



Co-sélection variétale pour des associations céréales-légumineuses performantes

Nathalie MOUTIER et Alain BARANGER, INRAE Rennes, UMR IGEPP
avec la collaboration d'Arnaud Gauffreteau, INRAE Grignon, UMR Agronomie
et de Matthieu Floriot, Agri-Obtentions Orsonville

Co-sélection variétale pour des associations céréales-légumineuses performantes

Services et performances attendus des associations végétales

Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association
Eléments bibliographiques et résultats d'expérimentation

Sélection pour l'aptitude à la culture en association
Conséquences pour l'inscription

Nouveaux outils pour la caractérisation des couverts et cultures associées.
Phénotypage : exemples et défis

Co-sélection variétale pour des associations céréales-légumineuses performantes

Services et performances attendus des associations végétales

Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association

Eléments bibliographiques et résultats d'expérimentation

Sélection pour l'aptitude à la culture en association

Conséquences pour l'inscription

Nouveaux outils pour la caractérisation des couverts et cultures associées.

Phénotypage : exemples et défis

Services et performances attendus des associations végétales

Préservation sols

Rotations
Structure
Evaporation
Erosion
Reliquats

Gestion ressources

lum, eau, N, P
Complémentarité
 Δ croissance
 Δ prof racinaire

Conservation

biodiversité
 Δ niches, habitats

Auxiliaires

Contrôle

bioagresseurs
 Δ couverture
 Δ microclimat
effet dilution
effet barrière

Séquestration C

Δ Matière org



Nutrition animale

Proximité
Autonomie
protéique

Productivité

Qualité
Stabilisation rdt

LER > 1
TP blé

Nutrition humaine

Equilibres
alimentaires

Adapté de
Malézieux et al
(2009)

Services et performances attendus des associations végétales

Diversité des objectifs de production

Récolte	Vise	Proportion Dose semis %L / %C	Service attendu
Fourrage (vert, ensilage, foin)	Forte biomasse		↘ intrants ↗ MAT Diversification Résilience face aux aléas
En grains > Céréale	Productivité C	30 / 70	↗ teneur protéines C ↘ apports d'N
En grains Céréale / Leg éq.	Productivité C+L	50/50 70/30 75/50	↗ teneur protéines C ↘ apports d'N Résilience face aux aléas
En grains > Légumineuse	Productivité L	100/30	Tuteurage L par C X apports d'N

Services et performances attendus des associations végétales

Des défis pour l'adoption

Pratiques culturales

Δ contraintes, objectifs

Δ combinaisons d'espèces,
de variétés, dates et
densités de semis, modes
de semis, stratégies de
fertilisation



Sélection pour des variétés adaptées

Traits d'espèces

Traits variétaux

Nouveaux schémas de
sélection

Machinisme et équipement

Semis, récolte, tri des grains récoltés

Services et performances attendus des associations végétales

Le défi de la complexité

Dose de semis ?

Mode de semis ?

Quelles espèces ?
Combien d'espèces ?

Date de semis et
de récolte ?



Quelles variétés ?

Pratiques
culturales?

Labour, Protection,
Fertilisation

Adaptation aux
usages ?

Pureté, Qualité

Services et performances attendus des associations végétales

Facteurs impliqués

Environnement

Climat
Pédologie

Pratiques

Date semis
Densité semis
Rotations
Pilotage N
Protection sanitaire

Règles

d'assemblage
Doses semis et ratios
entre espèces
Modalités semis

Combinaisons
Espèces (traits)
Variétés (traits)

Couverts (traits)

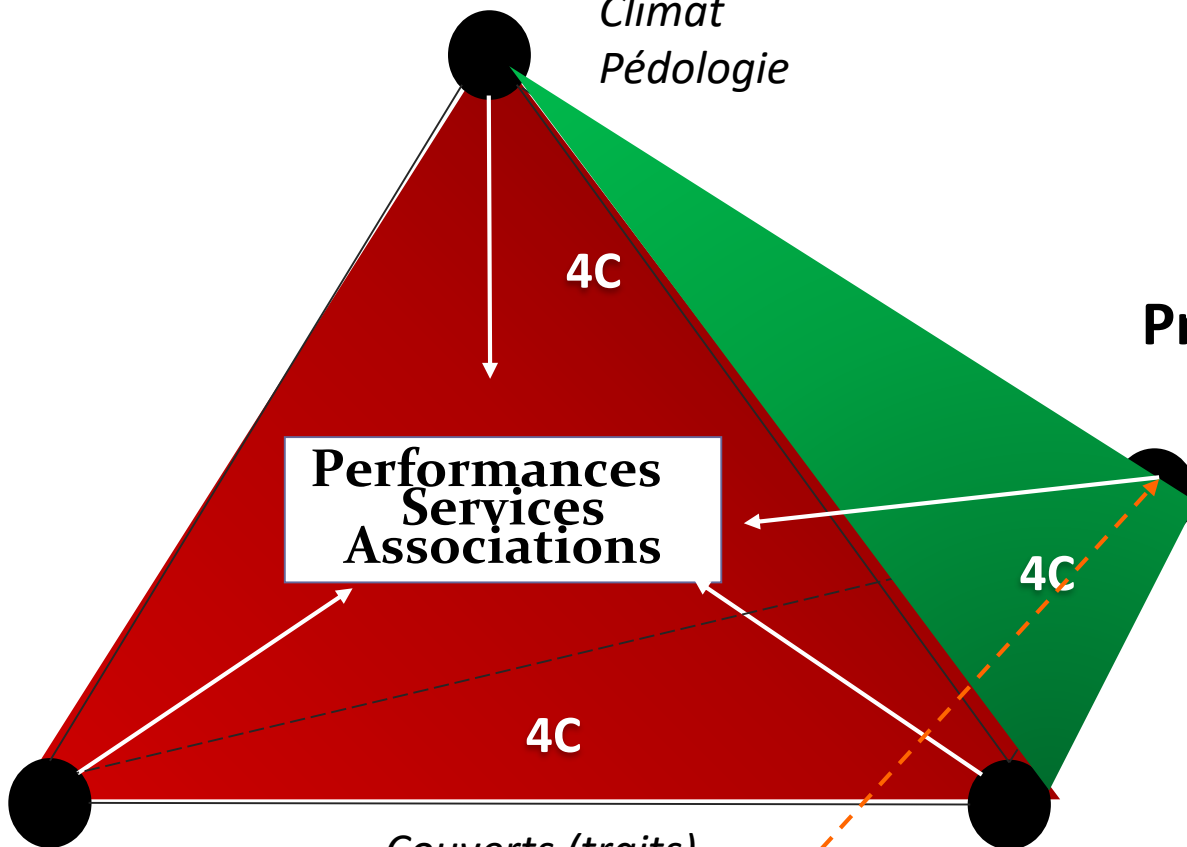
Performances
Services
Associations

4C

4C

4C

Sélection



Services et performances attendus des associations végétales

Indicateurs et variables associées, critères potentiels de sélection

Rdt blé, Rdt légumineuse / grains, MS
Rdt cumulé

LERs partiels / N, MS, rdt
LER total

Index équilibre entre les deux espèces

Facilité de récolte (synchro, verse)
Facilité de tri (PMG, casse et mélanges)

TPblé, TPleg
Rdt total en protéines
PS blé
Valeur blé en panification

Réduction usage intrants azotés

Réduction usage phytos :
Contrôle salissement
Contrôle maladies et ravageurs

Valorisation parcelles à faible potentiel

Biodiversité (auxiliaires)
Gestions érosion sols

Co-sélection variétale pour des associations céréales-légumineuses performantes

Services et performances attendus des associations végétales

Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association
Eléments bibliographiques et résultats d'expérimentation

Sélection pour l'aptitude à la culture en association
Conséquences pour l'inscription

Nouveaux outils pour la caractérisation des couverts et cultures associées.
Phénotypage : exemples et défis

