

Prise en compte du changement climatique dans les travaux des sections CTPS : lien à l'azote pour les céréales à paille

Marie-Hélène Jeuffroy

UMR Agronomie

UPSay – APT – INRAE

Palaiseau

21 mars 2024

Questionnaire à l'attention des Sections et Commissions Inter-Sections du CTPS janvier 2014

-

Etat des lieux des avancées des Sections et Commissions Inter-Sections en termes de prise en compte du changement climatique dans leurs travaux

« Le Comité Plénier du CTPS a adressé une demande de saisine au Comité Scientifique du CTPS sur la thématique du changement climatique, avec pour objectif de définir comment mieux prendre en compte l'adaptation au changement climatique lors de l'inscription des variétés au Catalogue.

En effet, si la société dans son ensemble est concernée par le changement climatique, le secteur agricole l'est encore davantage et il est urgent de le prendre en compte pour se préparer à y faire face.

Selon le dernier rapport du GIEC, la température moyenne mondiale pour la période 2013-2022 est supérieure de +1.15°C à celle mesurée sur la période 1850-1900. En France, cette augmentation de température est même estimée à +1.9°C sur la dernière décennie.

Les conséquences du changement climatique sont déjà bien visibles, et il faut désormais s'attendre à des conditions climatiques plus extrêmes et plus imprévisibles : sécheresse, canicule, orages violents...

Des modèles de projection permettent d'établir des climats analogues ; **ainsi, en 2040, le climat de Paris pourrait correspondre à celui observé aujourd'hui en Nouvelle-Aquitaine, et en 2100 au climat actuel du sud de l'Espagne. »**

Demande:

- Point sur l'impact de l'utilisation des engrais azotés sur les émissions de GES, sur le bilan énergétique de ces engrais pour la production des céréales,
- Point sur les voies d'amélioration possibles dans les programmes de sélection des variétés en lien avec les conduites, dans les critères d'évaluation du CTPS, sur les sujets à travailler au niveau des céréales à paille pour améliorer l'autonomie azotée et limiter l'impact sur le CC

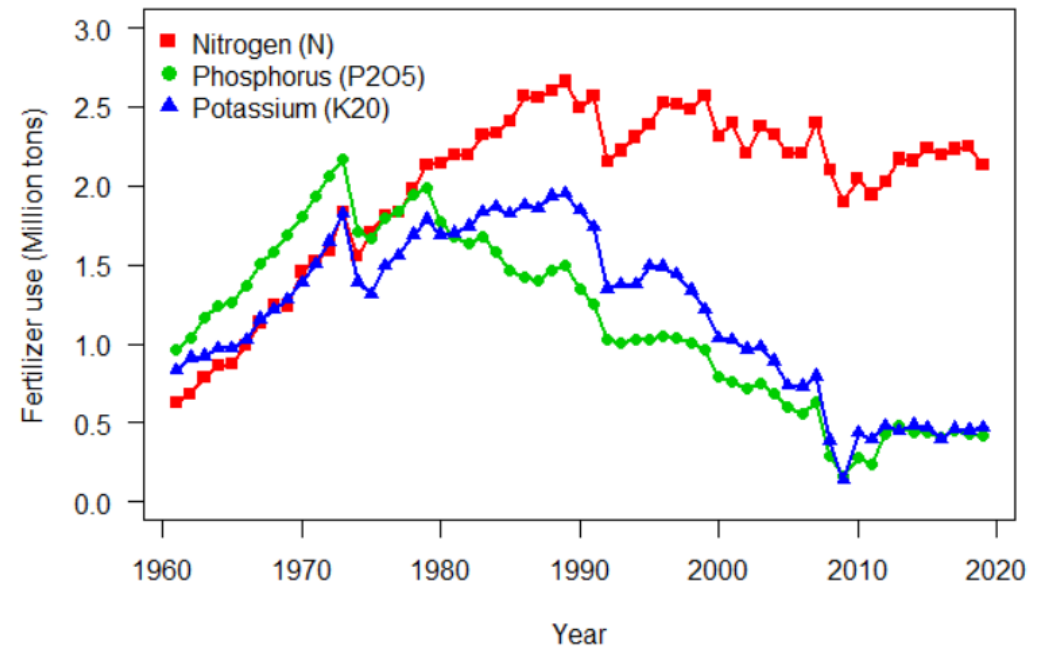
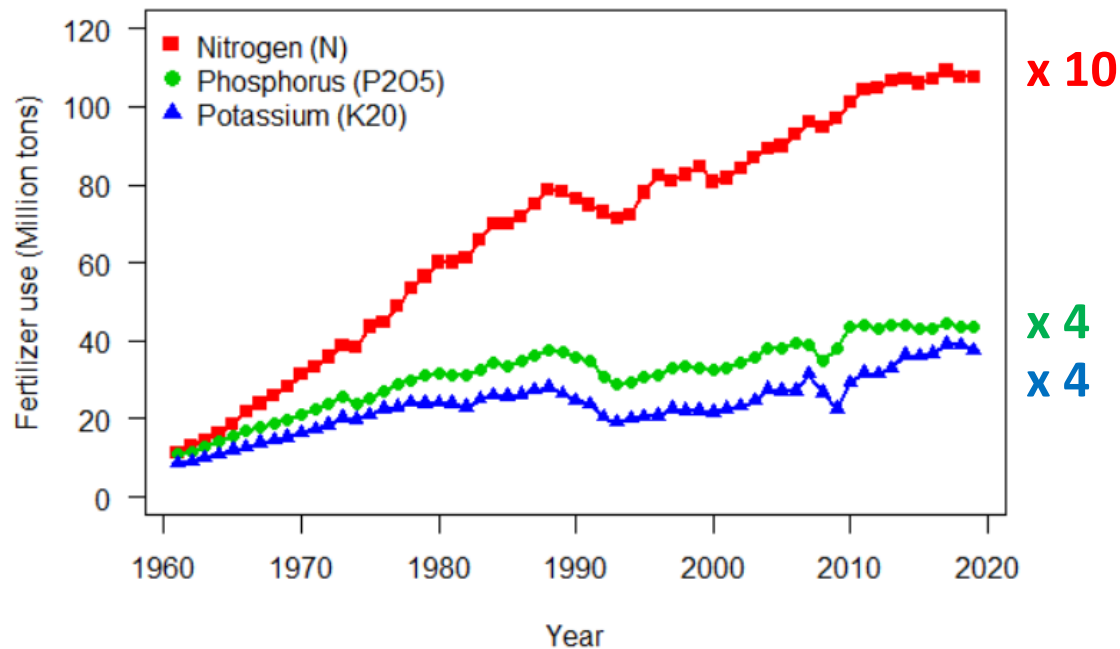
Changement climatique: de quoi parle-t-on ?

- **Atténuation du changement climatique:** quelles pratiques permettent de réduire l'effet sur le CC (les émissions de GES) ?
l'azote représente une grosse partie !
- **Adaptation au changement climatique:** augmentation des températures moyennes, hivers plus doux, périodes de sécheresse, gels tardifs, ... augmentation de la variabilité du climat, événements extrêmes imprévisibles → imprévisibilité du climat → diversification de la gamme variétale nécessaire (notamment en terme de cycle de culture (précoce/tardif; ...))
- On va parler de conduite N, de variétés, d'ITK, de SDC

Evolution de l'utilisation d'engrais: toutes cultures

à l'échelle mondiale

en France



Source : FAOSTAT (2021) <https://www.fao.org/faostat/en/#home>

Principaux postes consommateurs d'énergie dans la conduite d'une culture

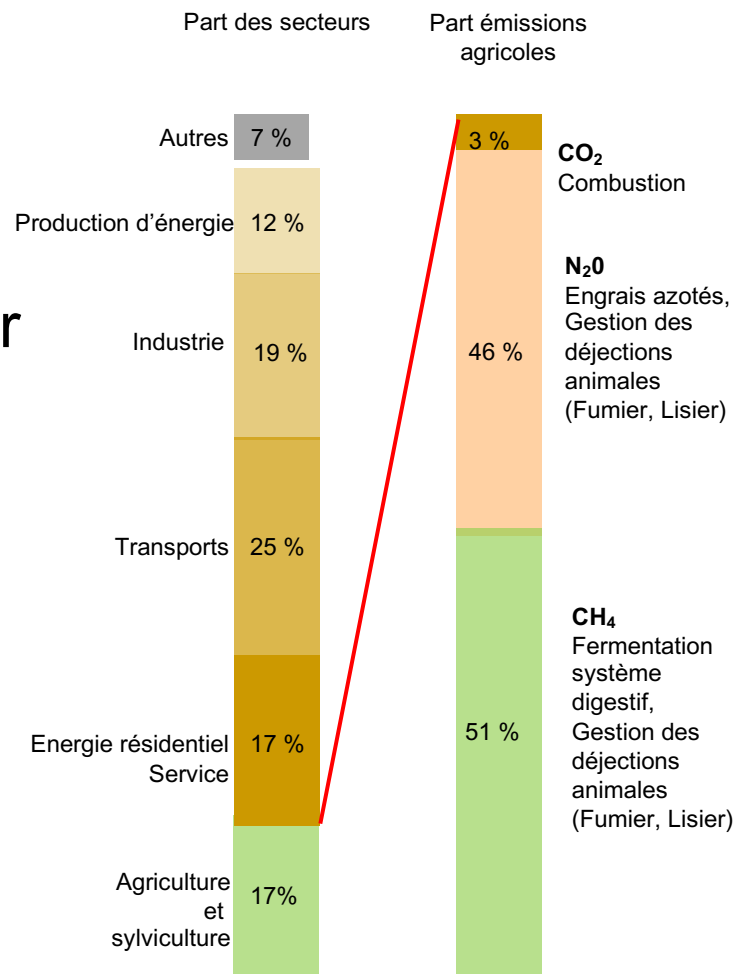
Consommations d'énergie fossile (GESTIM, 2019)	Consommation d'énergie (MJ/ha)	
Opérations culturales	Directe	Indirecte
Labour (charrue 5 socs, tracteur 150 cv : 200 ha/h)	1260	91
Gros cultivateur (tracteur 130 cv : 200 ha/h)	1047	73
Herse rotative (tracteur 130 cv : 80/150 ha/h)	672	90
Combiné de semis (tracteur 130 cv : 120 ha/h)	827	109
Semoir direct (tracteur 90 cv : 120 ha/h)	279	125
Passage épandeur (tracteur 90 cv : 100 ha/h)	126	14
Bineuse (tracteur 90cv : 80 ha/h)	226	46
Herse étrille	61	30
Pulvérisateur (pesticides) (tracteur 90 cv)	65	17
Moissonneuse batteuse (260 cv)	1512	173

Prise en compte de la puissance du tracteur spécifique à chacun des matériels, et des superficies traitées spécifiques à chacune des opérations culturales

Intrants	Consommation d'énergie indirecte
Ammonitrate (33.5%)	15.9 MJ/kg
Urée 46%	28.9 MJ/kg
Super 45 (P)	4.4 MJ/kg
Chlorure de K (40%)	3.0 MJ/ha
H : Roundup max 480 (DH 3 à 4 l/ha)	141.6 MJ/l
H : Bofix (DH 3 l/ha)	76.7 MJ/l
H : Colzor trio (DH colza 4l/ha)	119.5 MJ/l
M : mesurool pro (DH 3kg/ha)	5.6 MJ/ kg
M : metarex (ino DH 5 kg/ha)	11.5 MJ/ kg
F : amistar (DH BTH 1l/ha)	102.0 MJ/ l
F : caramba star (DH BTH 1l/ha)	18.4 MJ/ l
Semences : céréales (avoine, blé, trit.)	3 à 4 MJ/kg
Semences : colza (lin)	8.5 MJ/kg
Semences : pois	2.6 MJ/kg
Séchage de grains	3.45 GJ/t H ₂ O ⁶

