

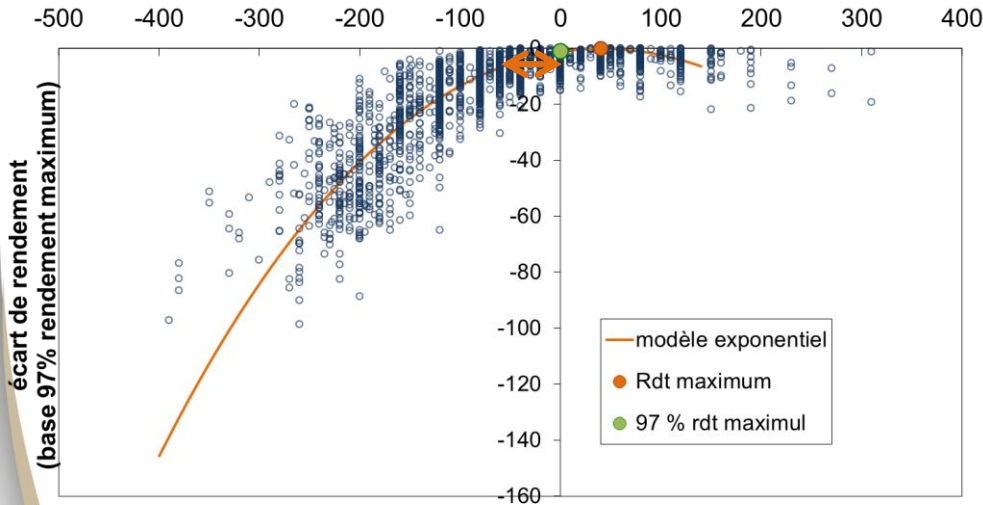
**Piloter la fertilisation azotée des céréales à paille en temps réel :  
ajuster ses interventions pour optimiser sa récolte**



# Les enjeux de la fertilisation azotée

## Réponse Moyenne du Rendement

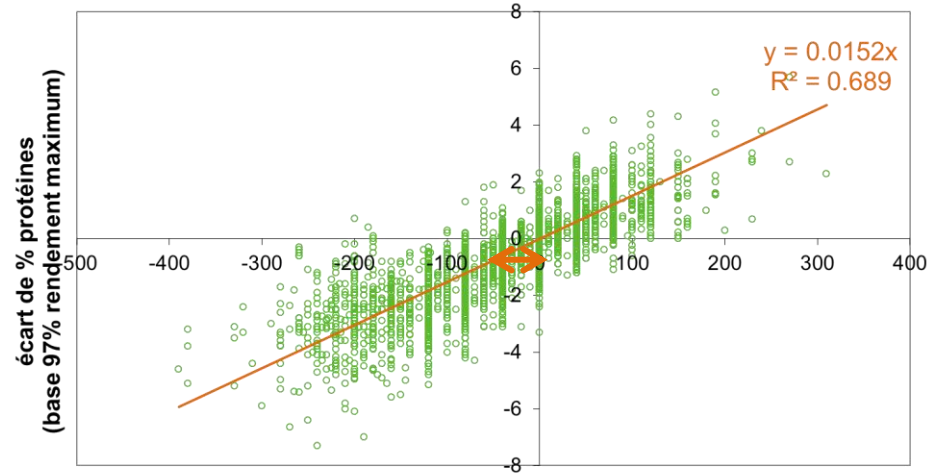
Essais "Azote-Fractionnement" de 1991 à 2002  
607 essais en 0 à 4 apports



écart à la dose N procurant 97% du rendement maximum

## Protéines

Essais "Azote-Fractionnement" de 1991 à 2002  
607 essais en 0 à 4 apports



écart à la dose N procurant 97% du rendement maximum

**Il existe un optimum de fertilisation azotée pour le rendement  
-40 kgN/ha par rapport à l'optimum = -4.4 q/ha et -0.6% protéines**



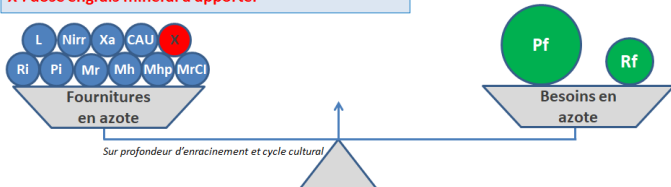
# Le raisonnement de la fertilisation azotée des céréales à paille

*Une approche à priori ...*

**Le calcul de la dose prévisionnelle (X)**

**Ri** : reliquat N ouverture du bilan  
**Pi** : azote déjà absorbé par la culture à l'ouverture  
**Mr** : minéralisation des résidus du précédent  
**Mh** : minéralisation de l'humus  
**Mhp** : minéralisation due à un retournement de prairie  
**MrCl** : minéralisation résidus de culture intermédiaire  
**L** : lixiviation (négligé)  
**Nirr** : azote issu de l'eau d'irrigation  
**Xa** : azote issu des apports organiques  
**CAU** : coefficient apparent d'utilisation (pertes liées à X)  
**X** : dose engrais minéral à apporter

**Pf** : besoins de la culture  
**Rf** : reliquat d'azote à la sortie du bilan



**N1**

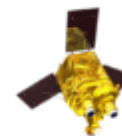
**(X - 40)**

**N2**



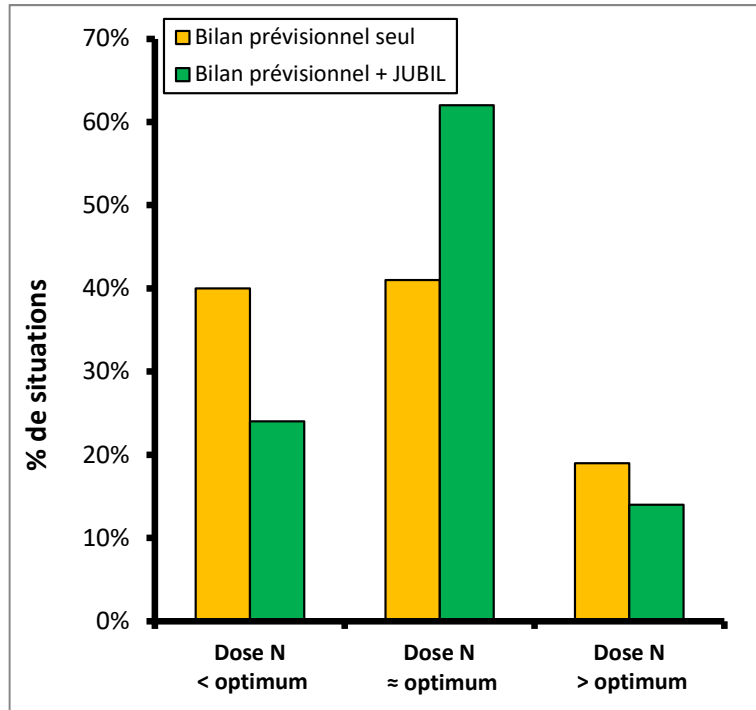
*... complétée par un diagnostic en végétation*

