

FERTILISATION



Performances des engrais azotés sur blé tendre et blé dur d'hiver

A l'occasion de la commercialisation de nouvelles formes d'engrais azotés et de produits à action bio-stimulantes, ARVALIS-Institut du végétal a mis en place, depuis 2012, une série d'expérimentations pour étudier leurs performances sur blé tendre et blé dur d'hiver.

LES PRODUITS TESTES

Outre les références ammonitrate, urée granulée et solution azotée, 11 produits récemment commercialisés ou en cours d'homologation ont été évalués. Ils se classent en plusieurs catégories en fonction de leurs propriétés technologiques et agronomiques. Les caractéristiques principales des produits testés sont résumées dans le tableau 1.

Les urées additionnées d'un inhibiteur d'uréase

NEXEN™ (Koch Fertilizer Products SAS, commercialisé et testé depuis 2012), **UTEC® 46** (Eurochem Agro France, commercialisé à partir de 2014, en test dès 2013 dans nos essais) et **NOVIUS®** (In Vivo, commercialisé à partir de 2014, en test depuis 2015 dans nos essais) sont des urées granulées avec un additif (NBPT pour N-(n-Butyl) ThioPhosphoric Triamide) ayant la propriété d'inhiber l'hydrolyse de l'urée, et donc de ralentir la transformation de l'urée en ion ammonium (NH_4^+). Selon la bibliographie internationale, cette action de l'additif devrait diminuer les pertes par volatilisation ammoniacale et ainsi prodiguer une meilleure efficacité aux produits qui en contiennent par rapport à leur version sans additif. Du point de vue du processus de fabrication, les trois produits se distinguent notamment par la technique d'imprégnation des granules d'urée avec le NBPT. Un 4^{ème} produit dans cette catégorie devrait être disponible au printemps 2017. Il s'agit d'une **urée additionnée de LIMUS®** (BASF, en test depuis 2014 dans nos essais). Le LIMUS est un additif composé de deux molécules : le NBPT et le NPPT. La 2^{ème} est aussi un inhibiteur d'uréase mais qui cible une autre catégorie de cette enzyme que celle ciblée par le NBPT.

Les inhibiteurs d'uréase additifs à la solution azotée

AZOKEEP® (Jouffray Drillaud, en cours d'homologation, AMM annoncée pour le 1^{er} trimestre 2017, en test depuis 2014 dans nos essais) est un additif liquide extem-

porané pour la solution azotée. Sa composition est à base de NBPT (N-(n-Butyl) ThioPhosphoric Triamide) ayant la propriété d'inhiber l'hydrolyse de l'urée, et donc de ralentir la transformation de l'urée en ion ammonium (NH_4^+). Selon la bibliographie internationale, cette action de l'additif devrait diminuer les pertes par volatilisation ammoniacale et ainsi prodiguer une meilleure efficacité à la solution azotée. Dans cette catégorie, deux autres produits en cours d'homologation devraient être disponibles dans les années qui viennent. Il s'agit de l'**AGROTAIN®** (Koch Fertilizer Products SAS, en test depuis 2013 dans nos essais) qui contient du NBPT et du **LIMUS®** (BASF, 1^{ère} année de test dans nos essais) qui contient du NBPT et du NPPT (cf. paragraphe sur les urées additionnées pour plus de détails sur le NPPT).

Les engrais à « azote protégé »

Trois engrais de la gamme CPRO (Fertiberia France, commercialisés depuis 2016) ont été testés cette année. Il s'agit du **NERGETIC® 30 ZIMACTIV**, du **NERGETIC® 20.17.0 CPRO** et du **NERGETIC® 18.8.6 CPRO**. La technologie de protection consiste en un traitement en usine avec un polymère qui, au contact de l'humidité du sol, assure une protection des éléments minéraux (source firme).

Les engrais avec additifs microbiens

FERTEVIE-WAKE® 1,8% AZO 18 (Fertemis/Lallemand Plant Care, commercialisé depuis 2014) est un engrais azoté soufré avec un additif microbien (le Ferteve-Wake) à base de levure *Saccharomyces cerevisiae* inactivée. Selon la firme, l'additif stimulerait l'ensemble de la flore du sol entraînant une accélération des phénomènes de minéralisation des matières organiques (pailles, résidus végétaux, produits résiduels organiques). Il améliorerait en cela l'implantation, la nutrition et la croissance des cultures. Il est préconisé en apport au stade tallage à 50 kg N/ha.

