



AGROCAMPUS OUEST
CFR Rennes
65 rue de Saint-Brieuc
35 042 Rennes Cedex



UNIFA
Immeuble Le Diamant A
92909 Paris-La-Défense Cedex

Mémoire de Fin d'Etudes

**Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences
Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage**

Année universitaire : 2012-2013
Spécialité : Sciences et productions végétales
Option : Ingénierie des agrosystèmes

**Synthèse d'essais de longue durée en grandes cultures comparant deux
engrais azotés minéraux : ammonitrate et urée**

Par : Marine Boury



Volet à renseigner par l'enseignant responsable de l'option/spécialisation
Ou son représentant
Date : /.../... Signature :

Bon pour dépôt (version définitive) :

Autorisation de diffusion : Oui Non

Devant le jury :

Soutenu à Rennes le : 13 septembre 2013

Sous la présidence de : Safya MENASSERI (Enseignant-chercheur, Agrocampus Ouest)
Maître de stage : Philippe EVEILLARD (Responsable Agronomie et Environnement, Unifa)
Enseignant référent : Safya MENASSERI (Enseignant-chercheur, Agrocampus Ouest)
Autres membres du jury : Matthieu CAROF ((Enseignant-chercheur, Agrocampus Ouest), Christine BISSUEL (Enseignant-chercheur, Agrocampus Ouest) et Anne JAFFREZIC (Enseignant-chercheur, Agrocampus Ouest)

"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST"

Photo de couverture :

Parcelles de blé tendre d'hiver fertilisées et non fertilisées du dispositif expérimental (essai 86) (photo personnelle)

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont permis de réaliser cette étude jusqu'à son terme.

Je souhaite tout d'abord remercier les membres de mon comité de pilotage du groupe ADA de l'Unifa qui ont permis de créer et de mettre en œuvre ce projet en proposant ce stage de fin d'études : Madame Carole Rocca et Messieurs Alain Bouthier, Donatien Caron, Luc Champolivier, Philippe Eveillard, Marc Hervé, Marc Lambert, Edouard Minier et Didier Roussel. Je remercie plus particulièrement Philippe Eveillard, mon maître de stage, ainsi que les autres membres actifs du comité de pilotage pour leur suivi, leurs conseils et leurs relectures tout au long de ces six mois.

Je tiens également à remercier François Piraux pour ses conseils précieux, et indispensables, sur les méthodes d'analyse statistique.

Enfin, je remercie l'ensemble de l'équipe de l'Unifa et de ses organisations satellites (Esma, Florence, Laurence, Marie-Amélie, Nelly, Sonia, Stéphanie, Tassadit, François, Gilles, Martin, Pierre-Henri et Philippe) pour son accueil, son dynamisme et son soutien dans les bons moments mais aussi les moins bons.

Abréviations

CAU : Coefficient apparent d'utilisation de l'azote

Dopt : Dose optimale

ETR : Ecart-type résiduel

PMG : Poids de mille grains

Ropt : Rendement optimal

SCE : Somme des carrés des écarts

Sommaire

Introduction	1
I. Contexte de l'étude : les enjeux liés à la fertilisation azotée.....	3
1. Importance des différents types d'engrais	3
2. La dynamique de l'azote et son influence sur les engrais.....	5
a. Le cycle de l'azote.....	5
b. Pertes d'azote et efficacité des engrais	5
3. Comparaisons des engrais azotés - définitions.....	7
II. Matériel et méthodes.....	9
1. Présentation du réseau d'essais et de la base de données	9
a. Présentation du réseau	9
b. Présentation du dispositif expérimental.....	9
c. Variables collectées sur les essais.....	11
2. Démarche d'analyse statistique des données	11
a. Approche individuelle des essais par analyses de variance et méthode des contrastes	11
b. Approche continue de la réponse des essais à l'azote par l'étude des courbes de réponse	13
c. Approche globale du réseau d'essais pour plusieurs variables.....	17
III. Résultats.....	19
1. Qualité du réseau d'essai	19
2. Effets de la forme d'azote sur le rendement – comparaison des essais	19
a. Caractérisation des effets observés.....	19
b. Caractérisation des courbes de réponse	21
3. Effets de la forme d'azote sur le rendement - Approche globale du réseau d'essai.....	25
a. Effet annuel	25
b. Effet du passé de fertilisation	25
c. Effet système.....	27
d. Simulation de rendement.....	27
4. Effets de la forme d'azote sur la qualité des produits récoltés.....	29
a. Céréales.....	29
b. Colza	31
5. Effets de la forme d'azote sur l'azote absorbé dans la plante	33
a. Céréales.....	33
b. Efficacité de l'ammonitrate et de l'urée pour les céréales	35
c. Colza	35

IV.	Discussion.....	36
1.	Impact de la méthode statistique sur les résultats.....	36
a.	Précision des essais	36
b.	Dispositif split-plot factoriel : le facteur « passé » en grande parcelle	36
c.	Impact sur la pertinence des résultats obtenus.....	36
2.	Effets de la forme d'azote sur les cultures d'une rotation blé-orge-colza	37
a.	Analyse de l'effet de la forme d'azote	37
b.	Conséquences sur les aspects qualité et économie.....	39
c.	Hypothèses d'explication des effets	40
3.	Perspectives	41
	Conclusion.....	42
	Bibliographie	43

Liste des figures

Figure 1 : Formes d'azotes dans les engrais azotés (Unifa, 2008)	2
Figure 2 : Evolution des formes d'engrais azotés livrés en France métropolitaine (Unifa, 2013).....	2
Figure 3 : Le cycle de l'azote (d'après Unifa, 2008)	4
Figure 4 : Devenirs possibles des formes d'azote des engrais après l'épandage (Cohan J-P., Le Souder C., 2013)	4
Figure 5 : Localisation des essais	8
Figure 6: Plan type de l'essai forme d'azote	10
Figure 7 : Exemple de courbes de réponse selon les 3 modèles envisagés	14
Figure 8 : Exemple de courbes de réponse avec modèle complet et modèle unique	14
Figure 9 : Fréquence d'essais avec des effets forme annuel, passé et système significatifs selon la méthode utilisée (toutes doses – sauf témoin)	18
Figure 10 : Ecarts d'indice de rendement entre Ammonitrate et Urée (Ammonitrate – urée) pour chaque essai dont l'effet est significatif (toutes doses sauf témoin) – moyenne et écart-type	18
Figure 11 : Fréquence d'essais avec des effets forme annuel et système significatifs à des doses particulières (hors témoins)	20
Figure 12 : Fréquence d'essais avec un effet forme du passé de fertilisation pour la dose témoin selon la méthode utilisée	20
Figure 13: Courbes de réponse moyennes indicées - Toutes cultures - effet Annuel	24
Figure 14 : Rendements et écarts de rendement entre ammonitrate et en urée pour chaque culture - Effet annuel.....	24
Figure 15 : Courbes de réponse moyennes indicées - Toutes cultures - effet Passé	26
Figure 16 : Courbes de réponse moyennes indicées - Toutes cultures - effet Système	26
Figure 17 : Indices de rendement pour la forme urée, sans augmentation de dose - Effet annuel	28
Figure 18 : Indices de rendement pour la forme urée, avec augmentation de dose de 8% - Effet annuel	28
Figure 19 : Indices de rendement pour la forme urée, sans augmentation de dose - Effet système	28

Figure 20 : Indices de rendement pour la forme urée, avec augmentation de dose de 23% - Effet système	28
Figure 21 : Ecart de teneur en protéines (Ammonitrate-urée) pour les trois effets	28
Figure 22 : Ecart de teneur en huile (Ammonitrate-urée) pour les trois effets.....	30
Figure 23 : Ecart de teneur en azote des grains (Ammonitrate-urée) pour les trois effets	30
Figure 24 : Ecart de rendement en huile (Ammonitrate-urée) pour les trois effets pour le colza	30
Figure 25 : Ecart d'azote absorbé- plante entière (Ammonitrate-urée) pour les trois effets ..	32
Figure 26 : Ecart d'azote absorbé dans les grains (Ammonitrate-urée) pour les trois effets..	32
Figure 27 : Ecart de teneur en azote dans la paille (Ammonitrate-urée) pour les trois effets	32
Figure 28 : Ecart d'azote absorbé dans la paille (Ammonitrate-urée) pour les trois effets	32
Figure 29 : Valeurs et écarts des CAU entre l'ammonitrate et l'urée - Céréales, effets annuel et système	34
Figure 30 : Ecart d'azote absorbé dans les grains de colza (Ammonitrate-urée) pour les trois effets.....	34
Figure 31 : Valeurs et écarts des CAU entre l'ammonitrate et l'urée – Colza, effets annuel et système (2 essais).....	34
Figure 32 : Plusieurs composantes du rendement des céréales.....	38
Figure 33 : Différences de la composante Nombre de grains/m ² pour les céréales et le colza - Effets annuel et système	38

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des sites d'essais.....	8
Tableau 2 : Caractéristiques des modèles et des courbes de réponse possibles.....	14
Tableau 3 : Allure des courbes de réponses et critères d'obtention.....	16
Tableau 4 : Valeur des écarts d'indice de rendement Dose X ou Doses \leq X et, entre parenthèses, le nombre d'essais correspondant. Effets annuel et système.....	20
Tableau 5 : Typologie de courbes de réponse à l'azote issue de l'analyse de variance.....	22
Tableau 6 : Typologie des courbes de réponse issues des modèles emboîtés (fréquence d'essais).....	22
Tableau 7 : Ecart de rendement selon la culture pour l'effet passé (q/ha).....	26
Tableau 8 : Différences d'indice de rendement ou de rendement entre la forme ammonitrate et la forme urée - Effet système.....	26

Liste des annexes

Annexe I : Le phénomène de volatilisation	i
Annexe II : Compléments sur les pertes d'azote du système sol-plante	iii
Annexe III : Devenir de l'azote issu des engrais : la cascade de l'azote	v

Introduction

Les enjeux environnementaux actuels sont en faveur d'une réduction générale de l'utilisation des intrants en agriculture. Ceux-ci comprennent les produits phytosanitaires mais également les produits fertilisants. Néanmoins, la limitation de l'utilisation des engrais minéraux, si elle est trop importante, peut se faire au détriment du rendement et de la qualité des produits récoltés. De plus, les excès d'azote peuvent être préjudiciables, d'une part, aux cultures en entraînant de la verse et en pénalisant le rendement et, d'autre part à l'environnement avec des risques de perte d'azote plus élevés. Dans le cas des engrais azotés, une bonne connaissance des différents produits utilisés, de leur devenir dans le sol puis de leur utilisation dans les cultures permet de mieux connaître les mécanismes de perte et d'assimilation de l'azote, et de pouvoir éviter les sous-dosages ou les sur-dosages lors des apports d'azote. Il existe plusieurs types d'engrais azotés minéraux qui contiennent de l'azote sous différentes formes. Ceux-ci ne réagissent pas de la même manière dans le système sol-plante après leur apport. Pour approfondir les conditions d'une meilleure performance des engrais azotés couramment utilisés en France, le groupe de travail ADA de l'Unifa (Union des Industries de la Fertilisation), composé des principaux producteurs d'ammonitrate en France, a mis en place une expérimentation multi-sites et pluriannuelle de comparaison de l'ammonitrate et de l'urée en collaboration avec deux instituts techniques (Arvalis et Cetiom) et le groupement coopératif (InVivo).

Cette étude compare l'effet de ces deux engrais sur le rendement et d'autres variables relatives à la qualité des cultures (teneur en protéines pour les céréales et teneur en huile pour le colza) et à l'azote absorbé à partir des résultats d'essais menés sur plusieurs années dans toute la France pour une rotation colza-blé-orge. Les essais sont des essais de longue durée c'est-à-dire qu'on n'étudie pas seulement l'effet de la forme d'azote sur les variables d'intérêt l'année de l'apport mais aussi sur l'année qui suit l'apport. Cette étude a pour objectif de répondre à la question suivante : Y a-t-il des différences d'efficience et d'efficacité entre l'ammonitrate et l'urée ? Cette problématique soulève plusieurs questions : Quel est l'effet du type d'engrais sur plusieurs variables ? Y a-t-il un effet du type d'engrais appliqué l'année précédente de l'étude ? Quelles sont les différences observées ? Comment les caractériser et les expliquer ? Quelles recommandations en termes de fertilisation peut-on fournir à partir de ces résultats ? Pour cela, on étudie les différences entre les deux formes d'azote (significativité, écarts, variations selon les doses apportées avec l'étude des courbes de réponse,...). Plusieurs méthodes d'analyse statistique sont employées pour répondre à ces questions.

Ce rapport présente tout d'abord le contexte de cette étude en s'intéressant à l'importance des engrais azotés et à leur devenir après leur épandage, par l'étude du cycle de l'azote. La démarche et les méthodes statistiques employées pour traiter les essais sont ensuite présentées dans une seconde partie. Enfin, les résultats issus des analyses sont présentés et une discussion permet d'interpréter les résultats de cette étude et d'aborder l'intérêt de ces résultats pour enrichir la compréhension du fonctionnement des engrais et de leur action sur le système sol-plante.

TYPE DE FERTILISANTS	ALIMENTATION PRÉFÉRENTIELLE DE LA PLANTE		
	URÉIQUE	AMMONIACALE	NITRIQUE
SOLIDE			
Urée	100%		
Sulfate d'ammoniaque		100%	
Sulfonitrate d'ammoniaque		73%	27%
Ammonitrate		50%	50%
Nitrate de chaux		7%	93%
Nitrate de potassium			100%
GAZ (avec enfouissement obligatoire)			
Ammoniac anhydre NH ₃		100%	
LIQUIDE			
Solution azotée	50%	25%	25%

Figure 1 : Formes d'azotes dans les engrais azotés (Unifa, 2008)

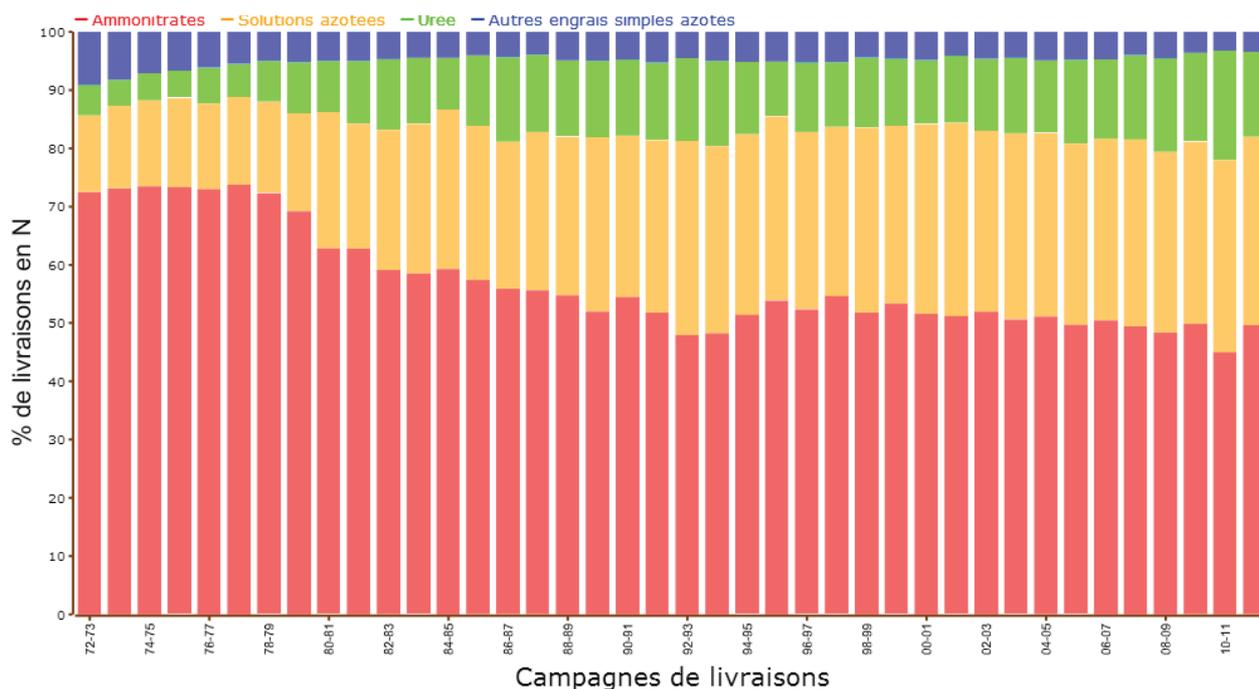


Figure 2 : Evolution des formes d'engrais azotés livrés en France métropolitaine (Unifa, 2013)

I. Contexte de l'étude : les enjeux liés à la fertilisation azotée

Les engrais azotés minéraux ont une importance significative dans la production alimentaire mondiale car ils contribuent à la production de protéines végétales à la base de la chaîne alimentaire. En effet, environ 40% des besoins alimentaires mondiaux de la population dépendent de l'utilisation de ces engrais (Mosier A. R. et al., 2004). L'Asie est une région majeure dans le marché des engrais azotés : elle consomme plus de 62% des engrais azotés produits dans le monde. L'Europe représente une part assez faible qui a tendance à diminuer avec 10,5% (soit 11 Mt d'azote en 2010) de la consommation mondiale d'azote (IFA, 2011).

1. Importance des différents types d'engrais

On s'intéresse dans cette étude à deux engrais azotés simples : ammonitrate et urée. Les engrais simples azotés sont la majorité des engrais azotés utilisés en France : ils représentent environ 89% de l'azote minéral livré en France métropolitaine (UNIFA, 2013). L'azote de ces engrais se présente sous différentes formes selon le type d'engrais (Fig. 1). L'urée est un engrais solide dont la molécule ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) contient de l'azote sous forme d'amide. Les ammonitrates sont des engrais solides dont l'azote est constitué à 50% d'azote ammoniacal (NH_4^+) et à 50% d'azote nitrique (NO_3^-). On distingue l'ammonitrate haut dosage à 33,5% d'azote et l'ammonitrate calcaire à plus de 27% d'azote. Enfin, les solutions azotées sont, comme leur nom l'indique, sous forme liquide et sont un mélange d'urée (50% de l'azote total) et de nitrate d'ammonium. Il existe d'autres formes d'engrais azotés tels que les engrais azotés soufrés ou magnésiens. En France, l'engrais azoté le plus utilisé est l'ammonitrate (49,6% de l'azote livré en engrais azoté simple en 2011/2012 en France métropolitaine = 888 680 tonnes d'azote). L'urée représente 14,5% de l'azote livré sous forme d'engrais azoté simple (UNIFA, 2013). La solution azotée est intermédiaire entre ces deux engrais (Fig. 2). La proportion d'engrais sous forme uréique a tendance à augmenter, aux dépens des ammonitrates. Néanmoins, ces proportions ne sont pas équivalentes à l'échelle mondiale puisque 55% de l'azote consommé dans le monde en 2010 provient de l'utilisation d'urée (IFA, 2011).

Le choix entre les différents engrais se fait selon des critères économiques et techniques. Historiquement, la production d'engrais en Europe privilégie les ammonitrates pour des raisons d'efficacité agronomique sous le climat de cette région. En France, l'urée granulée est exclusivement un produit importé d'autres pays de l'Union Européenne ou de pays tiers. Son attrait réside en partie dans son prix. En effet, les prix des engrais sont assez volatils et très dépendants des coûts de l'énergie et, lorsque ceux-ci sont importants, l'urée peut paraître plus avantageuse du fait de son prix généralement plus faible par rapport aux ammonitrates. Par exemple, début avril 2013, l'urée est à 794€/T d'azote et l'ammonitrate 33,5% est à 1042 €/T d'azote (d'après Terre-net, 2013). Néanmoins, les différences de prix entre ces deux formes d'engrais azotés sont très variables. Le choix d'un engrais est aussi lié à l'environnement technico-économique des agriculteurs (prix de l'engrais, circuit d'approvisionnement, choix d'investissement dans le matériel d'épandage) (Comifer Groupe Azote, 2011) et au type d'engrais. Ainsi, l'urée peut attirer par sa plus forte teneur en azote (46% contre moins de 35% dans l'ammonitrate) (Hofman G., Van Cleemput O., 2004). Néanmoins, la densité de l'urée n'est que de 0,7 contre environ 1 pour l'ammonitrate ce qui revient à avoir une dose d'azote équivalente pour les deux formes pour un même volume. Cela a aussi un impact sur la facilité d'épandage des engrais. En effet, il est plus difficile d'épandre un engrais de faible densité sur des largeurs importantes par rapport à un engrais de densité plus élevée.

