

# Comparaison de l'urée et de l'ammonitrate en essais de longue durée, synthèse de 10 ans d'expérimentation

LAMBERT<sup>(1)</sup> M. ; HERVE<sup>(2)</sup> M. ; EVEILLARD<sup>(3)</sup> P. ; BOUTHIER<sup>(4)</sup> A. ; CHAMPOLIVIER<sup>(5)</sup> L. ; MARQUIS<sup>(6)</sup> S. ; ROCCA<sup>(7)</sup> C. ; ROUSSEL<sup>(8)</sup> D.

<sup>1</sup>YARA France, <sup>2</sup>EUROCHEM Agro, <sup>3</sup>UNIFA, <sup>4</sup>ARVALIS-Institut du Végétal, <sup>5</sup>CETIOM, <sup>6</sup>BOREALIS-LAT, <sup>7</sup>IN VIVO, <sup>8</sup>OCI Agro

## Résumé :

Un réseau de 12 expérimentations pluriannuelles avec plus de 200 courbes de réponses comparant deux engrais azotés : l'urée et l'ammonitrate sur une rotation Colza-Blé-Orge a été mené de 2002 à 2012 par différents partenaires dans le cadre d'un projet coordonné par l'UNIFA. L'originalité du dispositif expérimental a permis de mettre en évidence, outre la traditionnelle comparaison de la réponse à la fertilisation azotée de l'année (effet annuel), l'existence d'un effet du « système » de fertilisation selon que l'on utilise exclusivement le même type d'engrais azoté chaque année et l'existence d'un effet du « passé » de fertilisation qui se traduit par une réponse différente des parcelles non fertilisées l'année de récolte selon qu'elles ont reçu de l'urée ou de l'ammonitrate les années antérieures.

## Différentes approches ont été mises en œuvre pour analyser les résultats de ce réseau d'essais :

- 1) les classiques analyses de variance et méthodes des contrastes,
- 2) les ajustements de fonctions de production (quadratique- plateau, quadratique, exponentiel ADAS) et tests des modèles emboîtés,
- 3) les comparaisons de l'ensemble des variables d'intérêt par le test de Student (comparaison d'échantillons appariés). Les proportions d'essais avec des effets formes d'azote (annuel, passé, système) statistiquement significatifs varient selon les types d'analyses mises en œuvre et les traitements comparés.

Il s'avère que, compte tenu des ordres de grandeur des différences, souvent comparables ou inférieures à la précision de chaque essai, c'est bien la multiplication des sites expérimentaux, à travers les lieux et les années, et la convergence des résultats qui permettent de dégager des résultats moyens autorisant la quantification des différences d'efficacité entre engrais. Malheureusement, comme d'autres résultats déjà publiés l'avaient montré, les différences moyennes masquent une variabilité certaine et aucune prédiction a priori des écarts d'efficacité n'a été possible même si des traitements de données complémentaires restent encore nécessaires.

Globalement, les principales conclusions de ce réseau sont les suivantes : -

La comparaison de l'effet annuel des 2 formes par le test de Student met en évidence un différentiel de rendement moyen à la dose du bilan prévisionnel ( $X = 167$  kg N/ha en moyenne) de 2 %\*\*\*, soit respectivement 1.2 (\*\*), 1.4 (\*\*) et 1.3 (\*) q/ha pour le colza, le blé et l'orge en faveur de l'ammonitrate. Ces écarts sont proches des résultats déjà connus et publiés en France et en Europe.

En plus de l'effet sur le rendement, des écarts significatifs sur les quantités d'azote absorbé et le coefficient apparent d'utilisation de l'azote sont également mis en évidence avec un CAU supérieur de 5 % \*\* avec l'ammonitrate (91 % contre 86% pour l'urée).

Plus originale est la démonstration d'un effet moyen du « passé de fertilisation » qui se traduit par des écarts statistiquement significatifs de rendement et d'azote absorbé sur chaque culture, à la fois sur les traitements fertilisés et les témoins sans azote : les parcelles ayant reçu de l'ammonitrate au cours des années précédant la réalisation de la courbe de réponse ont un rendement en moyenne supérieur de près de 2 % \*\* et une absorption d'azote significativement supérieure (+ 3\* à 7\*\*kg N/ha pour les céréales à paille) . Cet effet «passé de fertilisation » est davantage extériorisé par les parcelles non fertilisées avec une différence de rendement de 4.7 %\*\*\*et de 7\*\* à 13\*\*kg N/ha absorbé en plus pour les céréales à paille. En moyenne, sur les 51 situations étudiées, l'effet « passé » de fertilisation est du même ordre de grandeur que l'effet « annuel » traditionnellement testé dans les essais classiques.

L'effet « système » résulte de la combinaison des 2 effets élémentaires distincts : l'effet « annuel » et l'effet « passé ». Analysé sous l'angle de l'approche « système », les écarts de rendement entre les deux formes d'azote s'élèvent alors à 4.1 % \*\*\* à la dose du bilan prévisionnel soit respectivement 2.4\*\*\*, 2.7\*\*\*, 3.1 \*\*q/ha pour le colza, le blé et l'orge. Concernant les quantités d'azote absorbé, les différences atteignent 27\*\*, 19\*\*\* et 15 \*\*\* kg N/ha supplémentaire absorbé respectivement pour le colza, le blé et l'orge. Les coefficients apparents d'utilisation calculés dans l'approche « système » sont équivalents à ceux obtenus dans l'approche « annuelle » : 91 % avec l'ammonitrate contre 84 % avec l'urée. Les différences de quantités d'azote absorbé entre les 2 formes d'azote résultent d'une part d'une différence de CAU de 5 points (effet annuel) et de l'écart de fournitures du sol (effet passé).

L'absence de différence entre engrais sur les reliquats et les biomasses en sortie d'hiver (tests t non significatifs, respectivement ( $p = 0.39$ ,  $n = 49$  &  $p = 0.21$ ,  $n = 14$ ) prouve que ces différences de fournitures du sol sont postérieures aux mesures et s'extériorisent au printemps pendant la période de minéralisation de l'azote organique.

A ce stade, à l'échelle de la succession culturale , il apparait que les fertilisations récurrentes à base d'ammonitrate ont permis de conserver davantage d'azote provenant de l'engrais dans le système sol-plante, comparativement à l'urée traduisant une efficacité supérieure et probablement moins de pertes environnementales.

A dose d'azote identique, des enjeux qualité (teneur en protéines des céréales et teneur en huile du colza) ont également été identifiés dans cette étude : 0.2 à 0.3 point de protéines en moins avec l'urée, 0.25 à 0.48 point d'huile en moins avec l'ammonitrate.

Enfin, après ajustements statistiques de trois fonctions de production (quadratique-plateau, quadratique, exponentiel ADAS) sur plus de 200 courbes de réponses, des simulations ont été réalisées afin d'évaluer la « dose équivalente » d'urée permettant de rendre les différences de rendement avec l'ammonitrate non significativement différentes selon les deux approches « annuelle » ou « système ». Pour des considérations d'opérationnalité des résultats, ces simulations ont été réalisées à partir de la dose du bilan prévisionnel. Les simulations pour les trois fonctions de production aboutissent à des conclusions convergentes :

Les 2 engrais obtiennent des performances non significativement différentes avec une majoration de la dose bilan pour l'urée autour de 10 % (+16 à 18 kg N/ha) en approche annuelle. Le rattrapage de l'écart de performance enregistré dans l'approche « système » nécessite, quant à lui, une

augmentation de dose plus conséquente de l'ordre de 20 % de la dose bilan (+ 33 kg N/ha). Cette méthode permet de quantifier une différence d'efficacité brute entre les deux engrais mais ne correspond en aucun cas à une préconisation car ni les impacts environnementaux, ni les aspects économiques ne sont envisagés dans ce calcul.

Au-delà des différences mises en évidence dans cette étude, il nous paraît désormais fondamental de considérer systématiquement les impacts environnementaux dans les comparaisons d'engrais azotés. L'augmentation de la part de l'azote absorbé par la plante avec l'ammonitrate réduit les risques de perte d'azote dans l'environnement. Une partie de cet azote améliore le rendement et la teneur en protéine, une autre partie conservée dans les racines et les résidus de récolte est remise à disposition par la minéralisation l'année suivante. Ces écarts d'efficacité liés à la forme d'engrais utilisé pourraient être caractérisés par une approche bilan à l'échelle de la succession culturale et par une Analyse du Cycle de Vie. De même, il conviendra de travailler à la prévision du risque de volatilisation ammoniacale afin de réduire l'écart entre formes et de concourir à augmenter l'efficacité de chaque kg d'azote minéral épandu.

(Nb : \*\*\* :  $p < 0.001$  \*\*  $p < 0.01$  \*  $p < 0.05$ )

*Les auteurs remercient Marine BOURY, Stagiaire de fin d'étude AgroCampus Ouest à l'UNIFA pour le travail de synthèse réalisé sur les résultats du réseau d'essai.*

## INTRODUCTION

Les engrais azotés minéraux contribuent de manière importante à la production alimentaire mondiale puisqu'on estime que la moitié de la population est nourrie grâce à leur utilisation (Erisman et al. 2008). Toutefois, l'efficacité de l'azote apporté est variable et, en fonction des conditions climatiques, des cultures concernées, des systèmes d'exploitation et des itinéraires techniques, la valorisation de l'azote diffère. Les pertes d'azote associées à l'utilisation d'engrais azotés représentent un préjudice économique pour l'agriculteur mais génèrent également des impacts négatifs sur les écosystèmes, la santé humaine ou le climat. Continuer à gagner en efficacité de l'azote apporté est l'objectif de la fertilisation raisonnée et cela nécessite une meilleure connaissance des atouts et des limites des différents engrais azotés disponibles sur le marché.

Les pertes d'azote peuvent avoir lieu par lixiviation des ions nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ). Ce phénomène se produit quand de l'azote nitrique se trouve entraîné au-delà de la profondeur d'enracinement par la lame d'eau drainante. Ces fuites d'azote dans les eaux de surface ou souterraines ne varient pas selon le type d'engrais utilisé, que ce soit ammonitrate ou urée (Macdonald et al., 2006). De l'azote peut également être émis sous forme d'oxyde d'azote lors de la nitrification et surtout pendant la dénitrification quand les conditions ne permettent pas une réduction complète du nitrate en diazote ( $\text{N}_2$ ). D'autres pertes d'azote sous forme gazeuse, potentiellement plus importantes, peuvent se produire à partir de l'ammonium par volatilisation. En effet, l'ammonium est en équilibre dans le sol avec l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), gaz qui est susceptible d'être volatilisé et perdu dans l'atmosphère. Différentes études et estimations des émissions en  $\text{NH}_3$  par les fertilisants minéraux ont été publiées ECETOC (1994), Sutton et al. (1995), Harrison et Webb (2001) et Sommer et al. (2004). Ces études concluent que les émissions de  $\text{NH}_3$  issues de l'utilisation de l'urée sont les plus variables (de 6 à 47 % de l'azote appliqué sous forme d'urée) et très dépendantes de nombreux facteurs (type de sols, conditions climatiques, doses appliquées). A l'inverse, les émissions liées à l'utilisation d'ammonitrate (haut dosage à 33.5 % et calcaire à 27 %) sont données comme étant plus faibles, n'excédant pas 4 % de l'azote apporté.

La volatilisation est potentiellement plus élevée pour l'urée qui subit une étape d'hydrolyse par des enzymes extracellulaires ubiquistes, des uréases (EMEP/EEA, 2009). L'azote de l'urée est d'abord hydrolysé en ammonium  $\text{NH}_4^+$  et ensuite transformé en nitrate  $\text{NO}_3^-$ . L'hydrolyse est assez rapide mais elle dépend des conditions du sol. Lors de la dissolution du granulé d'urée puis de l'hydrolyse de la molécule, le pH augmente fortement (jusqu'à une valeur de 9 (Fenn, 1988)) autour de la zone de dissolution. Cela entraîne un déplacement de l'équilibre  $\text{NH}_4^+ \leftrightarrow \text{NH}_3$  en faveur de  $\text{NH}_3$ . L'ammoniac en solution se volatilise facilement en ammoniac gazeux, gaz qui est alors perdu pour le système sol-plante. La volatilisation ammoniacale a été estimée en moyenne à environ 15 % de la dose d'azote apportée pour l'urée épandue en surface et à seulement 2 % pour les ammonitrates (CITEPA, 2012 d'après EMEP/EEA guidebook, 2009)), un facteur d'émission de 8 % de l'azote apportée est retenu pour les solutions azotées (composées de 50 % d'urée, 25 % ammonium et 25 % nitrate). Néanmoins, les incertitudes concernant ce phénomène sont importantes. A noter que les essais d'efficacité des différentes formes d'azote au champ, place souvent l'urée devant la solution azotée ce qui apparaît contradictoire avec les données de volatilisation (Cohan et al., 2013).

Ainsi, le devenir des engrais après l'épandage (absorption, organisation ou perte) est variable selon la forme de l'azote contenue dans l'engrais. Cela peut avoir une influence sur la culture et donc sur

l'efficacité de l'engrais utilisé. A l'échelle mondiale, l'utilisation directe par les plantes de l'azote provenant des engrais appliqués représente 50 % ou moins de la dose d'engrais apportée (Mosier A. R. et al. 2004). Le reste est soit immobilisé dans le sol, soit perdu dans les eaux souterraines ou de surface ou dans l'atmosphère. L'efficacité d'absorption d'un engrais azoté peut être décrite à l'aide du Coefficient Apparent d'Utilisation (CAU) de l'engrais que l'on définit ici comme étant la part de l'azote absorbé par la plante provenant de l'engrais par rapport à la dose d'engrais apportée.

Soit :  $CAU = (U_N - U_0) / X$  où  $U_N$  et  $U_0$  sont les quantités d'azote absorbées par la plante respectivement avec ou sans application d'azote et  $X$  la dose d'azote apportée (Hofman G., Van Cleemput O., 2004).

