

**Evaluation de nouvelles méthodes
pour raisonner la fertilisation azotée
du blé tendre d'hiver**

Margot Alfroit

Option Calice : Concevoir et accompagner l'innov'action
en agronomie

Promotion 2017 - 2020

**Evaluation de nouvelles méthodes
pour raisonner la fertilisation azotée
du blé tendre d'hiver**

Margot Alfroit

Option Calice : Concevoir et accompagner l'innov'action
en agronomie

Promotion 2017 – 2020

Tuteur d'entreprise : Vincent Moulin

Enseignante référente : Nathalie Vassal-Courtaillac

« L'étudiante conserve la qualité d'auteurs et d'inventeurs au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de ce rapport et assument l'intégralité de leur responsabilité civile, administrative et/ou pénale ou de toute faute administrative ou pénale. Ils ne sauraient en aucun cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup. »

Remerciements

J'adresse tout particulièrement mes remerciements à Vincent Moulin, mon maître de stage et conseiller à la FDGEDA du Cher, pour son suivi et ses nombreux conseils. Je le remercie de m'avoir permis de l'accompagner aussi souvent pour découvrir son métier. Merci également pour les discussions et réflexions sur l'agriculture et pour les moments de rire.

Je remercie Jérôme Brunet, conseiller à la FDGEDA du Cher pour son aide sur une partie de ce mémoire ainsi que Céline Grimoin et Morgan Moreau du service expérimentation pour le travail qu'ils ont réalisé avant le début de mon stage et le temps qu'ils m'ont consacré.

Merci à Annick Gérard, secrétaire de Direction-Comptable, pour son aide au moment de l'impression du mémoire et de manière générale merci à toute l'équipe de la FDGEDA du Cher pour leur sympathie et pour m'avoir permis de réaliser ce stage.

La rédaction de ce mémoire est également l'occasion de remercier tous les professeurs de l'option Calice de VetAgro Sup pour la richesse de cette année scolaire et leur implication. Merci à Nathalie Vassal-Courtaillac, ma référente de stage, pour son suivi.

Enfin, merci à ma famille, à Thibaut et à mes amis pour le soutien qu'ils m'ont toujours apporté.

Résumé

La fertilisation azotée est gérée depuis de nombreuses années par une seule et unique méthode : la méthode du bilan prévisionnel. Entre 2015 et 2017, un raisonnement innovant de la fertilisation azotée a été étudié et les méthodes APPI-N et CHN qui en découlent, sont en cours de test.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans le projet SOLINAZO et s'intéresse à la potentielle validation de ces méthodes en tant qu'alternatives à la méthode du bilan. Sur la campagne 2019/2020, la FDGEDA du Cher a mis en place et suivi deux essais. Les résultats montrent que, dans le contexte de l'étude, la méthode APPI-N assure une performance de production égale à celle de la méthode du bilan voire meilleure sur le plan qualitatif. La méthode CHN se démarque quant à elle par une production de qualité malgré la moindre quantité produite dans une des situations. Il a également été montré que les outils à disposition pour estimer l'état de nutrition azotée d'une culture n'étaient pas toujours fiables.

L'étude a aussi consisté à suivre deux agriculteurs ayant mis en place la méthode APPI-N dans une de leurs parcelles en blé tendre d'hiver. Les agriculteurs appréhendaient de ne pas pouvoir apporter d'azote dans les périodes que la méthode considère non-favorables. La crainte d'une perte de rendement s'est faite ressentir. Ils pointent également l'impossibilité de piloter l'ensemble de la fertilisation azotée d'une exploitation faute d'outils utilisables à grande échelle.

C'est pourquoi, le développement des méthodes passe alors au préalable par un travail de R&D.

Mots clés : fertilisation azotée, méthode du bilan, méthode APPI-N, méthode CHN, performance, état de nutrition azotée, blé tendre d'hiver

Table des matières

Introduction.....	1
I. Contexte et enjeux autour de la gestion de l'azote dans les systèmes de cultures.....	2
1. Evaluation de l'importance de l'azote dans les systèmes de cultures.....	2
1.1. L'azote est indispensable au développement des plantes.....	2
a. Rôle de l'azote.....	2
b. Dynamique d'absorption de l'azote par une culture de blé.....	2
c. Efficience d'utilisation de l'azote par les plantes.....	3
1.2. Les pertes d'azote sont à l'origine de nuisances environnementales.....	3
a. Pollution des eaux.....	4
b. Pollutions atmosphériques.....	5
2. La fertilisation azotée est raisonnée par la méthode du bilan prévisionnel.....	5
2.1. Proposition d'une méthode pour rationaliser les apports d'azote par Hébert (1969).....	5
2.2. Vulgarisation de la méthode du bilan par l'ITCF (1978).....	6
2.3. Officialisation de la méthode du bilan par le Comifer (1980).....	6
3. Elaboration d'un raisonnement de la fertilisation azotée innovant.....	8
3.1. Les limites de la méthode du bilan prévisionnel.....	8
3.2. Le nouveau raisonnement de la fertilisation azotée proposé par Ravier (2017) repose sur des connaissances préexistantes.....	9
a. Suivi de l'état de nutrition azotée de la culture par l'estimation de l'INN.....	9
b. Tolérance de carences précoces en azote.....	10
c. Développement des méthodes APPI-N et CHN.....	10
4. Une étude visant à évaluer les méthodes APPI-N et CHN en tant qu'alternatives à la méthode du bilan.....	11
4.1. Problématique.....	11
4.2. Objectifs de travail.....	11
II. Matériels et méthodes de travail.....	12
Présentation de la stratégie globale de travail.....	12
1. Comparer expérimentalement les performances des méthodes APPI-N et CHN par rapport à la méthode du bilan.....	12
1.1. Dispositif expérimental.....	12
1.2. Protocoles expérimentaux des stratégies de fertilisation testées.....	13
a. Gestion de la fertilisation azotée par la méthode du bilan / méthode Comifer.....	14
b. Gestion de la fertilisation azotée par la méthode APPI-N.....	14
Principe de la méthode APPI-N.....	14
Application de la méthode APPI-N.....	15
c. Gestion de la fertilisation azotée par la méthode CHN.....	15

Principe de la méthode CHN	15
Application de la méthode CHN	15
1.3. Données nécessaires à l'analyse des résultats	16
a. Indicateur de performance de production	16
b. Indicateur de l'impact environnemental	17
c. Indicateur de performance économique	18
2. Tester la mise en œuvre de la méthode APPI-N par les agriculteurs.....	18
2.1. Support utilisé pour la mise en œuvre de la méthode APPI-N en conditions réelles	19
2.2. Méthode d'évaluation de l'appropriation de la méthode APPI-N par les agriculteurs....	19
III. Résultats et interprétations	20
1. Résultats et analyses de la performance de production.....	20
1.1. Essai sur sol argilo-calcaire superficiel	20
a. Présentation des plans de fumure azotée.....	20
Modalité S1 : méthode du bilan	20
Modalité S2 – méthode APPI-N	21
Modalité S3 – méthode CHN.....	21
b. Présentation des résultats de récolte.....	22
Résultats des rendements	22
Résultats des taux de protéines	23
1.2. Essai sur sol argileux lourd.....	23
a. Présentation des plans de fumure azotée.....	23
Modalité S1 – méthode du bilan	24
Modalité S2 – méthode APPI-N	24
Modalité S3 – méthode CHN.....	24
b. Présentation des résultats de récolte.....	25
Résultats des rendements	25
Résultats des taux de protéines	26
2. Résultats et analyses de l'impact environnemental.....	27
3. Résultats et analyses de la performance économique	28
4. Appropriation de la méthode APPI-N par les agriculteurs	29
4.1. Réactions engendrées par l'application de la méthode APPI-N sur l'agriculteur A	29
4.2. Réactions engendrées par l'application de la méthode APPI-N sur l'agriculteur B.....	30
IV. Limites de l'étude et réflexions sur le travail réalisé	31
1. Limites et réflexions sur le travail expérimental.....	31
1.1. Limites de la méthode APPI-N.....	31
1.2. Limites de la méthode CHN	31

1.3. Limites autour des outils d'estimation de l'INN	31
1.4. Réflexions sur la démarche de travail.....	32
2. Limites et réflexions sur le travail avec les agriculteurs	32
3. Perspectives de travail.....	32
Conclusion	33
Bibliographie.....	
Annexes.....	