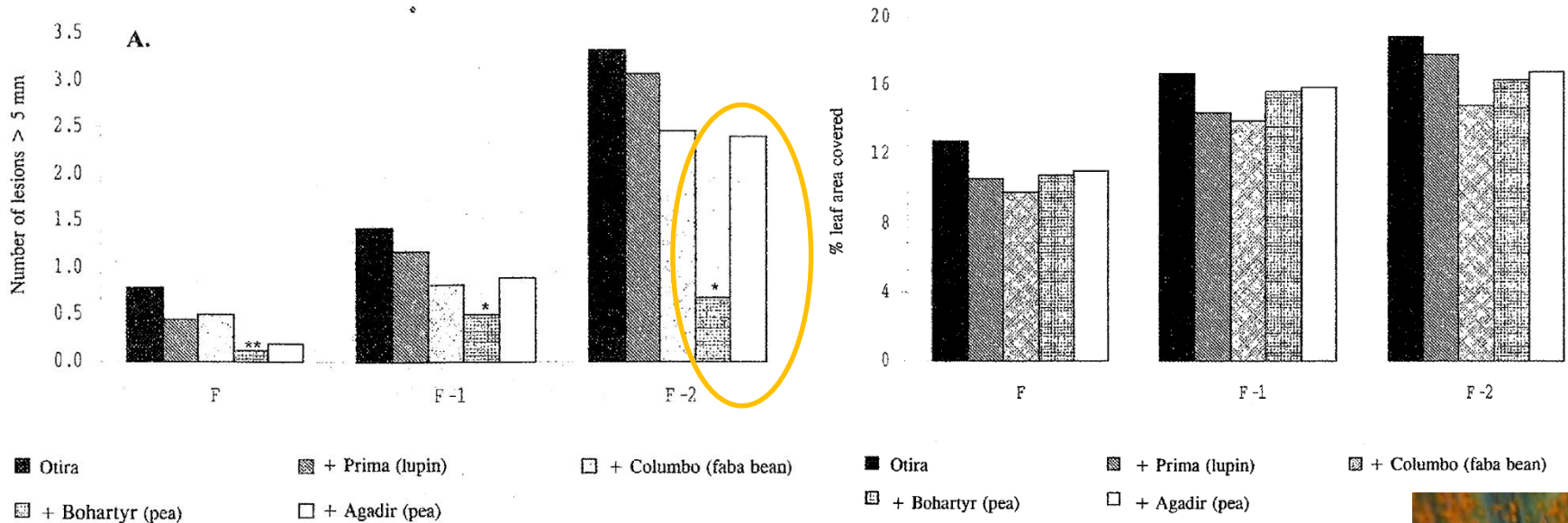
Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association

Contrôle des épidémies pathogènes

Quelles espèces/variétés associer pour un meilleur contrôle des épidémies ?

Un effet suppressif d'associations substitutives

significatif sur helminthosporiose de l'orge (maximal avec une variété de pois)
non significatif sur rouille brune de l'orge



Helminthosporiose

Rouille brune



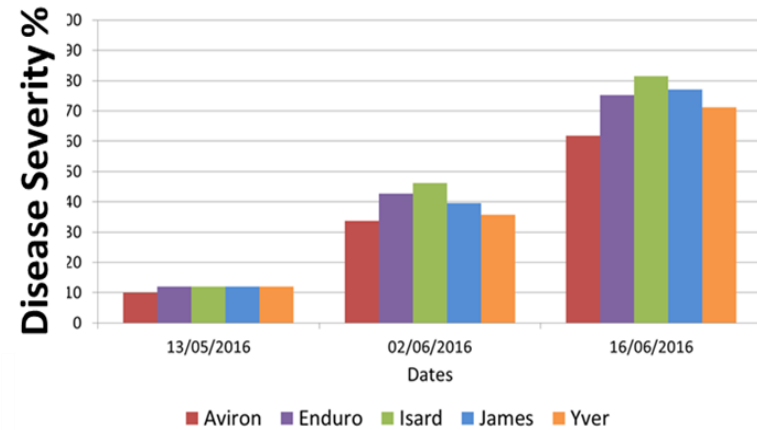
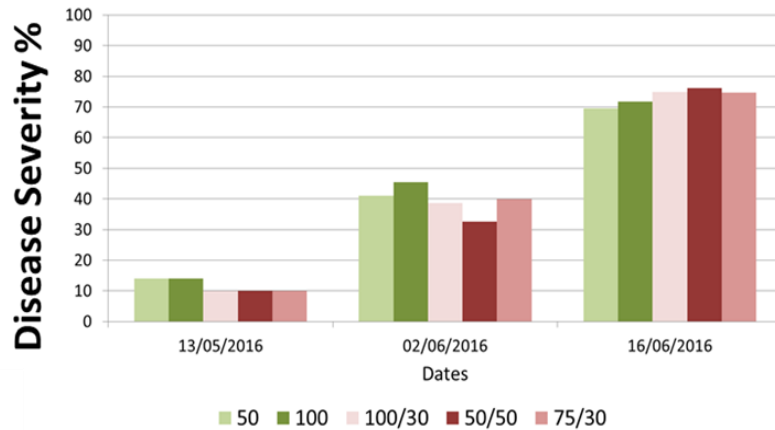
Kinane and Lyngkjaer, 2002

Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association Contrôle des épidémies pathogènes

Générer, via des associations pois d'hiver/céréales d'hiver, des architectures de couverts favorables à la limitation du développement des épidémies d'ascochytose du pois

La sévérité de l'ascochytose du pois appréciée à 3 dates via le pourcentage de nécroses observées sur tissus aériens à l'échelle de la parcelle dépend des variétés, mais aussi des densités de semis et des stades de l'épidémie.

2016



Résultats projet Prograilive ; Jumel et al, 2018

Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association

Rendement et teneur en protéines du blé

8 géotypes de blé tendre meunier

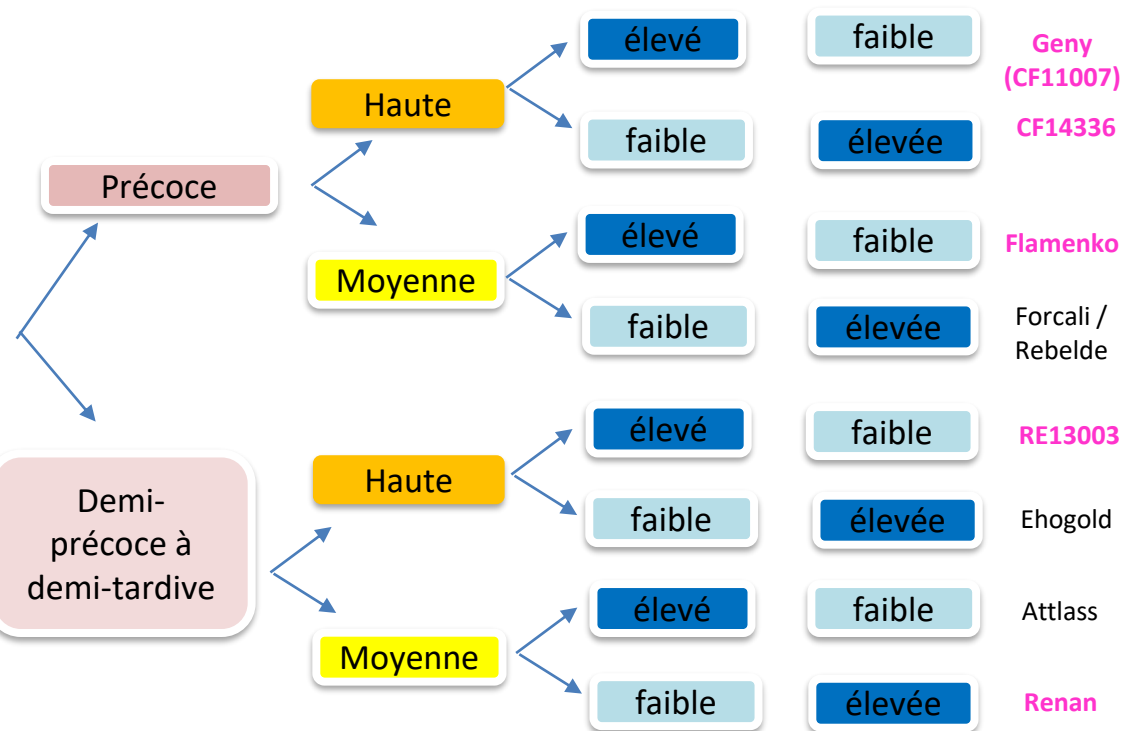
- critères communs (CP):
précoces à maturité (synchronisation récolte)
peu sensibles aux maladies (notamment RJ),
résistants à la verse (effet tuteur pour le pois)
- critères contrastés (CP) :