**L'utilisation des outils de pilotage**

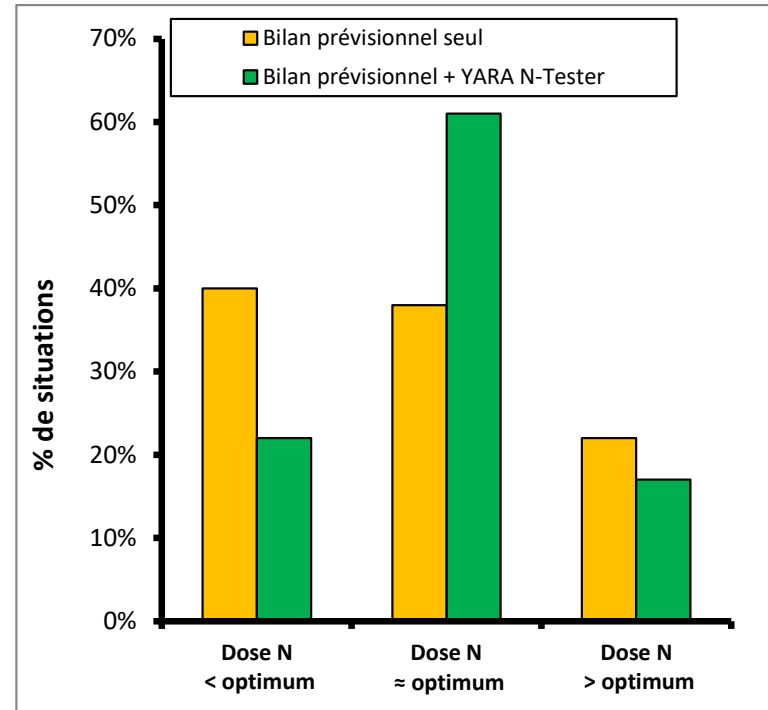




# Performance de l'approche « bilan prévisionnel + outil de pilotage »



220 essais (1994-1999)



206 essais (1994-2000)

-> on peut encore progresser (il reste 40% des situations pilotées qui ne sont pas à l'optimum)



# Résultats technico-économiques du pilotage de l'azote sur blé

- Avantages économiques de Farmstar objectif protéines par rapport l'utilisation de la dose bilan seule :

Dose d'engrais (kgN/ha)	<b>+ 25 kgN/ha</b>
Rendement (q/ha)	<b>+ 2.5 q/ha</b>
Protéines (%)	<b>+ 0.4</b>

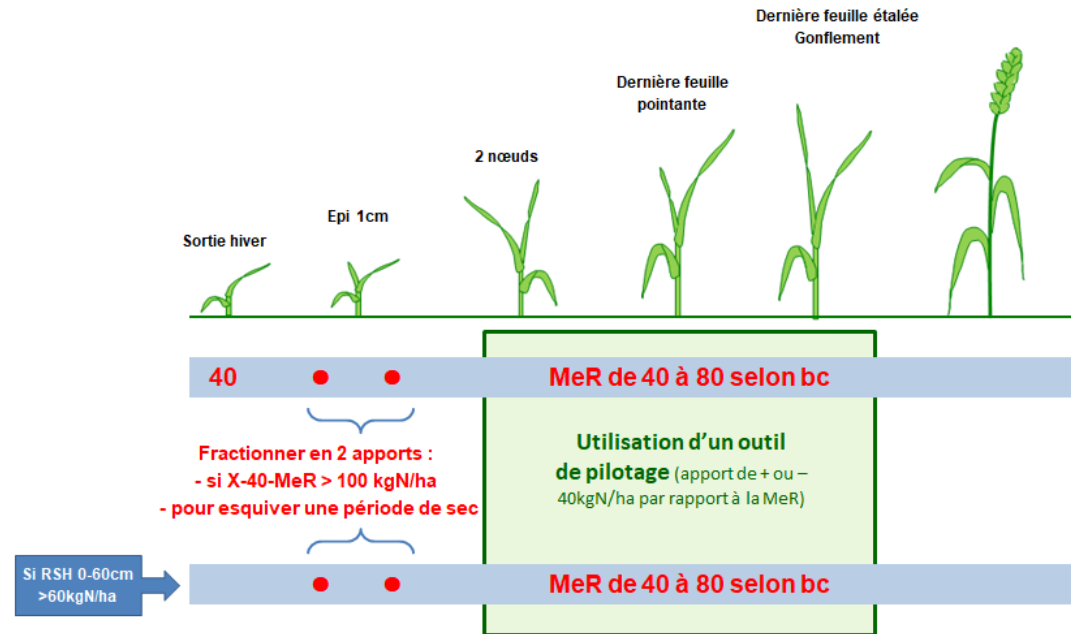
Sources des données : Essais ARVALIS 2014-2015

Scénarios de prix	Prix blé tendre €/t	Prix unité d'azote ammo €/kgN	Prix points protéines €/%/t	<b>Gain (€/ha)</b>
<b>Bas</b>	110	0.6	0	<b>12.5</b>
<b>Intermédiaire</b>	170	1.0	5	<b>18.0</b>
<b>Haut</b>	230	1.3	10	<b>26.0</b>



# Contexte actuel de la gestion de la fertilisation azotée des blés français et ses limites

Raisonnement basé aujourd'hui sur le calcul d'une dose prévisionnelle recalée en cours de campagne par un outil de pilotage



## Les limites de cette approche :

- > Peut-on atteindre systématiquement le potentiel de la parcelle quand le besoin d'azote prévisionnel est basé sur l'historique parcellaire ?
- > Piloter le dernier apport est-il suffisant pour s'adapter à l'année ?
- > Comment prendre en compte les flux azotés sol-plante lors du pronostic des OAD ?
- > Comment prendre en compte l'interaction eau-azote ?

