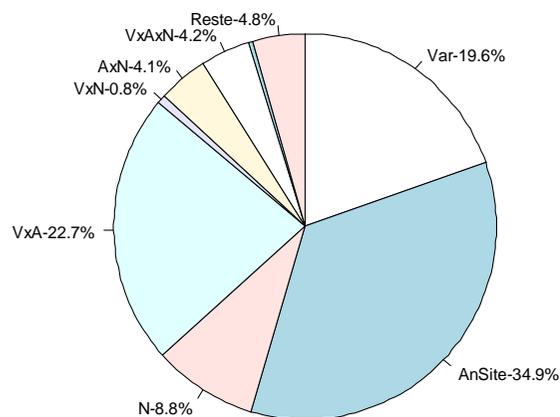




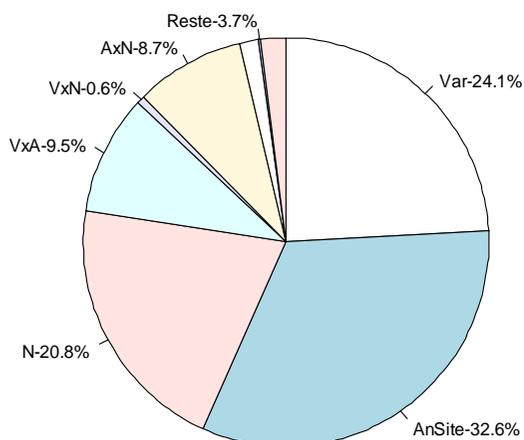
# Apports de la génétique pour l'augmentation de la teneur en protéines des céréales

# Interactions Génotype x Milieu x Agronomie dans plusieurs dispositifs d'essais variétés

Rendement



Concentration en protéines



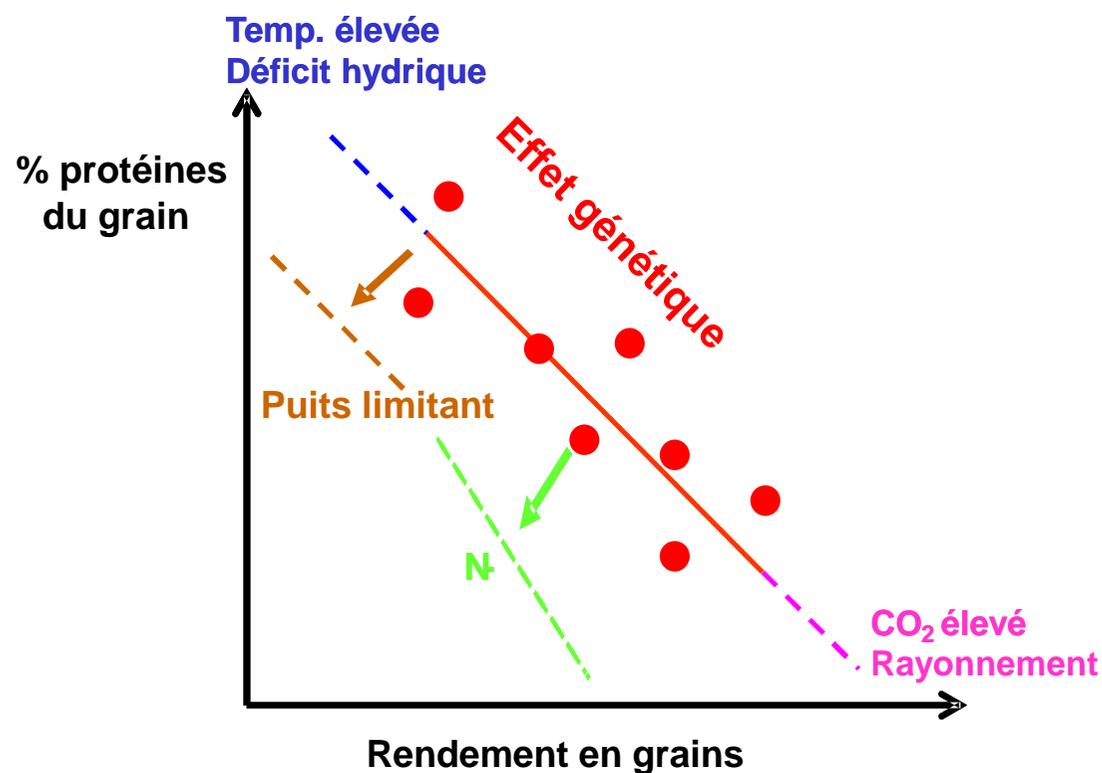
Types d'essais	Rendement			% protéines		
	Variété	Env	VxE	Variété	Env	VxE
INRA-T	12%	73%	10%	29%	50%	14%
INRA-NT	15%	68%	12%	27%	51%	15%
CTPS-T-Nord	15%	68%	2%	21%	62%	2%
Arvalis-T-Nord	8%	69%	12%	14%	62%	11%
Arvalis-T-Centre	12%	69%	8%	19%	58%	9%
Arvalis-T-Sud	10%	67%	12%	15%	62%	10%
ANR-T (*)	18%	70%	10%	17%	74%	7%
FSOV-T (**)	20%	48%	28%	24%	62%	12%
<b>Moy.</b>	<b>14%</b>	<b>67%</b>	<b>12%</b>	<b>21%</b>	<b>60%</b>	<b>10%</b>

T : protégé contre maladies, NT : non traité  
 (\*) ANR ProtNblé, Biogemma-INRA-Arvalis-Limagrain  
 (\*\*) FSOV Azote, INRA-Arvalis-CETAC-Limagrain

(Colloque blé tendre : Produire des protéines pour tous les débouchés, Arvalis, 2014, Paris)

# Effets des facteurs environnementaux

La concentration en protéines ne s'analyse pas indépendamment du rendement et des conditions de croissance



(Triboï et al 2006)

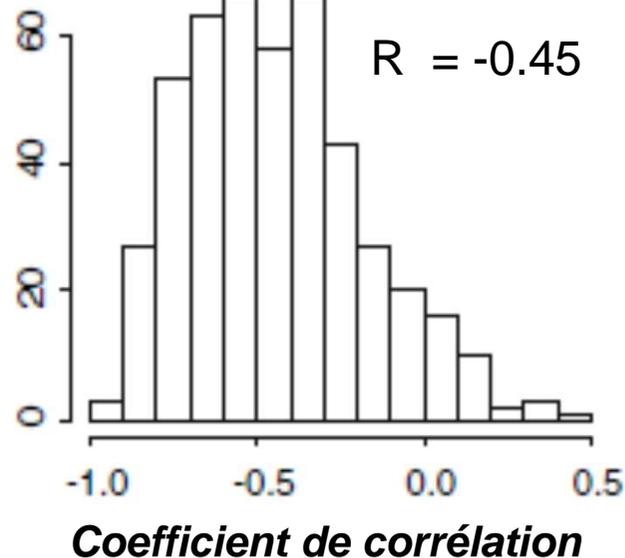
**Facteurs favorisant l'assimilation du carbone → baisse de % protéines**

**Facteurs limitant l'assimilation du carbone → augmentation de % protéines**

**Effet de la structure du couvert  
Carence en azote**

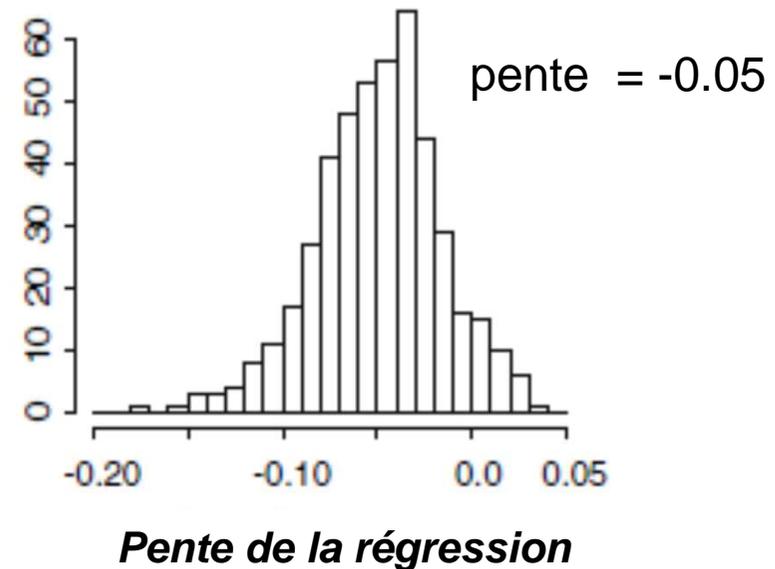
# Variabilité de la relation négative

*Relation calculée pour 458 environnements*



*Sur moyennes:  $R^2 \sim 0.5$*

*50% de la variabilité de %protéine expliquée par le rendement*

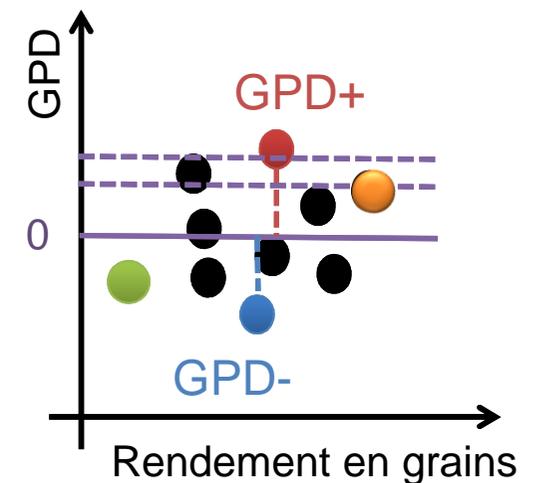
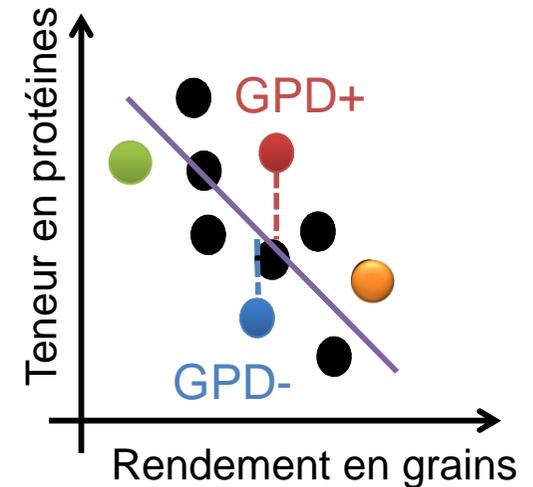