Table des figures

Figure 1 : Pourcentage total de biomasse et d'azote absorbé à différents stades de croissance du blé (Brown et al, 2005)	2
Figure 2 : Cycle biogéochimique de l'azote et pertes vers l'environnement (Genermont et Cellier, 2016)	4
Figure 3 : Effet de carences temporaires sur le rendement d'un blé variété SOISSONS sur 2 années (Jeuffroy et Bouchard, 1999)	10
Figure 4 : Représentation de la trajectoire d'INN seuil en fonction des stades du blé (Ravier, 2017)	10
Figure 5 : Représentation de la démarche méthodologique du travail de stage.....	12
Figure 6 : Plan du dispositif expérimental des essais.....	13
Figure 7 : Abaque support pour l'application de la méthode APPI-N dans les départements du Cher, de l'Indre et de l'Indre-et-Loire	15
Figure 8 : Sortie du modèle CHN, support de l'application de la méthode CHN	16
Figure 9 : Relevés pluviométriques de la station à proximité de l'essai de Senneçay (Sencrop – station de Louy)	21
Figure 10 : Rendement aux normes en fonction des modalités pour l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel.....	22
Figure 11 : Nombre d'épis par m ² en fonction des modalités pour l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel.....	22
Figure 12 : Nombre de grains par m ² en fonction des modalités pour l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel.....	22
Figure 13 : Teneur en protéines en fonction des modalités pour l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel.....	23
Figure 14 : Relevés pluviométriques de la station à proximité de l'essai de Laverdines (Sencrop – station de Villequiers)	24
Figure 15 : Rendement aux normes en fonction des modalités pour l'essai sur sol argileux lourd...	25

Figure 16 : Nombre d'épis par m ² en fonction des modalités pour l'essai sur sol argileux lourd	25
Figure 17 : Nombre de grains par m ² en fonction des modalités pour l'essai sur sol argileux lourd	25
Figure 18 : Teneur en protéines en fonction des modalités pour l'essai sur sol argileux lourd.....	26
Figure 19 : Rendements moyens obtenus sur les deux années d'essais pour les modalités « agriculteurs » et « APPI-N »	29
Figure 20 : Teneurs en protéines obtenues sur les deux années d'essais pour les modalités « agriculteur » et « APPI-N ».....	29
Figure 21 : Trajectoires d'INN réels et d'INN estimés par l'outil N-Tester® au cours du cycle cultural	31
Figure 22 : Trajectoires d'INN réels et d'INN estimés par le modèle CHN au cours du cycle cultural	32

Table des tableaux

Tableau 1 : Valeurs utilisées pour le calcul des marges brutes dégagées par chacune des trois modalités	18
Tableau 2 : Notations à réaliser par les agriculteurs au sujet de la bande APPI-N.....	19
Tableau 3 : Fractionnement et doses des apports d'azote réalisés sur l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel.....	20
Tableau 4 : Fractionnement et doses des apports d'azote réalisés sur l'essai sur sol argileux lourd	23
Tableau 5 : Coefficient Apparent d'Utilisation (CAU) des engrais, calculés dans chaque essai pour les modalités S1, S2 et S3	27
Tableau 6 : Calculs des marges brutes dégagées par les modalités S1, S2 et S3 pour l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel.....	28
Tableau 7 : Calculs des marges brutes dégagées par les modalités S1, S2 et S3 pour l'essai sur sol argileux lourd	28

Liste des abréviations

APPI-N : Apprendre à piloter l'azote

CAU : Coefficient Apparent d'Utilisation

CHN : Carbon, H₂O, Nitrogen

CUMA : Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole

FDGEDA : Fédération Départementale des Groupes d'Etudes et Développement Agricole

GREN : Groupes Régionaux d'Expertise Nitrate

Ha : hectare

HNT : Hydro-N-Tester

INN : Indice de Nutrition Azotée

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

Kg : kilogramme

M : mètre

M² : mètre carré

N : azote

Nb : nombre

NH₃ : ammoniac

NH₄⁺ : ammonium

NO₃⁻ : nitrate

OAD : Outils d'Aide à la Décision

PEI : Partenariat Européen pour l'Innovation

PMG : Poids de Mille Grains

Q : quintal

Rdt : rendement

R&D : Recherche et Développement

RSH : Reliquat Sortie Hiver

SOLINAZO : SOLutions INnovantes pour une gestion de l'AZOte dans les systèmes de cultures

U : unité

Introduction

La fertilisation azotée des grandes cultures est une thématique très largement discutée et étudiée dans le monde de l'agronomie. Les enjeux économiques et environnementaux, auxquels elle est rattachée, en font un enjeu majeur de l'activité agricole. Les nombreuses recherches sur ce sujet s'expliquent également par l'importance colossale de l'azote dans le développement des plantes et en particulier des céréales (Burt, 1991). L'espèce céréalière servant fréquemment de support aux recherches sur la fertilisation azotée est la culture de blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum*). En effet, de nombreuses connaissances sont disponibles sur cette culture et elle représente une part importante des surfaces cultivées (70% de la sole de céréales d'hiver) (Agreste, 2020) (Boiffin et al, 1981). De plus, c'est sur cette culture emblématique qu'a été conçu le raisonnement de la fertilisation azotée.

Depuis les années 1960, la gestion de la fertilisation azotée évolue dans le but de satisfaire la demande du marché et par conséquent la rémunération des agriculteurs, tout en limitant les pertes d'azote vers l'environnement. C'est en partant de cet objectif que s'est axé le travail de thèse de Clémence Ravier. En effet, après avoir justifié l'intérêt de renouveler le paradigme du raisonnement de la fertilisation azotée appliqué actuellement (méthode du bilan prévisionnel) et en s'appuyant sur un panel de connaissances plus large, Ravier (2017) propose un raisonnement de la fertilisation innovant. En quelques mots, ce raisonnement repose sur un pilotage intégral au cours du cycle cultural dans le but de se caler sur des besoins azotés réels et non prévisionnels. A partir de ce raisonnement innovant, deux méthodes ont été développées : la méthode APPI-N par l'INRAE et la méthode CHN par ARVALIS-Institut du végétal. Les méthodes diffèrent dans les outils mobilisés et les règles de décision.

C'est dans l'objectif de répondre aux problématiques de qualité des céréales et de gestion de l'azote dans les systèmes de cultures, que le projet SOLINAZO a vu le jour en 2017. Ce projet entre dans le cadre des Partenariats Européens pour l'Innovation (PEI). Les PEI sont guidés par la volonté d'accélérer l'innovation et de faciliter le transfert de connaissances. Les thématiques abordées sont diverses et parmi elles il est possible de citer la durabilité des systèmes de productions, le changement climatique ou encore l'usage du numérique (Réseau rural, sd). Le projet SOLINAZO a pour but de tester et valider les méthodes APPI-N et CHN en vue d'une potentielle diffusion aux acteurs concernés en tant qu'alternatives à la méthode du bilan prévisionnel. Le projet est porté par la Chambre régionale d'Agriculture Centre-Val-de-Loire et les nombreux partenaires assurent l'obtention de résultats représentatifs des différentes situations agricoles de la région. Parmi les partenaires se trouvent des chambres départementales d'agriculture, des organismes stockeurs et organismes techniques dont la FDGEDA du Cher. Le stage de fin d'études a été réalisé au sein de la FDGEDA du Cher, association à but non lucratif (loi 1901) dont la vocation est d'accompagner, de conseiller et d'aider ses adhérents dans la gestion et l'optimisation de leur exploitation agricole. En tant que partenaire du projet SOLINAZO, la FDGEDA du Cher a pour responsabilité le suivi d'essais au champ ainsi que le suivi et l'accompagnement d'agriculteurs testant une des deux méthodes sur leur exploitation. Par ces actions, les partenaires évaluent les possibilités de développement des méthodes APPI-N et CHN.

Le travail réalisé durant le stage a donc pour objectif d'apporter des éléments de réponse à la question suivante :

Les méthodes APPI-N et CHN peuvent-elles constituer des alternatives à la méthode du bilan prévisionnel ?

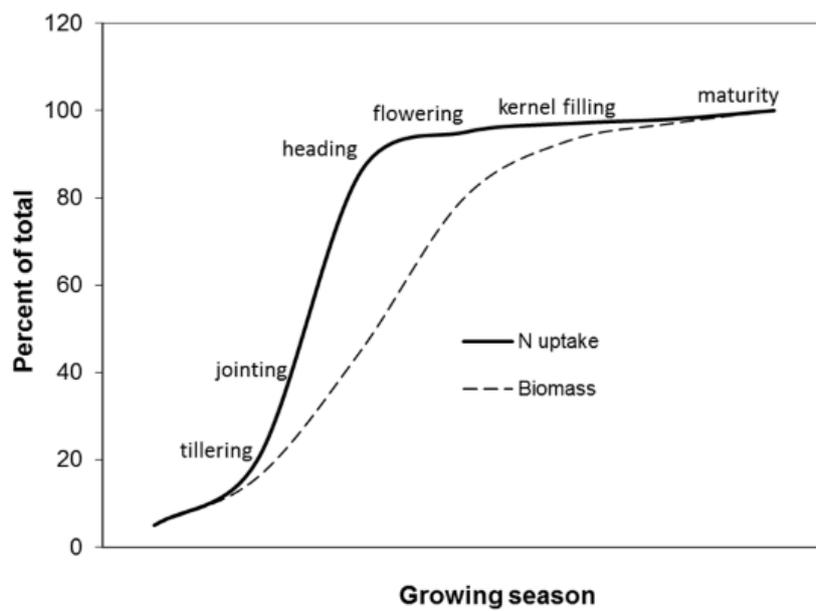


Figure 1 : Pourcentage total de biomasse et d'azote absorbé à différents stades de croissance du blé (Brown et al, 2005)

La démarche mise en œuvre pour répondre à la problématique repose sur un travail expérimental (mise en place et suivi d'essais, analyse de résultats) et un travail en conditions réelles avec des agriculteurs pour évaluer le potentiel de diffusion d'une des deux méthodes.