De plus, la disponibilité de l'azote dépend de sa forme : les engrais à base d'azote nitrique comme les ammonitrates contiennent de l'azote directement assimilable. Ce n'est pas le cas

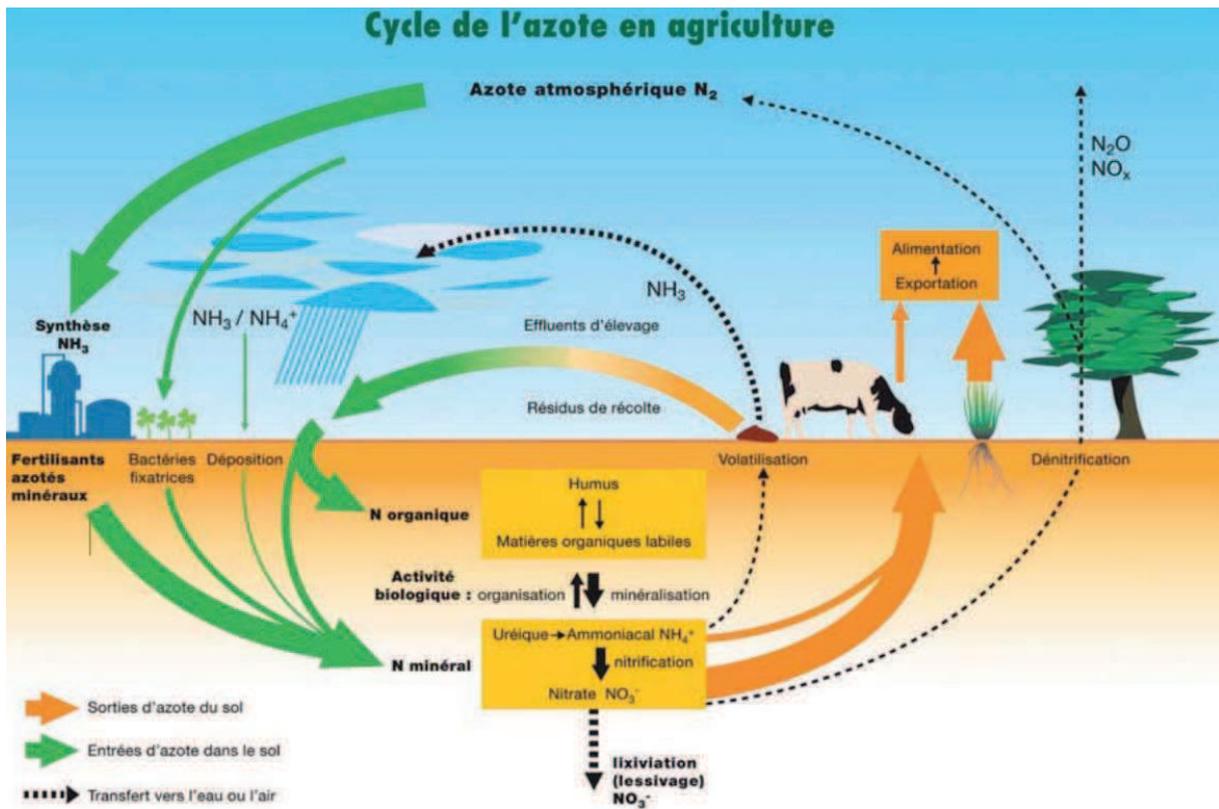


Figure 3 : Le cycle de l'azote (d'après Unifa, 2008)

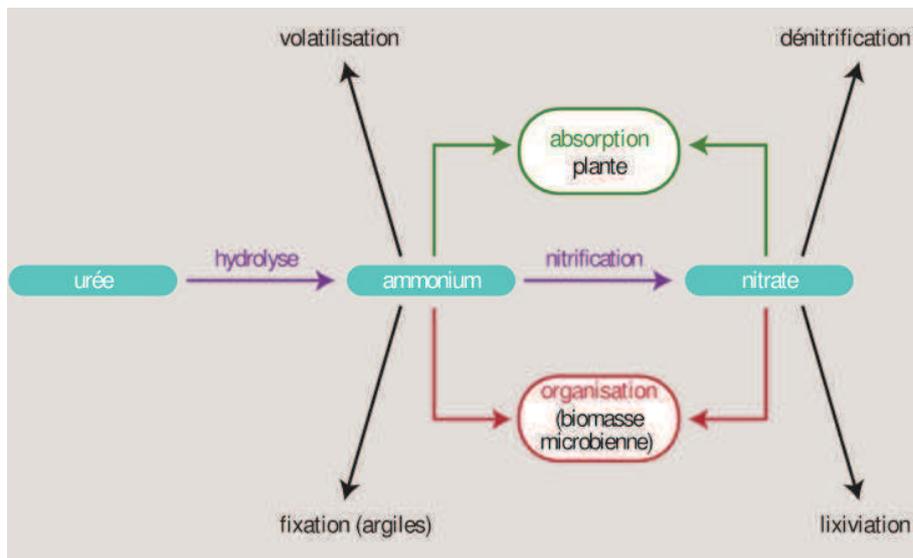


Figure 4 : Devenirs possibles des formes d'azote des engrais après l'épandage (Cohan J-P., Le Souder C., 2013)

pour l'urée dont la dégradation en nitrates nécessite plusieurs étapes. Les différents types d'engrais n'ont alors pas la même efficacité après leur introduction dans le système sol-plante. Ainsi, l'application des engrais dans les champs est généralement suivie d'une perte variable d'une partie de l'azote contenu dans l'engrais.

2. La dynamique de l'azote et son influence sur les engrais

a. Le cycle de l'azote

Les entrées d'azote dans le système sol-plante sont multiples : elles se font par déposition atmosphérique, par fixation biologique d'azote de l'air (symbiotique avec des légumineuses ou non symbiotique avec des bactéries libres), par apport de résidus de culture et par apports de fertilisants minéraux ou organiques. Dans le sol, des flux peuvent se produire entre les différentes formes d'azote (voir figure 3). La matière organique, qui contient l'azote organique, peut être décomposée en deux pools : un pool stable, peu accessible aux micro-organismes et donc peu minéralisable qu'on appelle humus (minéralisation à l'échelle de plusieurs semaines à plusieurs années, (IFA Task Force on Reactive Nitrogen, 2007)), et un pool de matière organique dite active accessible aux micro-organismes et minéralisable à court et moyen terme. L'azote organique peut tout d'abord être transformé en azote minéral NH_4^+ . C'est l'étape de minéralisation. Puis l'ammonium peut être oxydé en nitrite NO_2^- et en nitrate NO_3^- : c'est l'étape de nitrification. La vitesse de cette étape est régie par plusieurs facteurs. Le nitrate est très mobile dans le sol et directement assimilable par les plantes. Il atteint facilement les racines mais est cependant très sensible à la lixiviation. Les nitrates sont donc susceptibles d'être perdus pour le système sol-plante s'ils sont présents en dessous de la limite inférieure de la zone de présence des racines. Les nitrites ainsi que la molécule d'urée sont aussi concernés par la lixiviation (Butterbach-Bahl K. et al., 2011).

L'azote minéral peut également se trouver sous la forme de l'ion ammonium NH_4^+ . Cet ion est facilement absorbé par la culture mais en petites quantités. En effet, il est peu mobile dans le sol et est adsorbé sur le système adsorbant du sol (argiles, matière organique,...). Ce sont donc les racines qui doivent l'atteindre pour l'absorber (Yara, 2011). L'ammonium peut aussi être immobilisé par les micro-organismes pour leur croissance et leur activité et être transformé en azote organique : c'est l'étape d'organisation. Ainsi, l'azote minéral sous les formes d'ammonium et de nitrate peut être absorbé par les plantes. L'urée n'est pas absorbée en quantités significatives par les plantes.

b. Pertes d'azote et efficacité des engrais

L'exportation des plantes amène à une sortie d'azote « volontaire » du système. Par ailleurs, d'autres pertes d'azote existent tout au long du cycle de l'azote : la lixiviation des nitrates mais aussi des sorties vers l'atmosphère. Des pertes d'azote peuvent être aussi induites par les phénomènes de ruissellement ou d'érosion (Mosier A. R. et al., 2004). Les pertes vers l'atmosphère peuvent se produire à partir de l'ammonium par volatilisation. En effet, l'ammonium est en équilibre dans le sol avec l'ammoniac NH_3 , gaz qui est susceptible d'être volatilisé et perdu dans l'atmosphère. Des pertes ont aussi lieu lors de l'étape de dénitrification qui amène à la formation de diazote N_2 . Lors de ce processus, des pertes de protoxyde d'azote N_2O (puissant gaz à effet de serre) ou d'oxydes d'azote NO_x (polluants atmosphériques) peuvent se produire.

L'azote minéral contenu dans les engrais ne se distingue pas de l'azote minéral du sol et peut subir, selon sa forme, les différents processus du cycle de l'azote, y compris les pertes (Fig. 4) : organisation, lixiviation, dénitrification, volatilisation. La volatilisation est la perte d'azote la plus sujette à variation selon le type d'engrais utilisé (Comifer Groupe Azote, 2011). Des informations complémentaires sur la volatilisation sont en annexe. Elle 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 transformé en ammonium NH_4^+ et ensuite en nitrate NO_3^- . L'hydrolyse est assez rapide mais elle dépend de l'humidité du sol. Lors de la dissolution du granulé d'urée puis l'hydrolyse de la molécule, le pH augmente fortement (jusqu'à une valeur de 9) autour de la zone de dissolution (Comifer Groupe Azote, 2011). Cela entraîne un déplacement de l'équilibre $\text{NH}_4^+ \leftrightarrow \text{NH}_3$ en faveur de NH_3 . L'ammoniacque en solution se volatilise facilement en ammoniac gazeux au contact de l'air, gaz qui est alors perdu pour la plante. La volatilisation ammoniacale a été estimée à environ 11,5% de la dose d'azote apportée pour l'urée épandue en surface et à seulement 0,6% pour les ammonitrates (EMEP-CORINAIR, 2007). Néanmoins, les incertitudes concernant ce phénomène sont importantes. Pour la lixiviation, les risques sont faibles pour les engrais : on préconise leur épandage en période d'absorption des cultures, lorsque les périodes de drainage sont plus rares. De plus, les pertes 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). Des détails concernant les pertes d'azote des engrais sont en annexe.

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 : $\text{CAU} = (U_N - U_0) / X$ où U_N et U_0 sont l'absorption d'azote 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. Cela correspond actuellement aux fractionnements des apports d'azote conseillés. Augmenter le nombre d'apports est cependant difficile à réaliser à cause de difficultés techniques ou économiques. De plus, le nombre de passages peut être réduit en utilisant des inhibiteurs de nitrification qui ralentissent ce processus (Mosier A. R. et al., 2004). Par ailleurs, l'efficacité peut également être améliorée par l'utilisation d'outils de pilotage pour réaliser un épandage plus précis dans la parcelle 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).

Enfin, les engrais sont aussi à considérer d'un point de vue environnemental. Les formes d'azote issues de ces engrais peuvent réagir et prendre plusieurs formes via le cycle de l'azote. Chaque forme peut avoir un impact sur l'environnement. C'est ce qu'on appelle la cascade de l'azote. L'utilisation d'engrais minéraux résulte en une augmentation de la quantité d'azote réactif introduit dans la biosphère et intensifie la cascade de l'azote, avec des impacts environnementaux liés à cet azote et la possibilité d'avoir de l'azote réactif qui s'accumule dans certains compartiments de l'environnement (GIS GC HP2E, 2007). (Voir annexe : Cascade de l'azote)

3. Comparaisons des engrais azotés - définitions

La question de l'expérimentation pour comparer l'efficacité de différents engrais n'est pas nouvelle et des études à ce sujet ont déjà été publiées. En France, des essais de comparaison entre urée et solution azotée sur blé tendre d'hiver menés par l'ITCF (aujourd'hui Arvalis) et Hydro Agri France (aujourd'hui Yara) entre 1994 et 1995 ont amené à préconiser une majoration de dose de la solution azotée de 10 à 15% par rapport à l'ammonitrate selon les types de sol pour compenser les écarts d'efficacité qui peuvent se produire 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 conséquences de changements d'utilisation des produits fertilisants azotés sur l'agriculture et l'environnement au Royaume-Uni en comparant les engrais à base d'urée et ceux à base d'ammonitrate. Parmi les différentes expérimentations et résultats qui en résultent, 10 essais sur céréales d'hiver entre 2004 et 2005 ont permis de conclure que, en moyenne, une majoration de la dose d'azote d'urée d'environ 20% était nécessaire pour avoir des rendements et des concentrations en azote du grain équivalents par rapport à l'utilisation d'ammonitrate (Dampney et al., 2006). Enfin, Sylvester et al. (2012) ont repris les données et résultats de ces deux études britanniques pour les traiter simultanément et ont montré que l'efficacité de l'urée représentait 90% de celle de l'ammonitrate. Toutes ces études fournissent des conclusions intéressantes pour la comparaison mais celles-ci sont principalement valables seulement pour des céréales d'hiver (blé tendre ou orge).

Enfin, voici quelques définitions d'expressions utilisées dans ce rapport :

- Forme d'azote : un des deux engrais étudiés : ammonitrate et urée
- Effet annuel / effet de la fertilisation annuelle : effet de la forme d'azote apportée sur la culture récoltée, indépendamment de la forme d'azote utilisée l'année précédente
- Effet passé / effet du passé de fertilisation : effet de la forme d'azote utilisée sur la culture précédente, indépendamment de la forme d'azote utilisée l'année de récolte
- Effet système : effet de la forme d'azote sur la culture précédente et sur la culture de l'année de récolte (même forme pour les deux années)
- Courbe de réponse du rendement à l'azote : une courbe de réponse représente la valeur du rendement en fonction de la dose d'azote apportée
- Indice de rendement (%) : variable issue du rendement qui permet de comparer des cultures aux gammes de rendements différents (céréales et colza). Les indices de rendements sont calculés à partir du rendement obtenu à la dose bilan pour un passé de fertilisation en ammonitrate et une fertilisation annuelle également en ammonitrate
- Efficience d'un engrais : quantité d'azote nécessaire pour produire une unité de production (d'après Cohan J-P., Le Souder C., 2013)
- Efficacité d'absorption d'un engrais : pourcentage d'azote provenant de l'engrais absorbé par la culture (Cohan J-P., Le Souder C., 2013)



Figure 5 : Localisation des essais

Tableau 1 : Caractéristiques des sites d'essais

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	Maïs-bth-colza	Non calcaire

* Pdt = Pomme de terre

II. Matériel et méthodes

1. Présentation du réseau d'essais et de la base de données

a. Présentation du réseau

La figure 5 présente la localisation des 12 sites d'essais du réseau. Plusieurs organismes interviennent dans ce réseau : le commanditaire de l'essai, les partenaires et les prestataires qui réalisent, pour certains sites, les expérimentations (Antédis, SC2 ou Staphyt). Les années d'expérimentation vont de 2002 à 2012 mais chaque site a une durée d'expérimentation de 4 à 6 ans généralement. Tous les essais ne débutent pas la même année et certains continuent encore aujourd'hui pour la campagne 2013. On identifie chaque essai (combinaison d'un site et d'une année d'expérimentation) par le numéro du département du site et l'année de récolte. Au total, 52 essais 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. Pour la suite des analyses, on pourra nommer ces cultures par des abréviations :

Blé tendre d'hiver = **bth** Blé dur = **bd**

Orge d'hiver = **oh**

Orge de printemps = **op**

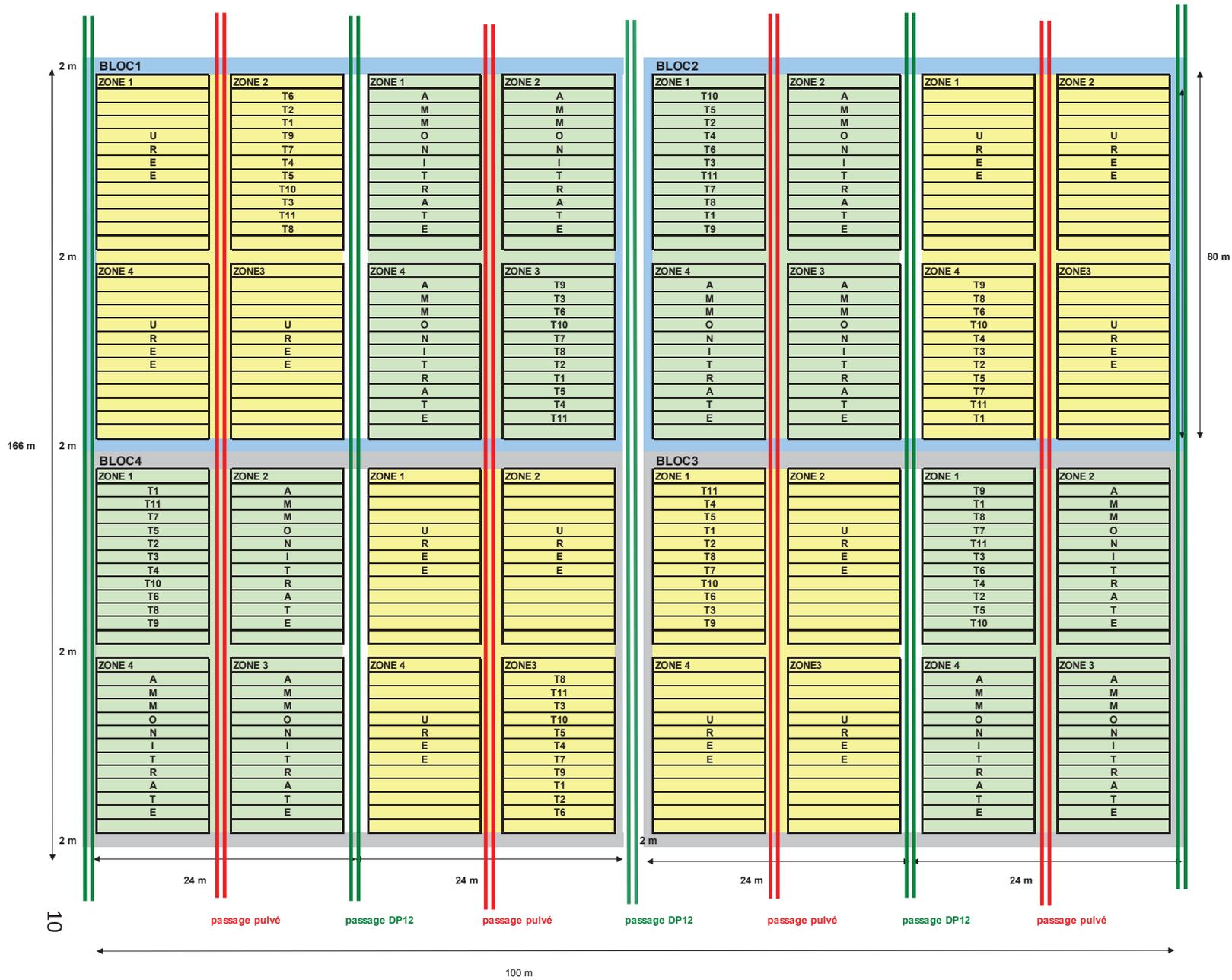
Colza d'hiver = **colza**

Au total, sur les 52 essais, on trouve 21 blés (18 bth et 3 bd), 16 orges (10 oh et 6 op) et 15 colzas. 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 CaCO₃ total > 5%. Parmi les 12 sites d'expérimentation, 7 sont en sol non calcaire et 5 sont en sol calcaire.

b. Présentation du dispositif expérimental

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. Chaque bloc est donc divisé en deux grandes parcelles dont la fertilisation de l'année précédente est soit de l'urée, soit de l'ammonitrate. Puis, on segmente chaque grande parcelle en quatre zones. Chaque année, une de ces zones est divisée en 11 parcelles élémentaires qui sont en 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 (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. Cette parcelle se distingue seulement par son passé de fertilisation. Les trois autres zones sont fertilisées avec le même engrais que pour le passé de fertilisation à la dose bilan X. Ce sont des zones « en réserve ». L'année suivante, les 11 parcelles élémentaires sont situées sur une autre des 4 zones de la grande parcelle. 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 6: Plan type de l'essai forme d'azote



Modalité	Dose	Forme d'azote
T1	Témoins ON (T0)	
T2	X-80	Urée 46
T3	X-40	Urée 46
T4	X (dose bilan)	Urée 46
T5	X+40	Urée 46
T6	X+80	Urée 46
T7	X-80	Ammo 33.5
T8	X-40	Ammo 33.5
T9	X (dose bilan)	Ammo 33.5
T10	X+40	Ammo 33.5
T11	X+80	Ammo 33.5

La figure 6 présente un plan type du dispositif expérimental. Les parcelles élémentaires ont une taille de 3 m x 10 m. Au total, l'emprise de l'essai approche les 2 hectares.

La première année d'expérimentation est une année de différenciation qui permet de créer le dispositif expérimental. Pour cela, les quatre blocs sont créés et, dans chaque bloc, une moitié est fertilisée avec de l'ammonitrate et l'autre moitié avec de l'urée. C'est le facteur « passé de fertilisation » de l'année suivante. Il n'y a pas de parcelles élémentaires. De plus, 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. Enfin, l'itinéraire technique mis en place sur les essais ne doit pas permettre d'avoir d'autres facteurs limitants 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.

c. 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.

Contrôle : Reliquats azotés sortie hiver, pesée de la biomasse sortie hiver (colza), outil de pilotage du 3^{ème} apport d'azote (N-tester ou GPN Pilot), comptage épis (céréales), PMG, nombre de grains/m²

Quantité : Rendement, rendement en huile par ha (colza)

Qualité : Teneur en protéines, teneur en huile (colza)

Azote : teneur en azote des grains et de la paille, azote absorbé plante entière

2. Démarche d'analyse statistique des données

a. Approche individuelle des essais par analyses de variance et méthode des contrastes

Avant d'étudier les effets recherchés à proprement parler, il faut s'assurer d'avoir une base de données « propre ». Pour cela, on effectue, pour chaque essai, une analyse de variance sur le rendement. Celle-ci permet de déceler les valeurs aberrantes (erreur expérimentale ou de saisie) ainsi que les blocs trop hétérogènes et de les corriger ou les supprimer. Ainsi, 12 données élémentaires et 2 blocs ont été supprimés de la base de données.

De plus, les analyses de variance permettent, d'une part, de déterminer la précision de l'essai (par l'écart-type résiduel) et, d'autre part, de décomposer la variance totale de la variable étudiée, ici le rendement, entre l'effet des blocs, des facteurs et de l'interaction entre ces facteurs. On s'intéresse ici à la réponse de la culture à l'azote apporté, selon sa forme (ammonitrate ou urée). Les parcelles élémentaires « témoins » ne sont donc pas prises en compte dans ces analyses de variance. Les trois facteurs de l'analyse de variance sont le passé de fertilisation (noté « effet passé »), la fertilisation annuelle (notée « effet annuel ») et le facteur « dose d'azote ». Les résultats de ces analyses de variance permettent de déterminer, pour chaque essai, si les effets des facteurs étudiés sont significatifs. Le seuil de significativité

utilisé tout au long de cette étude pour bien mettre en évidence les effets est de 10 %. On quantifie ensuite les écarts moyens de rendement entre les deux formes d'azote pour les effets passé et annuel.

Par ailleurs, les différences de rendement selon les doses d'azote apportées et selon les formes d'azote peuvent être décrites de manière qualitative en caractérisant les différents types de réponse à l'azote. Ainsi, les essais qui n'ont pas d'effet significatifs entre les deux formes d'azote et pas d'interactions entre facteur et dose ont des réponses à l'azote identiques. Si un effet est significatif et qu'il n'y a pas d'interactions entre le facteur et la dose, les courbes de réponse sont qualifiées de « parallèles », c'est-à-dire que l'évolution du rendement est différente selon la forme d'azote de l'effet étudié mais l'effet de cette forme est toujours le même quelle que soit la dose d'azote apportée. Enfin, les autres cas (présence d'une interaction facteur x dose) sont des courbes « différentes et non parallèles ».