Tableau 1 : Caractéristiques principales des produits testés

Nom	Firme	Statut réglementaire	Forme	Composition en éléments minéraux (% massique si pas d'autres précisions)						Additif	Autres informations
				N- Total	N- Urée	N- NH ₄ ⁺	N- NO ₃ ⁻	SO ₃	MgO		
Engrais azotés simples											
AMMONITRATE 33.5	Générique	NFU-42 001	Solide	33.5		16.75	16.75				
SOLUTION AZOTEE	Générique	NFU-42 001	Liquide	30	15	7.5	7.5				
UREE GRANULEE	Générique	NFU-42 001	Solide	46	46						
Urées additionnées d'un inhibiteur d'uréase											
NEXEN™	KOCH Fertiliser Products SAS	Engrais CE	Solide	46	46					NBPT	
NOVIUS®	In-Vivo	Engrais CE	Solide	46	46					NBPT	
UTEC® 46	EUROCHEM Agro France	Engrais CE	Solide	46	46					NBPT	
UREE+LIMUS®	BASF	Engrais CE	Solide	46	46					NBPT & NPPT	
Inhibiteurs d'uréase additifs à la solution azotée											
AZOKEEP®	JOUFFRAY DRILLAUD	En cours d'homologation	Liquide							NBPT	Additif à la solution azotée
AGROTAIN®	KOCH Fertiliser Products SAS	En cours d'homologation								NBPT	Additif à la solution azotée
LIMUS®	BASF	En cours d'homologation								NBPT & NPPT	Additif à la solution azotée
Engrais à azote « protégé »											
NERGETIC® 30 ZIMACTIV	FERTIBERIA France	Engrais CE	Solide	30	22	8	0	21			Techno CPRO Fe=0.1%; Mn=0.1%; Mo=0.001%; Zn=0.1%
NERGETIC® 20.17.0 CPRO	FERTIBERIA France	Engrais CE	Solide	20	12.5	7.5	0	15			Techno CPRO P ₂ O ₅ = 17 %
NERGETIC® 18.8.6 CPRO	FERTIBERIA France	Engrais CE	Solide	18	0	15.5	2.5	25			Techno CPRO P ₂ O ₅ = 8% K ₂ O = 6%
Engrais avec additifs microbiens											
FERTEVIE-WAKE® 1,8% AZO 18	FERTEMIS/ Lallemand Plant Care	NFU 44-204 (additif homologué)	Solide	18	5	13		35	3	Fertevie-wake	Apport au stade tallage à 50 kg N/ha

LES ESSAIS

8 essais ont été réalisés sur blé tendre et blé dur d'hiver au cours de la campagne 2015-2016. Le tableau 2 décrit leurs principales caractéristiques. Les conditions de valorisation des apports d'engrais ont été moyennées à bonnes sur l'ensemble des essais. Les conditions de fin de cycle sont à l'image du scénario agro-climatique de l'année 2016. A l'exception des essais réalisés en Bretagne et dans le Gers, tous les autres ont subi des cumuls de pluie et des déficits de rayonnement importants faisant chuter la production. Les attaques de maladies (notamment *Microdochium spp* sur feuillage sur certains sites) ont encore aggravé la situation. Outre les productions faibles à très faibles et des teneurs en protéines assez élevées non représentatives des «normales»

régionales, plusieurs essais affichent une réponse atypique du rendement aux doses N croissantes (courbes de réponse en quadratique avec une chute de rendement pour les doses N les plus importantes, sans que la verse puisse être la seule responsable). Malgré ces aléas, la précision statistique des essais est convenable et aucune expérimentation n'a été exclue. Néanmoins, pour « tamponner » le caractère exceptionnel de l'année, les résultats ne seront analysés que sous la forme de synthèses pluri-annuelles. Quand ce n'est pas possible (produits testés pour la 1^{ère} fois en 2016), les résultats seront à considérer avec précaution et nécessiteront une poursuite du référencement en 2017.

Tableau 2 : Caractéristiques principales des expérimentations 2016

Essai	Bignan (56)	Civray (18)	Ebersheim (67)	Epr. P. Le Neub. (27)	Les Gr. Loges (51)	La Chappe (51)	Mont. Les Cren. (32)	Binas (41)
Type de sol	Limon profond	Argilo-calcaire	Alluvions limo.sabl.	Limon profond	Craie blanche	Craie blanche	Terreforts profonds	Limons argileux
% MO	3.4	3.0	1.8	2.7	3.4	2.7	1.4	2.2
pHeau	7.2	8.2	7.6	7.8	8.4	8.7	8.5	7.9
P ₂ O ₅ Olsen (ppm)	217	106	190 (J.H.)	80	145	68	16	38
Précédent	Mais F.	Colza	Mais G.	Betterave Sucrière	Colza	Betterave Sucrière	Tournesol	Colza
Travail du sol	Labour	Labour	Labour	Travail profond sans retournement	Travail superficiel	Travail superficiel	Travail profond sans retournement	Travail profond sans retournement
Variété (espèce)	CELLULE (BTH)	ASCOTT (BTH)	CELLULE (BTH)	EXPERT (BTH)	FRUCTIDOR (BTH)	TRAPEZ (BTH)	BOLOGNA (BTH)	RELIEF (BDH)
Date de semis	26/10	08/10	15/10	08/10	08/10	08/10	26/10	22/10
Date de récolte	26/07	21/07	29/07	09/08	27/07	08/08	02/07	25/07
Dose X (kg N/ha)	200	180	220	200	150	220	220	200
ETR (q/ha 15% H.)	2.3	2.3	2.6	1.9	1.8	3.4	4.6	1.8
Rdt opti ammo (q/ha)	112.3	72.7	70.5	103.8	73.2	72.9	86.9	24.8
Dose N opti ammo (kg N/ha)	200	122	115	164	111	166	181	50

Dans tous les essais, la référence de comparaison est l'ammonitrate (à tous les apports) étudiée sous la forme d'une courbe de réponse à des doses croissantes d'engrais (4 à 5 doses selon les essais en plus du témoin sans apport). Dans les essais testant les additifs à la solution azotée, une courbe de réponses pour la solution azotée (à tous les apports) a aussi été réalisée. Les courbes de réponses ont fait l'objet d'un traitement statistique afin de les modéliser selon un formalisme différent selon que l'on s'intéresse au rendement ou à la teneur en protéines du grain (cf. encadré 1). Dans les essais testant les urées additionnées d'un inhibiteur d'uréase, une référence urée 46 (à tous les apports) a aussi été introduite, à deux doses totales d'azote (X-50 kg N/ha, X). Dans les essais testant le FERTEVIE-WAKE® 1,8% AZO 18, un témoin ammonitrate avec 50 kg N/ha apporté au tallage (au lieu de 40 kg N/ha du

témoin standard) a été conduit à deux doses totales d'azote (X-50 kg N /ha, X). En effet, le produit ne pouvant être épandu à moins de 50 kg N/ha pour respecter la dose minimale d'additif microbien à apporter, il était nécessaire de disposer d'un 2^{ème} témoin pour exclure un effet « fractionnement » d'un éventuel effet du produit en lui-même. Enfin, pour se prémunir d'un éventuel effet « nutrition soufrée » de certains produits, tous les essais ont bénéficié d'une couverture soufre pour éviter une éventuelle carence en cet élément.