Dans ce mémoire, une première partie est consacrée à la présentation et l'analyse des enjeux existants autour de la gestion de la fertilisation azotée dans les systèmes de cultures. Cette partie a pour objectif de cerner et comprendre les intérêts de l'étude réalisée. Ensuite, la présentation de la démarche de travail et des matériels et méthodes utilisés renseigne sur les résultats à disposition et la manière dont ils ont été obtenus. L'analyse des résultats est présentée dans une troisième partie et apporte des réponses dans les catégories suivantes : production, environnement, économie, appropriation d'une nouvelle méthode. Enfin, la dernière partie du mémoire vise à prendre du recul d'une part sur les résultats et d'autre part, sur la méthodologie de travail. Les éléments de conclusion aborderont le potentiel développement de ces méthodes et de diffusion aux agriculteurs.

I. Contexte et enjeux autour de la gestion de l'azote dans les systèmes de cultures

1. Evaluation de l'importance de l'azote dans les systèmes de cultures

1.1. L'azote est indispensable au développement des plantes

a. Rôle de l'azote

Bien que l'azote ne représente que quelques pourcents de la matière sèche totale d'une plante, il exerce une action essentielle sur la nutrition carbonée et donc sur la croissance. En effet, l'azote joue un rôle essentiel dans la composition de la matière vivante. Il intervient dans la constitution de l'information génétique (c'est le principal constituant des acides aminés et nucléiques) ainsi que dans la synthèse protéique (enzymes, chlorophylle). En tant que composant de la chlorophylle, l'azote joue un rôle crucial dans la photosynthèse. De plus, l'azote absorbé par la plante entre dans la composition des molécules contribuant à la structure des tissus et au transfert d'autres molécules. Les molécules qui ont une fonction de stockage des réserves sont elles aussi composées d'azote (Gate, 1995).

L'importance de l'azote dans la croissance des végétaux est d'autant plus grande lorsqu'il existe un objectif de production tant sur le plan quantitatif que qualitatif. Pour la culture de blé, l'azote est reconnu comme étant le facteur le plus important pour l'obtention d'un fort rendement avec un taux de protéines dans les grains acceptable (Orloff et al, 2012). Les espèces de grandes cultures et en particulier les céréales sont en effet les plantes les plus consommatrices d'azote (Burt, 1991). Cela peut s'expliquer par la relation proportionnelle entre l'estimation des besoins azotés et l'objectif de production (Jeuffroy et al, 2013).

b. Dynamique d'absorption de l'azote par une culture de blé

Les travaux de Coïc (1956) ont montré un besoin total d'environ 3 kilogrammes (kg) d'azote par quintal (q) de grains produits pour la culture de blé tendre. Cette valeur est néanmoins modulable en fonction de la date et de la densité de semis (Meynard, 1985). Les besoins azotés et par conséquent les absorptions par les plantes varient au cours du cycle cultural. En effet, l'absorption d'azote est liée au développement physiologique de la plante et augmente avec la production de biomasse (Limaux, 1999). Jusqu'au stade Epi 1 cm les besoins du blé tendre d'hiver, bien que fonction du nombre de talles émises, sont inférieurs à 50 kg d'azote par hectare (50 kgN/ha) (Chambre d'Agriculture Ariège, s.d). A la sortie de l'hiver, la reprise de végétation entraîne des besoins en azote importants entre 100 et 170 kgN/ha (Brown et al, 2005). Ces tendances sont observables sur la Figure 1, présentant le pourcentage d'azote absorbé par un plant de blé en fonction des stades de développement (Brown et al, 2005). La quasi-totalité (90%) de l'absorption d'azote s'effectue avant

la floraison. En ce qui concerne la répartition de l'azote dans la plante, environ 80% de l'azote total absorbé est stocké dans les parties aériennes (Gate, 1995).

L'azote accumulé, avant la floraison, dans les parties végétatives est remobilisé en fin de cycle, vers les grains et assure leur teneur en protéines (Jeuffroy et al, 2013). En moyenne, entre 65 et 92% de l'azote total des grains proviennent de l'absorption pré floraison (Van Sanford et Mackown, 1987). L'azote est véhiculé vers le grain sous forme d'acides aminés dont la principale source est la RUBISCO, enzyme clé du métabolisme carboné. Le transport de l'azote passe alors obligatoirement par une dégradation de cette enzyme, entraînant la sénescence des feuilles (Gate, 1995). Les acides aminés subissent ensuite des modifications biochimiques puis sont assemblés sous forme de protéines de réserve du grain (Bénétrix et Autran, 1997). L'azote absorbé après la floraison (environ 10% de l'azote total absorbé sur la Figure 1) sert à augmenter ce taux de protéines des grains (Austin et al 1977). Un taux de protéines important assure des qualités technologiques indispensables dans le processus de panification par exemple (Bénétrix et Autran, 1997).

c. Efficience d'utilisation de l'azote par les plantes

Malgré des besoins en azote importants, l'efficience d'utilisation de l'azote par les cultures est faible voire très faible pour les céréales car de l'ordre de 33% (Raun et Johnson, 1999). L'indicateur d'efficience le plus connu est dénommé *Nitrogen Use Efficiency* (NUE) et est calculé sur la base d'un ratio entre la quantité d'azote exportée par les produits de la culture et la quantité d'azote apportée (Oenema et al, 2015). L'efficience d'utilisation de l'azote correspond d'une part à l'efficience d'absorption de l'azote apporté à la plante et d'autre part à l'efficience de transformation de l'azote absorbé par la plante. Les indicateurs utilisés pour évaluer l'efficience de transformation de l'azote absorbé sont le rendement et la teneur en protéines des grains. Pour ce critère, l'effet de la variété de blé a été plusieurs fois confirmé (Le Souder et Bernicot, 1992). En ce qui concerne l'efficience d'utilisation de l'azote apporté, celui-ci est mesuré à l'aide du Coefficient Apparent d'Utilisation (CAU) pour le fertilisant choisi. Le CAU correspond à la fraction de l'azote total d'un fertilisant absorbée par la plante. Les travaux de Limaux (1994) montrent que le CAU dépend du stade de développement de la culture au moment de l'apport d'azote. En observant une meilleure valorisation du second apport réalisé début montaison par rapport au premier effectué à la reprise de végétation sortie hiver, il démontre une augmentation du CAU avec la date d'apport. Il explique ce phénomène par l'augmentation de la capacité d'absorption des plantes et l'augmentation de leurs besoins au cours du cycle cultural.

La faible efficience d'utilisation de l'azote par les plantes est en partie à l'origine des nombreux rejets vers l'environnement couplés à des pertes économiques pour les agriculteurs.

1.2. Les pertes d'azote sont à l'origine de nuisances environnementales

Parallèlement à l'augmentation de la population mondiale et par conséquent la croissance de la production agricole, une augmentation de la consommation d'engrais a été observée. Une étude, financée par le Ministère de l'Agriculture et réalisée par le GCL Développement Durable en 2010, a pointé une augmentation de la consommation mondiale d'engrais de 40% entre 1980 et 2008. Plus de la moitié de cette augmentation (60%) est due à la consommation croissante d'engrais azotés. De plus, au niveau mondial, la consommation d'engrais azotés représente 60% de la consommation d'engrais (tout élément nutritif confondu), suivie par la consommation d'engrais phosphatés (25%) et potassiques (15%) (GCL Développement Durable, 2010).

