

Outils et méthodes de sélection pour les associations céréales-légumineuses

Nathalie MOUTIER, Matthieu FLORIOT et Alain BARANGER



IGEPP

Institut de
Génétique, Environnement
et Protection des Plantes

Quels services/performances attendus des associations céréales-légumineuses ?

Quelles implications en terme de sélection ?

Associations et inscription

Quelles nouvelles références à acquérir par la recherche ?

Quels services/performances attendus des associations céréales-légumineuses ?

Quelles implications en terme de sélection ?

Associations et inscription

Quelles nouvelles références à acquérir par la recherche ?

Diversité des services attendus

Productivité
Qualité
Stabilisation rdts

LER > 1
TP blé

Gestion ressources
lum, eau, N
Complémentarité
 Δ croissance
 Δ prof racinaire

Contrôle
bioagresseurs
 Δ couverture
 Δ microclimat
effet dilution
effet barrière

Nutrition animale

Proximité
Autonomie
protéique



Conservation
biodiversité
 Δ niches, habitats

Auxiliaires

Préservation sols
Rotations
Structure
Evaporation
Erosion
Reliquats

Séquestration C
 Δ Matière org

Diversité des objectifs de production

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

De multiples performances attendues

Rdt blé, Rdt légumineuse / grains, MS
Rdt cumulé

LERs partiels / N, MS, rdt
LER total

Index équilibre entre les deux espèces

Indicateurs de performance ?

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

Salissement
Maladies et ravageurs

Facilité de récolte (synchro, verse)
Facilité de tri (PMG, % de grains lég cassés dans céréales)

Biodiversité (auxiliaires)
Erosion sol
Reliquats N

Land Equivalent Ratio (LER) - definition

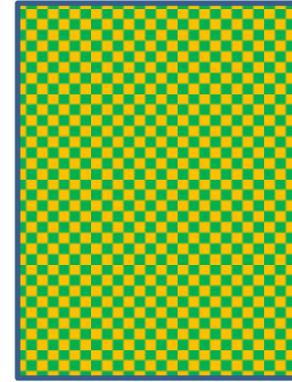
= the relative land area under SC that is required to produce the yields achieved in IC



1 ha wheat
Yield W (SC)



1 ha pea
Yield P (SC)



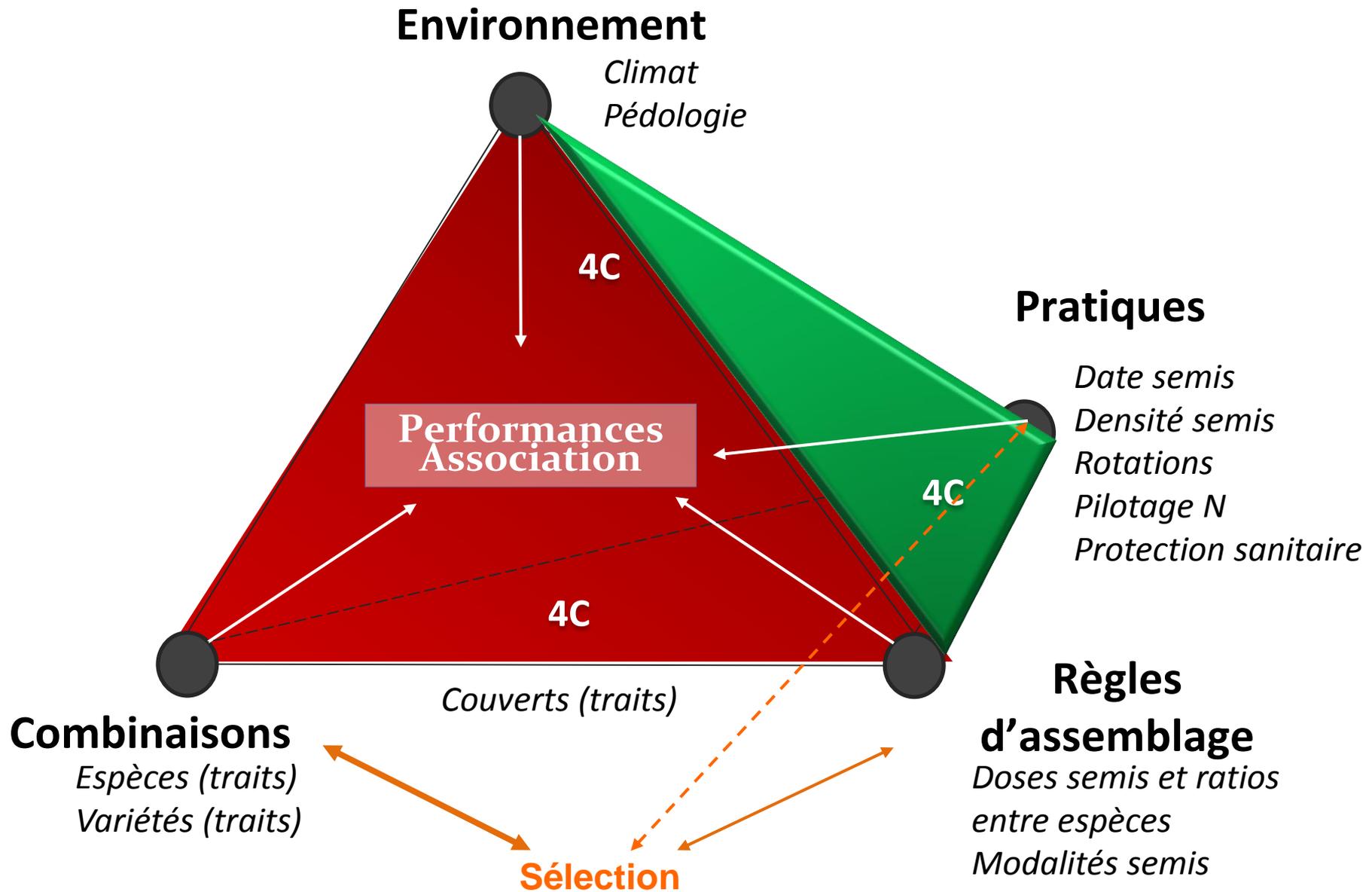
1 ha pea-wheat
Yields Wp and Pw (IC)

$$LER_{tot} = LER_W + LER_P = \frac{Y_{Wp}}{Y_{W(SC)}} + \frac{Y_{Pw}}{Y_{P(SC)}}$$

