

Quelles pistes pour l'avenir ?

Les leviers activables

Les verrous

Les perspectives

Philippe Gate

avec la collaboration de :

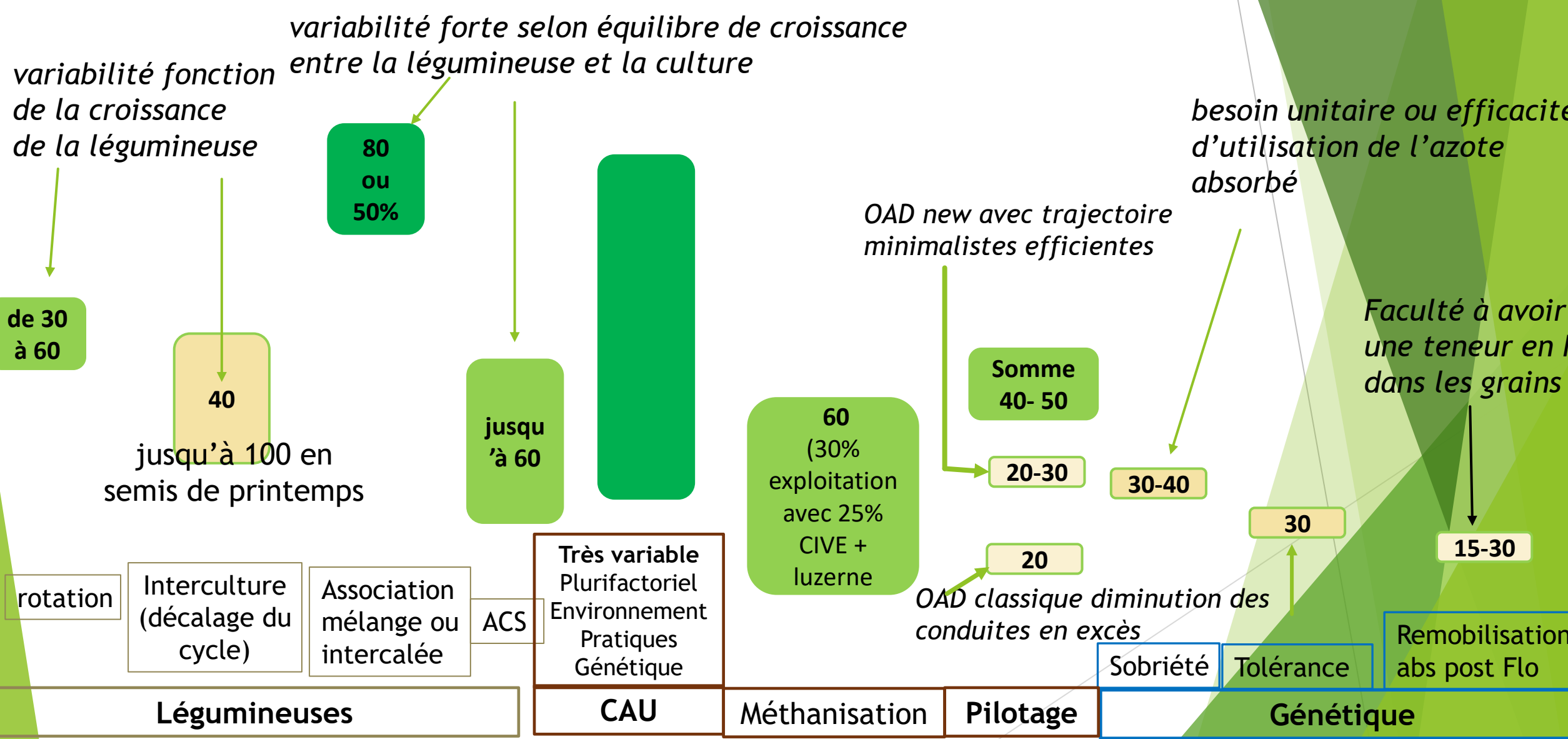
André Gallais, Marie-Hélène Jeuffroy, Jean-Louis Peyraud,
Marie Emmanuelle Saint-Macary, Hubert Defrancq, Alain Gojon, Christian Rousseau,
Sylvie Recous, Josette Garnier, Gilles Lemaire



*« Une passion : Connaître,
Une ambition : Transmettre »,
depuis plus de 250 ans !*

Chiffrage des possibilités de réduction de doses

(en kgN/ha, synthèse d'après nombreux travaux INRAE et ITA)



Chiffrage des possibilités de réduction de doses

(en kgN/ha, synthèse d'après nombreux travaux INRAE et ITA)

Baisse
considérable
des surfaces

ex :
protéagineux -
500 000 ha =
300kTN/han
la France 240kT
de tourteau de
soja...L'élevage
pourrait garantir
700 000 ha

de 30
à 60

40

jusqu'à 100 en
semis de printemps

80
ou
50%

Systèmes encore
très marginaux

jusqu'
'à 60

Concerne toutes
les surfaces
Variabilité
accrue
avec le CC

Systèmes encore
marginaux

60
(30%
exploitation
avec 25%
CIVE +
luzerne

concerne
peu de
surfaces
marché
modéré
(15%)

Somme
40- 50

20-30

20

Concerne toutes les
surfaces mais critères
insuffisamment
pris en compte

30-40

30

15-30

rotation

Interculture
(décalage du
cycle)

Association
mélange ou
intercalée

ACS

Très variable
Plurifactoriel
Environnement
Pratiques
Génétique

CAU

Méthanisation

Pilotage

Sobriété

Tolérance

Remobilisation
abs post Flo

Légumineuses

Génétique



Comment déployer davantage les systèmes les plus économes, en rupture ?

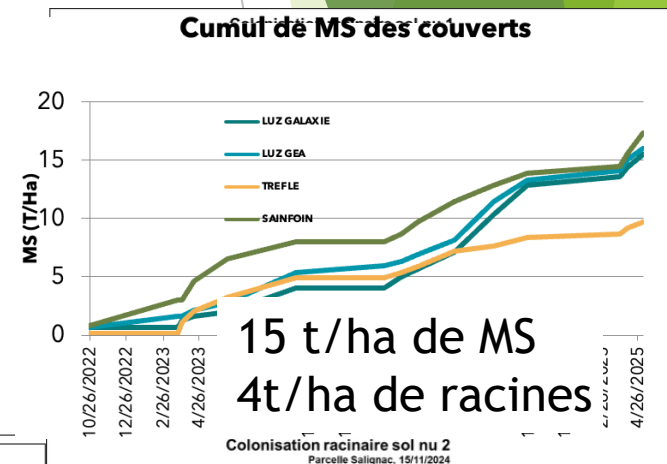
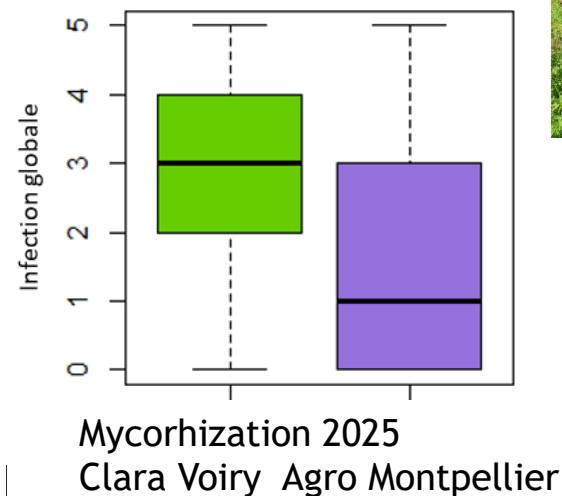
Associations avec des légumineuses