Précocité à
épiaison
en CP

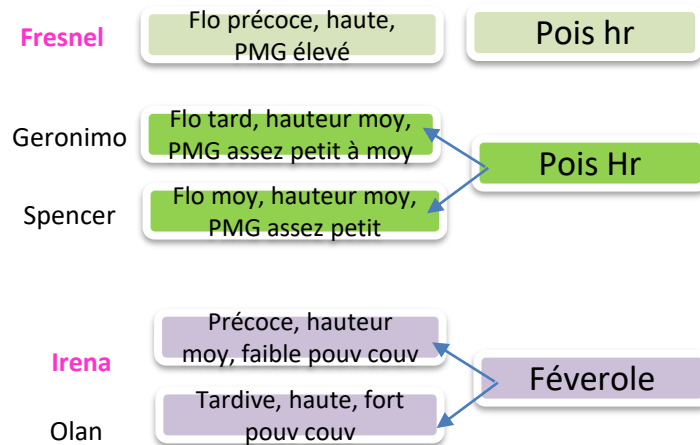
Hauteur à
épiaison
en CP

Potentiel de
rendement
en CP

Potentiel de
teneur en
protéines en CP



3 variétés de pois (1 hr, 2 Hr) 2 variétés de féverole



40 modalités associées + 13 modalités en CP = 53 modalités

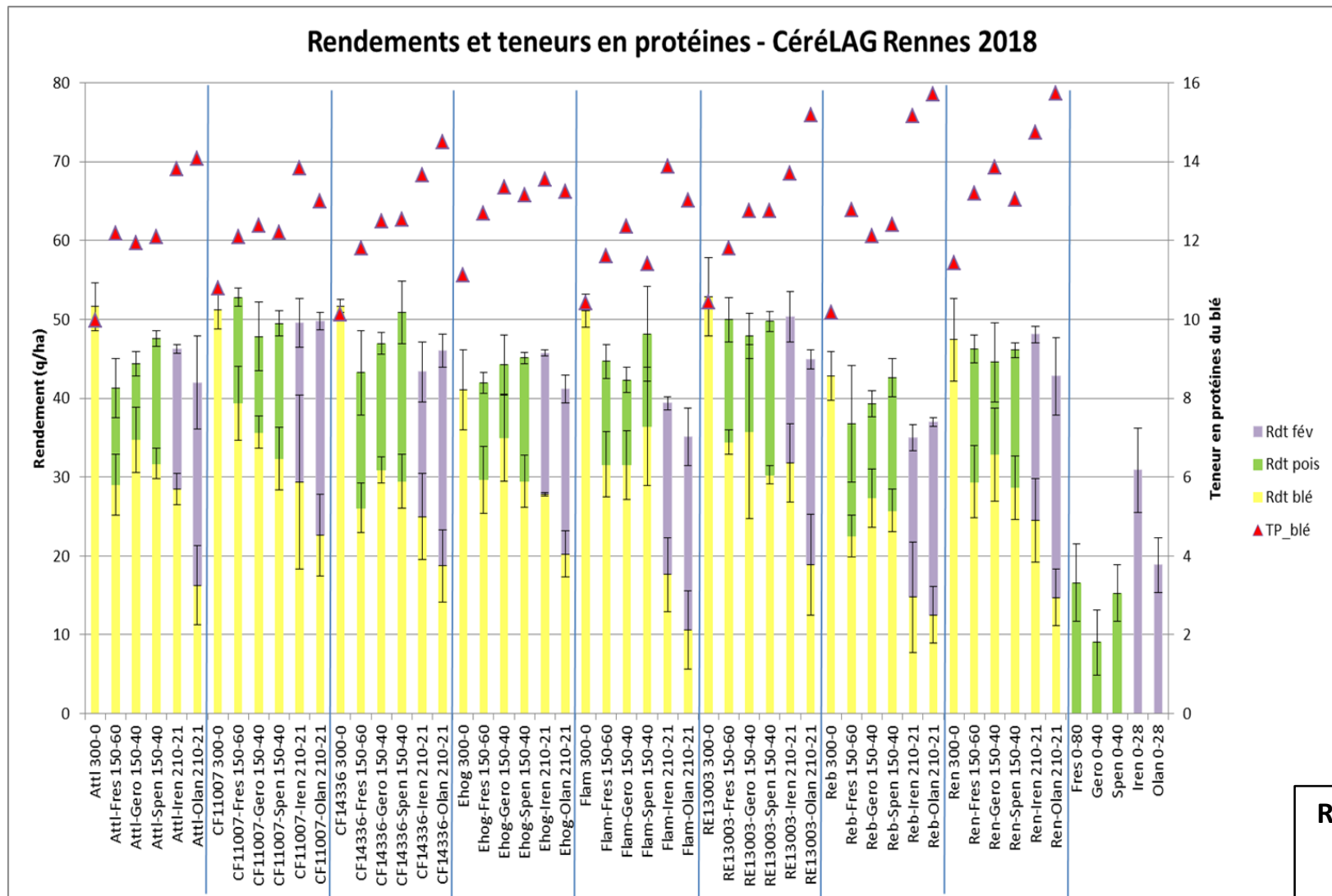
Projet CéréLAG
2016-2020

Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association

Rendement et teneur en protéines du blé

Une grande variabilité des rendements fonction des combinaisons variétales

Gamme de teneurs en protéines du blé de 10 (non panifiable) à 16 (blé de force)