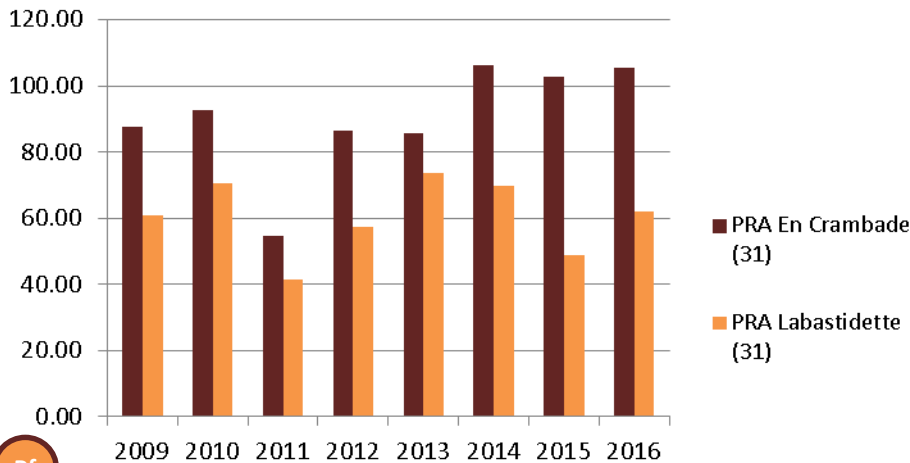


# Enjeu de la variabilité interannuelle des postes de bilan prévisionnel

## Exemple des besoins de la culture (Pf) et des fournitures du sol (Mh+Mr)

Essais variétés ARVALIS

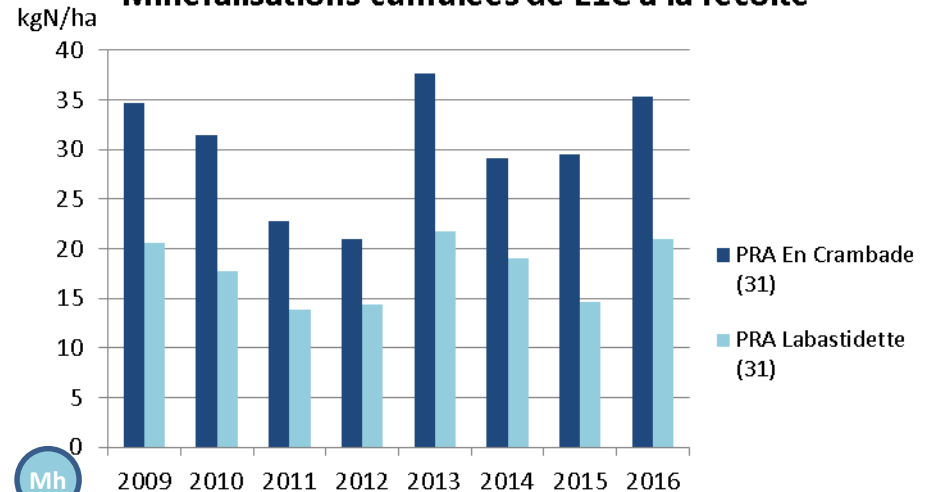
Evolution des rendements blé dur moyens en essais variétés



**Pf**  
 +/- 15 à 20 q/ha selon les années pour un même contexte (soit +/- 45 à 60 kg N/ha de besoin)

Modélisation à partir des JN

Minéralisations cumulées de E1C à la récolte



**Mh**  
**Mr**  
 +/- 15 kg N/ha selon les années pour un même contexte (en précédent tournesol ou colza)

En Crambade (31) – Alluvions limono-argileuses profondes  
 Labastidette (31) – Boulbènes superficielles

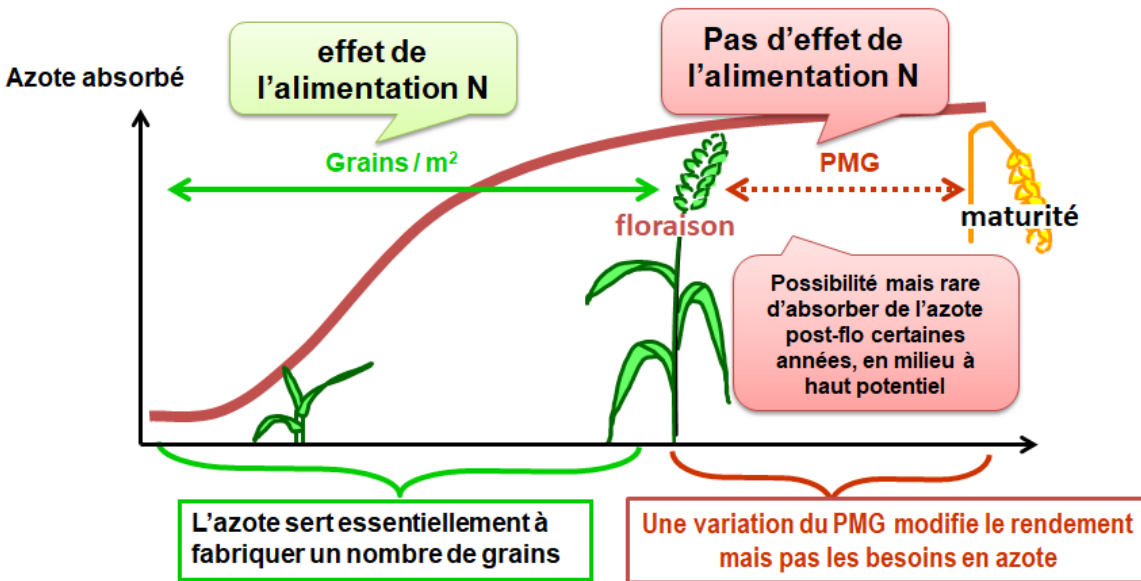
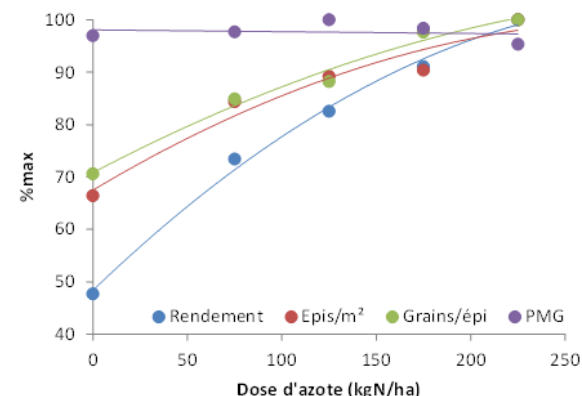


**Les outils de pilotage permettent une modulation de dose de +/- 40 kg N/ha autour de la dose prévisionnelle**



# La fertilisation azotée et l'élaboration du rendement

Essai En Crambade (31) 2013  
Variété Babylone



L'azote sert essentiellement à fabriquer un nombre de grains

Une variation du PMG modifie le rendement mais pas les besoins en azote

**Effet de la nutrition N :**

- Essentiellement sur le nb grains/m<sup>2</sup>
- Impact (-) indirect sur le PMG par effet de compensation

	Conditions de remplissage difficiles	Conditions de remplissage favorables
Nb grains / m <sup>2</sup>	18000	18000
PMG (g)	46	52
Rendement (q/ha)	82.8	93.6
Besoins calculés (kgN/ha)	248	281

En cas de perte de rendement liée à un mauvais remplissage (perte de PMG) les besoins calculés seront moindres alors qu'en réalité la plante aura absorbé la même quantité d'azote



Besoins de la culture calculés à partir du rendement pluriannuel alors que l'azote n'a une influence que sur le nombre de grains