Cette efficacité dépend de l'absorption de l'azote par la plante, de la fourniture en azote par le sol et des pertes d'azote et donc, indirectement, des facteurs qui déterminent ces processus tels que l'espèce cultivée, la pluviométrie, la température, la rotation ou encore le travail du sol (Mosier A. R. et al., 2004). L'efficacité d'absorption peut être améliorée en essayant de synchroniser au maximum les apports avec les besoins de la culture. Résultat auquel on parvient aujourd'hui grâce au fractionnement des apports d'azote. Par ailleurs, l'efficacité peut également être améliorée par l'utilisation d'outils de pilotage en cours de végétation pour réaliser un épandage plus précis et éviter les carences ou excès. Enfin, la carence en d'autres nutriments tels que le phosphore ou le potassium peut diminuer l'absorption d'azote par la plante et donc l'efficacité de l'engrais (Mosier A. R. et al., 2004).

Les engrais minéraux ou organiques sont aussi à considérer d'un point de vue environnemental. L'azote des engrais peut se transformer en différentes formes via le cycle de l'azote. Chaque forme a un impact sur l'environnement. C'est ce qu'on appelle la cascade de l'azote. L'utilisation des engrais minéraux conduit à une augmentation de la quantité d'azote réactif (toutes formes d'azote hors le diazote  $N_2$ ) introduit dans la biosphère et intensifie la cascade de l'azote. Les impacts environnementaux s'enchaînent avec la possibilité d'une accumulation d'azote réactif dans certains compartiments de l'environnement (GIS GC HP2E, 2007).

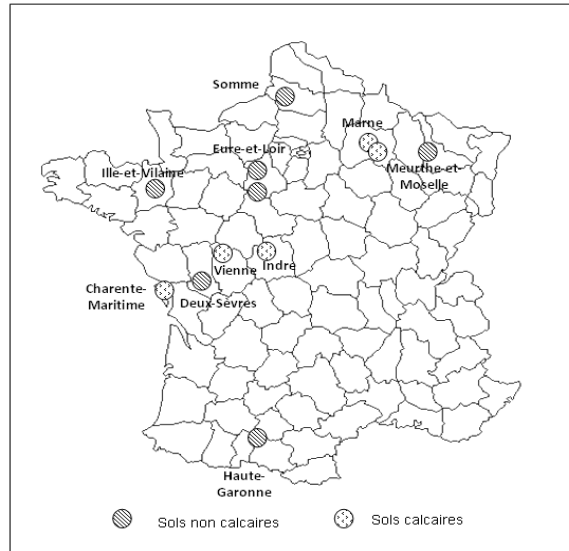
A l'échelle mondiale, 55 % de l'azote minéral apporté est sous forme d'urée (IFA, 2011). En France, l'ammonitrate (33.5 % et 27 %) représente 50 % des quantités d'azote minéral épandues contre 30 % pour la solution azotée et environ 15 % pour l'urée (UNIFA, 2013). Au-delà du raisonnement de la dose optimale et de la date d'apport, le choix de la forme d'azote constitue un levier important pour gagner en efficacité de l'azote apporté et réduire ainsi les impacts environnementaux qui en découlent. La question de l'expérimentation pour comparer l'efficacité de différents engrais n'est pas nouvelle et des études sur ce sujet ont déjà été publiées. En France, Arvalis et Yara ont mené, entre 1994 et 1995, des essais comparant ammonitrate et solution azotée sur blé tendre d'hiver qui ont conduit à confirmer les majorations de dose de solution azotée de 10 à 15 % par rapport à l'ammonitrate selon les types de sol pour compenser les écarts d'efficacité entre ces deux engrais (Le Souder C., Taureau J-C., 1997b).

Pour comparer l'efficacité entre ammonitrate et urée, 26 essais réalisés en Angleterre et au Pays de Galles entre 1983 et 1985 pour des sols crayeux ou à pH élevé et des céréales d'hiver (blé ou orge) ont montré que la quantité d'azote absorbé dans les grains était plus importante avec un apport d'ammonitrate qu'avec un apport d'urée (+ 2,5 %) et que la concentration en azote dans les grains était en général plus faible pour l'urée mais qu'il n'y avait pas de différences pour le rendement en

grains (Lloyd et al., 1997). Toujours au Royaume-Uni, le DEFRA a mis en place de 2002 à 2005 un programme de recherche destiné à étudier les possibles conséquences de la substitution des formes d'engrais azotés sur l'agriculture et sur l'environnement en comparant les engrais à base d'urée et ceux à base d'ammonitrate. Parmi les nombreux résultats de ces expérimentations, 10 essais sur céréales d'hiver entre 2004 et 2005 ont permis de conclure qu'en moyenne, il fallait majorer la dose d'urée d'environ 20 % pour obtenir des rendements et des exportations d'azote équivalents à ceux obtenus avec l'ammonitrate (Dampney et al., 2006).

Enfin, Sylvester et al. (2012) ont repris les données et résultats de ces deux études britanniques totalisant 47 essais pour les traiter simultanément et ont montré que l'efficacité de l'urée représentait 90 % de celle de l'ammonitrate. Toutes ces études comparatives fournissent des conclusions intéressantes mais celles-ci sont principalement valables pour des céréales d'hiver (blé tendre ou orge) et dans le cadre d'une fertilisation annuelle.

Des travaux non publiés, établis par BASF (Pasda et al.) au début des années 2000, montrent la possibilité d'un « effet historique » de la forme d'azote utilisé. Les écarts d'efficacité, au profit de l'ammonitrate par rapport à l'urée, ont tendance à augmenter d'année en année quand on compare à l'échelle de la succession culturelle des modalités fertilisées tous les ans avec la même forme. Il nous est donc apparu pertinent pour mieux caractériser l'efficacité de l'urée et de l'ammonitrate utilisé en France, de mettre en place un réseau d'essais à l'échelle de la succession des cultures d'une rotation type.



## **1. PRESENTATION DU RESEAU EXPERIMENTAL**

La figure 1 présente la localisation des 12 sites du réseau d'essais. Mis en commun par les différents partenaires, le réseau est constitué de deux essais initiés par YARA dès 2002, un essai suivi par ARVALIS et le CETIOM, un site conduit par INVIVO (Corea) et 8 sites gérés par l'UNIFA. Les années d'expérimentation vont de 2002 à 2012, chaque site ayant généralement une durée d'expérimentation de 4 à 6 ans. Tous les essais n'ont pas débuté la même année et certains continuent encore aujourd'hui pour la campagne 2013/14. Au total, les données de 52 essais (année-site) sont disponibles.

La rotation pratiquée sur ce réseau est une rotation colza-blé-orge avec principalement du blé tendre d'hiver et de l'orge d'hiver mais aussi parfois du blé dur ou de l'orge de printemps.

Site	Période d'expérimentation	Commanditaire	Succession culturale	Type de sol
28	2002-2007	YARA	Maïs-bth-op-colza-bth-op	Non calcaire
51	2002-2006	YARA	Betterave-bth-oh-colza-bth	Calcaire
54	2007-2011	UNIFA	Colza-bth-oh-colza-bth	Non calcaire
28	2007-2012	UNIFA	Maïs-bth-op-colza-bth-op	Non calcaire
51	2007-2012	UNIFA	Pdt*-bth-op-colza-bth-oh	Calcaire
36	2007-2012	UNIFA	Op-colza-bth-oh-colza-bd	Calcaire
86	2007-2012	UNIFA	Bth-colza-bth-oh-colza-bd	Calcaire
31	2007-2012	UNIFA	Sorgho-bth-oh-colza-bd-oh	Non calcaire
35	2007-2012	UNIFA	Maïs-bth-oh-colza-bth-oh	Non calcaire
80	2007 puis 2009-2011	UNIFA	Betterave -x- oh-colza-bth	Non calcaire
17	2008-2012	Arvalis-Cetiom	Bd-colza-bth-oh-colza	Calcaire
79	2010-2012	InVivo-Corea	Maïs-bth-colza	Non calcaire

\* Pdt = Pomme de terre

Blé tendre d'hiver = **bth**, Blé dur = **bd**, Orge d'hiver = **oh**, Orge de printemps = **op**, Colza d'hiver = **colza**

### Tableau 1: Caractéristiques des sites d'essais

Au total, sur les 52 essais, 20 blés (18 bth et 2 bd), 16 orges (10 oh et 6 op) et 15 colzas se sont succédés. Le tableau 1 présente les caractéristiques des sites d'essais : période d'expérimentation, commanditaire, succession culturale, nature du sol (calcaire-non calcaire). Un sol est considéré comme calcaire si les deux conditions suivantes sont réunies : pH eau > 7,5 et CaCO<sub>3</sub> total > 5 %. Parmi les 12 sites d'expérimentation, 7 sont en sol non calcaire et 5 sont en sol calcaire.

## **2. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL**

Le protocole d'expérimentation est commun à chaque essai. Le dispositif expérimental utilisé est un split-plot factoriel à quatre répétitions donc 4 blocs. En grandes parcelles se trouve le facteur « passé de fertilisation » à deux modalités : ammonitrate et urée. La première année d'expérimentation est une année de différenciation qui permet de créer le dispositif. Pour cela, les quatre blocs sont mis en place et dans chacun, une moitié est fertilisée avec de l'ammonitrate et l'autre moitié avec de l'urée. C'est le facteur « passé de fertilisation » des années suivantes. Pendant cette année, la culture n'est pas forcément une des cultures de la rotation prévue (tableau 1). On ne tient pas compte de cette première année dans les analyses.

Dès la deuxième année, on segmente chacune de ces grandes parcelles en quatre zones. Annuellement, une de ces zones reçoit les 11 parcelles élémentaires « courbe de réponse ». Il s'agit d'un dispositif factoriel randomisé avec deux facteurs : un facteur « fertilisation annuelle » à deux

modalités (ammonitrate et urée) et un facteur « dose d'azote » à 5 modalités centrées sur la dose X (X-80, X-40, X, X+40, X+80) ; ces modalités étant définies par rapport à la dose bilan X calculée par la méthode du bilan prévisionnel de l'azote du COMIFER pour chaque essai. En plus de ces dix parcelles élémentaires, une parcelle « témoin » qui ne reçoit pas d'azote l'année étudiée est mise en place. Les témoins 0 se distinguent entre eux uniquement par leur passé de fertilisation. Les trois autres zones de chaque sous-bloc sont fertilisées tous les ans avec le même engrais que pour le passé de fertilisation à la dose bilan X. Ce sont des zones « en réserve » qui ont reçu ou recevront les 11 modalités courbes de réponse.

L'année suivante, les 11 parcelles élémentaires sont situées sur une autre des 4 zones de chaque sous-bloc. La cinquième année, on revient sur la zone qui a reçu les 11 modalités du dispositif factoriel 4 ans auparavant. On suppose qu'il n'y a pas de biais lié à l'arrière-effet de ces différentes doses.

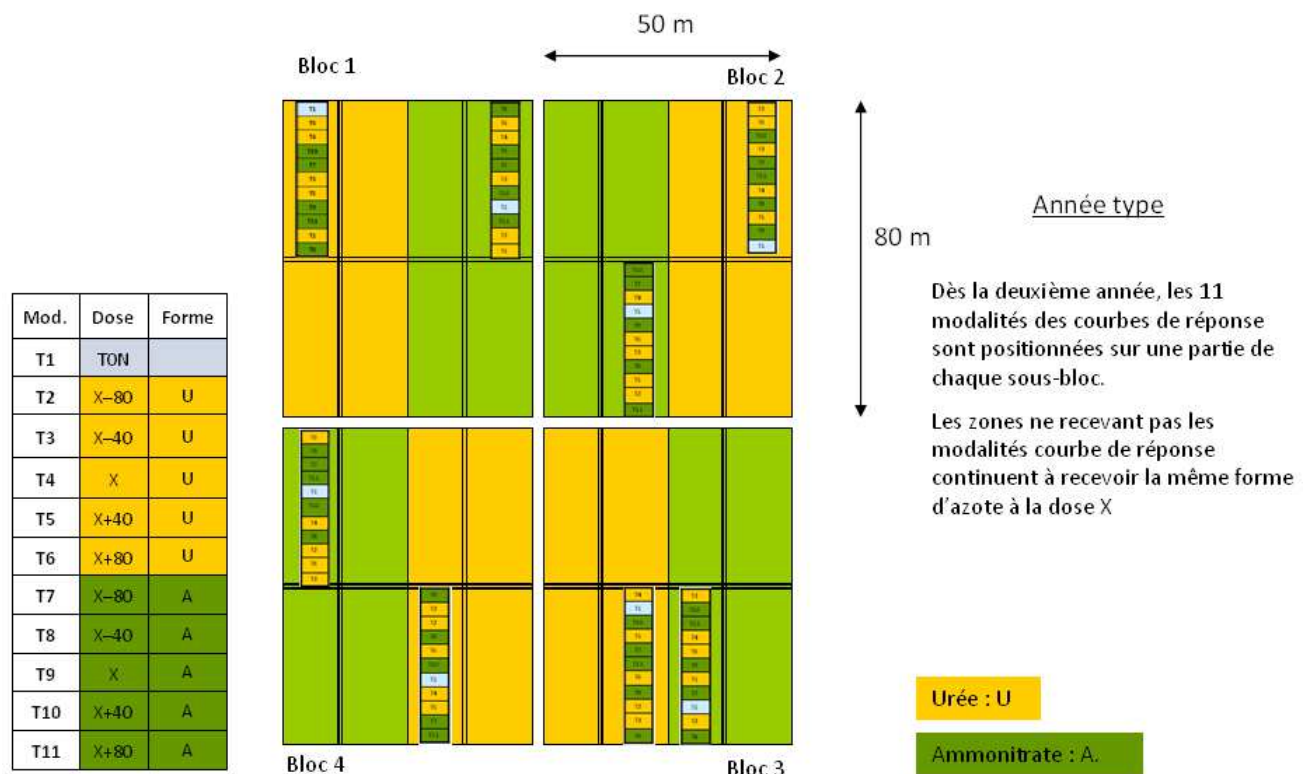


Figure 1 : Plan type d'un essai une année donnée

La figure 2 présente un plan type du dispositif expérimental une année donnée. Les parcelles élémentaires ont une taille de 3 m x 10 m. Au total, l'emprise de l'essai approche les 2 hectares.