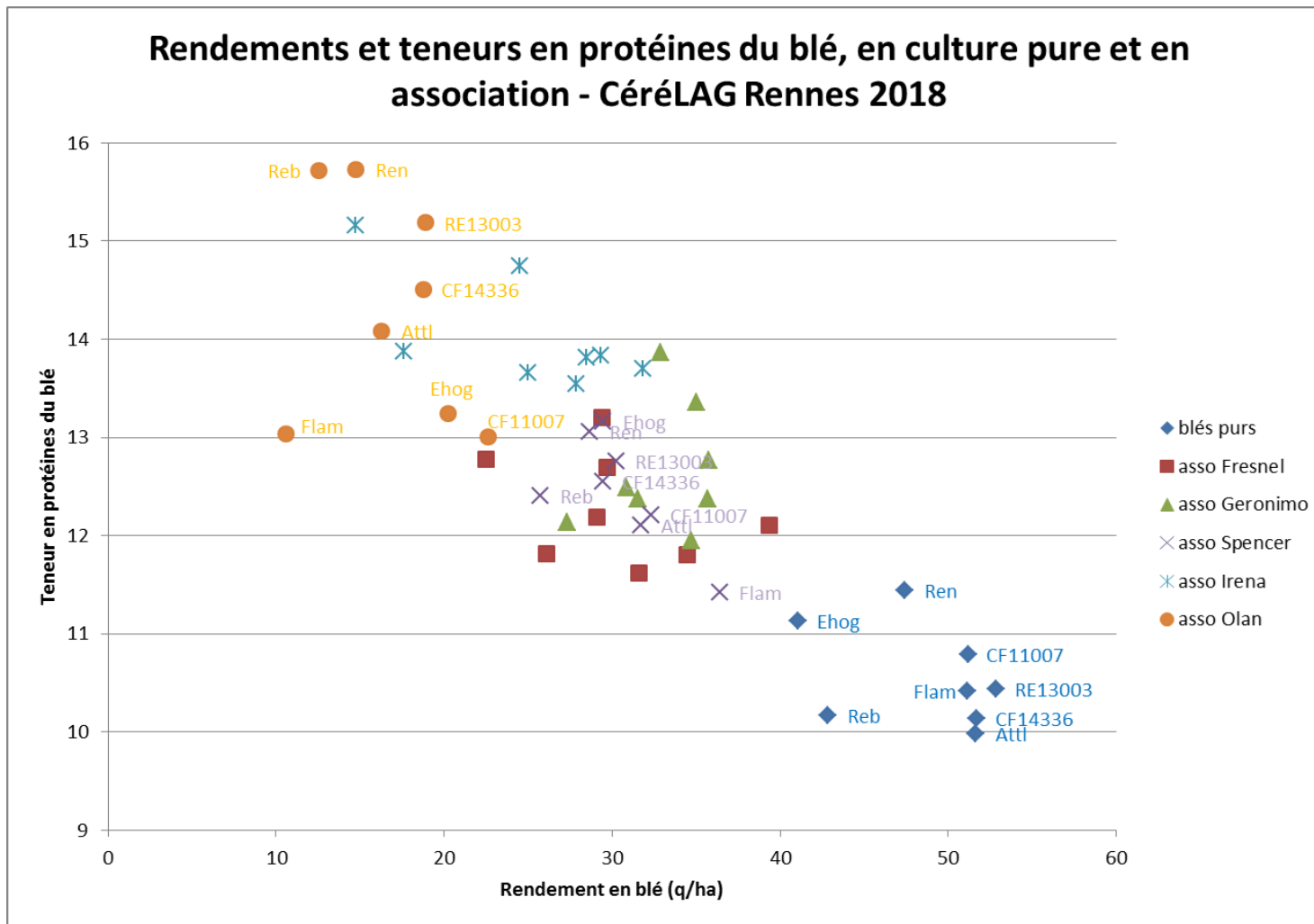


**Résultat projet
CÉRÉLAG
2016-2020**

Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association

Rendement et teneur en protéines du blé

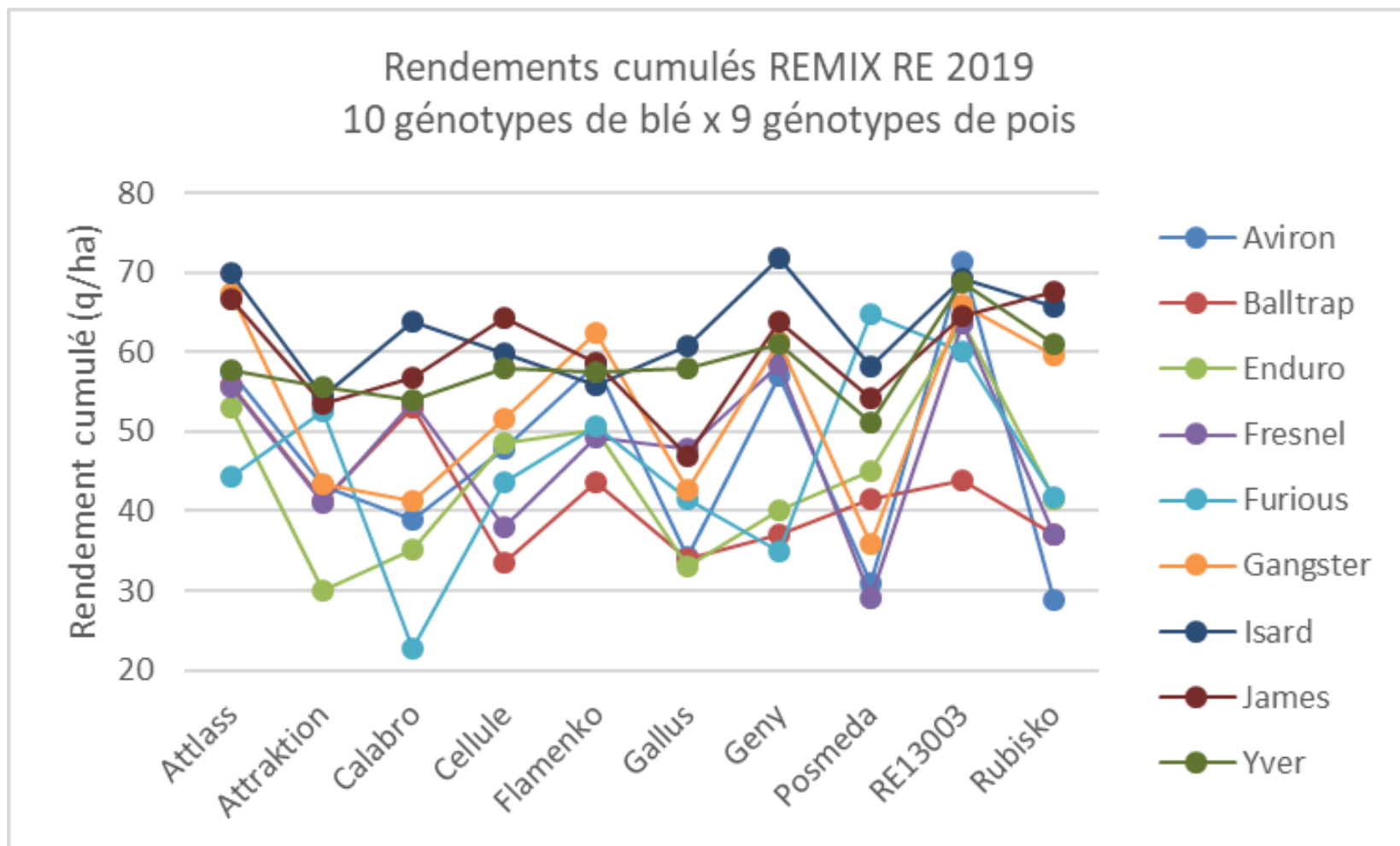
L'espèce associée (pois/féverole) et la variété de cette espèce ont une influence sur le rendement et la teneur en protéines des variétés de blé (et sur le lien entre ces deux variables)



Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association

Interactions GxG

Une grande complexité des interactions entre variétés d'espèces compagnes -
Stabilité de réponse (ou non) en fonction des testeurs



Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association

Interactions GxG

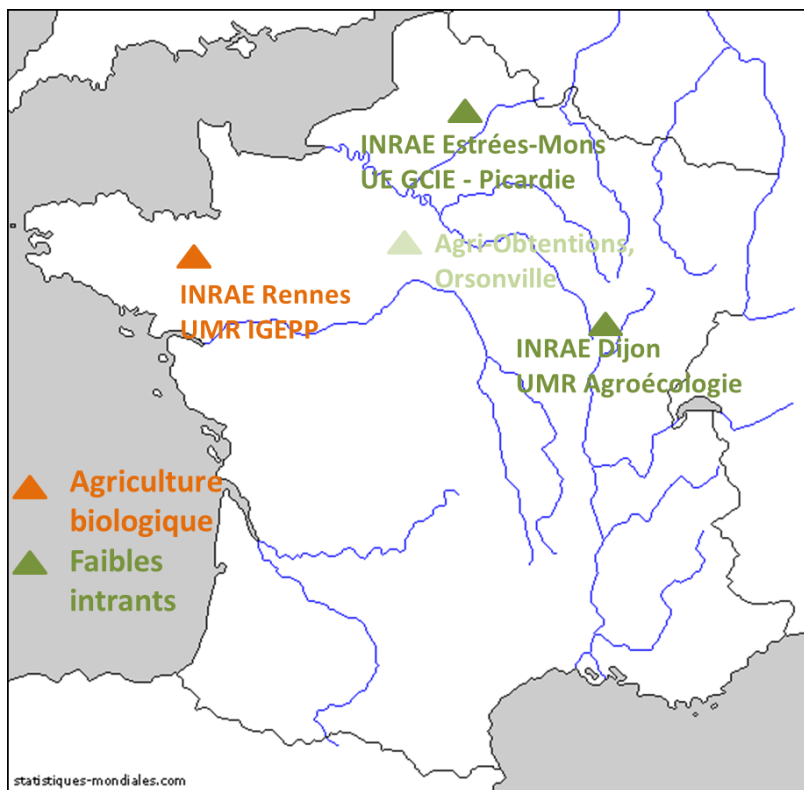
Un impact significatif des traits variétaux des espèces compagnes sur les indicateurs de performance. Impact variété légumineuse > impact variété céréale (cf Hauggaard, 2001)
Des choix de traits différents suivant qu'on cherche à optimiser le rendement du blé et le rendement cumulé, ou qu'on cherche à optimiser le rendement du pois et la teneur en protéines du blé.