Tous les produits ont été testés à une ou deux doses totales d'azote (X-50 kg N/ha, X et/ou X+50 kg N/ha selon les produits, avec X = dose totale d'azote prévisionnelle), la comparaison des rendements et des teneurs en protéines a été réalisée selon trois méthodes statistiques décrites dans l'encadré 2.

PERFORMANCE DES UREES ADDITIONNEES D'INHIBITEUR D'UREASE

Les résultats des synthèses pluriannuelles sont fournis en figures 1 à 4. Concernant les produits testés depuis au moins 3 années (NEXEN, UTEC 46 et urée+LIMUS), les résultats convergent. En situation de moindre performance de l'urée par rapport à l'ammonitrate (rendement et teneur en protéines), l'imprégnation d'urée avec un ou plusieurs inhibiteurs d'uréase permet de maintenir son efficacité au niveau de celle de l'ammonitrate pour le rendement, avec parfois un léger recul sur la teneur en protéines (pas toujours significatif et affichant néanmoins

une performance largement supérieure à celle de l'urée). Si on considère toutes les situations, les 3 produits testés affichent une légère meilleure performance que l'ammonitrate sur le rendement, tout en maintenant une teneur en protéines au même niveau. Concernant le NOVIUS, les résultats disponibles sont encore peu nombreux et présentent peu de situations où l'efficacité de l'urée est mise en défaut par rapport à celle de l'ammonitrate. Il n'est donc pas encore possible de conclure.

PERFORMANCE DES INHIBITEURS D'UREASE ADDITIONNEES A LA SOLUTION AZOTEE

Les résultats des synthèses pluriannuelles d'évaluation de l'AZOKEEP et de l'AGROTAÏN sont fournis en figures 5 et 6 respectivement. Ils convergent vers un positionnement intermédiaire de la solution azotée+additif entre la solution azotée solo et l'ammonitrate. Ce dernier reste l'engrais le plus performant à la fois sur le rendement et la teneur en protéines. Par rapport à la solution azotée solo, l'ajout d'inhibiteur d'uréase engendre un gain signi-

ficatif de teneur en protéines. Une légère tendance à un meilleur rendement semble se dessiner mais n'est pas confirmée statistiquement. Les résultats 2016 d'évaluation du LIMUS en additif à la solution azotée sont fournis en figure 7. Le caractère atypique de l'année nous incite à la prudence quant à d'éventuelles conclusions et implique la nécessité de poursuivre le référencement en 2017.

PERFORMANCE DES PRODUITS DE LA GAMME CPRO

Les résultats 2016 d'évaluation des produits de la gamme CPRO sont fournis en figure 8. On constate très peu de résultats significatifs. Le caractère atypique de

l'année nous incite à la prudence quant à d'éventuelles conclusions et implique la nécessité de poursuivre le référencement en 2017.

PERFORMANCE DU FERTEVIE-WAKE® 1,8% AZO 18

Les résultats de la synthèse pluriannuelle d'évaluation du FERTEVIE-WAKE® 1,8% AZO 18 sont fournis en figure 9. Une tendance à un meilleur rendement semble se dessiner bien que la significativité statistique du regroupement ne le confirme pas (effet significatif sur quelques essais individuels). Un effet négatif significatif sur la teneur en protéines est par contre mise en évidence. Le produit devant s'appliquer à 50 kg N/ha au

tallage et le témoin ammonitrate s'appliquant à 40 kg N/ha, les essais 2016 comportaient un témoin supplémentaire ammonitrate avec 50 kg N/ha au tallage. Aucun impact significatif du fractionnement n'a été mis en évidence, confirmant le fait que l'effet du produit n'est pas dû à un apport plus important d'azote au tallage. Etant donné le caractère atypique de l'année 2016, une poursuite du référencement en 2017 semble nécessaire.

1 – Ajustement des courbes de réponses à l'azote pour les références

La réponse à des doses croissantes d'azote apportée par les engrais de références (ammonitrate dans tous les essais, solution azotée en plus dans certains cas) a été évaluée avec un dispositif en « courbe de réponse » (4 à 5 doses selon les essais en plus du témoin sans apport). Concernant le rendement, cette dernière est modélisée soit avec un formalisme en « quadratique-plateau » (cf. équation 1), soit avec un formalisme en quadratique (de type aX^2+bX+c). Concernant la teneur en protéines du grain, le formalisme retenu est une régression linéaire affine en excluant le témoin sans apport d'azote.