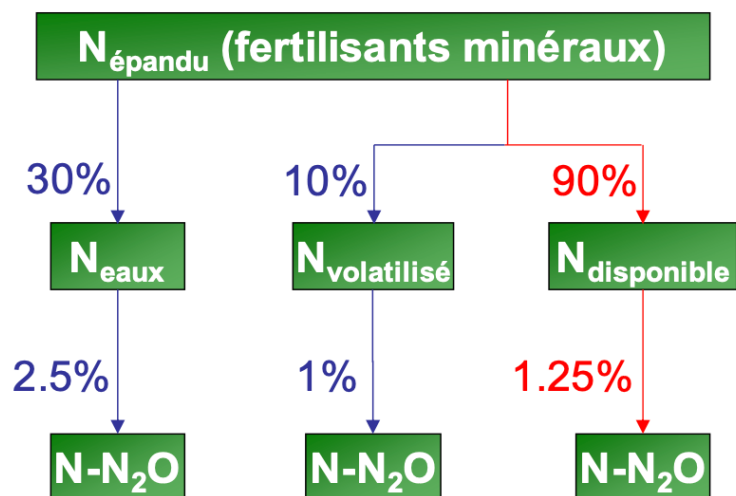
En France le secteur agricole représente 17% des émissions de gaz à effet de serre exprimées en CO₂e

51% CH₄
46% N₂O
3% CO₂

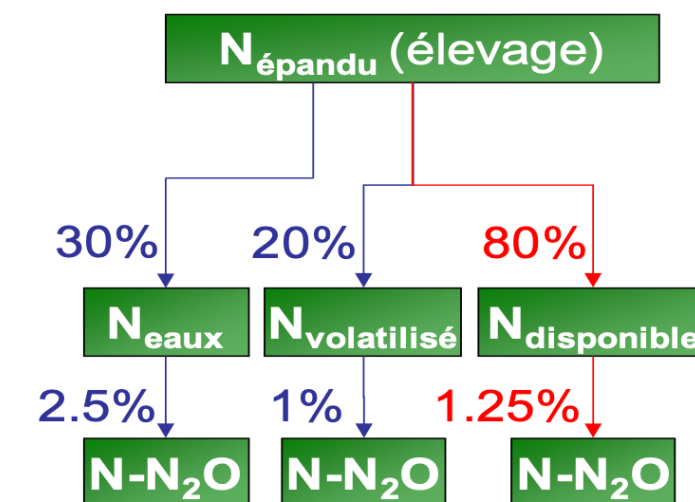


Emissions de GES par engrais minéraux vs organiques

Figure 3. Composantes des coefficients d'émission globaux (TIER 1)
pour les fertilisants minéraux et pour l'azote épandu des effluents d'élevage



$$(30 \times 2,5 + 10 \times 1 + 90 \times 1,25) / 100 = \mathbf{1,975\%}$$



$$(30 \times 2,5 + 20 \times 1 + 80 \times 1,25) / 100 = \mathbf{1,950\%}$$

source : CITEPA

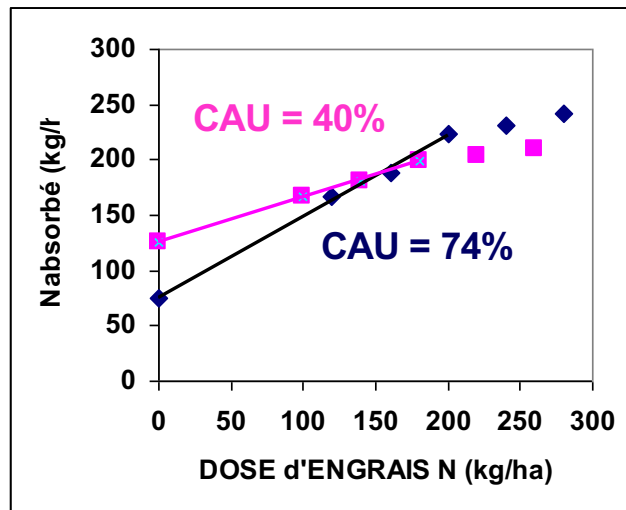
Pellerin et al., 2013

Les Pertes gazeuses sont corrélées à l'efficacité de l'utilisation de l'engrais

VARIATIONS DU CAU :

- 57% à 95% entre variétés
- 56% à 74% entre types de sol
- 46% à 102% entre lieux et dates d'apport

(Limaux, 1999)



La perte de CAU = pertes gazeuses principalement

$$(1-\text{CAU}).X = \cancel{I_X} + \cancel{L_X} + G_X + \cancel{\Delta R_f}$$

(Meynard et al., 1997)

I_X : supplément d'immobilisation lié à l'engrais

L_X : Lixiviation liée à l'engrais

G_X : pertes gazeuses liées à l'engrais

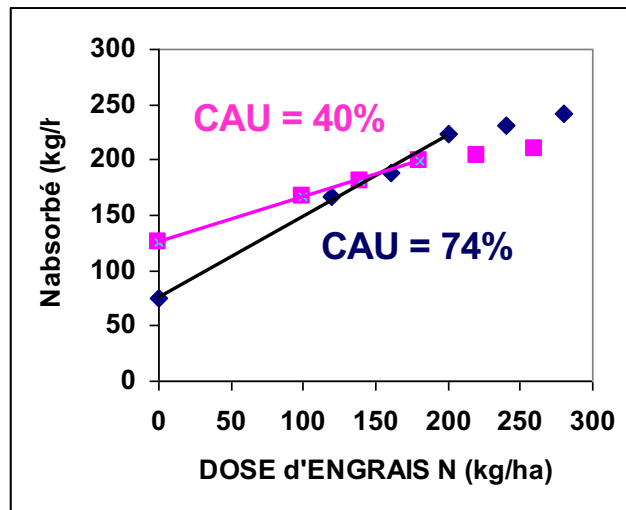
ΔR_f : différence de reliquat entre Recolte et SH

Les Pertes gazeuses sont corrélées à l'efficacité de l'utilisation de l'engrais

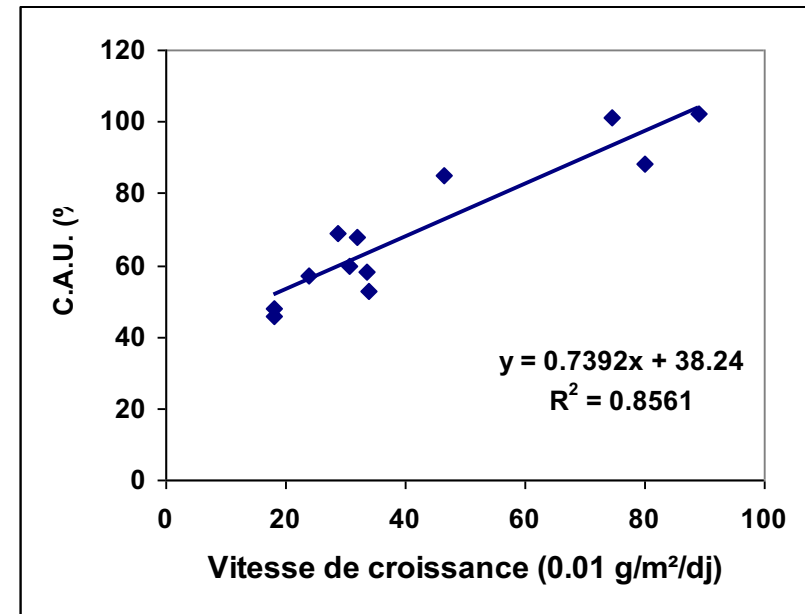
VARIATIONS DU CAU :

- 57% à 95% entre variétés
- 56% à 74% entre types de sol
- 46% à 102% entre lieux et dates d'apport

(Limaux, 1999)



Le CAU est d'autant plus élevé que la croissance du couvert est forte au moment de l'apport



(Limaux, 1999)

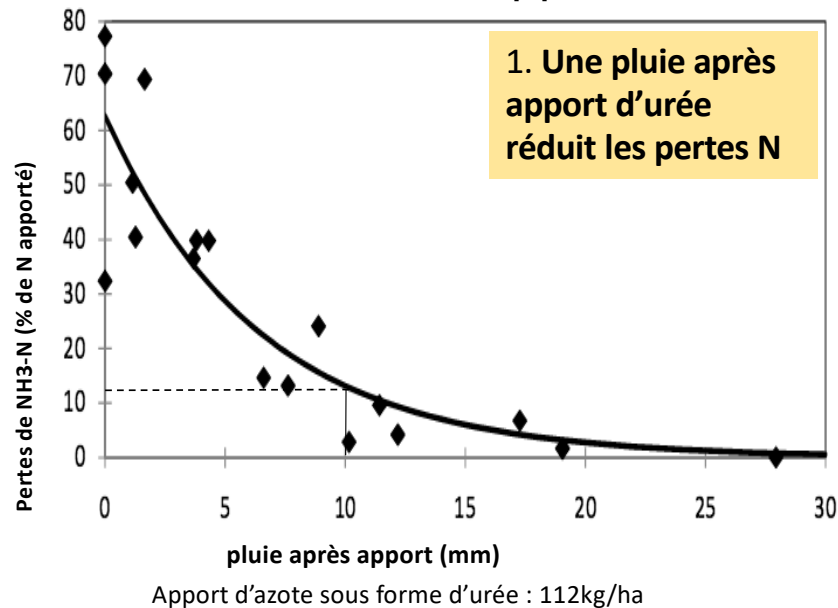
La perte de CAU = pertes gazeuses principalement

$$(1-\text{CAU}).X = \cancel{I_x} + \cancel{L_x} + G_x + \cancel{\Delta R_f}$$

(Meynard et al., 1997)

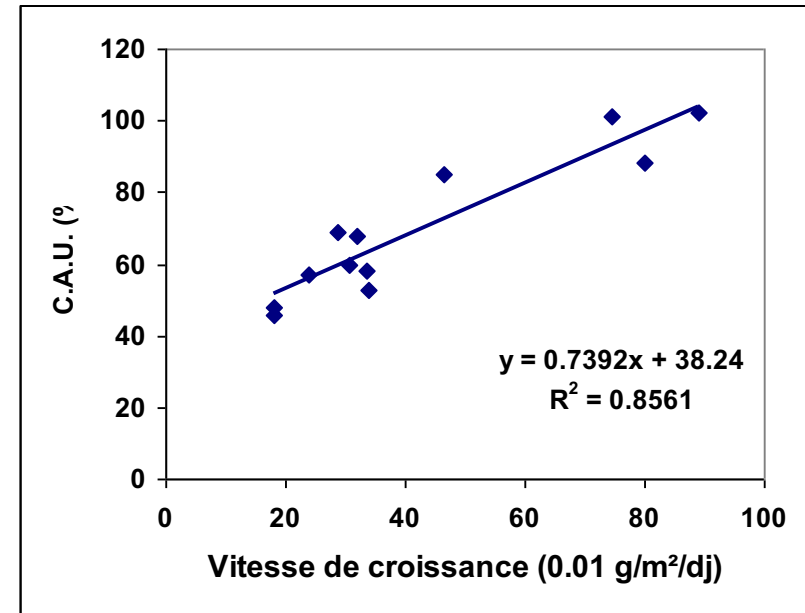
Les Pertes gazeuses sont corrélées à l'efficacité de l'utilisation de l'engrais

L'efficacité d'utilisation de l'azote (CAU) dépend des conditions de météo au moment de l'apport