La méthode des contrastes est une méthode de comparaison de moyennes qui peut être réalisée avec l'analyse de variance. Elle permet de tester des hypothèses particulières, et non plus de tester des effets « globaux » sur l'ensemble des données comme en analyse de variance. Cette méthode peut s'appliquer à la comparaison de deux moyennes entre elles mais aussi de plusieurs groupes de moyennes. Elle prend en compte la précision de l'essai pour mettre en évidence des effets significatifs. On utilise cette méthode dans cette étude pour répondre à plusieurs questions :

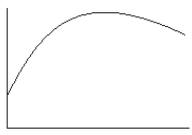
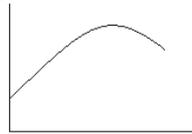
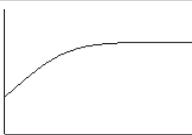
- Y a-t-il un effet du système de fertilisation sur le rendement ? (contraste entre les groupes de modalités {passé ammonitrate ; annuel ammonitrate} et {passé urée ; annuel urée})
- Y a-t-il un effet annuel à la dose bilan X ? (contraste entre les groupes de modalités {annuel ammonitrate ; dose X} et {annuel urée ; dose X})
- Y a-t-il un effet système à la dose bilan X ? (contraste entre les groupes de modalités {passé ammonitrate ; annuel ammonitrate ; dose X} et {passé urée ; annuel urée ; dose X})
- Y a-t-il des effets annuel et système aux doses inférieures ou égales à la dose bilan X ? (contraste entre les groupes de modalités {annuel ammonitrate ; doses X-80, X-40 et X} et {annuel urée ; doses X-80, X-40 et X} pour l'effet annuel et {passé ammonitrate ; annuel ammonitrate ; doses X-80, X-40 et X} et {passé urée ; annuel urée ; doses X-80, X-40 et X} pour l'effet système)
- Quel est l'effet du passé de fertilisation sur les parcelles « témoin » ? Ces parcelles n'ayant pas reçu d'apport d'azote l'année d'étude reflètent directement l'effet du passé de fertilisation (contraste entre les groupes de modalités {passé ammonitrate ; dose nulle « témoin »} et {passé urée ; dose nulle « témoin »})

En plus de savoir si les effets étudiés sont significatifs, on peut quantifier les écarts selon la forme d'azote apportée, comme pour l'analyse de variance.

b. Approche continue de la réponse des essais à l'azote par l'étude des courbes de réponse

Les mesures de rendement effectuées pour plusieurs doses d'azote appliquées permettent, pour chaque essai, de construire une courbe de réponse à l'azote. Elle consiste à représenter le rendement en fonction de la dose d'azote apportée. Cette réponse est visualisée par 6 points : le témoin et les doses X-80, X-40, X, X+40 et X+80. Les données utilisées sont des moyennes des 4 répétitions de l'essai. Pour pouvoir extrapoler des rendements à des doses d'azote quelconques, il est nécessaire d'avoir une représentation continue de la réponse à l'azote. Pour

Tableau 2 : Caractéristiques des modèles et des courbes de réponse possibles

Nom	Equation	Allure de la courbe	Observations
ADAS	$Rdt = a + b \times Dose + c \times 0,99^{Dose}$		Non symétrique
Quadratique	$Rdt = a + b \times Dose + c \times Dose^2$		Tendance à surestimer le rendement optimal
Quadratique-plateau	$Rdt = a + b \times Dose + c \times Dose^2$ si $Dose < D_{opt}$, Rendement = R_{opt} si $Dose > D_{opt}$		Pas de décroissance possible

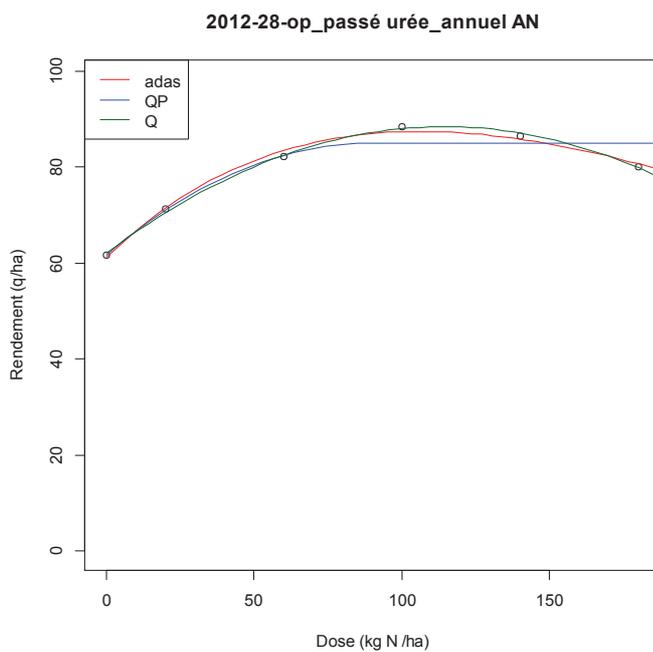


Figure 7 : Exemple de courbes de réponse selon les 3 modèles envisagés

Courbes de réponses qui correspondent à un passé de fertilisation en urée et une fertilisation annuelle en ammonitrate (AN)
 QP = Quadratique-plateau
 Q = Quadratique

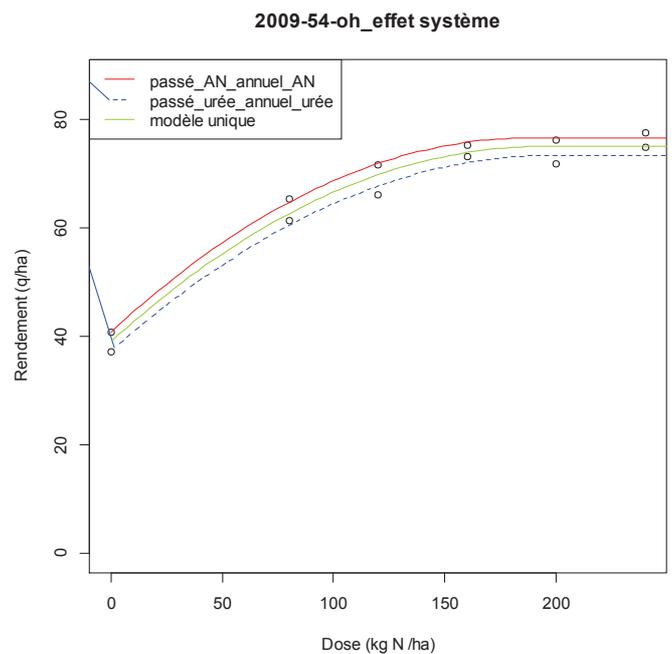


Figure 8 : Exemple de courbes de réponse avec modèle complet et modèle unique

Pour cet essai, les courbes de réponse selon les formes sont statistiquement différentes (test F, $p < 0.05$)

cela, on cherche à décrire cette réponse par l'utilisation d'un modèle. Richard H. (1996) décrit certaines contraintes qui doivent s'appliquer à la courbe de réponse modélisée :

- « Elle doit être la plus proche possible des [...] points expérimentaux,
- Elle doit être décrite par une équation mathématique (la correspondance Dose-Rendement est alors systématique quelle que soit la dose) »

Les modèles envisagés dans le cadre de cette étude sont le modèle quadratique-plateau, le modèle quadratique et le modèle ADAS. Le tableau 2 présente les caractéristiques de ces différents modèles de courbe de réponse. La dose optimale (Dopt) du modèle correspond ici à l'optimum technique, c'est-à-dire la dose à partir de laquelle le rendement est maximal (Ropt). Les constructions de courbes de réponse ont été réalisées à l'aide du logiciel R.

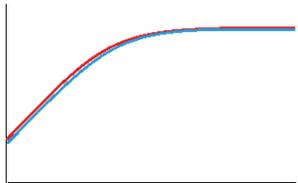
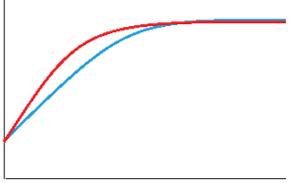
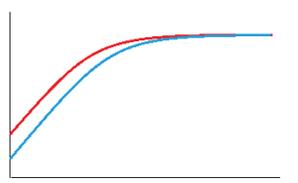
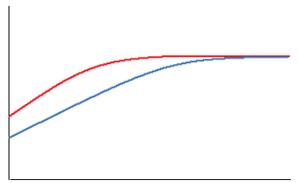
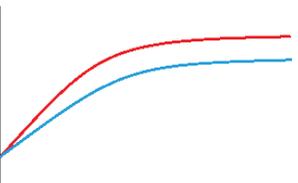
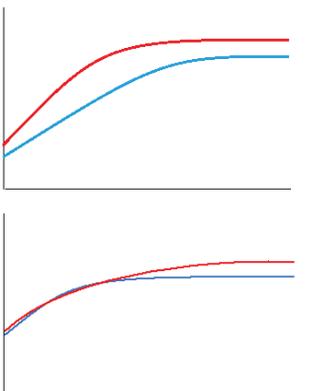
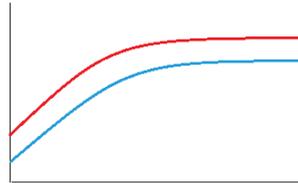
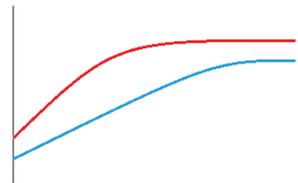
Pour choisir entre ces 3 modèles, on cherche à avoir un modèle le plus précis possible en minimisant la SCE (somme des carrés des écarts entre valeurs observées et valeurs estimées) de chaque modèle pour chaque essai. On souhaite également avoir un même modèle pour l'ensemble des courbes de réponse, compte tenu des écarts possibles entre modèles pour ajuster la dose optimale. Cependant, aucun de ces modèles ne permet de décrire correctement toutes les courbes de réponse. Le choix réalisé est alors d'utiliser le modèle quadratique-plateau pour tous les essais qui ne présentent pas de décroissance de rendement significative aux doses d'azote les plus élevées (test de Student-Newman-Keuls à 10%). Pour les autres essais, le modèle utilisé est le modèle ADAS qui s'adapte bien aux courbes avec une décroissance aux doses élevées. Ces essais correspondent généralement à des essais avec orges de printemps qui ont subi des phénomènes de verse. Le modèle ADAS concerne 7 essais sur les 52 disponibles. La figure 7 présente, pour un essai avec une décroissance significative (28-2012 en orge de printemps), les courbes de réponse construites selon les trois modèles. On utilise dans ce cas le modèle ADAS.

L'objectif de cette modélisation est de pouvoir déterminer si les courbes de réponse du rendement à l'ammonitrate et à l'urée sont différentes ou non et, si oui, de quelle manière elles le sont. Pour cela, on compare les courbes de réponse en comparant des modèles emboîtés. Un modèle emboîté est un cas particulier d'un modèle plus complexe. Par exemple, pour tester l'effet de la fertilisation annuelle, on construit, pour chaque essai, une courbe de réponse à l'ammonitrate (forme de l'année d'étude) d'une part et une courbe de réponse à l'urée d'autre part. Chaque courbe de réponse est accompagnée d'un écart-type résiduel (ETR) qui quantifie l'écart entre les points expérimentaux et les données simulées par la courbe de réponse. C'est le modèle complexe dont l'ETR est la somme des ETR de chaque courbe. On détermine ensuite une courbe de réponse « unique », sans distinction de la forme d'azote ; c'est un modèle simplifié à une seule courbe avec un ETR associé.

Un test statistique de Fischer à 10% permet de comparer les ETR des deux modèles emboîtés. Si ce test est significatif, alors cela signifie que le modèle unique est moins précis que le modèle complet (à 2 courbes de réponse) et que les deux courbes de réponse selon les deux formes d'engrais sont statistiquement différentes. L'effet étudié est alors significatif. Si le test est non significatif, cela signifie que le modèle unique est aussi précis que le modèle complet et que les deux courbes du modèle complet sont identiques. L'effet étudié est alors non significatif. La figure 8 illustre cette notion de modèles emboîtés. Cette méthode est utilisée pour les trois effets étudiés (effet passé, effet annuel et effet système).

A l'issue de la réalisation des courbes de réponse, les paramètres des modèles permettent de déterminer de façon mathématique la dose optimale (Dopt), le rendement optimal (Ropt) et l'ordonnée à l'origine qui correspondent à chaque courbe de réponse. On peut alors quantifier

Tableau 3 : Allure des courbes de réponses et critères d'obtention

	a AN = a urée pas d'effet passé sur témoins		a AN ≠ a urée effet passé sur témoins	
	Dopt AN = Dopt urée	Dopt AN ≠ Dopt urée	Dopt AN = Dopt urée	Dopt AN ≠ Dopt urée
Ropt AN = Ropt urée	COURBES IDENTIQUES 	COURBES DECALEES 	COURBES IDENTIQUES 	COURBES DECALEES 
Ropt AN ≠ Ropt urée	COURBES PARALLELES 	COURBES DECALEES ET PARALLELES 	COURBES PARALLELES 	COURBES DECALEES ET PARALLELES 

a = ordonnée à l'origine

les écarts de rendement optimal ou de dose optimale. Lors de la première modélisation, certaines doses optimales étaient supérieures à la dose maximale testée expérimentalement. Dans ce cas, on recommence la modélisation en limitant la dose optimale à la valeur de la dose maximale testée. Cela a concerné la moitié des essais.

Lorsque les effets testés sont significatifs, l'étude des paramètres permet de décrire cet effet en caractérisant les courbes de réponses. Celles-ci peuvent être décalées ou parallèles. De plus, pour les effets passé et système, une différence entre les ordonnées à l'origine (notées a) correspond à un effet du passé de fertilisation sur les témoins. Le tableau 3 présente les différents types de courbes que l'on peut observer. Il faut cependant noter qu'on peut avoir des courbes qui semblent, visuellement, parallèles mais, du fait de la qualité de la modélisation qui peut être moyenne (ETR élevé), ces courbes sont considérées comme identiques d'un point de vue statistique. Cela reste néanmoins peu fréquent.

Enfin, l'obtention des doses optimales permet d'obtenir le CAU (coefficient apparent d'utilisation de l'azote) pour chaque essai pour lequel les données d'azote absorbé plante entière pour plusieurs doses inférieures ou égales à la dose optimale sont disponibles. On obtient cette variable en calculant la pente de la relation linéaire entre l'azote absorbé et la dose d'azote apportée. Dans cette relation, la dose d'azote apportée est limitée à la dose optimale calculée précédemment pour rester dans un domaine de doses où la quantité d'azote absorbé répond linéairement.

c. Approche globale du réseau d'essais pour plusieurs variables

Dans cette partie, on analyse le rendement et d'autres variables non plus à l'échelle d'un essai mais à l'échelle du réseau d'essais. L'objectif est d'identifier des tendances concernant les effets du passé de fertilisation, de la fertilisation annuelle et du système de fertilisation. En moyenne, sur l'ensemble du réseau d'essais, y a-t-il un ou plusieurs effets ? Pour répondre à cette question, on applique la méthode des couples : pour chaque effet testé on utilise des données moyennes par essai, par forme d'azote et par variable. On obtient alors deux séries de données : une pour l'ammonitrate et une autre pour l'urée. La comparaison de ces deux séries est réalisée par un test de Student pour échantillons appariés (une paire de données par essai).

Les variables traitées sont : le rendement, la quantité d'huile par hectare, la teneur en protéines ou en huile et des composantes de rendement (PMG, nombre d'épis/m², nombre de grains/m²). En plus d'étudier des variables de rendement et de qualité, on s'intéresse à l'efficacité de l'azote apporté en analysant les variables d'azote absorbé plante entière, azote absorbé dans les grains, azote absorbé dans les pailles et CAU (seulement pour les céréales).

On utilise également la méthode des couples à l'échelle du réseau d'essais pour comparer des rendements obtenus par simulation, pour les effets annuel et système. Pour cela, on utilise les équations de chaque courbe de réponse obtenues précédemment pour simuler des rendements à des doses non testées. L'objectif de cette manipulation est de déterminer, à partir de la dose bilan X, de quelle quantité la dose d'azote de la forme la moins performante doit être augmentée pour rendre la différence de rendement entre les deux formes non significative.

Enfin, après avoir pu caractériser les effets pour le rendement selon la forme d'azote utilisée, on essaye de déterminer si certaines variables (site, année, culture, nature du sol, niveau de rendement et CAU) permettent d'expliquer, pour le rendement et pour chaque effet, la répartition entre essais avec un effet significatif et avec effet non significatif. On réalise pour cela des tests exacts de Fischer (équivalent du test du χ^2 pour des effectifs réduits) par variable.

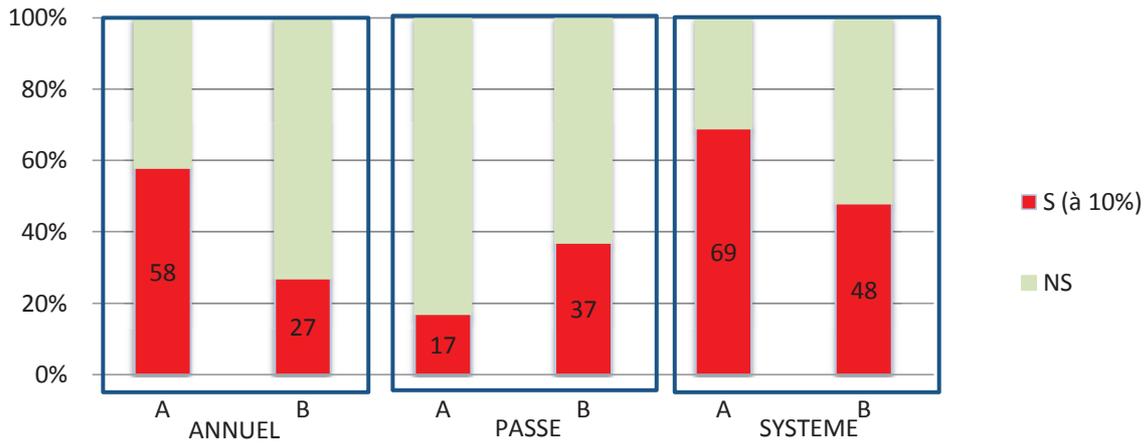


Figure 9 : Fréquence d'essais avec des effets forme annuel, passé et système significatifs selon la méthode utilisée (toutes doses – sauf témoin)

Méthode A : Analyse de variance et contrastes

Méthode B : Modèles emboîtés

S : Significatif NS : Non significatif

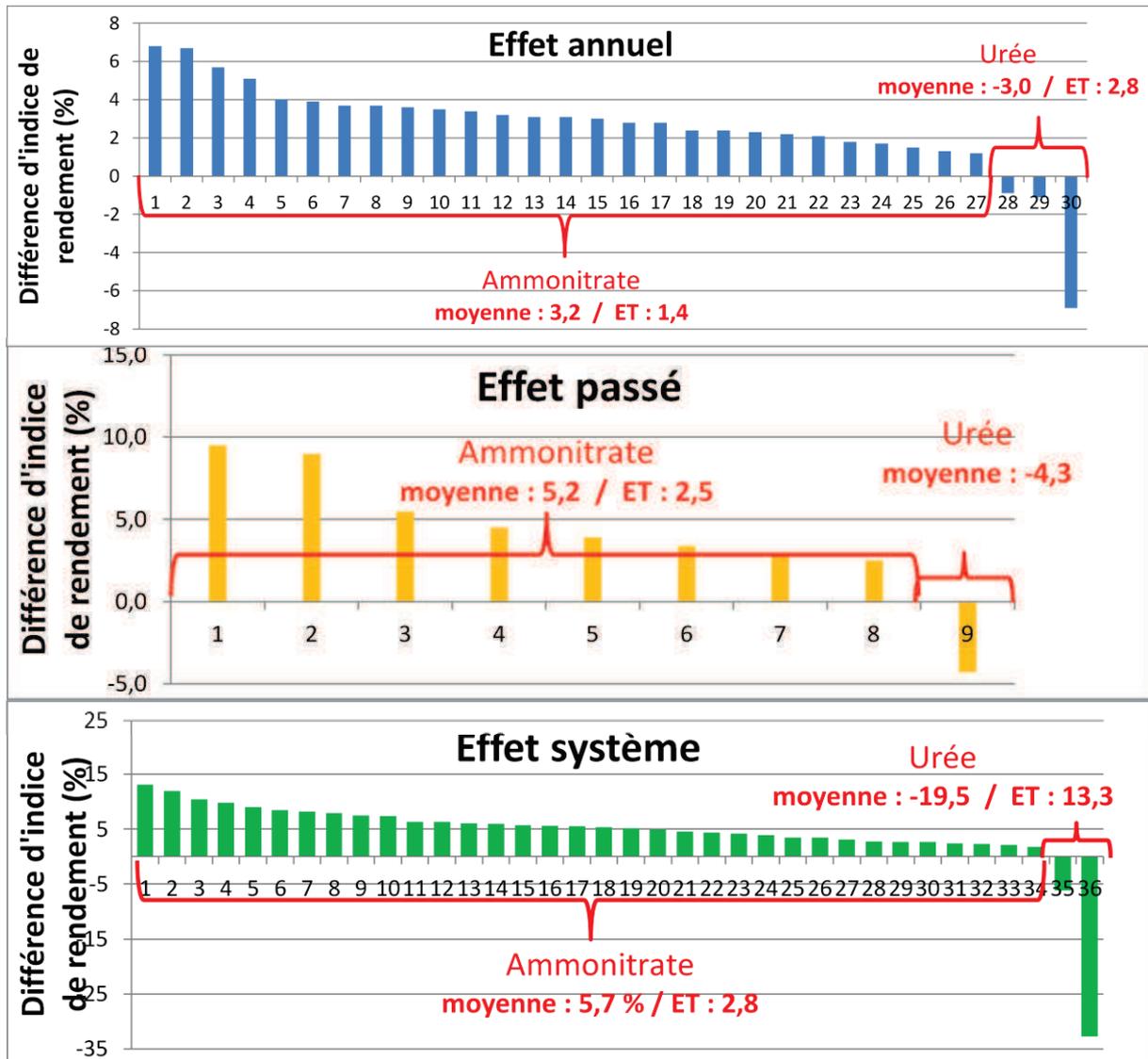


Figure 10 : Ecarts d'indice de rendement entre Ammonitrate et Urée (Ammonitrate – urée) pour chaque essai dont l'effet est significatif (toutes doses sauf témoin) – moyenne et écart-type

III. Résultats

Cette partie présente les différents résultats de l'étude avec, tout d'abord les résultats concernant la précision des essais. Ensuite, on présente les caractéristiques des effets de la forme d'azote sur le rendement en étudiant les différences des effets selon les essais. Puis ces effets sont étudiés non plus en comparant les essais entre eux mais à l'échelle du réseau des 52 essais pour quantifier les effets et dégager des tendances.

1. Qualité du réseau d'essai

Le réseau est globalement assez précis : plus de 80% des essais ont, à l'issue des analyses de variance, un écart-type résiduel inférieur à 4. Un seul site d'essai a des ETR élevés de manière assez régulière : l'essai 31 situé en Haute-Garonne (4 années sur 5 avec $ETR > 4$). Cela pourrait s'expliquer par des problèmes récurrents de salissement des parcelles.

2. Effets de la forme d'azote sur le rendement – comparaison des essais

a. Caractérisation des effets observés

- Avec azote (toutes doses sauf témoin)

La figure 9 présente le pourcentage d'essais avec des effets significatifs ou non significatifs pour chaque type d'effet, pour la méthode d'analyse de variance/contrastes ou la méthode des modèles emboîtés. L'effet annuel de la forme d'azote est variable selon la méthode utilisée : plus de la moitié des essais mettent en évidence cet effet lorsqu'on réalise les analyses de variance alors qu'il se manifeste dans moins de 30% des cas par la méthode des modèles emboîtés. De plus, quelle que soit la méthode, l'effet du passé de fertilisation est significatif pour moins de 40% des essais, avec particulièrement peu d'essais qui font ressortir cet effet par les analyses de variance. Enfin, l'effet du système de fertilisation est le plus fréquemment mis en évidence quelle que soit la méthode statistique.

Lorsqu'un effet est significatif, il est important de savoir en faveur de quelle forme d'azote il joue. Lorsqu'on observe un effet entre formes, cet effet va-t-il toujours dans le même sens ? On peut également se demander si les écarts entre les deux formes, lorsqu'ils existent, sont homogènes ou s'ils sont variables. Les écarts sont exprimés en indice de rendement (base 100 = rendement à la dose bilan passé ammonitrate et annuel ammonitrate) pour s'affranchir des différents types de culture et agréger toutes les situations. Ces écarts sont calculés à partir des données élémentaires et non par la méthode des modèles emboîtés.