[Eq.1] Si $N < x_0$: $RDT = p - b * (N - x_0)^2$
Si non: $RDT = p$

Avec : N= dose totale d'azote appliquée (kg N/ha)

RDT = rendement grain (q/ha 15% hum.)

p = rendement sur le plateau (q/ha 15% hum.)

x0 = dose N au début du plateau (kg N/ha)

b = paramètre de « courbure » (q/(kg N²/ha))

L'optimum de fertilisation azotée pour le rendement est déterminé de la façon suivante :

*Rendement optimal = $0.97 * p$*

Dose N optimale = dose N correspondant au rendement optimal sur la courbe de réponse

2 – Méthodes statistiques utilisées

Dans chaque essai, la performance des produits est évaluée selon 3 méthodes statistiques :

- Comparaison des modalités par contrastes suite à l'analyse de variance
- Comparaison de moyenne (test de Student) par rapport à la courbe de réponse référence modélisée
- Comparaison par rapport à l'intervalle de confiance à 95% de la courbe de réponse référence. Cette dernière méthode n'est pas un test statistique en soit, mais plutôt un indicateur confirmant une « tendance ». L'information est donc à considérer avec précaution si elle est la seule à indiquer un effet significatif du produit. Si ce cas se produit, il est précisé spécifiquement sur les figures. En l'absence de cette mention, la significativité indiquée correspond à la validation par au moins une des deux premières méthodes.

Dans les synthèses pluriannuelles, la performance des produits est évaluée par comparaison de moyennes appariées (test de Student).

Les figures reprennent les légendes suivantes :

*** = différence significative au seuil de 1% ;

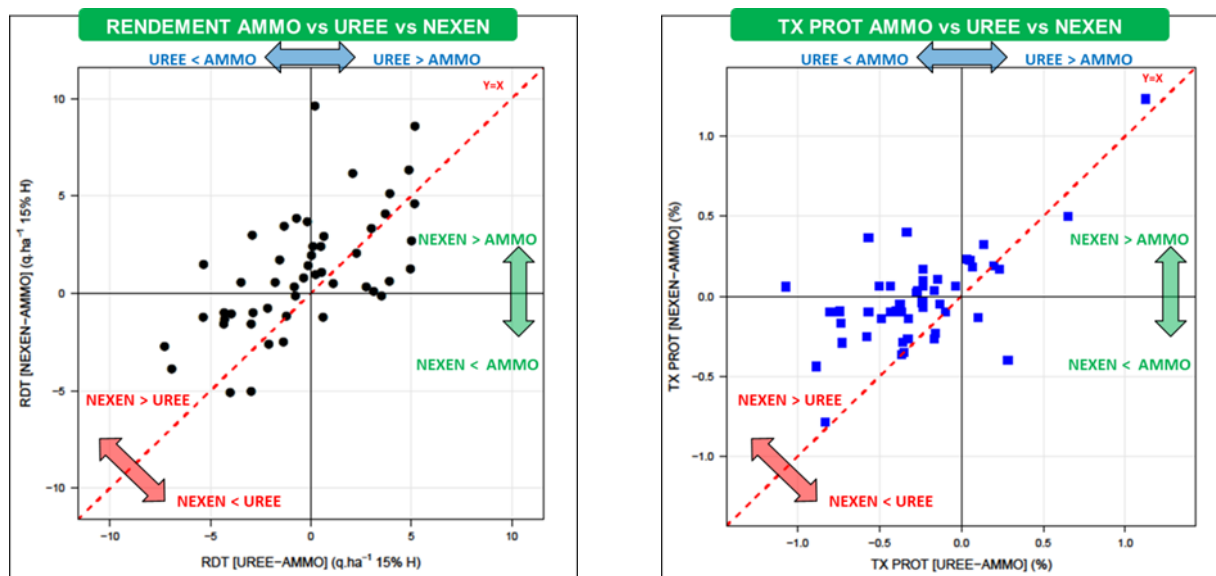
** = différence significative au seuil de 5% ;

* = différence significative au seuil de 10% ;

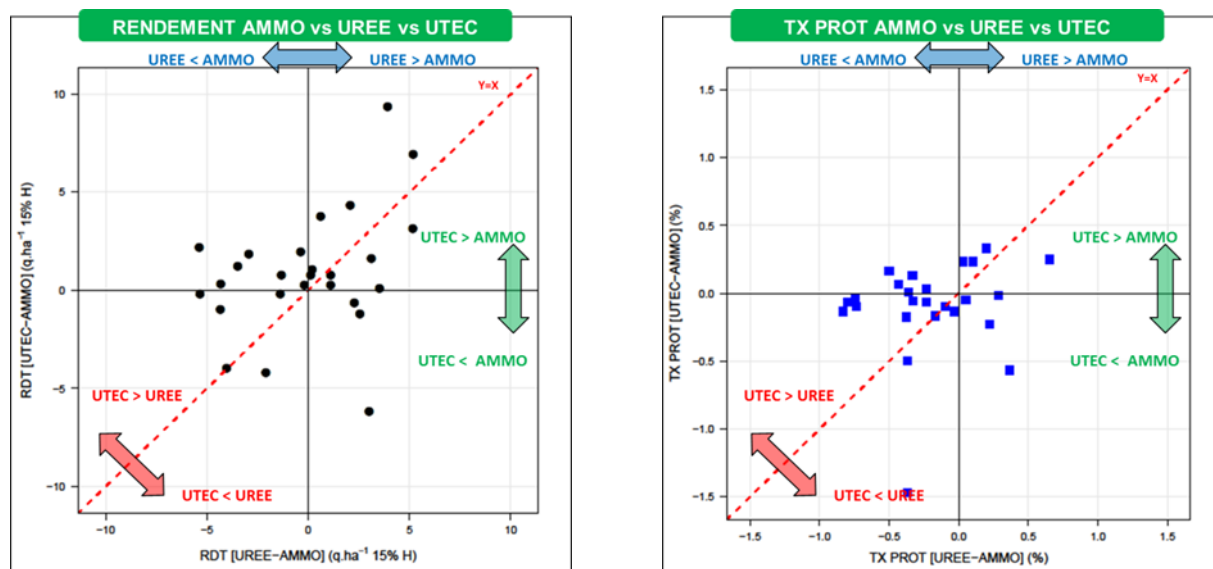
NS = différence non significative ;

** (IC) = significativité statistique reposant uniquement sur l'analyse de l'intervalle de confiance à 95% de la courbe de réponse référence.