*Sur moyennes: pente = -0.1*

*Augmentation du rendement de 10 q/ha se traduit par -1% protéines*

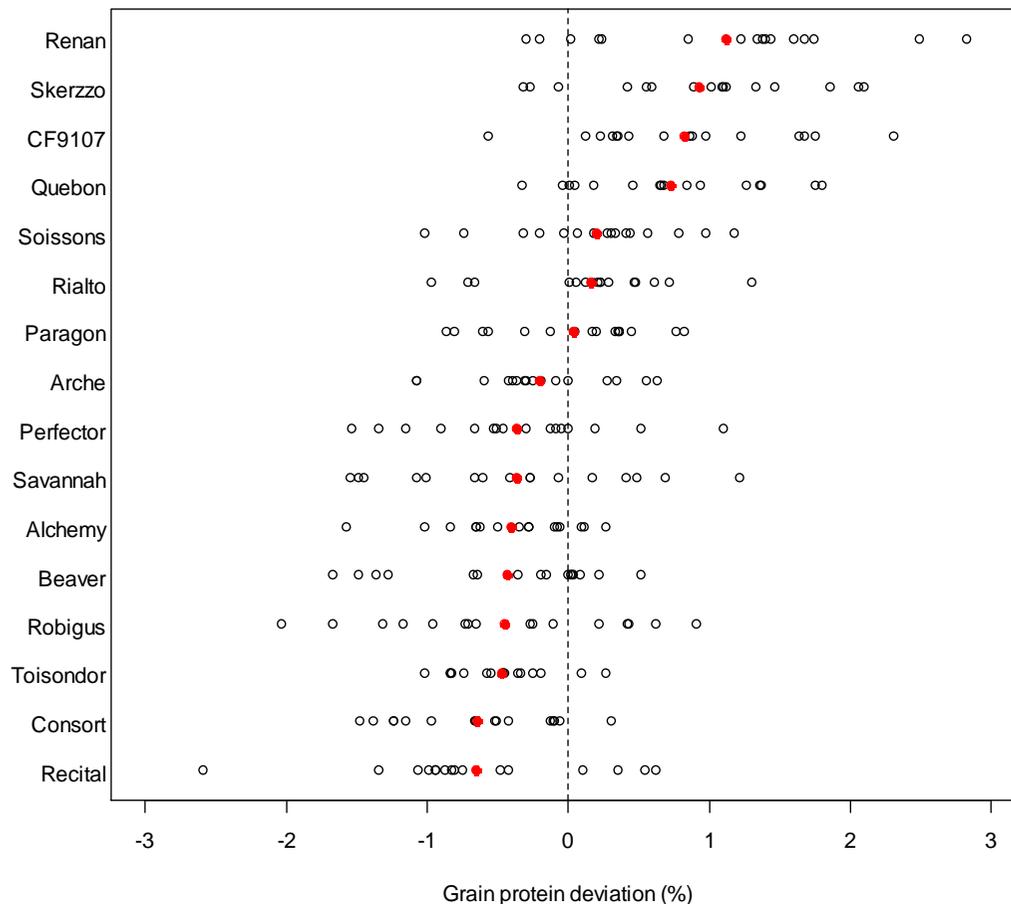
# La notion de GPD

- GPD: « **Grain protein deviation** »  
(Monaghan *et al.* 2001)
- GPD = **écart à la droite de régression** (positif ou négatif)
- Mesure relative qui nécessite des **expérimentations multi-locales et pluriannuelles**  
(5 lieux \* 2 années)  
(Oury et Godin 2007)



# Composante génétique du GPD

Relation calculée pour 27 environnements



**Gamme de variation**

**Max : -2% à +2%**

**En moyenne : -1% à +1%**

**Variétés qui sont  
« systématiquement »  
GPD- ou GPD+**

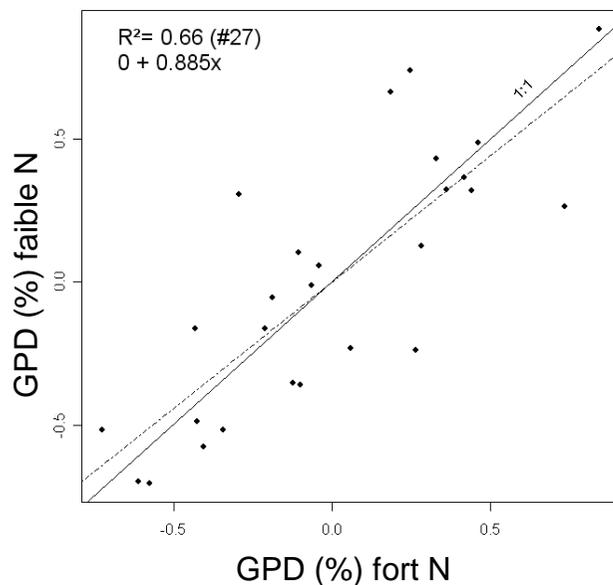
**Récital: GPD-**

**Renan: GPD+**

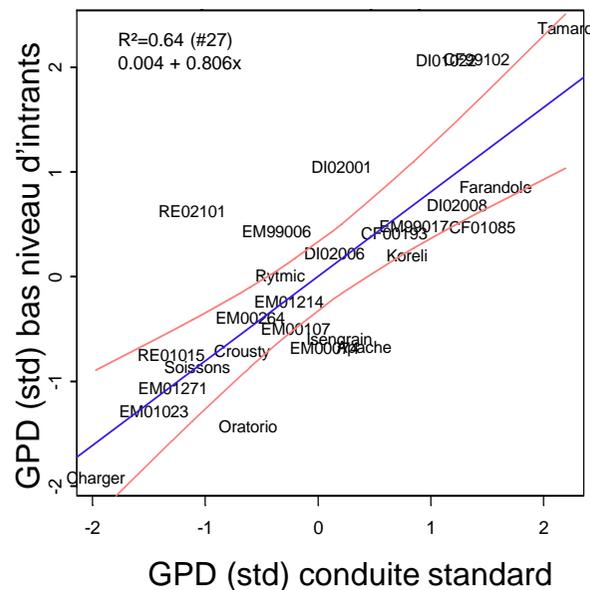
**Des faibles quantités  
d'azote en jeu  
~25 kg N / ha de différence  
entre extrêmes**

(FSOV Azote, INRA-Arvalis-CETAC)

# Stabilité du GPD entre conduites

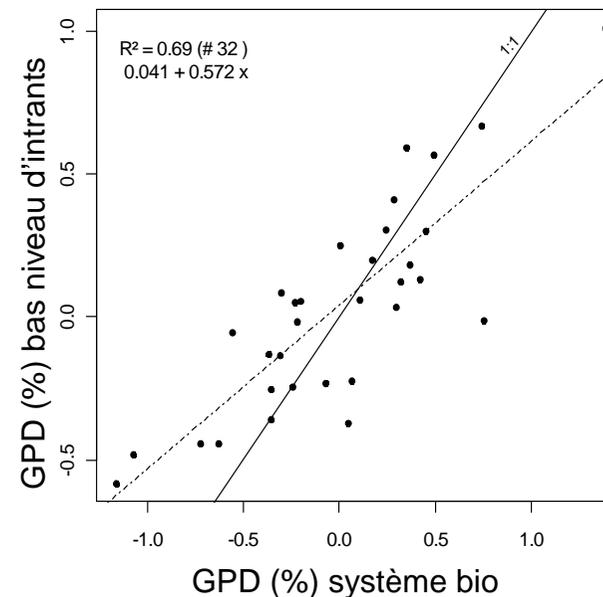


*Effet azote*  
(Bogard et al 2010)



*Effet conduite de culture*

(Oury et al)



*Effet système de culture*

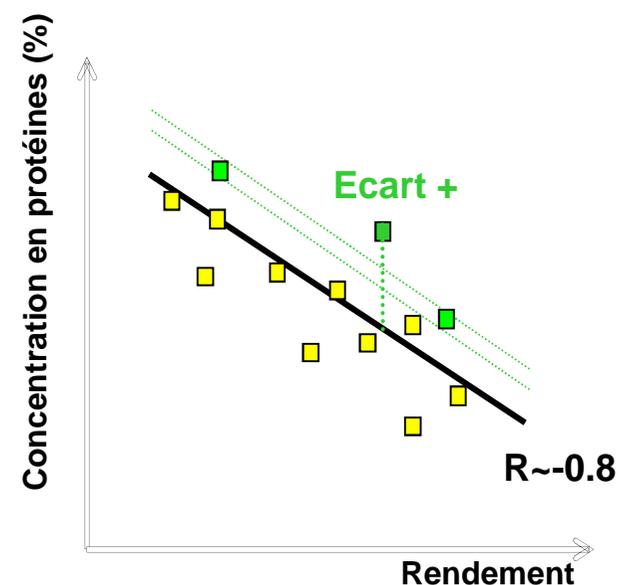
(Rolland et al)

# Evolution de la prise en compte des protéines dans les règles d'inscription par le CTPS

- **Implicitement classes technologiques**
  - % protéines appartient aux critères de qualité technologique
  - 1993 : décision de nouvelle classification techno (A,B,C,D en A, BPS, BP, BB, BAU) et nouveaux seuils de cotation,
  - Instauration des BAF
- **Bonus GPD depuis les inscriptions 2007 :**
  - 2005: décision d'introduction Prot/Rdt

**Bonification des variétés s'écartant significativement et positivement de cette relation négative**

- **bonus 1 point si écart > 0.5%**
- **bonus 2 points si écart > 0.7%**



(Règlements techniques, GEVES)