	Wheat earliness at heading stage	Wheat canopy height at heading stage	Wheat tillering ability	Pea flowering starting date	Pea flowering length	Pea canopy height at the end of flowering
Cumulative yield	NS Mid early-mid late ~ Early	NS Tall ~ Short	** High > Low	** Early > Mid early-mid late	*** Ref > Long ~ Short	*** Short > Tall > Medium
Pea yield	NS Mid early-mid late ~ Early	NS Short ~ Tall	NS Low ~ High	NS Mid early-mid late ~ Early	* Short ~ Long > Ref	*** Tall > Medium ~ Short
Wheat yield	NS Mid early-mid late ~ Early	NS Tall ~ Short	*** High > Low	*** Early > Mid early-mid late	*** Ref > Long > Short	*** Short > Tall ~ Medium
Wheat Protein Content	** Early > Mid early-mid late	*** Tall > Short	*** Low > High	*** Mid early-mid late > Early	*** Short > Long > Ref	*** Medium ~ Tall > Short

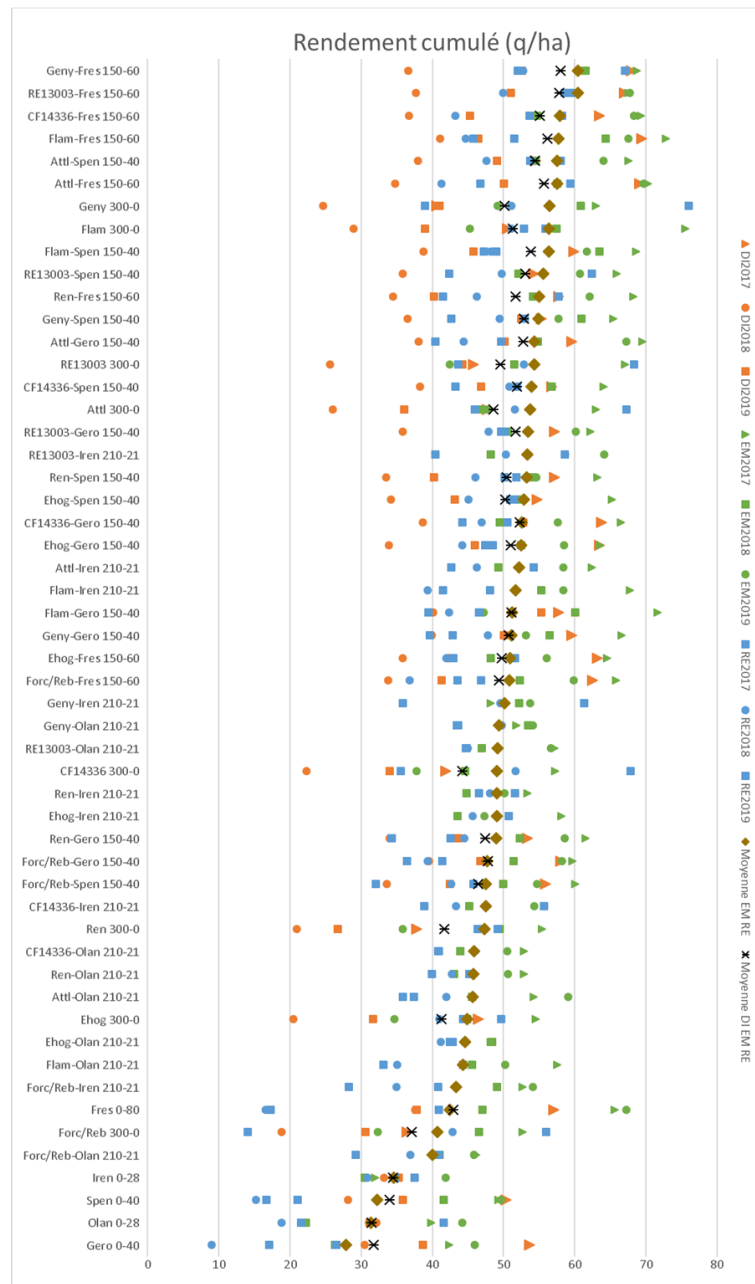
Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association

Interactions GxGxE

Une grande complexité des interactions entre combinaisons variétales et environnements d'évaluation (sites x années)



**Résultat projet CéréLAG
2016-2020**



Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association

Des modèles linéaires mixtes spécifiques pour gérer/analyser cette complexité

Modèle 1- Analyse des données environnement par environnement :

$$Y = \mu + G + C + G \times C + B + \varepsilon$$

Effet variété ? Effet conduite ? Pur prédictif asso ?

Quelles sont les IGC significatives dans chaque environnement ?

Ces interactions sont-elles toujours liées aux mêmes variétés ?

Modèle 2- Analyse des données sur les 9 environnements :

$$Y = \mu + G + C + E + G \times C + G \times E + C \times E + G \times C \times E + B \times E + \varepsilon$$

Quelle est la stabilité de l'aptitude à l'association des différentes variétés, entre environnements et testeurs légumineuses ? Construction de matrices d'interactions

avec

G : effet génotype, fixe

C : effet conduite (culture associée vs culture pure), fixe

E : effet environnement, aléatoire

B : effet bloc, aléatoire

Co-sélection variétale pour des associations céréales-légumineuses performantes

Services et performances attendus des associations végétales

Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association
Eléments bibliographiques et résultats d'expérimentation

Sélection pour l'aptitude à la culture en association
Conséquences pour l'inscription

Nouveaux outils pour la caractérisation des couverts et cultures associées.
Phénotypage : exemples et défis

Sélection pour l'aptitude à la culture en association

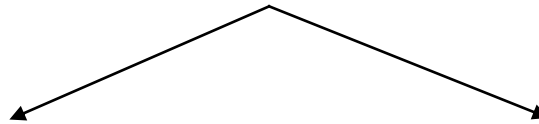
Bien définir les **cibles** visées



Quels sont les **traits** (espèce, variété, couvert) importants pour la réussite (compromis performances/services) de cette association ?



Peut-on **prédire** les performances des cultivars, obtenues en association, à partir des performances de ces cultivars en culture pure ?



Si oui,

sélection indirecte,
en culture pure,
possible

Si non,

méthodologies, dispositifs ?
schémas de sélection ?
méthodes d'appréciation des traits ?

Sélection pour l'aptitude à la culture en association

Définition des cibles

Marchés

Alimentation Animale (AA)
Alimentation Humaine (AH)

Utilisation

Graines (triées ou mélange)
Fourrages (sec, vert, ensilage)

Cibles ?

Systèmes

Gdes cult / Poly élevage
Conventionnel / FI / Bio
Rotations

Adaptation régionale

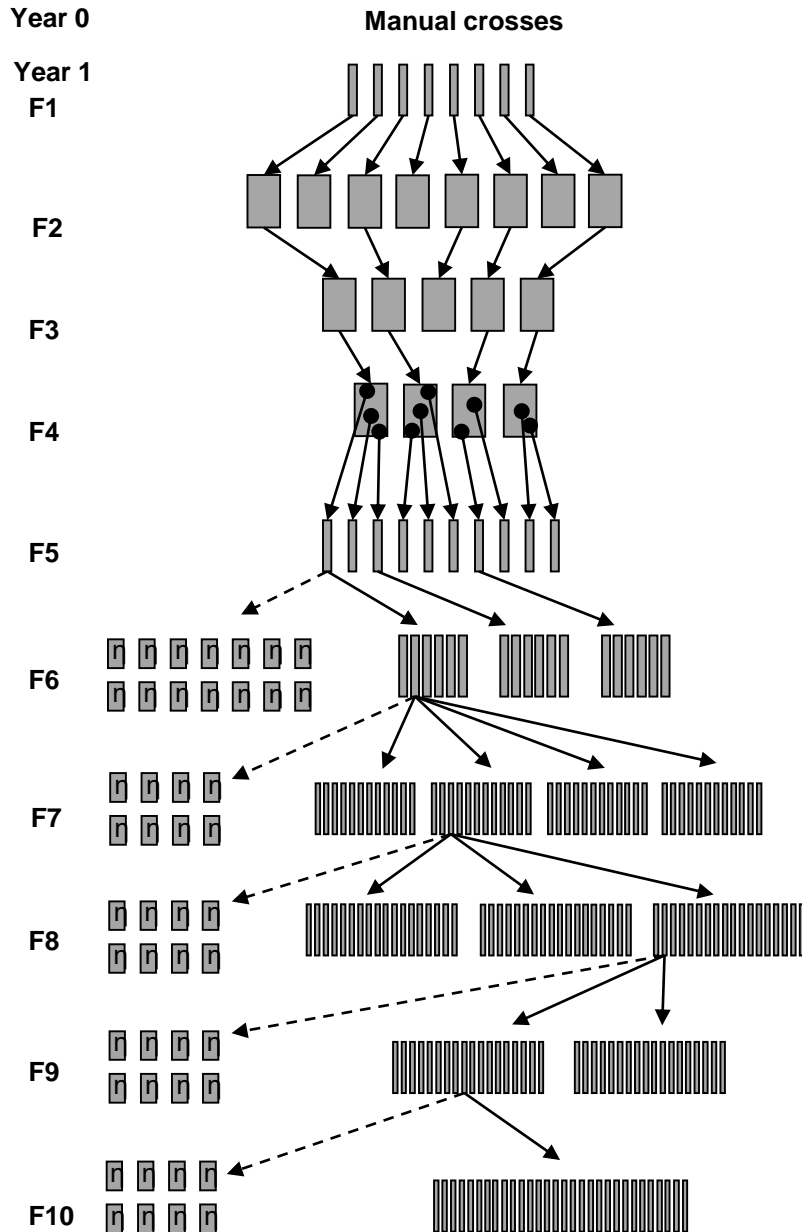
Cultures H, P
Conditions pédoclimatiques
Structures de transformation