**-> nécessité de raisonner sur un objectif de Nabs à floraison**

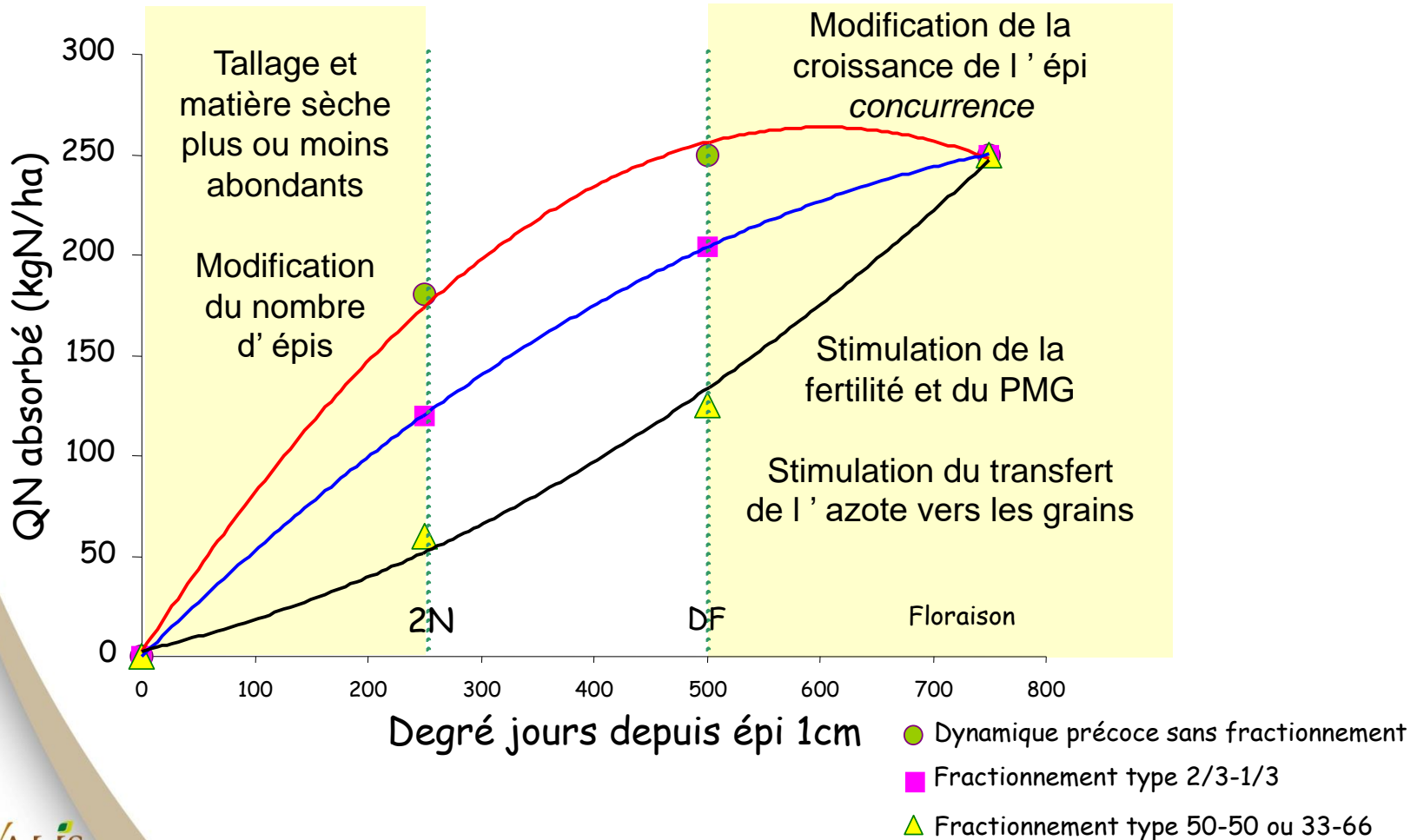


# Fractionnement de l'azote et notion de trajectoire d'absorption azotée

Début  
montaison

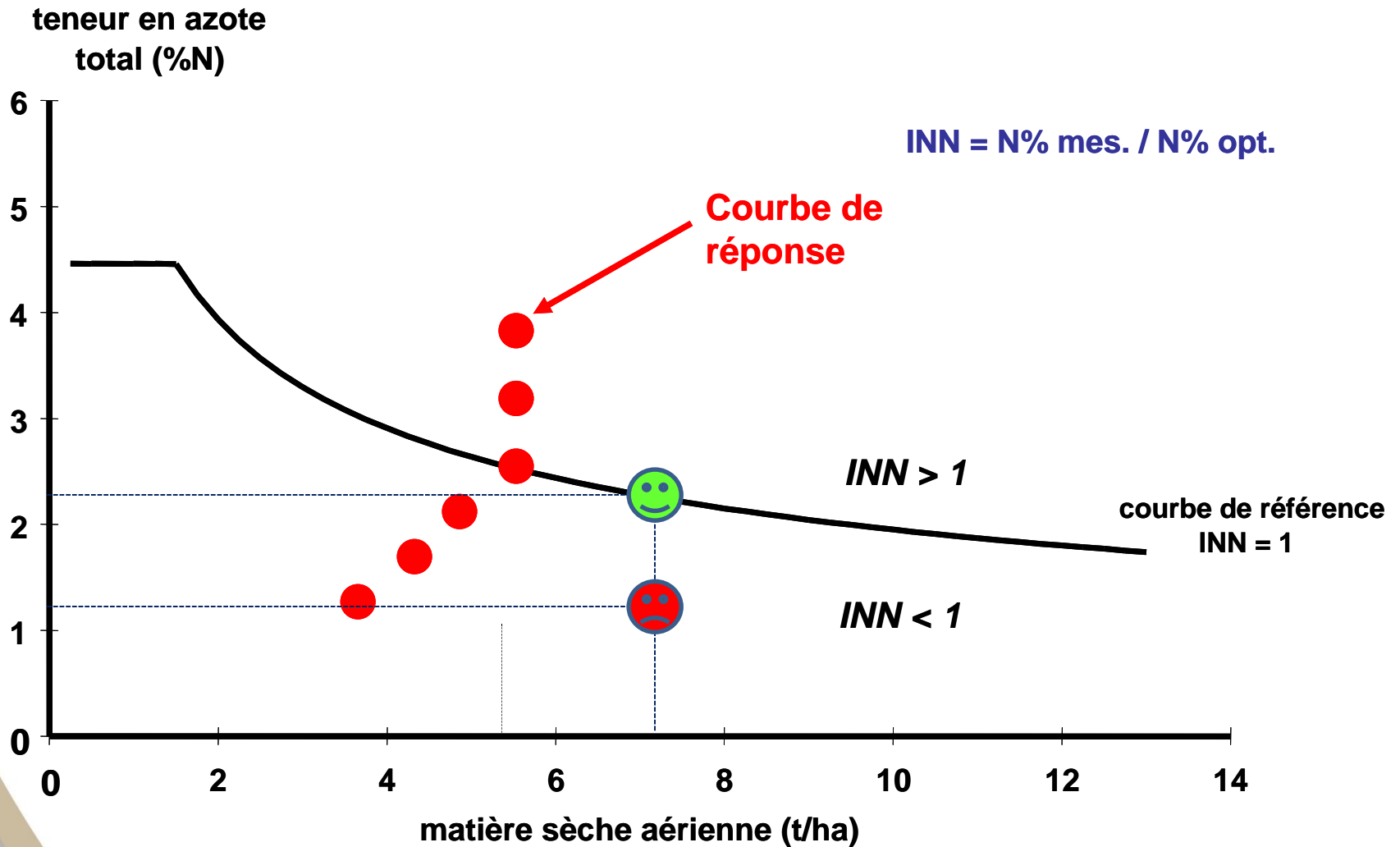
Fin  
montaison

Source : P. Gate, 2007





# Notion d'indice de nutrition azotée (INN)





# Thèse de C. Ravier (2015-2017)

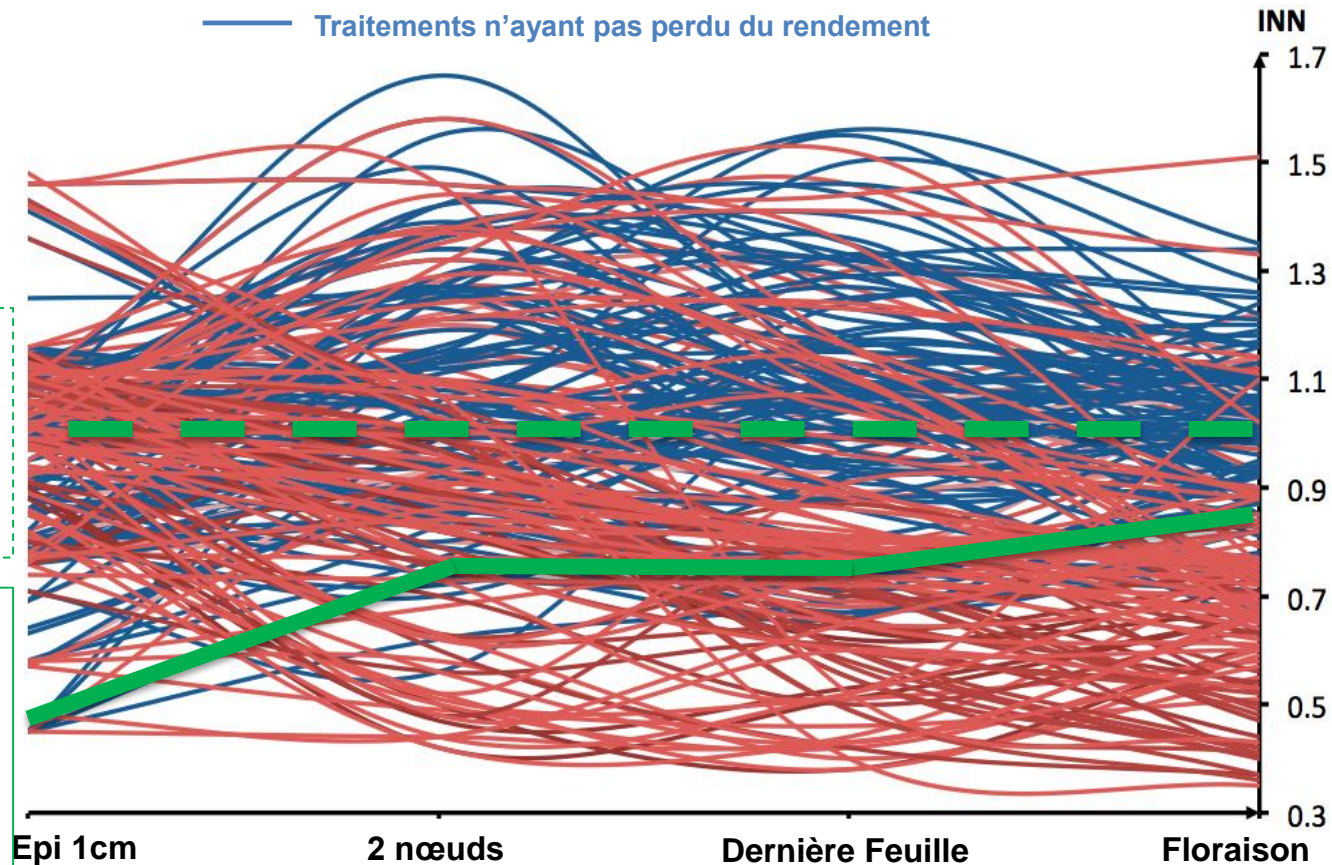
## - mise au point d'une dynamique d'INN mini -



— Traitements ayant perdu du rendement  
— Traitements n'ayant pas perdu du rendement

**Trajectoire « optimum » :**  
tant que l'INN reste au dessus de cette trajectoire, la croissance reste maximum ; c'est la trajectoire visée par la méthode du bilan.

**Trajectoire « minimum » :**  
tant que l'INN reste au dessus de cette trajectoire, on ne perd pas de rendement; c'est la trajectoire en dessous de laquelle la nouvelle méthode s'interdit de passer.



- 209 traitements issus d'essais Azote (5 sites - 9 années)
- Mesures de l'INN à Epi 1cm, 2 nœuds, Dernière feuille, Floraison



# Thèse de C. Ravier (2015-2017)

## - mise au point d'un nouvel outil de pilotage -

Semis    Sortie hiver    Epi 1cm    Deux nœuds    Dernière feuille    Floraison    Récolte



2

Mesure INN

3

Comparaison à la trajectoire d'INN minimum



1



Conditions favorables :

- Conditions météorologiques optimales pour la valorisation des apports
- Pas d'apport dans les 15 jours précédents



Risque de ne pas maintenir l'INN au dessus de la trajectoire jusqu'au prochain jour avec des conditions favorables?