Nouvelle façon d'envisager les associations: Les semis intercalés

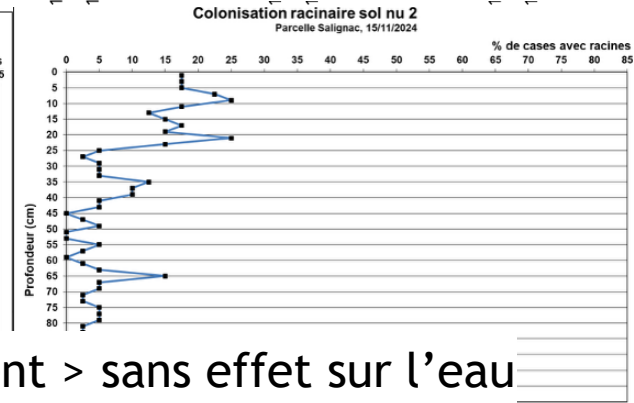
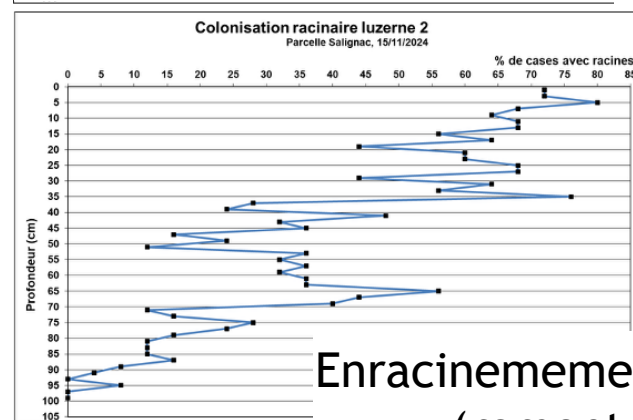
❖ Les avantages au-delà des économies d'azote

- Couverts permanents y compris en AB
- Pas de tri post-récolte
- Binage possible de la luzerne
- Stockage de C, sols moins secs
- Mycorhization X 3



❖ Les Verrous

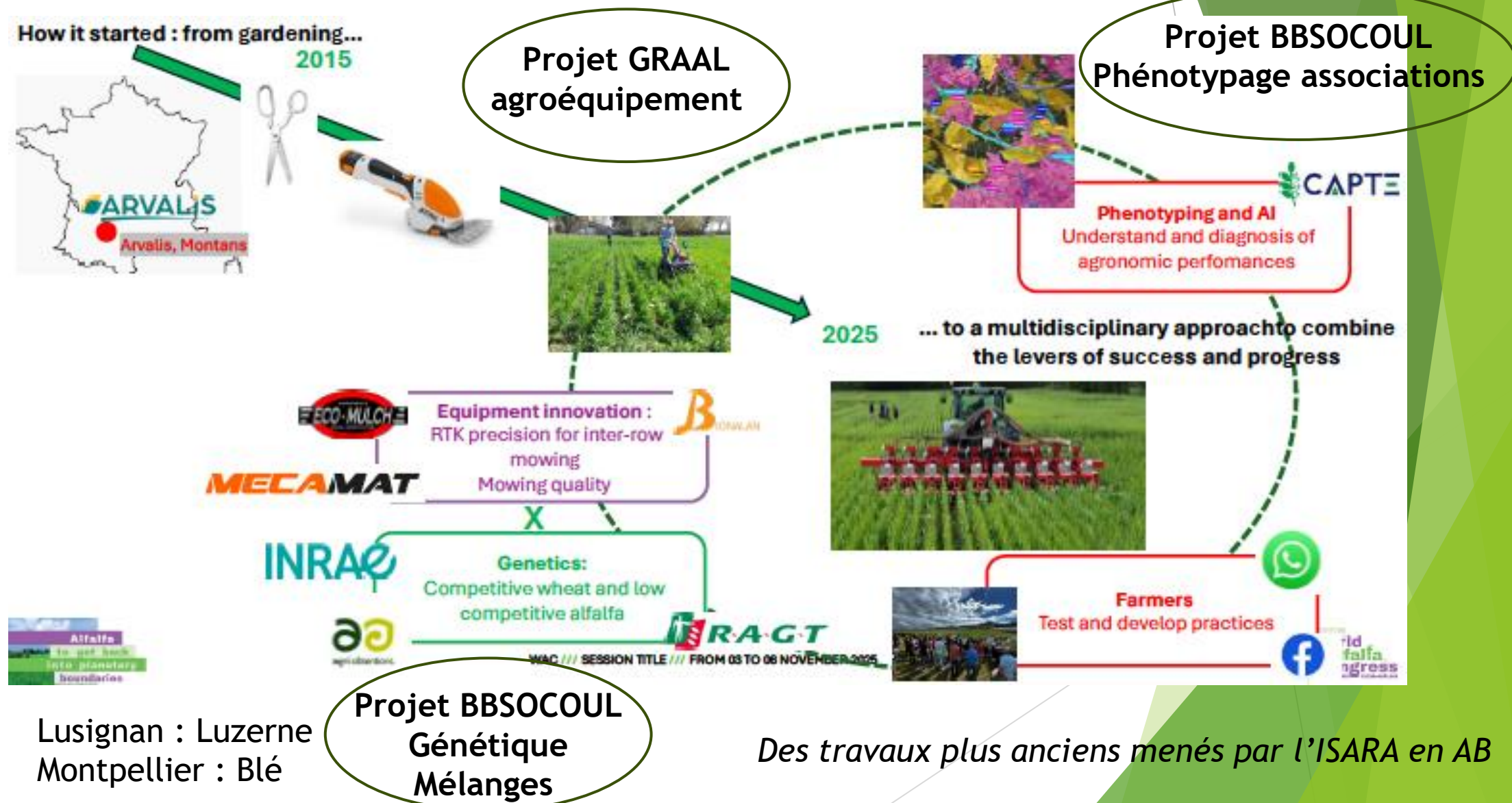
- Guidage satellite (2 cm) : paramétrage
- Des variétés de luzerne inadaptées (ex : pour un blé, ne pas dépasser 1t/ha à la floraison) : rendement de la culture irrégulier
- Coûts et charges de mécanisation



Enracinement > sans effet sur l'eau
(remontées, effet mulch)



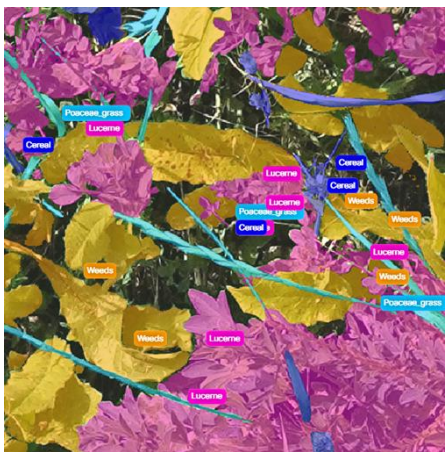
Des projets pluri disciplinaires en cours pour lever les verrous



Les avancées récentes du phénotypage haut débit pour suivre des couverts complexes



+ de 6000 images annotées



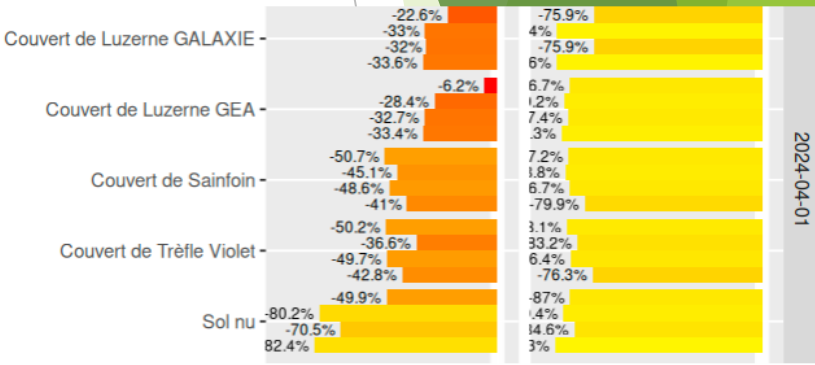
Modélisation pour suivre la croissance respective des 2 espèces (hauteur, biomasse, sénescence) pure