↪ Choix stratégiques + priorisation traits (/espèce ou couvert) + pression de sélection adaptée suivant ces cibles

↪ Importance de conserver un ensemble de critères de sélection suffisamment peu nombreux pour être gérables

Sélection pour l'aptitude à la culture en association

Questions posées CA vs CP



Mêmes traits, même gamme de variation ?

Ordre / pression de sélection ?

Méthodologies, designs ?

A quel moment, dans le schéma de sélection, introduire l'évaluation en association ?

génération

testeur (espèce / variété)

effectifs

Sélection spécifique CA ou mixte CP/CA ?

Des contraintes communes CP/CA :

faible qté de semences en début de sélection

variabilité génétique disponible

évaluation en réseau fin de sélection

cout et retour sur investissement

Sélection pour l'aptitude à la culture en association

Caractère prédictif de l'appréciation / sélection des traits en CP

46 géotypes de luzerne

Interactions significatives géotype x type de culture (CP vs CA)

Identification possible de géotypes mieux adaptés à un type de culture (CP vs CA)

↳ **Besoin d'une sélection spécifique pour l'aptitude à la CA**

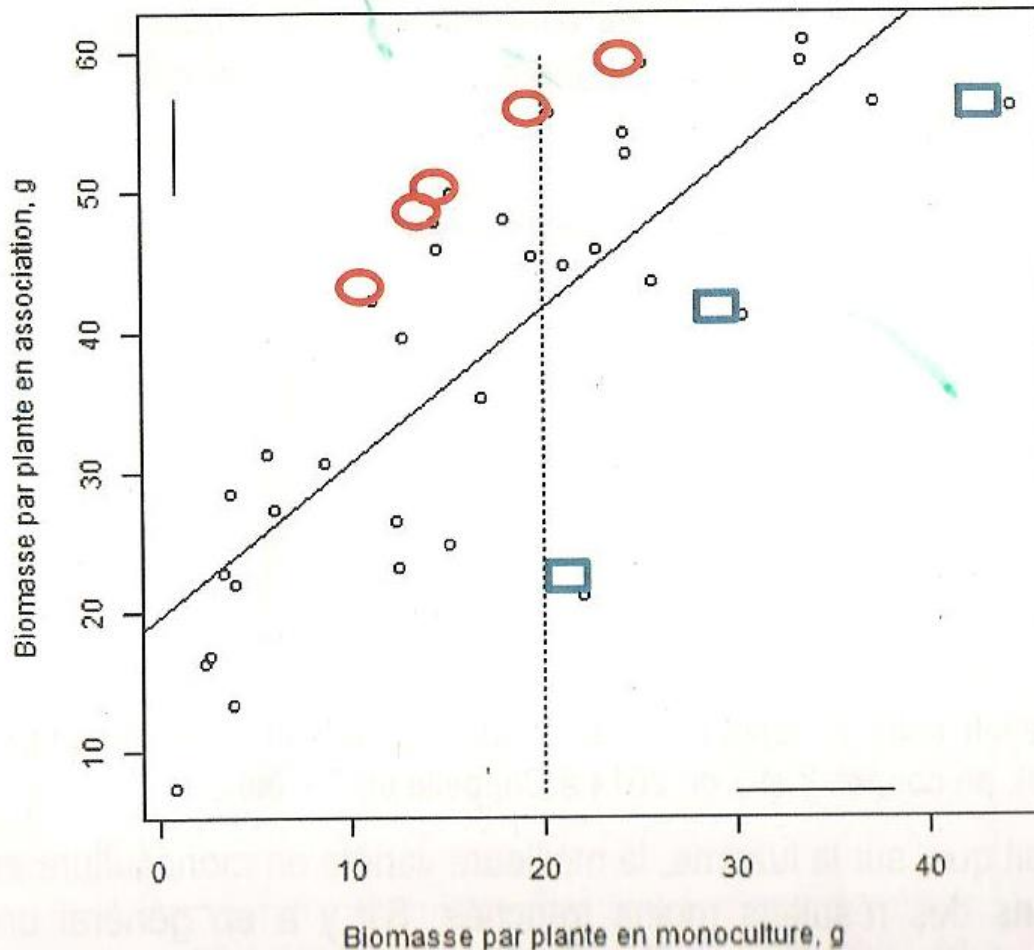


Figure 2 : Corrélation entre la biomasse évaluée en monoculture et biomasse en association, moyenne de 8 coupes réalisées en 2011 et 2012. Chaque point représente un géotype évalué en monoculture et en association. Les géotypes entourés d'un carré sont relativement plus productifs en monoculture, ceux entourés d'un cercle sont relativement plus productifs en association. La ligne pointillée verticale sépare les géotypes relativement productifs en monoculture (à droite) des autres. Les barres indiquent les écarts-types résiduels

Sélection pour l'aptitude à la culture en association

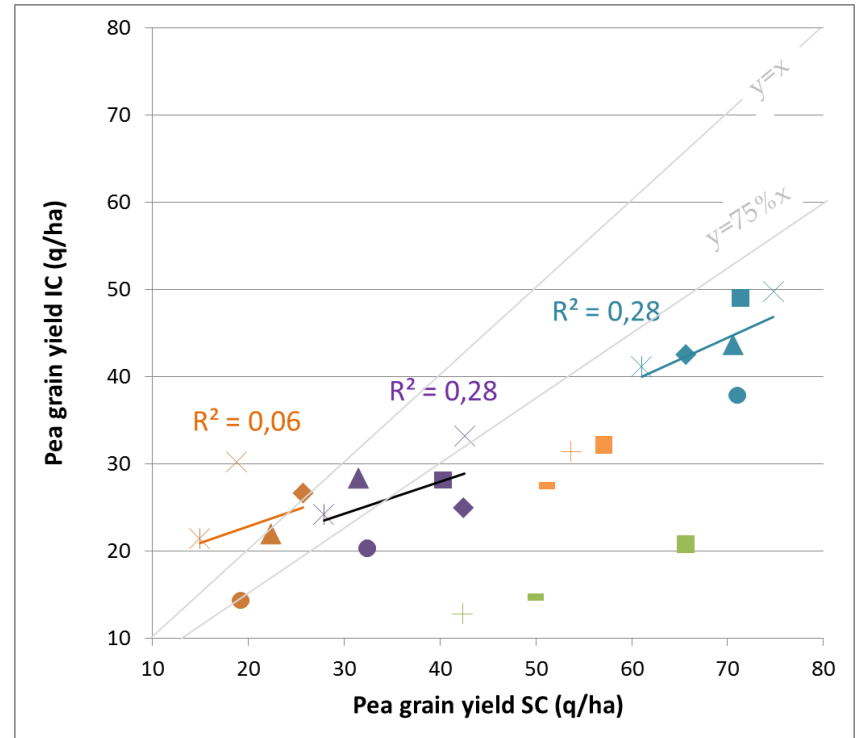
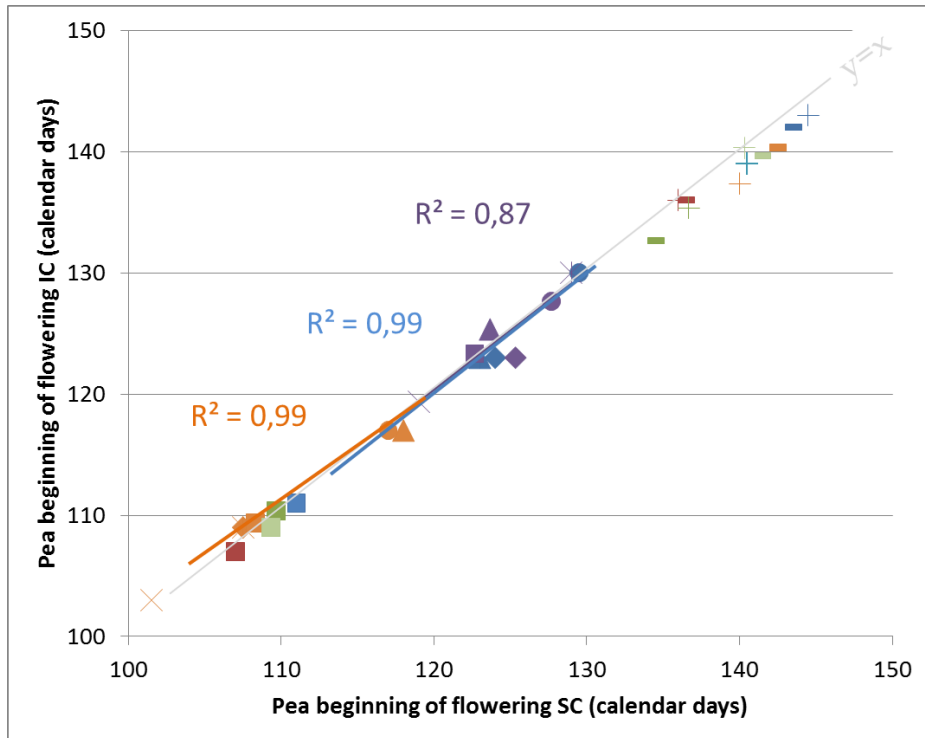
Caractère prédictif de l'appréciation / sélection des traits en CP