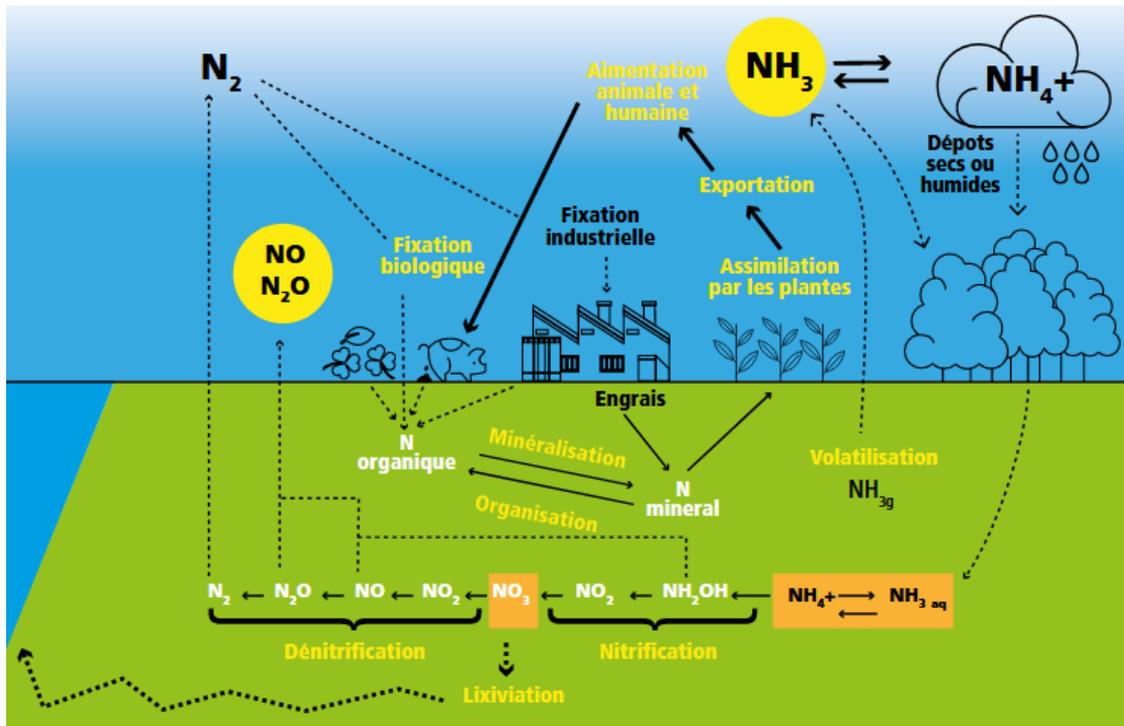


Figure 2 : Cycle biogéochimique de l'azote et pertes vers l'environnement (Genermont et Cellier, 2016)

Les travaux sur la gestion de la fertilisation azotée perdurent car l'azote mis à disposition pour les cultures n'est pas entièrement utilisé et les pertes sont à l'origine des nuisances environnementales. A titre d'exemple, en France, le surplus brut annuel moyen pour la période 2012-2016 s'élève à 42 kgN par hectare. Cette valeur est issue du bilan azoté réalisé entre les apports (fertilisants, déjections, fixation par les légumineuses, déposition atmosphérique) et les exports (cultures récoltées, productions fourragères). Une part du surplus étant émise dans l'atmosphère par volatilisation (21 kgN/ha), le surplus net réellement apporté au sol pour la période 2012-2016 est de 21 kgN/ha soit, 14% des apports (Agreste, Graph'Agri 2019).

La pollution azotée touche plusieurs milieux et les formes d'azote responsables sont différentes. La Figure 2 permet de faire un point sur le cycle de l'azote et servira de support pour faire le lien avec les pollutions engendrées.

a. Pollution des eaux

Les sols cultivés contiennent entre 3 et 5 tonnes (t) d'azote total par hectare, majoritairement sous forme organique. En plus de l'azote organique, de l'azote minéral (à savoir quelques dizaines de kg/ha en dehors des périodes d'apports azotés) se trouve également dans les sols cultivés. Les processus de minéralisation et organisation brutes (ou immobilisation) permettent le passage de l'un à l'autre (Recous et al, 1997). La minéralisation brute correspond à la dégradation de matières organiques par la microfaune et microflore du sol suivie d'une décomposition par la biomasse microbienne, d'une transformation en formes organiques stables à long ou moyen terme (humus) puis en azote minéral. Ce processus se réalise en conditions aérobies et anaérobies avec tout de même un optimum en aérobie (Genermont et Cellier, 2016). L'organisation, conversion d'azote minéral en azote organique, passe par une assimilation de l'azote minéral par des micro-organismes très diversifiés du sol (Recous et al, 1997). Seules les formes minérales nitrique (ions NO_3^-) et ammoniacale (ions NH_4^+) sont assimilables par les plantes, avec une absorption très majoritaire de la forme nitrique. Les nitrates (NO_3^-) sont également sources de pollution des aquifères souterrains et de surface (eutrophisation) à la suite de leur lixiviation depuis l'horizon de surface (Germon, 2013). C'est par ce processus, qu'à partir de 1970, les concentrations en nitrates dans les eaux ont augmenté y compris dans les eaux de captage utilisées pour l'alimentation. Afin de réduire l'impact agricole sur cette contamination, la directive n°91/676/CEE, plus connue sous le nom de directive nitrates, a été mise en place en 1991 (Sogreah-MEEDDTL, 2011). Il a également été montré qu'une consommation d'eau trop concentrée en nitrates fait courir des risques sur la santé humaine. En effet, avec la transformation dans l'organisme des nitrates en nitrites, il existe un risque de méthémoglobinémie chez le nourrisson et un risque cancérigène chez l'adulte (Davezac et al, 2008). L'existence de ce risque est à l'origine du décret 2001-1220 obligeant à limiter la concentration en nitrates dans les eaux à 50 mg/L (recommandation de l'OMS) (Afssa, 2004).

Toutefois, la responsabilité des nitrates dans le phénomène d'eutrophisation (accumulation de nutriments) a été remise en cause. L'eutrophisation se caractérise par une croissance excessive de plantes et d'algues dont les cyanobactéries (*Cyanobacteria*). La prolifération de cyanobactéries est un problème car certaines produisent des toxines (cyanotoxines) qui, lorsqu'elles sont trop abondantes dans un plan d'eau, peuvent occasionner des nuisances écologiques et nuire à la santé des usagers (Barroin, 2003). Pour Barroin (2003), c'est l'application incorrecte du concept de facteur limitant qui amène à considérer la pollution azotée comme première responsable de la prolifération de cyanobactéries. Il rappelle qu'en conditions naturelles l'azote est plus abondant que le phosphore et donc ne limite pas la croissance des végétaux aquatiques. Le phosphore est alors le facteur limitant. Or, la pollution par les phosphates fait perdre au phosphore ce statut de facteur limitant au profit de l'azote. De fait, les organismes capables de fixer de l'azote, sont favorisés dont les cyanobactéries

qui fixent l'azote moléculaire dissous dans l'eau (Barroin, 2003). A partir de ces informations, Barroin (2003) conclut que pour remédier au phénomène d'eutrophisation, le phosphore doit constituer le facteur de maîtrise.

b. Pollutions atmosphériques

Chargé positivement, l'azote ammoniacal ou ammonium (NH_4^+) est fixé au complexe argilo-humique du sol (Filion, 2017). Ainsi, l'ammonium est, à l'inverse des nitrates, peu mobile ce qui limite le risque de lixiviation. Lorsque les conditions sont favorables (aérobie, $6.9 < \text{pH} < 9$, $20^\circ\text{C} < \text{température du sol} < 36^\circ\text{C}$), l'ammonium est oxydé en nitrate par des bactéries spécifiques (*Nitrosomas* et *Nitrobacter*), c'est la nitrification (Recous et al, 1997). L'ammonium peut également passer sous sa forme gazeuse NH_3 (ammoniac), immédiatement volatilisé dans l'atmosphère (si libéré en surface) et source de pollution atmosphérique (Comifer, 2013a). Les retombées d'ammoniac, sur le sol, sous formes sèches ou humides contribuent aussi à l'eutrophisation mais surtout à l'acidification, impactant ainsi la qualité des sols (Sharma et Bali, 2017).

D'autres formes d'azote sont responsables de la pollution atmosphérique, ce qui explique les 20% d'émissions de gaz à effet de serre (GES) en France métropolitaine en provenance du secteur agricole (Pellerin et al, 2014). Le processus de dénitrification, réduction des nitrates en diazote (N_2), est à l'origine de nombreuses émissions d'azote vers l'atmosphère. Cette réduction par des bactéries et champignons du sol s'effectue en conditions anaérobies et lorsque le pH est compris entre 6 et 8. Elle nécessite un passage par des formes d'azote intermédiaires tels que les oxydes d'azote gazeux (NO) et le protoxyde d'azote (N_2O). Ces produits intermédiaires sont émis dans l'atmosphère si la dénitrification n'est pas totale (Genermont et Cellier, 2016). Le N_2O , également émis lors du processus de nitrification en tant que produit secondaire, est l'un des 3 principaux GES et est impliqué dans la destruction de la couche d'ozone (Cellier et al, 2013 ; Germon, 2013). Les émissions de NO contribuent quant à elles aux pluies acides et seraient, avec les émissions d' NH_3 , responsables d'une réduction de 10% de la biodiversité des forêts sur 2/3 de l'Europe (Germon, 2013 ; Sutton et al, 2011). Dans le cas d'une dénitrification totale, le diazote (N_2) ainsi obtenu sera émis dans l'atmosphère et pourra être transformé en azote organique par fixation libre et fixation symbiotique (Recous, 1997).

Il est néanmoins important de souligner que la fertilisation azotée n'est pas responsable à elle seule des nuisances environnementales causées par le secteur agricole. Les quantités importantes d'azote excrétées par les animaux font de l'élevage une source de pollution à ne pas négliger. Par exemple, 80% des émissions d' NH_3 proviennent de l'élevage (Peyraud et al, 2012).

Dans un objectif de combiner qualité et quantité d'une culture pour répondre à la demande du marché, tout en limitant les impacts sur l'environnement, la fertilisation azotée doit être raisonnée.