-> to compare cultivar performance in intercropping relative to sole crop

LER > 1 : environmental resources are used more efficiently by IC than by SC

Facteurs influençant les performances des associations

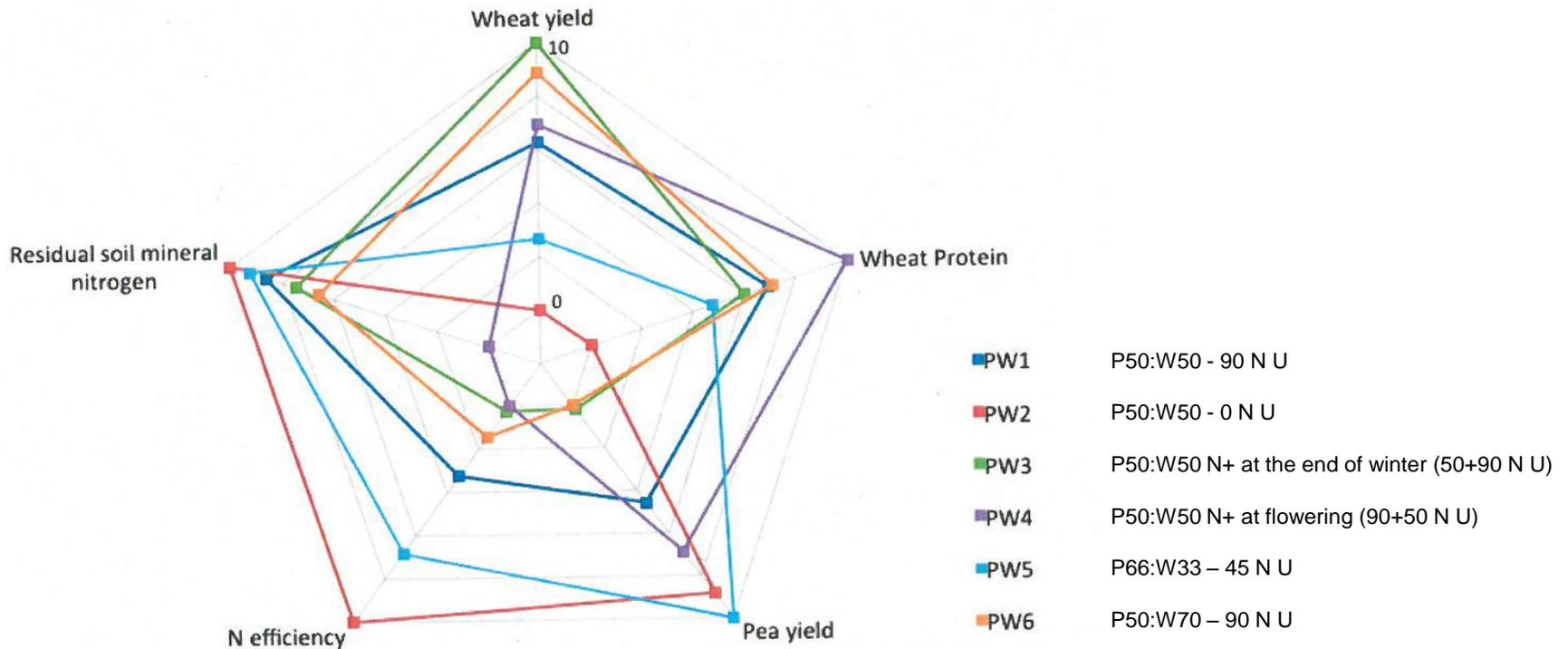


Sowing design : substitutive/replacement vs additive mixtures

Sowing design	Plant densities DW/WP	
	Pea SC	0/59
	Substitutive mixture IC	95/28
	Substitutive row IC	109/30
	Additive row IC	109/59

F, seed treated with fungicide; H, herbicide 2–4 days after sowing. ■, pea plants; ■, wheat plants.

Influence of fertilization (dose and date of application) and sowing ratio between the two species on performances of the mixture



Quels services/performances attendus des associations céréales-légumineuses ?

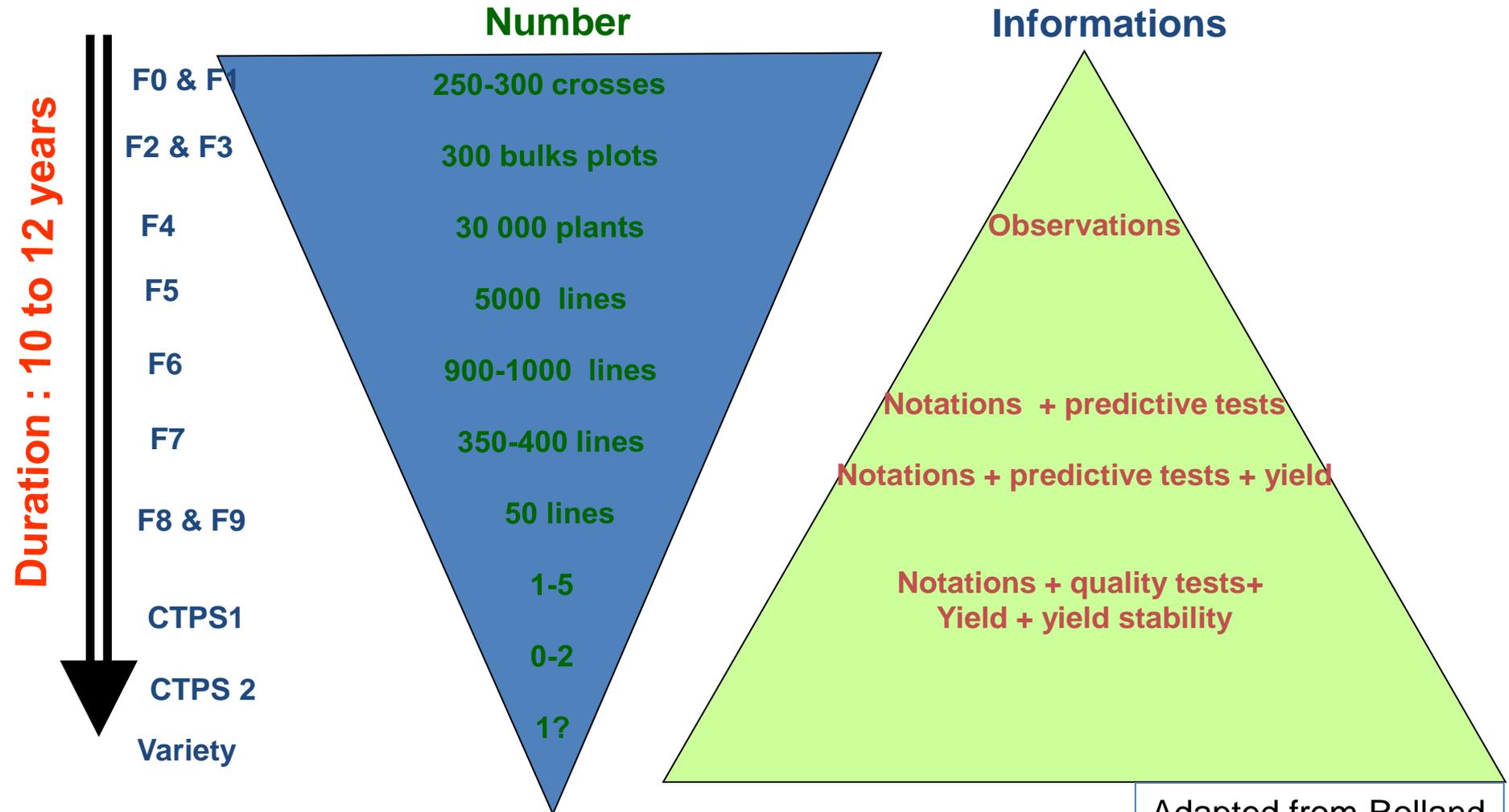
Quelles implications en terme de sélection ?