Enfin, l'itinéraire technique mis en place sur les essais ne doit pas permettre d'avoir d'autres facteurs limitant que l'azote. Par exemple, un apport systématique de soufre sous forme sulfate est réalisé en sortie d'hiver. Seuls les apports d'azote sont réalisés par l'organisme expérimentateur ; le reste est fait par l'agriculteur qui cultive la parcelle.



Au final, chaque année, 4 conduites de fertilisation sont donc obtenues notées par convention :

{ApA} : fertilisation tous les ans avec de l'ammonitrate

{UpU} : fertilisation tous les ans avec de l'urée

{ApU} : fertilisation avec de l'ammonitrate l'année de récolte avec de l'urée appliquée les années précédentes

{UpA} : fertilisation avec de l'urée l'année de récolte avec de l'ammonitrate appliquée les années précédentes

### **3. Variables collectées sur les essais**

Pour chaque site d'essai, une analyse de terre de départ est réalisée. De plus, chaque année, l'itinéraire cultural de chaque parcelle est enregistré, avec le détail de la fertilisation appliquée hors protocole. Enfin, pour chaque essai, des variables de contrôles ou relatives à la production de grains récoltés, la qualité des grains et l'azote absorbé par la culture sont disponibles.

**Variables mesurées :** Reliquats azotés sortie hiver, pesées des biomasses sortie hiver (colza), outil de pilotage du 3ème apport d'azote (N-tester ou GPN Pilot), comptage épis (céréales), PMG, nombre de grains/m<sup>2</sup>, Rendement, teneur en protéines, teneur en huile (colza), teneur en azote des grains et de la paille, azote absorbé plante entière

### **4. Résultats et discussions**

#### **4.1. Définition des principaux effets « formes d'azote » présentés**

##### **Effet forme N « annuel »:**

comparaison directe des résultats de chaque forme d'engrais mesurés l'année de récolte indépendamment de la forme d'azote appliquée les années antérieures : soit la comparaison des modalités {ApA&ApU} versus modalités { UpA&UpU}.

L'effet forme N « annuel » correspond en réalité à l'approche traditionnelle des essais de comparaison de formes d'azote tels qu'ils sont pratiqués le plus souvent. On mesure directement l'effet de l'engrais apporté l'année de récolte.

**Effet « passé » de fertilisation :** comparaison des résultats obtenus sur la culture en fonction de la forme d'engrais appliquée les années antérieures indépendamment de la forme d'azote apportée l'année de récolte :

soit la comparaison des modalités { ApA&UpA} versus modalités { ApU&UpU}.

**Effet « système » de fertilisation :** comparaison des résultats obtenus sur la culture en fonction de l'utilisation exclusive d'une unique forme d'azote tous les ans. soit la comparaison des modalités {ApA} versus modalités { UpU}.

#### **4.2. Indice de rendement :**

Afin de pouvoir globaliser les comparaisons pour toutes les cultures de la succession, par convention, nous avons considéré un indice 100 % correspondant au rendement obtenu avec un traitement de

référence Ammonitrate avec passé Ammonitrate à la dose du bilan X (X ApA), tous les autres traitements sont exprimés relativement au traitement de référence.

#### **4.3. Qualité du réseau d'essai :**

Sur les 52 situations (année x essai) disponibles, nous pouvons considérer la précision des essais comme satisfaisante avec 80 % de coefficients de variations inférieurs à 6 %, à l'exception d'un des essais dont l'écart-type a été régulièrement élevé à très élevé chaque année. Néanmoins, seul essai du réseau situé dans la région Midi-Pyrénées, il a été conservé dans les analyses fréquentielles. Seule l'année 2011 avec une absence de réponse à l'azote et un CV très élevé a été éliminée de l'analyse. Classiquement, les essais colza présentent des écart-types résiduels supérieurs aux céréales à paille.

#### **4.4. Mise en évidence des différents effets formes d'azote**

La variable étudiée est le rendement de chaque culture

##### **4.4.1. Approche par l'analyse de variance et la méthode des contrastes :**

La synthèse des analyses de variances et des tests par la méthode des contrastes permettent d'établir les résultats suivants : - Un effet « annuel » significatif (seuil  $\alpha = 10\%$ ) de la forme d'azote est mis en évidence dans 58 % des situations. Le sens de l'effet est en faveur de l'ammonitrate dans 9 cas sur 10 avec un différentiel de rendement de + 3.2 % en moyenne. Un effet annuel significatif en faveur de l'urée existe néanmoins mais dans seulement 2 essais. L'effet global du « passé de fertilisation » n'est statistiquement mis en évidence par l'analyse de variance que dans 17 % des situations. Ce constat résulte en grande partie du fait que ce facteur est disposé par construction en sous-bloc dans les dispositifs expérimentaux et présente en conséquence une plus faible précision. Testé par la méthode des contrastes sur les témoins non fertilisés, cet effet devient significatif dans 46 % des situations. Dans 9 cas sur 10, l'effet « passé de fertilisation est en faveur de la forme ammonitrate avec un différentiel de +5.2 % de rendement. - enfin testé par la méthode des contrastes, l'effet « système » correspondant à l'utilisation d'une forme d'azote unique chaque année se révèle globalement significatif dans près de 7 cas sur 10, atteignant près de 8 cas sur 10 pour les traitements limitant en azote (dose N < X). A l'inverse, l'effet « système » est moins fréquemment significatif à mesure que la dose d'azote augmente : moins de 4 cas sur 10 à la dose Bilan X. L'effet « système » est quasi exclusivement en faveur de la forme Ammonitrate avec un différentiel moyen de + 5.7 à 7.4 % de rendement.

	ANOVA	méthodes des contrastes sur doses particulières		
	globale	X	N < X	To
<b>annuel</b>	58 %	37 %	46 %	
<b>passé</b>	17 %			46 %
<b>système</b>	69 %	35 %	77 %	46 %

Tableau 2 : Fréquence des effets formes d'azote significatifs (seuil  $\alpha = 10\%$ ) déterminés par l'analyse de variance globale et par la méthode des contrastes appliquée à différentes doses d'azote : dose bilan X, dose d'azote < X et témoins non fertilisés.

Sens des effets	écart global		dose X		N < X	
	% des cas	écart moyen (%)	% des cas	écart moyen (%)	% des cas	écart moyen (%)
<b>Effet "annuel"</b>	30 situations					
<b>Ammo &gt; Urée</b>	93 %	+ 3.2 %	85 %	+ 4.9 %	100 %	+ 3.6 %
Urée > Ammo	7 %	- 1.0 %	15 %	- 3.1 %		
<b>Effet "passé"</b>	9 situations					
<b>Ammo &gt; Urée</b>	90 %	+ 5.2 %				
Urée > Ammo	10 %	- 4.3 %				
<b>Effet "système"</b>	35 situations					
<b>Ammo &gt; Urée</b>	98 %	+ 5.7 %	100 %	+ 7.4 %	98 %	+ 5.8 %
Urée > Ammo	2 %	- 6.2 %			2 %	- 6.60 %

Tableau 3 : Répartition des effets formes selon la forme la plus performante : fréquence et effet moyen sur l'indice de rendement : effet global tous traitements confondus et effet pour certaines doses particulières (dose bilan X, dose d'azote < X). Ecarts exprimés en % (base 100 % = rendement dose X « ApA »)

### 1.1.1. Approche par l'ajustement de fonction de production et le test des modèles emboîtés.

La variable étudiée est le rendement de chaque culture

#### **Choix d'un modèle de fonction de production:**

Préalablement à la réalisation des tests par les modèles emboîtés, une sélection de la fonction de production (rendement – dose N) offrant le meilleur compromis qualité-facilité d'ajustement statistique et pertinence agronomique a été réalisé parmi 3 modèles candidats :

- modèle quadratique Q:  $\text{Rendement} = a + b N + c N^2$
- modèle exponentiel modifié Adas :  $\text{Rendement} = a' + b' N + c' 0.99^N$
- modèle quadratique-plateau QP :  $\text{Rendement} = a + b N + c N^2$  si  $N \leq N_{opt}$  sinon  $R_{opt}$

Le modèle QP a finalement été identifié comme celui offrant le meilleur compromis bien qu'il ne puisse rendre compte des cas de courbes de réponses décroissantes notamment dans le cas de chutes de rendement liées à la verse. Contrairement aux 2 autres modèles qui présentent des biais de sur ou sous-estimation, le modèle QP est un estimateur non biaisé du rendement mesuré à la dose X du bilan (cf. 5.4.5). Il offre le meilleur ajustement dans la plupart des situations (43/50) néanmoins le modèle exponentiel modifié a été retenu dans les cas de courbes de réponses décroissantes au-delà de la dose optimale (7/50).

**Principe :**

Après ajustement statistique d'un modèle de courbe de réponse aux points expérimentaux de chaque essai, la significativité de chacun des effets formes d'azote est testée statistiquement en confrontant un modèle « complet » qui distingue chaque effet à un modèle « unique » qui, par hypothèse, confond chaque effet. Un test de Fisher appliqué à la différence de Sommes de Carrés des Ecartés de chaque modèle permet de déterminer si le modèle « complet » est statistiquement différent du modèle « unique » et que, dès lors, l'effet forme d'azote testé est significatif ou non. En d'autres termes, s'il convient ou non de distinguer les 2 courbes de réponse.

**Les comparaisons réalisées :**

Existence d'un effet forme N « global »

modèle complet : 1 modèle comportant 1 courbe de réponse pour chacune des 4 modalités de fertilisation {ApA}{UpA}{ApU}{UpU} comparé à un modèle unique avec une seule courbe de réponse pour les 4 modalités {ApA&UpA&ApU&UpU}

Existence d'un effet forme N « annuel » :

modèle complet : 1 modèle comportant 1 courbe de réponse pour chacune des 2 formes N annuelles {ApA&ApU}, {UpA&UpU} comparé à un modèle unique avec une seule courbe de réponse pour les 4 modalités {ApA&UpA&ApU&UpU}

Existence d'un effet forme N « passé de fertilisation » :

modèle complet : 1 modèle comportant 1 courbe de réponse pour chacun des 2 « passés » de fertilisation {ApA&UpA}, {ApU&UpU} comparé à un modèle unique avec une seule courbe de réponse pour les 4 modalités {ApA&UpA&ApU&UpU}

Existence d'un effet forme N « système de fertilisation » :

Modèle complet : 1 modèle distinguant chaque système de fertilisation {ApA}, {UpU} comparé à un modèle unique globalisant les 2 modalités

## Résultats

Les tests par les modèles emboîtés dans l'hypothèse où le meilleur modèle par essai est sélectionné permettent de dresser les conclusions suivantes:

Il existe un effet forme d'azote « global » significatif (seuil  $\alpha = 10\%$ ) dans 66 % des situations. L'effet « passé » de fertilisation est significatif dans 56 % des situations.

L'effet « annuel » est significatif dans 30 % des situations.

L'effet « système » est significatif dans 58 % des situations.

effet forme N (seuil $\alpha = 10\%$ )	existence	annuel	passé	système
<b>Meilleur modèle/essai</b>	<b>66 %</b>	<b>30 %</b>	<b>56 %</b>	<b>58 %</b>
<b>Quadratique-Plateau</b>	<b>53 %</b>	<b>27 %</b>	<b>37 %</b>	<b>57 %</b>
<b>Quadratique</b>	53 %	24 %	51 %	53 %
<b>Exponentiel modifié Adas</b>	61 %	25 %	33 %	61 %

Tableau 4 : Fréquence des effets formes d'azote significatifs révélés par les tests des modèles emboîtés pour le modèle Quadratique-Plateau, Quadratique et exponentiel modifié ADAS. Variable étudiée = rendement

### Commentaires :

L'approche par la comparaison de modèles emboîtés présente quelques points de divergence avec l'approche par l'analyse de variance : l'effet forme N annuel est moins souvent mis en évidence par les modèles emboîtés (30 % contre 58 %) alors qu'à contrario l'effet du passé de fertilisation ressort plus fréquemment (56 % contre 17 %). Les 2 approches font par contre ressortir une fréquence élevée d'effet « système » statistiquement significatifs entre 69 % et 58 %.

Les limites de cette approche : Les ajustements de courbes de réponse ont été réalisés sur les rendements moyens par dose d'azote et la précision de chaque essai n'est donc pas intégrée. Le poids relatif du témoin non fertilisé qui intervient dans chaque ajustement de courbe est important. Ce qui explique probablement en partie les divergences avec les résultats de l'analyse de variance classique.

Quel que soit le modèle choisi, dans 20 à 24 % des situations avec l'ammonitrate et dans 40-45 % des situations avec l'urée, la dose d'azote optimale « technique » ajustée dépasse la dose maximale testée dans les essais ( $X + 80$ ). La comparaison des optima de chaque forme n'est donc pas toujours possible. Cette approche présente également 2 inconvénients : elle n'intègre pas la dimension économique (prix de la culture et prix des engrais) et les optima techniques obtenus sont supérieurs de 15 à 23 % aux doses  $X$  prévues par la méthode des bilans.

#### 1.1.1. Courbes de réponses

Les deux approches précédentes sur le rendement des cultures ont montré que l'effet forme d'azote quelle que soit sa modalité (annuel, passé, système) se révélait statistiquement significatif (seuil  $\alpha = 10\%$ ) dans près d'une situation sur deux, l'effet « système » étant celui le plus fréquemment mis en évidence. Néanmoins, malgré la bonne précision enregistrée dans le réseau d'essais, il convient de reconnaître que les différences qu'il est possible de mettre en évidence au sens statistique sont souvent supérieures à ce que l'agronome ou le gestionnaire estime « intéressant ». Selon les cultures, des différences de 1.5 à 3 q/ha sont quasi impossibles à mettre en évidence alors qu'elles représentent l'ordre de grandeur des différences entre les facteurs étudiés. L'alourdissement des dispositifs expérimentaux unitaires afin de leur donner la puissance statistique nécessaire n'est pas compatible avec les budgets expérimentaux et la nécessité d'établir des références dans différents milieux et sur plusieurs années. Dès lors, seule l'accumulation d'un nombre important d'expérimentations permet l'analyse d'écart, qui pris individuellement, ne sont pas différents au sens statistique mais qui par leur fréquence et leur récurrence permettent d'approcher les différences recherchées. Ce constat est particulièrement avéré pour la réponse des cultures à la fertilisation azotée compte tenu de la forte variabilité affectant la nutrition minérale des cultures et l'efficacité des engrais. En effet, les principales pistes pouvant expliquer les différences entre formes d'azote : pertes gazeuses par volatilisation ammoniacale et dénitrification, organisation microbienne, voire lixiviation sont sous la dépendance des variables pédo-climatiques.