2. La fertilisation azotée est raisonnée par la méthode du bilan prévisionnel

2.1. Proposition d'une méthode pour rationaliser les apports d'azote par Hébert (1969)

Les objectifs de production agricole qui ont suivis la 2^{nde} Guerre Mondiale ont entraîné l'utilisation d'engrais azotés de synthèse de façon excessive et non raisonnée car alors sans conseil de limitation et d'identification des risques. Le choc pétrolier de 1973, associé à une augmentation des coûts du carburant et des engrais de synthèse, a permis une prise de conscience de la dépendance de l'agriculture française à ces deux derniers (Reau et al, 2017). A cette prise de conscience s'ajoute celle des impacts environnementaux causés par l'azote, des suites du rapport Hénin de 1980 (Hénin, 1980). La gestion et le raisonnement de la fertilisation azotée semble alors indispensable. C'est dans cet élan que les experts se penchent sur une méthode introduite par Hébert en 1969 qui, dans le contexte de l'époque, est passée inaperçue. Cette méthode, connue sous le nom de « Méthode du bilan prévisionnel », incite la rationalisation des apports d'azote pour la culture de blé (Hébert, 1969).

Lors de sa parution dans le Bulletin Technique de l'Information en 1969, la méthode du bilan est présentée par l'équation suivante :

$$X = Pf + Rf - Ri - Mr - Mn$$

Avec,

X : dose prévisionnelle d'azote à apporter au cours du cycle cultural

Pf : besoins azotés de la culture issus du produit entre l'objectif de rendement et le besoin unitaire en azote de la culture (x kg d'N/q de grains produits)

Rf : azote minéral présent dans le sol à la fermeture du bilan (après la récolte)

Ri : azote minéral présent dans le sol à l'ouverture du bilan (souvent sortie hiver) : Reliquat Sortie Hiver (RSH)

Mr : azote minéral issu de la minéralisation des résidus de la culture précédente

Mn : azote minéral issu de la minéralisation nette de l'azote organique présent dans l'humus. La minéralisation nette correspond à la différence entre la minéralisation brute et l'organisation (Valé, 2006)

Bien que communément apportée en une seule fois au stade tallage du blé, la dose d'azote peut être fractionnée. Avant Hébert (1969), Coïc (1956) démontre qu'un fractionnement de la dose d'azote entre le stade tallage et le stade floraison assure à la fois un haut rendement et un haut taux en protéines dans les grains. Préconisation similaire de la part d'Hébert (1969) qui, avec un objectif centré seulement sur les rendements, suggère quant à lui un fractionnement entre le tallage et le début de la montaison.

2.2. Vulgarisation de la méthode du bilan par l'ITCF (1978)

Cette méthode est vulgarisée en 1978 par l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF, ancien nom d'ARVALIS-Institut du végétal) après quelques ajustements. Les évolutions portent, d'une part, sur une meilleure évaluation de la quantité d'azote fournie par le sol en prenant en compte d'éventuels anciens retournements de prairies et apports d'engrais organiques. D'autre part, des tables de références sont disponibles et permettent une meilleure estimation de certains postes de l'équation. Enfin, les règles de fractionnement de la dose d'azote à apporter se précisent avec comme référence pour le 2nd apport, le stade Epi 1 cm. Une conduite en 3 apports commence à être abordée pour éviter les apports supérieurs à 100 kgN/ha et améliorer, par un apport tardif, les teneurs en protéines des grains (ITCF, 1978).

2.3. Officialisation de la méthode du bilan par le Comifer (1980)

La méthode du bilan devient officielle lors de sa diffusion par le Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée (Comifer) créé en 1980. La création de ce comité a initié les échanges et concertations entre les divers acteurs de la fertilisation raisonnée. Ces échanges contribuent au développement et à l'amélioration des pratiques de fertilisation notamment par la diffusion de valeurs de référence (ie valeurs standards propres à un contexte) et de méthodes validées par les experts. De nombreux travaux ont contribué à détailler les postes de l'équation et à améliorer leur estimation. Ainsi, après plusieurs mises à jour de l'équation illustrant le raisonnement de la méthode du bilan prévisionnel, la dernière en date est présentée par le Comifer (2013b). L'équation est la suivante* :

$$X = Pf + Rf + lx + Gx + L - Pi - Ri - Mh - Mhp - Mr - MrCi - Mpro1 - Mpro2 - A - Nirr - Xpro$$

*A noter cependant que les pertes azotées du sol par voies gazeuses (Gs), la fixation non symbiotique (Fns) et symbiotique (Fs) d'azote atmosphérique ne sont pas représentées dans cette équation. En effet, pour simplifier

l'équation Gs et Fns sont considérées comme des phénomènes de faible ampleur et du même ordre de grandeur d'où Gs=Fns et la méthode du bilan s'appliquant le plus souvent aux cultures non-légumineuses, Fs est considérée comme nulle (Fs=0) (Comifer, 2013b).

Avec,

X : dose prévisionnelle d'azote à apporter au cours du cycle cultural

Pf : besoins azotés de la culture issus du produit entre l'objectif de rendement et le besoin unitaire en azote de la culture (x kgN /q de grains produit). Le besoin unitaire varie en fonction de la variété de blé tendre mais reste compris en 2.8 et 3.2 kgN/q de grains produits. Les travaux d'ARVALIS-Institut du végétal ont également permis de définir un besoin qualité (bq) en azote par variété, visant à obtenir un taux en protéines d'au moins 11.5% sans compromettre l'objectif de rendement (ARVALIS-Institut du végétal, 2020a). En ce qui concerne l'objectif de rendement, il est règlementé dans les zones dites vulnérables, définies à la suite de la directive nitrates. Cette règlementation concerne la majorité de la Surface Agricole Utilisée (SAU) française car 68% de celle-ci est qualifiée de zones vulnérables (Office International de l'Eau, 2016). L'objectif de rendement correspond à la moyenne des rendements réalisés sur l'exploitation lors des 5 dernières années pour la culture ou prairie concernées, en excluant la valeur maximale et minimale (Ministère de l'Ecologie, 2011). Ce point sera discuté dans une partie suivante (3.1. Les limites de la méthode du bilan prévisionnel).

Rf : azote minéral présent dans le sol à la fermeture du bilan (après la récolte)

Ix : part de l'azote minéral apporté perdue par organisation microbienne

Gx : part de l'azote minéral apporté perdue par voie gazeuse

L : azote perdu par lixiviation, estimable par exemple avec le modèle LIXIM (Mary et al, 1999)

Pi : azote absorbé par la culture avant l'ouverture du bilan (sortie hiver)

Ri : Reliquat Sortie Hiver dont l'estimation par une analyse de sol est à privilégier

Mh : azote minéral issu de la minéralisation nette de l'azote organique présent dans l'humus

Mhp : azote minéral issu de la minéralisation nette à la suite d'un retournement de prairie

Mr : azote minéral issu de la minéralisation nette des résidus de la culture précédente

MrCi : azote minéral issu de la minéralisation nette des résidus de la culture intermédiaire

Mpro1 / 2 : azote minéral issu de la minéralisation nette de l'azote organique d'un Produit Résiduaire Organique (PRO) apporté avant l'ouverture du bilan / après l'ouverture du bilan

A : azote contenu dans les dépôts atmosphériques

Nirr : azote contenu dans l'eau d'irrigation

Xpro : azote minéral apporté par un PRO après l'ouverture du bilan

Les postes de l'équation relatifs à une minéralisation sont ceux ayant suscité le plus d'intérêt dans la recherche et sont à l'origine de plusieurs modèles, comme par exemple le modèle STICS pour la minéralisation des résidus de cultures précédente et intermédiaire. Un modèle est une simulation informatique d'un système pour améliorer sa compréhension et prédire son comportement (Affholder, 2001). Les nombreux travaux ont apporté une meilleure connaissance des déterminants de la minéralisation nette de l'azote des matières organiques, permettant d'établir des simulations de dynamique de minéralisation (Nicolardot et al, 2001). Ces avancées ont notamment contribué à

l'élaboration d'outils d'aide à la décision (OAD) parmi lesquels il est possible de citer AzoFert®. Ce logiciel, basé sur le formalisme de la méthode du bilan prévisionnel établi par le Comifer et la simulation des fournitures en azote, calcule automatiquement la fertilisation azotée d'une culture à l'échelle de la parcelle et du cycle de culture (Machet et Dubrulle, 2009).

