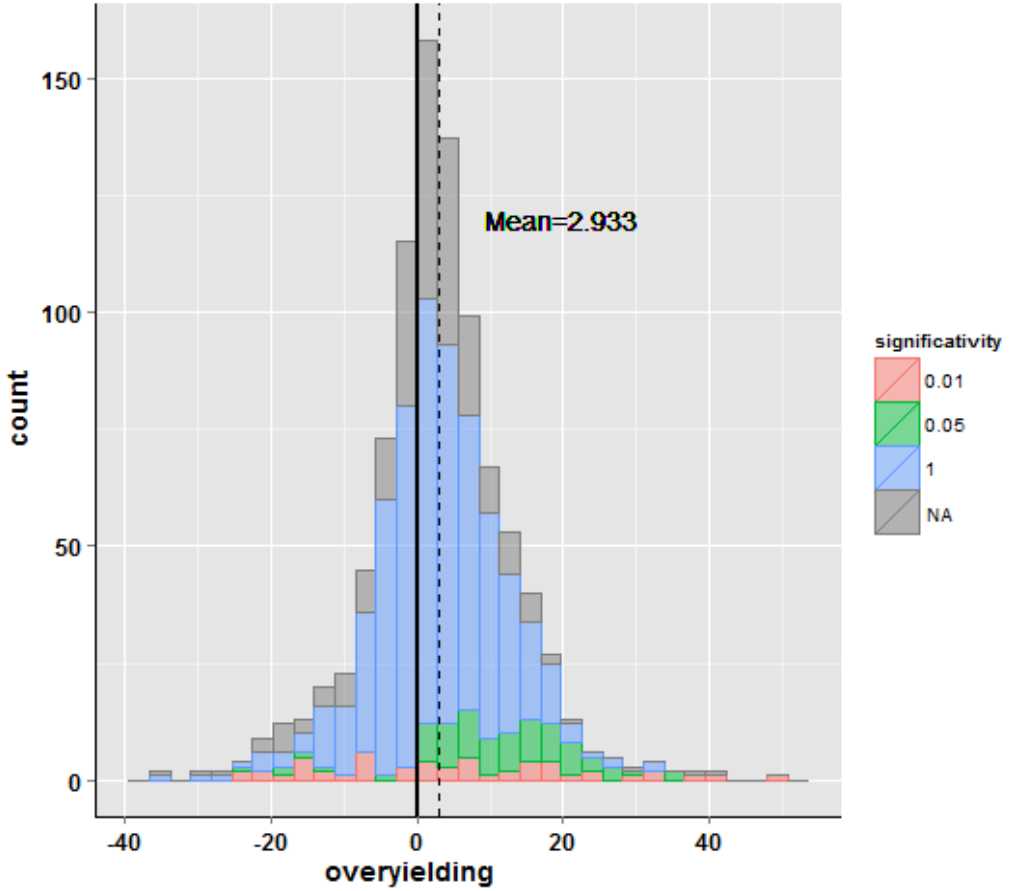
PHYTOPATHOLOGIE

MALHERBOLOGIE



Des mélanges plus productifs

Méta-analyse : Mélanges variétaux de blé tendre



OY = Rdt Mélange/ mean(Rdt Pures)

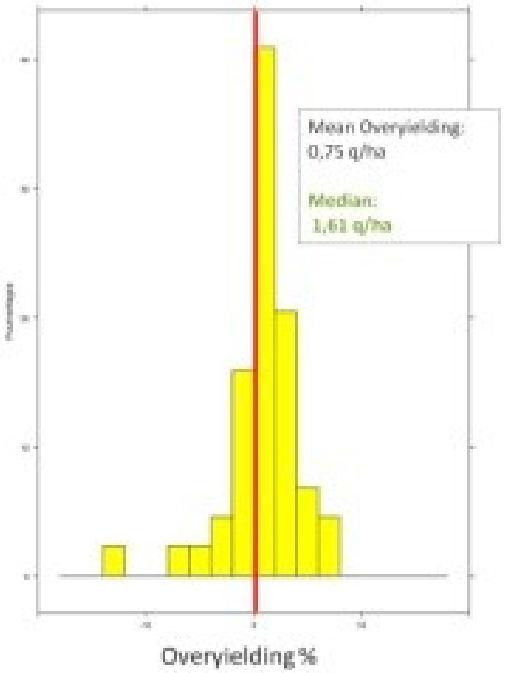
J. Borg et al. 2017

→ Des gains de rendement dans 2/3 des cas, modérés, mais *plus marqués en présence de maladies* (+ 6%)