### Les courbes de réponses « moyennes ».

Dans un premier temps, et afin d'avoir une vision globale des résultats de ce réseau d'essais, des courbes de réponses moyennes centrées sur la dose X, reliant l'indice de rendement à la dose N, ont été réalisées.

Par construction, et pour permettre une comparaison pluriannuelle indépendamment des espèces récoltées (colza, blé orge), le rendement à la dose X pour le traitement ApA (Ammonitrate passé Ammonitrate) a été défini à 100 %, toutes les autres traitements sont exprimés relativement à cette valeur.

Chaque situation (1 essai-1 année) permet la réalisation de 4 courbes de réponses élémentaires {ApA, UpA, ApU, UpU} telles que représentées sur la figure 3.

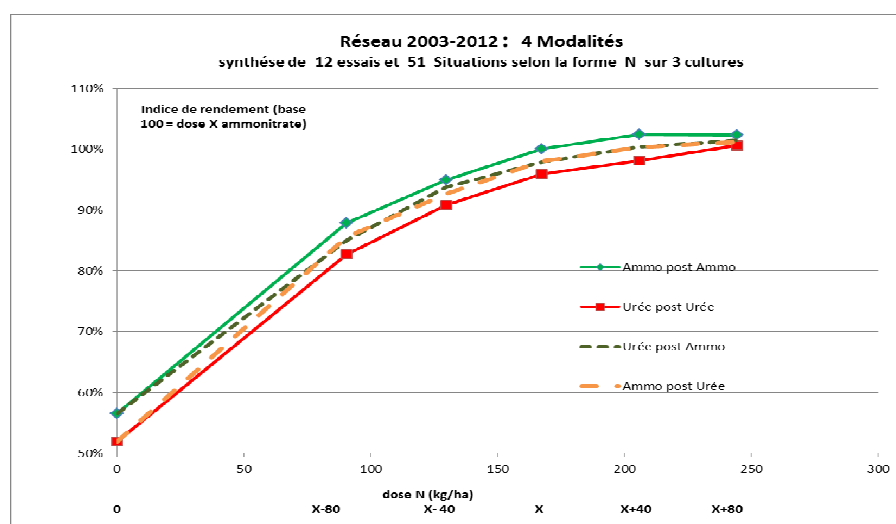


Figure 3 : Représentation des 4 courbes de réponse moyennes obtenues sur les 51 situations – comparaison des conduites « ApA » en vert = ammonitrate appliquée tous les ans, « UpU » en rouge = Urée appliquée tous les ans, « UpA » : urée l'année de récolte avec fertilisation antérieure avec l'ammonitrate en vert pointillé et « ApU » : ammonitrate l'année de récolte avec fertilisation antérieure avec de l'urée en orange pointillé.

D'un point de vue opérationnel, ces 4 courbes ne représentent pas des réalités pratiques semblables. Ainsi les courbes ApU et UpA sont la résultante du dispositif expérimental et ne correspondent pas réellement à une véritable pratique agricole. A l'inverse, les courbes ApA et UpU correspondent à des pratiques de fertilisation utilisant un engrais azoté unique chaque année tel qu'il est possible d'en rencontrer.

Les courbes de réponse moyennes des conduites de fertilisation « mixtes » ApU et UpA se positionnent de manière intermédiaire entre les conduites ApA et UpU qui paraissent extrémiser les réponses vis-à-vis de la forme d'azote utilisée.

### L'effet « annuel »

Le regroupement, d'une part des courbes de réponses ApU & ApA et, d'autre part, des courbes de réponse UpA & UpU permet d'établir des comparaisons faisant finalement abstraction de la forme d'azote appliquée les années antérieures. Nous sommes ramenés dans cette configuration, à la comparaison classique des formes d'azote sur une base uniquement annuelle telle que cette problématique est le plus souvent abordée par la plupart des expérimentateurs.

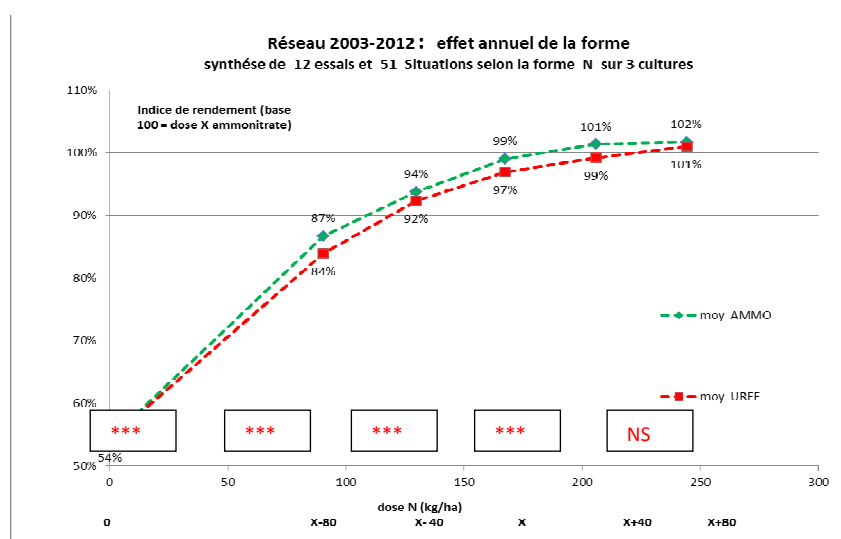


Figure 4: Courbes de réponses moyennes

– comparaison des conduites annuelles « ApA & ApU » en vert pointillé = versus « UpU & UpA » en rouge pointillé.

Les résultats du test t de Student pour chaque modalité de dose ( X-80 ,X-40 ,X ,X+40, X+80 ) sont reportés

\*\*\* = très hautement ,

NS : non significatif.

La courbe de réponse moyenne ainsi obtenue est représentée sur la figure 4 avec les indices de rendement moyens calculés. Cette courbe de réponse décrit ce que nous avons qualifié d'effet « annuel » dans la mesure où chaque forme comparée intègre les 2 types de passé de fertilisation.

Les écarts d'indices de rendement testés par le t de Student sur chacune des doses sont tous significativement différents (\*\*\*, n = 102) à l'exception de la dose X+80 (NS). Sur les autres doses, l'écart moyen est relativement constant autour de 2 %.

### L'effet « système »

La comparaison des courbes de réponses moyennes ApA et UpU laisse apparaître un différentiel entre formes de l'ordre de 4% en moyenne plus important que dans l'approche annuelle comme l'illustre la figure 5.

Les différences s'avèrent significatives à chacune des doses (t de Student, n=51).

Comparé à l'approche annuelle, le différentiel d'indice de rendement est doublé. Cet écart résulte pour partie de l'effet « annuel » déjà évoqué mais également de l'effet « passé » de fertilisation dont l'illustration la plus flagrante est donnée par les indices obtenus sur les parcelles non fertilisées qui diffèrent

Significativement selon le passé de fertilisation azotée. Les parcelles avec un historique ammonitrate ont un indice de rendement supérieur de 5 % comparées aux témoins avec passé urée.

Le décalage des courbes de réponse est largement expliqué par le décalage constaté sur les témoins non fertilisés. Comme pour l'approche annuelle, les différences entre formes se réduisent aux plus fortes doses.

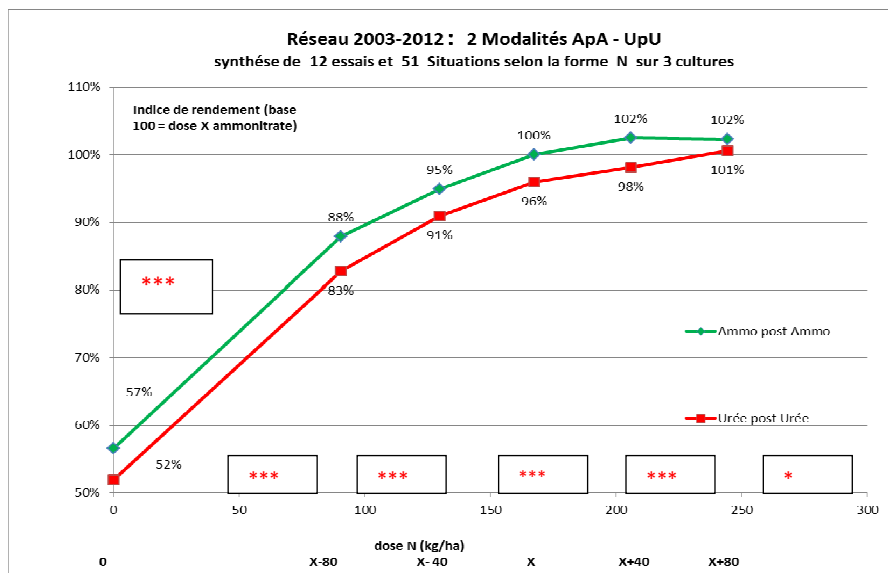
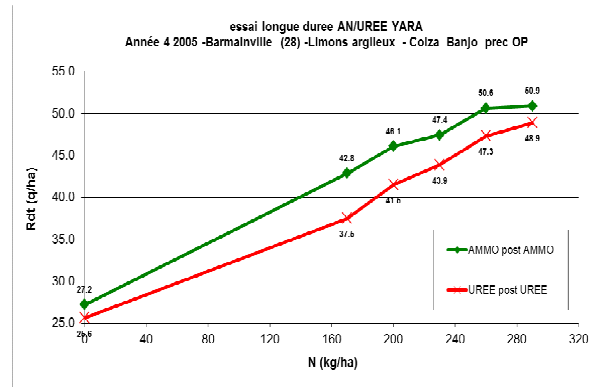
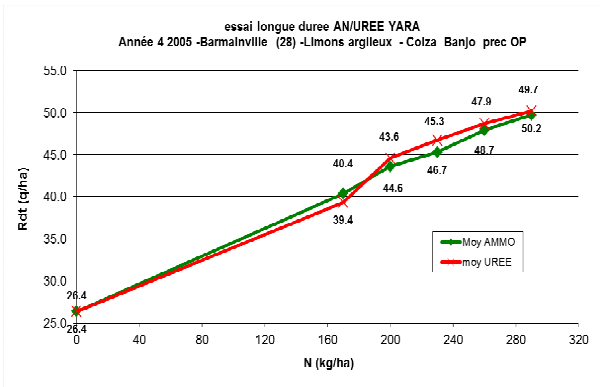


Figure 5 : courbes de réponse moyennes – comparaison des conduites « ApA » en vert = ammonitrate appliquée tous les ans versus « UpU » en rouge = Urée appliquée tous les ans .

Les résultats du test t de Student pour chaque modalité dose (To , X-80 ,X-40 ,X ,X+40 , X+80 ) sont reportés \*\*\* = très hautement significatif , \* = significatif ,NS : non significatif





La comparaison des 2 approches précédentes « vision annuelle » ou « vision système » démontre que l'amplitude de la différence entre forme d'azote dépend du point de vue adopté. Il est d'ailleurs très illustratif de documenter à l'aide d'un exemple les conclusions parfois différentes qui peuvent être tirées selon le point de vue adopté, le cas de la figure 6 ci-dessous a été constaté à plusieurs reprises dans le réseau d'essais :

Vision « annuelle »

vision « système »

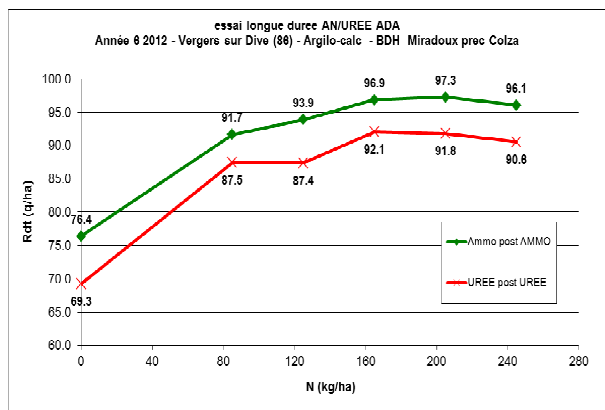
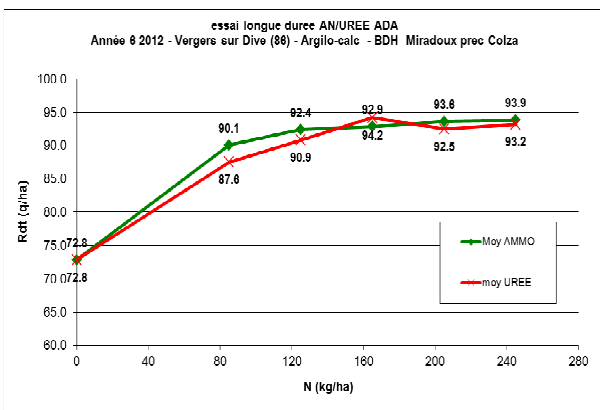


Figure 6: Illustration sur 2 sites expérimentaux de la dualité des conclusions possibles selon qu'une vision « annuelle » ou «système» de l'effet forme d'azote est considérée :

A gauche : courbe de réponse moyenne UpA et UpU en vert (« moy AMMO») comparée à la courbe de réponse des conduites UpA et UpU en rouge (moy UREE). L'effet forme d'azote « annuel » est non significatif par le test des modèles emboîtés ( $p > 0.94$ ). A droite: courbes de réponses à l'azote en vision « système » – comparaison des conduites ApA en vert (AMMO post AMMO) = ammonitrate appliquée tous les ans versus UpU en rouge (UREE post UREE) = Urée appliquée tous les ans. L'effet forme d'azote est hautement significatif ( $p < 0.01$ ) par le test des modèles emboîtés.