Associations et inscription

Quelles nouvelles références à acquérir par la recherche ?

Schéma de sélection en culture pure

Exemple : sélection blé tendre d'hiver en culture pure
INRA Rennes – UMR IGEPP



Year 0

Manual crosses

Sélection blé tendre d'hiver en culture pure INRA Rennes – UMR IGEPP

Year 1

F1

Year 2

F2

Year 3

F3

Year 4

F4

Year 5

F5

Year 6

F6

Year 7

F7

Year 8

F8

Year 9

F9

Year 10

F10

4 years (F2 to F5) of selection before yield evaluation
Résistance aux maladies du feuillage
Architecture (hauteur)
Précocité à épisaison

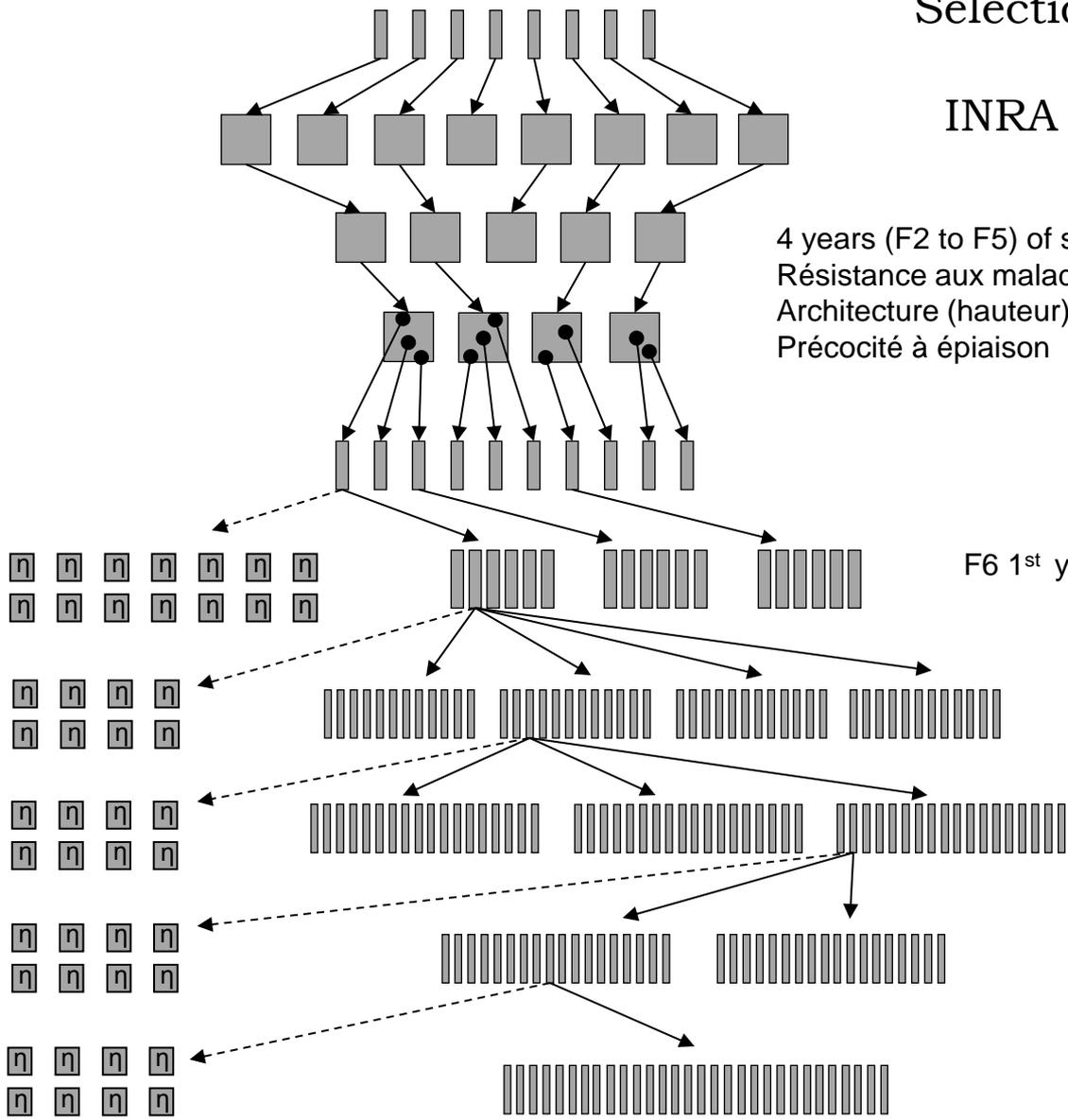
F6 1st yield evaluation

Grain protein content and W

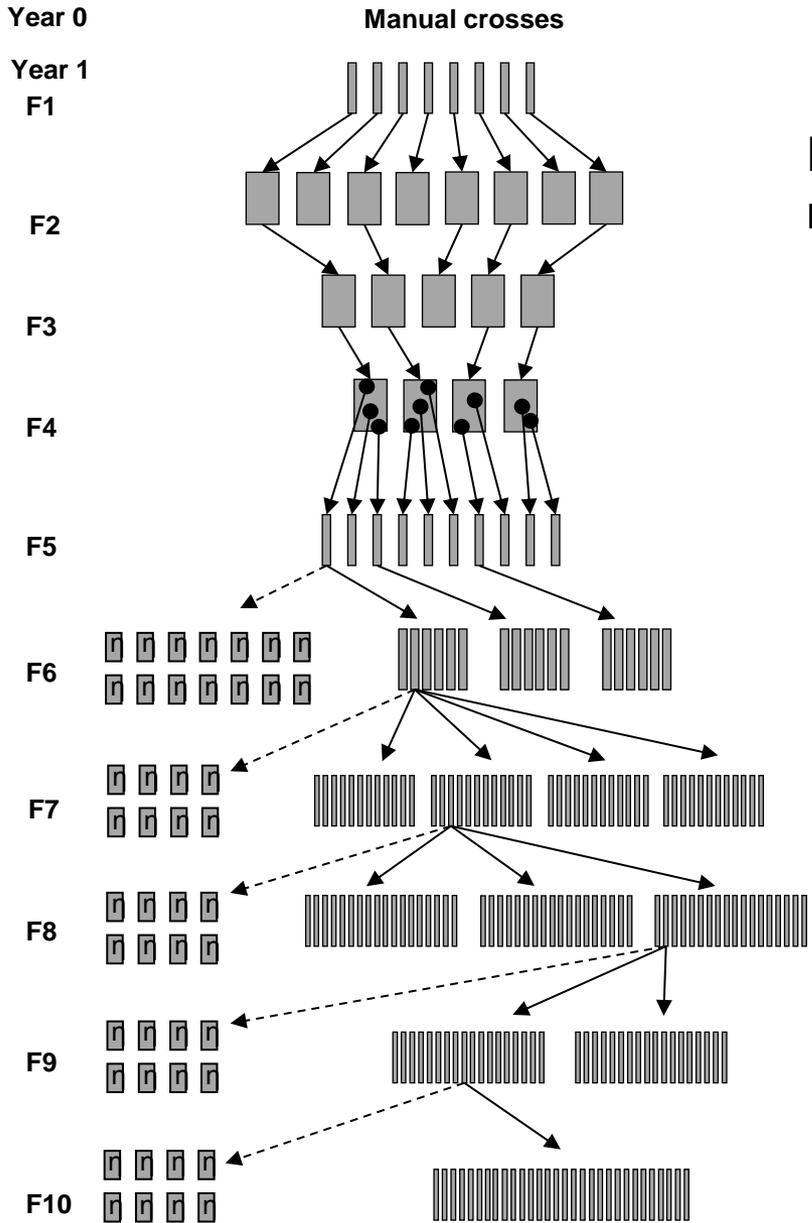
Quality tests, breadmaking

Quality tests, breadmaking

1-2 pure lines
Before Catatog registration tests (2 years) if lines fixed



Adapted from Rolland



Des contraintes communes pur/associé : faible nb de semences en début de sélection