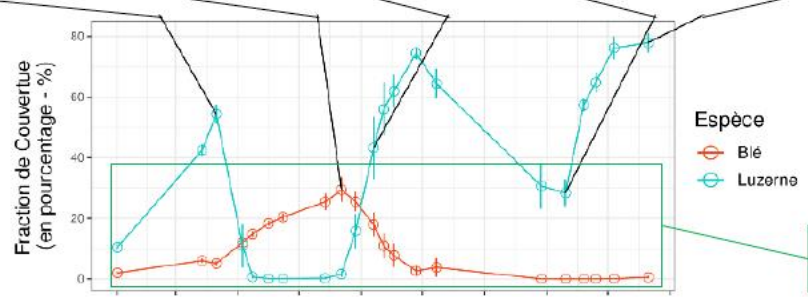
IA : deep learning

Analyse de la croissance du blé soumis à la possible concurrence

En cours :
définir un indicateur de compétition culture/couvert



Phénotypage phénomobile



Analyse de la croissance du blé soumis à la possible concurrence de la luzerne

De premiers traits identifiés à sélectionner :

- dormance
- nanisme (hauteur)

INRAE Montpellier
UMT CAPTE
ARVALIS

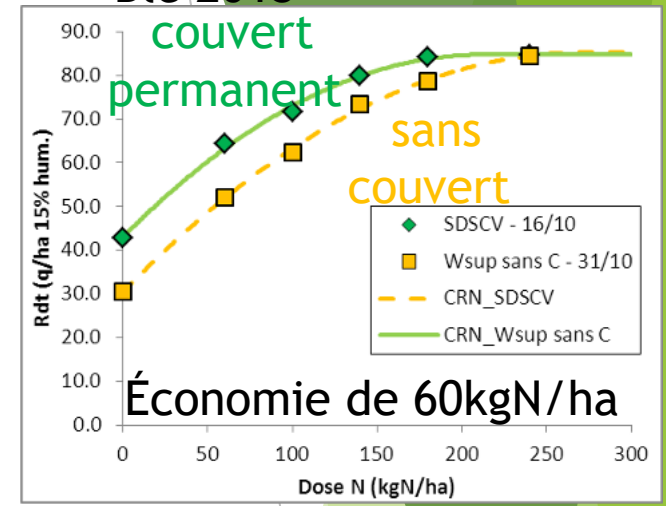


Cultures sous couverts permanents, et associations avec légumineuses : voies de progrès

Ferme de H. Charpentier
Blé 2013

❖ Semis sous couverts et association

- des rendements **trop variables** (régulation de la concurrence ACS, variabilité du LER en asso...)
 - ✓ génétique encore inadaptée
 - perspectives : **sélection « idéomélanges »**



❖ Semis sous couverts

- ✓ régulation avec herbicides peu efficace
- perspectives « **désherbage** » **non chimique inter culture ? (innovation agroéquipement)**

❖ Associations : attractivité économique

- l'élevage peut garantir le **débouché de 700 000 ha** de protéagineux / éligibilité financement écorégime
- **alimentation humaine** : ex blé-lentille (avec la coop de Manosque, Qualisol...)

Table 4 Land equivalent ratio (LER) of the different treatments that there were irrigated and Rainfed conditions. Data presented are mean values with the least significant difference (LSD).

Treatments	Partial Land Equivalent Ratio				Land Equivalent Ratio
	Wheat (LER _w)		Pea (LER _p)		Total
	Irrigated	Rainfed	Irrigated	Rainfed	Irrigated
Yecora E-Isard	0.67	0.52	0.55	0.43	1.22
Yecora E-Olympos	0.35	0.31	0.87	0.88	1.22
Elissavet-Isard	0.52	0.39	0.68	0.85	1.20
Elissavet-Olympos	0.21	0.24	0.79	0.76	1.00
Mean	0.44	0.37	0.72	0.73	1.16
LSD	0.06		0.11		0.06

D'après, C. Pankou, 2022



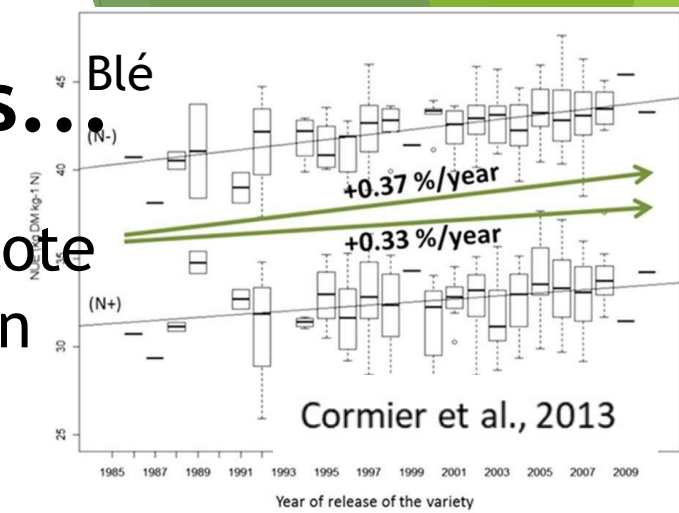
Le levier génétique

Les acquis à déployer et les perspectives

***« Une passion : Connaître,
Une ambition : Transmettre »,
depuis plus de 250 ans !***

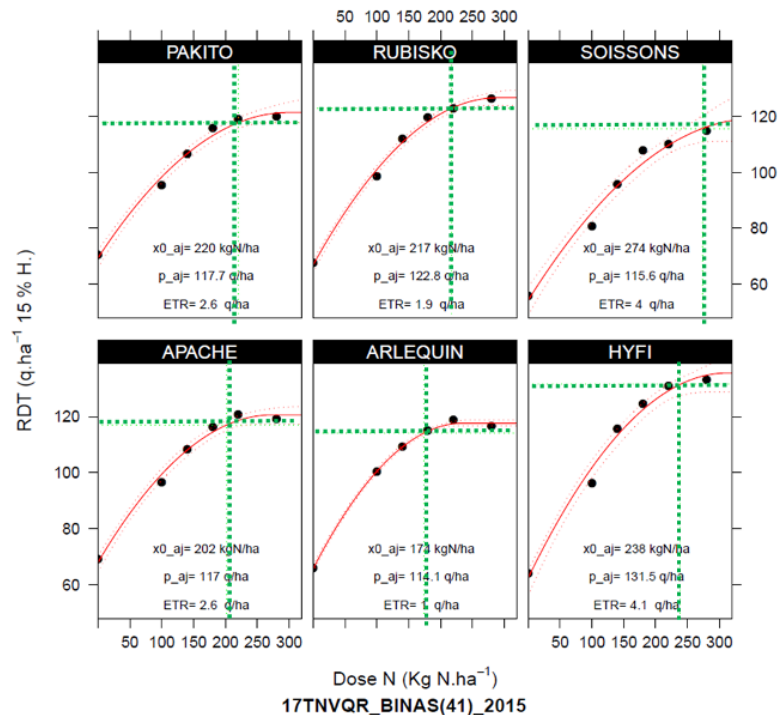
Des acquis qui profitent à tous les producteurs...

→ Les variétés modernes ont une efficacité d'utilisation de l'azote supérieure (Blé, Maïs, Colza) → voir texte de A Gallais et A Gojon