### 1.1.1. Quantification des écarts entre formes d'azote pour les principales variables selon les effets

Les moyennes par traitements des principales variables mesurées sur le réseau d'essais ont fait l'objet de comparaison dont les principaux résultats sont détaillés dans les tableaux 6 -7 -8

Les comparaisons réalisées à la dose X pour les différents effets sont résumés dans le tableau 5 ci-dessous.

La dose X moyenne sur l'ensemble du réseau se situait à 167 kg N/ha répartie en 182 N sur les blés, 175 N pour le colza et 144 N pour les orges.

**Tableau 5 : Ecarts sur les principales variables mesurées (rendement, azote absorbé plante entière et grain) à la dose bilan X et CAU calculé pour N < dose optimale selon les effets formes d'azote considérés**

ECARTS à la dose X m = 167 N	Témoins non fertilisés			Effet "Annuel"			Effet "Passé"			Effet "Système"		
	écart	test t	n	écart	test t	n	écart	test t	n	écart	test t	n
indice de rendement C-B-O	<b>4.7%</b>	<b>***</b>	(51)	<b>2.1%</b>	<b>***</b>	(102)	<b>1.9%</b>	<b>***</b>	(102)	<b>4.1%</b>	<b>***</b>	(51)
Rendement												
q/ha Blé	<b>3.9</b>	<b>***</b>	(20)	<b>1.4</b>	<b>**</b>	(42)	<b>1.3</b>	<b>**</b>	(42)	<b>2.7</b>	<b>***</b>	(20)
q/ha Orge	<b>4.2</b>	<b>**</b>	(16)	<b>1.3</b>	<b>*</b>	(32)	<b>1.8</b>	<b>*</b>	(32)	<b>3.1</b>	<b>**</b>	(16)
q/ha Colza	<b>1.8</b>	<b>**</b>	(15)	<b>1.2</b>	<b>**</b>	(30)	<b>1.1</b>	<b>*</b>	(30)	<b>2.4</b>	<b>***</b>	(15)
Azote absorbé PE												
kg N/ha Blé	<b>13</b>	<b>**</b>	(14)	<b>14</b>	<b>***</b>	(28)	<b>4</b>	<b>NS</b>	(38)	<b>19</b>	<b>***</b>	(14)
kg N/ha Orge	<b>7</b>	<b>**</b>	(13)	<b>7</b>	<b>*</b>	(26)	<b>8</b>	<b>**</b>	(16)	<b>15</b>	<b>***</b>	(13)
kg N/ha Colza	<b>nd</b>			<b>nd</b>			<b>nd</b>			<b>27</b>	<b>**</b>	(11)
Azote absorbé Grain												
kg N/ha Blé	<b>7</b>	<b>***</b>	(19)	<b>7</b>	<b>***</b>	(40)	<b>2</b>	<b>S 10%</b>	(38)	<b>9</b>	<b>***</b>	(19)
kg N/ha Orge	<b>7</b>	<b>***</b>	(16)	<b>5</b>	<b>***</b>	(32)	<b>6</b>	<b>***</b>	(32)	<b>11</b>	<b>***</b>	(16)
kg N/ha Colza	<b>5</b>	<b>**</b>	(14)	<b>4</b>	<b>**</b>	(28)	<b>4</b>	<b>*</b>	(14)	<b>8</b>	<b>***</b>	(14)
CAU % céréales pt < N OPT				Ammo	Urée				Ammo	Urée		
				<b>91%</b>	<b>84%</b>				<b>91%</b>	<b>86%</b>		
				<b>6%</b>	<b>***</b>	(54)				<b>5%</b>	<b>**</b>	(26)

#### Témoins non fertilisés

Selon l'historique de fertilisation l'effet le plus notable sur les variables indice de rendement, rendement, azote absorbé plante entière et grain est enregistré sur les parcelles non fertilisées et correspond à la quantification de l'effet « historique ». Les effets sur les témoins sont tous significatifs et en faveur des historiques de fertilisation ammonitrate pour l'ensemble des variables considérées : - respectivement 1.8, 4.2 et 3.9 q/ha de plus pour le colza, l'orge et le blé - 7 à 13 kg d'absorption d'azote supplémentaire pour l'orge et le blé pour la plante entière-5 à 7 kg d'azote supplémentaire absorbé par le grain pour le colza et les céréales à paille

### **Effet forme d'azote « annuel »**

Etabli sur une centaine de courbes de réponse, l'effet forme d'azote « annuel » s'avère significatif à toutes les doses testées (t-Student) et notamment à la dose bilan X sur les principales variables suivies. L'écart d'indice de rendement atteint en moyenne 2.1 % qui se répartit en 1.2 q/ha pour le colza, 1.3 q/ha pour l'orge et 1.4 q/ha pour le blé. Ces écarts de rendement sont conformes aux résultats établis dans d'autres réseaux d'essais annuels pour le colza et le blé (*Yara, synthèse de 21 essais formes d'azote annuels 2008-2012 sur colza – réunion Comifer N Fev 2013, Perspectives Agricoles jan 2013 n°396*). Le différentiel d'azote absorbé plante entière sur les céréales à paille se situe entre 14 kg N/ha pour le blé et 7 kg N/ha pour l'orge. Des écarts significatifs d'absorption par les grains sont également mesurés: respectivement 7 kg N/ha pour les blés, 5 kg pour les orges et 4 kg N/ha pour les colzas. Au final, une différence de 6.5 % sur le coefficient d'utilisation de l'azote en faveur de l'ammonitrate est mise en évidence sur les céréales à paille (91 % versus 84 %). Aucune différence n'ayant été établie entre orge et blé, les CAU des céréales à pailles ont été regroupés. Pour les colzas, le trop faible nombre de situations (2 essais) ne permet pas de présenter des moyennes représentatives.

En conclusion, à la dose bilan X, des écarts significatifs ont été établis en faveur de l'ammonitrate sur les critères : rendements, quantités d'azote absorbé (plante entière et grain) et CAU des céréales à pailles. L'ammonitrate permet une meilleure absorption d'azote pour une même dose apportée. C'est entre 5 et 8 % de la dose d'azote apporté qui est retrouvé en plus dans la plante. Les écarts mesurés à la dose X sont confirmés par les écarts établis sur l'ensemble des traitements fertilisés des essais et sont détaillés dans le tableau 6.

### **Effet forme d'azote « passé »**

Les comparaisons par les tests t de Student ont également été établies afin de tester l'effet du « passé » de fertilisation sur les traitements fertilisés sur une centaine de courbes de réponse. Déjà établi sur les témoins non fertilisés, l'effet du passé de fertilisation est également statistiquement démontré sur les variables indice de rendement, rendement et absorption d'azote. Le différentiel d'indice de rendement entre les parcelles avec passé ammonitrate et les parcelles avec passé urée atteint en moyenne 1.9 %. Ainsi il s'avère que l'effet « passé » de fertilisation est du même ordre de grandeur que l'effet « annuel » de la forme d'azote (1.9 % versus 2.1 %) avec des écarts de rendement par culture tout à fait comparables entre effet « annuel » (respectivement 1.4, 1.3 et 1.2 q/ha pour le blé, l'orge et le colza) et l'effet « passé » (respectivement 1.3, 1.8, 1.1 q/ha). Bien que modestes, les écarts d'absorption d'azote mesurés sont aussi significatifs et en faveur des historiques de fertilisation « ammonitrate » et ils confirment ici le supplément de fournitures d'azote du sol plus nettement établis sur les parcelles non fertilisées.

Une analyse plus fine montre que les différences d'azote absorbé entre les différents passés de fertilisation ne sont pas expliquées par des reliquats d'azote minéral et des biomasses de colza en sortie d'hiver différentes entre formes d'engrais. Ainsi, il est probable que ces différences surviennent au printemps postérieurement à l'ouverture du bilan d'azote. Les écarts de fournitures d'azote entre les deux historiques de fertilisation pourraient traduire non pas tant une fourniture supérieure avec l'ammonitrate que la capacité avec cette forme à conserver davantage d'azote dans le système sol-plante (CAU plus élevé et davantage d'azote contenus dans les racines et les résidus de culture) à

l'échelle pluriannuelle en étant moins soumise aux pertes par volatilisation. Cependant, cette hypothèse explicative ne peut être vérifiée à partir des informations disponibles dans le réseau expérimental. Les résultats détaillés de l'effet « passé » de fertilisation sont reportés dans le tableau 7.

### **Effet forme d'azote « système »**

#### *Rendement et indices de rendement*

L'approche « système » résulte à la fois de l'effet de la forme d'azote apportée sur la culture récoltée et de l'effet historique lié à la forme d'azote utilisée les années antérieures sur les parcelles.

En moyenne, l'effet « système » testé sur 51 courbes de réponses s'établit à 4.1 % en faveur de l'ammonitrate. Les écarts de rendements mesurés sur chaque culture sont quasiment doublés par rapport à la traditionnelle comparaison « annuelle » (+2.1 %) grâce à la contribution quasi additive de l'effet « passé » (+1.9 %) pour atteindre en moyenne + 2.7 q/ha pour le blé, + 3.1 q/ha pour l'orge et + 2.4 q/ha pour le colza.

*Azote absorbé, qualité, CAU* concernant les quantités d'azote absorbé, les écarts moyens établis sont importants.

A la dose bilan X, les conduites Ammonitrate chaque année permettent une absorption supérieure de respectivement 15, 19 et 27 kg N/ha pour l'orge, le blé et le colza. Ces écarts correspondent à 10 % (céréales) et 15 % (colza) de la dose bilan par culture. Les différences d'azote absorbé proviennent à la fois d'une biomasse supérieure et d'une teneur en azote plus élevée avec les traitements ammonitrate (plante entière pour le colza au stade G4, paille et grain pour les céréales). Ces absorptions supérieures sont également confirmées dans les parties récoltées : les teneurs en azote des grains de céréales et de colza sont significativement plus élevées avec l'ammonitrate. Pour les céréales, blé et orge, la traduction immédiate est une teneur en protéines plus élevée de 0.3 point environ avec l'ammonitrate. Corrélativement, les teneurs en azote supérieures obtenues dans les graines de colza avec l'ammonitrate ont un effet négatif significatif sur la teneur en huile (- 0.48 pt) par rapport à l'urée qui est néanmoins contrebalancé par la production totale d'huile /ha. On retrouve ici la classique relation inverse entre teneur en huile et teneur en protéines établie par le Cetiom.

Les coefficients apparents d'utilisation de l'azote (91 % avec l'ammonitrate contre 86 % avec l'urée) sont similaires à ceux mesurés en comparaison annuelle. Du point de vue de l'absorption d'azote, les différences d'efficacité entre les 2 formes s'expliquent par un effet CAU supérieur provenant de la fertilisation appliquée l'année de récolte et par un effet fourniture d'azote du sol plus élevée ( $N_f = N_o + CAU \cdot X$ ). En moyenne, dans les conditions de ce réseau d'essais, les conduites à base d'ammonitrate ont montré leur aptitude à conserver davantage d'azote dans le système sol-plante et par conséquent à minimiser les pertes d'azote réactif hors de ce système. L'ensemble des résultats détaillés est reporté dans le tableau 8.

Tableau6 : Comparaisons annuelles Ammonitrate-Urée – valeurs moyennes et écarts entre formes selon les cultures pour les principales variables mesurées

Effet annuel			Ammo nitrate	Urée	écart	eff.	test t	sign	Ammo nitrate	Urée	écart	eff.	test t	sign	Ammo nitrate	Urée	écart	eff.	test t	sign
			toutes cultures																	
indice de rendement	% X ApA	Dose X	99.0%	96.9%	2.1%	(102)	5.29	***												
		toutes doses	96.6%	94.7%	1.9%	(508)	10.30	***												
			Blé						Orge						Colza					
rendement	q/ha	Dose X	78.1	76.7	1.4	(42)	3.39	**	84.9	83.5	1.3	(32)	2.10	*	41.1	39.9	1.2	(30)	3.62	**
		toutes doses	76.8	75.5	1.4	(210)	6.98	***	81.8	80.7	1.0	(160)	4.41	***	40.2	39.1	1.1	(150)	6.93	***
N absorbé Plante entière (partie aérienne x 1.25)	kg N/ha	Dose X	273	259	14	(28)	4.93	***	212	205	7	(26)	2.20	*						
		toutes doses	267	254	13	(140)	7.78	***	208	202	7	(130)	3.89	***						
N absorbé grain	kg N/ha	Dose X	156	149	7	(40)	6.05	***	136	131	5	(32)	4.05	***	109	104	4	(28)	3.11	**
		toutes doses	151	145	6	(200)	10.68	***	131	126	4	(160)	6.57	***	106	102	4	(140)	6.21	***
N absorbé paille	kg N/ha	Dose X	57	51	6	(28)	3.88	***	42	41	1	(26)	0.36	NS						
		toutes doses	57	53	5	(140)	5.14	***	44	42	2	(130)	2.39	*						
CAU toutes Céréales	%		91%	84%	6%	(54)	4.56	***												
CAU grains	%		54%	50%	3%	(70)	6.58	***							31%	30%	1%	(13)	2.16	NS
teneur en azote grain	% ms	Dose X	2.29	2.22	0.06	(38)		***	1.81	1.76	0.04	(32)	2.60	*	2.93	2.90	0.03	(28)	0.98	NS
		toutes doses	2.24	2.19	0.06	(190)	10.28	***	1.79	1.75	0.04	(160)	3.90	***	2.92	2.89	0.03	(140)	2.41	*
teneur en azote paille	%ms	Dose X	0.64	0.59	0.04	(28)	3.22	**	0.56	0.55	0.01	(26)	0.64	NS						
		toutes doses	0.63	0.59	0.05	(140)	5.04	***	0.58	0.57	0.02	(130)	1.87	S 10%						
teneur en protéines Céréales	% ms	Dose X	13.4	13.1	0.29	(42)	4.96	***	11.2	11.0	0.17	(32)	2.48	*						
		toutes doses	13.1	12.9	0.25	(210)	10.32	***	11.1	10.9	0.23	(160)	6.54	***						
teneur en huile colza	%	Dose X													45.0	45.3	- 0.24	(28)	1.75	S 10%
		toutes doses													45.1	45.4	- 0.27	(140)	5.15	***
rendement en huile colza	kg/ha	Dose X													1 749	1 707	43	(28)	2.95	**
		toutes doses													1 708	1 676	33	(140)	4.83	***

Tableau 7 : Comparaisons « passé » Ammonitrate-Urée –valeurs moyennes et écarts entre formes selon les cultures pour les principales variables mesurées selon l’historique de fertilisation .Valeurs mesurées à la dose X, tous traitements fertilisés et sur les témoins non fertilisés.