# Inscription de variétés bonifiées

Depuis 2007, **26 inscriptions avec bonus GPD**

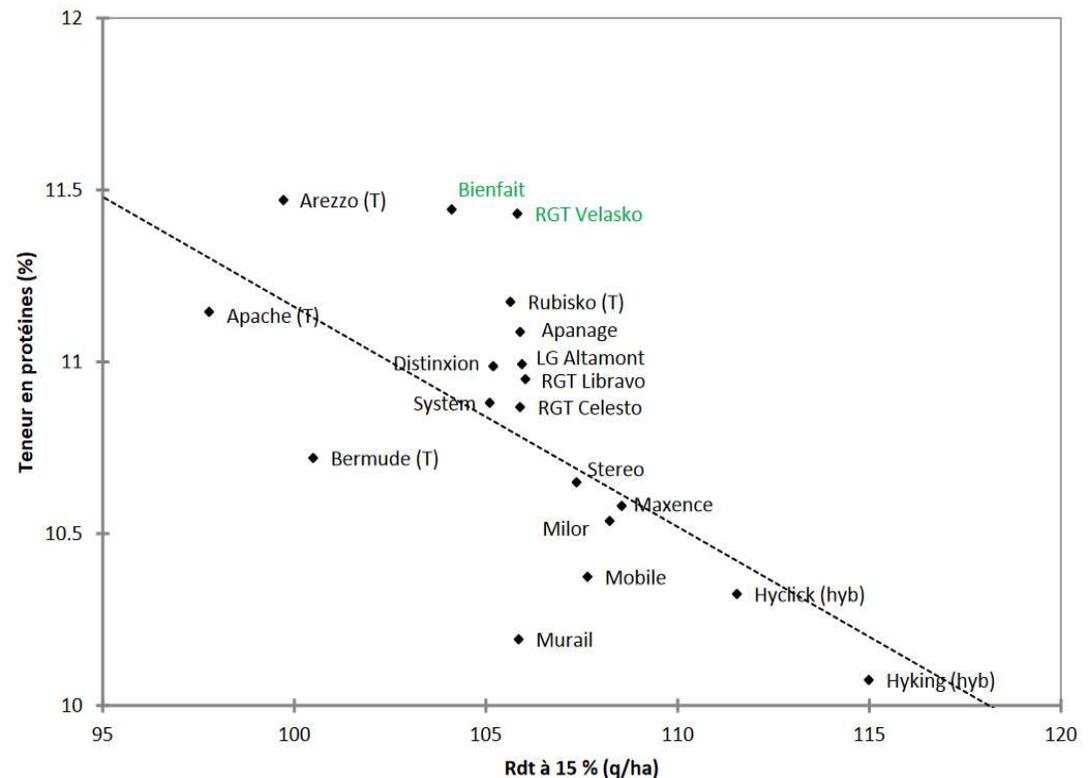
- 8 simple bonus
- 18 double bonus
- 13 zone Nord
- 14 zone Sud

## Inscription 2016

N: Bienfait (+), RGT Velasko (++)

S: Centurion (+), Papillon (+), Izalco CS (++)

CTPS Nord 2014-2015

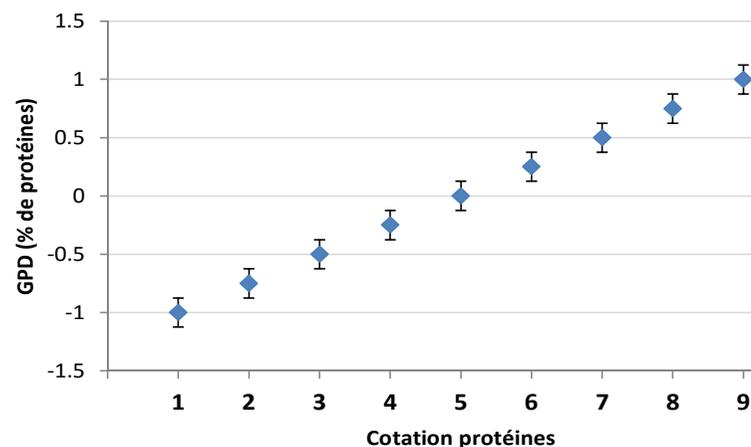


GEVES – Céréales à paille - Nouvelles Variétés proposées à l'inscription sur la Liste A du Catalogue Officiel Français

n°57 – Octobre 2015

# Cotation du GPD sur les variétés inscrites

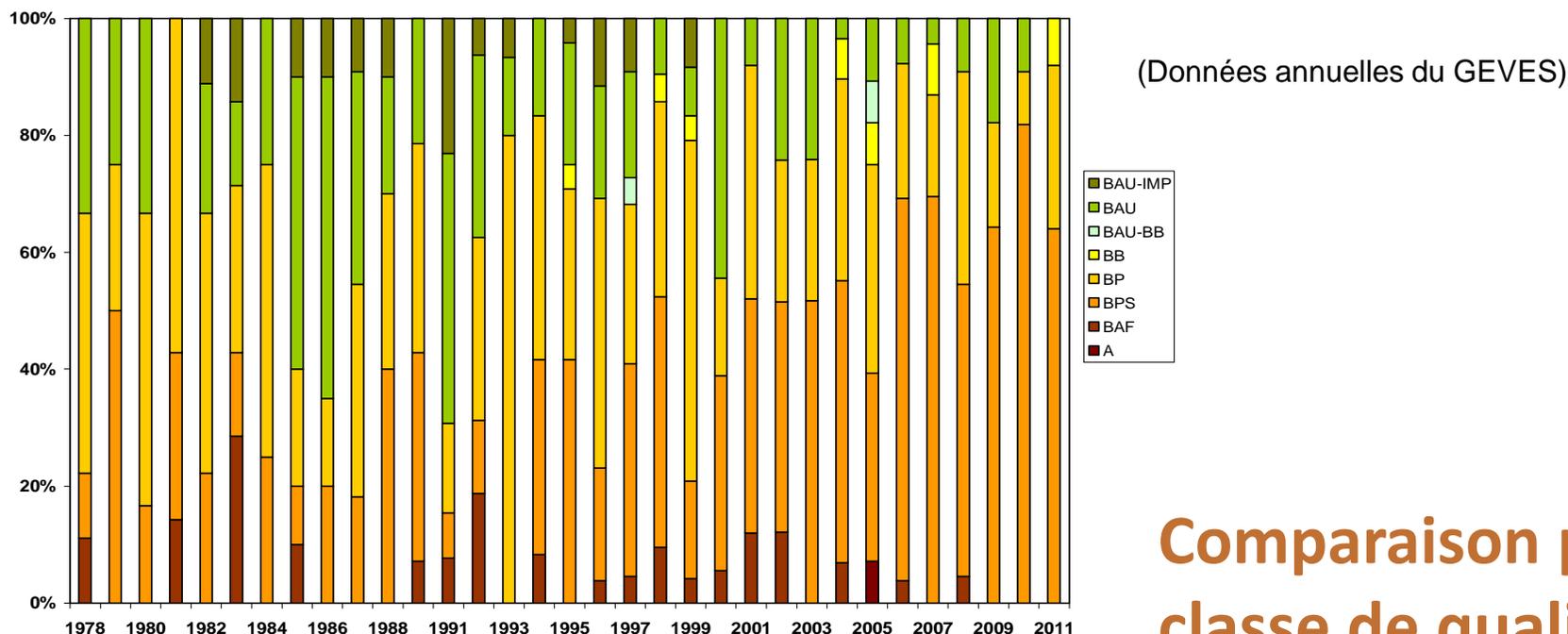
- Transformation de la GPD en cotation de 1 à 9 diffusée dans les catalogues



Variétés inscrites en 2016

Nom	Représentant	Année d'inscription	Aristation (b=barbu / nb=non barbu)	CARACTÉRISTIQUES PHYSIologiques				RÉSISTANCES AUX MALADIES										QUALITE TECHNOLOGIQUE					ANMF		
				Alternativité	Précocité épiaison	Hauteur	Verse	Piétin verse	Oidium*	Rouille jaune*	Septoriose tritici	Rouille brune*	Fusariose (f. gramineum)	Nuisibilité globale des maladies Nord (septoriose dominante) (1)	Nuisibilité globale des maladies Sud (septoriose et rouille brune dominantes) (1)	Complexe Mosaïques	Cécidiomyces Orange	Chloroturon	PS	Protéines (2)	Durété	W à 11% de protéines (14% pour les BAF)		P/L à 11% de protéines (14% pour les BAF)	Classe qualité (3)
APANAGE	Florimond Desprez	2016	b	4	7	3,5	7	3	(5)	7	7,5	4	3,5	(7)				S	(5)	6	m-h	160-215	0,7-2,6	BP	
BIENFAIT	Florimond Desprez	2016	b	3	6,5	3	7	4	(7)	7	5,5	5	4	(6)				S	(5)	7	m-h	155-215	0,6-1,9	BPS	VOp
CENTURION	Saaten Union	2016	b	3	7,5	4	5	3		7	5	7	4,5					(6)	7	m-h	175-230	1,2-2,2	BPS		
COMILFO	Lemaire Deffontaines	2016	b	3	7	3,5	6	3	(6)	6	5,5	6	5					S	(6)	4	m-h	145-200	1,2-1,6	BPS	
COMPLICE	Florimond Desprez	2016	b	3	7	4	7	3		6	6	5	5					T	(6)	5	m-h	140-190	1,0-1,9	BPS	
DISTINXION	Saaten Union	2016	b	3	6,5	3,5	6,5	4	(7)	7	6,5	4	4,5	(6)				T	(6)	5	m-h	145-200	1,2-2,2	BP	
HYBELLO (h)	Saaten Union	2016	nb	5	7,5	4	4	3		8	6	6	5,5					(5)	5	m-h	160-215	0,8-1,7	BPS	VOp	