4

**Dose pour maintenir l'INN au dessus de la trajectoire jusqu'au prochain jour avec des conditions favorables**

Oui

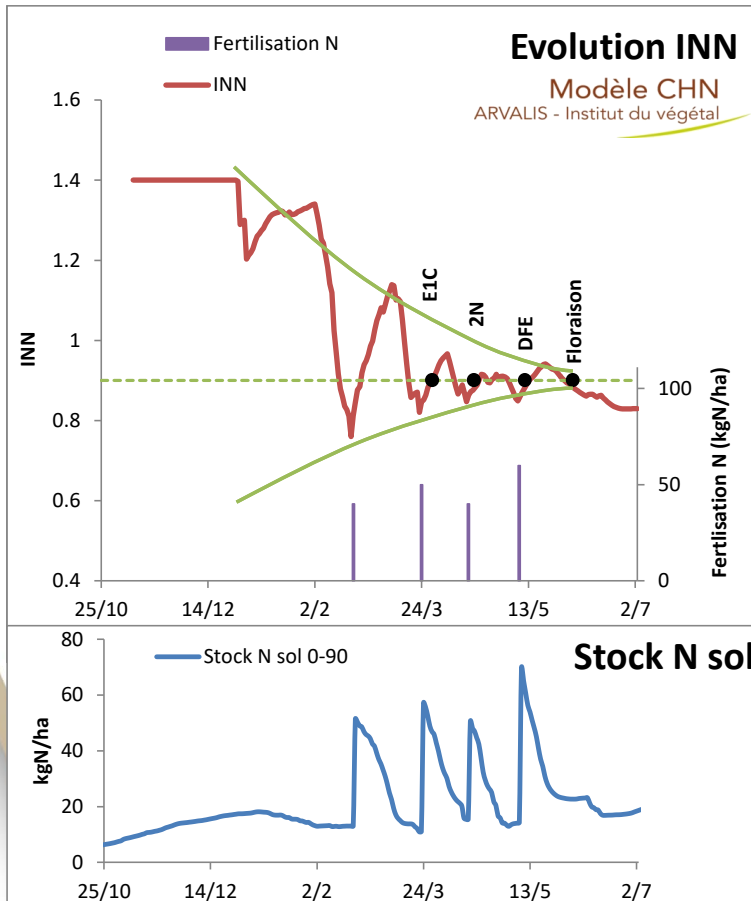
Non

**Pas d'apport**



# Mise au point des règles de décision pour la valorisation de CHN

**Stratégie travaillée** : définir une trajectoire d'INN optimale et déclencher un apport dès que l'on s'en éloigne trop à cause d'un défaut de fourniture du sol (gérer les interactions eau-azote)



1. Viser un INN floraison de 0.9 (est-ce suffisant dans les contextes à très hauts potentiels ? Quid de l'enjeu protéines ?)
2. Se donner des « rendez-vous » réguliers où il faut remonter à l'INN optimal  
-> Ces rdv vont conditionner le fractionnement et permettre de ne pas rentrer en carence azotée trop forte au risque de ne plus pouvoir la rattraper et ainsi de limiter la croissance de la plante
3. Suivre en parallèle les fournitures azotées du sol

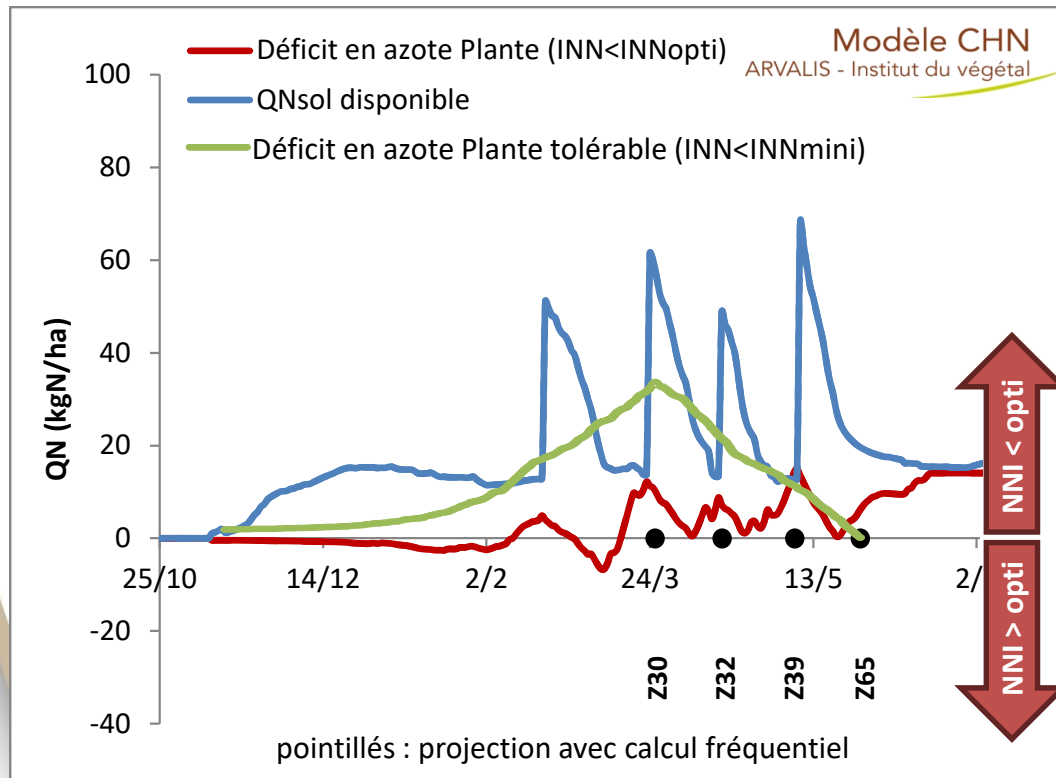


**Représentation de l'INN non utilisable pour calculer une dose -> passer en quantité d'azote (QN)**



# Mise au point des règles de décision pour la valorisation de CHN

Raisonnement en quantité d'azote (QN) pour pouvoir calculer des doses



**Dose à apporter pour atteindre le prochain rdv :**

N1 (tallage) : 40 kg N/ha

N2 (E1C) : 50 kg N/ha

N3 (2N) : 40 kg N/ha

N4 (DFE) : 60 kg N/ha



Ne pas négliger pour autant les conditions d'apport (avant une pluie ...)  
-> fixer des rdv aux périodes maximisant le CAU

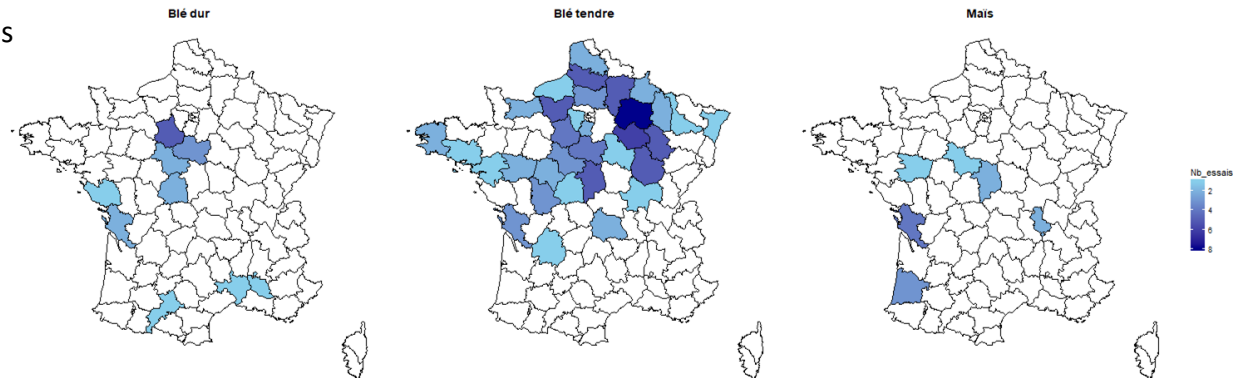


# Un réseau d'essais conséquent

	2015		2016		2017		2018		Total
	Arvalis	Part.	Arvalis	Part.	Arvalis	Part.	Arvalis	Part.	
<b>Blé tendre</b>	0	0	10	0	15	2	13	58	98
<b>Blé dur</b>	0	0	0	0	3	5	3	7	18
<b>Maïs</b>	2	0	3	0	3	0	5	0	13