Le concept de bilan prévisionnel de l'azote minéral du sol d'Hébert (1969) s'est progressivement imposé comme l'unique méthode de raisonnement de la fertilisation azotée en France mais aussi aux Etats-Unis, en Belgique ou encore aux Pays-Bas (Limaux, 1999). Aux Etats-Unis, le principe de calcul des besoins en azote est effectivement similaire à celui utilisé dans la méthode du bilan avec la prise en compte d'un objectif de rendement. La principale différence avec ce qui se fait en France réside dans l'application de la méthode. Le fractionnement est bien différent car 75% de l'azote total est apporté avant le semis (Shanahan et al, 2008). Dans leur publication, Shanahan et al (2008) remettent en cause cette logique d'apport qui selon eux ne coïncide pas avec les besoins des cultures et est à l'origine des faibles NUE calculés. En Chine, aucune limitation de fertilisation n'est imposée par le gouvernement ce qui amène à des apports totaux pouvant aller jusqu'à 600 kgN/ha par an dans les systèmes intensifs blé-maïs (Cui et al, 2010). De même qu'aux Etats-Unis, une part importante (50%) des apports est effectuée avant le semis, expliquant alors le fait que seuls 25% de l'azote apporté soient utilisés par les plantes, qu'entre 25 et 45% soient accumulés dans le sol et qu'entre 30 et 50% soient perdus dans l'environnement (Cui et al, 2010). Cui et al (2010) pointent également le fait qu'en Chine, les agriculteurs sont très peu accompagnés. Leurs connaissances sur la fertilisation azotée sont acquises de la manière suivante : 30% des informations sont obtenues par le négociant d'engrais, 30% par les contacts avec les agriculteurs voisins, 30% des informations issues de leur expérience personnelle et seulement 10% proviennent de services extérieurs. En conséquence, la plupart des agriculteurs chinois n'ont aucune idée de la quantité appropriée et appliquent une grande quantité d'azote pensant éviter les faibles rendements (Cui et al, 2010).

3. Elaboration d'un raisonnement de la fertilisation azotée innovant

3.1. Les limites de la méthode du bilan prévisionnel

Bien qu'elle ait fait consensus pendant plusieurs années, la méthode du bilan présente certaines limites mises en avant depuis les années 80. Très rapidement, la standardisation des références a été discutée car jugée pertinente uniquement lorsque les conditions du milieu sont similaires à celles dans lesquelles la méthode du bilan a été établie (Meynard, 1985). Les travaux de Boiffin et al (1981) montrent également, à travers des essais en Champagne crayeuse, la nécessité de références techniques régionales. Ce n'est qu'en 2013 lorsque la méthode du bilan devient outil règlementaire de la directive nitrates, que se créent des Groupes Régionaux d'Expertise Nitrate (GREN) en charge d'adapter la méthode à chaque région (Meynard et Jeuffroy, 2019). Les comptes-rendus des GREN mettent en évidence les limites existantes autour de l'objectif de rendement et du reliquat sortie hiver.

Anne Lacroix (1995) avait pointé la difficulté pour les agriculteurs de définir un rendement objectif pertinent, alors bien souvent surestimé par rapport aux rendements obtenus sur l'exploitation les années précédentes (Cerf et Meynard, 1988). A l'inverse, les rendements objectifs ne correspondent pas toujours au rendement maximal permis par les potentialités du milieu pour l'année en question (Ravier, 2017). De plus, l'objectif de rendement est susceptible de varier au cours du développement de la culture à la suite par exemple de facteurs climatiques, apparition de maladies et/ou ravageurs mal contrôlés. Le rendement objectif est défini au début du cycle cultural et par conséquent, ne permet pas d'appréhender ces potentielles variations. Ainsi, chaque année, il existe un risque soit d'appliquer une dose excédentaire conduisant à de potentielles pertes vers l'environnement, soit d'appliquer une dose insuffisante ce qui empêche l'atteinte de l'objectif de rendement. Dans les deux cas, la rentabilité économique de l'agriculteur est handicapée.

Le reliquat sortie hiver pose également question car les mesures effectuées pour l'estimer, se faisant à la tarière, sont plus ou moins faciles en fonction de la présence de cailloux (Meynard et Jeuffroy, 2019). En effet, dans les sols à forte charge en cailloux, les racines pénètrent plus profondément que ce qu'il est possible de faire avec la tarière (Meynard et al, 1997). De plus, la valeur de ce reliquat n'est pas toujours représentative de la diversité des sols d'une exploitation et est souvent sous-estimée (Limaux, 1999).

Faces aux limites de la méthode du bilan prévisionnel et aux problèmes environnementaux encore marqués, plusieurs études ont été initiées et un nouveau raisonnement de la fertilisation azotée a été étudié.

3.2. Le nouveau raisonnement de la fertilisation azotée proposé par Ravier (2017) repose sur des connaissances préexistantes

L'élaboration d'une nouvelle manière de raisonner la fertilisation azotée est présentée dans la thèse de Ravier (2017). Celle-ci est principalement basée sur un suivi régulier de l'état de nutrition azotée de la plante et sur l'acceptation de carences en azote non préjudiciables pour le rendement (Ravier, 2017). Parmi les nouveautés, l'objectif de rendement n'est plus pris en compte et il serait désormais possible de se débarrasser du reliquat sortie hiver. La conception de ce raisonnement mobilise d'anciens travaux, datant pour certains des années 90, mais peu valorisés des suites du consensus autour de la méthode du bilan.

a. Suivi de l'état de nutrition azotée de la culture par l'estimation de l'INN

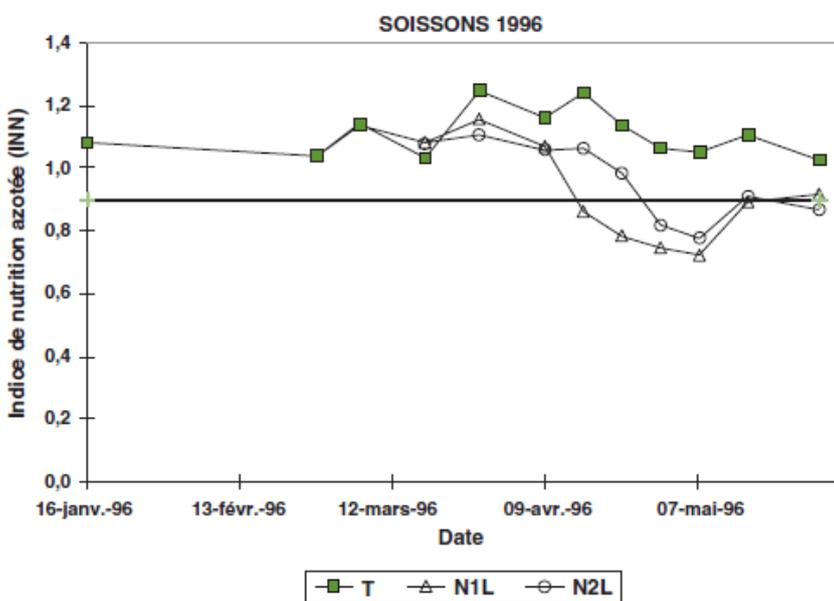
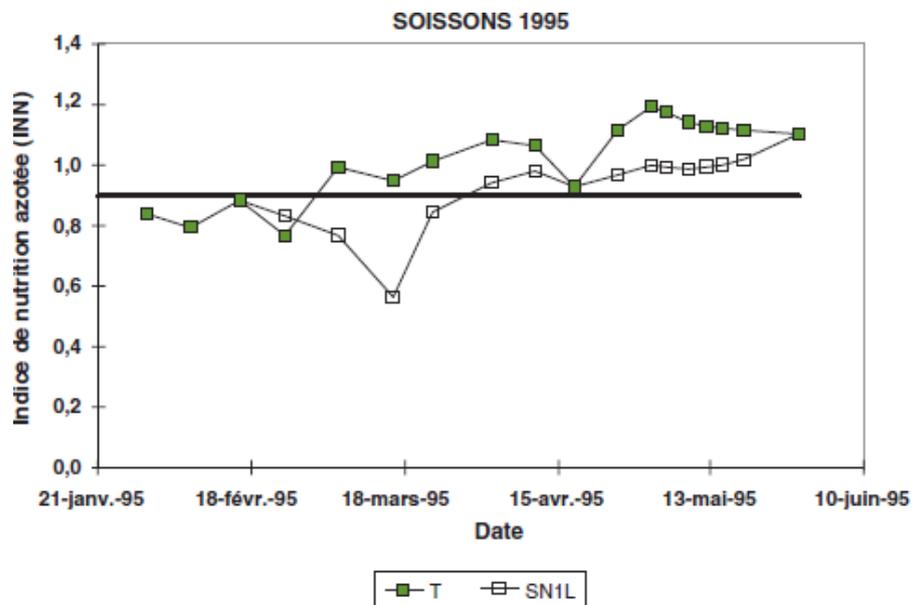
Au cours du développement de la biomasse d'une culture, l'accumulation de carbone entraîne une diminution de la teneur en azote par dilution (Lemaire et Salette, 1984). D'après Gate (1995), cette variation de la teneur en azote résulte de plusieurs causes. D'une part, les protéines synthétisées à la suite de l'absorption d'azote accélèrent la croissance des plantes. D'autre part, la teneur en azote est plus élevée dans les feuilles que dans la tige et est plus importante dans les organes jeunes (Gate, 1995). Conjointement à l'observation de cet effet de dilution, des courbes de dilution ont alors été construites. Justes et al (1994) observent pour la culture de blé une teneur en azote critique des parties aériennes (%Nc), en dessous de laquelle la production de biomasse n'est pas maximale : la plante est en état de carence.