Effet historique		Ammo nitrate	Urée	écart	eff. test t	sign	Ammo nitrate	Urée	écart	eff. test t	sign	Ammo nitrate	Urée	écart	eff. test t	sign				
		toutes cultures																		
indice de rendement	% X ApA	Dose X	98.9%	97.0%	1.9%	(102)	4.29	***												
		toutes doses	96.7%	94.7%	2.0%	(508)	8.94	***												
		Témoin ON	56.6%	51.9%	4.7%	(51)	7.38	***												
		Blé					Orge					Colza								
rendement	q/ha	Dose X	76.3	75.1	1.3	(42)	2.73	**	85.1	83.3	1.8	(32)	2.68	*	41.1	40.0	1.1	(30)	2.70	*
		toutes doses	74.9	73.9	1.0	(210)	4.58	***	82.3	80.2	2.0	(160)	5.94	***	40.2	39.1	1.1	(150)	5.79	***
		Témoin ON	44.6	40.7	3.9	(20)	4.60	***	49.4	45.2	4.2	(16)	3.89	**	23.9	22.0	1.8	(15)	3.66	**
N absorbé Plante entière (partie aérienne x 1.25)	kg N/ha	Dose X	179	176	3	(42)	127	NS	173	167	6	(32)	2.85	**						
		toutes doses	175	172	3	(210)	2.36	*	170	163	7	(160)	5.01	***						
		Témoin ON	106	94	13	(14)	4.11	**	90	83	7	(13)	3.66	**						
N absorbé grain	kg N/ha	Dose X	142	141	2	(42)	172	S 10%	136	130	6	(32)	3.87	***	108	104	4	(28)	2.22	*
		toutes doses	138	136	2	(210)	3.89	***	131	126	5	(160)	7.69	***	106	102	5	(140)	5.84	***
		Témoin ON	65	58	7	(19)	4.37	***	61	54	7	(16)	4.16	***	54	49	5	(14)	3.23	**
N absorbé paille Toutes Céréales	kg N/ha	Dose X	49	47	1	(54)	108	NS												
		toutes doses	50	48	1	(270)	2.32	*												
		Témoin ON	18	17	1	(27)	157	NS												
teneur en azote grain Toutes Céréales - colza	% ms	Dose X	2.05	2.03	0.03	(68)	2.76	**												
		toutes doses	2.02	2.00	0.02	(340)	4.29	***												
		Témoin ON	1.54	1.48	0.06	(34)	2.23	*												
teneur en azote paille Toutes Céréales	%ms	Dose X	0.59	0.58	0.01	(54)	1.18	NS												
		toutes doses	0.56	0.55	0.01	(324)	1.00	NS												
		Témoin ON	0.36	0.37	-0.01	(27)	1.18	NS												
teneur en protéines Toutes Céréales	% ms	Dose X	12.3	12.3	0.00	(210)	0.20	NS												
		toutes doses	11.8	11.8	0.03	(252)	1.27	NS												
		Témoin ON	12.5	12.5	-0.01	(42)	0.14	NS												
teneur en huile colza	%	Dose X										45.2	45.4	-0.26	(26)	157	NS			
		toutes doses										45.2	45.5	-0.27	(130)	3.95	***			
		Témoin ON										47.1	47.2	-0.16	(13)	0.82	NS			
rendement en huile colza	kg/ha	Dose X										1 732	1 690	42	(26)	2.32	*			
		toutes doses										1 696	1 657	39	(130)	4.82	***			
		Témoin ON										1 025	941	84	(13)	3.79	**			

Tableau 8 : Comparaisons « Système» Ammonitrate-Urée – valeurs moyennes et écarts entre formes selon les cultures pour les principales variables mesurées selon le système de fertilisation. Valeurs mesurées à la dose X, tous traitements fertilisés.

Effet Système			Ammo nitrate	Urée	écart	eff.	test t	sign	Ammo nitrate	Urée	écart	eff.	test t	sign	Ammo nitrate	Urée	écart	eff.	test t	sign	
			toutes cultures																		
indice de rendement	% X ApA	Dose X	100.0%	95.9%	4.1%	(51)	7.21	***													
		toutes doses	97.6%	93.7%	3.8%	(254)	12.5	***													
			Blé							Orge					Colza						
rendement	q/ha	Dose X	80.9	78.2	2.7	(20)	4.05	***	85.6	82.5	3.1	(16)	3.96	***	41.7	39.3	2.4	(15)	5.19	***	
		toutes doses	79.4	76.8	2.6	(100)	6.50	***	82.7	79.6	3.1	(80)	7.35	**	40.8	38.6	2.1	(74)	8.24	***	
N absorbé Plante entière (partie aérienne x 1.25)	kg N/ha	Dose X	276	258	19	(14)	4.40	***	218	203	15	(13)	5.56	***	236	209	27	(11)	4.40	**	
		toutes doses	268	251	17	(70)	7.33	***	212	197	15	(65)	7.48	***	azote absorbé colza uniquement dose X au stade G4						
N absorbé grain	kg N/ha	Dose X	160	152	9	(19)	4.66	***	139	128	11	(16)	5.43	***	110	102	8	(15)	4.77	***	
		toutes doses	156	147	8	(95)	9.55	***	133	124	10	(80)	10.76	***	109	100	9	(70)	8.20	***	
N absorbé paille	kg N/ha	Dose X	59	52	7	(14)	2.88	*	43	41	2	(13)	1.59	NS							
		toutes doses	57	52	5	(70)	4.81	***	44	40	4	(65)	4.49	***							
CAU toutes Céréales	%		91%	86%	5%	(26)	3.1	**													
CAU grains	%		53%	52%	2%	(34)	2.0	*						31%	30%	1%	(13)	2.2	NS		
teneur en azote grain	% ms	Dose X	2.29	2.22	0.07	(19)	5.05	***	1.85	1.74	0.11	(16)	5.05	***	2.59	2.57	0.01	(15)	0.56	NS	
		toutes doses	2.24	2.18	0.06	(95)	7.58	***	1.82	1.74	0.08	(75)	5.87	***	2.94	2.88	0.06	(70)	1.54	NS	
teneur en azote paille	%ms	Dose X	0.65	0.59	0.06	(14)	3.37	**	0.58	0.55	0.04	(13)	3.90	***							
		toutes doses	0.63	0.59	0.04	(70)	3.99	***	0.59	0.55	0.04	(65)	1.51	NS							
teneur en protéines Céréales	% ms	Dose X	13.3	13.0	0.30	(20)	2.92	**	11.3	10.9	0.33	(16)	3.39	**							
		toutes doses	13.0	12.8	0.25	(100)	5.43	***	11.2	10.8	0.35	(80)	6.32	***							
teneur en huile colza	%	Dose X								41.9	42.4	- 0.48	(15)	2.22	*						
		toutes doses								42.0	42.5	- 0.52	(74)	6.54	***						
rendement en huile colza	kg/ha	Dose X								1658	1575	83	(15)	3.98	***						
		toutes doses								1615	1546	70	(74)	6.34	**						
colza biomasse stade G4	t ms/ha	Dose X								10.5	10.0	0.5	(11)	2.57	*						
colza teneur N% stade G4	% ms	Dose X								1.80	1.65	0.15	(11)	3.34	**						

Figure 7: Effet forme N « annuel » confrontation des Indices de rendement urée en abscisse et ammonitrate en ordonnée  
 Ci-dessous : fréquence des écarts de rendement en faveur de l'une des formes (témoins exclus)

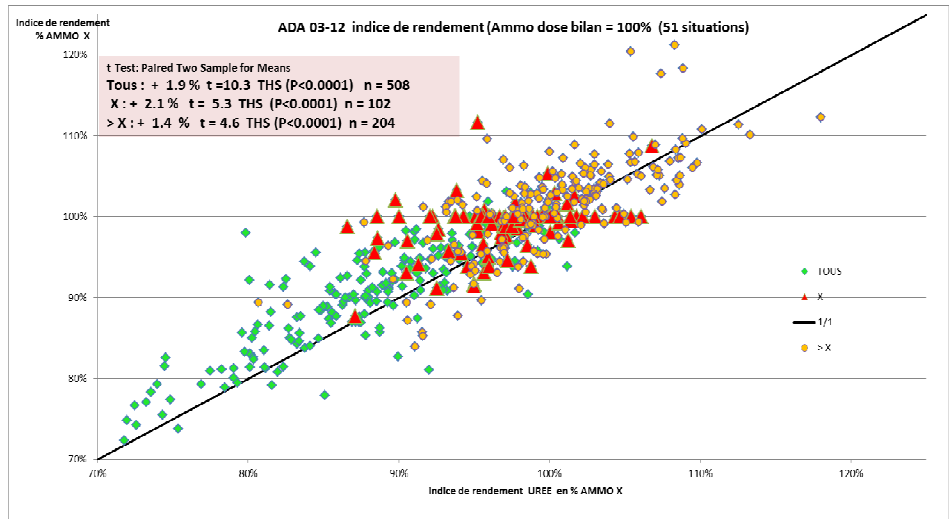
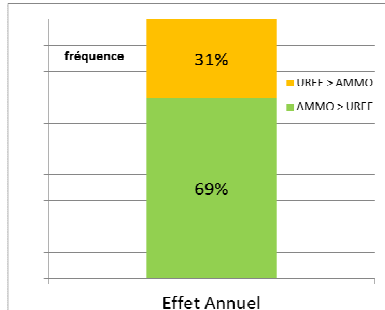


Figure 8 : Effet forme N « historique » confrontation des Indices de rendement urée en abscisse et ammonitrate en ordonnée. En jaune les témoins non fertilisés, en rouge, les traitements à dose X  
 Ci-dessous : fréquence des écarts de rendement en faveur de l'une des formes (témoins exclus)

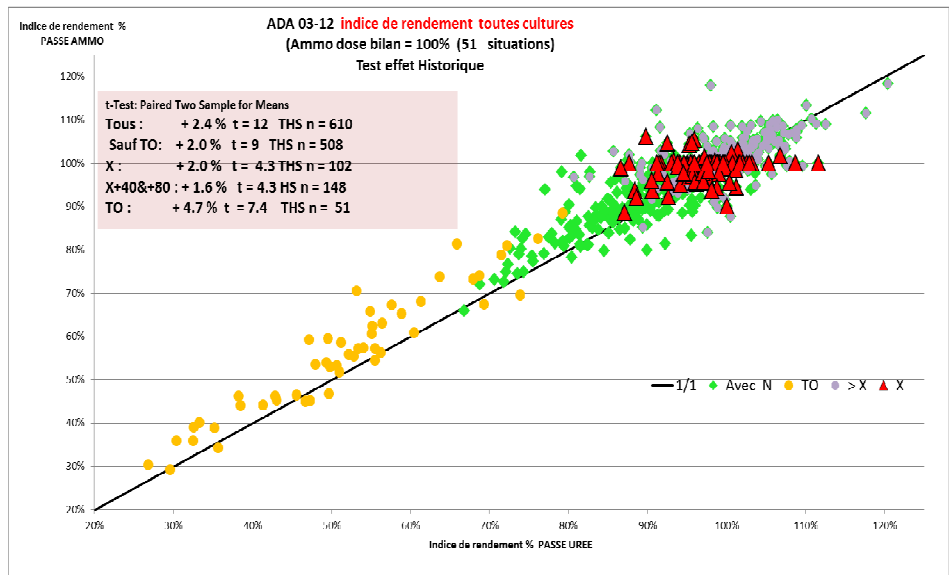
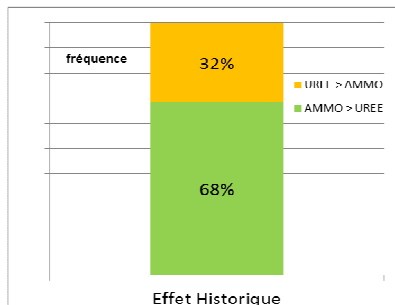


Figure 9 : Effet forme N « système » confrontation des Indices de rendement urée en abscisse et ammonitrate en ordonnée  
 Ci-dessous : fréquence des écarts de rendement en faveur d'une forme ou l'autre (témoins exclus)

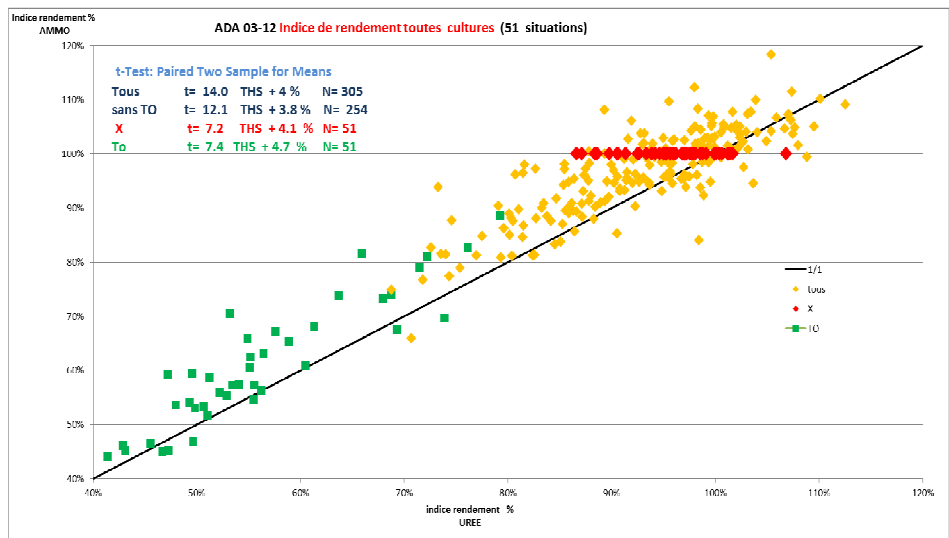
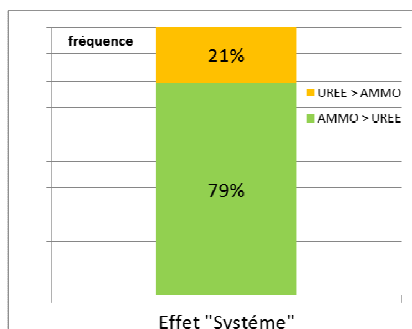