Holcomb J, 2011

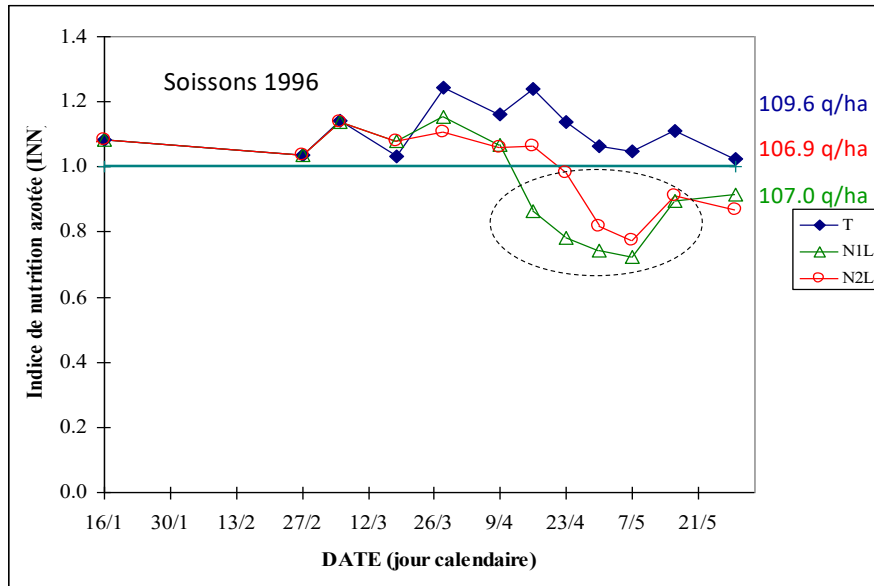
Le CAU est d'autant plus élevé que la croissance du couvert est forte au moment de l'apport



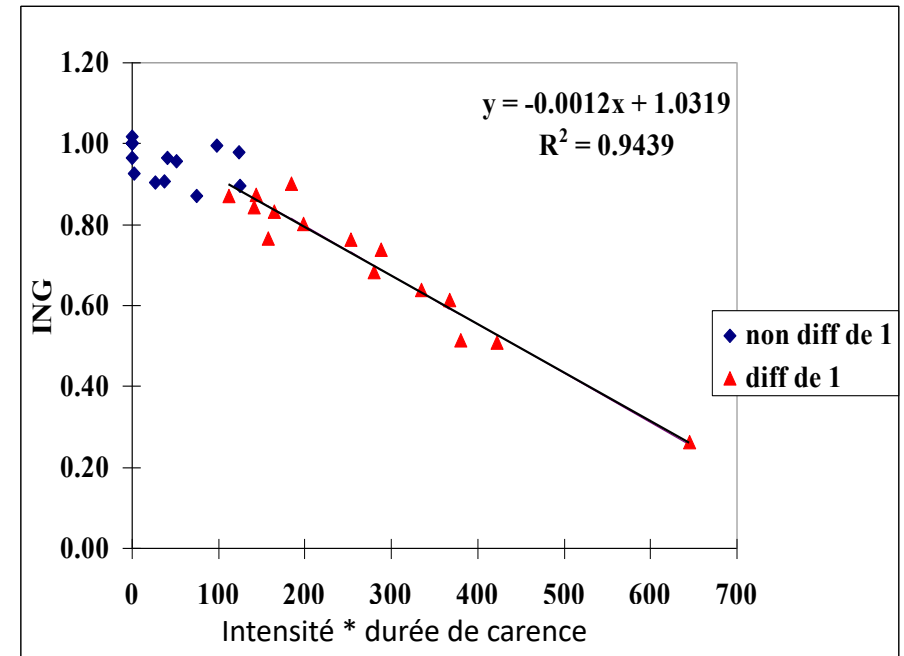
(Limaux, 1999)

- ➔ Bannir les apports d'N de sortie hiver (mi-février), les moins moins utilisés, donc les plus émetteurs de GES dans les essais de sélection ET d'évaluation variétale !
- ➔ Positionner les apports d'N au plus près des pluies fait gagner beaucoup en efficacité d'utilisation !

Effet de ces conduites sur les carences azotées et la production



Jeuffroy & Bouchard, 1999

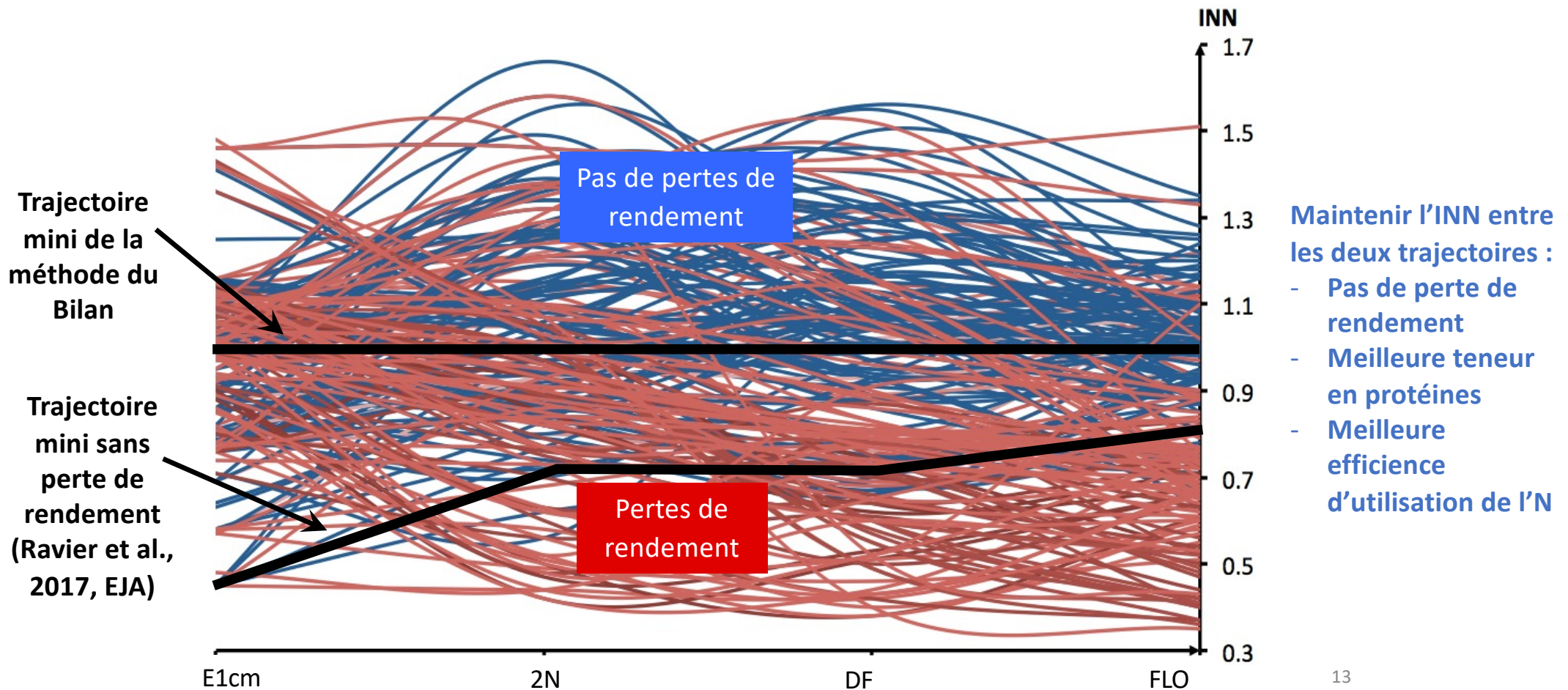


(Jeuffroy et Bouchard, 1999)

Toutes les **carences** ne sont **pas préjudiciables** pour le **rendement** (ni pour la **teneur en protéine**) → lesquelles peut-on tolérer ?

Trajectoire d'INN recommandée : carences tolérables bénéfiques pour RDT, TPI et eff utilisation N

(Ravier et al, 2017, EJA)

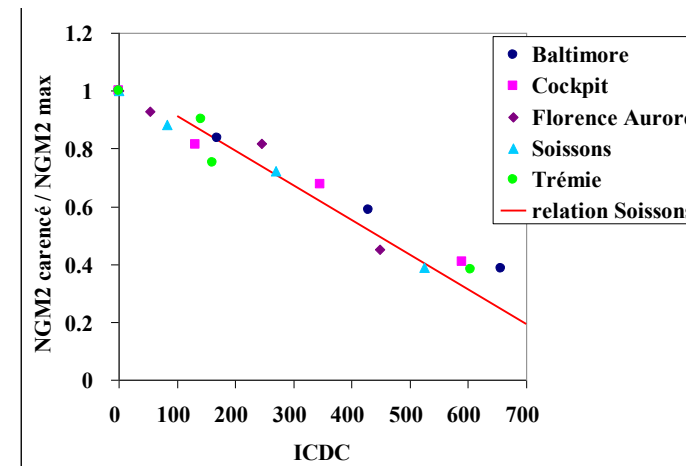


Effet variétal sur les carences azotées et la production

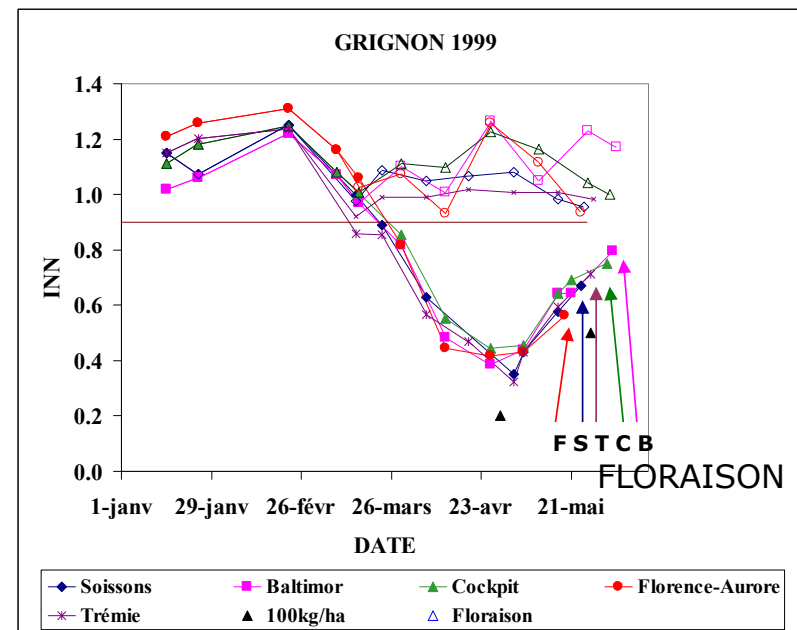
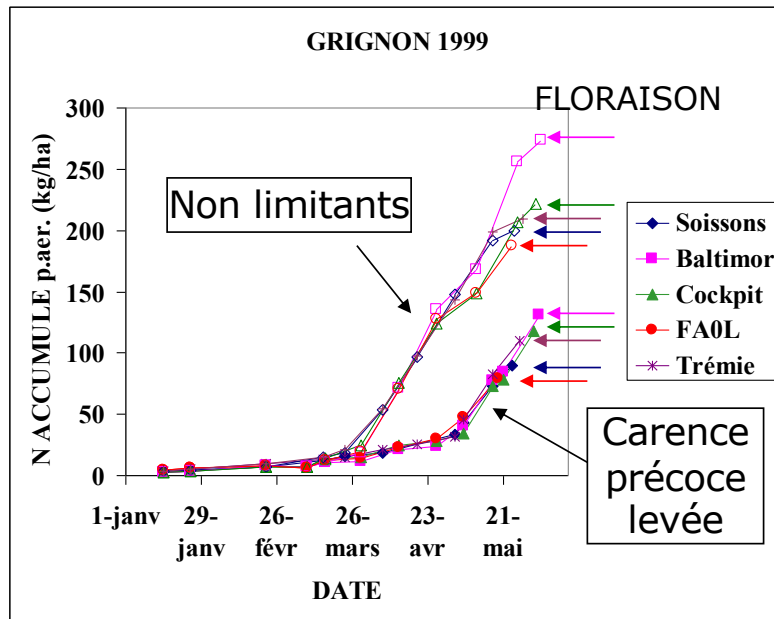
Nombre de grains par m² et nombre de grains relatif (NGR : entre parenthèses) sur chaque traitement (tableau 3)