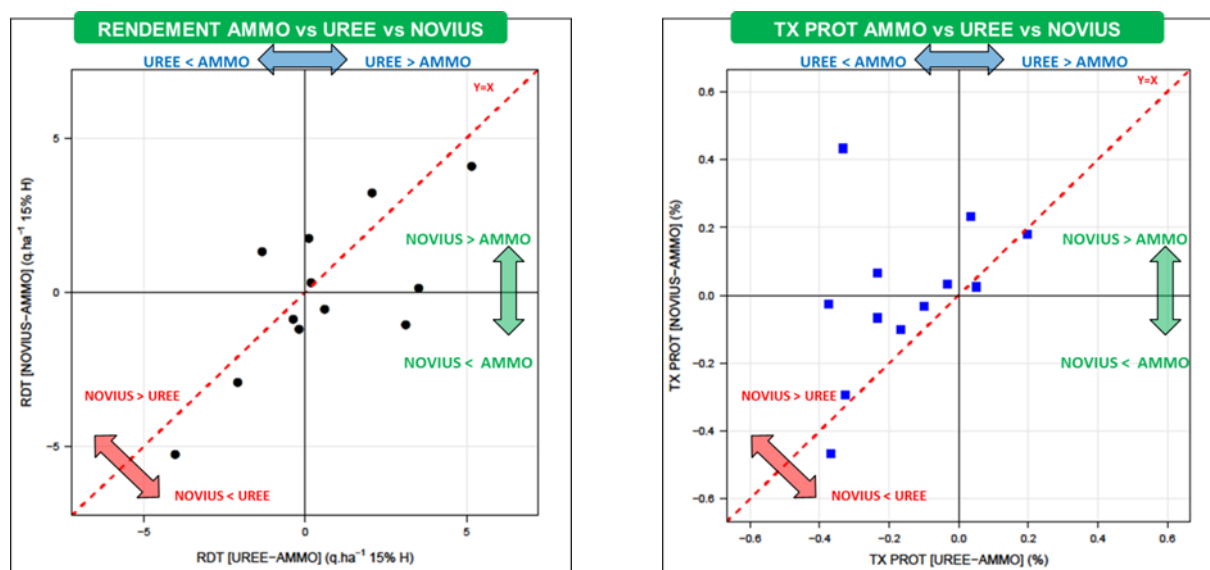
- Figure 1 : Rendement et teneur en protéines suite à l'apport de NEXENTM et d'urée 46. Résultats exprimés en écart à l'ammonitrate à dose totale N équivalente. Synthèse pluriannuelle sur 5 années d'essais (19 essais ARVALIS, récoltes 2012 à 2016). Comparaisons sur tous les apports (53 points). Performances moyennes toutes situations (cf. encadré pour les légendes statistiques) :
- [NEXEN-AMMO] : RDT=+1.0 q/ha^{NS} ; TX PROT=-0.02 %^{NS}
 - [NEXEN-UREE] : RDT=+1.5 q/ha^{***} ; TX PROT=+0.24 %^{***}
 - [UREE-AMMO] : -0.4 q/ha^{NS} ; TX PROT=-0.24 %^{***}



- Figure 2 : Rendement et teneur en protéines suite à l'apport d'UTEC[®] 46 et d'urée 46. Résultats exprimés en écart à l'ammonitrate à dose totale N équivalente. Synthèse pluriannuelle sur 4 années d'essais (14 essais ARVALIS, récoltes 2013 à 2016). Comparaisons sur tous les apports (28 points). Performances moyennes toutes situations (cf. encadré pour les légendes statistiques) :
- [UTEC-AMMO] : RDT=+1.0 q/ha^{NS} ; TX PROT=-0.07 %^{NS}
 - [UTEC-UREE] : RDT=+0.9 q/ha^{NS} ; TX PROT=+0.11 %^{NS}
 - [UREE-AMMO] : 0.0 q/ha^{NS} ; TX PROT=-0.20 %^{**}



- Figure 3 : Rendement et teneur en protéines suite à l'apport de NOVIUS® et d'urée 46. Résultats exprimés en écart à l'ammonitrate à dose totale N équivalente. Synthèse pluriannuelle sur 2 années d'essais (6 essais ARVALIS, récoltes 2015 et 2016). Comparaisons sur tous les apports (12 points). Performances moyennes toutes situations (cf. encadré pour les légendes statistiques) :
- [NOVIUS-AMMO] : RDT=-0.1 q/ha^{NS} ; TX PROT=0.00 %^{NS}
 - [NOVIUS-UREE] : RDT=-0.6 q/ha^{NS} ; TX PROT=+0.15 %^{**}
 - [UREE-AMMO] : +0.6 q/ha^{NS} ; TX PROT=-0.16 %^{**}