Figure 10 : Effet forme N « annuel » confrontation des quantités d'azote absorbé plante entière urée en abscisse et ammonitrate en ordonnée (blé à droite et orge à gauche)

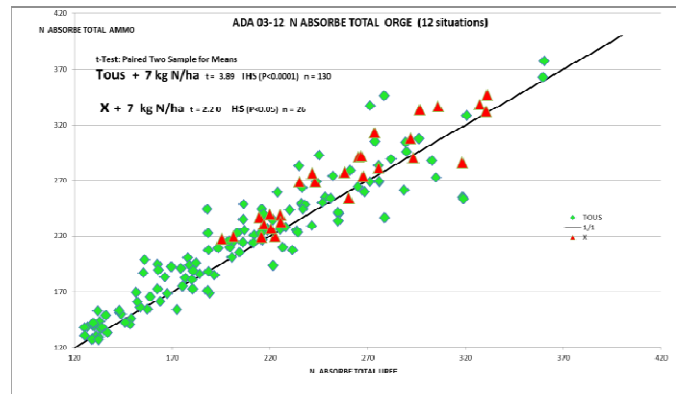
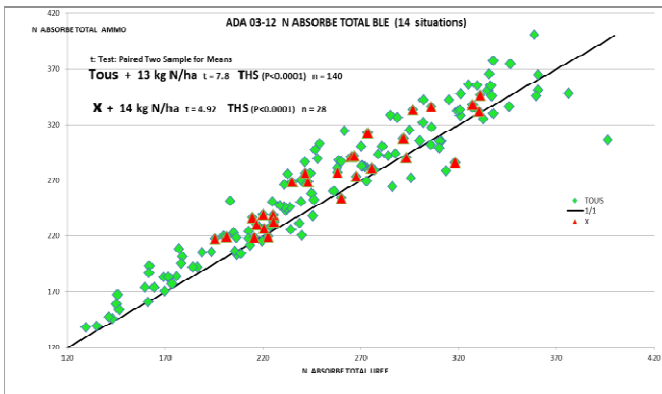


Figure 11 : Effet forme N « historique » confrontation des quantités d'azote absorbé plante entière par les céréales à paille (orge et blé) urée en abscisse et ammonitrate en ordonnée- à gauche ensemble des points expérimentaux, à droite focus sur les témoins non fertilisés

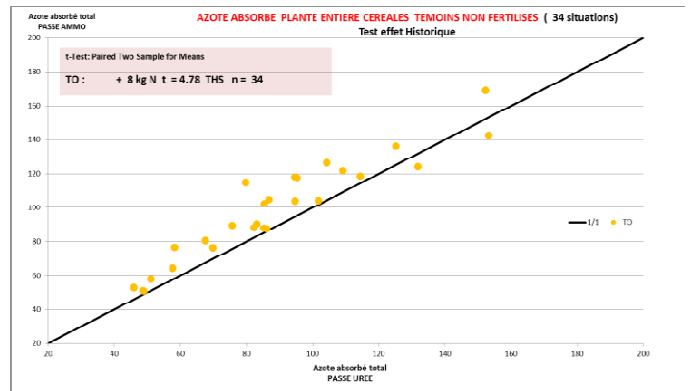
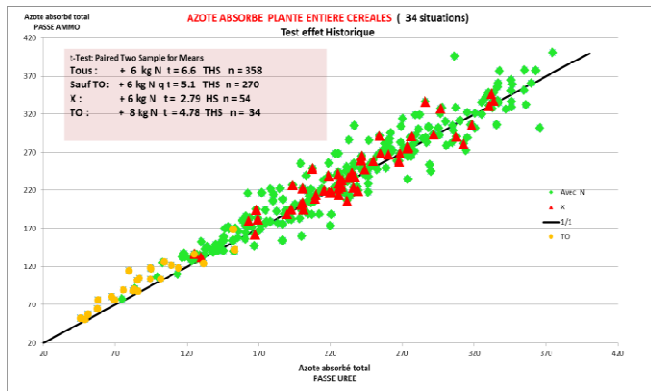
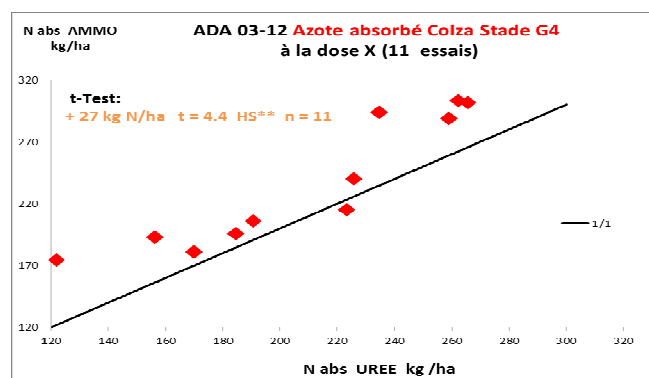
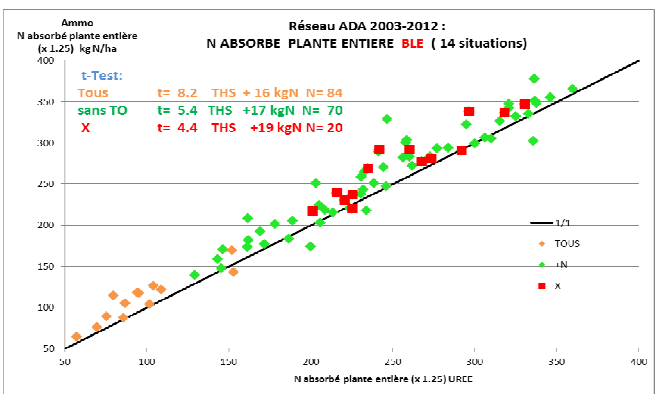
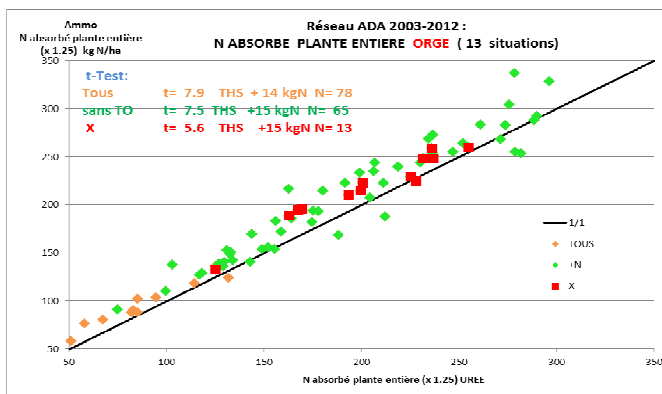


Figure 12 : Effet forme N « système » confrontation des quantités d'azote absorbé plante entière par les céréales à paille et le colza urée en abscisse et ammonitrate en ordonnée



#### 4.4.5 Quel écart de dose pour un rendement équivalent

Les résultats précédents ont permis de quantifier les écarts d'efficacité entre les 2 formes d'azote du point de vue du rendement, de l'azote absorbé et de la qualité. En ne considérant que la relation dose d'azote-rendement et sans aucune considération relative à l'azote non utilisé, l'allure des courbes de réponse (cf 5.4.3) montre qu'il est possible de compenser la moindre efficacité d'une forme par une dose d'apport plus élevée. Des préconisations de surdosage sont parfois relayée par la prescription agricole pour différents types d'engrais et de cultures (solution azotée sur céréales à paille, urée en couverture sur maïs et prairie) et figurent même dans certains arrêtés de 2012 définissant les « référentiels régionaux de mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée ».

Compréhensible d'un point de vue économique, pourvu que les coûts de l'azote et les prix des cultures le permettent, cette approche ne prend pas en compte l'azote non valorisé et partiellement perdu dans le milieu naturel qui occasionne pourtant un coût environnemental et sociétal important. Néanmoins, la détermination des écarts de dose d'azote requis pour obtenir des performances de production équivalentes est un moyen de quantifier la différence d'efficacité entre engrais.

Pour cela, à partir des ajustements statistiques réalisés avec les 3 modèles de fonction de production Quadratique-Plateau, Quadratique, Exponentiel modifié Adas (cf 5.4.2) sur chacune des 204 courbes de réponses, des simulations ont été réalisées afin de déterminer la plus petite augmentation de dose permettant de rendre les différences de rendement entre formes d'azote statistiquement non significatives. Afin de conserver une valeur opérationnelle aux simulations réalisées, la dose de référence retenue a été la dose du bilan prévisionnel X établie sur chaque essai sans distinction de forme.

Parmi les 3 fonctions de production utilisées, la fonction Quadratique-Plateau est celle qui fournit les meilleures estimations des rendements mesurés à la dose X. A contrario, la fonction Quadratique confirme sa tendance à une certaine surestimation du rendement au voisinage de l'optimum tandis que le modèle exponentiel modifié présente le défaut inverse.

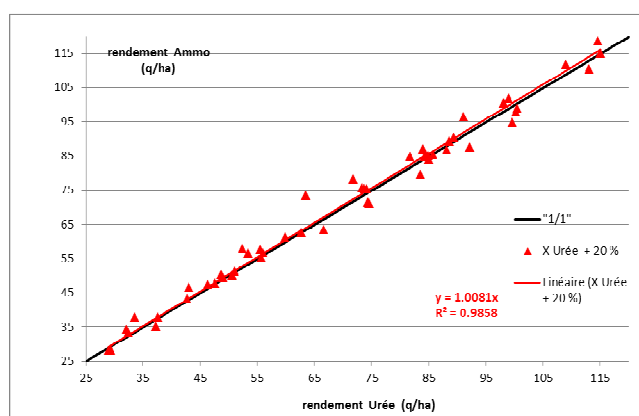
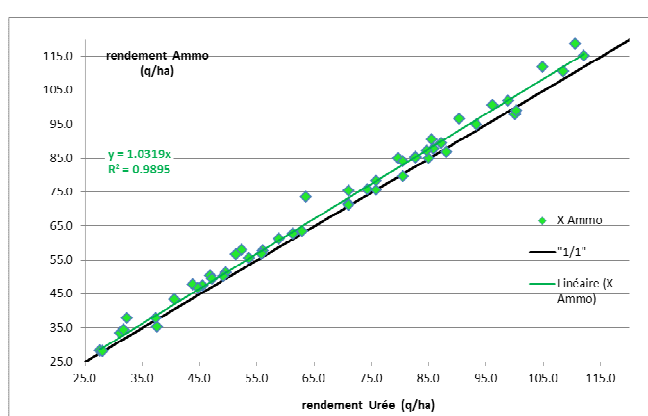
**Tableau 8 : Comparaison à la dose X des écarts d'estimations (mesuré – ajusté) des 3 fonctions de production. Le modèle Quadratique-Plateau ne présente pas de biais d'estimation contrairement aux 2 autres fonctions pour lesquelles des différences significatives sont enregistrées. (test de Student)**

écart de rendement à la dose X mesuré - ajusté(q/ha)	Approche « annuelle » Ensemble des situations (n= 204)		Approche « système » uniquement (n=102)	
<b>quadratique plateau</b>	<b>-0.05</b>	<b>NS</b>	<b>-0.06</b>	<b>NS</b>
quadratique	-0.49	***	-0.44	**
exponentiel modifié	0.24	*	0.29	*

La recherche des doses d'urée permettant d'obtenir un rendement équivalent à l'ammonitrate est effectuée sur les 2 populations de courbes de réponse, soit dans une optique de comparaison « annuelle », soit dans une optique de comparaison « système ». Les simulations donnent des résultats convergents pour les 3 fonctions de production. En approche « Annuelle », un supplément d'environ 10 % de la dose bilan est nécessaire avec l'urée pour rendre les différences brutes de rendement non significatives. Concernant l'approche « Système », très logiquement, avec des écarts de rendement entre formes plus importants à l'origine, les différences entre les 2 formes deviennent statistiquement non significatives pour un supplément d'environ 20 % de la dose bilan.

**Tableau 9 : Résultats des simulations de recherche des doses équivalentes « ammonitrate » pour les 3 fonctions de production et les 2 populations de courbes de réponse. Test t de Student – la dose X doit être en moyenne majorée de 10 à 20 % pour rendre les différences de rendement non significatives.**

dose X Moyenne		167	fonction Quadratique Plateau	fonction Quadratique	Fonction exponentiel Adas
<b>Approche "annuelle"</b>	dose équivalente		<b>184</b>	<b>185</b>	<b>185</b>
	% majoration dose X		<b>9.8 %</b>	<b>10.7 %</b>	<b>10.8 %</b>
			<b>16</b>	<b>18</b>	<b>18</b>
			<b>NS</b>	<b>NS</b>	<b>NS</b>
indice de rendement	Ammo.	99.09 %	99.12 %	99.10 %	
	Urée	98.57 %	98.58 %	98.57 %	
	n =	102	102	102	
<b>Approche "système"</b>	dose équivalente		<b>201</b>	<b>202</b>	<b>200</b>
	% majoration dose X		<b>20.4 %</b>	<b>20.5 %</b>	<b>19.6 %</b>
			<b>34</b>	<b>34</b>	<b>33</b>
			<b>NS</b>	<b>NS</b>	<b>NS</b>
indice de rendement	Ammo.	100.0 %	100.0 %	100.0 %	
	Urée	98.80 %	98.81 %	98.82 %	
	n =	51	51	51	



**Figure 13 : Illustration de la recherche de dose équivalente – approche « système » : en vert rendement Urée versus rendement Ammonitrate à dose équivalente en rouge rendement Urée à X+20 % de telle sorte que la différence de rendement devienne non significative**

Cette méthode permet de rendre en **moyenne** les différences de rendement entre formes d'azote non significatives. Cependant compte tenu de la variabilité des réponses à la forme d'azote, dans les situations où les écarts entre formes sont nuls ou faibles, la majoration de dose conduit à des

situations de sur-fertilisation. De même, quand la courbe de réponse à l'urée atteint son plateau ou sa phase décroissante (selon les fonctions), l'augmentation de dose ne permet pas de réduire l'écart de rendement. Cette approche n'est donc pas satisfaisante, au cas par cas, dans une logique de préconisation a priori.