Pour répondre à ces questions, la figure 10 présente, pour l'analyse de variance et pour chaque type d'effet, les écarts d'indice de rendement entre la forme ammonitrate et la forme urée, toutes doses confondues hors témoin, pour chaque essai dont l'effet étudié est significatif (à 10%). Cette figure permet d'illustrer la variabilité des différences d'indice de rendement selon les essais: quel que soit l'effet, les écarts types sont assez importants et les valeurs des différences ne sont pas homogènes pour l'ensemble des essais. Les écarts les plus faibles se retrouvent pour l'effet annuel et les écarts les plus importants pour l'effet système. L'effet passé est intermédiaire. De plus, on distingue le sens de l'effet (Ammonitrate ou urée) selon le signe de la différence d'indice de rendement (Ammonitrate – Urée). Si l'effet est en faveur de l'ammonitrate, la différence d'indice de rendement est positive. Inversement, lorsque l'effet est en faveur de l'urée, la différence est négative. Ainsi, la majorité des essais ayant un effet significatif exprime une différence positive en faveur de l'ammonitrate. En effet, pour l'effet annuel, seuls 3 essais sur les 30 essais pour lesquels l'effet est significatif (soit 10%) sont en faveur de l'urée. Pour l'effet passé et pour l'effet système, respectivement

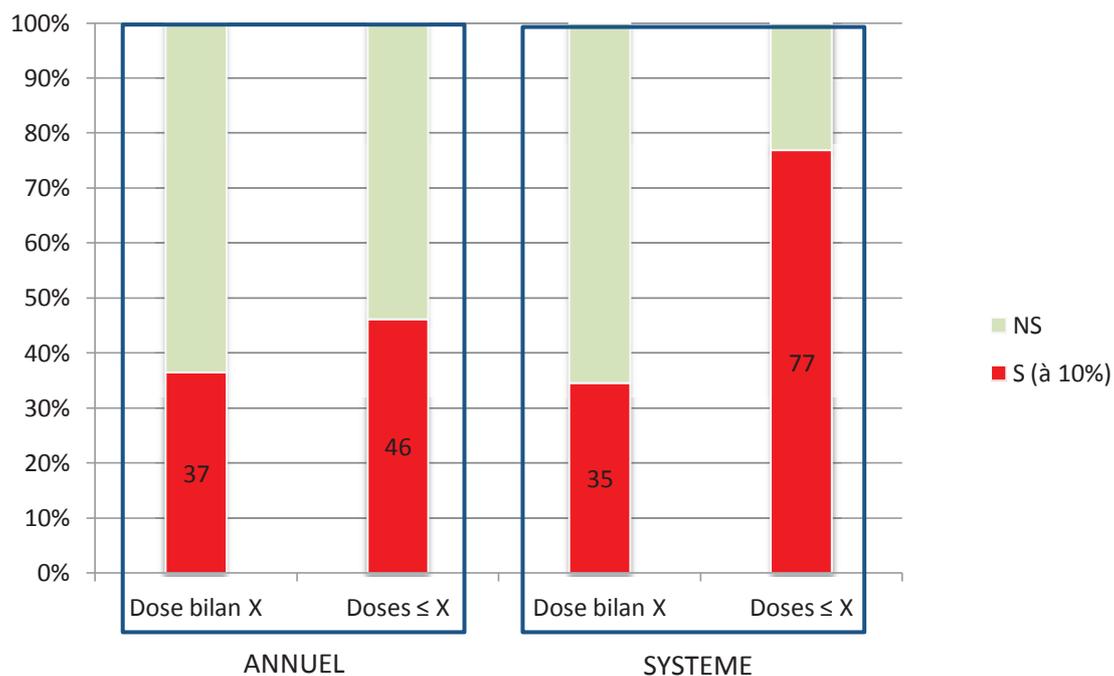


Figure 11 : Fréquence d'essais avec des effets forme annuel et système significatifs à des doses particulières (hors témoins)

S : Significatif NS : Non significatif

Tableau 4 : Valeur des écarts d'indice de rendement Dose X ou Doses ≤ X et, entre parenthèses, le nombre d'essais correspondant. Effets annuel et système

Effet		Dose X		Doses ≤ X	
		Ammonitrate	Urée	Ammonitrate	Urée
Annuel	moyenne	4,9 (16)	-3,1 (3)	3,6 (24)	/
	écart type	1,8	1,1	1,4	/
Système	moyenne	7,4 (18)	/	5,8 (38)	-19,9 (2)
	écart type	3,2	/	2,9	13,3

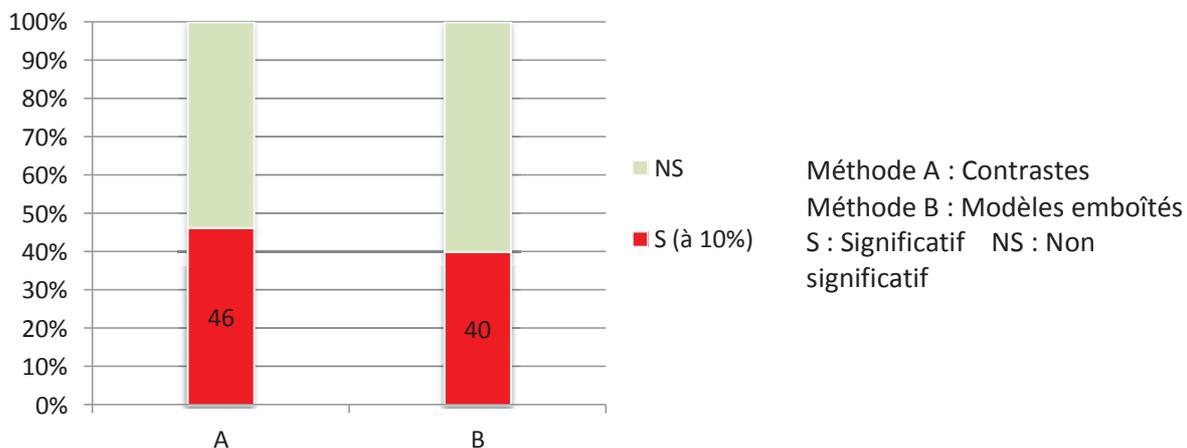


Figure 12 : Fréquence d'essais avec un effet forme du passé de fertilisation pour la dose témoin selon la méthode utilisée

1 essai sur 9 et 2 essais sur 36 sont en faveur de l'urée. Néanmoins, on peut noter que, pour les quelques essais favorables à l'urée, les écarts peuvent être particulièrement importants et variables, surtout en raison d'un seul essai pour les effets annuel et système : l'essai 31-2011. Cet essai en blé dur est un des plus imprécis du réseau d'essais.

Néanmoins, l'approche globale par dose moyenne peut masquer le comportement différent de la plante en fonction de son régime azoté (doses inférieures à la dose bilan ou doses supérieures).

- Analyse en fonction des doses apportées

L'étude des effets peut ensuite être focalisée sur des doses particulières par la méthode des contrastes pour les effets annuel et système. La figure 11 présente les fréquences d'effets annuel et système significatifs aux doses X et aux doses inférieures ou égales à X (c'est-à-dire X-80, X-40 et X). Ainsi, à la seule dose bilan, les effets annuel et système sont significatifs pour plus d'un tiers des essais. Cette proportion augmente lorsqu'on prend en compte les doses inférieures à la dose bilan, en particulier pour l'effet système. On peut donc avoir des différences de rendement pour des doses d'azote assez faibles : ces doses se situent au niveau de la phase croissante des courbes de réponse du rendement à l'azote (phase de carence en azote). Les différences entre formes d'azote sont donc mieux exprimées dans la partie ascendante de ces courbes pour la dose bilan et pour les doses inférieures à cette dose.

Comme pour l'ensemble des doses, les écarts d'indice de rendement pour les essais avec effets significatifs sont variables selon les essais. Ils sont en faveur de l'ammonitrate sauf quelques essais en faveur de l'urée pour l'effet annuel à la dose X (16% des essais) et pour l'effet système aux doses $\leq X$ (5% des essais). De plus, pour les doses $\leq X$ et, plus particulièrement pour les doses X, les écarts d'indice de rendement sont plus importants que pour l'ensemble des doses (voir tableau 4).

- Effet du passé de fertilisation sur les parcelles « témoin »

Sur les témoins ne recevant pas d'azote l'année de la récolte, on teste directement l'effet du passé de fertilisation (forme d'azote apportée à la culture précédente). Cet effet passé se confond avec l'effet système sur les mêmes témoins non fertilisés.

La figure 12 illustre l'effet de la forme du passé de fertilisation sur les témoins, selon les deux méthodes utilisées. Ainsi, l'effet direct sur les parcelles « témoin » de la forme d'azote utilisée l'année précédente est assez fréquent quelle que soit la méthode employée et concerne au moins 40% des essais. De plus, tous les essais pour lesquels cet effet est significatif ont une différence d'indice de rendement Ammonitrate-Urée positive par la méthode des contrastes avec un écart moyen entre les deux formes de + 8,4% (écart type : 3,5).

b. Caractérisation des courbes de réponse

En plus de décrire et quantifier les écarts, on peut étudier la forme des courbes de réponse à l'azote de chaque essai pour déterminer si les profils de réponse des essais à des doses croissantes d'azote sont similaires pour tous les essais ou s'ils varient.

Pour les effets annuel et passé, l'analyse de variance permet de classer les courbes de réponse Ammonitrate et Urée de l'ensemble des essais selon la caractéristique de l'effet étudié : courbes identiques si pas d'effet, courbes parallèles si effet significatif constant ou courbes différentes et non parallèles s'il y a une interaction. On ne peut pas caractériser de manière plus précise les courbes « différentes et non parallèles ». L'effet « système » étant étudié par la méthode des contrastes, il n'y a pas de typologie de courbes possible. Le tableau

Tableau 5 : Typologie de courbes de réponse à l'azote issue de l'analyse de variance

		Types de réponse des essais aux deux formes d'engrais azoté		
		Identiques	Parallèles	Différentes et non parallèles
Nombre et fréquence d'essais	Annuel	21 sur 52 = 40 %	25 sur 52 = 48 %	6 sur 52 = 12 %
	Passé	34 sur 52 = 65 %	6 sur 52 = 12 %	12 sur 52 = 23 %

Tableau 6 : Typologie des courbes de réponse issues des modèles emboîtés (fréquence d'essais)

		a AN = a urée pas d'effet passé sur les témoins		a AN ≠ a urée effet passé sur les témoins	
		Dopt AN = Dopt urée	Dopt AN ≠ Dopt urée	Dopt AN = Dopt urée	Dopt AN ≠ Dopt urée
		Ropt AN = Ropt urée	COURBES IDENTIQUES	COURBES DECALEES	COURBES IDENTIQUES
	ANNUEL	73%	4%	/	/
	PASSE	44%	2%	19%	8%
	SYSTÈME	48%	4%	4%	4%
Ropt AN ≠ Ropt urée	COURBES PARALLELES	COURBES DECALEES ET PARALLELES	COURBES PARALLELES	COURBES DECALEES ET PARALLELES	
	ANNUEL	19%	4%	/	/
	PASSE	12%	2%	10%	4%
	SYSTÈME	15%	2%	19%	4%

a = ordonnée à l'origine

5 présente la typologie de courbes de réponse obtenue avec des allures de courbes correspondant à chaque classe. Dans la classe « Différentes et non parallèles », on trouve une multitude de comportements possibles ; le graphe présenté n'est qu'un exemple de courbes de réponses de cette classe. Comme on l'a vu précédemment, de nombreux essais ont un effet passé non significatif avec des courbes de réponse identiques. Parmi les courbes qui ne sont pas identiques, on distingue assez peu de courbes parallèles pour l'effet du passé (seulement 12 % des courbes). Ces courbes parallèles sont beaucoup plus fréquentes pour l'effet annuel. Pour ces essais, la différence de rendement entre les deux formes est majoritairement à l'avantage de l'ammonitrate se produit de manière constante quelle que soit la dose (hors témoins).

L'étude des courbes par la méthode des modèles emboîtés est plus complète. En effet, elle permet d'avoir des informations sur l'ordonnée à l'origine, la dose optimale et le rendement optimal des courbes et donc, de caractériser les courbes selon l'effet du passé de fertilisation sur les témoins, selon le décalage des doses optimales ou des rendements optimaux en fonction de la forme d'azote. En plus d'avoir des courbes identiques et parallèles comme en analyse de variance, le décalage des doses optimales aboutit à des courbes décalées et l'effet du passé de fertilisation sur les témoins (différence d'ordonnée à l'origine a) permet de caractériser les courbes à la dose nulle (courbes confondues ou distinctes). L'effet de la forme d'azote peut donc se produire sur la dose optimale ou sur le rendement. Le croisement de ces différentes possibilités entre elles amène au classement des courbes présenté dans le tableau 6. Pour l'effet annuel et l'effet passé, la majorité des différences de dose optimale ou de rendement est en faveur de l'ammonitrate. Pour l'effet système, toutes les différences sont favorables à la forme ammonitrate. Des courbes identiques se retrouvent logiquement en proportions assez importantes en lien avec la significativité des effets. Parmi les autres courbes, quel que soit l'effet, les courbes parallèles sont en majorité avec environ 20% au minimum de l'ensemble des courbes de réponse. Pour ces courbes, l'augmentation de la dose d'azote de la forme la moins performante ne permet pas de rattraper le rendement de la forme la plus performante : il y a toujours un écart entre les deux formes même aux doses élevées. L'effet système est celui qui met le plus en évidence les courbes parallèles avec 34% de courbes parallèles. On trouve également des courbes décalées, avec une différence de dose optimale, mais elles sont peu nombreuses (10% au maximum). Pour ces courbes, le rendement optimal atteint par les deux formes d'azote est le même mais il est atteint avec une dose d'azote moins importante pour une des deux formes. Enfin, l'effet du passé de fertilisation sur les témoins est présent pour l'ensemble des types de courbes (identiques, parallèles, décalées et décalées et parallèles) et plus particulièrement pour les courbes parallèles (environ 50% des courbes parallèles ont un effet du passé sur les témoins). Dans ce cas, l'effet (passé ou système) de la forme d'azote est présent quelle que soit la dose d'azote apportée et pour la dose nulle également (effet du passé seulement).

La réponse du rendement à l'application d'ammonitrate ou d'urée à différentes doses n'est pas identique pour tous les essais.

- ➔ L'effet de la forme d'azote n'est pas toujours significatif
- ➔ La forme privilégiée est l'ammonitrate, rarement l'urée mais ce cas existe
- ➔ Si l'effet est significatif, les écarts entre les formes et les caractéristiques des courbes de réponse sont variables selon les essais. L'effet se produit principalement sur le rendement optimal avec une majorité de courbes parallèles.
- ➔ Parmi les trois effets étudiés, l'effet système est le plus fréquent et entraîne les écarts les plus importants
- ➔ Les écarts sont plus importants en ne retenant que les doses inférieures ou égales à la dose bilan X.

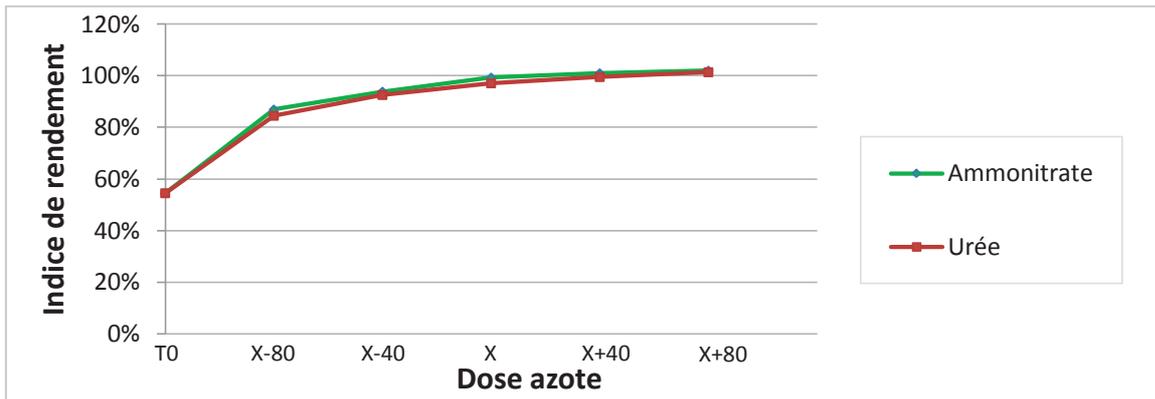


Figure 13: Courbes de réponse moyennes indicées - Toutes cultures - effet Annuel

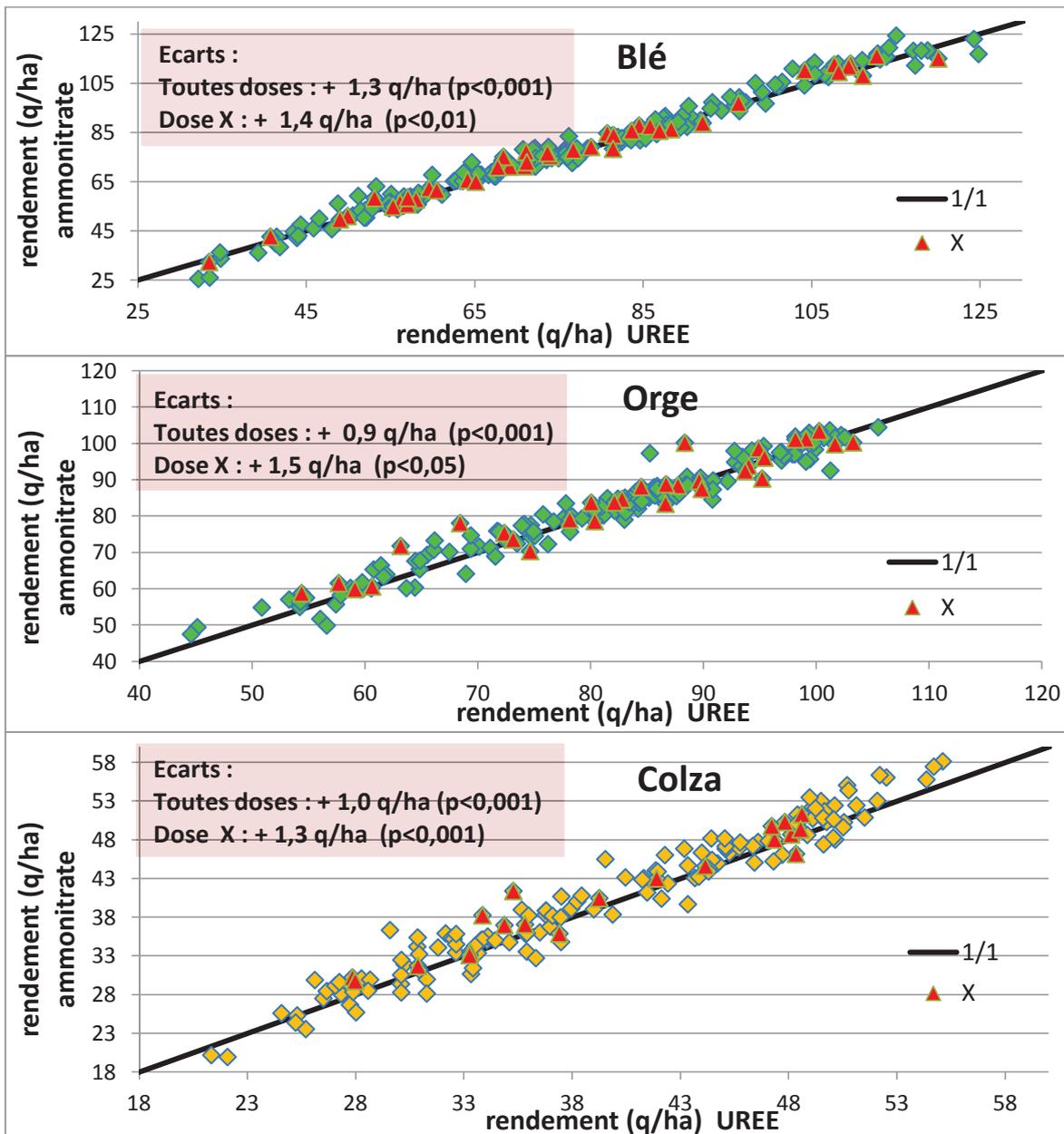


Figure 14 : Rendements et écarts de rendement entre ammonitrate et en urée pour chaque culture - Effet annuel

3. Effets de la forme d'azote sur le rendement - Approche globale du réseau d'essai

La partie précédente nous a permis d'étudier les écarts d'indice de rendement et leur variabilité entre les essais, pour les effets annuel, passé et système, avec ou sans témoin. On s'intéresse maintenant à ces mêmes effets mais à l'échelle du réseau d'essai par la méthode des couples.

a. Effet annuel

En moyenne, sur l'ensemble des essais, la différence d'indice de rendement entre la forme Ammonitrate et la forme Urée pour la fertilisation annuelle est de 1,6% ($p < 0,001$) avec azote (toutes doses sauf témoins) et de 2,2% ($p < 0,001$) pour la dose X. La figure 13 permet d'illustrer l'effet annuel de la forme d'azote en traçant les courbes de réponse pour chaque forme. Cette approche globale met donc en évidence un effet annuel de la forme d'azote marqué par un gain de rendement modeste mais significatif lié à la forme ammonitrate en comparaison avec la forme urée.

On peut détailler cet effet de la forme d'azote utilisée l'année de la récolte en l'étudiant pour chaque culture. La figure 14 présente les différents rendements obtenus pour l'ensemble des essais pour chaque forme d'azote selon la culture. Plus les points sont éloignés de la bissectrice, plus la différence de rendement entre la forme ammonitrate et la forme urée pour un même essai est importante. Ainsi, quelle que soit la culture, le rendement avec la forme ammonitrate est en moyenne légèrement supérieur à celui obtenu avec de l'urée en effet annuel. Les écarts de rendement entre les deux formes à la dose X sont assez proches pour les trois cultures. On peut noter que, le rendement du colza étant environ la moitié de celui des céréales, l'effet annuel de la forme d'azote est environ deux fois plus important sur le colza que pour les céréales.

b. Effet du passé de fertilisation

Les résultats de comparaison des rendements entre les deux formes d'azote sont semblables pour toutes les doses d'azote ou seulement pour la dose X : les différences de rendement moyens entre la forme ammonitrate et la forme urée sont de 1,6% ($p < 0,001$) et 1,5% ($p < 0,5$) respectivement pour toutes les doses (sauf témoins) et pour la dose X. De plus, l'étude des différences entre ammonitrate et urée est aussi possible pour les parcelles « témoin » non fertilisées l'année de récolte. Ainsi, la différence entre les deux formes pour l'effet du passé de fertilisation sur les témoins est de + 4,4% d'indice de rendement ($p < 0,001$) en faveur de l'ammonitrate. Cet écart est donc plus important pour les parcelles non fertilisées que pour les parcelles qui reçoivent de l'azote l'année de récolte.