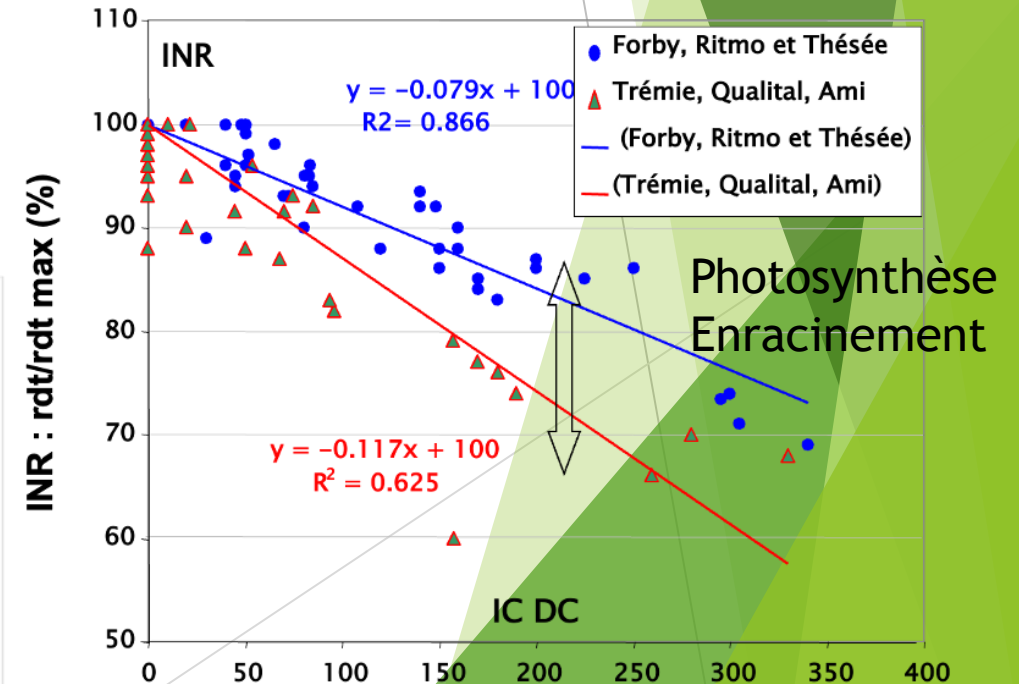
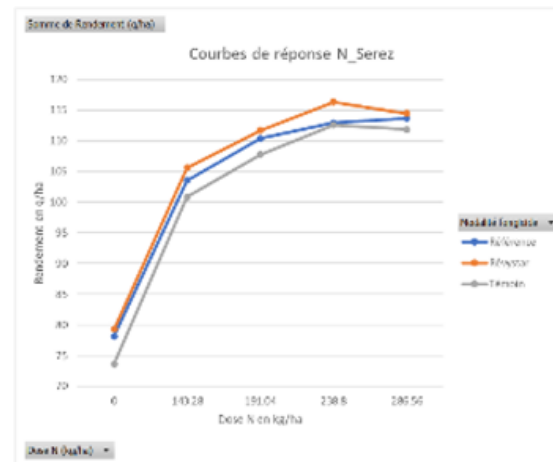


... Mais d'autres qui ne profitent pas toujours aux producteurs

Des différences de doses optimales jusqu'à 100kgN/ha Des pertes de rendement différentes en fonction du stress N

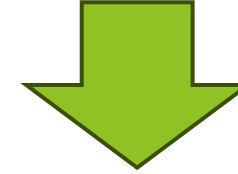


Des pénalités parfois faibles en conditions suboptimales (-30kgN/ha) et qui coûtent



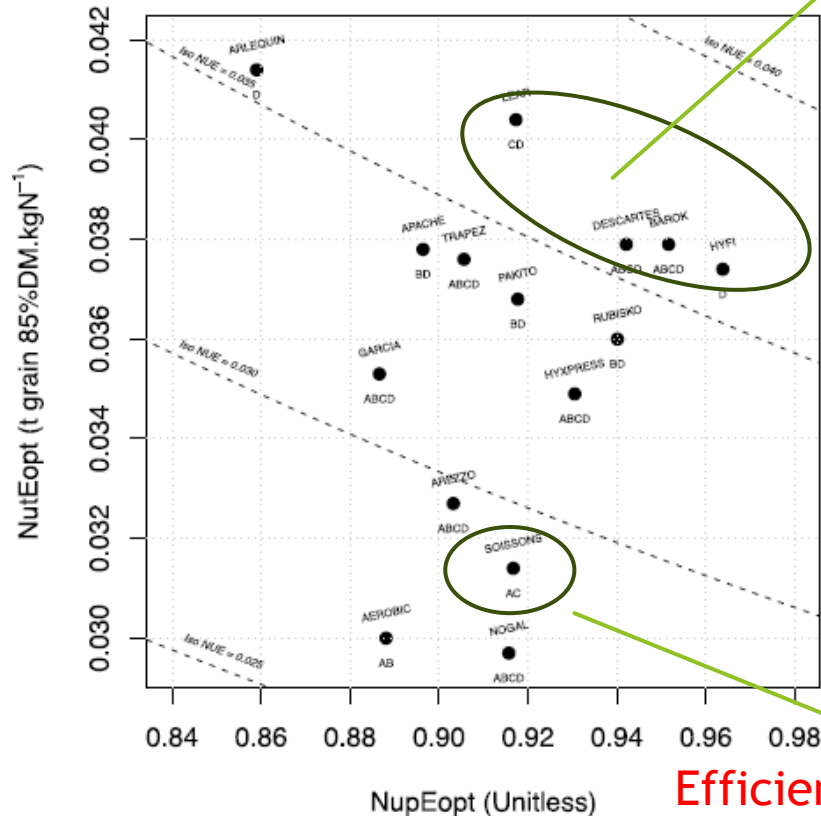
Génétique pas de *trade off* entre efficacité d'absorption et d'utilisation de l'azote

(d'après F. Taulemesse, ARVALIS, 2025)



Efficacité
d'utilisation

Variétés combinant
les 2 traits favorables



	NutEopt
ARLEQUIN	0.041 D
LEAR	0.04 CD
DESCARTES	0.038 ABCD
BAROK	0.038 ABCD
APACHE	0.038 CD
TRAPEZ	0.038 ABCD
HYFI	0.037 CD
PAKITO	0.037 C
RUBISKO	0.036 BC
GARCIA	0.035 ABC
HYXPRESS	0.035 ABC
AREZZO	0.033 ABC
SOISSONS	0.031 A
AEROBIC	0.03 AB
NOGAL	0.03 ABC

Efficacité
d'absorption

variété ancienne
Soissons

Possibilité de combiner

fort CAU

Efficacité élevée
d'utilisation
pour le rendement

ENVIRONNEMENT

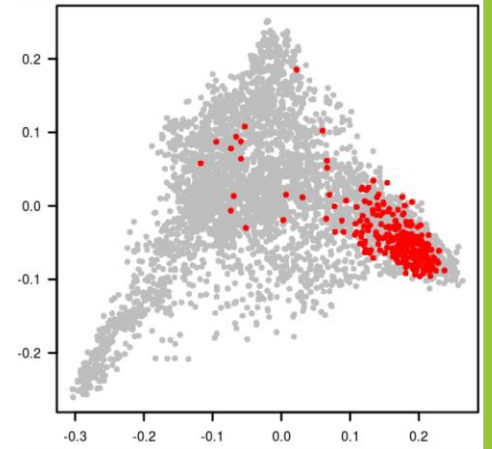
SOUVERAINETÉ
RENTABILITÉ



Comment améliorer la situation ?

Ex : Blé, une petite variabilité explorée

Source : Travaux de Sophie Bouchet



- ▶ Sortir du carcan de l'optimum de fertilisation
- ▶ Explorer les **ressources génétiques**
- ▶ Améliorer, surexprimer les gènes (de + en + connus, à découvrir) : apport possible des **biotechnologies** (transgénèse et édition du génome), mais blocage en Europe pour la transgénèse et discussion pour certaines modalités d'édition du génome
- ▶ Mobiliser les **technologies du phénotypage** sur des dispositifs adaptés (Phénome, grand emprunt) en lien avec le CTPS, pour la **sélection et le conseil**

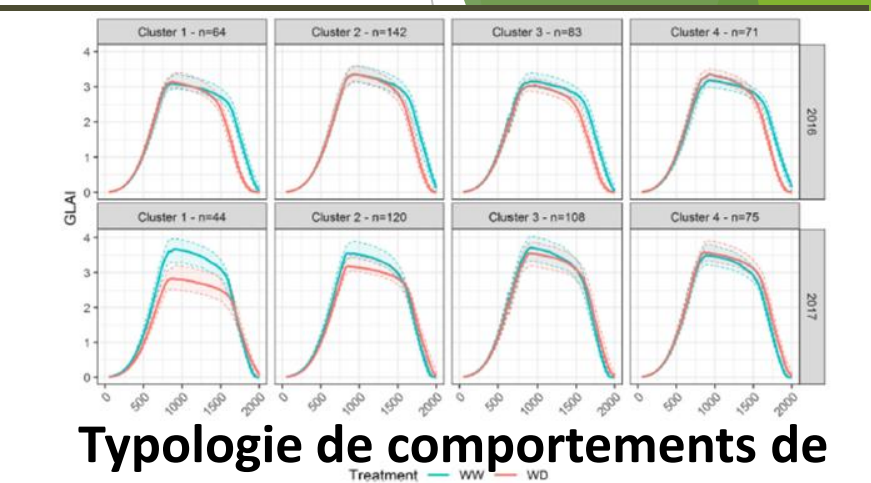
Ce que l'on sait Mobiliser certains dispositifs de phénotypage haut débit