# Augmentation des inscriptions en BPS et BP



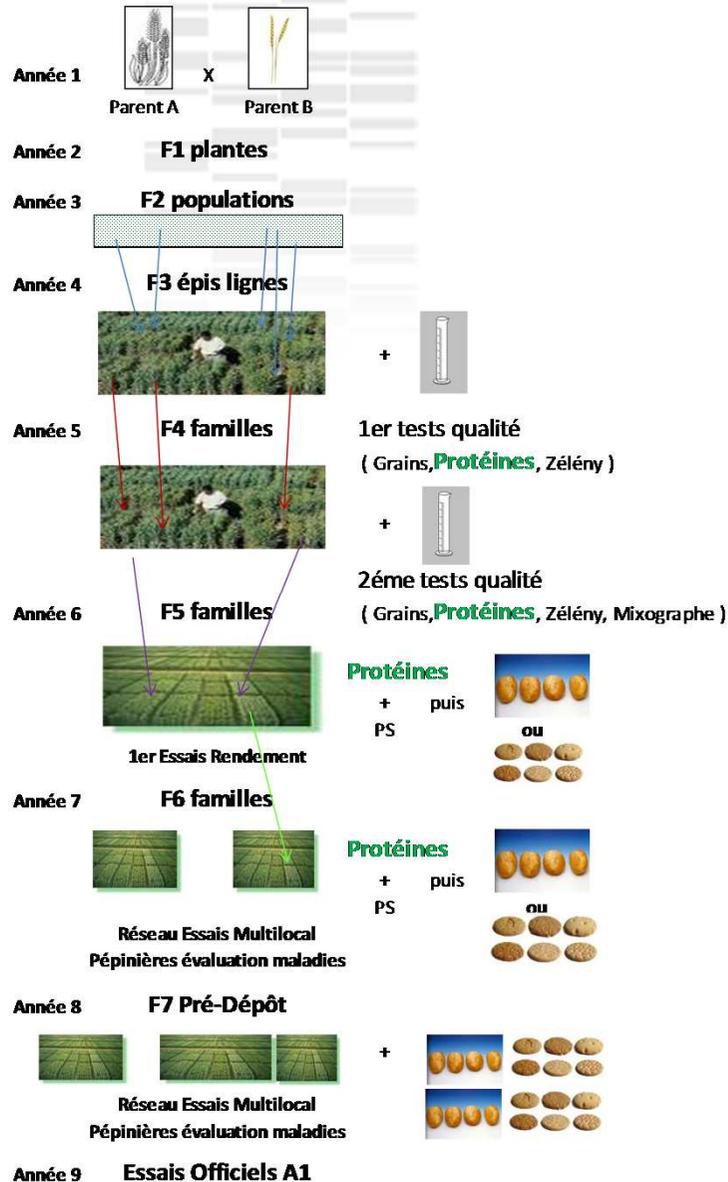
## Comparaison par classe de qualité

Essais NUE et progrès génétique

Source : Cormier et al 2013

Classe qualité	Nb	% Protéines
BAF	12	12.11 a
BPS	104	9.95 b
BP	50	9.81 b
BB	7	9.79 b
BAU	7	9.20 c

# Exemple d'un schéma de sélection



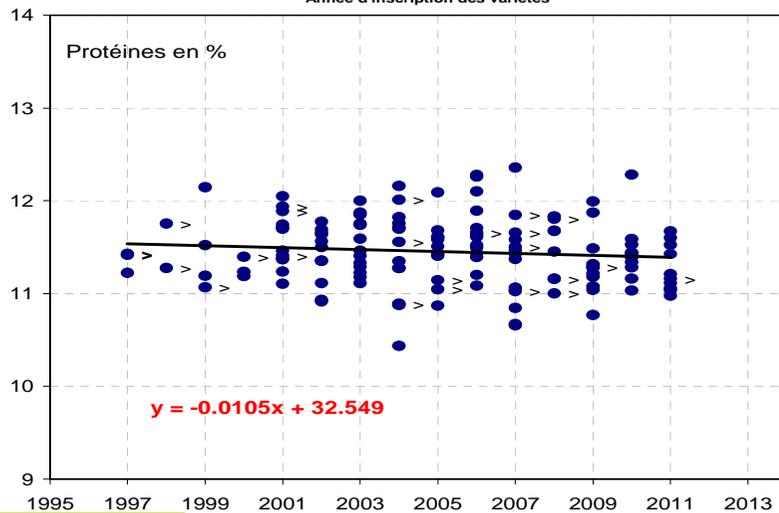
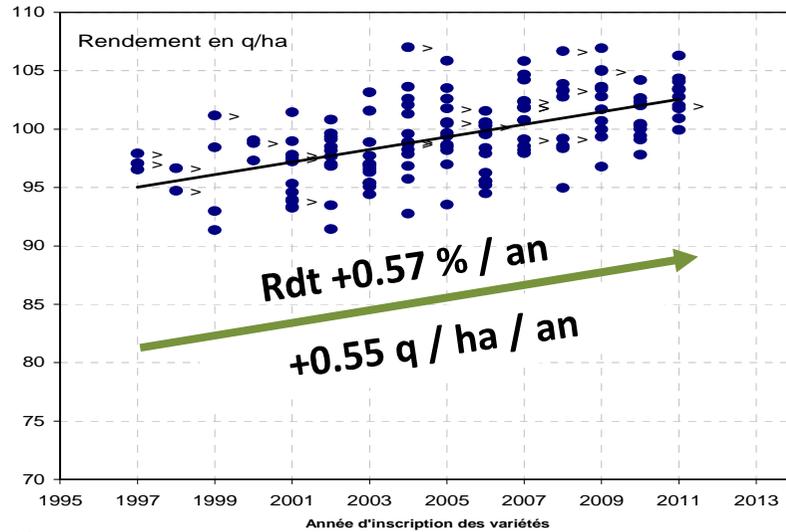
La qualité est prise en compte dès les premiers stades de sélection

A partir d'un échantillon de 20g de grains un premier tri est fait sur :  
PMG et PS  
% Protéines et Dureté (mesures SPIR)

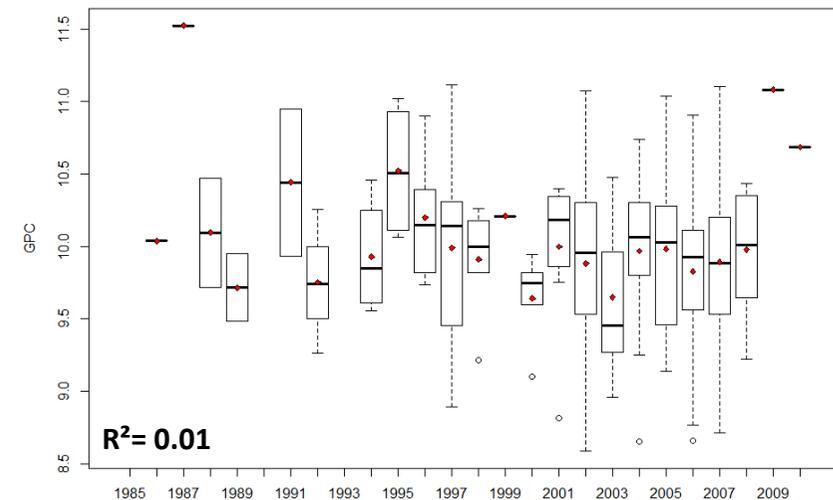
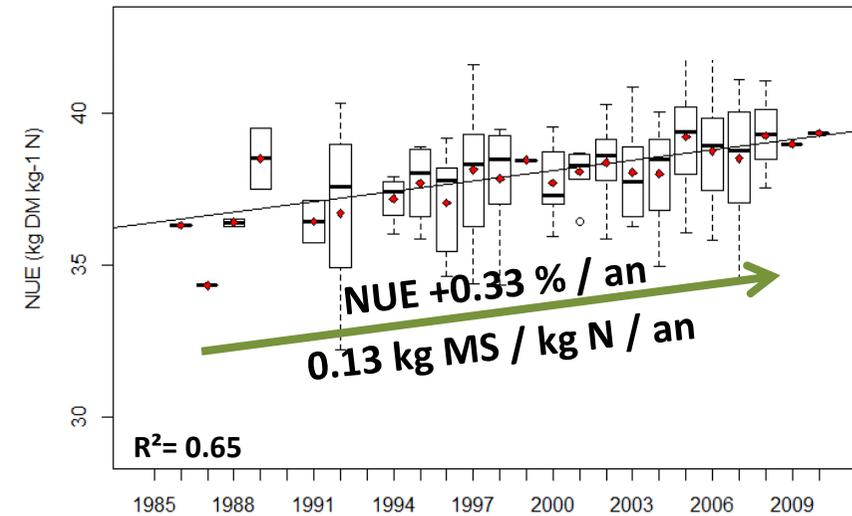
(UFS Colloque blé tendre : Produire des protéines pour tous les débouchés, Arvalis, 2014, Paris)

# Estimations du progrès génétique

ARVALIS, essais Post-Inscription 1997-2012, liste Nord



Essais projet ProNblé  
Cormier et al (2013) : 1985-2010



# Estimations du progrès génétique

Progrès génétique	Condition	Rendement en q/ha/an	Protéines en %/an
225 variétés européennes (1985-2010) comparées dans essais du projet ANR ProtNblé Cormier et al (2013)	Fort N	+0.35	-0.0200
	Faible N	+0.26	-0.0100
Ajustements sur données post-Inscription ARVALIS 1997-2012 (fertilisation raisonnée)	Liste Nord	+0.55	-0.0105
	Liste Centre	+0.30	-0.0001
	Liste Sud	+0.38	-0.0007

Alors que mécaniquement l'augmentation de RDT aurait dû entraîner une baisse de % protéines, on ne le constate pas

Effets du progrès de NUE et NHI → maintien de % protéines bien qu'augmentation de rendement

(Colloque blé tendre : Produire des protéines pour tous les débouchés, Arvalis, 2014, Paris)

# Les bases physiologiques du GPD

- **Variété à GPD positif** = variété qui, au regard de son niveau de rendement, accumule davantage de protéines dans ses grains que la moyenne de la série

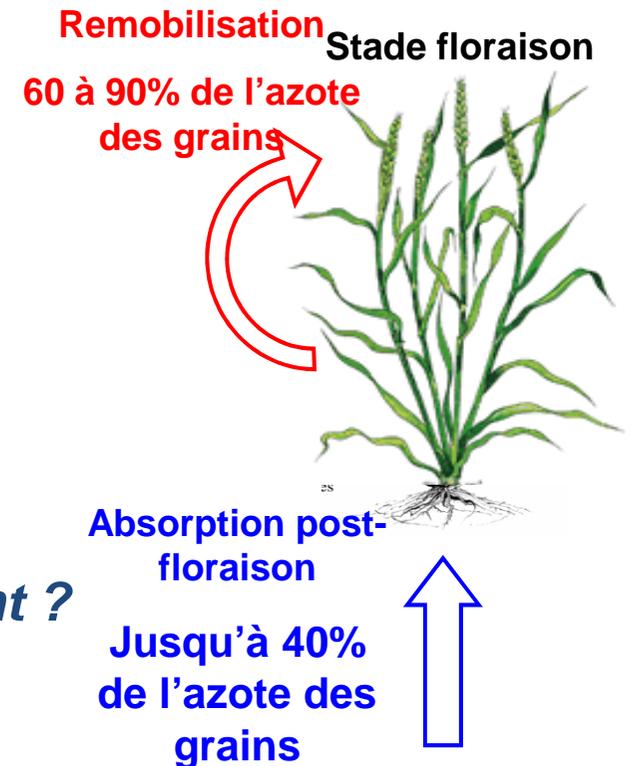
- Meilleures capacités de **remobilisation de l'azote**?