Ce résultat semble assez logique compte tenu du fait que ces parcelles sont en situation de carence azotée (le rendement aux doses témoin est près de 50% plus faible que le rendement à la dose optimale). Une petite différence de fourniture d'azote du sol entraîne une différence plus importante sur le rendement. La figure 15 (page suivante) présente les courbes de réponse moyennes pour les deux formes d'azote.

On peut également détailler l'effet du passé de fertilisation par culture. Comme pour l'effet annuel, c'est pour les orges que l'on observe la différence de rendement liée à l'effet passé la plus importante entre l'ammonitrate et l'urée. De plus, les différences sur les témoins sont de nouveau beaucoup plus importantes que pour des parcelles fertilisées l'année de récolte avec un gain avec la forme ammonitrate sur la culture précédente. Les écarts de

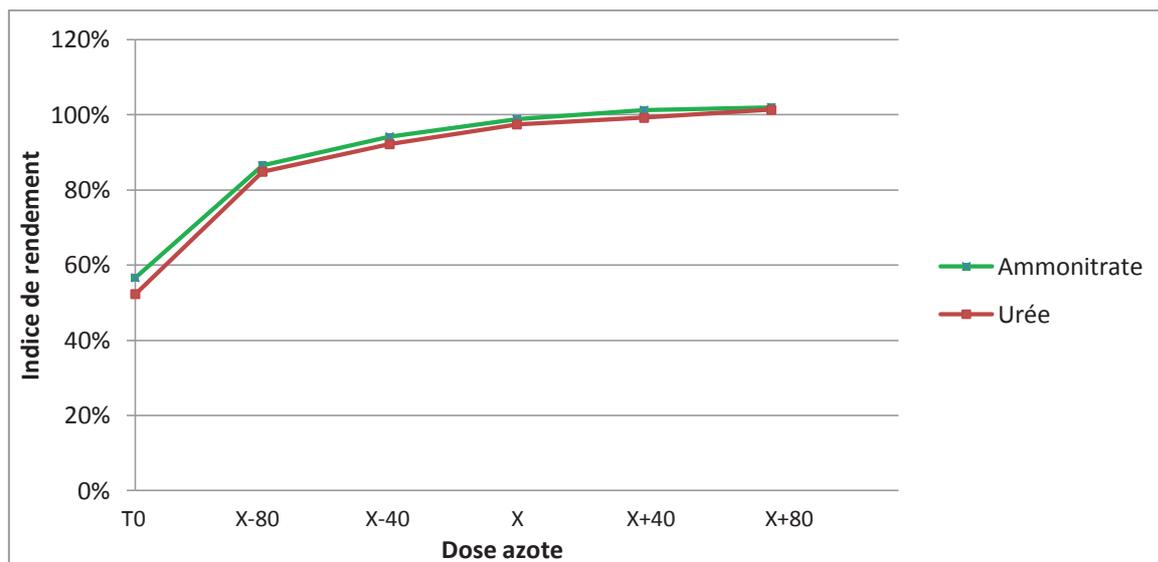


Figure 15 : Courbes de réponse moyennes indicées - Toutes cultures - effet Passé

Tableau 7 : Ecart de rendement selon la culture pour l'effet passé (q/ha)

Doses	BLE	ORGE	COLZA
Toutes doses (sauf témoin)	0,8 **	2,0 ***	1,1 ***
Dose X	1,1 .	1,7 *	1,0 *
T0	3,6 ***	3,9 **	2,0 **

Tableau 8 : Différences d'indice de rendement ou de rendement entre la forme ammonitrate et la forme urée - Effet système

Doses	Toutes cultures (%)	BLE (q/ha)	ORGE (q/ha)	COLZA (q/ha)
Toutes doses (sauf témoin)	3,2 ***	2,1 ***	2,9 ***	2,1 ***
Dose X	3,7 ***	2,4 **	3,1 **	2,4 ***
T0	4,4 ***	3,6 ***	3,9 **	2,0 **

. $p < 0,1$ * $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ *** $p < 0,001$

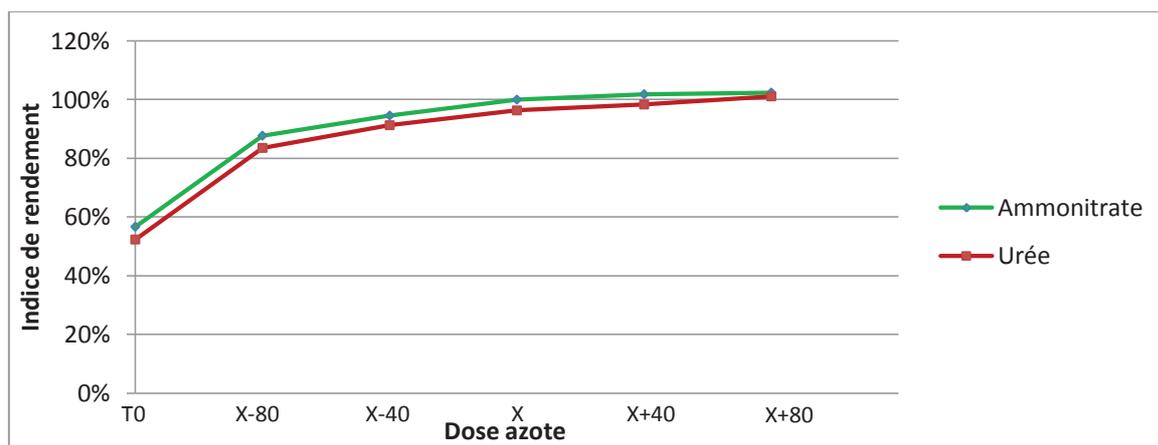


Figure 16 : Courbes de réponse moyennes indicées - Toutes cultures - effet Système

rendement sont présentés dans le tableau 7 pour toutes les doses (sauf témoins), la dose X et la dose témoin.

c. Effet système

Le tableau 8 présente les différences d'indice de rendement (toutes cultures) et de rendement (par culture) entre les formes ammonitrate et urée selon les doses étudiées. L'ensemble des résultats correspond à un gain de rendement en utilisant l'ammonitrate quelle que soit la dose. Comme pour les autres effets, les écarts les plus importants correspondent à l'effet du passé sur les doses témoins sauf pour le colza. L'effet du passé de fertilisation sur les témoins est le même pour l'effet passé et pour l'effet système. De plus, ce sont toujours les orges qui permettent le meilleur gain de rendement en utilisant l'ammonitrate. Enfin, les écarts de rendement sont plus importants que pour les effets annuel et passé. On constate aussi que la somme des écarts des effets annuel et passé est proche des écarts de l'effet système. Cet effet semble donc être un effet additif des effets annuel et passé. La figure 16 présente les courbes de réponse moyennes pour les deux formes d'azote pour l'effet système. Les écarts entre les deux courbes sont plus importants que ceux constatés pour les effets annuel et passé pris individuellement.

d. Simulation de rendement

On a pu voir que l'ammonitrate permet, en moyenne, aux mêmes doses d'azote apporté, un rendement plus important par rapport à l'urée. Il est intéressant de savoir, pour les effets annuel et système, de combien, au minimum, la dose d'azote avec utilisation d'urée doit être augmentée pour parvenir à une différence de rendement non significative entre les deux formes. Pour cela, on réalise des simulations de rendement à des doses non testées dans les essais à l'aide des équations des courbes de réponse. Ces simulations ne sont réalisées que pour les essais avec le modèle quadratique-plateau (45 essais). En effet, le modèle ADAS pose le problème d'accroître fortement les différences entre les deux formes après le dépassement de la dose optimale, alors que l'objectif est de diminuer les différences de rendement entre les deux formes. Avec le modèle quadratique-plateau, les rendements des deux formes d'azote ne varient plus et sont sur le plateau de la courbe après le dépassement de la dose optimale mais celle-ci est parfois très supérieure à la dose bilan.

La figure 17 (page suivante) présente, pour l'effet annuel, les indices de rendements de la forme urée pour chaque essai à la dose bilan X. La droite à 100% correspond à l'indice de rendement de la forme ammonitrate qui est ici la référence.

Les points sont assez proches de la droite à 100% car l'écart moyen entre ammonitrate et urée est assez faible. Cet écart, de 1,8% d'indice de rendement en faveur de l'ammonitrate, est néanmoins significatif ($p < 0,001$). Les points sous cette droite ont un indice de rendement avec l'urée inférieur à la référence ammonitrate (100%). Ainsi, en moyenne, il faudrait augmenter la dose bilan pour l'urée de 8% pour obtenir statistiquement une différence d'indice de rendement entre les deux formes non significative ($p > 0,1$). La figure 18 (page suivante) présente les indices de rendements obtenus dans cette configuration.

Pour l'effet système, on a pu montrer que les écarts entre la forme ammonitrate et la forme urée sont plus importants que pour l'effet annuel. La figure 19 (page suivante) permet de visualiser ces écarts à la dose bilan X (points éloignés de la droite Ammonitrate à 100% d'indice de rendement). En moyenne, l'écart d'indice de rendement entre ces deux formes est de 3,7% en faveur de l'ammonitrate ($p < 0,001$). Pour rendre l'écart moyen entre les rendements non significatif ($p > 0,1$), la dose bilan devrait être augmentée de 23% pour la

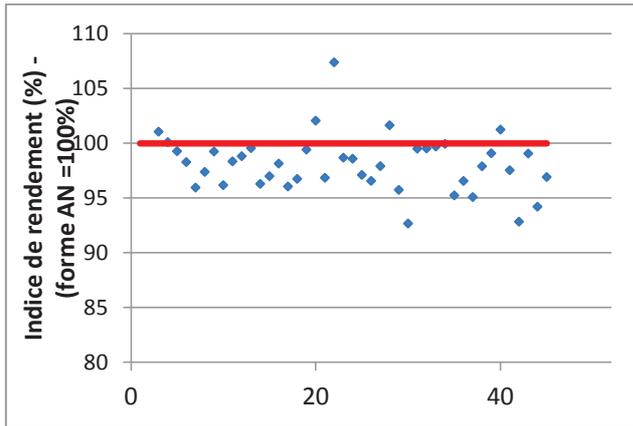


Figure 17 : Indices de rendement pour la forme urée, sans augmentation de dose - Effet annuel

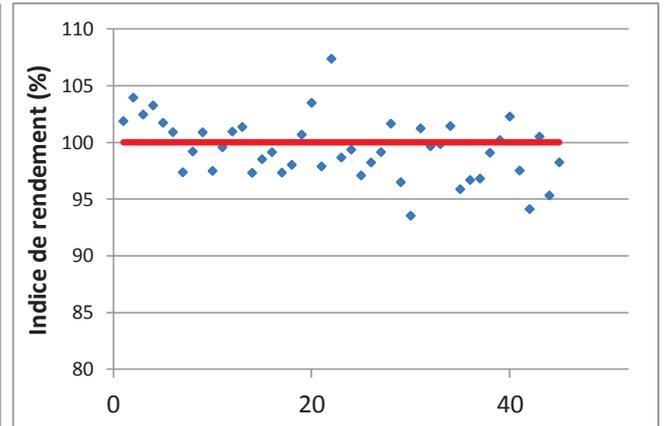


Figure 18 : Indices de rendement pour la forme urée, avec augmentation de dose de 8% - Effet annuel

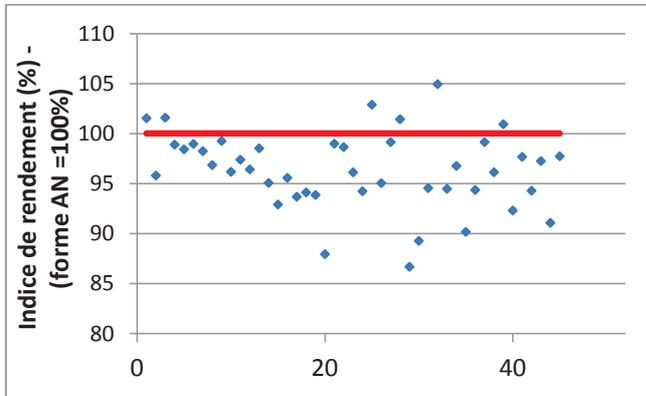


Figure 19 : Indices de rendement pour la forme urée, sans augmentation de dose - Effet système

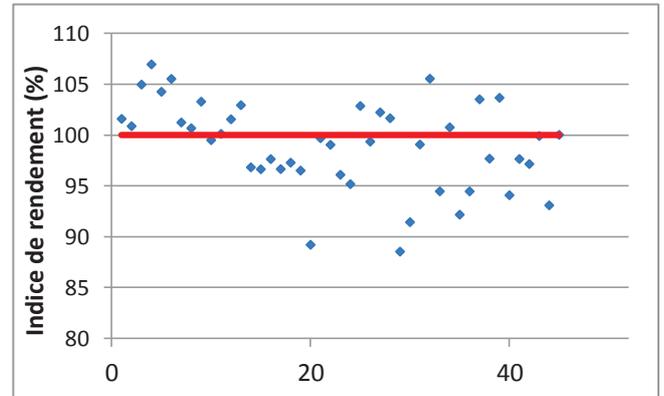


Figure 20 : Indices de rendement pour la forme urée, avec augmentation de dose de 23% - Effet système

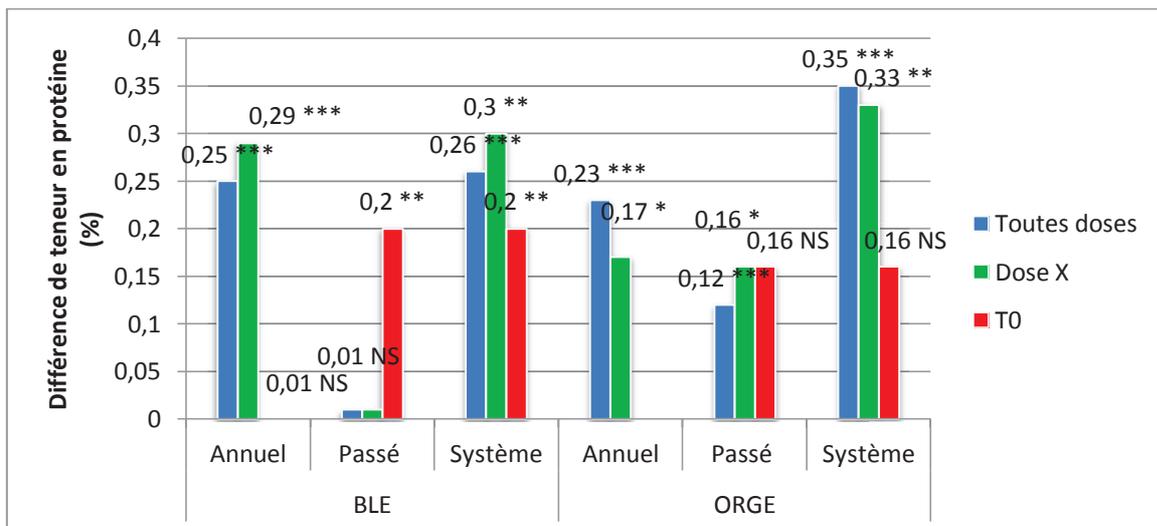


Figure 21 : Ecarts de teneur en protéines (Ammonitrate-urée) pour les trois effets

forme urée. La figure 20 présente les indices de rendements de la forme urée avec cette augmentation de dose.

Ces manipulations permettent donc d'avoir une idée de la majoration de dose nécessaire pour avoir des rendements moyens équivalents entre la forme ammonitrate et la forme urée. Néanmoins, il n'est pas pertinent de retenir ces valeurs pour les appliquer sur des essais individuels. En effet, augmenter la dose bilan de 8% ou de 23% permet « d'effacer » statistiquement la différence entre l'ammonitrate et l'urée à l'échelle du réseau mais ne réduit pas la dispersion des points autour de la droite. De plus, on a vu précédemment que tous les essais n'ont pas un effet annuel ou système significatif. Ainsi, l'augmentation de dose peut amener à une sur-fertilisation pour les essais pour lesquels la différence entre les formes n'est pas significative. De plus, pour les essais avec un effet significatif, cette augmentation de dose peut aussi ne pas être suffisante pour « gommer » les différences de rendement.

Pour l'ensemble du réseau d'essai, on peut dégager des tendances concernant l'effet de la forme d'azote sur le rendement :

- ➔ La forme ammonitrate permet, en moyenne, un gain de rendement quelle que soit la dose par rapport à la forme urée
- ➔ Ce gain est généralement plus élevé pour les orges par rapport au blé mais il ne dépasse pas 2q/ha pour les effets annuel et passé à la dose bilan.
- ➔ En effet annuel, ce gain est du même ordre de grandeur pour le colza mais, par rapport à son rendement, ce gain est relativement plus important que pour les céréales
- ➔ Le gain de rendement en effet système est le plus important et cumule les gains des effets annuel et passé
- ➔ Le gain de rendement lié à l'utilisation d'ammonitrate en passé de fertilisation sur les témoins est généralement élevé (plus de 3 q/ha sur céréales) mais le rendement associé reste inférieur à celui des autres doses

4. Effets de la forme d'azote sur la qualité des produits récoltés

La performance d'une récolte s'évalue au niveau de la quantité de produit récolté mais aussi par rapport à la qualité de ce produit. On s'intéresse à l'effet de la forme d'azote sur la teneur en protéines du grain pour les céréales et sur la teneur en huile du grain pour le colza. De plus, on se focalise plus particulièrement sur la dose bilan qui est une dose de référence.

a. Céréales

La figure 21 présente les différences de teneur en protéines du grain entre ammonitrate et urée pour chaque effet et chaque culture. La différence « Ammonitrate-urée » est toujours positive, c'est-à-dire que l'utilisation d'ammonitrate permet un gain de teneur en protéines par rapport à l'utilisation d'urée quel que soit l'effet considéré. On remarque que l'effet du passé de fertilisation est assez faible, quelle que soit la dose. Soit la différence entre ammonitrate et urée n'est pas significative, soit la différence est faible. L'utilisation d'ammonitrate l'année de récolte à la dose bilan permet d'obtenir, en moyenne, un gain de +0,29 point pour les blés ou +0,17 point pour les orges. Ce gain est plus important lorsqu'on utilise l'ammonitrate pour l'effet système : plus de 0,3 point de protéine supplémentaire par rapport à l'urée. Ici aussi, l'effet système est le cumul de l'effet annuel de la forme d'azote apportée et de l'effet passé.

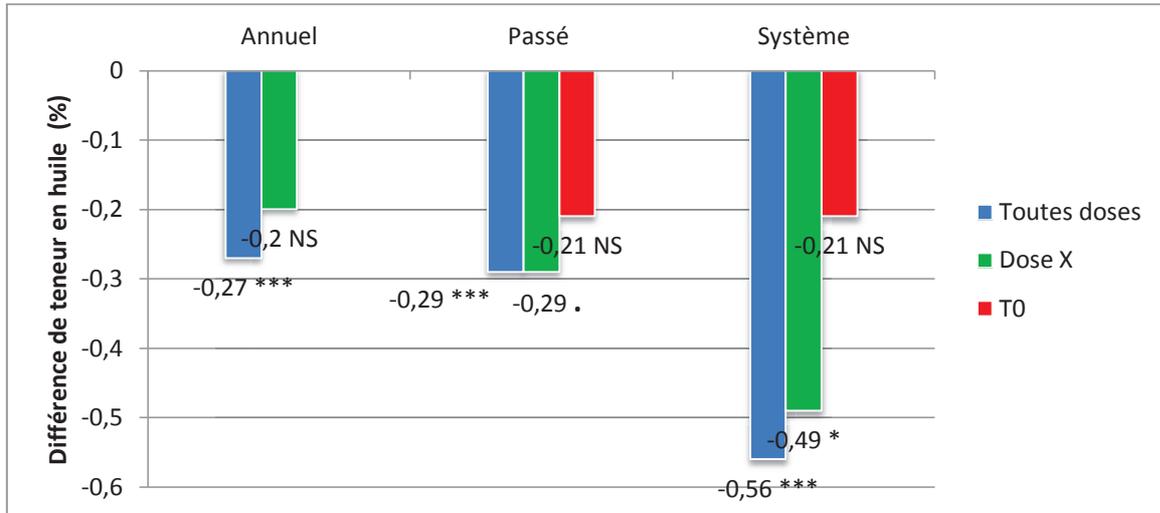


Figure 22 : Ecarts de teneur en huile (Ammonitrate-urée) pour les trois effets

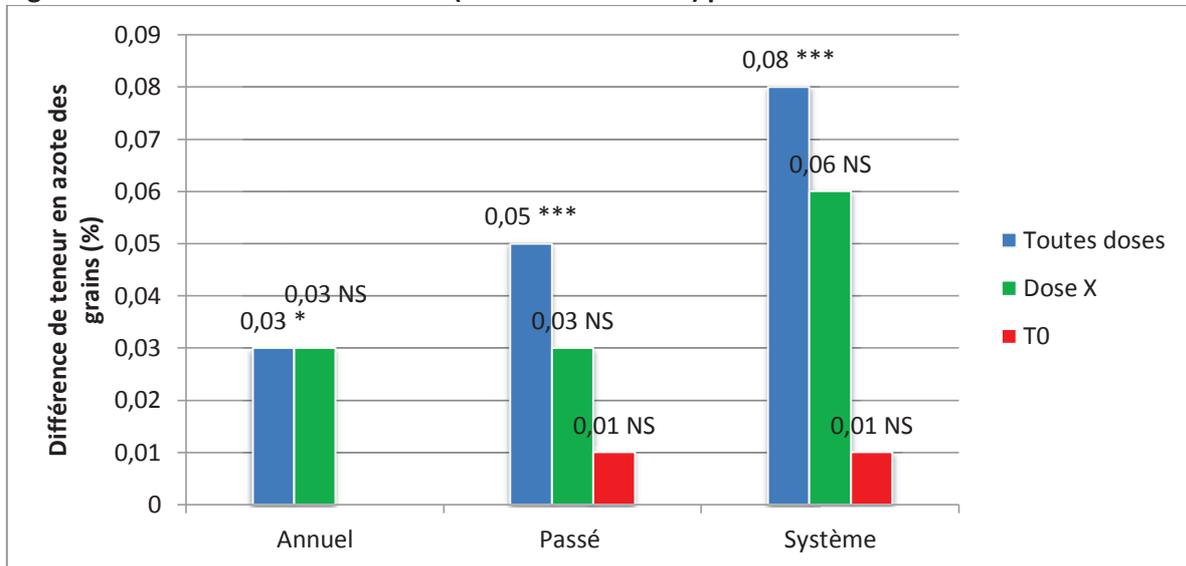


Figure 23 : Ecarts de teneur en azote des grains (Ammonitrate-urée) pour les trois effets

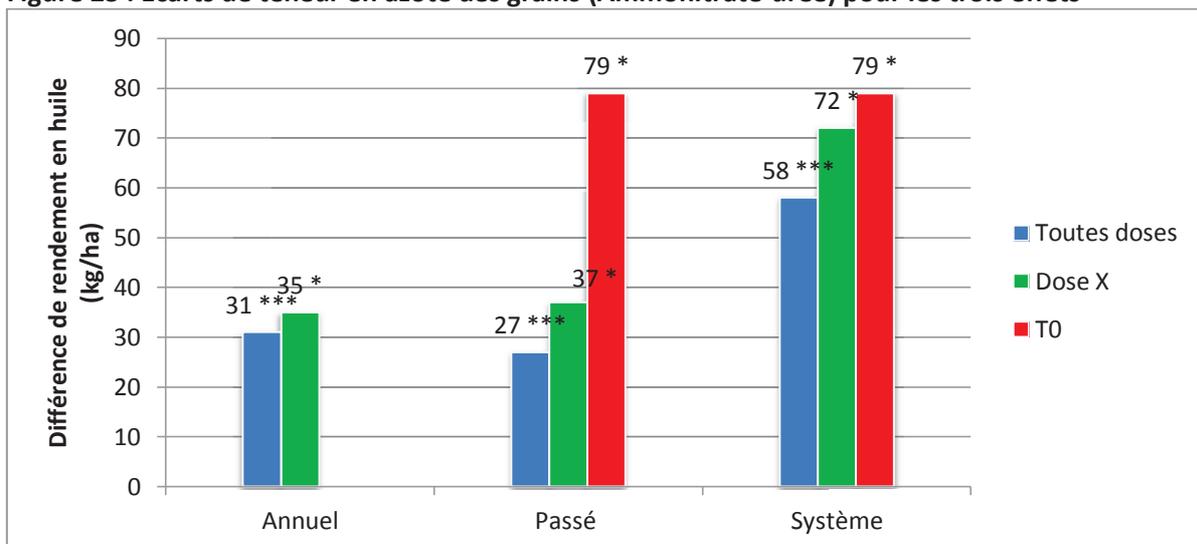


Figure 24 : Ecarts de rendement en huile (Ammonitrate-urée) pour les trois effets pour le colza

b. Colza

La figure 22 présente les différences de teneur en huile des grains (ammonitrate - urée) pour les trois effets. On remarque que les résultats sont négatifs, c'est-à-dire que, en moyenne, l'ammonitrate amène une diminution de la teneur en huile par rapport à l'urée.