Questions posées :

Les mêmes traits ou pas ?

Variabilité génétique diversifiée disponible ?

Ordre / pression de sélection ?

A quel moment dans le schéma de sélection, introduire la sélection pour les associations (à quelle génération, avec quels effectifs) ?

Sélection spécifique asso ou mixte pur/asso ?

Sélection pour les associations

Bien définir les cibles visées



Quels sont les traits (espèce, variété, couvert) importants pour la réussite 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, quelles méthodologies, dispositifs nécessaires ? Quelles nouvelles formes prises par les schémas de sélection ?
Quelles méthodes pour évaluer ces traits en situation de culture associée ?

Défis et implications pour la sélection

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

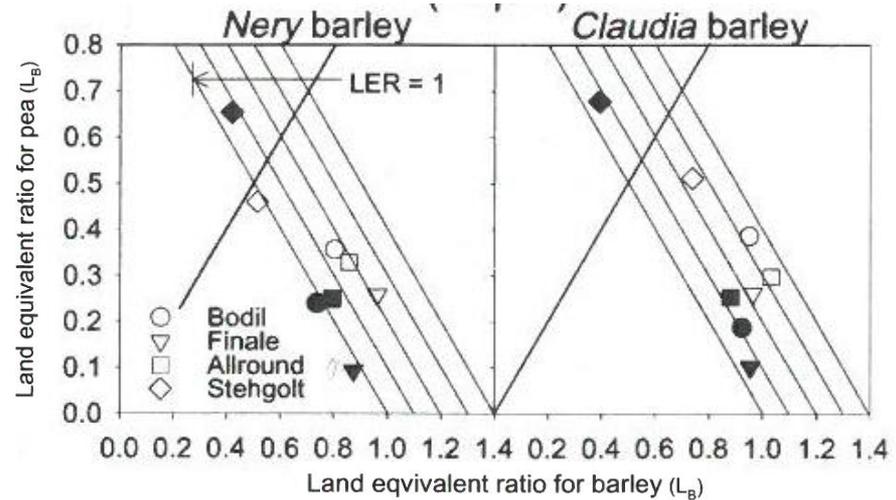
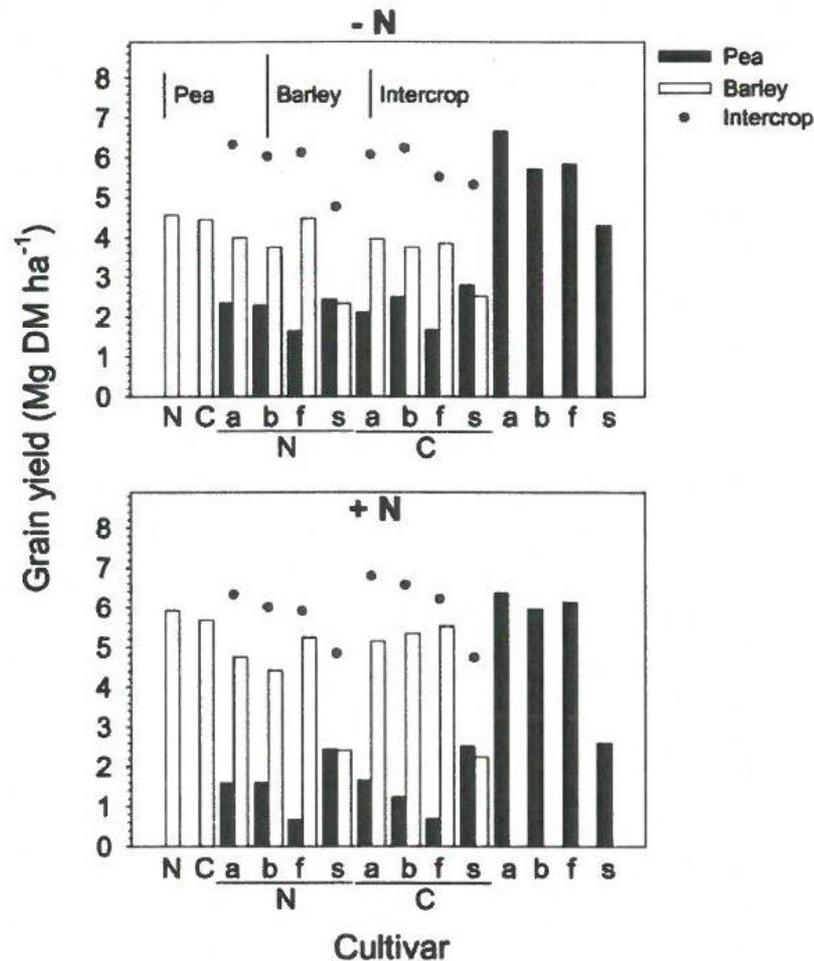
Identification des traits et gamme de variation de ces traits