Variétés		Baltimore	Cockpit	Florence A.	Soissons	Trémie
Traitements	N0	10907 (0,39)	10974 (0,41)	7857 (0,45)	10312 (0,39)	9420 (0,38)
	N0L	22558 (0,80)	20194 (0,75)	9722 (0,56)	17323 (0,65)	18535 (0,76)
	N1	16637 (0,59)	18109 (0,68)	14213 (0,82)	19199 (0,72)	18420 (0,75)
	N2	23743 (0,84)	21753 (0,81)	16175 (0,93)	23422 (0,88)	22125 (0,90)
	N3 (témoin)	28320	26750	17395	16527	24533

La relation entre perte de nombre de grains/m² et caractéristiques de la carence n'est pas différente entre variétés



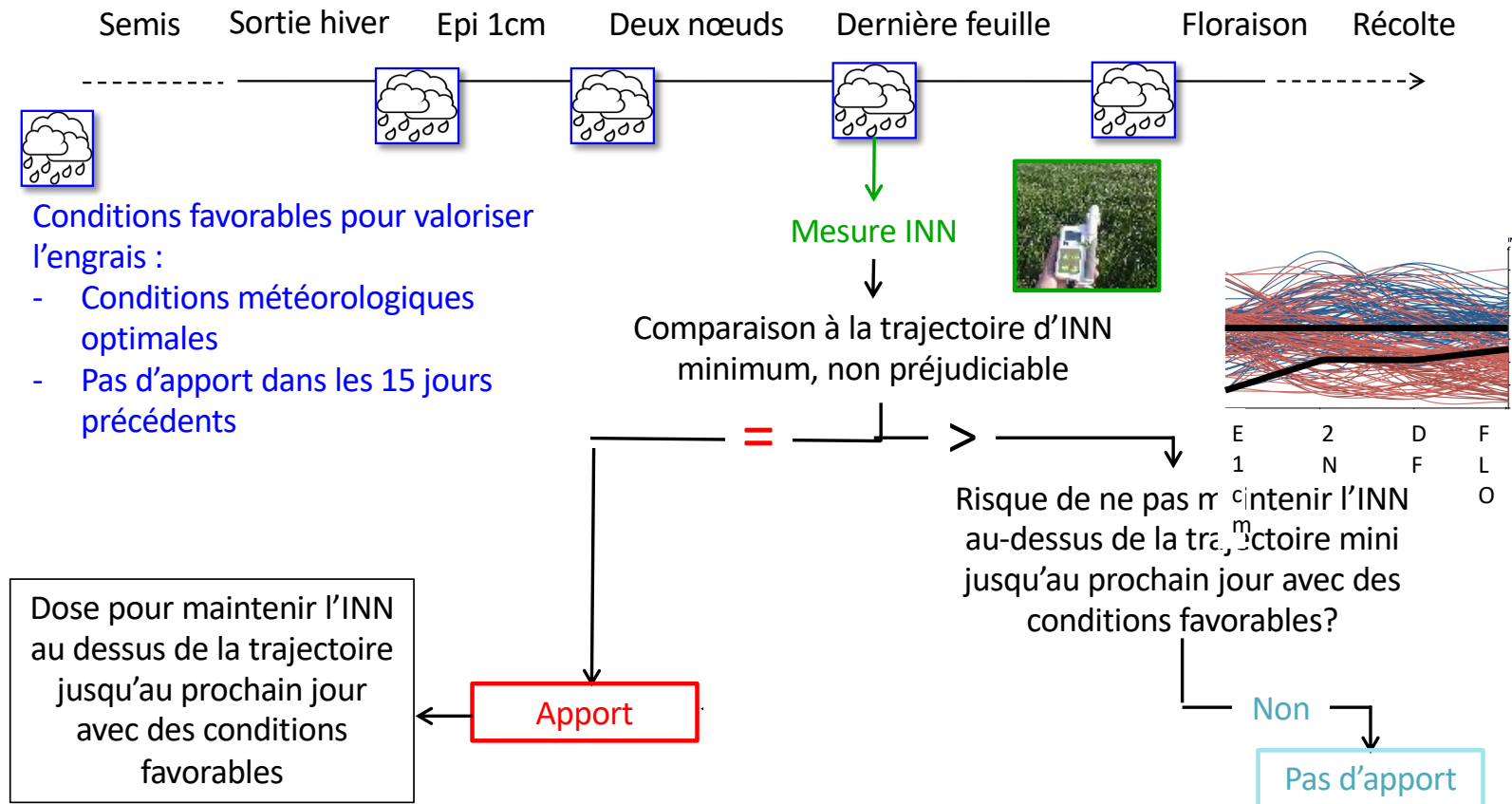
Les différences de cinétique d'absorption d'N entre variétés sont majoritairement liées à des différences de rythme de développement



(Jeuffroy et Barbottin, np)

APPI-N= une méthode de fertilisation pour adapter la date et les doses d'apport à la situation : pilotage intégral basé sur un suivi de la nutrition azotée, tolérant des carences

(Ravier et al., 2018;
Jeuffroy et al., 2019)



INN	1 ^{er} - 15 mars	15 - 31 mars	1 ^{er} - 15 avril	...
0.4	40			
0.5	40	60		
0.6	40	60		
0.7	40	60	100	
0.8	0	60	80	
0.9	0	40	60	
1	0	40	40	
> 1	0	0	0	

Synthèse globale des résultats de l'évaluation d'APPI-N

en Centre-Val de Loire et Grand-Est

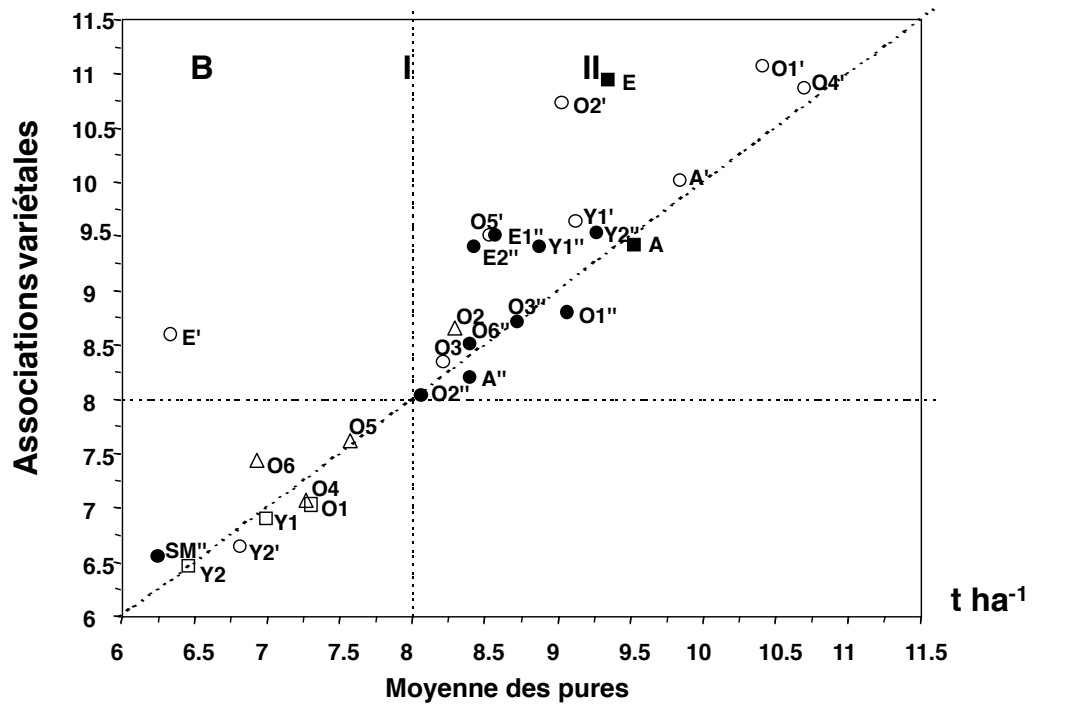
(Paut et al., 2024, NCAS)

Type de résultats	Paramètre d'évaluation	Résultats en micro-parcelles (n =20)	Résultats en bandes agriculteur (n=16)
Stratégie de fertilisation	Date du 1 ^{er} apport	20 jours plus tard (entre 0 et 50 jours d'écart)	15 à 25 jours plus tard
	Nombre total d'apports	Bilan : 5% 2 apports 95% 3 apports APPI-N : 50% : 2 apports 50% : 3 apports	Bilan : 18% 2 apports 75% 3 apports APPI-N : 37% 2 apports 56% 3 apports
	Dose totale	Réduite de 16 kg N/ha (Significatif à 5%)	Réduite de 25 kg N/ha
Performance économique	Rendement à 15%	Equivalent : Ecart de -1,3 q/ha (NS)	Equivalent : Ecart de + 0,9 q/ha
	Taux de protéine	Equivalent : Ecart de +0,1 point (NS)	Equivalent : Ecart de + 0,3 point
	Marge partielle	Equivalent : Ecart de - 2€/ha (NS)	Ecart de + 38 €/ha
Performance environnementale	Pertes	Réduites de 9 kg N/ha (S) (n=19)	Réduites de 36 kg N/ha (n=7)
	Emission de GES par hectare	Réduites de 627 kg CO2eq/ha (S) (-26%) (n=19) <i>L'équivalent d'un trajet d'environ 3250 km en voiture</i>	Réduites de 1895 kg CO2eq/ha (-39%) (n=7)
	Émission de GES par quintal de produit récolté	Réduites de 8,6 kg CO2eq/q (S) (-28%) (n=19)	Réduites de 25,3 kg CO2eq/q (-40%) (n=7)

Les associations variétales : une technique d'intérêt face au CC

Pas de gain de rendement ... mais

RENDEMENT t ha⁻¹

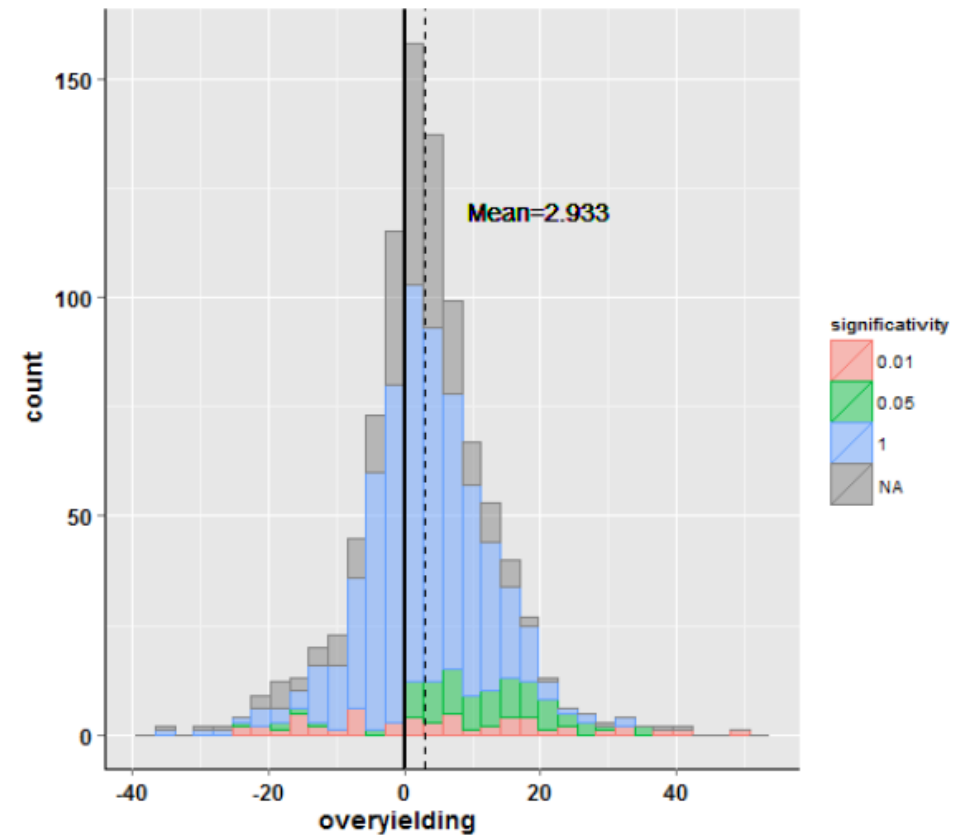


□ CM1, ■ CM2, △ CM3 in 1999-2000, ○ CM4 in 2000-2001 and ● CM4 in 2001-2002

(Belhaj Fraj, 2003)