Agri-Obtentions 2016
Agri-Obtentions 2017
INRA Dijon 2017
INRA Estrées-Mons 2016
INRA Estrées-Mons 2017
INRA Rennes 2016
INRA Rennes 2017
Terres Inovia 2017

Sigle	Variété
◇	Aviron
△	Balltrap
×	Enduro
□	Fresnel
×	Furious
○	Gangster
+	Geronimo
□	Spencer

Pour certains traits (rendements en grains par ex), l'évaluation en CP n'est pas adaptée et une sélection en CA est nécessaire.

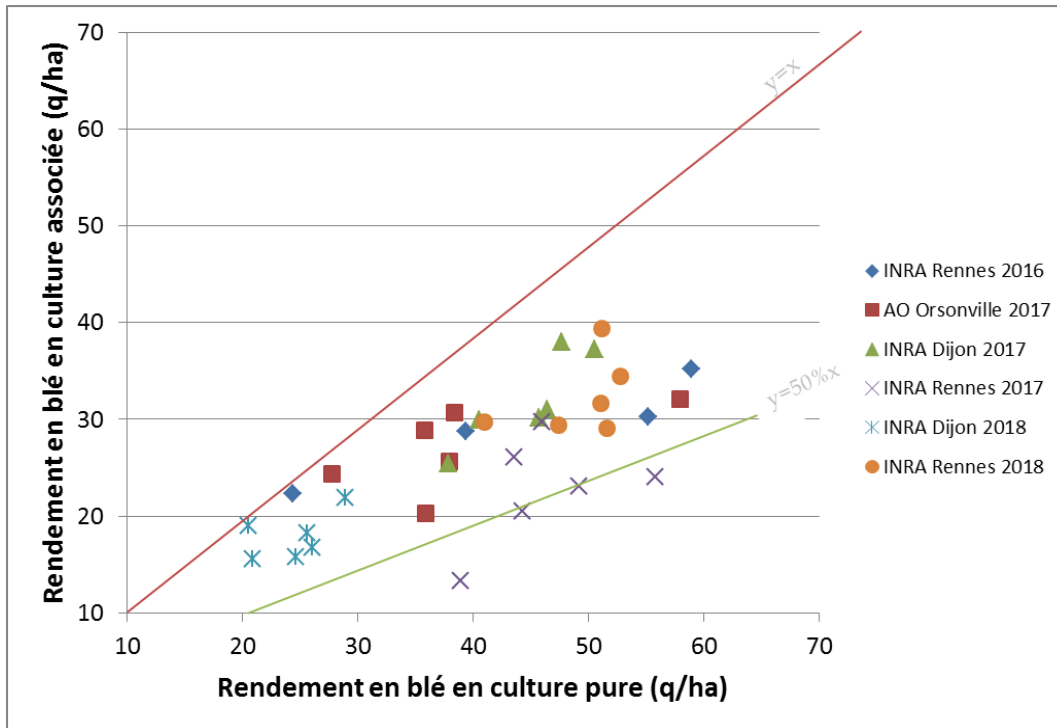
Pour d'autres (date de floraison par ex), l'évaluation en CP est prédictive de celle en CA



Sélection pour l'aptitude à la culture en association

Caractère prédictif de l'appréciation / sélection des traits en CP

Quelles conséquences de la culture en association blé - pois sur le rendement en blé ?
(exemple blé associé à Fresnel)



On observe des différences de comportement selon les variétés étudiées

Le rendement en blé en association est systématiquement inférieur au rendement en blé en culture pure, la densité de semis étant deux fois plus faible en culture associée (150 grains/m² contre 300 grains/m² en culture pure)

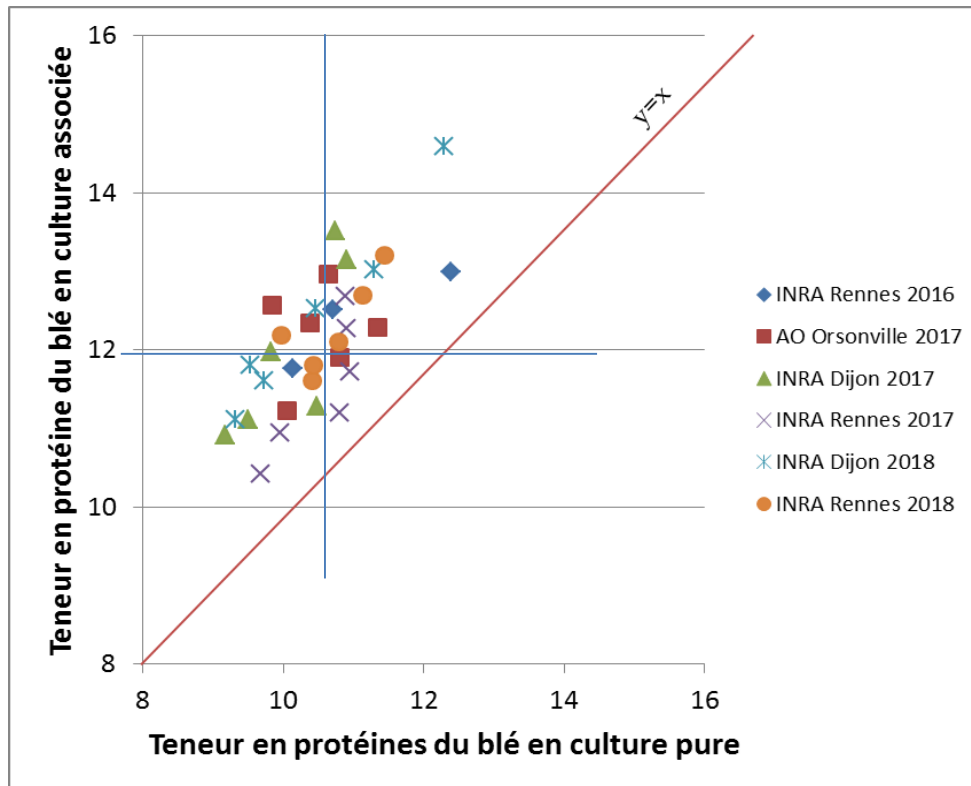
Le rendement en blé en association est supérieur aux 50% de rendement en blé en culture pure dans la quasi-totalité des situations (compensation via tallage ?)