- Figure 4 : Rendement et teneur en protéines suite à l'apport d'urée 46+LIMUS® et d'urée 46. Résultats exprimés en écart à l'ammonitrate à dose totale N équivalente. Synthèse pluriannuelle sur 3 années d'essais (9 essais ARVALIS, récoltes 2014 à 2016). Comparaisons sur tous les apports (18 points). Performances moyennes toutes situations (cf. encadré pour les légendes statistiques) :
- [(UREE+LIMUS)-AMMO] : RDT=+2.3 q/ha^{***} ; TX PROT=-0.04 %^{NS}
 - [(UREE+LIMUS)-UREE] : RDT=+2.1 q/ha^{***} ; TX PROT=+0.13 %^{NS}
 - [UREE-AMMO] : +0.2 q/ha^{NS} ; TX PROT=-0.17 %^{*}

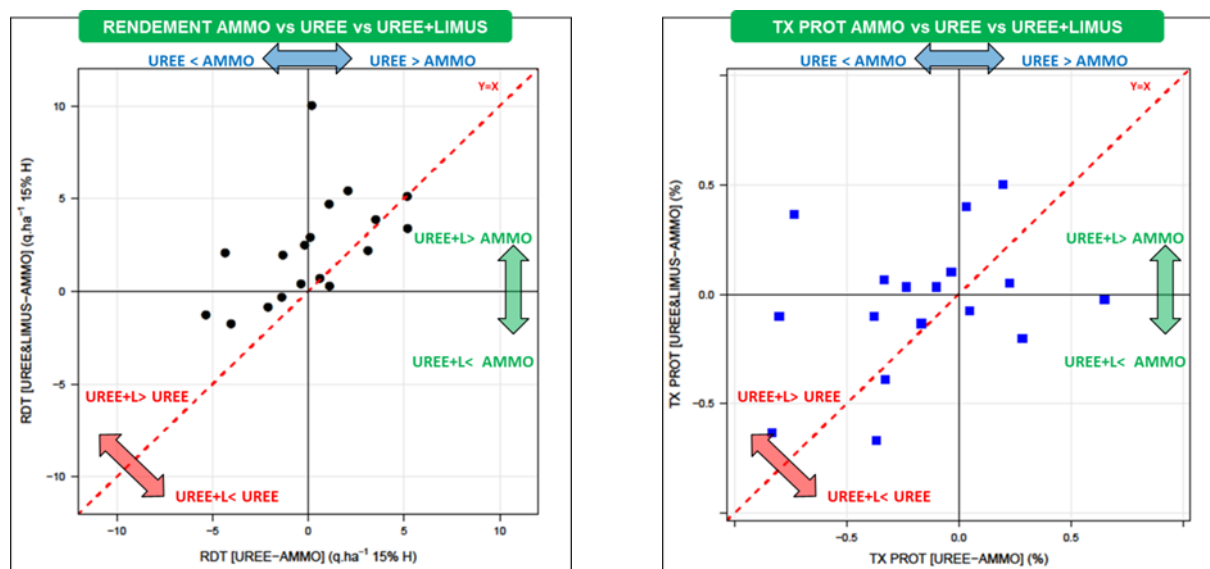


Figure 5 : Rendement et teneur en protéines suite à l'apport de solution azotée+AZOKEEP® et de solution azotée. Résultats exprimés en écart à l'ammonitrate à dose totale N équivalente. Synthèse pluriannuelle sur 3 années d'essais (8 essais ARVALIS, récoltes 2014 à 2016). Comparaisons sur tous les apports (16 points). Performances moyennes toutes situations (cf. encadré pour les légendes statistiques) :

- [(SOL N+AZOKEEP)-AMMO] : RDT=-3.4 q/ha*** ; TX PROT=-0.47 %***
- [(SOL N+AZOKEEP)-SOL N] : RDT=+0.9 q/ha^{NS} ; TX PROT=+0.21 %**
- [SOL N-AMMO] : -4.3 q/ha*** ; TX PROT=-0.68 %***