3 associations de
4 variétés en 2000,
1 association en 2001 et 2002,
cultivées selon un système de protection intégrée

Méta-analyse sur les mélanges de blé

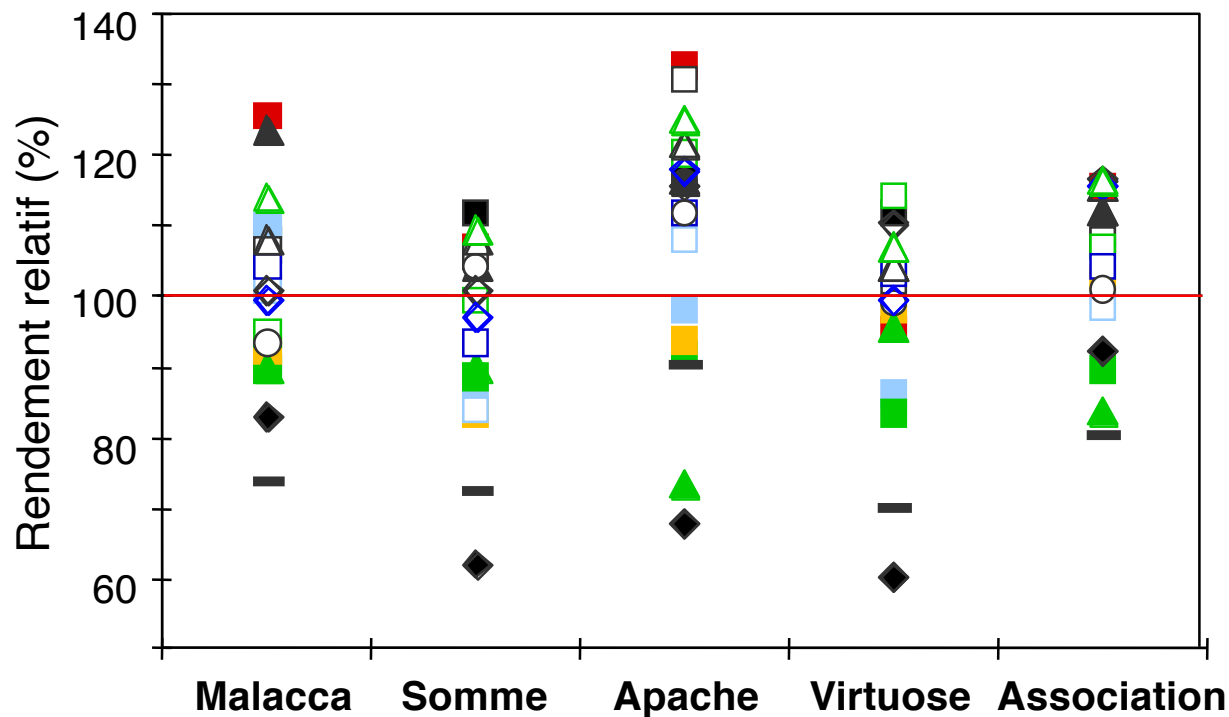


Borg et al. (2017)

Les associations variétales : une technique d'intérêt face au CC

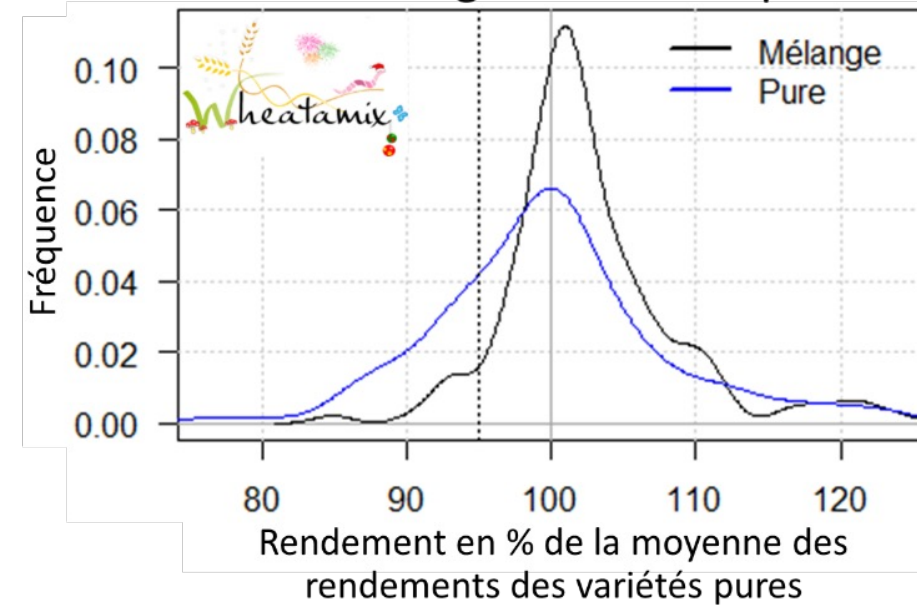
Mais ... Meilleure stabilité du rendement

Moyenne des rendements des cultures monovariétales
sur tous les sites pendant 2 ans = 100



(Belhaj Fraj, 2003)

135 mélanges + variétés pures



→ Sélectionner pour l'aptitude à l'association ?

→ Sélectionner et évaluer en association ?

Les associations variétales : une technique d'intérêt face au CC

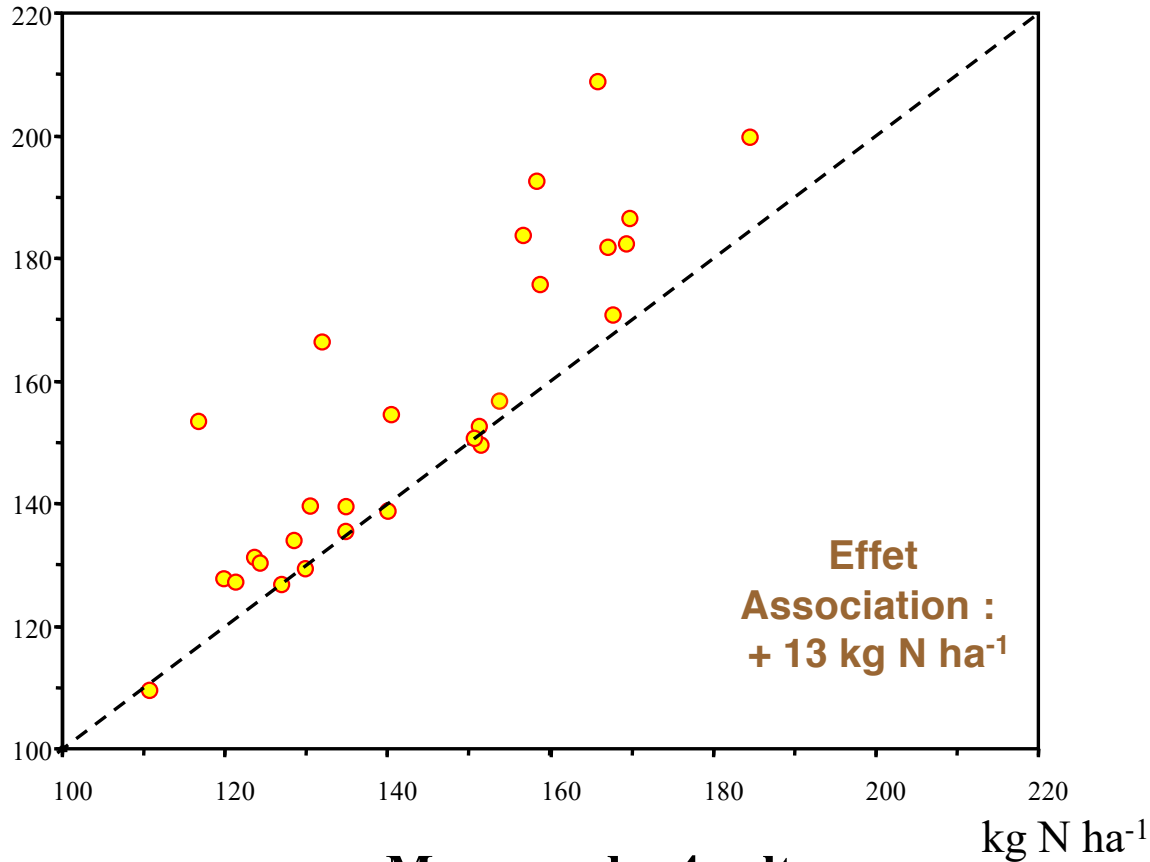
et ... Meilleure absorption de l'N

Quantité d'N dans
les grains

kg N ha⁻¹

kgN ha⁻¹

Associations variétales



→ Sélectionner pour l'aptitude à l'association ?

→ Sélectionner et évaluer en association ?

(Belhaj Fraj, 2003)

Moyenne des 4 cultures
monovariétales

DES ITINÉAIRES TECHNIQUES EN COMBINANT PERFORMANCES AGRONOMIQUES, ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES : adapter les caractéristiques variétales à la conduite !

(Loyce et al., 2001; 2012)

Une décroissance du niveau d'intrants, de ITK 1 à ITK 4

- **ITK1: Itinéraire technique à haut niveau d'intrants, conçu pour maximiser le rendement:**

Dose d'engrais N de l'ITK2 + 30kg/ha, 1 ou 2 régulateurs, 2 ou 3 fongicides

- **ITK2: Conduite de référence, conseillée dans la région pour le blé d'hiver (référence Arvalis ou Chambre d'Agriculture, année 2000):**

Dose N calculée par bilan prévisionnel, 3 apports, 1 régulateur de croissance, 1 ou 2 fongicides

- **ITK3:**

Par rapport à l'ITK2, réduction cohérente de la dose d'engrais azoté (de 30 kg.ha⁻¹ ; pas d'apport de sortie hiver) et de la densité de semis (de 40%). Pas de régulateur de croissance; un seul traitement fongicide au maximum

- **CM4:**

Par rapport à l'ITK2, réduction de la dose d'engrais azoté (de 60 kg.ha⁻¹) et de la densité de semis (de 40%); pas de traitement fongicide, pas de régulateur de croissance

DES ITINÉAIRES TECHNIQUES EN COMBINANT PERFORMANCES AGRONOMIQUES, ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES : adapter les caractéristiques variétales à la conduite !