- Sénescence
- Translocation de l'azote

- Meilleures capacités d'**absorption de l'azote**?

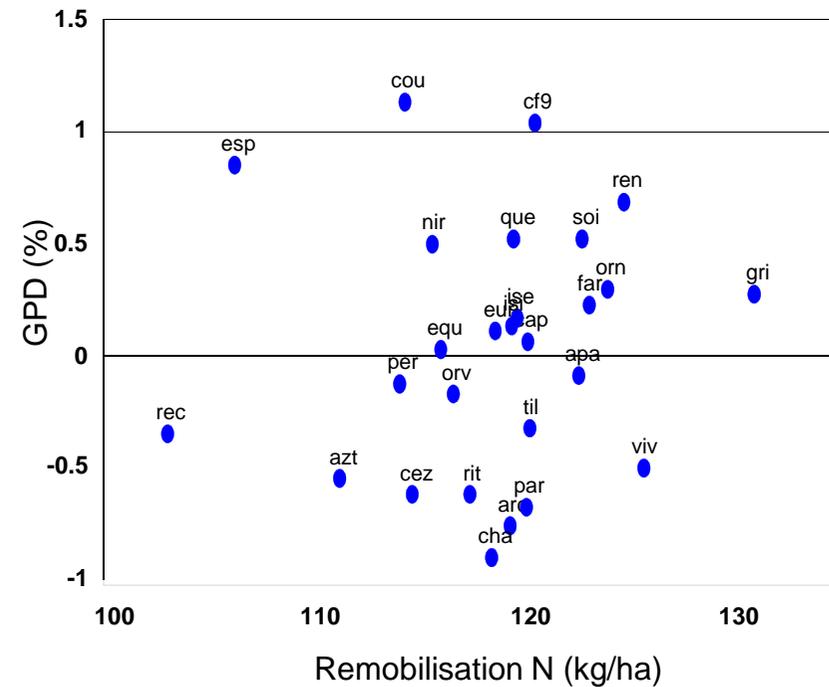
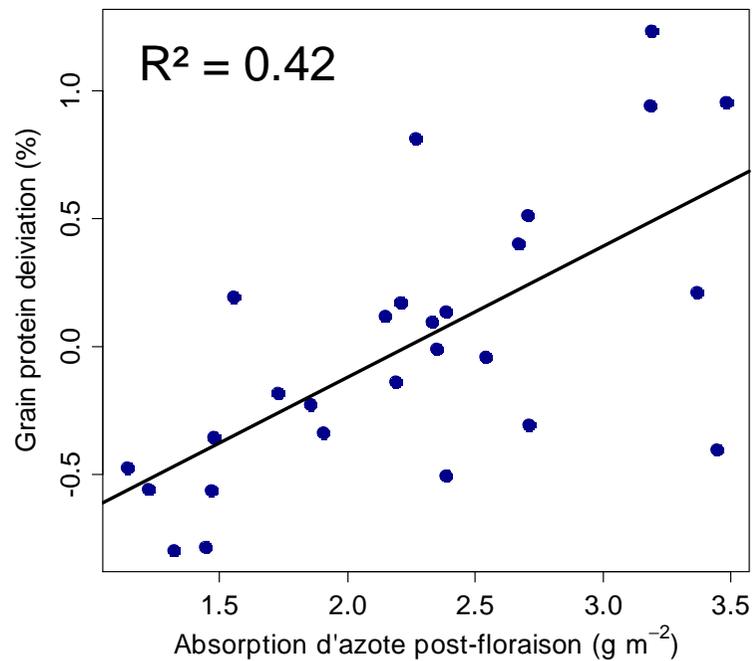
- Architecture racinaire
- Régulation de l'absorption

*Quel flux d'azote est le plus déterminant ?*



# Les bases physiologiques du GPD

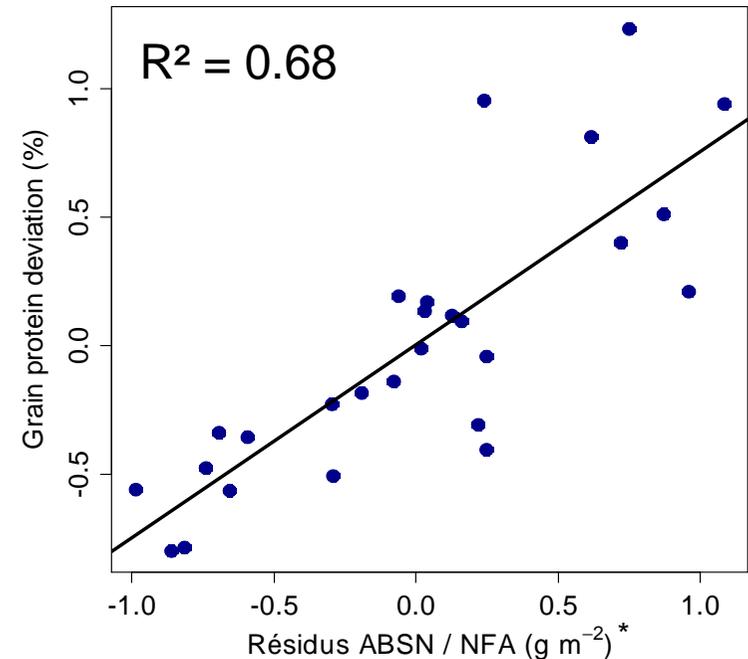
- l'absorption d'azote post-floraison explique ~50% du GPD



Bogard *et al.*, 2010

# Les bases physiologiques du GPD

- Les différences de précocité ont un impact sur la répartition de l'azote absorbé entre les phases pré et post-floraison
- La quantité d'azote absorbé après floraison par Kg d'azote absorbé avant floraison explique le GPD (43 à 84% selon les environnements)
- *Différences de régulation de la satiété en azote?*



Bogard *et al.*, 2010

\* Résidus statistiques de la relation ABSN – NFA où  
ABSN = Quantité d'azote absorbée après floraison  
NFA = Quantité d'azote absorbée à floraison

# Régulation de l'absorption par la satiété pour l'azote :

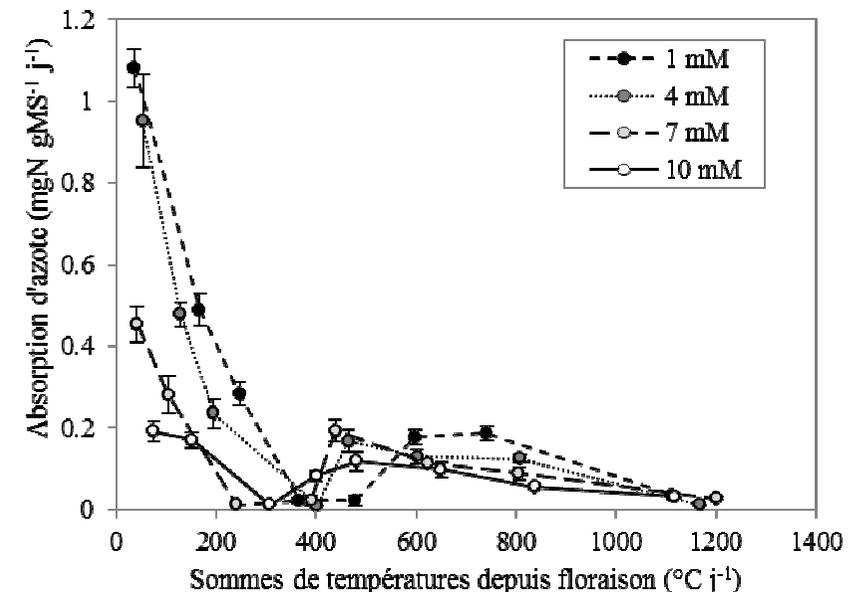
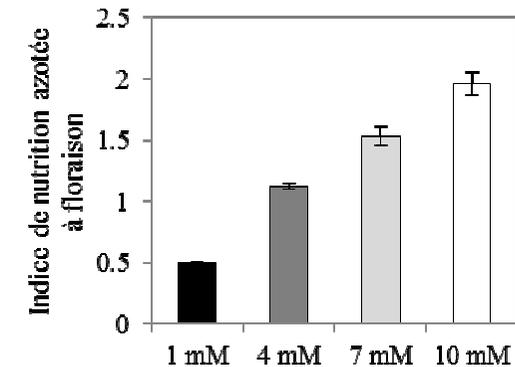
Effet du statut azoté à floraison sur l'absorption d'azote post-floraison

## Etude du cv. Récital en conditions contrôlées :

- 4 modalités azotées en pré-floraison
- Azote non-limitant en post-floraison
- => Effet du statut azoté à floraison sur l'absorption post-floraison?