On sait qu'il y a une relation inverse entre teneur en protéines et teneur en huile dans la graine de colza. Cette diminution de la teneur en huile pourrait correspondre à une plus forte teneur en protéines liée à l'effet de la forme ammonitrate ; effet qui semble cohérent avec celui observé sur les céréales. De plus, l'effet du passé de fertilisation sur les témoins n'est pas significatif et l'effet de la forme d'azote sur la teneur en huile n'est significatif à la dose X que pour l'effet passé et l'effet système. Enfin, l'effet système est toujours le plus important et semble correspondre au cumul des deux autres effets.

La figure 23 présente les différences entre les formes d'azote pour la teneur en azote des grains selon les effets. Quel que soit l'effet, les différences ne sont pas significatives pour les doses témoins ou doses bilan. Ainsi, à ces doses, la forme d'azote n'influe pas sur la teneur en azote des grains du colza. Néanmoins, toutes doses, il y a un effet positif de la forme ammonitrate sur cette variable. Les écarts entre « toutes doses » et les doses bilan sont assez proches mais, dans le cas des doses bilans, le nombre de données est plus faible, ce qui pourrait expliquer la non significativité des effets. Ces résultats sont cohérents avec une augmentation de la teneur en azote, donc en protéines, dans le grain avec l'ammonitrate, ce qui entraîne une diminution de la teneur en huile avec cette même forme d'azote.

A partir du rendement du colza et de la teneur en huile des grains, on peut étudier l'effet de la forme d'azote sur une variable qui intègre ces deux variables : le rendement en huile par unité de surface (en kg/ha). La figure 24 présente ces résultats.

Les différences entre la forme ammonitrate et la forme urée sont toujours positives quel que soit l'effet étudié. Ainsi, c'est la forme ammonitrate qui est plus performante que l'urée pour cette variable. L'effet positif de l'ammonitrate sur le rendement fait plus que compenser l'effet négatif de cette forme sur la teneur en huile des grains. De plus, l'effet du passé de fertilisation sur les témoins est toujours le plus important. Néanmoins, le rendement à ces doses reste encore inférieur aux rendements des parcelles fertilisées. Enfin, à la dose bilan, l'utilisation d'ammonitrate permet un gain équivalent pour l'effet passé et l'effet annuel par rapport à l'utilisation d'urée. Ce gain atteint en moyenne 72 kg/ha lorsqu'on utilise l'ammonitrate en fertilisation passée et en fertilisation annuelle (effet système).

- La forme ammonitrate permet, en moyenne, un gain de teneur en protéines dans le grain des céréales
- A la dose bilan, ce gain est assez faible pour les effets annuel et passé (+ 0,3 point au maximum) et un peu plus élevé pour l'effet système (+0,3 point de protéine au minimum)
- Pour le colza, l'ammonitrate a un effet négatif sur la teneur en huile des grains par rapport à l'urée. Cet effet est difficile à mettre en évidence pour les effets annuel et passé
- L'effet négatif de l'ammonitrate sur la teneur en huile est plus que compensé par son effet positif sur le rendement : à la dose bilan, le gain de rendement en huile est d'environ 36 kg/ha pour les effets annuel et passé et le double pour l'effet système
- L'effet système est le cumul des effets annuel et passé pour les variables de qualité

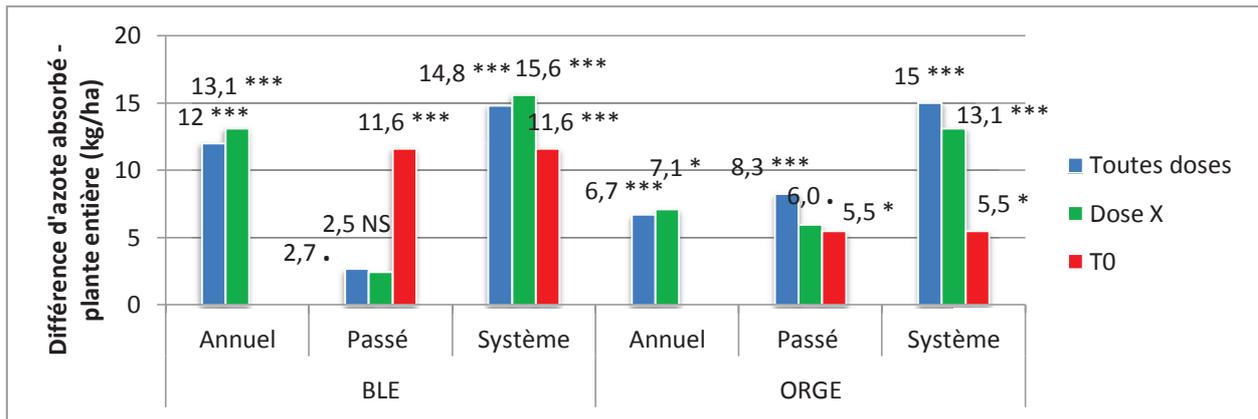


Figure 25 : Ecarts d'azote absorbé- plante entière (Ammonitrate-urée) pour les trois effets

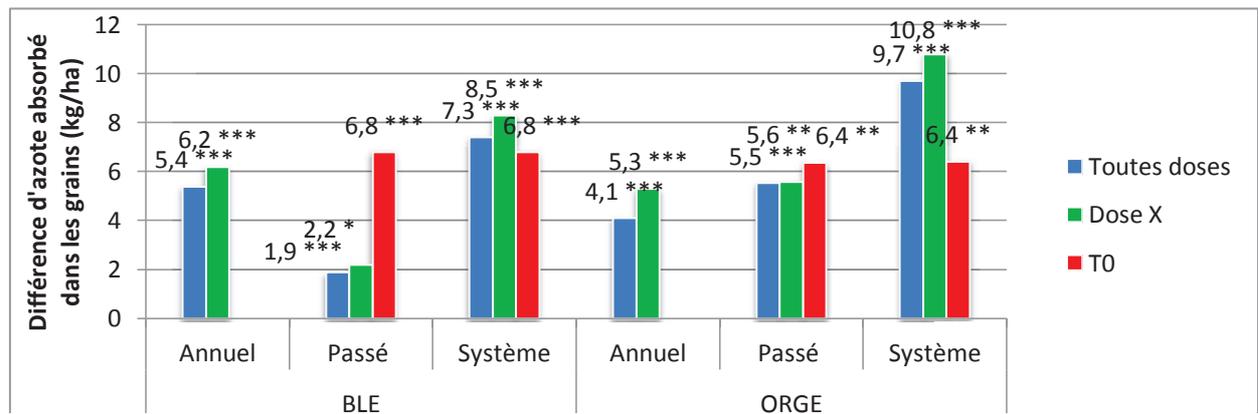


Figure 26 : Ecarts d'azote absorbé dans les grains (Ammonitrate-urée) pour les trois effets

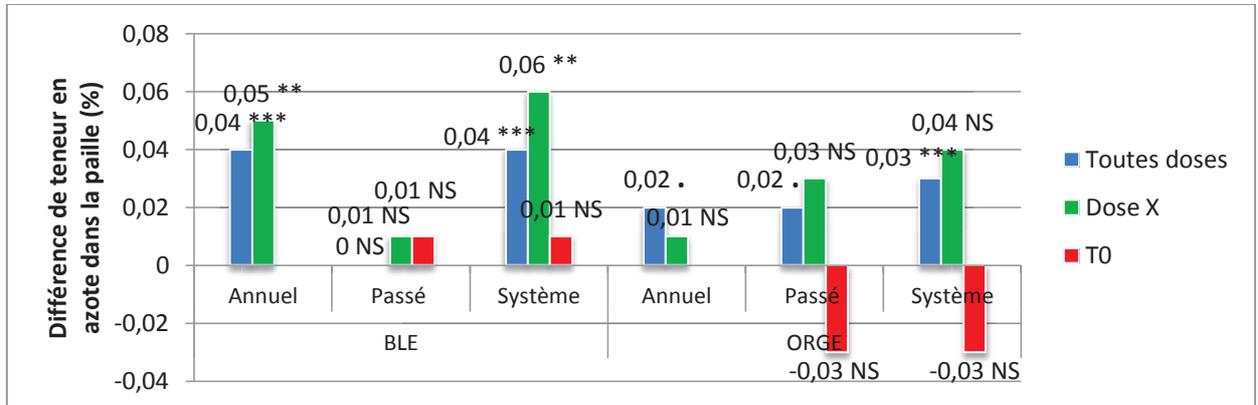


Figure 27 : Ecarts de teneur en azote dans la paille (Ammonitrate-urée) pour les trois effets

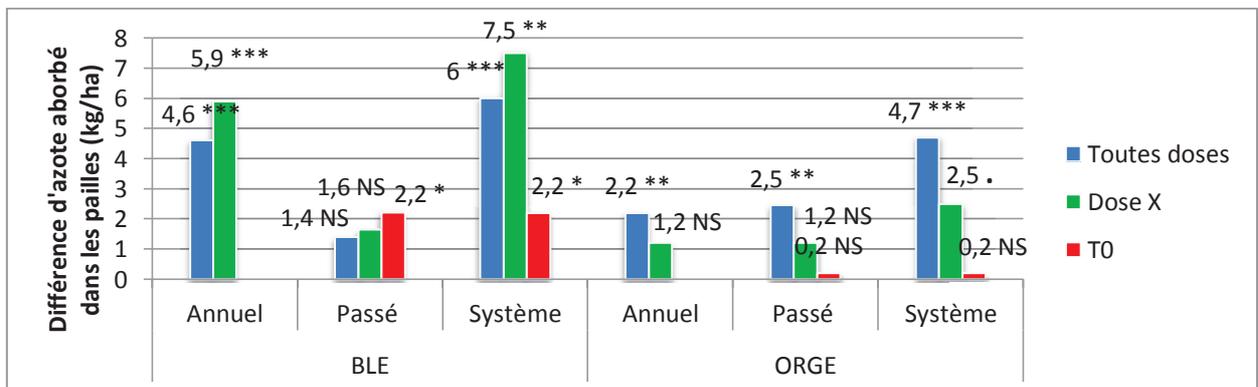


Figure 28 : Ecarts d'azote absorbé dans la paille (Ammonitrate-urée) pour les trois effets

5. Effets de la forme d'azote sur l'azote absorbé dans la plante

Au cours des précédents résultats, on a pu mettre en évidence que l'ammonitrate était plus efficient par rapport à l'urée. Néanmoins, on ne peut pas affirmer à partir de ce résultat que c'est l'azote issu de la forme ammonitrate qui est mieux absorbé par rapport à l'azote de l'urée mais on peut dire que la forme d'azote a tout de même une influence sur le rendement final via le cycle de l'azote. Dans cette nouvelle partie, on s'intéresse à l'efficacité des engrais en étudiant l'azote absorbé dans les plantes selon la forme d'azote utilisée.

a. Céréales

La figure 25 présente les différences (Ammonitrate – urée) entre les quantités d'azote absorbé pour la plante entière selon l'effet étudié. Il n'y a pas eu de mesures directes sur les racines des plantes : on suppose ici que les parties racinaire et aérienne évoluent dans un rapport constant. Les différences sont toutes positives : l'utilisation de la forme ammonitrate permet un gain d'absorption d'azote. L'effet de la forme d'azote utilisée en passé de fertilisation est également significatif, notamment sur les témoins pour le blé. A la dose bilan, la différence est cependant non significative pour le blé ou plus faible pour les orges. L'effet du passé de fertilisation sur des parcelles fertilisées l'année de récolte est donc assez faible par rapport aux autres effets. Enfin, l'utilisation d'ammonitrate pour l'effet système apporte une absorption d'azote supplémentaire de plus de 10 kg/ha à la dose bilan. Cet effet cumule les différences des effets annuel et passé.

On peut ensuite décomposer cette absorption d'azote selon les parties de la plante en étudiant, d'une part, l'azote absorbé dans les grains et, d'autre part, l'azote absorbé dans la paille.

La variable « quantité d'azote absorbé dans les grains » en kg d'azote / ha (figure 26) permet d'intégrer en même temps l'effet de la forme d'azote sur le rendement et sur la teneur en azote dans les grains. Cette fois-ci, toutes les différences sont significatives. L'effet positif de l'ammonitrate par rapport à l'urée sur le rendement s'ajoute à l'effet positif sur la teneur en azote des grains. Ainsi, tous les résultats sont en faveur de l'ammonitrate par rapport à l'urée. L'effet du passé de fertilisation sur les témoins est de nouveau assez élevé. Sur les parcelles fertilisées à la dose bilan, ce gain est beaucoup plus faible pour le blé. Enfin, l'effet système cumule les effets annuel et passé de la forme d'azote : le gain lié à l'ammonitrate est donc plus important.

La figure 27 présente les différences entre les formes d'azote de teneur en azote pour la paille. Ici, la paille correspond à la partie aérienne de la plante sans les grains ; elle est obtenue par prélèvement de bottillons coupés au ras du sol. Encore une fois, les différences significatives sont toutes en faveur de l'ammonitrate. A la dose bilan, on remarque que l'effet de la forme d'azote n'est pas significatif pour les orges, quel que soit l'effet. De plus, pour le blé, l'effet de la forme d'azote pour le passé de fertilisation n'est pas significatif. On a cependant un effet annuel de la forme d'azote. Enfin, l'effet système de la forme d'azote est très proche de l'effet annuel.

On peut ensuite étudier l'effet de la forme d'azote sur l'azote dans les pailles à l'échelle de la parcelle à l'aide de la variable « quantité d'azote absorbé dans les pailles (kg/ha) » (figure 28). Cette variable permet de prendre en compte la teneur en azote dans les pailles et le rendement en paille. Pour les orges, les effets de la forme restent non significatifs ou faibles. Pour le blé, on a un petit effet du passé de fertilisation sur les témoins mais pas à la dose bilan. Les effets annuel et système pour le blé sont les plus importants.

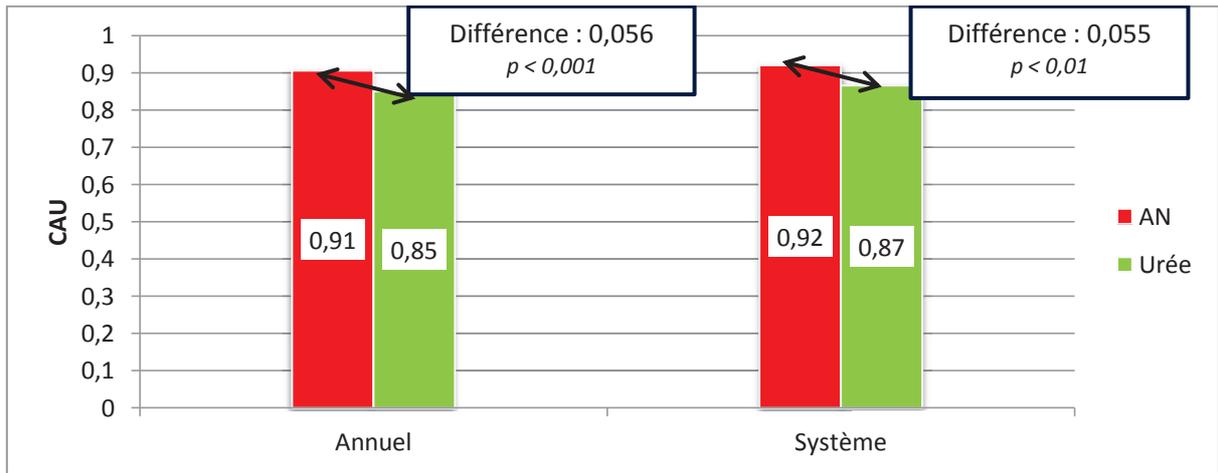


Figure 29 : Valeurs et écarts des CAU entre l'ammonitrate et l'urée - Céréales, effets annuel et système

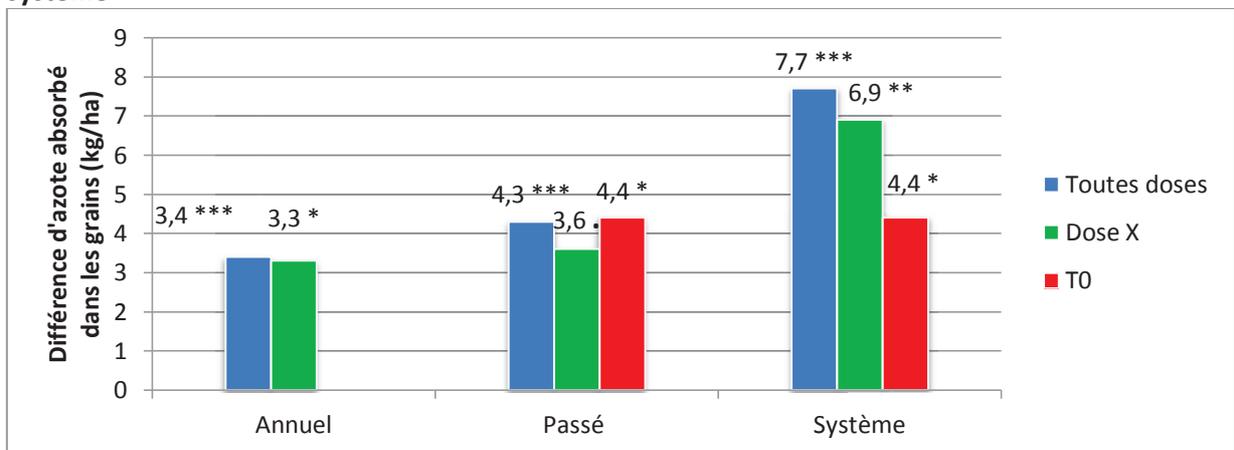


Figure 30 : Ecarts d'azote absorbé dans les grains de colza (Ammonitrate-urée) pour les trois effets

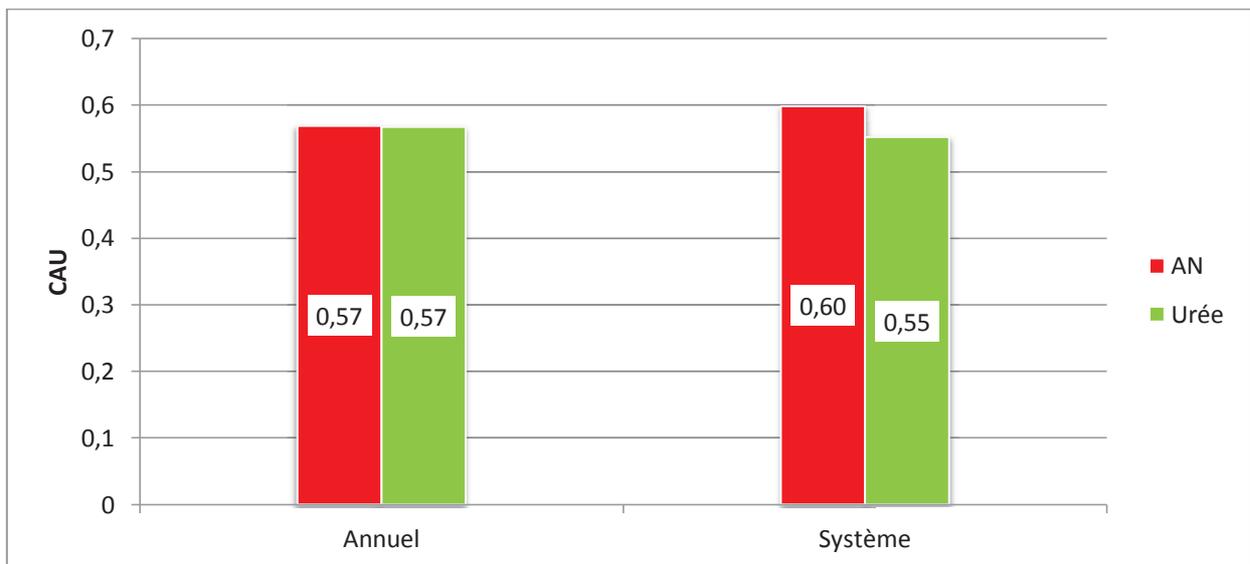


Figure 31 : Valeurs et écarts des CAU entre l'ammonitrate et l'urée – Colza, effets annuel et système (2 essais)

b. Efficacité de l'ammonitrate et de l'urée pour les céréales

A l'aide des quantités d'azote absorbé plante entière pour des parcelles fertilisées et des parcelles non fertilisées, on a déterminé le Coefficient Apparent d'Utilisation (CAU) de l'azote de chaque engrais pour les effets annuel et système. Ici, on détermine le CAU à l'aide de la pente de la droite reliant la quantité d'azote absorbé à la quantité d'azote apporté.