Passer du stade recherche à l'application opérationnelle



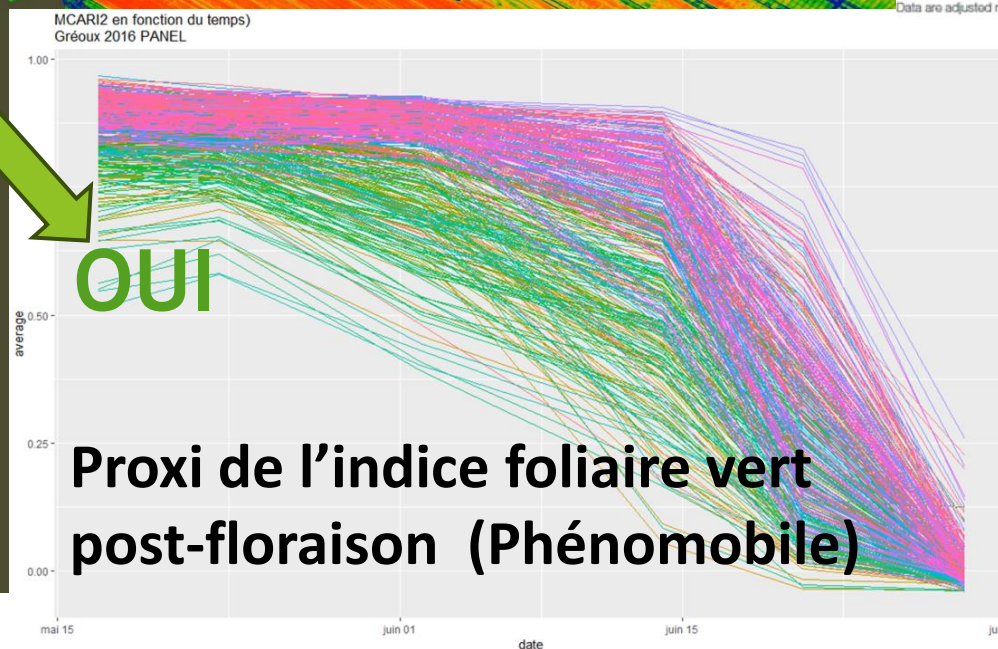
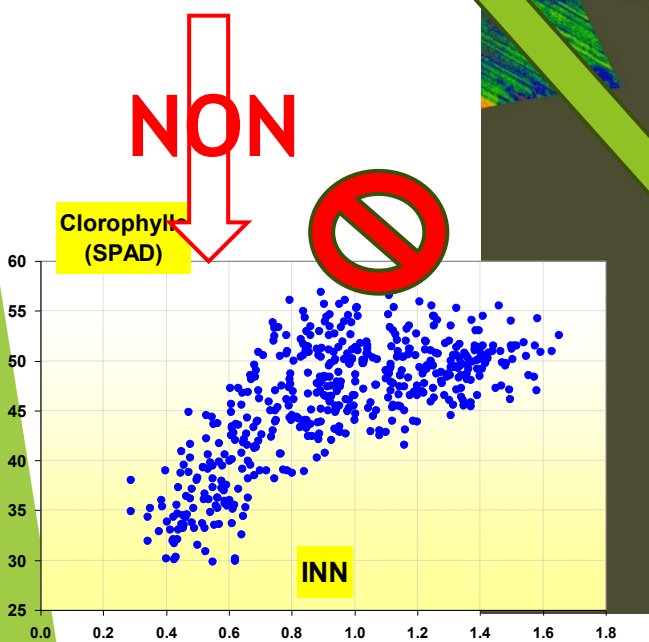
Fumure N+ Fumure N-

Dispositifs du projet Phénome
Phénotypage haut débit pour
la tolérance au stress
Phénomobile, drone... avec capteurs
hyperspectraux : dynamique
d'évolution d'indicateurs d'intérêt

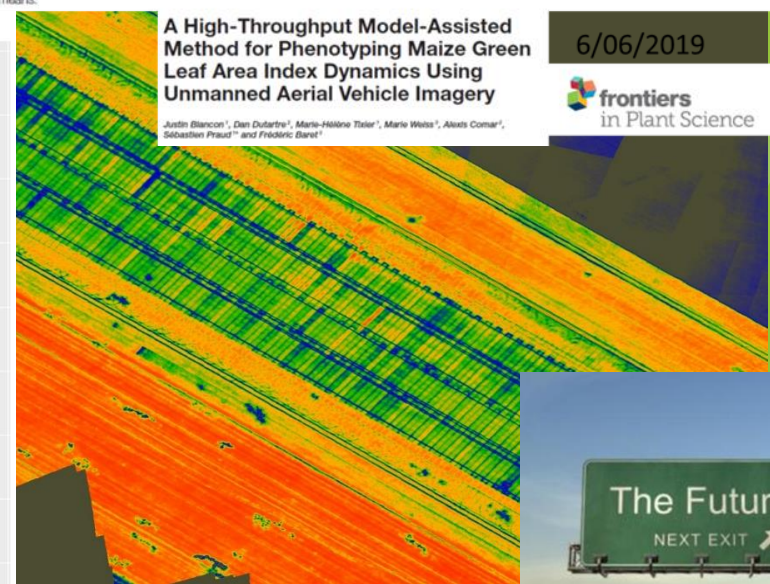


Typologie de comportements de variétés de maïs

FIGURE 5 | GLAI dynamics response to drought. The figure displays the difference of GLAI dynamics in Well-Watered and Drought conditions for four clusters of maize genotypes. The thick line represents the median of GLAI_{test} for the genotypes in the corresponding cluster, while the thin dashed lines show the first and third quartiles. N is the number of genotypes in each cluster. Data are adjusted means.



Proxi de l'indice foliaire vert
post-floraison (Phénomobile)



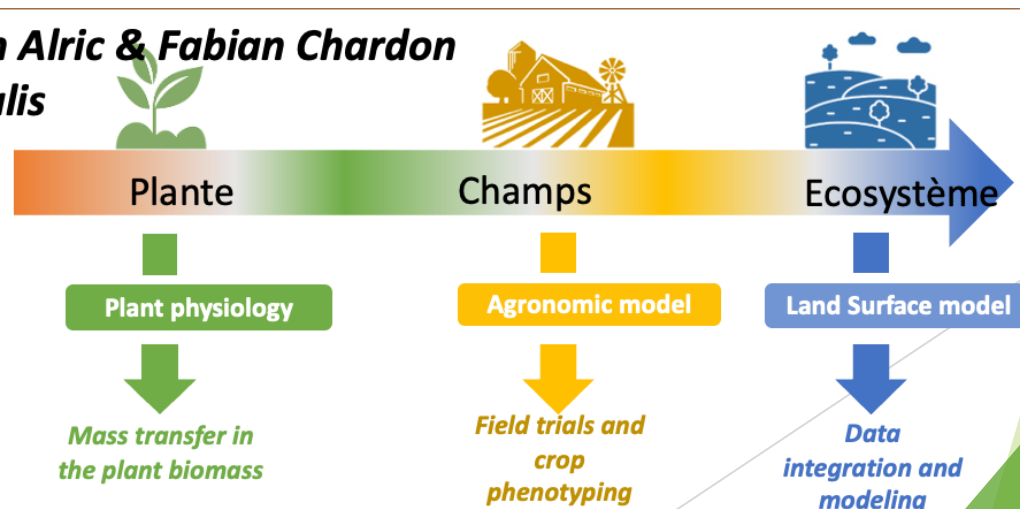
Un projet original : Sélection de variétés à teneur en chlorophylle ajustée, projet GREENSCALE 2025