Le statut azoté à floraison influence la capacité des plantes à absorber de l'azote au cours de la phase post-floraison « précoce »

*Quels sont les mécanismes de régulation de cette absorption?*



# Régulation de l'absorption par la satiété pour l'azote :

Effet du statut azoté à floraison sur l'absorption d'azote post-floraison

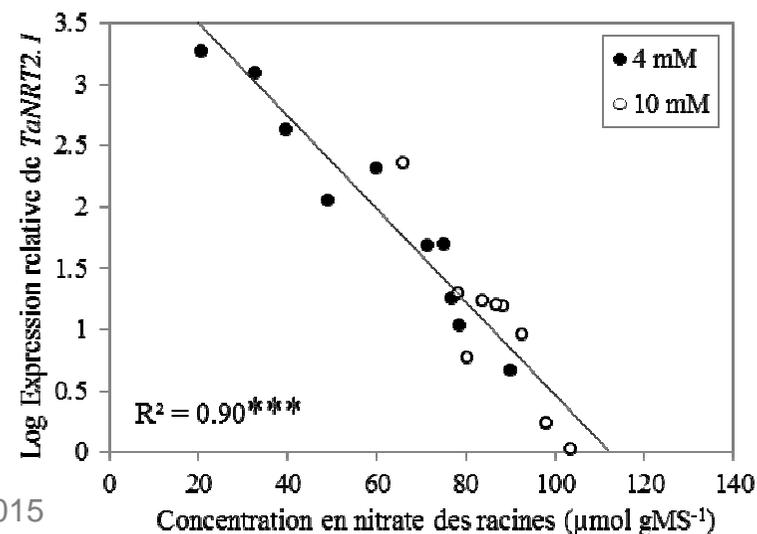
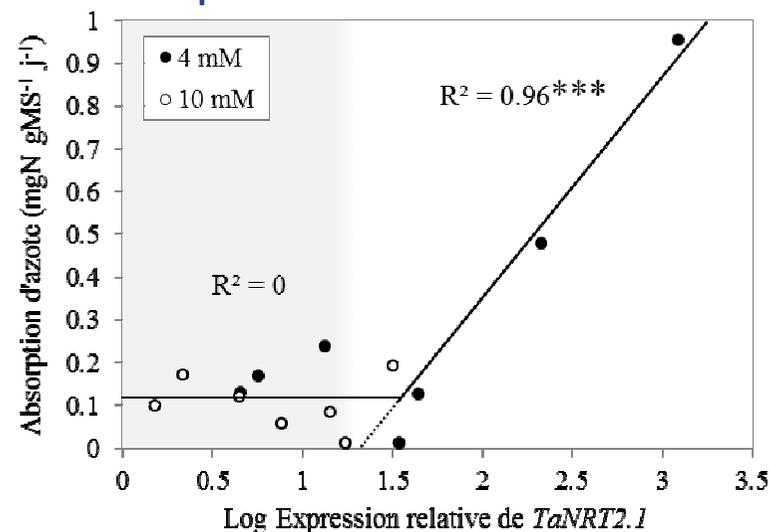
**Expression du gène *TaNRT2.1* codant pour un transporteur racinaire de nitrate à haute affinité:**

- Explique une grande part de l'absorption d'azote lorsque celle-ci est soutenue

**=> Acteur majeur de l'absorption d'azote post-floraison précoce?**

- Négativement corrélée à la concentration en nitrate des racines en phase post-floraison précoce

**Concentration en nitrate des racines :  
marqueur de satiété pour l'azote?**



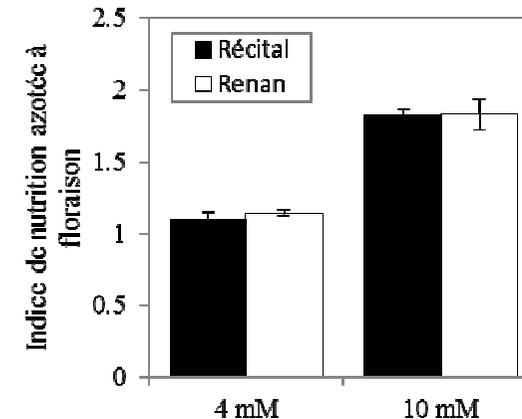
Adapté de Taulemesse *et al.*, 2015

# Variabilité génétique de GPD et satiété pour l'azote

Comparaison des cvs. Récital (GPD-) et Renan (GPD+) en conditions contrôlées :

- 2 modalités azotées contrastées en pré-floraison (4 mM vs 10 mM)

=> Les statuts azotés à floraison de Récital et Renan sont comparables en 4 mM et en 10 mM



Adapté de Taulemesse *et al.*, 2016

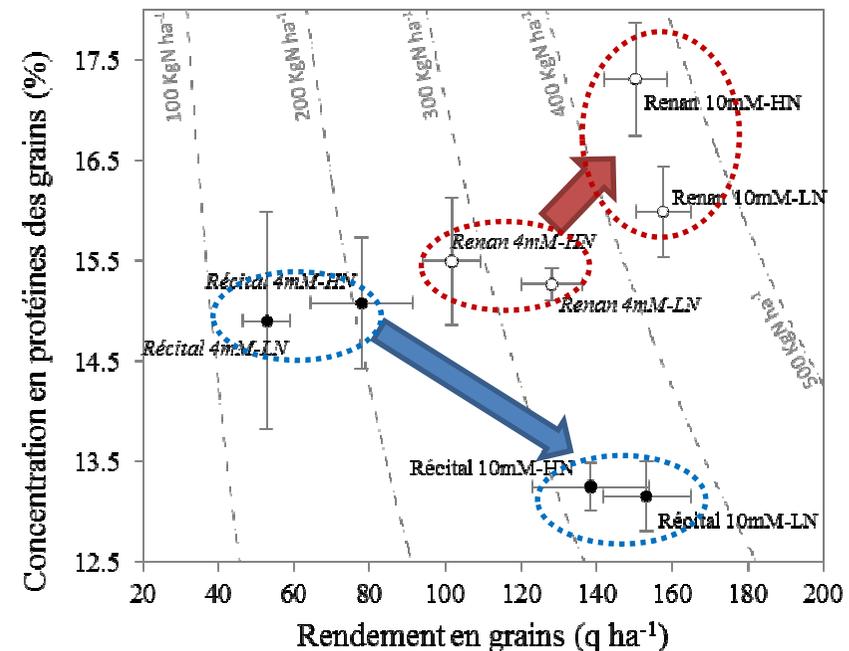
- 2 modalités azotées contrastées en post-floraison (LN vs HN)

=> Effet du statut azoté à floraison et de la disponibilité de l'azote après floraison sur l'absorption post-floraison?

# Variabilité génétique de GPD et satiété pour l'azote

## Rendement et concentration en protéines à maturité

- Peu d'effet de la modalité post-floraison
- Effet de l'azote pré-floraison sur le rendement et la concentration en protéines
- Réponses contrastées à l'azote pré-floraison pour la concentration en protéines



Adapté de Taulemesse *et al.*, 2016

**Comment expliquer ces différences de concentration en protéines ?**

# Variabilité génétique de GPD et satiété pour l'azote

## Absorption d'azote post-floraison précoce :

Explique la concentration en protéines des grains indépendamment du rendement (81%)

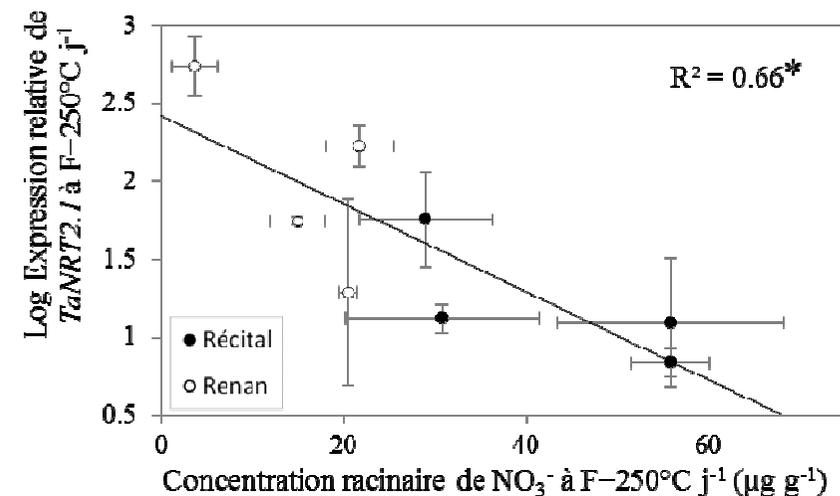
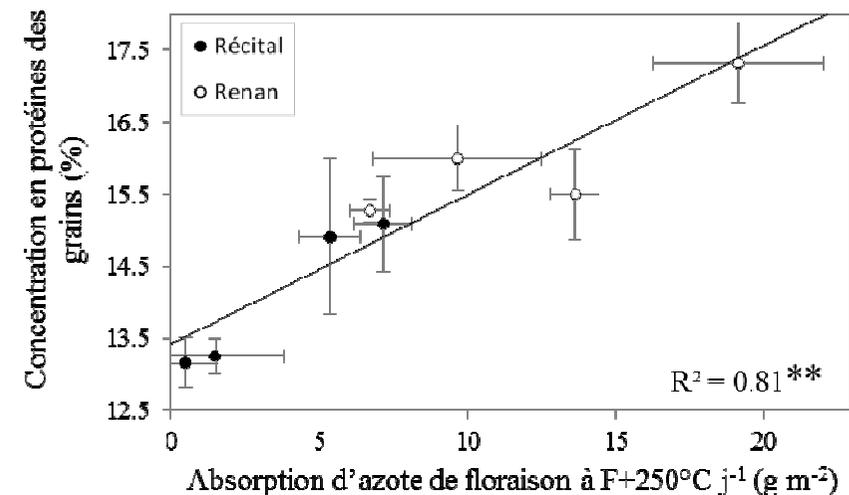
=> Implication de *TaNRT2.1*

## Concentration en nitrate des racines :

Négativement corrélée à l'expression de *TaNRT2.1* chez les deux cultivars

=> Marqueur potentiel du GPD.