Sélection pour l'aptitude à la culture en association

Caractère prédictif de l'appréciation / sélection des traits en CP

Quelles conséquences de la culture en association blé - pois sur la teneur en protéines du blé ?

(exemple blé associé à Fresnel)



↪ La teneur en protéines du blé en association est systématiquement supérieure à celle du blé en culture pure (1,6 points de plus en moyenne sur nos essais)

↪ Cette augmentation est cohérente avec la baisse du rendement observée en association

↪ A nouveau, on observe des différences de comportement selon les variétés étudiées

Sélection directe pour une seule espèce cible ou en miroir pour les deux espèces ?

Une seule espèce cible

Nombreux génotypes de l'espèce A

- testés avec 1 seule variété « testeur »
moyenne de l'espèce B

- ou testés avec un panel réduit de
testeurs de l'espèce B pris un par un,
ou testeurs mélangés
(exemple CREA Italie)

Deux espèces en miroir

Nombre génotypes de l'espèce A = nombre
génotypes de l'espèce B

- lignes alternées en pépinière

- co-évolution des deux espèces (populations)
(exemple INRA BAGAP Rennes)

Sélection pour l'aptitude à la culture en association

Conséquences pour l'inscription

DHS et VATE sur des combinaisons/mélanges identifiés ?
en pur / en asso / les deux

Essais associés en réseau -> le système peut s'adapter

Expérimentation spéciale CTPS pois fourrager d'hiver associé triticales
Cogestion sections fourragères et protéagineux

Expérimentation spéciale CTPS féverole de P à vocation engrais vert
Cogestion sections plantes de service et protéagineux

En Autriche, l'office d'évaluation variétale pour l'inscription au catalogue évalue les performances de rendement des pois protéagineux en AB en association, les autres critères sont faits en culture pure

? Intégration de l'évaluation des performances en association par la post-inscription (intérêt Terres Inovia, Arvalis)

Co-sélection variétale pour des associations céréales-légumineuses performantes

Services et performances attendus des associations végétales

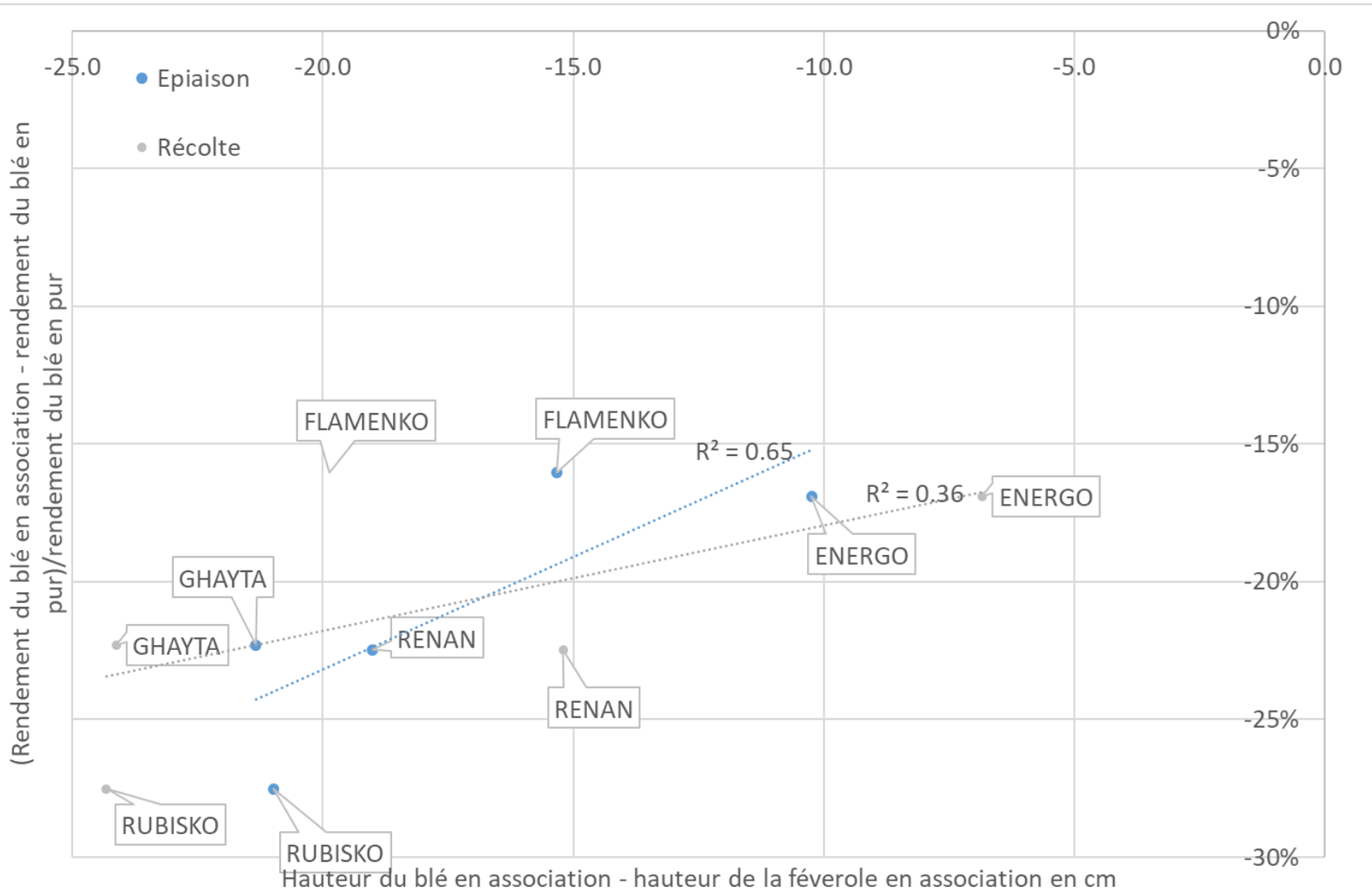
Impact du choix variétal sur les services/performances de l'association
Eléments bibliographiques et résultats d'expérimentation

Sélection pour l'aptitude à la culture en association
Conséquences pour l'inscription

Nouveaux outils/indices pour la caractérisation des couverts et cultures associées.
Phénotypage : exemples et défis

Nouveaux outils/indices pour la caractérisation des couverts et cultures associées

Exemple : perte relative de rendement en association par rapport à la différence de hauteur entre le blé et la féverole à la récolte et à l'épiaison



Outils pour la caractérisation des couverts et cultures associées

Nouvelles méthodes de phénotypage haut débit, appréciation des traits du couvert (imagerie, NDVI, multiplex etc.) et des conditions environnementales (capteurs microclimat dans couverts), analyse des compétitions entre espèces ; méthodologies simplifiées ?

Outil de diagnostic agronomique : « DiagVar Asso » pour connaître les facteurs limitants principaux qui jouent sur les associations. Prise en compte de l'interaction plante-plante dans l'outil.

Modalités d'accès à une **variabilité génétique plus large**, parfois contre-sélectionnée jusqu'à présent (exemple variétés de pois versantes peuvent être adaptées en CA // blés hauts OK en AB)

Outils pour la caractérisation des couverts et cultures associées

Développement d'outils de phénotypage haut débit

exemple : couverture du sol blé/pois/adventices/sol nu

Passage du couvert mono au couvert bispécifique + absence herbicide : questions particulières



blé pur



pois pur



association blé pois

Perspectives

Intégration / Fréquences de retour des associations dans les rotations

Sol, nutriments
Microbiote,
Gestion bioagresseurs

Standardisation et management de la production

Indicateurs d'hétérogénéité
Complements
Stockage

Qualité de la récolte pour la nutrition humaine

Produits allergen ou gluten free
Qualité boulangère



Projet Mobidiv

Gestion, contrôle des bioagresseurs et réduction potentielle des usages de produits phytosanitaires

Modélisation des interactions plante-plante et impact des environnements

Analyse des mécanismes sous-jacents

Allers-retours modélisation - expérimentation au champ

A vibrant, rural landscape featuring a field of tall grasses and various flowers, including purple and red blooms. In the background, several cows are grazing in a field, with a line of trees and a clear sky above.

**Merci pour votre
attention**