~30% d'essais invalidés chez les partenaires

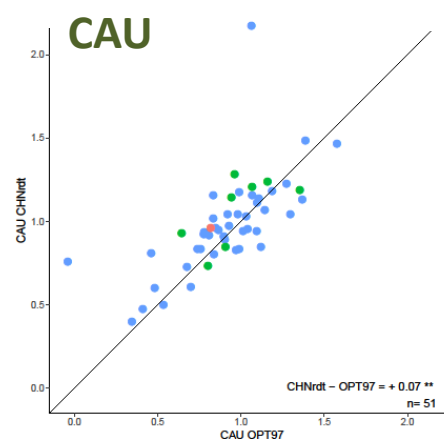
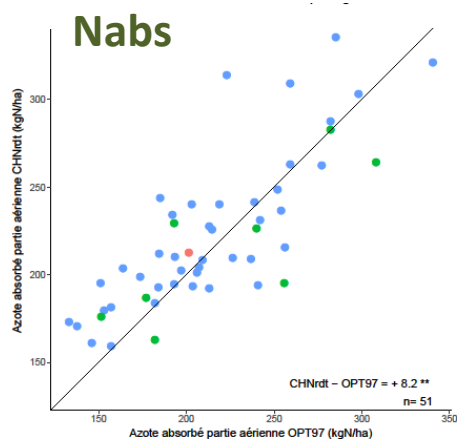
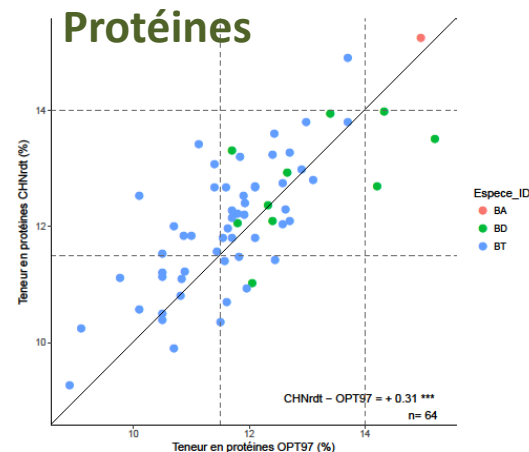
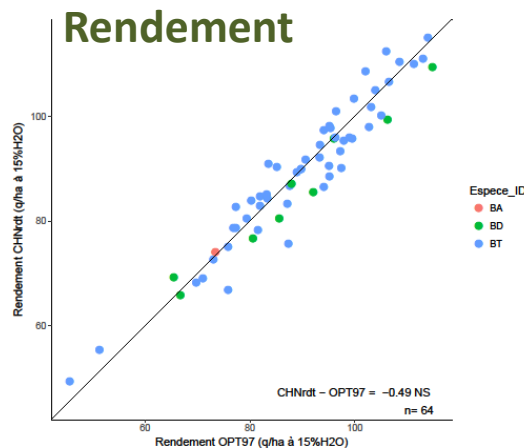
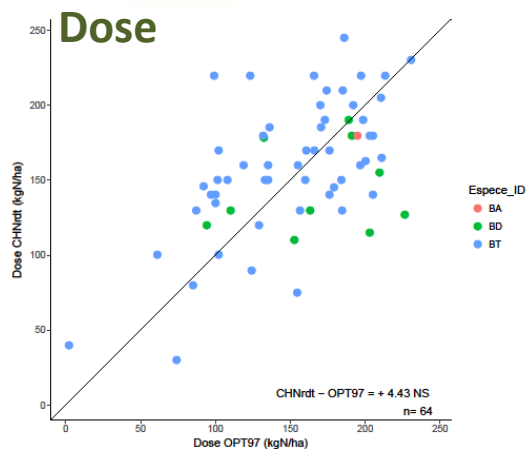


## Un grand nombre de partenaires :

- **Chambres d'agricultures** -> CA02, CA10, CA17, FDGEDA18, CA27, CA28, CA36, CA37, CA41, CA45, CA51, CA52, CA76, CA80, CA89, CA IDF
- **Coopératives/Négoces** -> Acolyance, AGORA, AgroPithiviers, Axereal, Bourgogne du Sud, CAJ, CapSeine, CAVAC, CECAB, CERENA, Coop. de Bonneval, Coop. De Tricherie, Dijon Céréales, EMC2, Epitest, Interface céréales, NORIAP, Seine-Yonne, SCAEL, Soufflet, Ternoveo, Terre Atlantique, UNEAL, ValEpi, Vivescia
- **CETA** -> CETA CB, CETA de Romilly, GRCETA 14, GRCETA 27

# Performances CHN-conduite :

## CHN rendement en comp. l'optimum (97%)



Moyennes %protéines

	BT	BD
Opti97 CRN	11.6	13.0
CHN rdt	11.9	12.8
CHN prot		

Comp. OPT 97%	Nb d'essais (Nabs)	Dose N (kgN/ha)	Rendement (q/ha à 15%H)	Protéines (%)	Nabs (kgN/ha)	CAU (%)
CHN rdt	64 (51)	+ 4.4 NS	-0.5 NS	+ 0.3 ***	+ 8 **	+ 7 **
CHN prot						