Exemple : programme IVD CéréLAG

8 géotypes de blé tendre meunier peu sensibles aux maladies (notamment rouille jaune), résistants à la verse, **choisis selon un certain nombre de critères** :

Précocité à épiaison	Hauteur de paille	Niveau de rendement	Teneur en protéines	Idéotype	Géotype choisi
Précoce	Haute	Elevé	Faible	Blé 1 (PHEF)	Geny INRA-AO 2018
		Faible	Elevée	Blé 2 (PHFE)	CF 14 336 Matériel INRA-AO en fin de sélection
	Moyenne	Elevé	Faible	Blé3 (PMEF)	Flamenko (INRA-AO 2011)
		Faible	Elevée	Blé 4 (PMFE)	Rebelde (Momont 2015/ INRA-AO 2015)
½ précoce à ½ tardif	Haute	Elevé	Faible	Blé 5 (THEF)	RE 13 003 Matériel INRA-AO en fin de sélection
		Faible	Elevée	Blé 6 (THFE)	Ehogold (Autriche 2014)
	Moyenne	Elevé	Faible	Blé 7 (TMEF)	Atlass (Sem Partners 2004)
		Faible	Elevée	Blé 8 (TMFE)	Renan (INRA-AO 1989, témoin en AB)

Performances culture pure -> culture associée ?



Aboveground biomass production without (o) or with (●) application of Nitrogen

Choice of P cv influenced the IC performance to a larger degree than the choice of B cv

P cv x cropping system interactions -> cv performed differently in SC and IC

⇒ Need for breeding suitable pea cvs for IC

Hauggaard-Nielsen and Jensen, 2001

Fig. 3. Grain yields of barley and pea cultivars in sole and intercroops without (-N) and with (+N) application of 40 kg N ha⁻¹. Experiment I: all values are means of three replicates. Bars represent LSD_{0.05}. For further details on cultivars, see Table 1.

For optimized N-use in pea-barley intercrops, most important traits for pea :

- Determinate growth
- Medium competitive root system for soil inorganic N during early growth
- High light absorption capacity (P grow < B)
- Early establishment of N₂ fixation