(Loyce et al., 2001; 2012)

Une décroissance du niveau d'intrants, de ITK 1 à ITK 4

- **ITK1:** Itinéraire technique à haut niveau d'intrants, conçu pour **maximiser le rendement:**

Dose d'engrais N de l'ITK2 + 30kg/ha, 1 ou 2 régulateurs, 2 ou 3 fongicides

- **ITK2:** Conduite de référence, conseillée dans la région pour le blé d'hiver (référence Arvalis ou Chambre d'Agriculture, année 2000):

Dose N calculée par bilan prévisionnel, 3 apports, 1 régulateur de croissance, 1 ou 2 fongicides

- **ITK3:**

Par rapport à l'ITK2, réduction cohérente de la dose d'engrais azoté (de 30 kg.ha⁻¹ ; pas d'apport de sortie hiver) et de la densité de semis (de 40%). Pas de régulateur de croissance; un seul traitement fongicide au maximum

- **CM4:**

Par rapport à l'ITK2, réduction de la dose d'engrais azoté (de 60 kg.ha⁻¹) et de la densité de semis (de 40%); pas de traitement fongicide, pas de régulateur de croissance

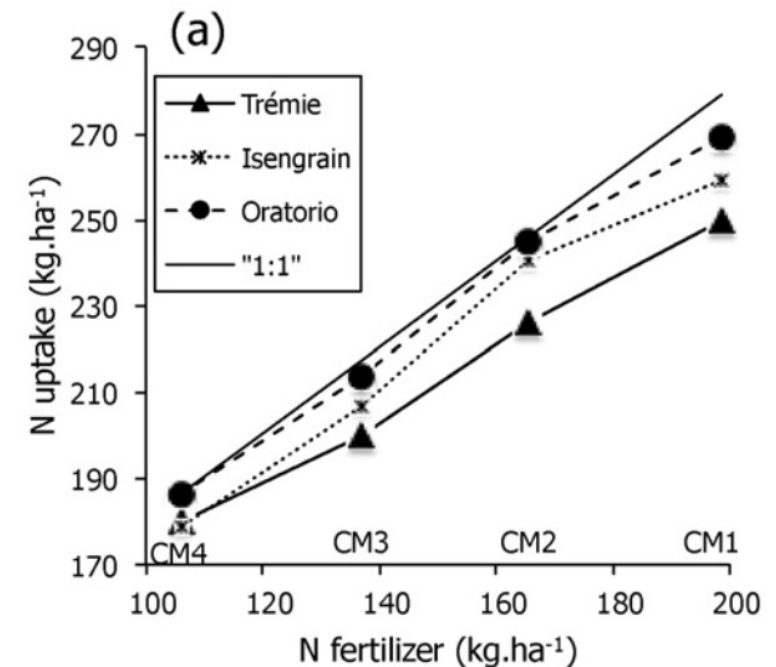
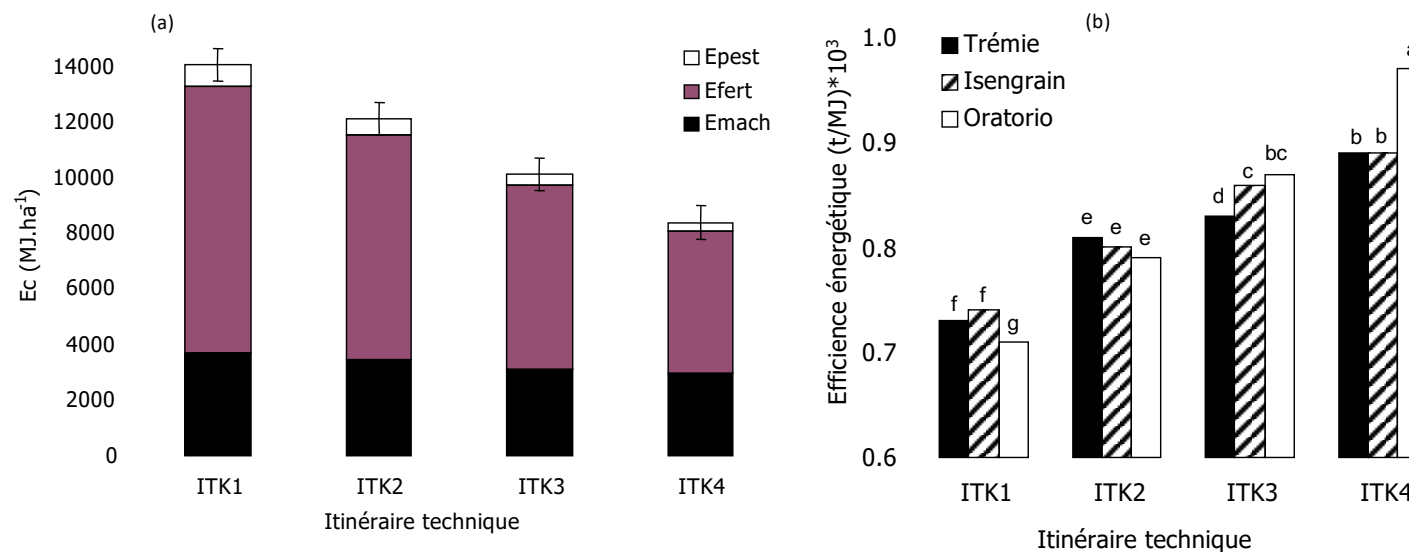


Fig. 3. N uptake as a function of N fertilizer application

- Verse sur Trémie
- efficence d'utilisation de N (Nup/Nrate) : CM4 > CM3 > CM2 > CM1

Performances énergétiques: coûts en énergie fossile et efficacité énergétique (tonnes de grain par MJ)

(Loyce et al., 2001; 2012)



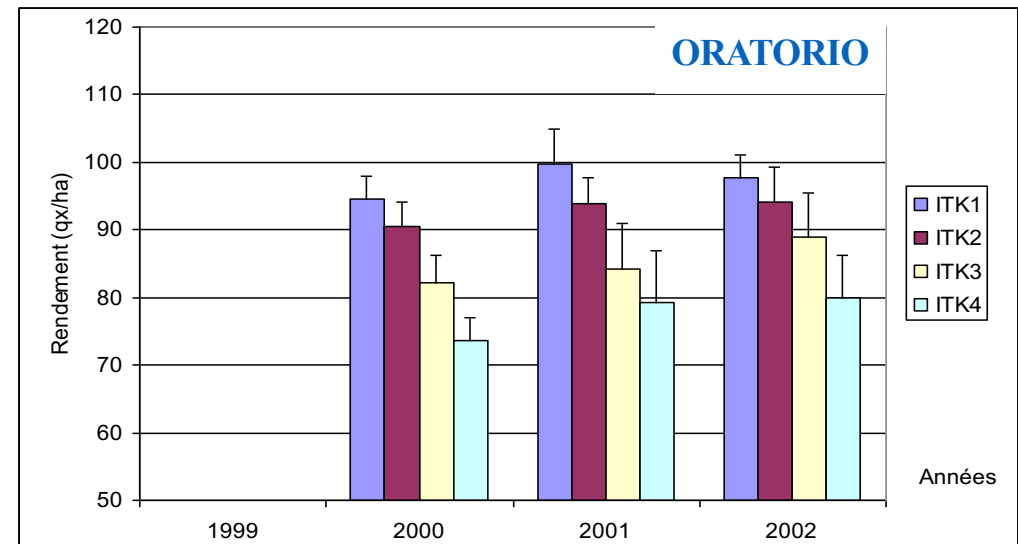
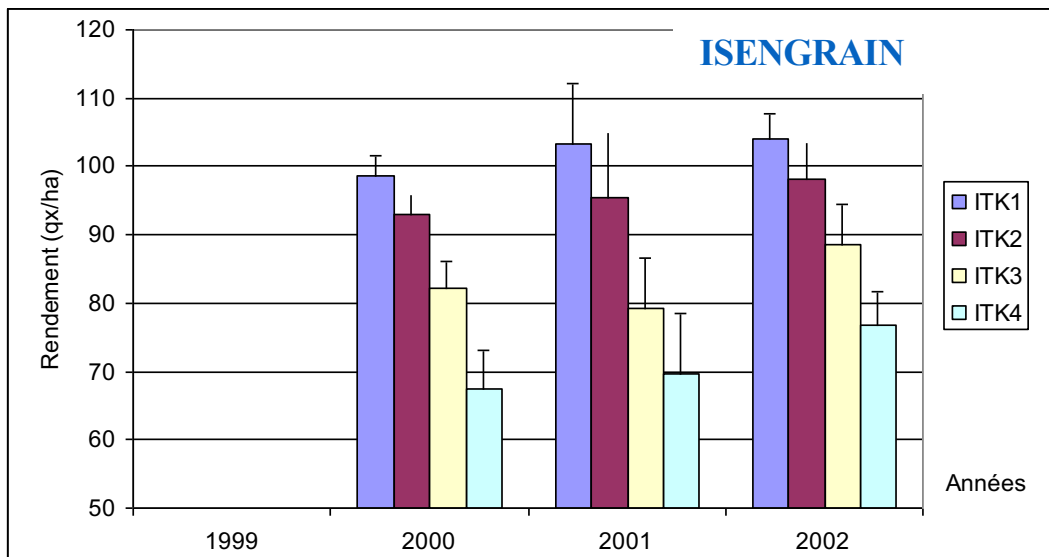
- Une diminution des coûts d'énergie fossile de 40.3% entre ITK 1 et ITK 4
- L'engrais azoté est le plus fort contributeur aux dépenses énergétiques

- Une efficacité énergétique qui augmente de ITK 1 à ITK 4
- Très lié à l'efficacité d'utilisation de N

Rendement en grain selon la conduite et l'année, pour 2 variétés

(moyenne de l'ensemble des essais)

(Loyce et al., 2001; 2012)

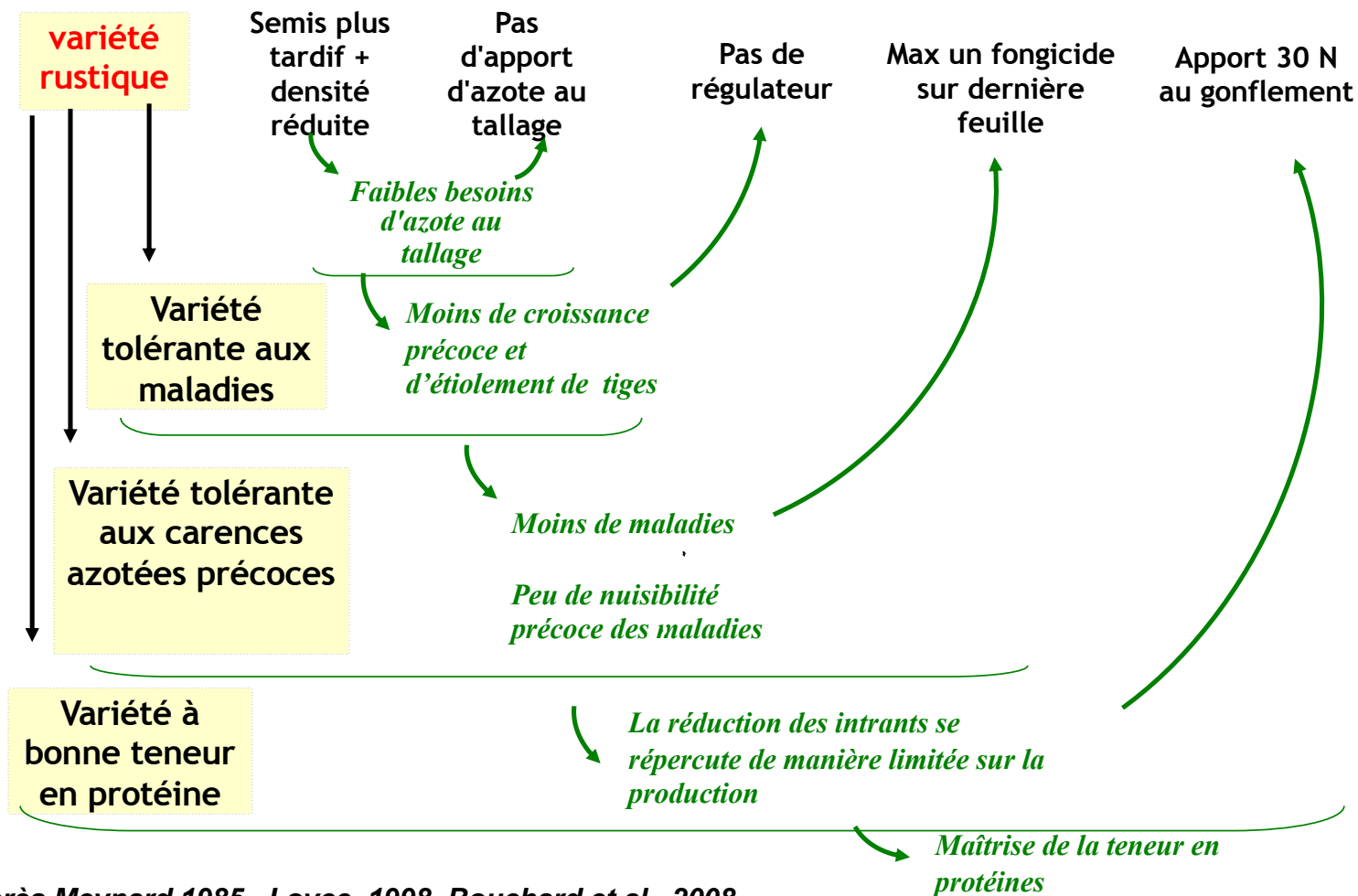


- Meilleur rendement de Isengrain en ITK1
- Rendements de Isengrain et Oratorio équivalents en ITK2 et ITK3
- Meilleur rendement de Oratorio en ITK3 et ITK4

➔ Sélectionner des variétés
adaptées aux ITK 3 !
... mais ca veut dire quoi ???