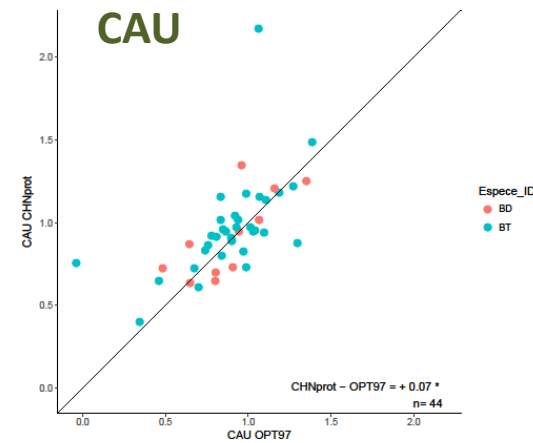
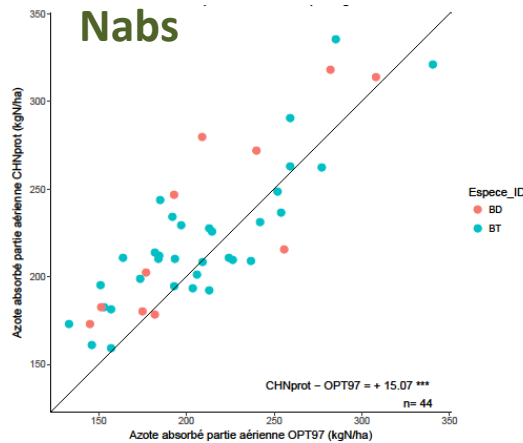
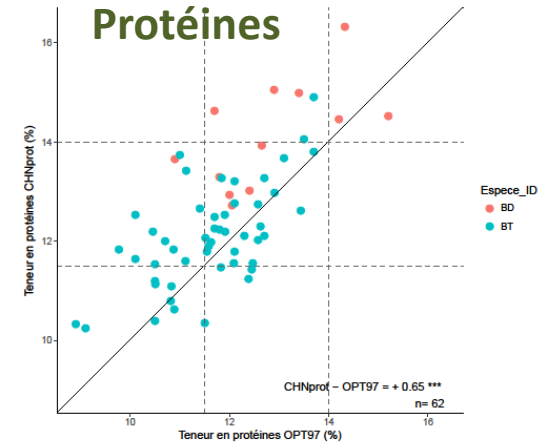
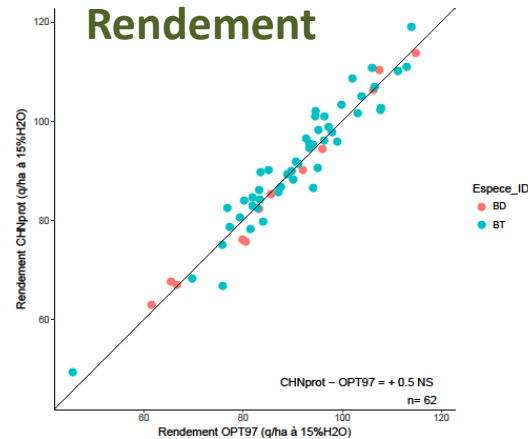
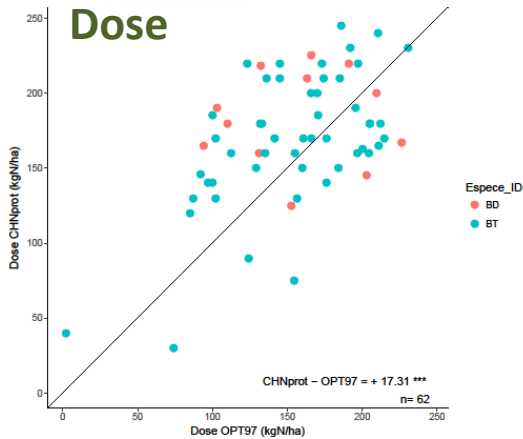
Test statistique en comparaison avec l'optimum CRN :

\*\*\* différence significative à 1%; \*\* à 5%; \* à 10%; NS Différence non significative



# Performances CHN-conduite :

## CHN protéines en comp. l'optimum (97%)



Moyennes %protéines

	BT	BD
Opti97 CRN	11.6	13.0
CHN rdt	11.9	12.8
CHN prot	12.1	14.1

Comp. OPT 97%	Nb d'essais (Nabs)	Dose N (kgN/ha)	Rendement (q/ha à 15%H)	Protéines (%)	Nabs (kgN/ha)	CAU (%)
CHN rdt	64 (51)	+ 4.4 NS	-0.5 NS	+ 0.3 ***	+ 8 **	+ 7 **
CHN prot	62 (44)	+ 17 ***	+ 0.5 NS	+ 0.7 ***	+ 15 ***	+ 7 *

Test statistique en comparaison avec l'optimum CRN :

\*\*\* différence significative à 1%; \*\* à 5%; \* à 10%; NS Différence non significative

# Ce que l'on fait [de mieux] aujourd'hui

Calcul Dose Totale prévisionnelle

Application règles Mise en Réserve bq

Pilotage OAD Fin montaison

Modulation intraparcellaire

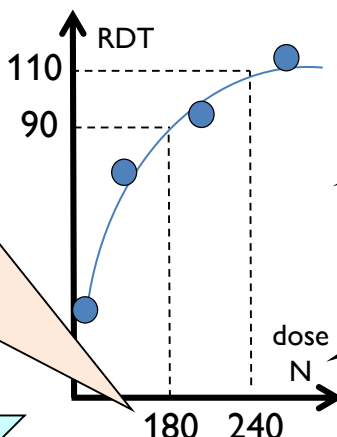
RSH

raisonnement /INN à instant t

## les écueils qui peuvent se présenter

dose N < offre climatique de l'année.

Intérêt++ dans un contexte de dérèglement climatique



pb lié au calcul de l'objectif RDT

levier OAD +/-40kgN/ha insuffisant

pb pilotage « dans le sec » -> prise en compte l'interaction eau-azote dans l'estimation des flux azotés sol- plante lors du pronostic OAD



LAI Cab

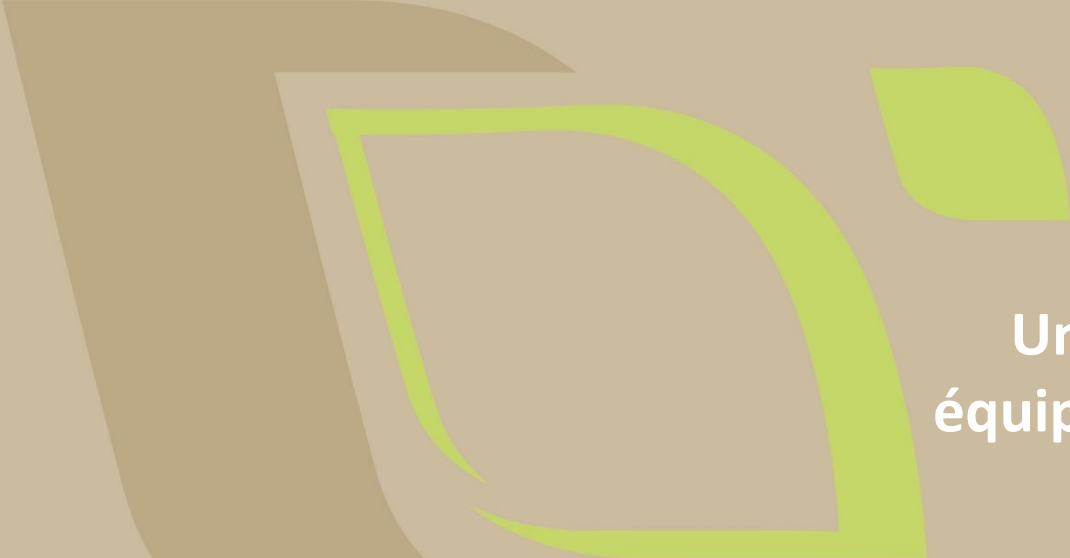
raisonnement /INN en CONTINU et besoins N en VALEUR ABSOLUE

~~Calcul Dose Totale prévisionnelle~~

objectiver l'impasse TALLAGE

valoriser le potentiel de rendement de l'année /offre climatique : intérêt 3 ou 4 apports ? intérêt apport tardif épiaison-flo ?

## ce que l'on pourrait faire demain



Un grand merci à toutes les  
équipes Arvalis et les partenaires  
impliquées

**Merci de votre attention**

**Des questions ?**

**ARVALIS**  
Institut du végétal