*Les différences de satiété pour l'azote expliquent la concentration en protéines du grain indépendamment du rendement*



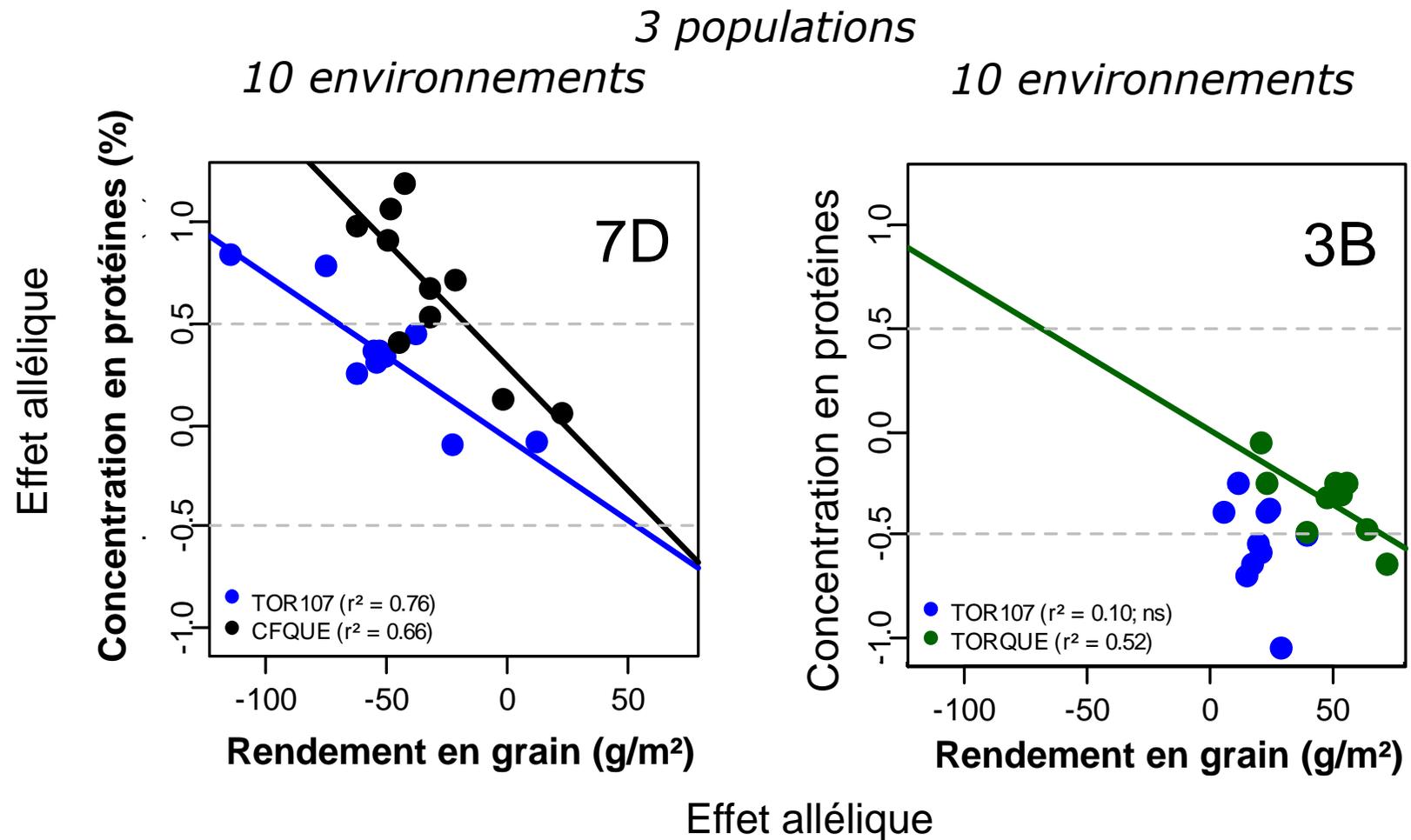
Adapté de Taulemesse *et al.*, 2016

# La variabilité génétique à explorer

- Développement des recherches pour identifier des régions chromosomiques : recherche de QTL, génétique d'association
- Utilisation de gènes d'intérêt identifiés (NAM-B1, Alanine-Amino-Transférase,..)
- Développement de la sélection génomique (marquage haute-densité, grand nombre de gènes à effet faible)
- Exploration de grandes stratégies à long terme (dont fixation N)

# Identification de régions chromosomiques

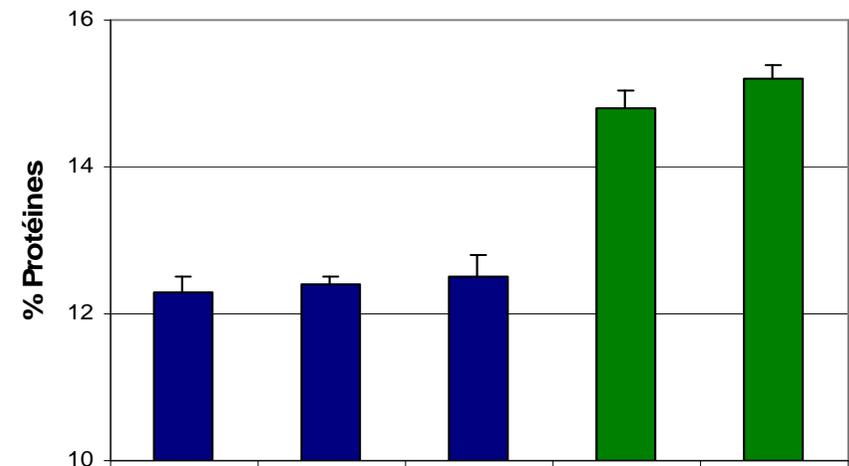
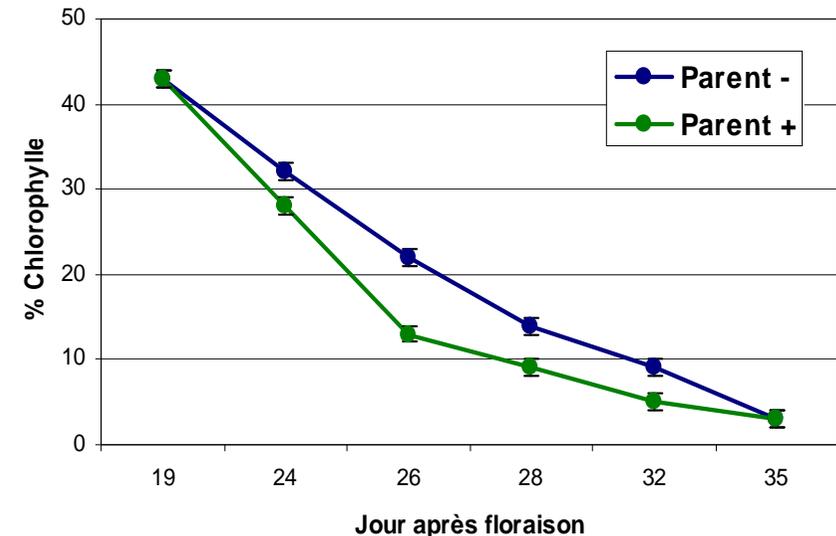
## Analyses de de descendance de croisement (analyse QTL)



Bogard et al (2013)

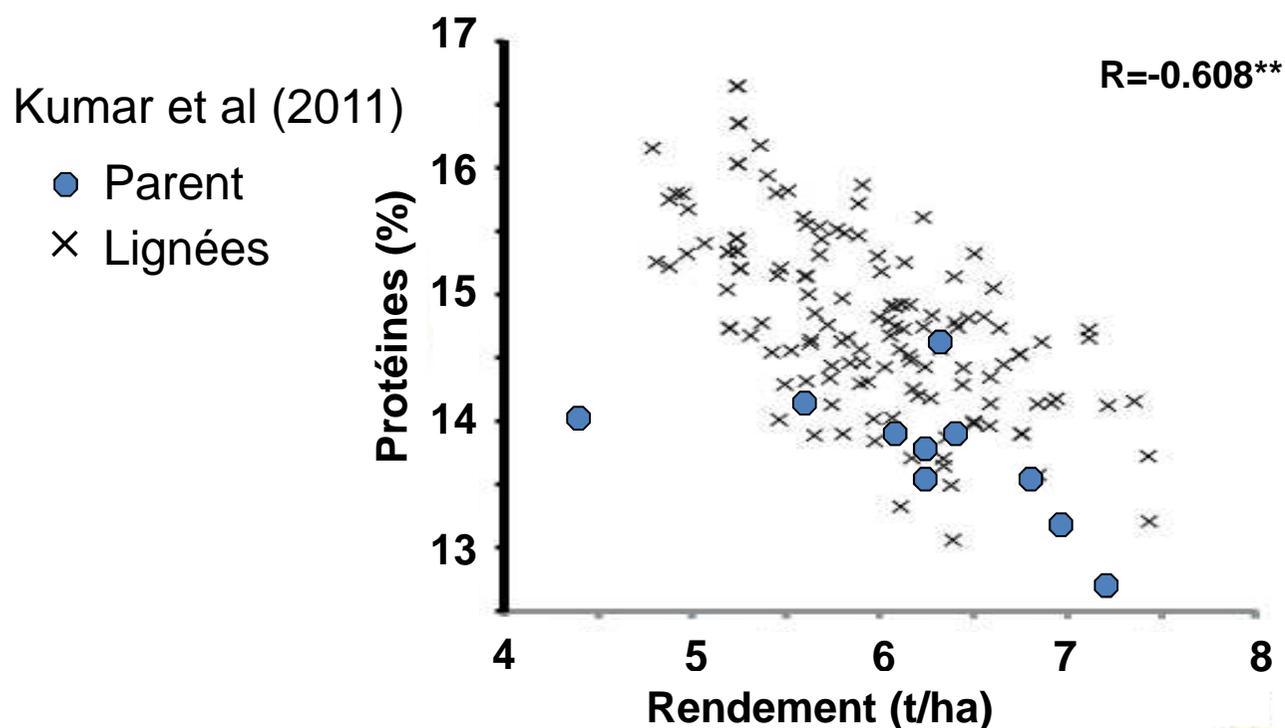
# Un gène majeur identifié

- Clonage du gène NAM-B1 chez le blé dur (Uauy et al. 2006)
  - Accélère la sénescence, augmente la teneur en protéines
  - Meilleure efficacité de remobilisation (N, Zn, Fe) (Waters et al. 2009)
- 
- Allèle favorable présent chez le blé tendre (Asplund et al. 2010, Hagenblad et al 2012)
  - 5/367 Core-Collection INRA : 1 hiver: Touzelle-Blanche-Barbue



# Effet de NAM-B1

Brevis et Dubcovsky (2010)	6 rétro-croisements (BC)	7 sites (US)	Rdt ns / +0.74%
Kumar et al (2011)	124 BC / 10 parents	3 sites (Inde)	Rdt ns / +1.06%
Carter et al (2012)	2 BC	2 sites (US)	Rdt ns / +0.16%
Tabbita et al (2013)	2 BC	5 sites (Argentine)	Rdt ns / +0.62%



Quelques variétés inscrites (HRSW)

Lillian (2005, Can.)