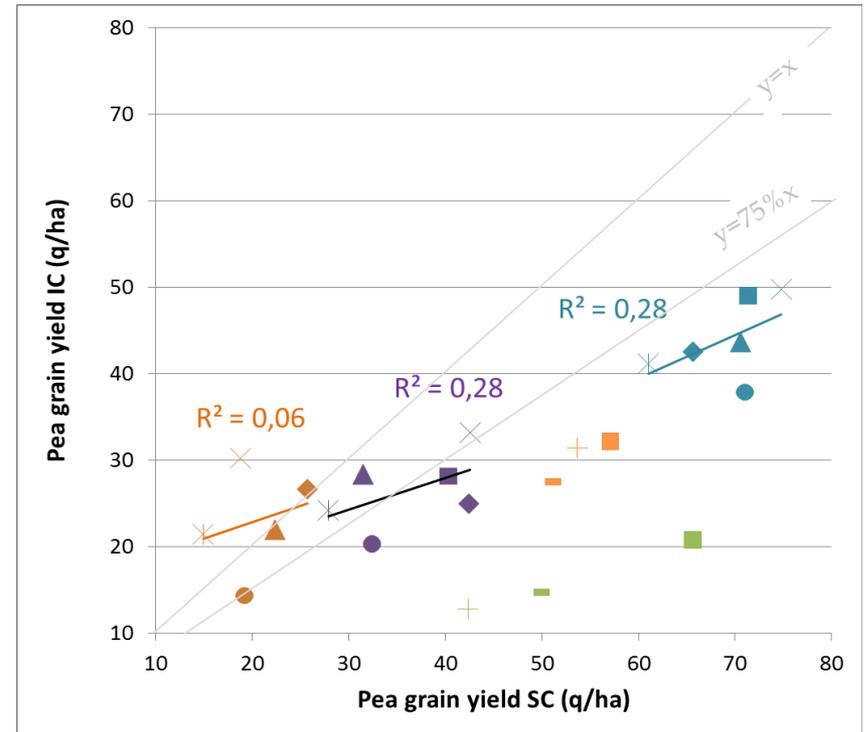
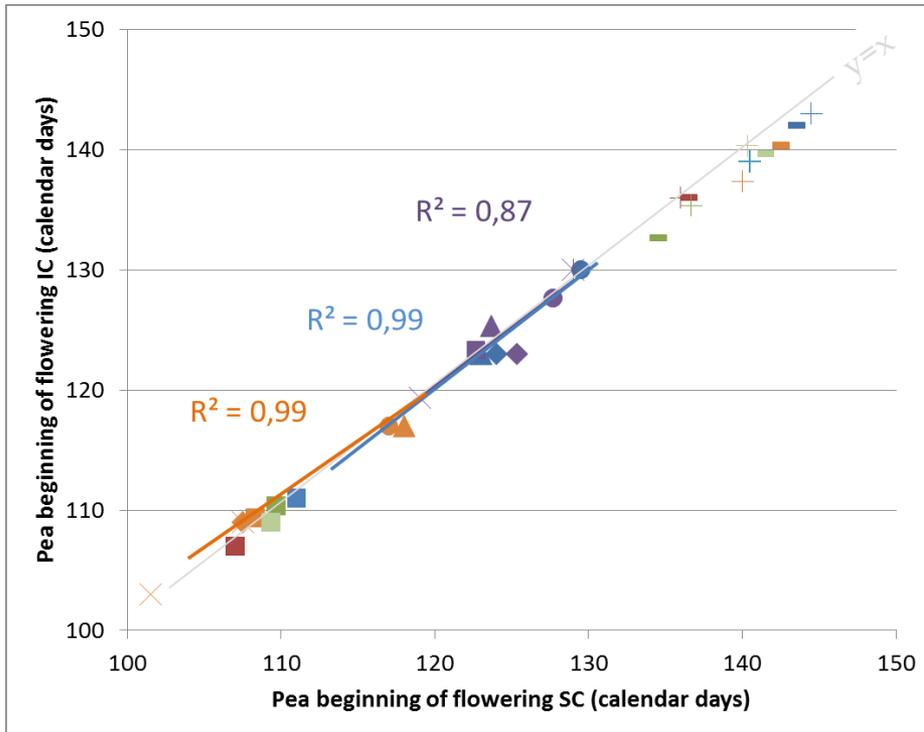
≠ to SC cv

[Hauggaard-Nielsen and Jensen, 2001]

Other example

Pea lodging resistance -> not necessary in IC ≠ to SC

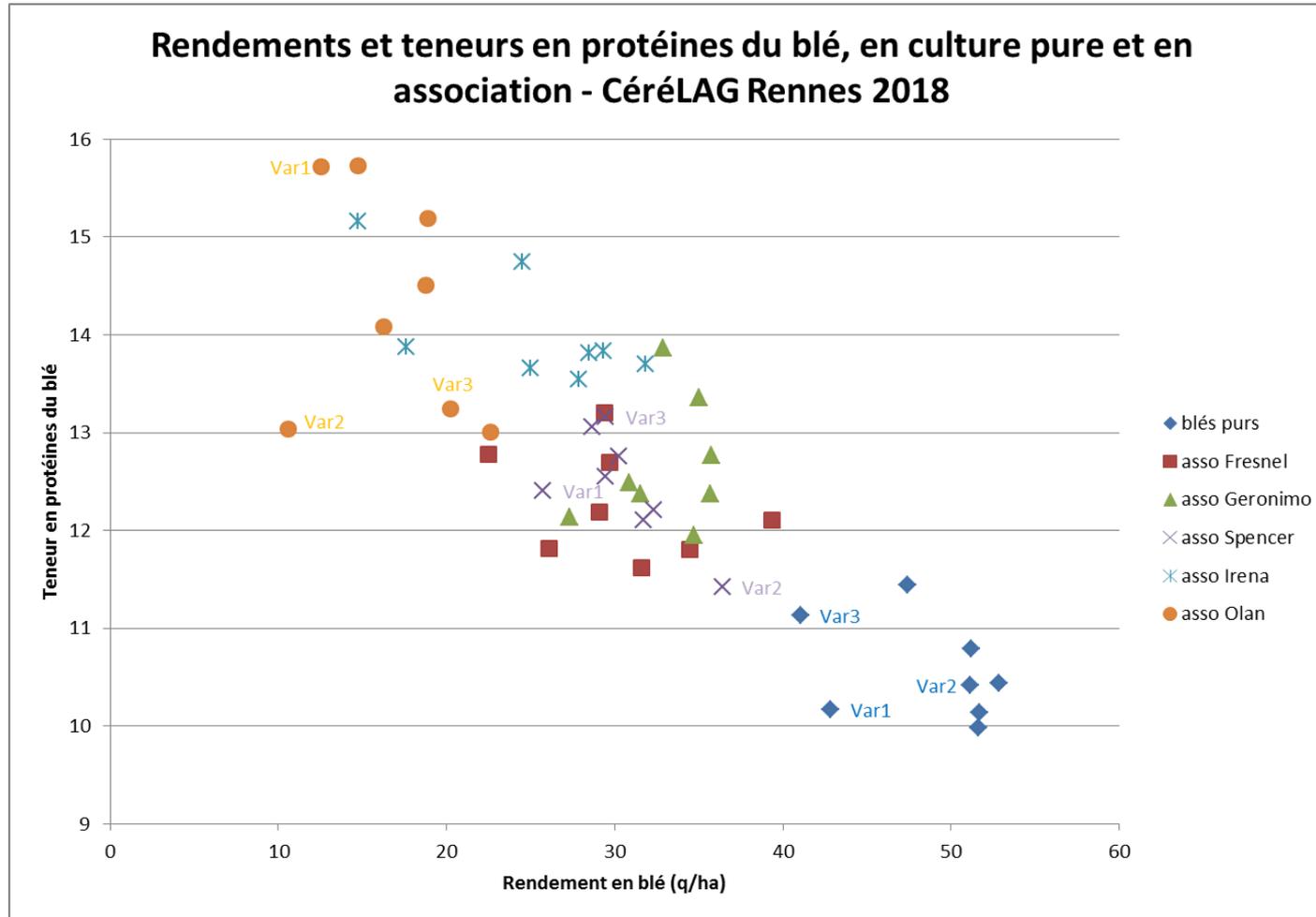
Performances culture pure -> culture associée ?