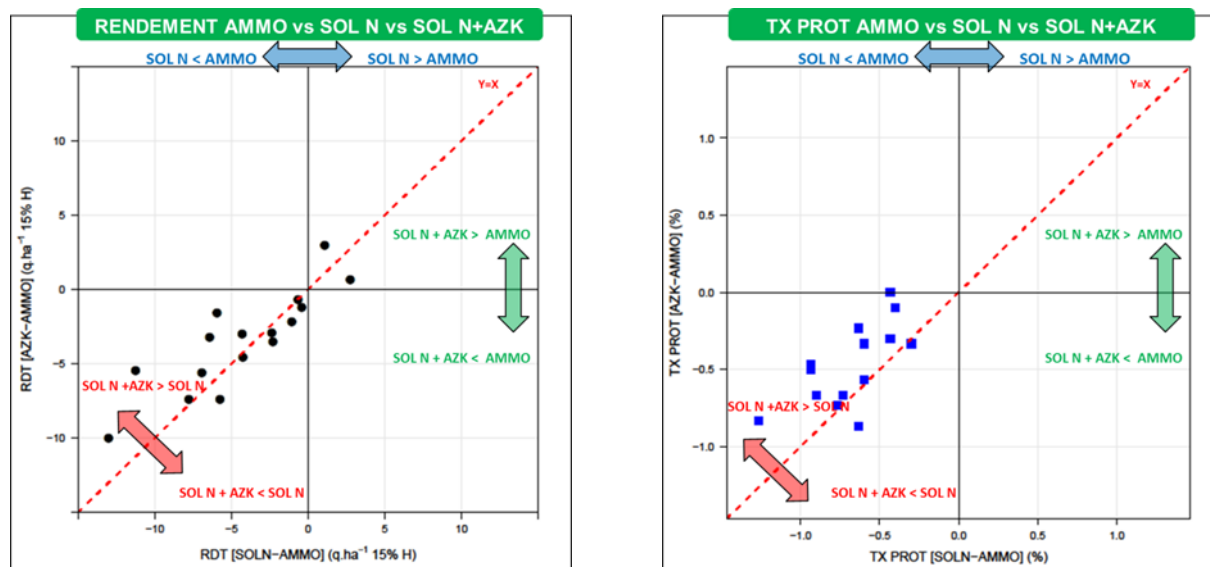


Figure 6 : Rendement et teneur en protéines suite à l'apport de solution azotée+AGROTAIN® et de solution azotée. Résultats exprimés en écart à l'ammonitrate à dose totale N équivalente. Synthèse pluriannuelle sur 4 années d'essais (9 essais ARVALIS, récoltes 2013 à 2016). Comparaisons sur tous les apports (28 points). Performances moyennes toutes situations (cf. encadré pour les légendes statistiques) :

- [(SOL N+AGROTAIN)-AMMO] : RDT=-2.7 q/ha*** ; TX PROT=-0.42 %***
- [(SOL N+AGROTAIN)-SOL N] : RDT=+0.6 q/ha^{NS} ; TX PROT=+0.21 %**
- [SOL N-AMMO] : -3.3 q/ha*** ; TX PROT=-0.63 %***

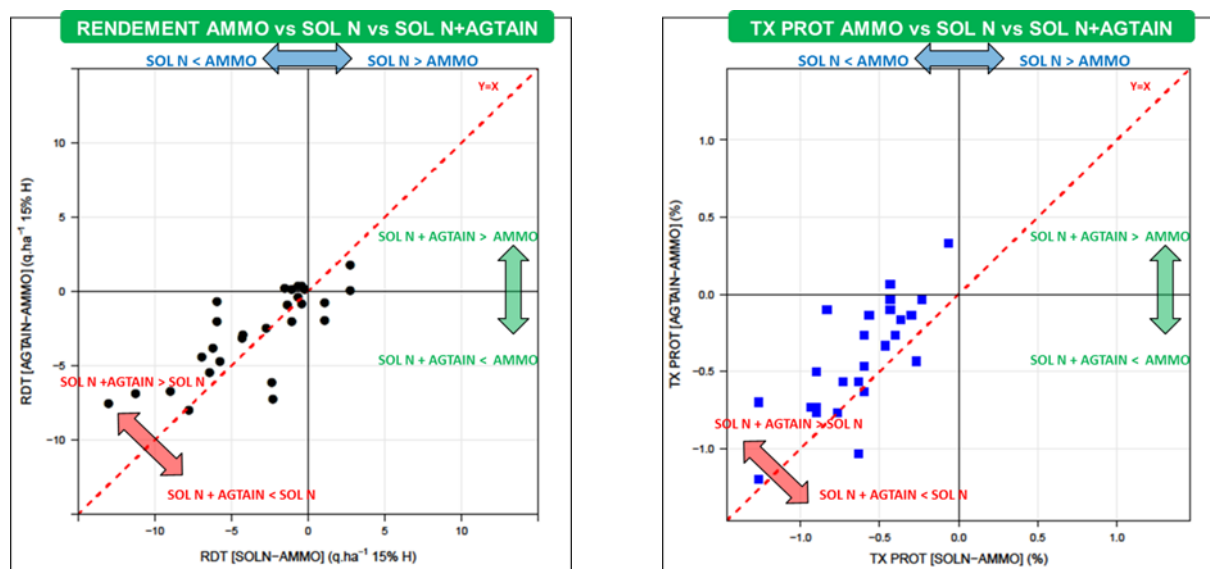


Figure 7 : Rendement et teneur en protéines suite à l'apport de solution azotée+LIMUS[®], de solution azotée et d'ammonitrate dans les essais récolte 2016 (3 essais). Comparaisons sur tous les apports à deux doses totales N (X-50 kg N/ha et X). Cf. encadré pour les légendes statistiques.