La figure 29 présente les CAU moyens obtenus ainsi que la comparaison entre les deux formes. On remarque que les CAU sont, en moyenne, tous supérieurs ou égaux à 0,85. Ainsi, on peut affirmer que, en moyenne, au minimum 85% de l'azote absorbé par les plantes a été fourni directement ou indirectement par l'engrais. On observe également que, pour les deux effets, les CAU les plus importants sont les CAU issus de la forme ammonitrate et la différence avec les CAU de l'urée est significative. Ainsi, pour les effets annuel et système, l'utilisation d'ammonitrate permet une absorption d'azote supplémentaire de plus de 5% par rapport à l'utilisation d'urée à la même dose.

c. Colza

La figure 30 s'intéresse à la quantité d'azote absorbé dans les grains par rapport à l'unité de surface : le rendement intervient dans cette variable. Même si on a peu de différence pour la teneur en azote des grains entre les formes d'azote, la meilleure efficacité de l'ammonitrate pour le rendement permet d'obtenir une quantité d'azote absorbé dans les grains à l'hectare plus importante que pour l'urée, quel que soit l'effet étudié. A la dose bilan, l'utilisation de l'ammonitrate pour la fertilisation annuelle ou la fertilisation passée permet un gain de plus de 3 kg/ha d'azote absorbé dans les grains. L'effet système cumule les deux effets annuel et passé.

Enfin, on a également déterminé les quantités d'azote absorbé pour la partie aérienne des colzas au stade G4 (stade de formation des siliques) à la dose bilan pour l'effet système. La différence moyenne entre la forme ammonitrate et la forme urée est de 19 kg/ha ($p < 0,01$) c'est-à-dire que l'apport d'ammonitrate permet un gain d'absorption de 19 kg d'azote/ha par rapport à l'urée. A ce même stade, à la dose bilan, l'ammonitrate permet en plus d'avoir 0,5 t/ha ($p < 0,05$) de matière sèche supplémentaire par rapport à l'urée. Cette production de matière sèche peut donc permettre d'atteindre un meilleur rendement avec l'ammonitrate à cette dose. Cela peut ne pas être le cas à des doses d'azote plus élevées car les courbes reliant le poids de matière sèche au rendement ne sont pas tout le temps croissantes.

La mesure de CAU sur les colzas n'a pu être réalisée que pour les deux essais en colza d'un même site (17). La figure 31 présente les valeurs obtenues pour ces deux essais. Ces CAU sont plus faibles que pour des céréales mais sont néanmoins supérieurs au minimum à 0,55 : au moins 55% de l'azote absorbé par le colza a été fourni directement ou indirectement par les engrais. Les différences entre les deux formes ammonitrate et urée pour les effets annuel et système ne sont pas significatives.

- L'ammonitrate permet, en moyenne, une meilleure absorption d'azote par rapport à l'urée que ce soit dans la plante entière pour céréales et colza, ou dans les grains et les pailles des céréales
- L'effet de la forme d'azote sur l'azote absorbé des pailles est plus faible, voire non significatif, en particulier pour les orges
- Quelle que soit la culture, l'effet système de la forme d'azote sur l'azote absorbé est plus important et représente le cumul des effets annuel et système
- Les CAU des engrais azotés ont des valeurs supérieures à 0,80 sur céréales et supérieures à 0,55 sur colza. L'ammonitrate améliore significativement de 0,05 point en moyenne le CAU calculé sur les céréales en effet annuel comme en effet système.

IV. Discussion

1. Impact de la méthode statistique sur les résultats.

On a pu voir, dans la partie précédente, que les résultats ne sont pas exactement identiques selon la méthode utilisée (analyse de variance – contrastes, modèles emboîtés et méthode des couples). Or ces méthodes sont utilisées à partir de la même base de données. Néanmoins, une différence importante est que la méthode des modèles emboîtés et la méthode des couples ont été réalisées à partir des moyennes des 4 blocs de chaque essai et ces méthodes ne tiennent pas compte du dispositif en split-plot mis en place. Les parties suivantes présentent quelques spécificités de l'analyse de variance.

a. Précision des essais

La précision des essais en analyse de variance est évaluée par l'écart-type résiduel (ETR) de chaque essai. Il correspond à la part de variation de rendement de l'essai qui n'est pas expliquée par le modèle avec les trois facteurs (passé, annuel, dose). Plus cet ETR est élevé et plus on considère que l'essai est imprécis. Pour déterminer la significativité des facteurs, l'analyse de variance tient compte de l'hétérogénéité dans l'essai. Ainsi, plus celle-ci est importante, moins la précision de l'essai est bonne et plus les écarts de rendement entre les modalités d'un facteur doivent être importants pour pouvoir détecter un effet significatif de ce facteur.

b. Dispositif split-plot factoriel : le facteur « passé » en grande parcelle

En effet, dans le dispositif choisi le facteur « passé de fertilisation » est en grande parcelle du split-plot factoriel. En pratique, cela signifie que ce facteur est moins précis dans l'analyse de variance. Ainsi, l'effet passé ayant moins de précision, pour un même essai avec des écarts-types résiduels équivalents pour les effets annuel et passé, des écarts de rendements significatifs pour le facteur annuel peuvent être non significatifs pour le facteur passé. La puissance de détection de cet effet est alors plus faible.

Cela pourrait expliquer :

- la faible fréquence d'effets significatifs du passé de fertilisation par l'analyse de variance par rapport à ce même effet par la méthode des modèles emboîtés ou par rapport à l'effet annuel et l'effet système des deux méthodes
- les écarts plus importants entre indices de rendement Ammonitrate – Urée pour l'effet passé, quand il est significatif, par rapport à l'effet annuel

➔ La méthode des modèles emboîtés et la méthode des couples s'appuient sur les moyennes des 4 blocs par modalité. L'hétérogénéité entre les blocs et la précision de l'essai n'est donc pas prise en compte. Dans ces méthodes, tous les essais sont au même niveau pour la détection des effets significatifs.

c. Impact sur la pertinence des résultats obtenus

Les écarts moyens des effets significatifs du passé de fertilisation obtenus par l'analyse de variance sont, par nature du facteur en grande parcelle, plus importants que pour l'effet annuel. Néanmoins, les effets significatifs du passé de fertilisation sont moins fréquents que

pour l'effet annuel. Ainsi, ces résultats sont particulièrement en lien avec la méthode d'analyse utilisée.

Toujours pour la méthode d'analyse de variance, on peut se demander si la variabilité des valeurs des écarts de rendements pour les essais avec un effet significatif n'est pas liée à la variabilité de la précision des essais. De même, pour la méthode des modèles emboîtés, la qualité de la modélisation des courbes de réponse a une influence sur la significativité des effets (une modélisation précise, c'est-à-dire avec un ETR faible, ne nécessite pas des écarts entre forme trop importants pour détecter un effet significatif). Néanmoins, on a vu que plus de 80% des essais étaient précis avec un ETR d'analyse de variance faible et les modélisations de mauvaises qualité ne sont pas fréquentes. L'impact des essais de mauvaise précision ou avec une mauvaise modélisation est donc faible sur les tendances qui se dégagent des résultats. La méthode des couples, quant à elle, ne prend pas en compte la précision des essais mais cette approche multi-sites et pluriannuelle permet de dégager des tendances en moyenne pour l'ensemble des essais. Même si les effets ne sont pas significatifs pour chaque essai, en moyenne, sur l'ensemble des essais, ces effets peuvent être significatifs. Les résultats issus de cette méthode sont donc intéressants et pertinents car ils prennent en compte des sites variables quant à leurs caractéristiques (calcaire ou pas, superficiels, profonds,...) et plusieurs années donc plusieurs effets climatiques possibles (impacts de sécheresse par exemple).

2. Effets de la forme d'azote sur les cultures d'une rotation blé-orge-colza

a. Analyse de l'effet de la forme d'azote

Les résultats de cette étude mettent en évidence un effet moyen positif de l'ammonitrate sur le rendement en grain des cultures et également sur l'azote absorbé par la plante par rapport à l'utilisation d'urée. Cet effet s'applique dans plusieurs conditions : lorsque l'ammonitrate est utilisé sur la culture précédente (effet passé) ou sur la culture en place l'année de récolte (effet annuel) mais aussi lorsqu'on utilise cet engrais à la fois en fertilisation passée et en fertilisation annuelle (effet système). Dans le cas d'un système de culture utilisant constamment le même engrais, l'effet de la forme d'azote est amplifié et semble correspondre à l'addition de l'effet annuel et de l'effet passé. La mise en place d'un tel système avec l'ammonitrate par rapport à l'urée peut donc permettre d'avoir un gain de rendement pour une même dose d'azote ou bien d'éviter d'avoir à majorer l'apport d'azote avec l'urée pour atteindre un rendement équivalent.

Ces résultats restent cependant des résultats généraux et ils ne sont pas valables pour tous les essais. Il peut arriver que l'effet de la forme d'azote ne se produise pas ou, plus rarement, que l'effet soit en faveur de l'urée. Utiliser l'ammonitrate dans ce cas peut donc amener à des résultats contraires à ceux énoncés.

De plus, on a pu montrer que les écarts de rendement à faibles doses d'azote (X-80, X-40) étaient généralement plus importants que pour les doses supérieures (doses supérieures à la dose bilan). Cela s'explique par le fait que l'azote devient un facteur limitant dans ce cas : on est dans la zone de réponse maximale sur la courbe de réponse à l'azote et une petite différence d'azote joue alors beaucoup sur le rendement même si celui-ci est faible. Cet effet se retrouve sur des doses faibles. Plus on augmente la dose, moins la différence d'azote liée à la forme de l'engrais influera fortement le rendement final.

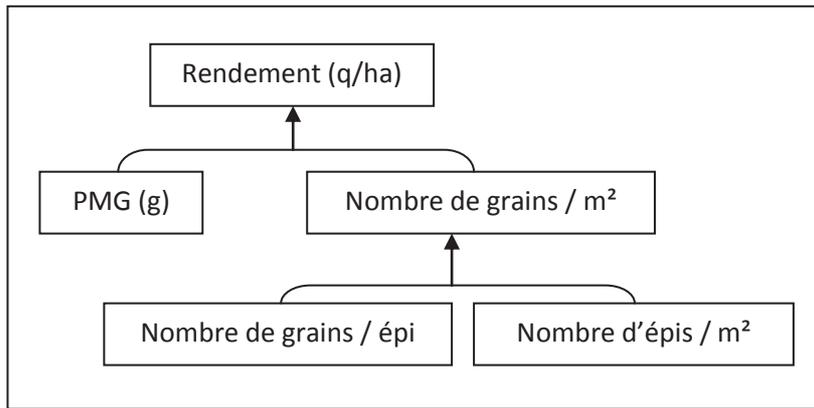


Figure 32 : Plusieurs composantes du rendement des céréales

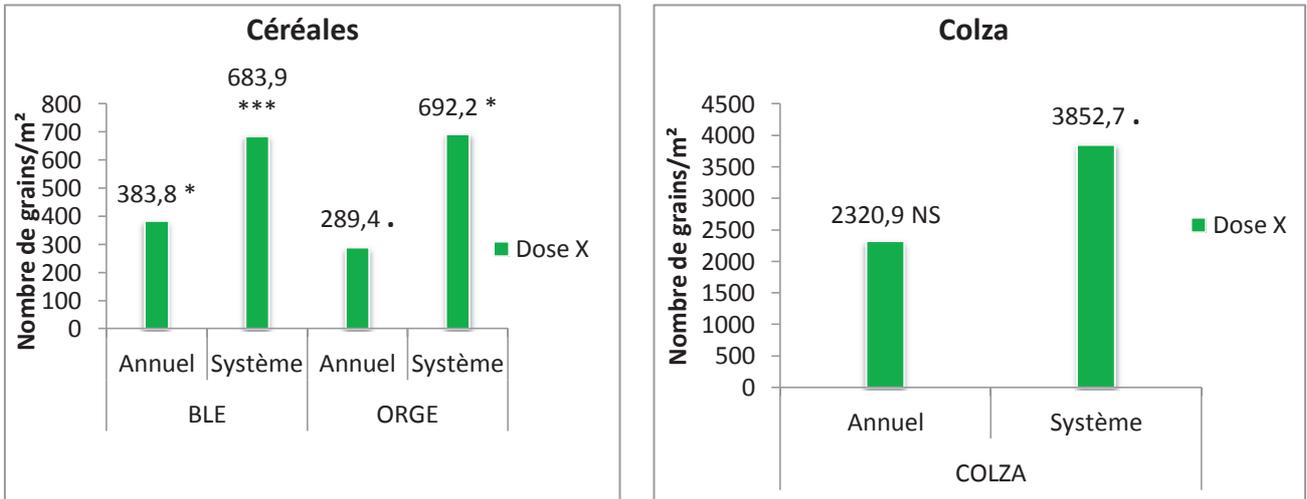


Figure 33 : Différences de la composante Nombre de grains/m² pour les céréales et le colza - Effets annuel et système

Cette conséquence se retrouve également pour les doses témoins qui correspondent aux parcelles non fertilisées l'année de récolte : dans ces conditions l'azote est très fortement limitant. L'utilisation d'ammonitrate l'année précédente de la récolte permet de créer une différence de rendement et d'absorption d'azote pour la culture l'année d'étude ce qui entraîne des écarts entre les deux formes d'azote pour l'effet passé souvent assez importants. Cet effet du passé de fertilisation se retrouve pour les autres doses mais avec des écarts moins élevés, l'azote devenant moins limitant. On peut proposer une hypothèse pour expliquer l'effet passé de la forme d'azote : sur l'ensemble du réseau, les résidus de culture (pailles de blés et d'orges et tiges de colza) ont été enfouis pour la majorité des essais. De plus, l'ammonitrate utilisé l'année précédente amène à un meilleur rendement et une meilleure absorption d'azote par la culture précédente avec donc au final plus d'azote présent dans les résidus. Cet azote supplémentaire immobilisé sous forme d'azote organique dans la paille et les racines peut alors être disponible après minéralisation pour la culture suivante en augmentant le stock d'azote dans le sol : c'est l'effet passé.

De plus, à la dose bilan, la forme d'azote peut ne pas avoir d'effets sur les teneurs en azote dans le grain ou la paille ou sur les teneurs en huile. Néanmoins, l'effet positif de l'ammonitrate sur le rendement en grain ou en paille amplifie, quand il y en a, les effets et permet généralement d'avoir un gain pour l'absorption d'azote avec l'ammonitrate. On peut essayer de situer cet effet dans l'élaboration du rendement : la figure 32 présente les principales composantes du rendement pour les céréales. On peut tout d'abord se demander si on a un effet de la forme d'azote pour le poids des grains en étudiant le Poids de Mille Grains (PMG). La différence de PMG entre ammonitrate et urée, à la dose bilan et pour les effets annuel et système n'est significative à 10% que pour les orges en effet annuel. Il n'y a donc pas d'effet forme significatif pour la composante PMG sur les blés et sur les orges en effet système. Pour le colza, l'effet forme sur le PMG est également non significatif. Ainsi, pour les céréales, la forme d'azote a peu d'effet pendant la phase de remplissage des grains, phase qui détermine la composante PMG.

On a cependant un effet final sur le rendement ; l'effet de la forme d'azote devrait donc se produire au niveau de la phase de production des grains, avant la fin de la floraison : on peut l'étudier avec la composante nombre de grains/m². La figure 33 présente les différences obtenues entre ammonitrate et urée pour cette composante à la dose bilan.

L'effet de la forme d'azote est donc significatif pour cette composante, sauf pour le colza en effet annuel. L'utilisation d'ammonitrate permet donc, en moyenne, d'avoir plus de grains par unité de surface par rapport à l'urée. C'est sur cette composante que l'effet forme est le plus important. Le nombre de grains/m² est également déterminé par le nombre d'épis/m² et le nombre de grains/épi. La composante nombre d'épis/m² a été mesurée pour les céréales. L'effet forme d'azote sur le nombre d'épis/m² n'est pas significatif quelle que soit la culture.

b. Conséquences sur les aspects qualité et économie

L'effet positif de l'ammonitrate sur certaines variables par rapport à l'urée peut poser des problèmes pour des cultures d'un point de vue de la qualité. En effet, l'ammonitrate permet généralement d'augmenter la teneur en protéines et de diminuer la teneur en huile dans les grains de colza. Cela peut être un aspect positif pour la qualité des tourteaux de colza, plus riches en protéines dans ce cas. Concernant l'huile, le rendement en huile n'a pas de signification économique directe pour les agriculteurs et les coopératives : un meilleur rendement en huile obtenu avec l'ammonitrate n'est pas valorisé. Ce qui est valorisé par les tritrateurs est la teneur en huile avec une majoration possible si celle-ci est élevée. Or, sur cette variable, l'ammonitrate a plutôt un effet négatif. Ainsi, l'ammonitrate tend à augmenter

le rendement mais aussi à diminuer la teneur en huile. Il faut trouver un compromis sur la dose d'azote à apporter pour éviter, en améliorant une des variables de trop pénaliser l'autre.

La même remarque peut être faite pour la culture de l'orge de brasserie. En effet, ces orges doivent avoir un taux de protéines plutôt faible (inférieur à 11,5%). Pour cela, l'ammonitrate est plutôt défavorable puisque cette forme permet d'augmenter le taux de protéines par rapport à l'urée. Néanmoins, l'obtention de la qualité ne doit pas se faire au détriment du rendement : il faut trouver un compromis entre le rendement et la teneur en protéines.

La culture du colza et de l'orge brassicole nécessitent donc d'être précis sur la fertilisation pour atteindre les objectifs de rendement et de qualité.

c. Hypothèses d'explication des effets

L'effet de la forme d'azote n'est pas significatif pour l'ensemble des essais. On peut donc se demander pourquoi un effet est significatif dans un cas et pourquoi il ne l'est pas dans un autre cas. Dans le cas des résultats de l'analyse de variance, la répartition des essais selon une variable précise en essais avec un effet significatif ou un effet non significatif a été comparée à la répartition théorique des essais dans le cas où la variable étudiée et la variable de significativité des essais sont indépendantes. Les variables choisies sont : le site de l'essai, l'année, la culture, le niveau de rendement et le type de sol. Cette comparaison a été réalisée pour les effets annuel et système à la dose bilan pour chaque variable par un test exact de Fisher (équivalent du test du χ^2 pour des effectifs réduits). Par exemple, cela répond à la question : la répartition entre les essais avec effet significatif ou non significatif est-elle indépendante du site d'essai ? Les résultats correspondent tous à des tests non significatifs (à 10%) : il n'y a pas de lien entre la significativité des effets et le site, l'année, la culture, le niveau de rendement ou la nature du sol (calcaire ou non calcaire).

On peut également se poser la question concernant l'origine des différences d'azote absorbé. Pour les céréales, le CAU de l'ammonitrate est plus élevé que celui de l'urée. Cela signifie que, pour une même dose d'azote apportée, l'absorption d'azote avec l'utilisation d'ammonitrate est plus importante que l'absorption d'azote avec l'utilisation d'urée (d'environ 5%). Ainsi, on peut se demander comment cette différence peut s'expliquer. L'azote issu de l'urée non absorbé par la plante contrairement à l'ammonitrate est-il stocké et immobilisé dans le sol ? Cela ne semble pas très probable d'autant plus que cette augmentation du stock d'azote dans le sol devrait avoir un effet passé positif en faveur de l'urée pour la culture suivante et ce n'est pas le cas. Une hypothèse plus probable est que l'urée subit après son épandage de la volatilisation, ce qui entraîne une diminution de l'azote disponible pour le système sol-plante. Ce phénomène serait plus ou moins important selon la nature du sol et les conditions climatiques après chaque apport de l'engrais. Cette hypothèse pourrait être vérifiée en étudiant l'effet de plusieurs variables explicatives possibles liées à la volatilisation sur les écarts de rendement et d'azote absorbé entre ammonitrate et urée : par exemple une variable sur le sol (sol calcaire/non calcaire) et des variables climatiques (évapotranspiration, pluviométrie, humidité du sol en surface, température de l'air,...). Néanmoins, cela peut être très complexe : en effet, le dispositif de cette étude ne permet pas de renseigner ces variables de manière assez précise et l'interaction entre les variables explicatives peut également être importante. De plus, les apports sont au nombre de 2 ou 3 selon la culture : il y a donc 2 ou 3 conditions de volatilisation à étudier par essai en regard d'écarts de rendements ou d'azote absorbé qui sont établis après tous les apports, à la récolte.

Enfin, si on appliquait les majorations de dose obtenues par simulations de rendements comme règle pour la conduite de la fertilisation des cultures, on risquerait d'augmenter la perte d'azote par volatilisation ammoniacale liée à l'apport de l'urée.

3. Perspectives

Cette étude ne permet pas d'expliquer clairement les effets liés à l'utilisation d'ammonitrate ou d'urée. Ces effets ne se produisent pas tout le temps et, lorsqu'ils se produisent, la réponse à cet effet est très variable selon les essais en termes d'écart mais aussi de courbes de réponse. De même, les simulations de rendements amèneraient à augmenter la dose d'urée pour atteindre un rendement non significativement différent du rendement en ammonitrate mais, ce faisant, la variabilité entre les rendements augmente ainsi que les risques de sur-fertilisation ou de sous-fertilisation. Cela ne peut pas être raisonnable d'un point de vue environnemental, économique et aussi par rapport à la qualité. En effet, l'apport azoté doit être précis pour des cultures telles que les orges brassicoles ou le colza.

La connaissance des facteurs explicatifs des effets forme d'azote pourrait permettre de déterminer pourquoi les réponses à l'azote sont différentes selon la forme d'azote. Si on arrivait à connaître les raisons de la variabilité des réponses, on pourrait ensuite essayer de prévoir les différences entre ammonitrate et urée pour un site ou une culture donnée. Dans ce cas, on pourrait réaliser des simulations de rendement pour chaque groupe d'essais pour lesquels la réponse est semblable et connaître l'augmentation de dose à utiliser pour chaque groupe.

De plus, cette étude a permis de mettre en évidence un effet passé de la forme d'azote valable uniquement pour la forme d'azote utilisée l'année précédente de l'année de récolte. Il serait intéressant d'étudier l'effet du passé selon le nombre d'années de fertilisation avec la même forme d'azote précédant l'année de récolte. Ce nombre a varié de 1 à 4 pour le dispositif utilisé dans cette étude.

Enfin, les doses optimales calculées ici sont des optimums techniques. Il peut être également intéressant de travailler sur des doses optimales économiques, qui prennent en compte le coût de l'engrais. En effet, l'ammonitrate étant généralement plus cher que l'urée, les gains amenés par l'utilisation d'ammonitrate sont à mettre en regard du prix plus faible de l'urée. Cette comparaison ne devrait cependant pas se baser sur le seul effet annuel mais bien sur l'effet système qui prend en compte l'arrière-effet de la forme d'azote.

Ces essais se poursuivent en 2013, certains sont arrêtés, d'autres seront créés pour étudier l'effet de la forme d'azote pour d'autres cultures. Il est nécessaire de continuer les expérimentations pour consolider les résultats obtenus. Cela sera d'autant plus vrai que les essais seront précis.

Conclusion :

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, l'effet annuel de la forme d'azote avait déjà été établi pour différentes cultures et est confirmé par cette étude. Ce réseau d'essais 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 et dans ses différentes parties. L'effet passé a été particulièrement identifiable sur les parcelles témoin non fertilisées l'année de récolte : les écarts de rendement ou d'azote absorbé observés pour ces parcelles sont dus à la forme d'azote utilisée l'année précédente. 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 d'effets système significatifs par rapport à l'effet annuel. Enfin, quel que soit l'effet, en moyenne, c'est avec l'ammonitrate qu'on obtient un gain de rendement ou d'azote absorbé par rapport à l'urée.