Les différentes mesures permettent de définir des paramètres de modélisation d'une courbe de dilution critique régit par les équations suivantes :

- **%Nc = 4.4 si biomasse aérienne (ba) < 1.55 t/ha** (pour une biomasse aérienne inférieure à 1.55 t/ha, les parties aériennes doivent contenir au minimum 4.4% d'azote pour que la production de biomasse ne soit pas affectée)
- **%Nc = 5.35 * ba^(-0.442) si ba > 1.55 t/ha**

Est alors développée la notion d'Indice de Nutrition Azotée (INN) permettant de caractériser l'état de nutrition d'une culture (Lemaire et Gastal, 1997). L'indicateur utilisé dans la définition de l'INN est la teneur en azote des parties aériennes. En effet, l'INN correspond au ratio entre la teneur en azote des parties aériennes de la plante (%Nobs) et la teneur en azote critique (INN=%Nobs / %Nc). Lorsque l'INN est inférieur à 1, la plante est en état de carence. D'autres indicateurs, corrélés à l'INN, sont représentatifs de l'état de nutrition azotée d'une culture et sont à l'origine d'outils de pilotage pour la fertilisation azotée. L'outil JUBIL®, utilisé en complément de la méthode du bilan, vise à ajuster le dernier apport azoté prévu fin montaison. L'état de nutrition azotée est déterminé par une mesure de la teneur en nitrates dans le jus de base de tige au début du stade montaison (Justes, 1993). La teneur en chlorophylle des feuilles constitue également un bon indicateur de l'état de nutrition de

Rendement 1995
 T : 93.1 q/ha
 SN1L : 98.8 q/ha



Rendement 1996
 T : 109.6 q/ha
 N1L : 106.9 q/ha
 N2L : 107 q/ha

Figure 3 : Effet de carences temporaires sur le rendement d'un blé variété SOISSONS sur 2 années (Jeuffroy et Bouchard, 1999)

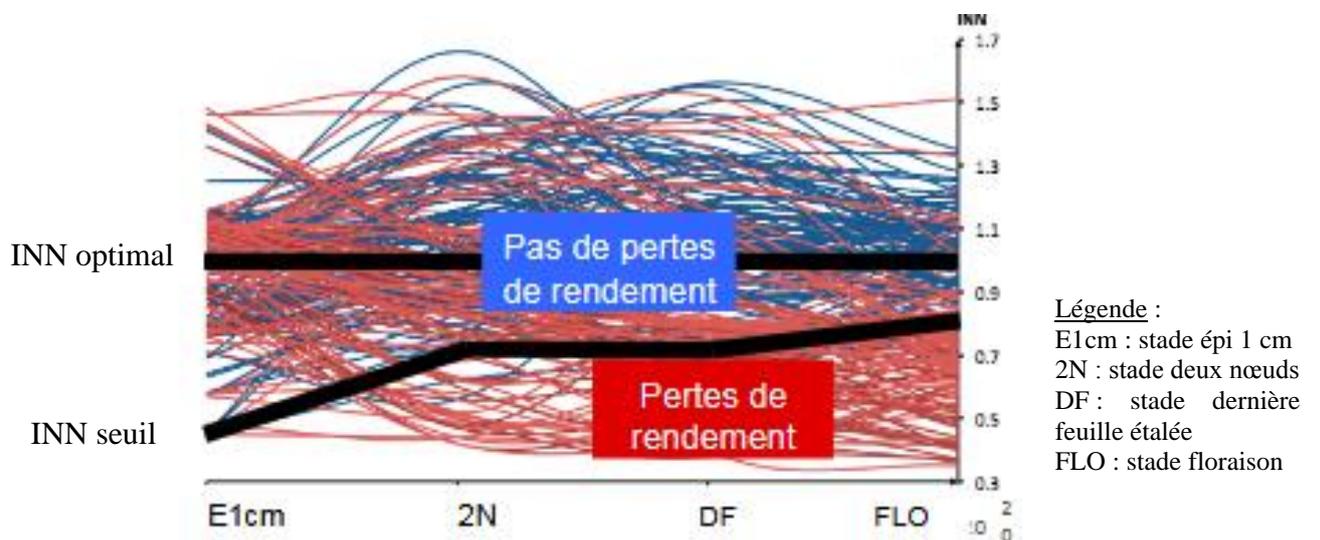


Figure 4 : Représentation de la trajectoire d'INN seuil en fonction des stades du blé (Ravier, 2017)

la culture. Cela s'explique par le fait que l'azote assimilé par la plante est stocké à 80% dans les feuilles sous formes de protéines, localisées à environ 75% dans les chloroplastes. Il existe donc une corrélation entre l'azote contenu dans les feuilles et la quantité de chlorophylle (Gate, 1995). Par exemple, dans les outils de pilotage tels que N-Sensor® et Farmstar®, la teneur en chlorophylle est estimée par réflectance. Il est aussi possible d'estimer la teneur en chlorophylle des feuilles par transmittance comme c'est le cas de l'outil N-Tester® (ARVALIS-Institut du végétal, 2015). Ces outils permettent de détecter l'installation d'une carence en azote et donc, de décider du déclenchement d'un apport et de la dose.

b. Tolérance de carences précoces en azote

La notion de carences en azote tolérées par la culture a également été mobilisée par Ravier (2017) pour l'élaboration du nouveau raisonnement. Cette notion va à l'encontre d'un des principes de la méthode du bilan qui repose sur la nécessité d'une nutrition azotée non limitante pour atteindre des rendements importants (Hébert, 1976). Pourtant, Jeuffroy et Bouchard (1999) montrent qu'une carence précoce en azote n'impacte pas négativement le rendement d'une culture de blé. Plus précisément, tant que l'état de nutrition azotée de la culture retrouve et garde un niveau satisfaisant un mois avant la floraison, une carence antérieure, même longue et intense, ne sera pas préjudiciable pour le rendement et la teneur en protéines (Figure 3). La mise en pratique de cette idée entraîne un 1^{er} apport tardif par rapport à la préconisation de la méthode du bilan. L'engrais sera alors mieux valorisé par la culture (Limaux, 1999). Dans sa thèse, Ravier (2017) évoque également les travaux sur les carences en azote de Sadras et Lemaire (2014), Lemaire et Gastal (2009), David et al (2004), qui ont permis d'affiner le paramétrage des modèles de cultures (Ravier, 2017).

En combinant les notions d'INN et de carences tolérées, les essais mis en place par Ravier (2017) ont permis d'établir une trajectoire d'INN seuil. Cette trajectoire varie selon le stade de la plante et permet d'apprécier la valeur seuil indiquant une perte prévisible de rendement (Figure 4). L'INN optimal, en début de cycle, définie par Ravier (2017) crée volontairement une carence en azote dans le but de maximiser l'efficacité d'utilisation de l'azote des plantes par la suite. L'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote passe également par l'attention particulière portée à la notion de « jours favorables » à l'apport. Cette notion sera détaillée dans la suite du rapport. A travers ses travaux, Ravier (2017) conclut également que l'INN de la culture au stade floraison doit être égal à 0.9 pour que le rendement ne soit pas impacté des suites d'une carence en azote.

c. Développement des méthodes APPI-N et CHN

Les points clés de ce nouveau raisonnement de la fertilisation azotée ont été repris et font l'objet du développement de la méthode APPI-N (pour « apprendre à piloter l'azote ») par l'INRAE et de la méthode CHN (pour Carbon, H₂O, Nitrogen) par ARVALIS-Institut du végétal.

Les méthodes se différencient au niveau du protocole d'application. En effet, la méthode APPI-N nécessite un travail de terrain avec des mesures régulières pour estimer l'INN tandis que la méthode CHN passe uniquement par des simulations du modèle. De plus, dans la méthode APPI-N, l'utilisateur est responsable de la vérification de la pluviométrie tandis que le modèle CHN impose la période d'apport qu'il considère favorable. Davantage de détails sur ces deux méthodes sont fournis dans la partie II. Matériels et méthodes de travail.

4. Une étude visant à évaluer les méthodes APPI-N et CHN en tant qu'alternatives à la méthode du bilan

4.1. Problématique

Les limites de la méthode du bilan et les problèmes environnementaux encore présents prouvent la pertinence de concevoir une manière alternative de raisonner la fertilisation azotée. Les méthodes APPI-N et CHN sont basées sur le raisonnement proposé par Ravier (2017) dans sa thèse mais diffèrent dans leurs applications. L'objectif de l'INRAE et d'ARVALIS-Institut du végétal est d'étendre l'utilisation de leur méthode aux agriculteurs, c'est pourquoi la problématique guidant les travaux du projet SOLINAZO est :

Les méthodes APPI-N et CHN peuvent-elles constituer des alternatives à la méthode du bilan prévisionnel ?

C'est la première fois dans l'histoire de la fertilisation azotée qu'une telle question se pose. En effet, malgré l'identification, depuis les années 1980, de limites dans la méthode du bilan (Meynard, 1985 ; Cerf et Meynard, 1988), le principe initial du raisonnement de la fertilisation azotée (objectif de rendement, quantité d'azote non limitante...) n'avait pas été questionné (Ravier, 2017). Pour constituer une alternative à la méthode du bilan, ces méthodes devront être pertinentes pour les agriculteurs et les conseillers tant sur le plan performance que mise en pratique. Une validation au niveau réglementaire sera également nécessaire.