Idéotypage participatif

- **Assembler des variétés pour s'adapter au contexte local**
  - Démarche d'idéotypage participatif:
    - Co-conception de règles d'association (techniciens/agriculteurs/chercheurs)
    - Évaluation à la ferme des mélanges : 30 agriculteurs, 2015-2017

    -> Gains de rendement dans 2/3 des cas
    -> Effet stabilité /gestion du risque prépondérant

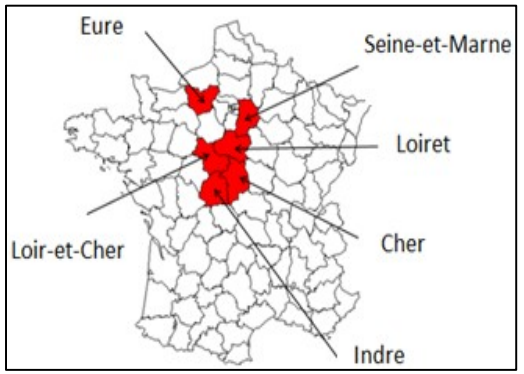


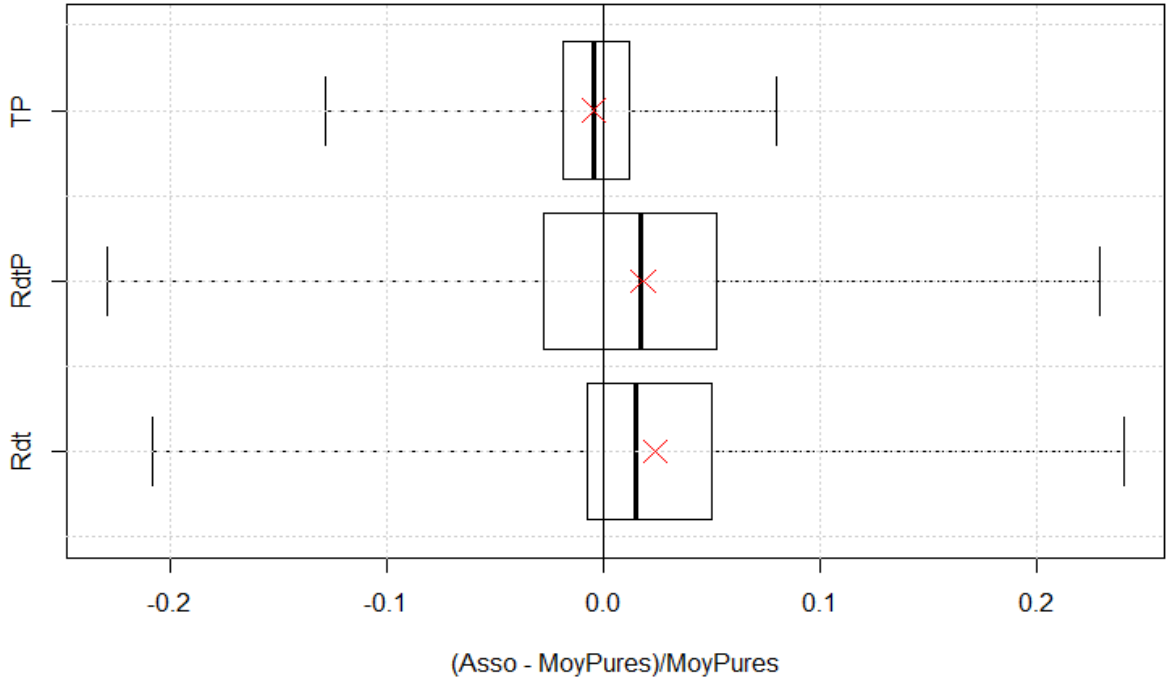
- **Agriculture BIO: mieux intégrer le GxExM**
  - Gestion des adventices
  - Gestion de l'azote