Ces effets ont pu être décrits, quantifiés mais leur explication reste difficile. 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 la significativité des essais. Il n'y a donc pas de possibilité d'établir des critères pour prévoir les effets de la forme d'azote. De plus, la perte d'azote par volatilisation plus importante après l'épandage d'urée (moins d'azote pour le système sol-plante) est 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 permettrait alors 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). Il faut cependant être plus précis pour des cultures telles que le colza ou l'orge de brasserie. Dans ce cas, on peut adopter un calcul de la dose bilan par la méthode du bilan prévisionnel plus restrictif pour limiter la teneur en protéines sans trop nuire au rendement.

Enfin, la meilleure connaissance des différences entre ammonitrate et urée doit également considérer l'aspect environnemental 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 plutôt aléatoire des épisodes pluvieux qui permettraient l'infiltration de l'engrais dans le sol. L'association d'un inhibiteur d'uréase pour ralentir l'hydrolyse de l'urée et limiter les risques de volatilisation est une piste à explorer. Le bilan environnemental des engrais considère aussi d'autres impacts en plus de l'effet d'acidification 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

- Butterbach-Bahl K., Gundersen P. et al. (2011) Nitrogen processes in terrestrial ecosystems. In: The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Sutton Mark A., Howard Clare M., Erisman Jan W. et al. Cambridge University Press with sections © authors / European Union, New York, pp. 99-125.
- Cohan J-P., Le Souder C. (2013) Formes d'azote. Ammonitrate, solution azotée ou urée : les bons critères de choix. *Perspectives agricoles*, n° 396 Janvier 2013, pp. 36-38
- Comifer Groupe Azote (2011) Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies. Comifer 91 p.
- Dampney P., Dyer C., Goodlass G., Chambers B., (2006) Component report for Defra Project NT2605 (CSA 6579). WP1a Crop Responses. DEFRA, 110 p.
- EMEP/CORINAIR (2007) Chapter B1010 Cultures with fertilisers. In: EMEP/CORINAIR Technical Report No. 16/2007, EEA, 43 p.
- EMEP/EEA (2009) Chapter 4D Crop production and agricultural soils. In: EMEP/EEA Emission inventory guidebook 2009, EEA, 39 p.
- Hofman G., Van Cleemput O. (2004) Soil and Plant Nitrogen. IFA, Paris, 48 p.
- IFA Task Force on Reactive Nitrogen. (2007) Sustainable Management of the Nitrogen Cycle in Agriculture and Mitigation of Reactive Nitrogen Side Effects. IFA, Paris, 53 p.
- 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.
- Richard H. (1996) Rapport d'expérimentation. Comparaison de l'efficacité de deux formes d'engrais azoté : Ammonitrate et solution azotée sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre. Hydro Agri France, ITCF. 34 p.
- 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, 112 p.

Yara (2011) Les ammonitrates. Optimiser le rendement, préserver l'environnement. Yara, 15p.

Sitographie

GIS GC HP2E (2007) Cascade de l'azote et azote réactif : qu'est-ce que c'est ? Disponible sur : <https://colloque4.inra.fr/gchp2e_seminaire_azote/Page-d-accueil/Pourquoi/Cascade-de-l-azote-et-azote-reactif> (consulté le 14/03/2013)

IFA (2011) IFADATA 2010. Disponible sur <<http://www.fertilizer.org/ifa/ifadata/search>> (consulté le 19/03/2013)

Terre-net (2013) Cotations de l'engrais urée. Disponible sur <<http://www.terre-net.fr/marche-agricole/engrais/uree/a10>>. Engrais Ammonitrate 33,5. Disponible sur : <<http://www.terre-net.fr/marche-agricole/engrais/ammonitrate-33-5/a8>> (consultés le 05/04/2013)

UNIFA (2008) Azote. Choisir la forme de l'azote minéral. Disponible sur : <<http://www.unifa.fr/raisonner-la-fertilisation/choisir-le-bon-produit/azote.html>> (consulté le 11/03/2013)

UNIFA (2013) Importance des familles d'engrais pour la France entière. Les engrais simples azotés. Disponible sur : <<http://www.unifa.fr/le-marche-en-chiffres/la-fertilisation-en-france.html>> (consulté le 29/03/2013)

Annexe I : Le phénomène de volatilisation

A l'échelle mondiale, la production agricole participe à environ 75% des émissions totales d'ammoniac avec 22% de ces émissions qui proviennent des fertilisants minéraux¹. La prise en compte de la volatilisation ammoniacale est donc importante pour réduire les pertes d'azote d'un point de vue économique mais aussi environnemental. En France, l'agriculture participe à hauteur de 97% des émissions de NH₃. Les fertilisants minéraux correspondent à environ 22,5% des émissions du secteur agricole en 2010, soit 141 244 tonnes de NH₃ ; le reste provenant principalement de l'élevage (déjections animales)².

Les pertes par volatilisation ammoniacale sont plus importantes pour l'urée que pour l'ammonitrate. Les quantités volatilisées dépendent des conditions pendant et après l'épandage (une température élevée, un vent fort, une faible hygrométrie, un sol nu)³ et de nombreux facteurs dont les plus importants sont : un pH basique et une faible CEC. Pour un sol calcaire, la volatilisation risque d'être plus importante que pour un sol non calcaire (pH plus élevé)⁴. De plus, la Capacité d'Echange Cationique (CEC) du sol permet, si elle est importante, d'adsorber l'ammonium et donc favorise la réduction des risques de volatilisation.⁵ Au contraire, une ETP importante, liée à une température élevée, favorise le départ d'ammoniac.⁶ Une étude sur les facteurs de volatilisation réalisée par le Defra a permis de trouver un effet de la texture du sol sur les quantités d'ammoniac volatilisées après l'application d'urée : les émissions étaient les plus importantes pour des sols sableux limoneux et les plus faibles pour des sols limono-argileux et limono-sableux. Des relations entre les émissions d'ammoniac et la CEC, le pH, les teneurs en argile et carbone organique ou encore l'activité d'uréases, n'ont pas pu être mises en évidence.⁶ La volatilisation ammoniacale a été estimée à environ 11,5% de la dose d'azote apportée pour l'urée épandue en surface et à seulement 0,6% pour les ammonitrates.⁷ Néanmoins, l'estimation de la volatilisation est difficile et les situations rencontrées peuvent être très variables :

Pour des cultures annuelles, la volatilisation mesurée est en moyenne de 3% et varie de -3 à 10% de l'azote apporté pour les ammonitrates et elle est en moyenne de 22% et varie de 2 à 43% pour l'urée selon le DEFRA⁷ (Essais réalisés sur 5 sites de 2004 à 2005, mesures par des tunnels). Selon l'EMEP/EEA⁸, la volatilisation ammoniacale est de 4% au maximum de l'azote apporté pour les ammonitrates et de 6 à 47% pour l'urée. Lors de l'application d'urée, un enfouissement rapide est préconisé pour éviter la diffusion dans l'air de l'ammoniac.⁴ Il est cependant peu réalisé et n'est généralement pas possible lorsque la culture est déjà en place.

¹ IFA Task Force on Reactive Nitrogen. (2007) Sustainable Management of the Nitrogen Cycle in Agriculture and Mitigation of Reactive Nitrogen Side Effects. IFA, Paris, 53 p.

² CITEPA (2012) Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. Séries sectorielles et analyses étendues. Format Secten. CITEPA, Avril 2012, 336 p.

³ UNIFA (2008) Gagner en efficacité avec l'azote minéral pour protéger l'environnement. Dossier technique. UNIFA 16 p.

⁴ Comifer Groupe Azote (2011) Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies. Comifer 91 p.

⁵ Le Souder C., Taureau J-C. (1997) Engrais azotés. Leur devenir dans le sol. *Perspectives agricoles*, n°221 Février 1997, pp. 64-66

⁶ Chadwick D., Misselbrook T., Gilhespy S., Williams J., Bhogal A., Sagoo L., Nicholson F., Webb J., Anthony S., Chambers B. (2005) Component report for Defra Project NT2605 (CSA 6579). WP1b Ammonia emissions and crop N use efficiency. DEFRA, 71 p.

⁷ EMEP/CORINAIR (2007) Chapter B1010 Cultures with fertilisers. In: EMEP/CORINAIR Technical Report No. 16/2007, EEA, 43 p.

⁸ EMEP/EEA (2009) Chapter 4D Crop production and agricultural soils. In: EMEP/EEA Emission inventory guidebook 2009, EEA, 39 p.

Une autre manière de limiter la volatilisation est d'épandre l'engrais pendant ou avant un épisode pluvieux, ce qui permet une bonne infiltration de l'engrais dans le sol mais la météo est difficile à prévoir.⁹ Les pertes par volatilisation peuvent être réduites si une pluie significative a lieu pendant la principale période de volatilisation soit pendant environ 10 jours après l'application de l'engrais.¹⁰ Enfin, pour limiter les risques de volatilisation, le CORPEN préconise l'utilisation d'azote sous la forme nitrique, sans risque de volatilisation, de préférence aux formes uréique et ammoniacale.¹¹ Lors de l'utilisation de la solution azotée, des majorations de 10 à 15% de la dose d'azote de la méthode du bilan prévisionnel peuvent être réalisées pour compenser les pertes d'azote principalement liées à la volatilisation.¹² De même, une majoration peut aussi être réalisée pour l'urée. De plus, l'urée peut aussi être appliquée avec un inhibiteur d'uréase comme le NBPT. Il permet de réduire les pertes par volatilisation en ralentissant le processus d'hydrolyse de la molécule d'urée et de décaler la période pendant laquelle les pertes sont maximales. Les possibilités d'avoir un épisode pluvieux permettant l'infiltration de l'urée dans le sol et donc la diminution des risques de volatilisation sont alors accrues. Le NBPT se dégrade au cours du temps et selon la température avec une dégradation maximale à 25°C¹³.

⁹Comifer Groupe Azote, 2011

¹⁰ EMEP/EEA, 2009, d'après Misselbrook et al., 2004

¹¹ CORPEN (2006) Les émissions d'ammoniac et de gaz azotés à effet de serre en agriculture. CORPEN, 98 p.

¹² 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

¹³ Watson C. J., Akhonzada N. A., 2005

Annexe II : Compléments sur les pertes d'azote du système sol-plante

Butterbach-Bahl K. et al. (2011, d'après Davidson, 2009)¹⁴ estiment que l'utilisation d'un engrais azoté amène à une perte d'environ 2,5% de l'azote contenu dans cet engrais sous forme de N₂O à cause des pertes directes et indirectes liées aux cycles de nitrification et de dénitrification qui se produisent après l'application de l'engrais. Le GIEC, lui, suppose que les émissions directes de N₂O provenant des fertilisants appliqués sont de l'ordre de 1% de l'azote appliqué et les émissions totales (directes et indirectes) correspondent à 1,9% de l'azote appliqué.¹⁵ Les valeurs sont donc variables selon les sources. Cela est essentiellement dû aux incertitudes très importantes concernant ces émissions. Les émissions de N₂O augmentent particulièrement avec l'humidité du sol, la température et la disponibilité en azote minéral.¹⁶ Enfin, une étude réalisée par le DEFRA a montré que, en tenant compte des émissions directes et indirectes (volatilisation et déposition de l'ammoniac suivies d'émissions de N₂O), les facteurs d'émission de N₂O de l'urée et de l'ammonitrate ne sont pas significativement différents.¹⁷

Selon la forme de l'azote dans l'engrais apporté, les pertes d'azote se produisent à partir de différents processus. Les pertes d'azote ammoniacal peuvent, selon la nature de l'engrais et les conditions d'épandage être plus ou moins importantes. Les pertes par dénitrification de protoxyde d'azote et d'oxydes d'azote ont un fort impact sur le réchauffement climatique mais ne représentent pas une quantité très importante d'azote perdue. Les pertes par lixiviation de nitrate peuvent être importantes mais, les apports de fertilisants azotés n'ayant pas lieu pendant l'hiver quand le drainage peut être important, les risques de lixiviation de nitrate provenant d'engrais sont plutôt faibles.¹⁸ Ainsi, plus les pertes sont importantes et plus les effets négatifs sur l'efficacité d'absorption de l'engrais sont importants. Par exemple, l'épandage d'urée par temps chaud, avec du vent, sans pluie favorise fortement la volatilisation d'ammoniac et donc la perte d'azote, et ce, d'autant plus que ces conditions durent dans le temps.

¹⁴ Butterbach-Bahl K., Gundersen P. et al. (2011) Nitrogen processes in terrestrial ecosystems. In: The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Sutton Mark A., Howard Clare M., Erisman Jan W. et al. Cambridge University Press with sections © authors / European Union, New York, pp. 99-125.

¹⁵ GIEC (2006) Chapitre 11 : Émissions de N₂O des sols gérés, et émissions de CO₂ dues au chaulage et à l'application d'urée. In : Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, préparé par le Programme pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. et Tanabe K. (eds). Publié: IGES, Japon, 60p.

¹⁶ Dampney P.M.R., Chadwick D., Smith K.A., Bhogal A. (2004) Report for Defra Project NT2603. The behaviour of some different fertiliser – N materials. DEFRA, 114 p.

¹⁷ Smith K., Dobbie K., Thorman R., Yamulki S. (2006) Component report for Defra Project NT2605 (CSA 6579). WP2 The effect of N fertiliser forms on nitrous oxide emissions. DEFRA 44 p.

¹⁸ Cohan J-P., Le Souder C. (2013) Formes d'azote. Ammonitrate, solution azotée ou urée : les bons critères de choix. *Perspectives agricoles*, n° 396 Janvier 2013, pp. 36-38

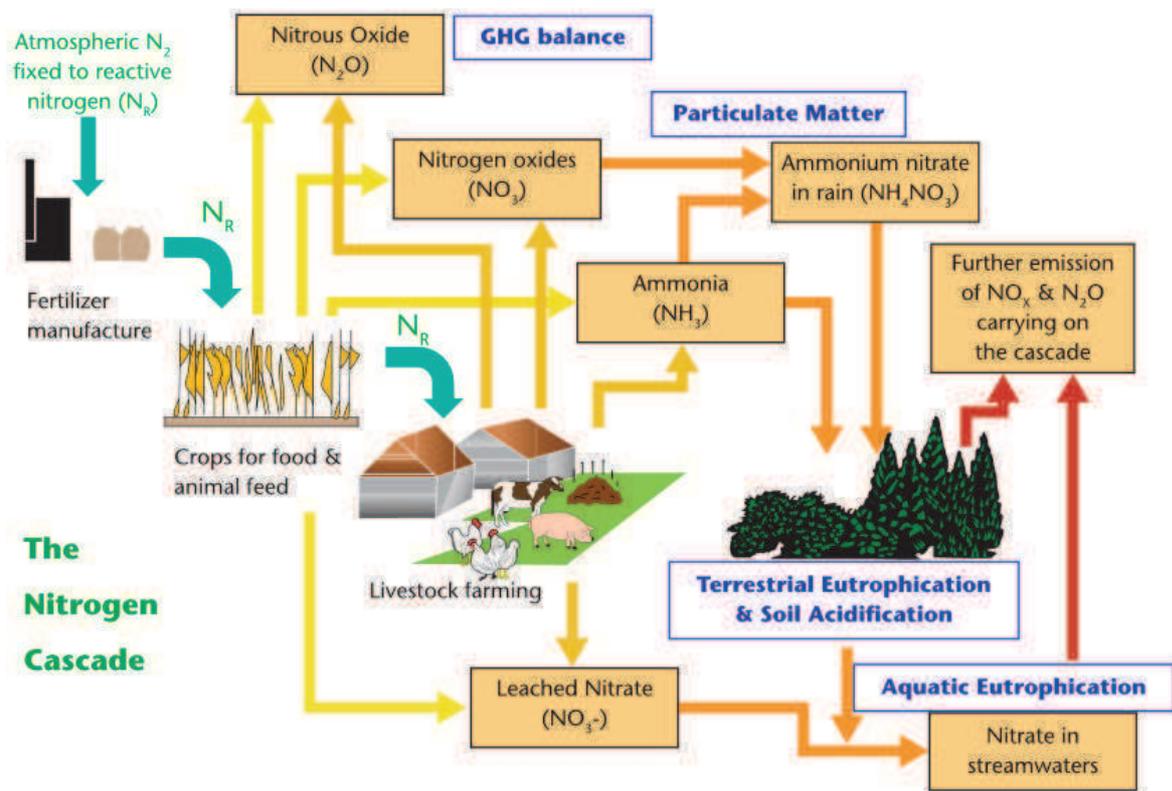


Figure 1 : Cascade de l'azote¹⁹

¹⁹ Cellier P., Bethenod O., Castell J-F., Germon J-C. (2008) Contribution de l'agriculture à l'effet de serre. Importance de l'azote et interactions avec l'ozone. *OCL* Vol 15 n° 5 Septembre-octobre 2008 pp. 317-323 doi : 10.1684/ocl.2008.0224

Annexe III : Devenir de l'azote issu des engrais : la cascade de l'azote

Le diazote, constituant 78% en volume de l'atmosphère et donc présent en grande quantité, est un gaz inerte, qui réagit très peu : c'est ce qu'on appelle l'azote non réactif. Il représente environ 99% de l'azote de la Terre.²⁰ Les autres formes d'azote forment le pool d'azote réactif. Ces molécules sont susceptibles d'interagir avec d'autres composés chimiques. L'azote réactif peut donc être organique ou minéral (urée, protéines, NH_3 , NO_3^- , ...).

L'azote réactif nouvellement produit peut entrer dans ce qu'on appelle la cascade de l'azote. Il est produit à partir du N_2 soit naturellement par fixation libre ou symbiotique et par réaction chimique dans l'atmosphère, soit industriellement, principalement par le procédé de Haber-Bosch.²¹ Ce procédé consiste à synthétiser de l'ammoniac à partir de l'azote du N_2 de l'atmosphère et de dihydrogène. L'azote réactif issu de ces processus est alors susceptible de réagir plusieurs fois avec d'autres molécules et d'avoir plusieurs formes différentes avant d'être éventuellement dénitrifié en diazote et redevenir ainsi de l'azote non réactif. Cette cascade de réactions et de formes d'azote peut amener, à chaque nouvelle forme d'azote réactif, à avoir un effet sur l'environnement (voir Figure 1). Cela permet de mettre en évidence les effets directs et indirects des pertes d'azote provenant du cycle de l'azote.

La production et l'utilisation d'engrais azotés minéraux provoquent une augmentation de la quantité d'azote réactif introduit dans la biosphère et une intensification de la cascade de l'azote ; avec des impacts sur l'atmosphère et sur les écosystèmes terrestres ou aquatiques pouvant aussi être intensifiés. En effet, l'azote réactif peut alors s'accumuler dans les différents compartiments de l'environnement.²⁰

²⁰ IFA Task Force on Reactive Nitrogen. (2007) Sustainable Management of the Nitrogen Cycle in Agriculture and Mitigation of Reactive Nitrogen Side Effects. IFA, Paris, 53 p.

²¹ GIS GC HP2E (2007) Cascade de l'azote et azote réactif : qu'est-ce que c'est ? Disponible sur : <https://colloque4.inra.fr/gchp2e_seminaire_azote/Page-d-accueil/Pourquoi/Cascade-de-l-azote-et-azote-reactif> (consulté le 14/03/2013)

	<p>Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage</p> <p>Spécialité : Sciences et productions végétales</p> <p>Option : Ingénierie des agrosystèmes</p> <p>Enseignant référent : Safya Menasseri</p>
<p>Auteur : Marine Boury</p>	<p>Organisme d'accueil : Unifa</p>
<p>Date de naissance : 22/03/1990</p>	<p>Adresse : Le Diamant A 92909 Paris- La Défense Cedex</p>
<p>Nombre pages : 44 Annexes : 5</p>	<p>Maître de stage : Philippe Eveillard</p>
<p>Année de soutenance : 2013</p>	
<p>Titre français : Synthèse d'essais de longue durée en grandes cultures comparant deux engrais azotés minéraux : ammonitrate et urée</p>	
<p>Titre anglais : Review of long term trials on main crops comparing two types of nitrogen fertilizers : ammonium nitrate and urea</p>	
<p>Résumé :</p> <p>La maîtrise de la fertilisation azotée est un enjeu majeur dans la réduction des impacts environnementaux de l'agriculture. Cette étude analyse l'effet de la forme de l'engrais azoté solide, ammonitrate et urée, sur une rotation colza-blé-orge. Le réseau d'essais en place de 2002 à 2012 distingue l'effet annuel classiquement étudié et l'effet passé peu étudié de la forme d'azote apportée sur la culture précédente. Les effets de la forme d'azote sont mis en évidence sur le rendement, la teneur en protéines ou en huile et sur l'azote absorbé par les grains et la plante entière à partir d'un jeu complet de courbes de réponses sur 52 situations.</p> <p>Plusieurs méthodes statistiques sont combinées pour évaluer l'intensité de l'effet de la forme ammonitrate, à la fois en fréquence de réponses significatives, et en importance de l'écart avec l'urée. Pour toutes les variables, l'écart en faveur de l'ammonitrate le plus important est obtenu par l'effet système qui cumule l'effet passé (forme d'azote sur le précédent) et l'effet annuel (forme sur la culture). Néanmoins, la variabilité de ces effets est importante et n'a pas pu être expliquée par un effet culture, type de sol ou climat. En l'absence d'un modèle prédictif, il convient d'être prudent sur l'application d'un taux d'augmentation de la dose d'azote en urée calculé pour annuler l'écart de rendement entre les deux formes.</p>	
<p>Abstract :</p> <p>Precise nitrogen fertilization is an important issue to limit environmental impacts of crop production. This study analyses the effect of the type of fertilizer (ammonium nitrate and urea) for a common crop rotation of rapeseed-wheat-barley. The network of trials from 2002 to 2012 highlights an annual effect well documented but also a past effect, receiving less attention, of the type of fertilizer applied on the past crop. The effects of the type of fertilizer are quantified on yield, protein or oil content and on the nitrogen taken up by grains or the whole plant in 52 situations with response curves to nitrogen.</p> <p>Several statistical methods are used to estimate the intensity of the effect of ammonium nitrate both on the frequency of significant responses and on the magnitude of the difference with urea. For all variables the system effect adding annual and past effects of ammonium nitrate shows the most important differences. However, the variability of these effects is important and it could not be explained by factors like crop, type of soil or climatic conditions. With no predictive model available for the effect of fertilizer type, it is necessary to be very careful on applying an increase of the nitrogen dose for urea to cancel the difference of yield between the two fertilizers.</p>	
<p>Mots-clés : ammonitrate, urée, azote, essai de longue durée, blé, orge, colza, rendement, protéine, huile, absorption d'azote</p> <p>Key words : ammonium nitrate, urea, nitrogen, long term trial, wheat, barley, rapeseed, yield, protein, oil, nitrogen uptake</p>	