Valoriser les ITK BNI par des variétés aux caractéristiques cohérentes :

Tolérantes aux carences N précoces + adaptées aux semis tardifs et moins denses + tolérantes aux maladies et à la verse



D'après Meynard 1985, Loyce, 1998, Bouchard et al., 2008

Associations pluri-spécifiques: une pratique très efficace v/v de l'N



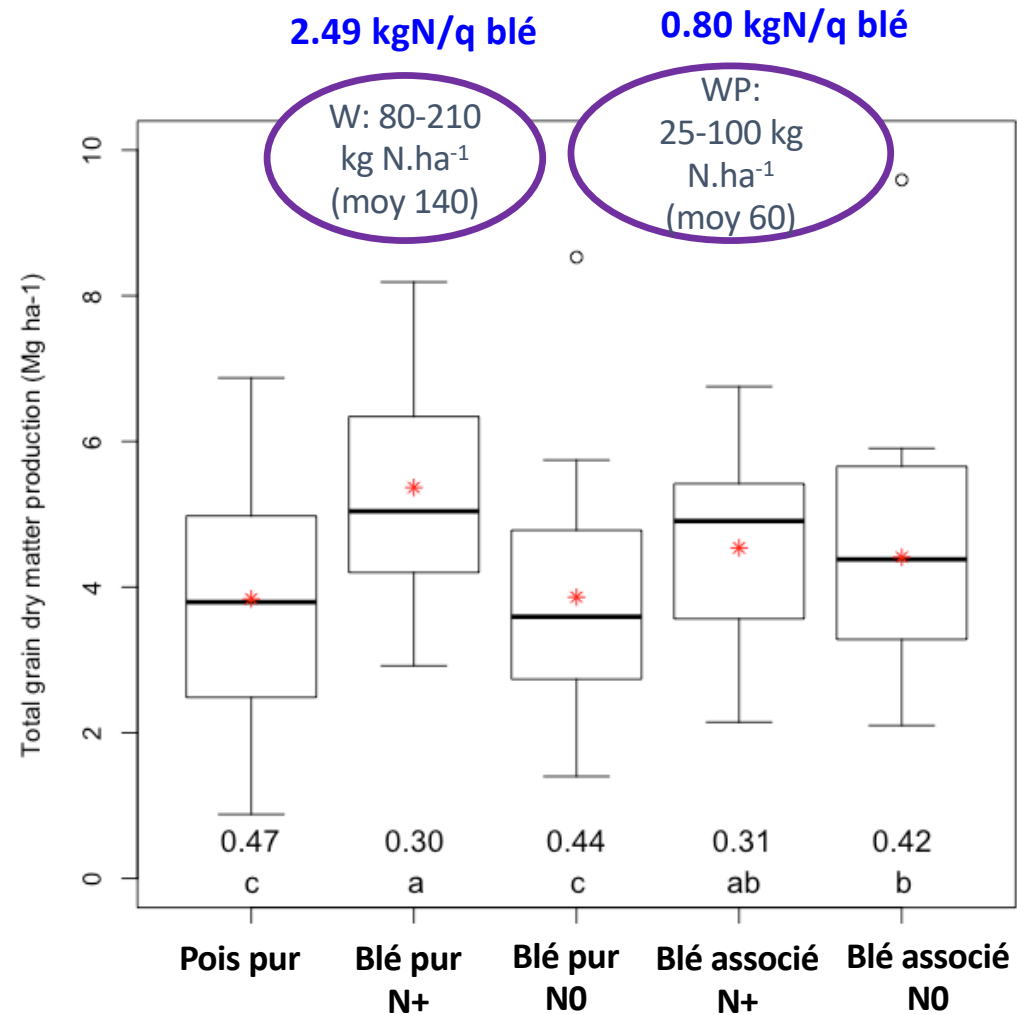
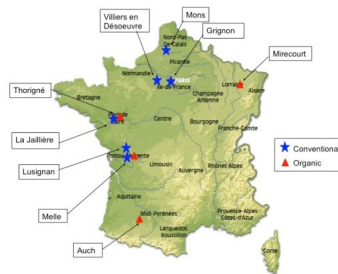
Associations céréales-légumineuses: une pratique très efficace v/v de l'N

➔ Rendement blé associé proche blé pur,
avec ferti différente!

→ Pas de différences entre rendement association avec et sans N (*parcelles en conv et en AB*)

➔ Pour modalités fertilisées, quantité de N nécessaire pour produire 1q de grains est 3 fois plus faible en association qu'en blé pur

Source : projet CASDAR associations
(2005-08)



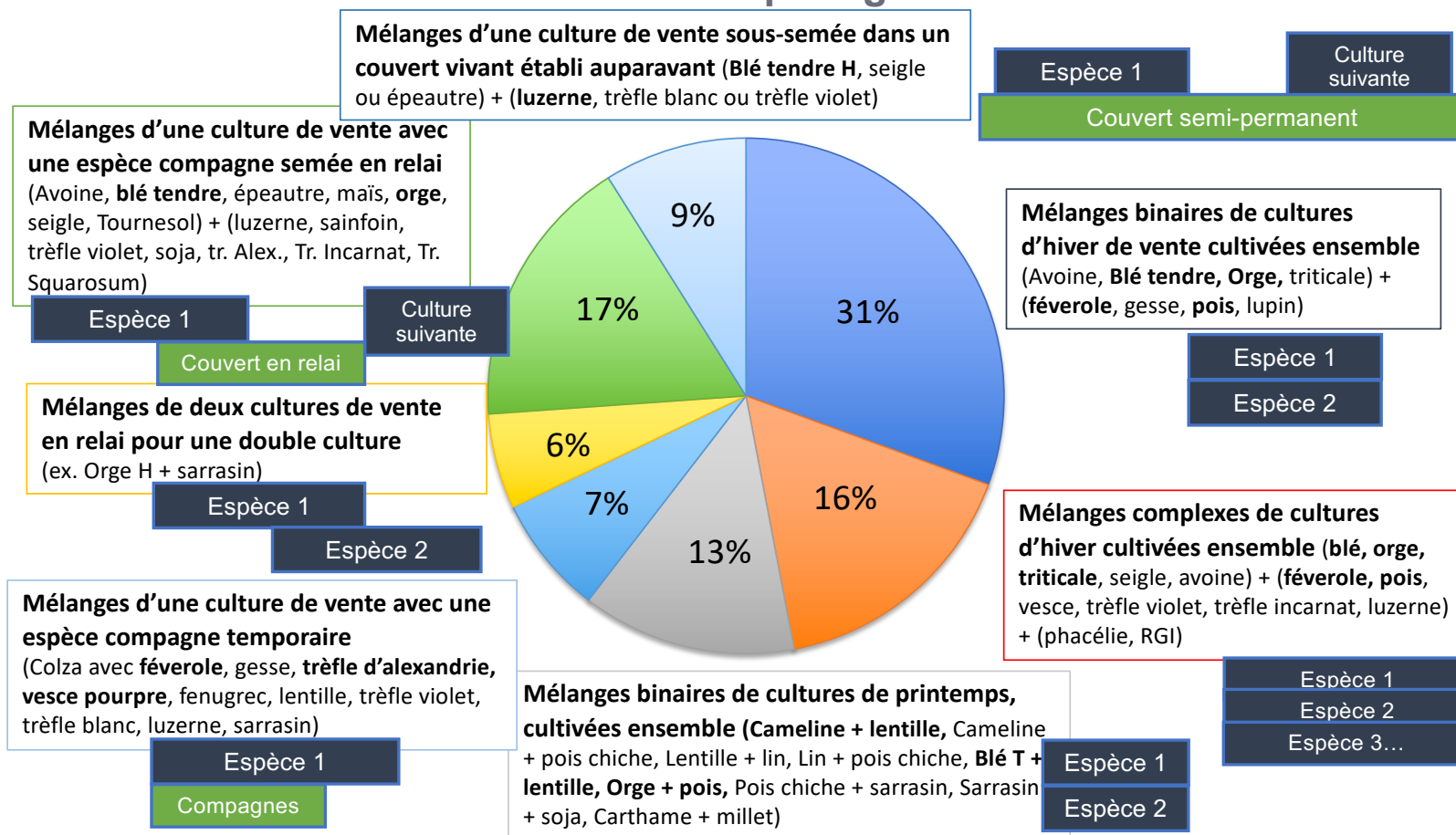
Diversité des associations: Quelles associations sont cultivées chez les agriculteurs ?