- Promesse : réduction de 20% des apports azotés, transposable à différentes espèces
- Hypothèse : optimisation de la régulation de l'assimilation du CO₂, du transport des électrons, de la NUE par la chlorophylle et les complexes protéiques associés
- → Des plantes à plus faibles besoins en N (grâce à une assimilation et remobilisation améliorées) séquestrant autant de carbone et consommant moins d'eau
- Analyse sur un panel de mutants d'orges à différentes teneurs en chlorophylle (« greenscale »)

GREENSCALE Dir. Jean Alric & Fabian Chardon
CNRS INRAe CEA Arvalis
FairCarboN Axe3



C/N et LUE
Photosynthèse





Quelques pistes plus prospectives

Fixation asymbiotique (bactéries du rhizobiome)

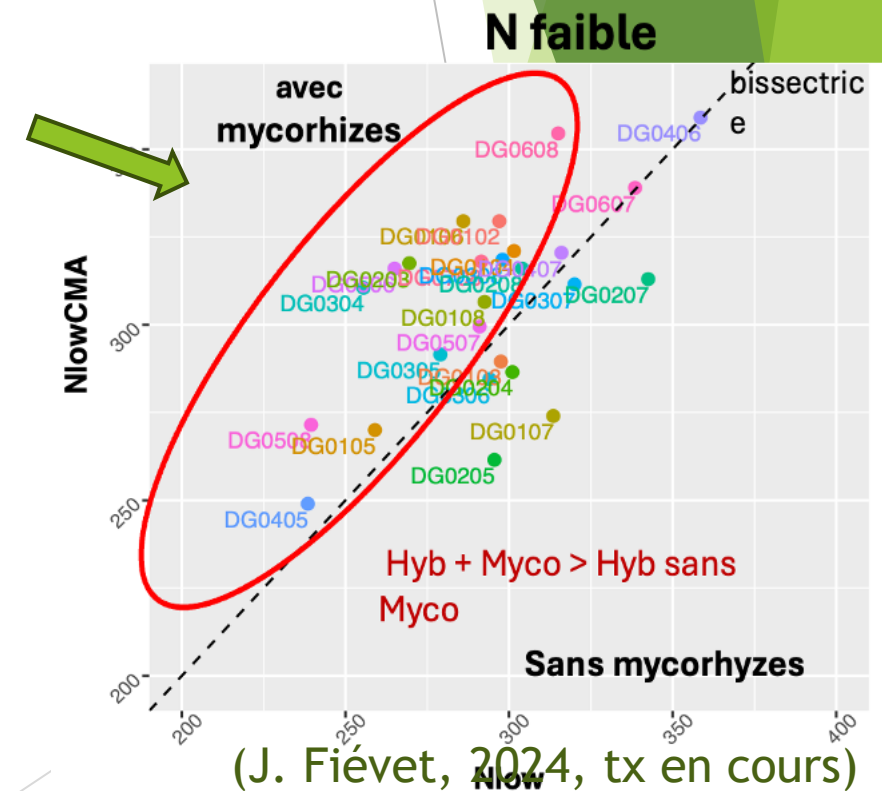
Chez le riz et le maïs, fixation de 40-50 kg N/ha. Ex chez le maïs d'une population mexicaine (photo Van Deynze et al, 2018)



Les associations symbiotiques entre plantes et champignons mycorhiziens : résultats positifs chez le maïs, à faible fumure N, meilleur remplissage des grains. Tx en cours chez le blé.

Chez le blé, des différences entre variétés anciennes et variétés modernes pour l'aptitude à « recruter » les mycorhizes

A quand un blé fixateur d'azote atmosphérique ?