#### 4.4.6 Résultats complémentaires

- Origine des effets formés d'azote mesurés

L'analyse, essai par essai, de la relation entre N absorbé plante entière et rendement sur l'ensemble des céréales à paille et pour 2 colzas permet clairement de conclure que cette relation est unique et indépendante de la forme d'azote apportée.

Les différences entre formes d'azote ne sont pas imputables à une moindre efficacité de conversion de l'azote absorbé en rendement mais bien à une différence dans la relation N apporté – N absorbé. L'hypothèse explicative la plus couramment avancée et la plus probable repose sur des pertes gazeuses plus importantes avec l'urée comparativement à l'ammonitrate au moment des apports d'azote, avant absorption par la plante.

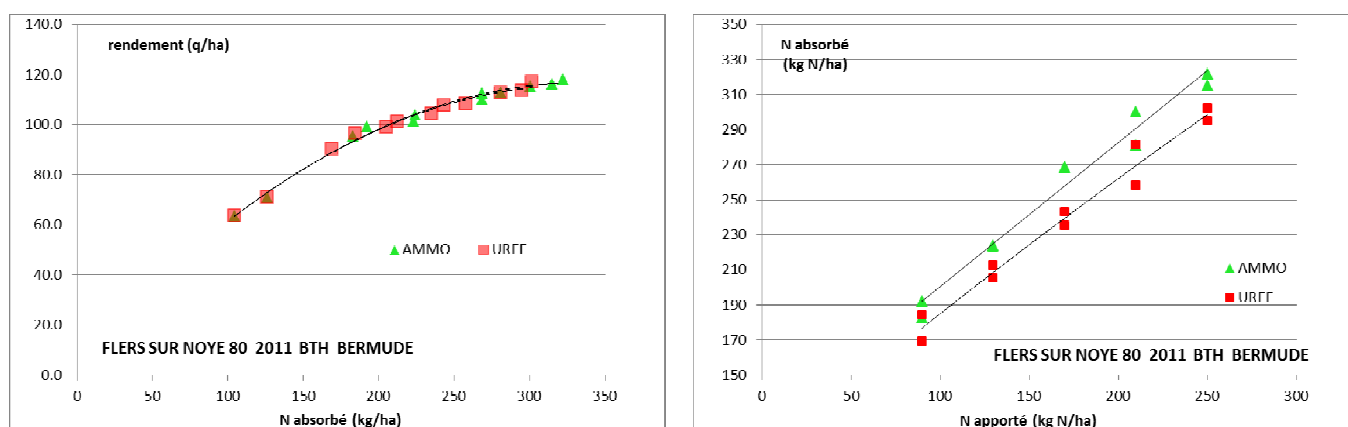


Figure 14 : Illustration à partir d'un essai sur blé : A gauche, la relation N absorbé et rendement est indépendante de la forme apportée, en présence d'un effet forme d'azote. L'efficacité interne est identique entre les 2 formes d'azote. A droite, par contre, une différence marquée dans la relation N apporté et N absorbé qui se traduit par une plus forte absorption d'azote avec l'ammonitrate pour une même dose d'apport.

- L'effet « historique » : hypothèse explicative

L'effet « passé » de fertilisation en faveur de l'ammonitrate, quant à lui, résulterait simplement de la minéralisation de l'azote supplémentaire contenu dans les résidus de culture et les racines ou organisé par la microflore sur sol. Autrement formulé, le supplément d'absorption d'azote constaté (CAU plus élevé) avec l'ammonitrate les années antérieures contribue à augmenter la fourniture d'azote du sol par la minéralisation de la fraction non exportée par les récoltes. A l'inverse, l'urée davantage soumise à des pertes par volatilisation laisserait moins d'azote minéral disponible pour

l'absorption et l'organisation microbienne. Ces hypothèses restent néanmoins à vérifier alors que les dispositifs expérimentaux ne sont pas adaptés pour ce faire. Cependant, des analyses d'activité biologique du sol ont été initiées afin d'explorer cette hypothèse. Les premiers résultats sur l'un des sites expérimentaux (86) semblent indiquer une activité biologique supérieure sur les sous-blocs ammonitrate : notamment sur le critère « azote minéralisable en anaérobiose ». D'autres indicateurs tels que la biomasse microbienne, les métabolites « autoclaves » et « tétraborate » montrent également des valeurs plus élevées (différences non significatives).

Ces différentes pistes pourraient accréditer la thèse d'un pool d'azote labile récent, différent selon les 2 formes d'azote et susceptible de participer à la fourniture du sol en azote.

- Récurrence de l'effet « historique »

A l'instar de l'effet forme annuel, l'effet du passé de fertilisation n'est pas systématique sur un site expérimental. Il peut être constaté sur une année donnée et absent une autre année. Il n'a pas été mis en évidence d'effet cumulatif du passé de fertilisation au fur et à mesure des années : l'écart entre les témoins non fertilisés ne s'accroît pas dans le temps. Cependant, Pasda et al 2007 (résultats non publiés) mentionnent la possibilité d'un effet s'amplifiant dans le temps mais sur des dispositifs expérimentaux différents. L'absence de récurrence de l'effet « historique » est assez cohérente avec l'explication par la volatilisation ammoniacale survenue les années antérieures. L'intensité plus ou moins forte de la volatilisation ammoniacale les années antérieures expliquerait l'extériorisation plus ou moins nette de l'effet « historique » l'année de la récolte.

- Type de sol et effet forme d'azote

Dans une première analyse, il n'a pas été possible de montrer que les sols calcaires (pH eau > 7.5 et CaCO<sub>3</sub> > 5 %) extériorisaient des écarts plus élevés que les sols de limons avec l'hypothèse explicative sous-jacente que la volatilisation ammoniacale est plus élevée en sol calcaire et induirait des performances inférieures de l'urée. Ce résultat diverge par rapport à la conclusion établie en 1997 par Arvalis-Institut du végétal et Yara lors de la synthèse d'essais annuels comparant ammonitrate et solution azotée sur blé dans laquelle les sols calcaires donnaient les plus forts écarts au détriment de la solution azotée.

- Efficacité de l'azote et conditions climatiques au moment des apports d'azote

Une première approche mettant en relation les effets formes d'azote mesurés sur les principales variables culturales (rendement, azote absorbé, CAU) avec un certain nombre de critères climatiques établis au moment de chaque apport a été tentée. A ce stade de l'étude, cette mise en relation des critères climatiques (température, cumul pluviométrique, cumul P-ETP, humidité du sol) obtenus sur des postes climatiques proches et des effets formes n'a pas permis de tirer de conclusion intéressante. Cette approche explicative devra être complétée dans une seconde phase.

## **5. CONCLUSIONS**

Cette étude a permis de mettre en évidence les effets de l'utilisation d'ammonitrate en comparaison de l'utilisation d'urée pour une rotation classique colza-blé-orge. La richesse du réseau d'essais (multi-site et pluriannuel) permet de dégager des résultats inédits. En effet, au-delà de l'effet annuel de la forme d'azote qui avait déjà été établi pour différentes cultures, il permet également d'établir deux nouveaux effets : un effet passé et un effet système de la forme d'azote sur le rendement et l'azote absorbé dans la plante. L'effet passé de l'engrais azoté est particulièrement identifiable sur les parcelles témoin non fertilisées: les écarts de rendement et d'azote absorbé sur ces témoins ne sont dus qu'à la forme d'azote utilisée sur les cultures précédentes. L'effet système, quant à lui, combine l'effet passé et l'effet annuel de façon additive, ce qui amplifie les écarts entre ammonitrate et urée et augmente la fréquence des essais avec effet significatif par rapport à l'effet annuel. Enfin, en moyenne, c'est l'ammonitrate qui permet un gain de rendement et d'azote absorbé par rapport à l'urée.

Ces effets ont pu être décrits et quantifiés grâce à la large accumulation de résultats expérimentaux mais il reste à les expliquer puis plus utilement à les prévoir. En effet, l'exploitation du réseau d'essais ne permet pas d'expliquer la variabilité des réponses observées (variabilité de significativité des effets, des écarts et des courbes de réponse). La culture, le site d'essai, l'année et le type de sol ne permettent pas d'expliquer les effets mesurés. Il n'y a donc pas de possibilité d'établir des critères pour prévoir les effets de la forme d'azote. La perte d'azote par volatilisation, plus importante après l'épandage d'urée (moins d'azote pour le système sol-plante) reste une des pistes privilégiées pour expliquer les effets observés. Les données disponibles (climatiques et de sol) sur les conditions après chaque apport ne sont cependant pas assez fines pour évaluer ce risque et le mettre en relation avec les résultats agronomiques (rendement, azote absorbé).

Néanmoins, les résultats présentés dans cette étude permettent de compléter et d'enrichir les connaissances dans le domaine de la compréhension du fonctionnement des engrais et de la dynamique de l'azote ainsi que les connaissances concernant les principes de fertilisation actuels. Ainsi, en l'absence de modèle prédictif sur l'effet de la forme d'azote, le calcul de la dose d'azote conseillée par la méthode du bilan prévisionnel de l'azote peut être réalisé en se basant sur l'hypothèse la plus favorable d'utilisation de l'azote (c'est-à-dire avec l'ammonitrate à plus fort CAU). Le recours à un outil de pilotage en cours de culture quand c'est possible permet aussi d'ajuster la dose d'azote à apporter pour prendre en compte un manque d'efficacité de la forme d'azote la moins favorable (ici l'urée).

Enfin, la meilleure connaissance des différences entre ammonitrate et urée doit nous inciter également à considérer, plus systématiquement, l'impact environnemental lié à l'utilisation des engrais. La réduction du risque de volatilisation ammoniacale se heurte, d'une part, à l'impossibilité d'enfouir les engrais après leur apport pour le colza, le blé ou l'orge et, d'autre part, au caractère aléatoire des épisodes pluvieux qui permettraient l'infiltration de l'engrais dans le sol. Le bilan environnemental des engrais considère aussi d'autres impacts en plus de l'effet d'acidification/eutrophisation lié à la volatilisation d'ammoniac. La production de gaz à effet de serre est un critère environnemental important qui intervient tout au long du cycle de vie des engrais : de la production des engrais à leur épandage en passant par leur transport. Une analyse multicritère des impacts environnementaux de l'ammonitrate et de l'urée permettrait donc d'avoir une vision d'ensemble des différences entre ces engrais.

## **BIBLIOGRAPHIE :**

- BOURY M, (2013) Synthèse d'essais de longue durée en grandes cultures comparant deux engrais azotés minéraux : ammonitrate et urée. Mémoire de fin d'études Agrocampus Ouest UNIFA
- Citepa, 2012. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. Séries sectorielles et analyses étendues. Format Secten. Paris : Citepa. <http://www.citepa.org/fr/inventaires-etudes-et-formations/inventaires-des-emissions/secten>.
- Cohan JP, Lesouder C, Formes d'azote : ammonitrate, solution azotée ou urée: les bons critères de choix. *Perspectives Agricole* n°396. Janvier 2013. 36-38
- Dampney P., Dyer C., Goodlass G., Chambers B., (2006) Component report for Defra Project NT2605 (CSA 6579). WP1a CropResponses. DEFRA, 110 p.
- ECETOC, (1994). Ammonia emissions to air in Western Europe. Technical report no. 62. Brussels: European Center for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals (ECETOC).
- Erisman , J. W. , Galloway , J. N. , Sutton , M. S. , Klimont , Z. and Winiwater , W. ( 2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 1, 636 –639.
- Fenn, L.B., Hossner, L.R. (1985). 'Ammonia volatilization from ammonium or ammonium forming fertilizers', *Advances in Soil Science*, 1, pp. 123–169.
- Harrison R, Webb J, 2001. A Review of the effect of N fertiliser form on gaseous N emissions. *Advances in Agronomy* 73 : 65-108.
- Le Souder C., Taureau J-C. (1997) Formes d'engrais. Quelle incidence sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre d'hiver ? *Perspectives agricoles*, n°221 Février 1997, pp. 67-74
- Lloyd A., Webb J., Archer J. R., Sylvester-Bradley R. (1997) Urea as a nitrogen fertilizer for cereals. *Journal of Agricultural Science*, Cambridge, 128, pp. 263-271
- Macdonald A., Goulding K., Bhogal A., Nicholson F., Chambers B., Sagoo L., Dixon L., Hatch D., (2006) Component report for Defra Project NT2605 (CSA 6579). WP4 Nitrogen losses to surface and ground waters. DEFRA 48 p.
- Mosier A. R., Keith Syers J., Freney J. R. eds. (2004) Agriculture and the nitrogen cycle: Assessing the Impacts of Fertilizer Use on Food Production and the Environment. *SCOPE 65*, Island Press, Washington, 296 p
- Sommer, S.G., Schjørring, J.K., Denmead, O.T. (2004). 'Ammonia Emission from mineral fertilizers and fertilized crops'. *Advances in Agronomy*, 82, pp. 557-662.

- Sutton, M.A., Place, C.J., Eager, M., Fowler, D., Smith, R.I. (1995b). 'Assessment of the magnitude of ammonia emissions in the United Kingdom', *Atmospheric Environment*, 29, pp. 1393–1411.
- Sylvester-Bradley R., Kindred D. R., Wynn S. C., Thorman R. E., Smith K. E. (2012) Efficiencies of nitrogen fertilizers for winter cereal production, with implications for greenhouse gas intensities of grain. *The Journal of Agricultural Science*, available on CJO 2012, doi : 10.1017/S0021859612000810
- UNIFA (2013) Livraisons d'engrais minéraux en France métropolitaine 2011/2012. UNIFA, 112p.