■	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

For certain traits, selection for sol crop is not adapted to selection for mixture => there is a need for a specific selection for mixture

Influence de l'espèce/variété associée



L'espèce associée (pois/féverole) et la variété de cette espèce a une influence sur le rendement et la teneur en protéines des variétés de blé

Aptitudes générale et spécifique à l'association

GAM = General ability to mixture (average of all mixtures with this cv)

SAM = Specific ability to mixture (the best one compared to the others)

Table 4. General mixing ability (along diagonal) and specific mixing ability (below diagonal) for grain yield for all 15 possible mixtures grown in 33 environments in eastern Washington during 1995–1997.

	Eltan	Hill 81	Lewjain	Madsen	Rod	Stephens
	kg ha ⁻¹					
Eltan	–196.6					
Hill 81	121.3	–80.8				
Lewjain	–89.6	–43.0	–101.8			
Madsen	–85.1	–13.5	62.1	–4.9		
Rod	–20.2	14.0	55.8	–1.8	363.8	
Stephens	73.6	–78.8	14.6	38.3	–47.7	20.3

Gallandt *et al.*, 2001

Aptitudes générale et spécifique à l'association

Thèse Benedikt Haug (FiBL Suisse) (essais 2018-2019) :
28 variétés pois x 8 variétés orge x 2 sites x 2 années
Dispositif factoriel incomplet

$$Y_{rbp} = \mu + \alpha_r + GMA_b + GMA_p + SMA_{bp} + e$$

With Y_{rbp} the mixture yield of the b-th barley variety and the p-th pea variety in repetition r,

μ the intercept,

α_r the effect of the rth repetition/block,

GMA_b the general mixing ability of the bth barley cultivar,

GMA_p the general mixing ability of the pth pea variety,

SMA_{bp} the specific mixing ability of the bth barley cultivar with the pth pea cultivar (interaction),

e the error term

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)

Quels services/performances attendus des associations céréales-légumineuses ?

Quelles implications en terme de sélection ?

Associations et inscription

Quelles nouvelles références à acquérir par la recherche ?

Implications 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

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

Quels services/performances attendus des associations céréales-légumineuses ?

Quelles implications en terme de sélection ?

Associations et inscription

Quelles nouvelles références à acquérir par la recherche ?

Défis et implications pour la recherche

Processus sous-jacents à l'obtention des services :

- teneurs en protéines
- contrôle des bioagresseurs
- gestion de l'N dans la rotation

Durabilité potentielle des systèmes et réponse aux grands enjeux : réduction IFT, changement climatique

Recherche ?

Ressources biologiques et moléculaires
Variabilité disponible RG
Champ des possibles de variation des traits
Outils de suivi des traits

Interactions GxExC

Besoin de nouveaux outils pour les associations

Travailler sur la création ou le calcul d'indices pertinents

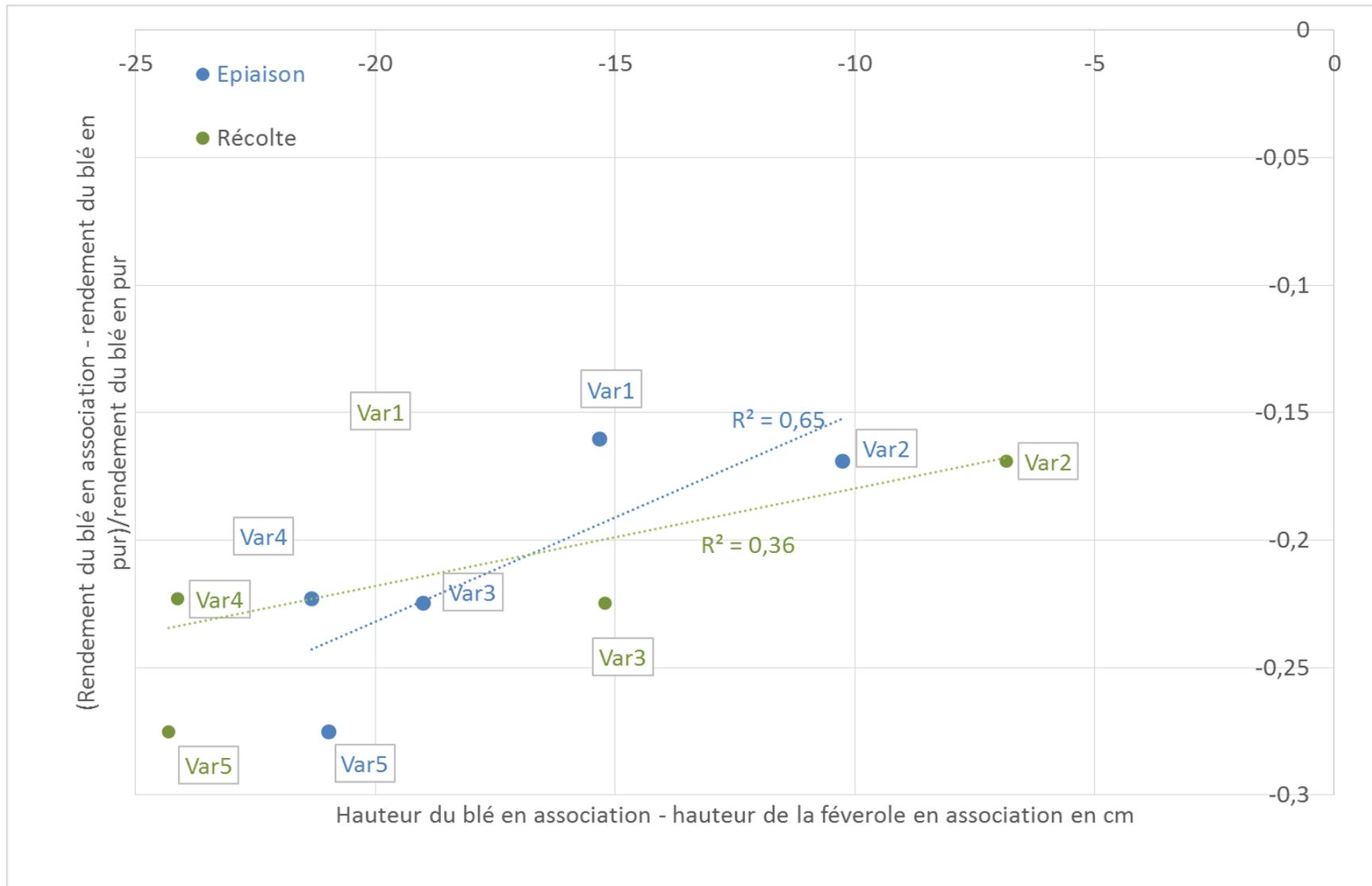
Nouvelles méthodes phénotypage haut débit, appréciation des traits du couvert (imagerie, NDVI, multiplex etc.) et des conditions environnementales (capteurs microclimat dans couverts), analyse des compétitions entre espèces ; méthodologies simplifiées ?