Somerset (2006, Can.)

Farnum (2009, US)

Burnside (2010, Can.)

Lassik (2011, US)

# Amélioration de l'Efficacité d'Utilisation de l'Azote du blé

– Blé inhibiteurs de nitrification

**Idée** : limiter la nitrification biologique

**Moyen** : L'espèce sauvage *Leymus Racemosus* exsude des produits limitant ou inhibant *Nitrosomonas* (Subbarao et al., 2009)

**Travaux en cours** : Introduction de chromosomes de *A. leymus* dans le génotype de lignées de blé (Ortiz [CIMMYT] et al., 2008)

**Pas de temps** : 10 ans ?



# Blé fixateur d'azote ?

- Certaines bactéries (diazotrophes) synthétisent la nitrogenase enzyme sensible à O<sub>2</sub> qui fixe N<sub>2</sub> atmosphérique
  - Nodule racinaire qui confère un environnement pauvre en O<sub>2</sub>
  - Association légumineuses / Rhizobia ou sp / Frankia
  - Echange acides aminés / sucres
- Travaux récents montrant une voie de signalisation commune entre symbiose mycorhizienne et symbiose bactérienne (évolution de la symbiose bactérienne à partir de la symbiose mycorhizienne chez certaines espèces)
- Est-ce que cette voie peut être activée chez les céréales ?

(Projet ENSA : Engineering N Symbiosis for Africa, B&MGF, maïs et Setaire, [www.ensa.ac.uk](http://www.ensa.ac.uk))

# Différentes stratégies explorées

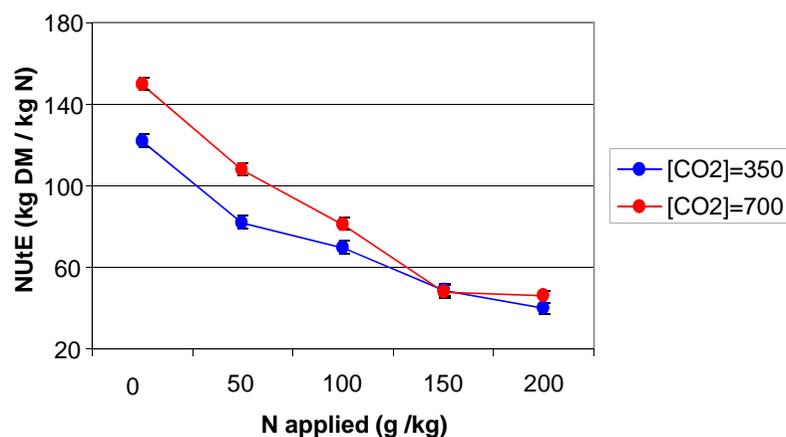
Stratégie	Caractéristiques
<b>Amélioration des interactions avec des bactéries fixatrices d'azote (endophytes/épiphytes)</b>	Exploitation des interactions naturelles avec les bactéries de la rhizosphère Sélection de plantes interagissant efficacement avec ces organismes Recherche d'une variabilité génétique
<b>Développement d'une symbiose avec des bactéries fixatrices d'azote</b>	Potentiel fort de fixation d'azote Basée sur des symbiontes très bien connus Contrôle de l'interaction spécifique par des signaux symbiotiques Possibilité d'optimiser à la fois la plantes et les bactéries
<b>Développement d'une symbiose tripartite avec des mycorhizes et bactéries fixatrices d'azote</b>	Nécessite une inoculation avec les mycorhizes Exploite une symbiose plante-mycorhize bien connue Applicable à toutes les céréales
<b>Création de plantes fixatrices d'azote</b>	Indépendance vis-à-vis des micro-organismes Applicable à toutes les plantes transformables

Position paper GIS-BV – Allenvi : Cereals benefiting from nitrogen fixation: strategies for the French public-private research community (Cullimore et al, 2013)

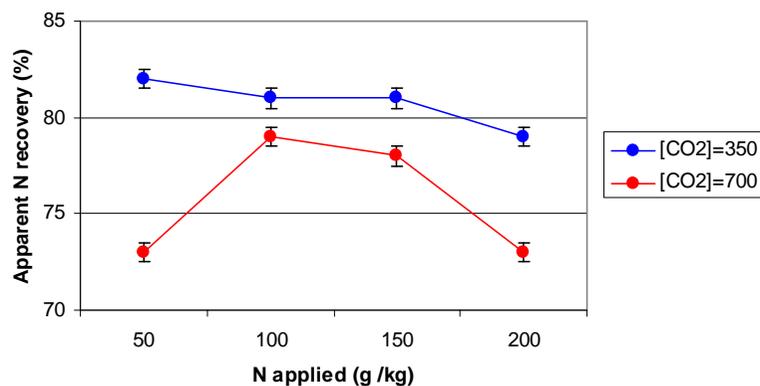
# Les interactions entre contraintes dans le cadre du changement climatique

- > **L'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> est plutôt favorable au espèce comme le blé (C<sub>3</sub>)**
  - > Augmentation de ~15% du rendement en augmentant la teneur en CO<sub>2</sub> (Long et al, 2006 méta-analyse)
  - > Mais décroissance de la teneur en protéines en partie causée par la corrélation négative
- > **Effets défavorables indirects du changement climatique**
  - > Augmentation fréquence de périodes sèches durant la montaison → effet négatif sur la disponibilité en azote
  - > Augmentation des températures moyennes
    - cycle plus court (~ -10 jours à floraison en 2050, nord de la France) → potentiel de rendement plus faible

# NUE et la teneur en CO<sub>2</sub> ?



NUE augmente avec la teneur en CO<sub>2</sub>



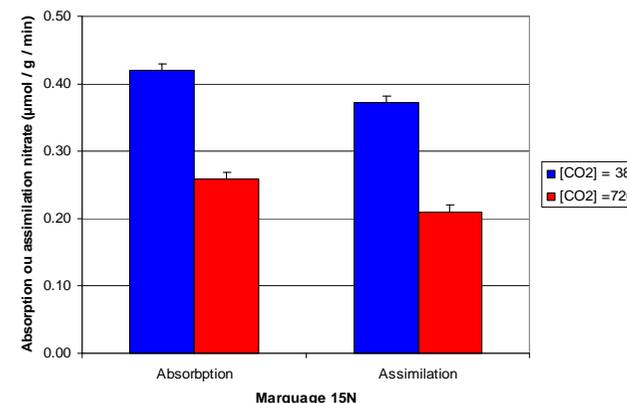
NUE diminue avec la teneur en CO<sub>2</sub>

Li et al 2003

	Rubisco content <sup>a</sup> (mg m <sup>-2</sup> )	
	Current	Elevated
Crop	217	177
Tree	153	147
Legume	260	233
Grass	182	150

Leakey et al 2009

Plus forte efficacité de l'appareil photosynthétique



Diminution de l'assimilation du nitrate

Bloom et al 2010

# Conclusions

- Forte prise en compte de la concentration en protéines à tous les niveaux (sélection, inscription, développement, recherche)
- La sélection a permis une augmentation du rendement sans pénaliser la concentration en protéines
- De nombreuses voies génétiques sont explorées (à plus ou moins long terme)
  - Basées sur des outils et connaissances génétiques en augmentation
  - Sur mesure %protéines efficace (SPIR) et phénotypage haut-débit pour caractériser la plante en développement
- Perspectives du changement climatique qui peuvent impacter la teneur en protéines (disponibilité en eau, fertilisation CO<sub>2</sub> , interaction avec l'assimilation du nitrate)

# Remerciements:

**V. Allard, F.X. Oury, E. Heumez, B. Rolland, F. Taulemesse, M. Bogard (INRA)**

**D. Gouache, K. Beauchene, P. Gate, P. du Cheyron, F. Taulemesse, M. Bogard, J. Lorgeou (Arvalis)**

**S. Lafarge, D. Cormier, S. Praud (Biogemma)**

**P. Senellard (UFS)**

**Projet FSOV (2004-2006)** « Amélioration conjointe de l'absorption de l'azote et de la teneur en protéines ». INRA, CETAC (Caussade Semences, Lemaire-Deffontaine, Momont, Saaten-Union Recherche, RAGT2n, Secobra Recherche, Unisigma), ARVALIS Institut-du-végétal

**Projet FSOV (2011-2013)** : "Variabilité génétique pour l'absorption d'azote post-floraison. Partenaires : INRA, CETAC (Caussade Semences, Lemaire-Deffontaine, Momont, Saaten-Union Recherche, Secobra Recherche), Unisigma, RAGT2n, Limagrain-Europe, ARVALIS Institut-du-végétal

**Projet ANR ProtNBlé (2006-2009)** « Analyses génétiques de la stabilité du rendement et de la teneur en protéines du grain en contexte limitant en azote chez le blé tendre et le blé dur ». Biogemma, INRA, Limagrain-Verneuil Holding, ARVALIS Institut-du-végétal

**Réseau d'expérimentation post-inscription ARVALIS Institut-du-végétal, Réseau d'expérimentation blé tendre INRA et Réseau d'expérimentation UFS**

- Bogard M, Taulemesse F, Du Cheyron P, Le Gouis J (2016) Progresser en protéines sans pénaliser le rendement: la notion de GPD. Azote et innovation : Quels leviers pour concilier productivité, qualité et autonomie des systèmes céréaliers ?, Lempdes
- Le Gouis J, Oury F-X, Lorgeou J, Senellard P (2014) Plus de protéines grâce à la génétique aujourd'hui et demain ? In: Arvalis (ed) Colloque blé tendre : Produire des protéines pour tous les débouchés, Paris
- Praud S, Le Gouis J, Baret F, De Solan B, Lafarge S, Cormier F, Gouache D (2016) Valoriser les tolérances variétales pour faire face aux carences azotées. Azote et innovation : Quels leviers pour concilier productivité, qualité et autonomie des systèmes céréaliers ?, Lempdes