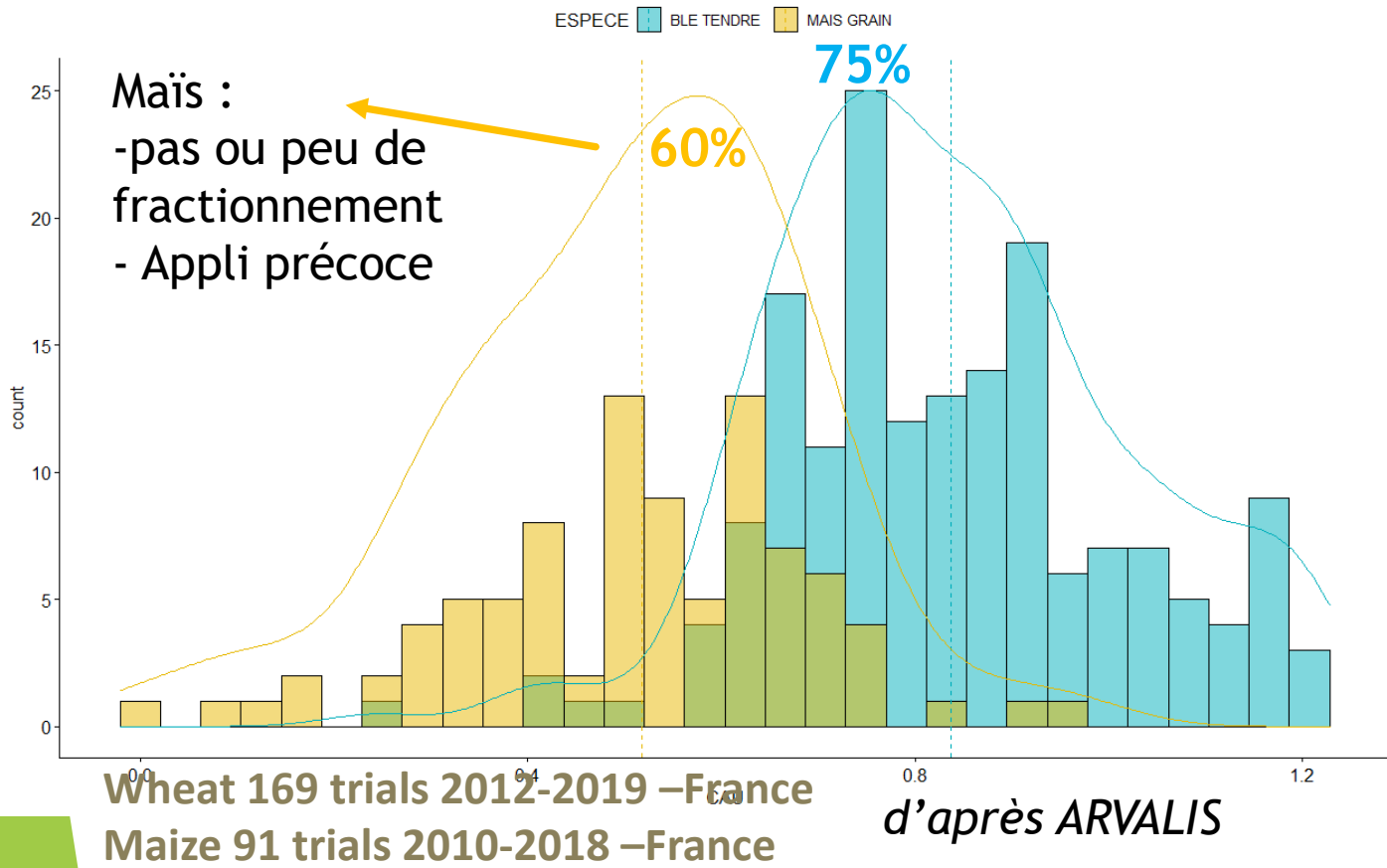




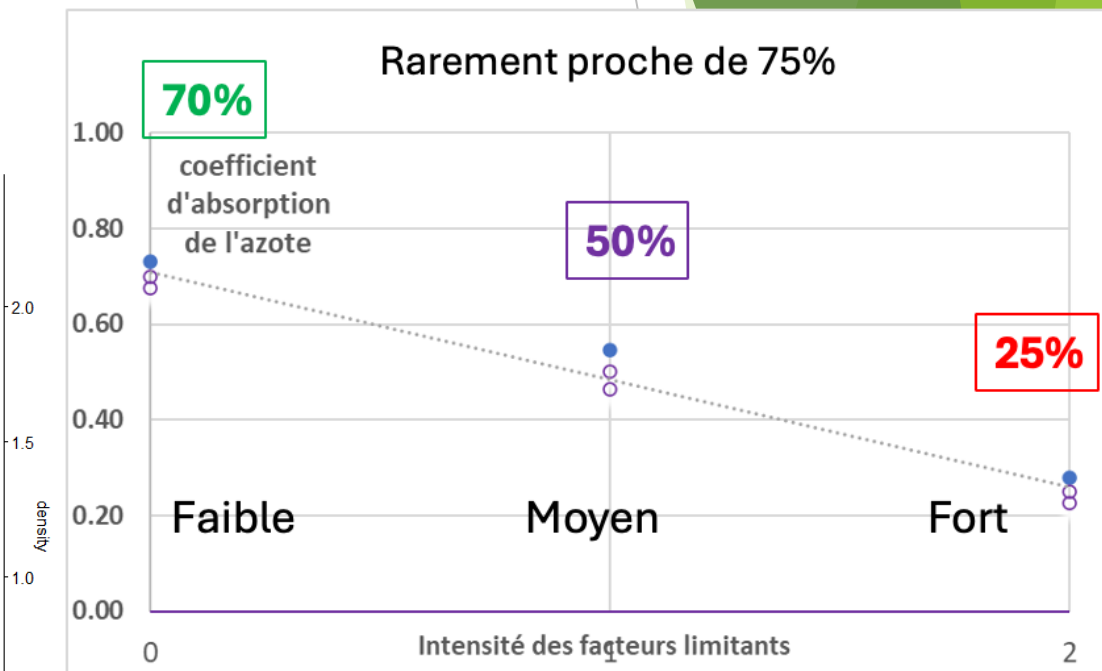
Améliorer l'efficacité d'absorption : une variabilité forte

Remarques : contraintes inéluctables
On ne biberonne pas et pari sur le climat futur...

Agriculture « conventionnelle »
Parcelles fertilisées à l'optimum



Agriculture Biologique
Blé région centre



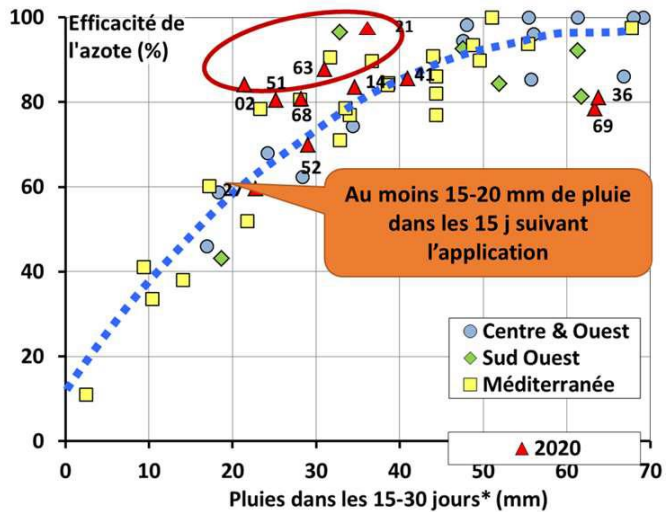
D'après Vallé M.,2006 et Billy L. 2008

	Nabs	Rendement
médiane	115	40.6
décile 2	90	33
décile 8	165	56

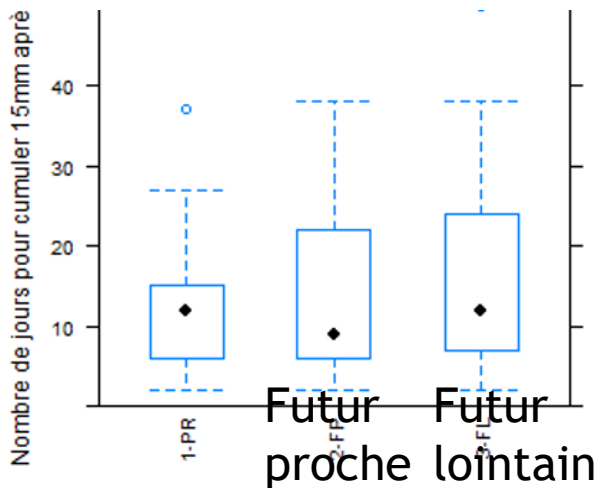


L'efficacité de l'azote diminue lorsqu'il fait sec après les apports

CAU : Les voies de progrès



La variabilité va s'accroître dans le futur



- Considérer N dans sa globalité : Nmin du sol et N engrais et avoir une estimation **spatio-temporelle** des quantités
- Améliorer les connaissances sur le déterminisme de l'efficacité d'absorption
- Chercher des **facteurs de résilience** en diversifiant les sources d'azote (légumineuses)
 - Notion de « profil N résilient »
- OAD : promouvoir les capteurs à la parcelle pour estimer **en continu la vitesse de croissance**, prédictive du niveau d'absorption pour optimiser le **fractionnement**
- Mieux prévoir le climat
 - Court terme : on gagne 1 jour de précision tous les 10 ans (MétéoFrance)
 - Demain : mobiliser les **modèles saisonniers**

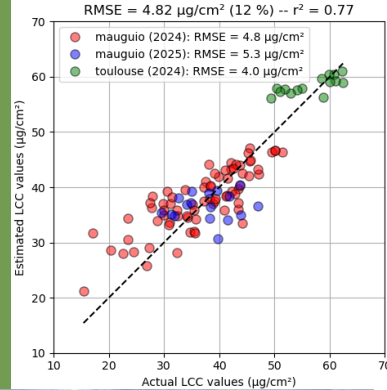
Les priorités pour les outils de pilotage

Constat :

Depuis 25 ans, la précision de l'INN n'a pas progressé

Les sources principales d'imprécision :

- le coefficient d'absorption,
 - la variabilité du rendement entre année
 - L'incertitude entre le moment du diagnostic et la récolte
- Et d'autres facteurs que N peuvent intervenir : maladies, hydromorphie...



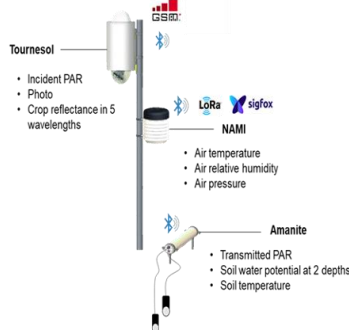
➡ Enrichir les outils avec des capteurs et des modèles complémentaires

Connaissance
de l'azote du sol



Labo
portatif

Dynamique de
croissance
Piquets au sol



Conditions
environnementales

Modèle dynamique de
croissance
et d'absorption

À chaque apport

Pourrait profiter à tous les
agriculteurs qui n'utilisent pas
D'OAD (85-90%)

Meilleure prédiction de l'absorption
Révision du rendement
(ajustement des besoins)



Les leviers pour réduire les émissions de N₂O

(remarque : peu d'études au champ...)