Besoin d'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.

+ besoin d'avoir accès à une variabilité génétique plus importante, parfois contre-sélectionnée jusqu'à présent (exemple pois qui versent OK en asso // blés hauts OK en AB)

Création ou calcul d'indices pertinents pour la culture associée

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



Développement d'outils de phénotypage haut débit

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



blé pur

pois pur

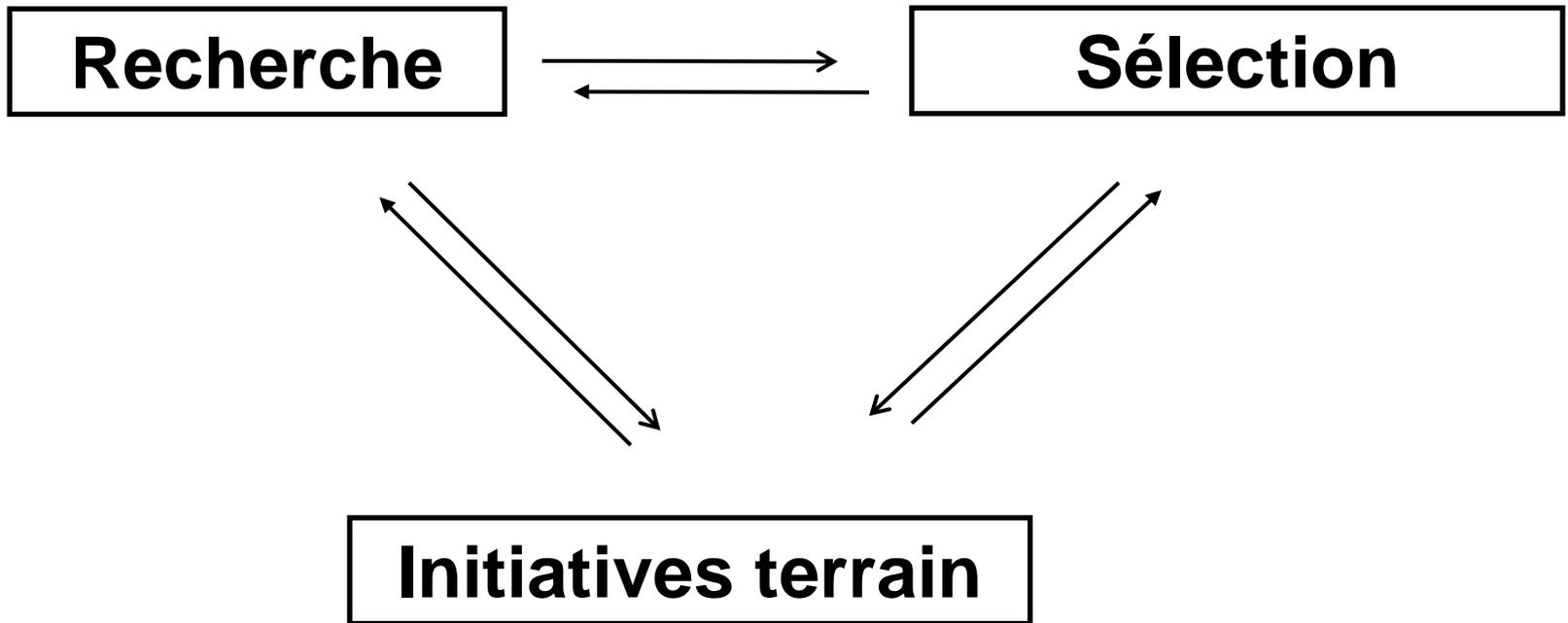
association blé pois

Besoin de développements méthodologiques

Développement approche GMA/SAM (Producteur / Associé (Forst, 2018; Goldringer 1994))

Comparaison plusieurs méthodologies sélection pur/asso, asso blé/asso
pois croisée

Besoin d'allers-retours entre recherche, sélection, conseillers et agriculteurs



Collaborations

Eric Hanocq, Isabelle Lejeune-Hénaut (INRA Estrées-Mons)

Pascal Marget, Christophe Lecomte, Judith Burstin, *Thibault Guégan* (INRA Dijon)

Isabelle Litrico, Cyril Firmat (INRA Lusignan)

Jérôme Enjalbert, Emma Forst, Tristan Mary-Huard (INRA Le Moulon)

Christos Dordas (AUTH, Grèce)

Peter Miko (MTA ATK, Hongrie)

Paolo Anicchiarico (CREA, Italie)

Pierre Hohmann, *Benedikt Haug* (FIBL, Suisse)

François Boissinot (CRAPL)

Jean Champion (CA 26)

Patrice Côte (CA 89)

Cécile Le Gall (Terres Inovia)

Enguerrand Burel, Loïc Prieur (CREAB)

Thierry Quirin (AgroBio PC / FRAB Nouvelle Aquitaine)

Christine Fintz, Marie-Hélène Bernicot (GEVES)

Laurence Fontaine, Mathieu Conseil (ITAB)

A Rennes en 2019, essais associations = 800 microparcelles en Agriculture Biologique

Développement AO

5 couples espèces x 3 densités

5 sites, 1 année

IVD CéréLAG

8 variétés blé tendre d'hiver x (1 variété de pois hr + 2 variétés de pois Hr + 2 variétés de féverole)

3 sites, 4 années

H2020 Remix

10 variétés blé tendre d'hiver x 9 variété pois hr

4 sites, 2 années

A vibrant, rural landscape featuring a field of tall grasses and wildflowers. In the foreground, there are numerous purple flowers and several bright red poppies. The middle ground shows a line of green trees and a few cows grazing. The background consists of rolling green hills under a clear sky.

**Merci pour votre
attention**