Verret et al. 2020

134 associations - 7 types identifiés

Entre 1 et 9 associations différentes par agriculteur

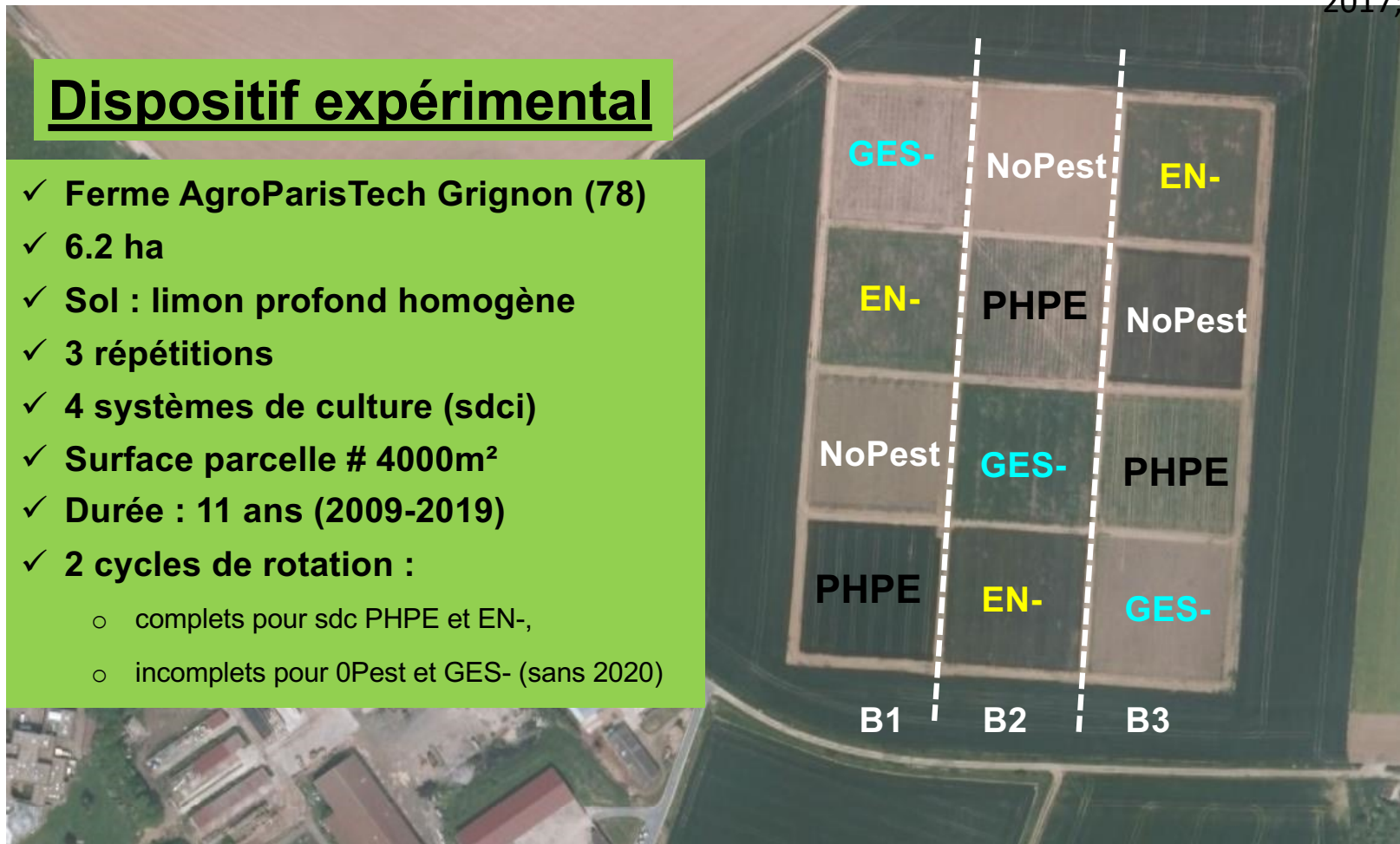


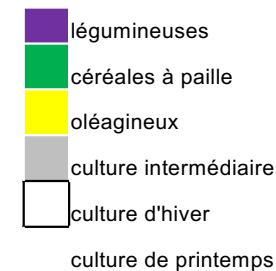
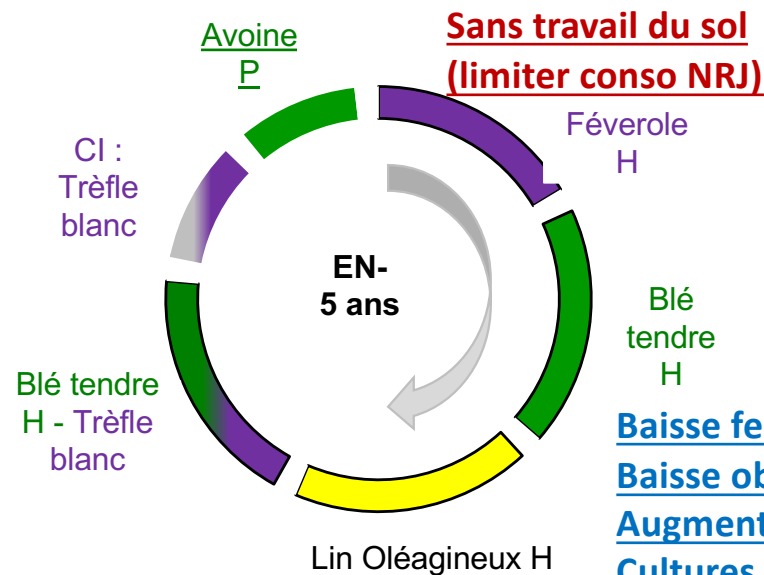
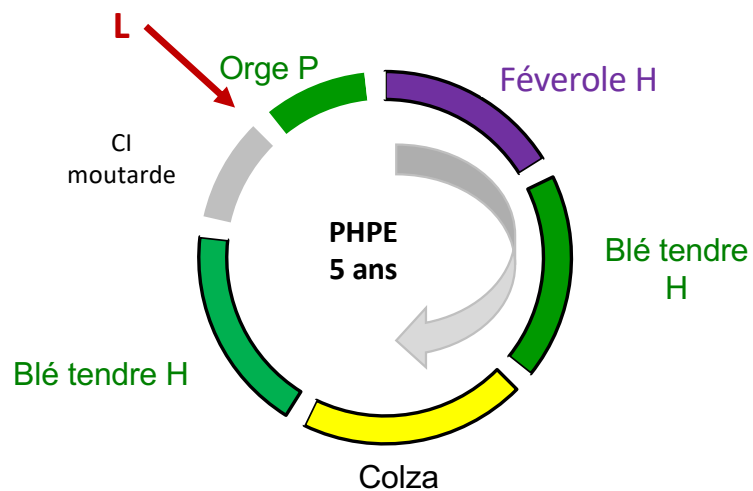
Réduire fortement les GES et la consommation d'énergie passe par un changement au niveau du système de culture !

(Colnenne-David et al., 2017; 2023)

Dispositif expérimental

- ✓ Ferme AgroParisTech Grignon (78)
- ✓ 6.2 ha
- ✓ Sol : limon profond homogène
- ✓ 3 répétitions
- ✓ 4 systèmes de culture (sdci)
- ✓ Surface parcelle # 4000m²
- ✓ Durée : 11 ans (2009-2019)
- ✓ 2 cycles de rotation :
 - complets pour sdc PHPE et EN-,
 - incomplets pour 0Pest et GES- (sans 2020)





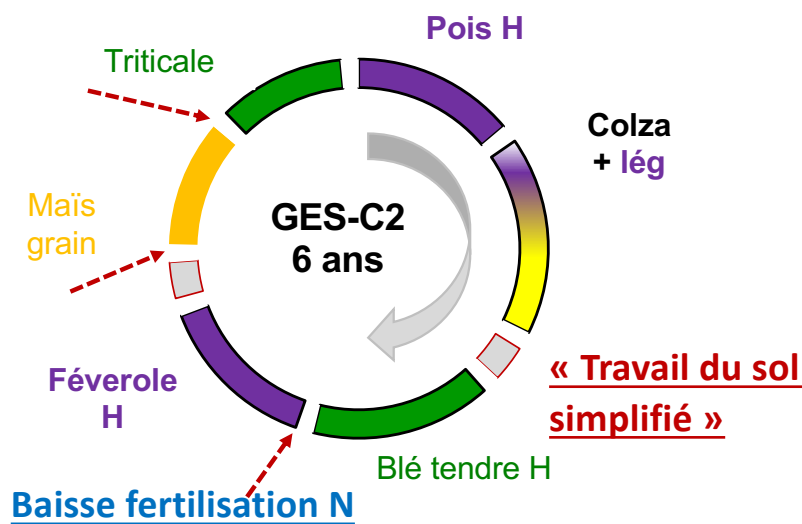
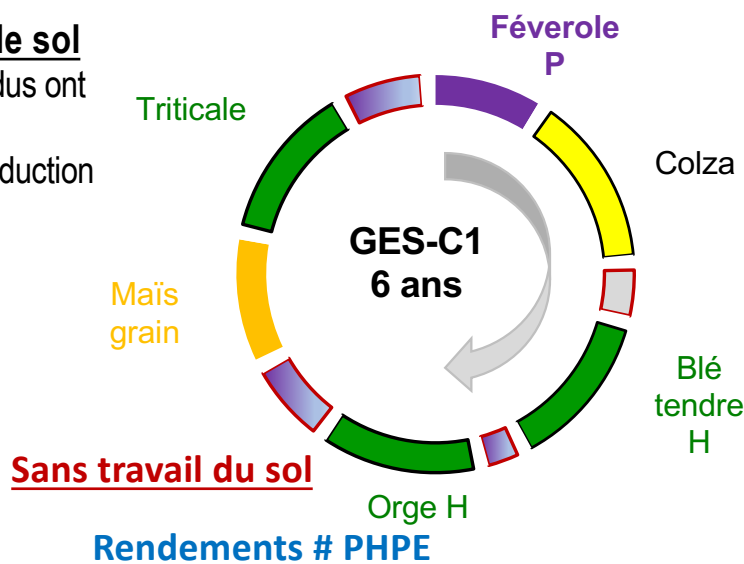
Baisse fertilisation N
Baisse obj de production
Augmentation légumineuses
Cultures non fertilisées (faibles besoins)

Favoriser le stockage de C dans le sol

- ✓ implanter des espèces dont les résidus ont un potentiel de stockage élevé
- ✓ maintenir des niveaux élevés de production
- ✓ produire de la biomasse (CI)
- ✓ sans labour

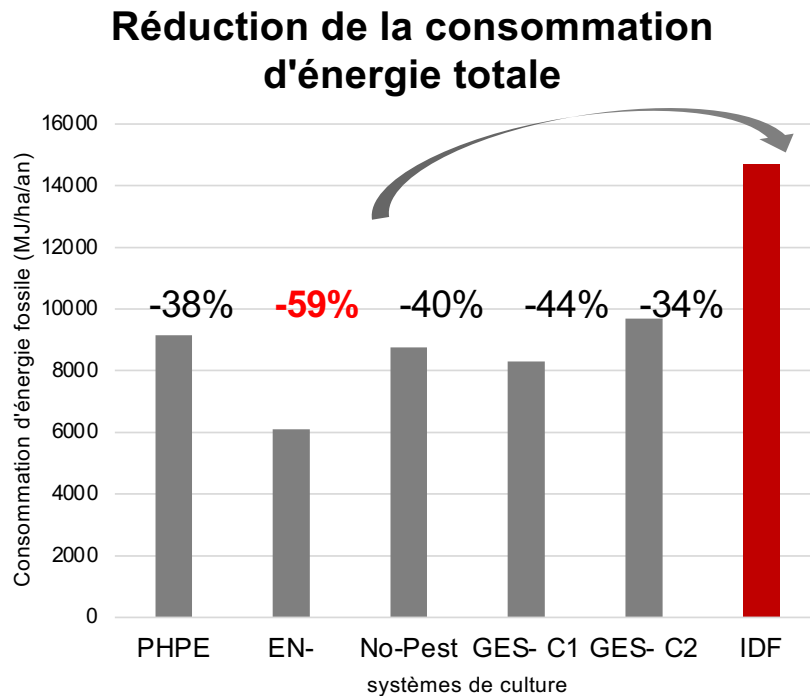
Limitier les émissions de N₂O

- ✓ implantations
 - légumineuses
 - espèces à pivots
 - cultures intermédiaires



Des systèmes de culture innovants pour réduire les GES et la consommation d'énergie

(Colnenne-David et al., 2017; 2023)



Rendements (t/ha ; 0%)	PHPE	0Pest	GES-	EN-	PV
Blé tendre d'hiver	7,26	6,39	7,38	6,46	8.1 (blé de blé : 7.2)

Des systèmes de culture innovants pour réduire les GES et la consommation d'énergie

(Colnenne-David et al., 2017; 2023)

Emissions GES totales (kg CO₂eq/ha/an)

GES-	PHPE	Plateau Versailles
1 052 +/- 183	1 071 +/- 145	2 573 +/- 169

Balance carbone (kg CO₂eq/ha/an)

GES-	PHPE	Plateau Versailles
1 202 +/- 86	1 188 +/- 270	2 102 +/- 174

GES'TIM, 2010 – SIMEOS (<http://www.simeos-amg.org/>)

GES- : moyennes à l'échelle de la rotation (2009-2014), écart-types sur trois répétitions
 PHPE : moyennes à l'échelle de la rotation (2009-2013), écart-types sur trois répétitions
 PV : moyennes à l'échelle de la rotation (2009-2014), écart-types sur la base des trois systèmes de référence, Plaine de Versailles

Rendements (t/ha ; 0%)	PHPE	0Pest	GES-	EN-	PV
Blé tendre d'hiver	7,26	6,39	7,38	6,46	8.1 (blé de blé : 7.2)

- ➔ Des variétés adaptées à des situations avec opérations simplifiées de travail du sol ?... Conditions de levée variables, dynamiques d'absorption d'N, effet mulch ...
- ➔ Des essais de sélection et d'évaluation spécifiques en TCS
- ➔ Une diversité d'espèces à sélectionner (en articulation avec les filières)

Changement climatique: de quoi parle-t-on ?

- **On ne peut pas dissocier adaptation et atténuation:** les solutions pour faire face à l'adaptation sont-elles cohérentes avec une atténuation → place essentielle des légumineuses ; rôle clé des associations pluri-spécifiques ! → sélectionner ces espèces et pour ces modes de culture
- **L'azote n'est qu'une partie de la conduite** → on ne peut pas raisonner l'azote en oubliant les autres composantes de la conduite → modifier les conduites dans les essais de sélection ET d'évaluation variétale
- **Les systèmes agricoles sont de plus en plus variés** → la gamme variétale nécessaire doit s'élargir → les dispositifs d'évaluation variétale doivent évoluer (diversité de systèmes de culture ; on-farm experiment)