Projet OCAPI
30% recyclage=
3% de
l'utilisation
15% si 100%
(Starck 2025)

Il faut ajouter
la baisse de la
ferti N de la
culture
suivante

Remarque : une parcelle hydromorphe
Non fertilisée émet autant qu'une parcelle
drainée et fertilisée à l'optimum

FertigHY : une usine en 2030 =
2% de GES de la production végétale
6% de l'utilisation des engrais

Prix si pas
d'accompagnement ?

part du CO₂
dans
la fabrication

Ammo < Urée
< Solution et
il faut
ajouter 10% à
la solution
(procédé et
transport)

Akiama et
al. 2010

60%

49% si
sol à
faible
capacité

20% tous
sols
français

45% si
vert
ou 35-
40% si
bleu

45%

CASDAR PCB
2013

CASDAR NoGas
2010-2012
Arvalis

CASDAR NoGas
2010-2012
Tlnovia

10%

12 à
24%

Arvalis 2025
simulation

YARA,
Consortium EU
FertigHY

Légumineuses
VS
Non leg

Drainage

Engrais minéral
VS
amendements

Forme
Engrais
minéral

Inhibiteur
nitrification

Chaulage
climatique

Engrais
décarbonés

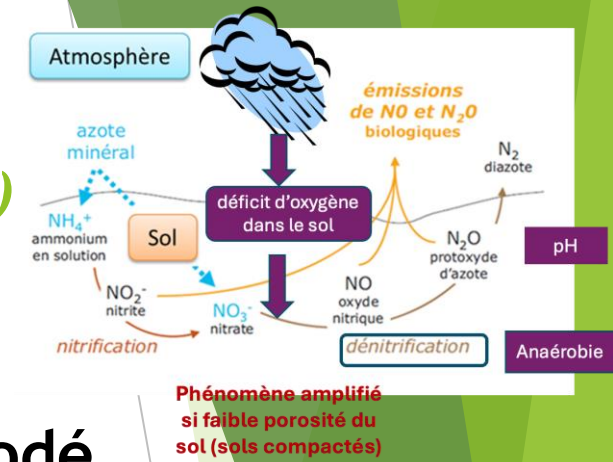
Urines

AB

Stimuler la dénitrification

(réduction de N_2O en N_2) (d'après Hénault C. et al. 2025)

- Pourquoi : Priorité majeure car N_2 n'est pas un GES
- Comment : cette réaction est opérée par la **N_2O réductase codé par le gène nosZ+ de rhizobia**, seul mécanisme connu à ce jour
 - Identifier et introduire des souches symbiotes de légumineuses efficaces
 - Améliorer la capacité physico-chimique des sols français à réduire
- Des premiers résultats encourageants
 - Souche G49 du soja permet de réduire 80% (parcelles non fertilisées)
 - Chaulage « climatique » :
 - 40% des sols français sont inaptes à réduire (90 sites réseau RMQS)
 - le chaulage diminue de 49% (médiane) l'émission de N_2O



Les sélectionneurs devraient s'intéresser davantage aux microbes...

Soit une réduction de 20% sur l'ensemble des sols ...

Les leviers pour réduire les émissions

Réduction forte des pertes ammoniacales de l'élevage et des cultures par l'agroéquipement

- **pendillards (71%)**
- **enfouisseurs (90%)**
- Méthode CULTAN pour les engrais riches en NH₄



A DEPLOYER

- Cuma
- Aides

- Produits Résiduaire Organiques
- Restitution de résidus de culture

Les pertes les + élevées sont dans les régions d'élevage intensifs là où l'agriculture et l'élevage ont été déconnectés

Traitement des effluents
bioéconomie circulaire
produire des engrais
normalisés

Séchage

Compostage
Désodorisation
Hygiénisation

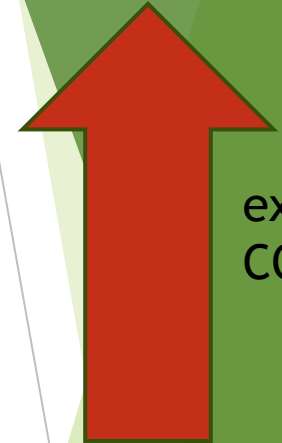
Réintroduction de l'élevage
dans les territoires grandes cultures

Coexistence :
Tirer profit des cultures
intermédiaires, diversification
échanges Paille-Fumier

Des troupeaux au sein des
exploitations
Ex : 200 brebis fertilisent 15 ha

**Nouveaux engrais
organiques**

ex :
COOPERL



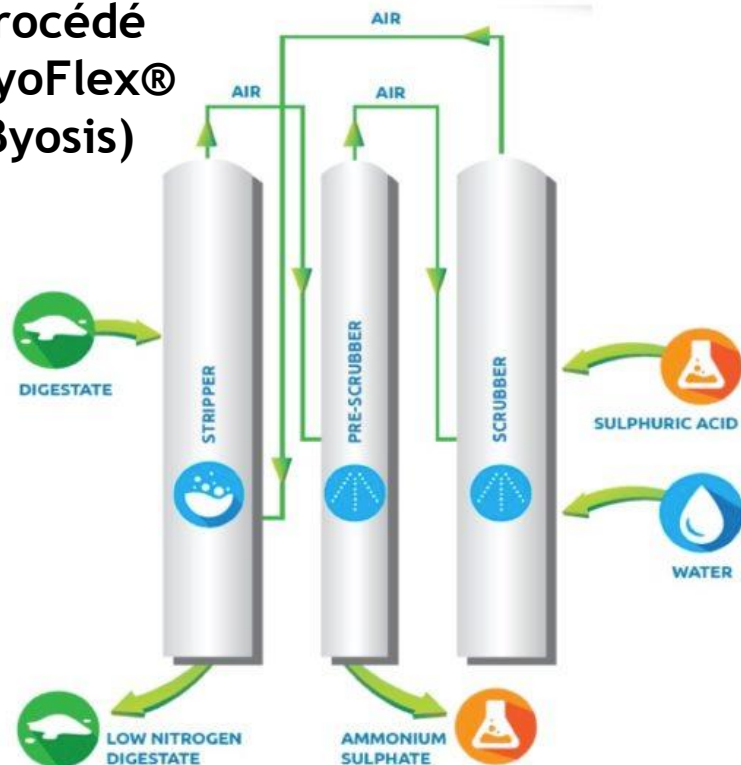
Le futur de l'organique : un champ des possibles ?

Les biotechnologies au service de l'industrie du recyclage N-(P-K)

Double enjeu : réduire les pertes dans l'environnement et récupérer les éléments fertilisants pour produire des engrais

La technique du « décapage / lavage » (stripping / scrubbing)

Procédé
ByoFlex®
(Byosis)



Fertilisant liquide de qualité
obtenu après process :

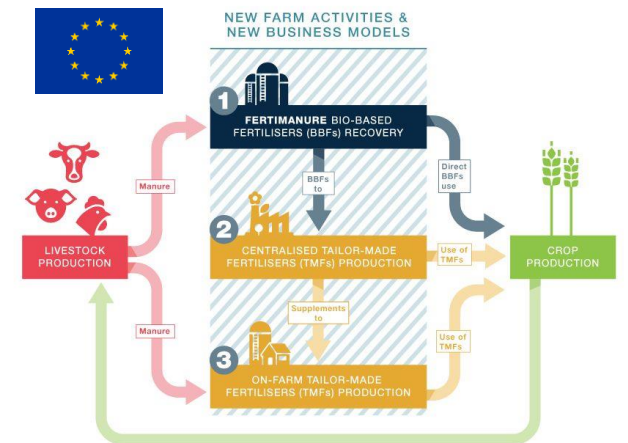
Si acide sulfurique > production
de sulfate d'ammonium liquide
(40% MS, 6-8%N et 8-9%S)

Si acide nitrique > production de
nitrate d'ammonium liquide
(50% MS, 17%N)

Projet FERTIMANURE : production de fertilisants biosourcés par “stripping”
(BioBased Fertilizers = BBF) > 5 pilotes en Europe (selon les intrants)

The Future
NEXT EXIT

FERTIMANURE CIRCULAR ECONOMY STRATEGY



CONCLUSION

- ▶ Des degrés de liberté non exploités, des innovations en cours
- ▶ Une approche multi levier, systémique et souvent à l'échelle des territoires
- ▶ **Pour avancer :**
 - ▶ **approche incitative** avec des projets ambitieux transformants « recherche-action-solutions intégrées »
 - ▶ ex : à l'instar du PARSADA, avec des prérequis : innovation, combinaison de leviers, multi acteurs avec accompagnement des agriculteurs
 - ▶ **approche réglementaire** : pollueur-payeur, taxes ?
 - ▶ **et nécessité de**
 - ▶ convaincre certains acteurs qu'il est utile de **changer de référentiel**
 - ▶ donner « une lisibilité marché » aux fournisseurs d'innovations

*« Une passion : Connaître,
Une ambition : Transmettre »,
depuis plus de 250 ans !*

The background features abstract, overlapping green geometric shapes, primarily triangles and polygons, in various shades of green, creating a modern and dynamic visual effect.

MERCI DE VOTRE ATTENTION

***« Une passion : Connaître,
Une ambition : Transmettre »,
depuis plus de 250 ans !***