PICRI

Rendement et teneur en protéines

<u>3 années</u> : 2015, 2016 et 2017
<u>20 à 30 agriculteurs</u> chaque année
<u>160 mélanges</u> testés





J. Borg et al. in prep

<u>Sur Taux Prot.</u> : 44 % d'OY positifs

<u>Sur Rendement Prot.</u> : 63 % d'OY positifs

<u>Sur Rdt</u> : 68% d'OY positifs

Mélange > variété pariée par l'agriculteur
- 90% des cas en 2015 et 2016
- 35% des cas en 2017

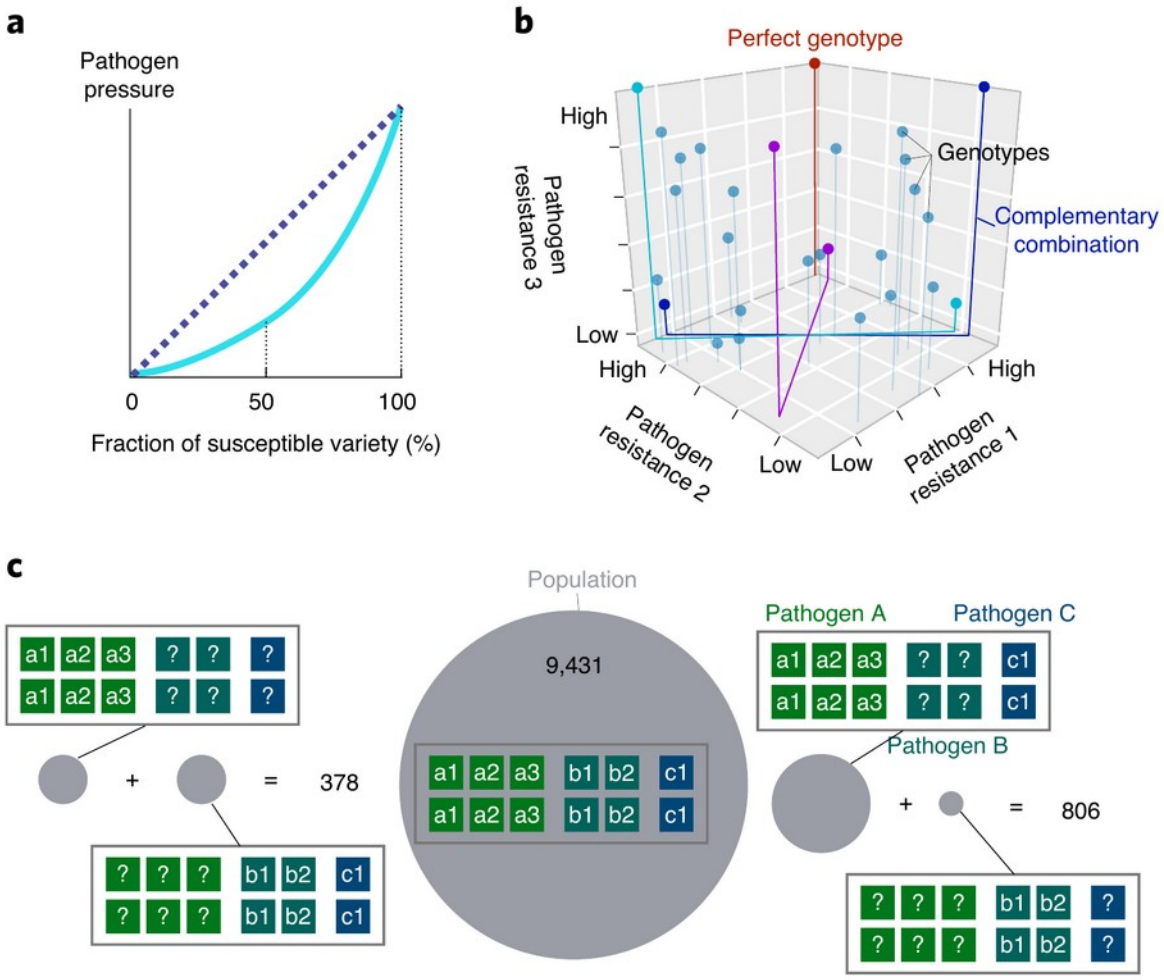
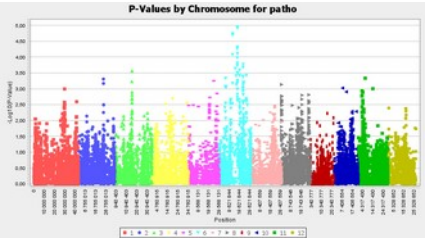