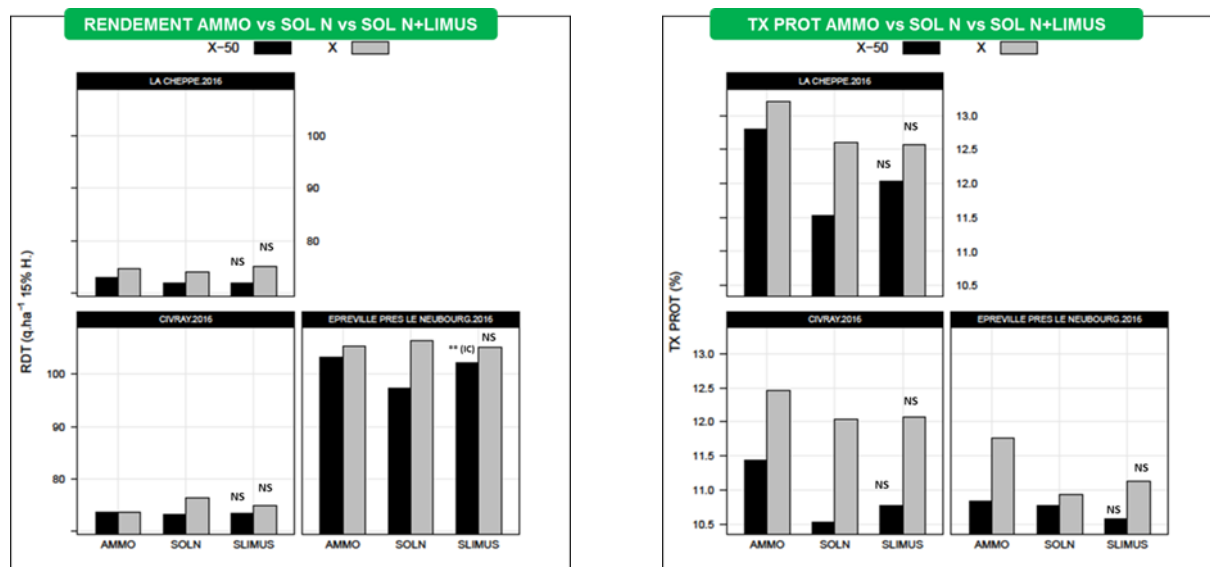


Figure 8 : Rendement et teneur en protéines suite à l'apport de produit de la gamme CPRO et d'ammonitrate dans les essais récolte 2016 (5 essais). Comparaisons à deux doses totales N (X-50 kg N/ha et X) :

- NERGETIC 30 testé à Z30 (autres apports = AMMO)
- NERGETIC 20.17.0 testé à Z30 (autres apports = AMMO)
- NERGETIC 18.8.6 testé à Z25 (autres apports = AMMO)

Cf. encadré pour les légendes statistiques.

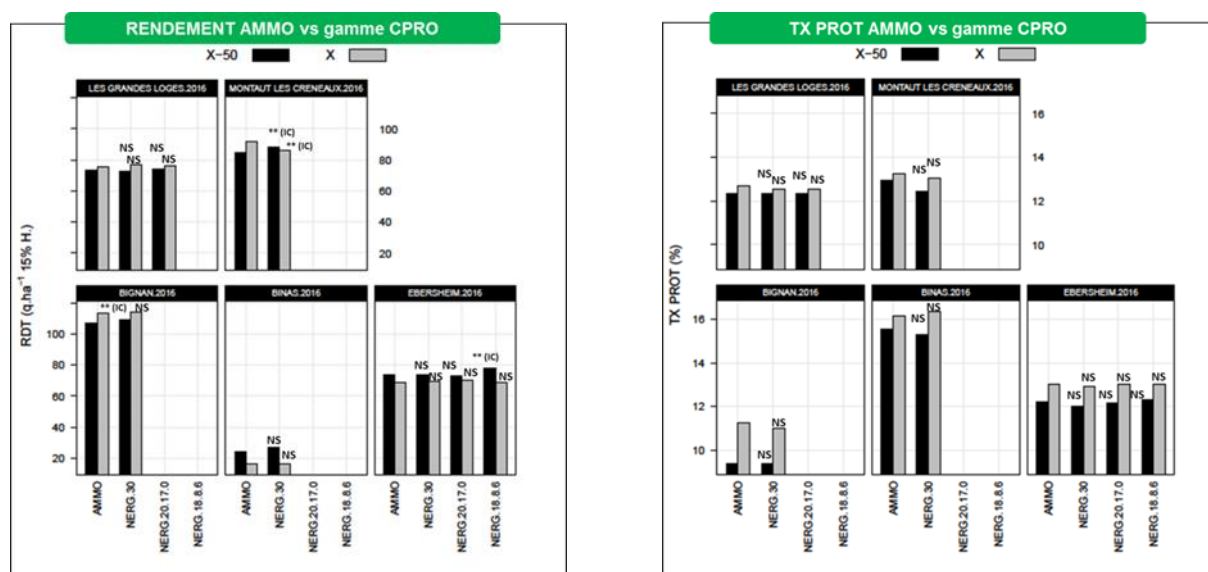
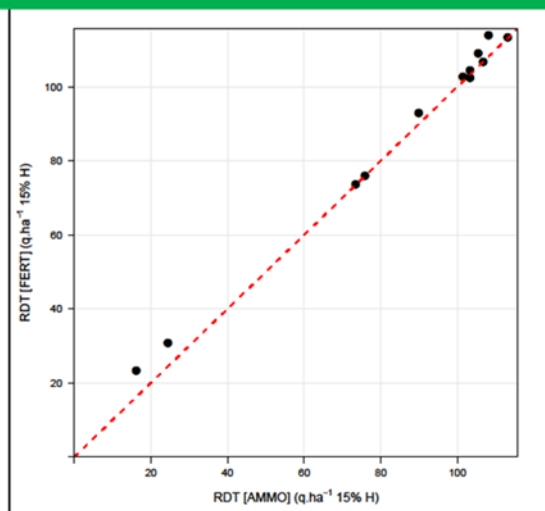


Figure 9 : Rendement et teneur en protéines suite à l'apport de FERTEVIE-WAKE® 1,8% AZO 18 et d'ammonitrate. Synthèse pluriannuelle sur 2 années d'essais (5 essais ARVALIS, récoltes 2015 et 2016). FERTEVIE WAKE® 1.8% AZO 18 apporté à 50 kg N/ha au tallage (autres apport = AMMO ; apport tallage du témoin AMMO=40 kg N/ha) (12 points). Performances moyennes toutes situations (cf. encadré pour les légendes statistiques) : [(FERTEVIE-WAKE® 1,8% AZO 18)- AMMO] : RDT= +2.1 q/ha^{NS} ; TX PROT=-0.21 %^{**}

RENDEMENT AMMO vs FERTEVIE-WAKE® 1,8% AZO 18



TX PROT AMMO vs FERTEVIE-WAKE® 1,8% AZO 18