Fig. 3 | Re-partitioning the problem of combining multiple disease resistances. a, Typical behaviour of population-level resistance in mixtures as the fraction of the susceptible variety changes (inspired by ref. [21]).

S. Wuest et al. 2021

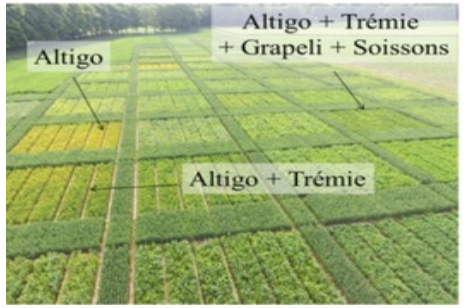
Ongoing experiment: Wheat-Pea GWAS



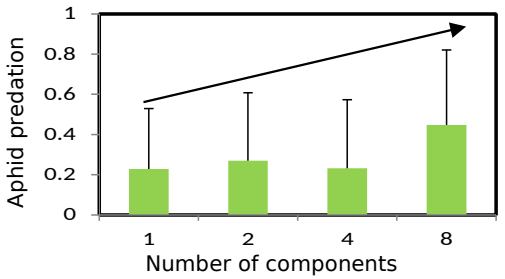
- Panel of 200 wheat lines studied in combination with 2 pea cultivars
- 2 years (2023-2025), 2 sites (Saclay & Rennes)
- Phenotyping: Yield, quality, disease resistances
- **Scientific questions :**
  - Neighbour Mediated Immunity
  - Nitrogen use synergy
  - Mixing ability for yield and disease control
- **Collaborations**:
  - **IGEPP** – Rennes (N. Moutier, A. Baranger) - **BIOGER** (T. Vidal) – **ECOSYS** (JM Gilliot) + **GS Biosphera** project (**IPS2**: ML. Martin-Magniette, E. Delannoy) + **GQE GeVAD** (M.Tenaillon team)

But some significant effects on services detected !

- Effective control of pathogens



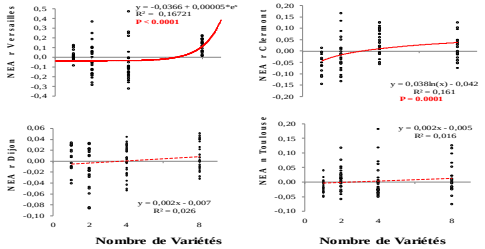
- Positive impact of aphid predation



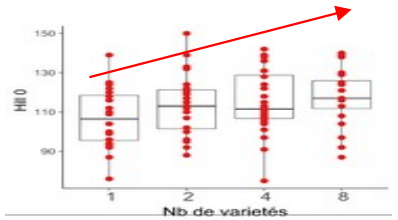
Porcher et al., in prep

- Improved nitrogen cycle through modification of soil bacterial communities

  (mycorrhizae are also favored by diversity)



Hugoni et al., in prep



Taschen et al., in prep

- Improved worm health if fed with mixtures

Chassé *et al.* 2019