4.2. Objectifs de travail

Pour apporter des éléments de réponse à la problématique, plusieurs objectifs et hypothèses ont été définis. L'étude a pour objectif **d'évaluer la pertinence des méthodes APPI-N et CHN sur des critères relatifs aux enjeux actuels**. L'évaluation de la pertinence de ces méthodes innovantes passe par une comparaison avec la méthode du bilan. Les résultats et analyses produits apporteront des éléments de réponse quant à la pertinence des méthodes par rapport à la méthode du bilan dans les contextes pédoclimatiques des essais. Trois catégories font l'objet d'une analyse de pertinence : la production, l'impact environnemental et la rentabilité économique. La tendance aux apports tardifs dans le cas de pilotage par les méthodes APPI-N et CHN (Ravier, 2017), amène à formuler l'hypothèse selon laquelle les taux de protéines sont supérieurs à ceux obtenus avec la méthode du bilan (ARVALIS-Institut du végétal, 2013). L'hypothèse concernant l'impact environnemental est celle selon laquelle un pilotage par les méthodes APPI-N et CHN améliore la valorisation des apports d'engrais azotés. Cette dernière s'appuie sur les travaux de Limaux (1994) cités précédemment (meilleure valorisation de l'apport pour une date plus tardive). En considérant une amélioration de l'utilisation de l'azote apporté, il est également possible de supposer que les pilotages APPI-N et CHN assurent une meilleure rentabilité économique qu'une gestion par la méthode du bilan.

Un autre objectif, associé au précédent, est celui de **tester la robustesse des méthodes APPI-N et CHN dans différentes situations agricoles** dont celles qui risquent de mettre les méthodes en défaut.

L'étude a aussi pour objectif **d'analyser les réactions des agriculteurs engendrées par ce changement de pratique**. Cet objectif, complémentaire de la partie expérimentale, constitue une part importante du projet. En effet, les connaissances mobilisées et l'application de cette méthode étant très différentes de ce que les agriculteurs ont l'habitude de faire dans le cadre de la méthode du bilan, ils pourraient se sentir désemparés. Il apparaît donc intéressant de faire un point sur ce que ces changements provoquent sur les agriculteurs, leurs apprentissages, leurs réflexions... De plus, l'analyse de cette prise en main/appropriation donnera accès aux adaptations mises en place par les agriculteurs pour faire face aux contraintes du milieu. Ces adaptations pourront être à l'origine de

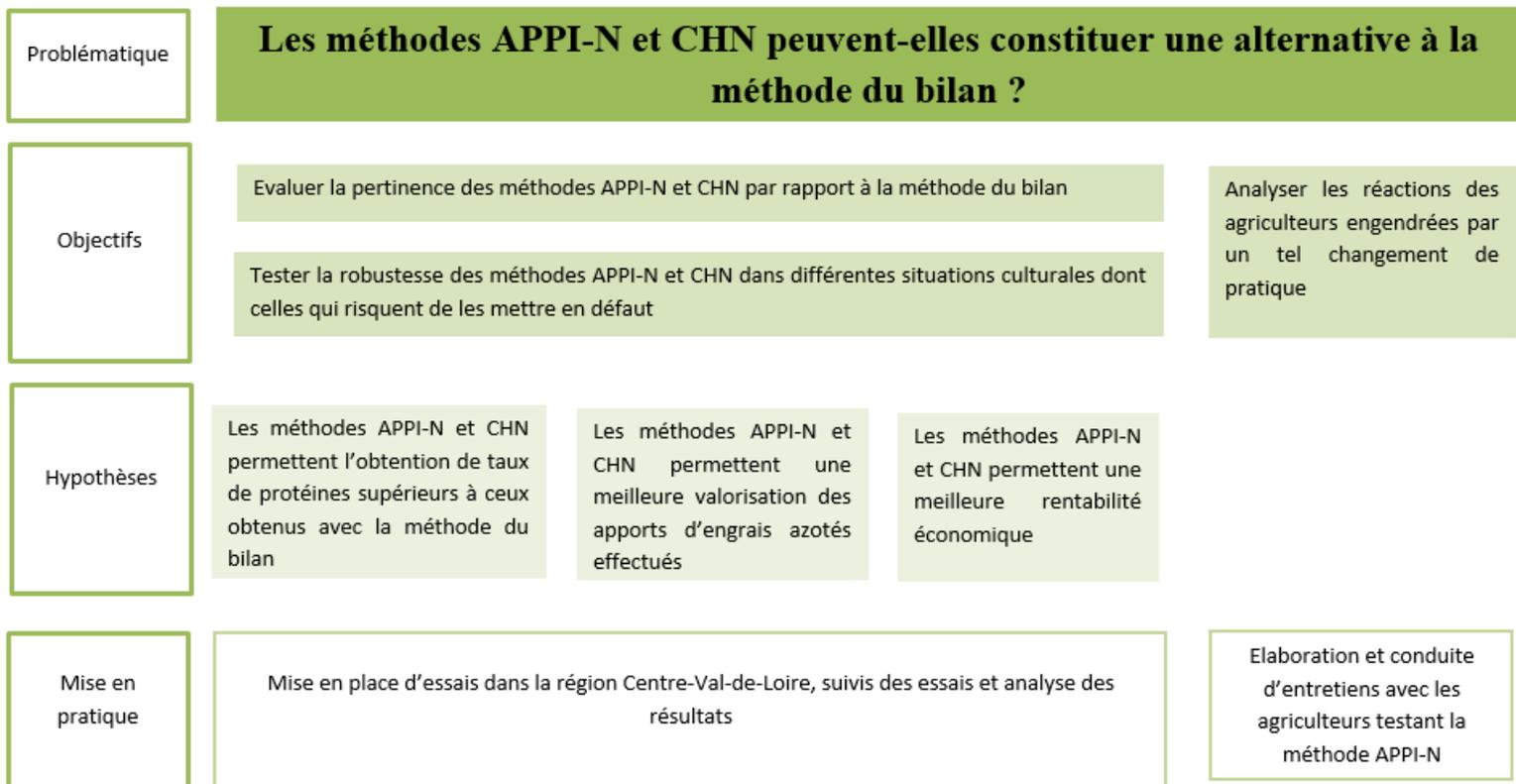


Figure 5 : Représentation de la démarche méthodologique du travail de stage

nouvelles réflexions par les développeurs de la méthode et de possibles modifications des règles de décision.

II. Matériels et méthodes de travail

Présentation de la stratégie globale de travail

La stratégie globale mise en œuvre pour satisfaire les objectifs et répondre à la problématique est présentée Figure 5. La mise en pratique, pour apporter des éléments de réponse quant à la pertinence des nouvelles méthodes, passe par une approche expérimentale. Celle-ci est caractérisée par des essais mis en place par la FDGEDA du Cher. Une approche en conditions réelles, basée sur un travail avec les agriculteurs, permettra d'analyser la prise en main, par les agriculteurs d'une nouvelle méthode.

L'objectif relatif à la robustesse des méthodes dans différentes situations agricoles est un objectif du projet SOLINAZO mais ne constitue pas un objectif du travail de stage à part entière. En effet, ce point est testé à travers tous les essais mis en place dans la région Centre-Val-de-Loire. L'ensemble des essais du projet SOLINAZO permettent d'apprécier une certaine diversité de textures de sol. Les données précises des parcelles sur lesquelles se trouvent les essais des autres partenaires ne sont pas connues.

La suite de la partie s'articule en fonction des objectifs de travail définis dans le cadre du stage.

1. Comparer expérimentalement les performances des méthodes APPI-N et CHN par rapport à la méthode du bilan

Pour une utilisation des méthodes APPI-N et CHN en tant qu'alternatives à la méthode du bilan, il est nécessaire d'évaluer et de comparer leurs performances. Les méthodes sont alors évaluées et comparées à travers plusieurs indicateurs quantitatifs et qualitatifs dont les détails sont fournis dans la partie 1.3. Données nécessaires à l'analyse des résultats.

Les résultats détermineront s'il est pertinent de proposer un pilotage de la fertilisation azotée avec l'une des deux nouvelles méthodes en substitution d'une gestion par la méthode du bilan.

1.1. Dispositif expérimental

Chaque année, deux essais sont mis en place par la FDGEDA du Cher dans des parcelles d'adhérents. Les agriculteurs sollicités sont reconnus pour leur travail de qualité. Les agriculteurs sèment leurs parcelles en blé tendre d'hiver comme à leur habitude et le détournement des essais est réalisé par le service expérimentation de la FDGEDA du Cher. Ce choix, à la place de semis « expérimentaux », assure des semis plus réguliers et évite de contraindre les agriculteurs. Le protocole d'essai SOLINAZO, élaboré par l'INRAE et ajusté par les partenaires du projet, laisse le choix d'un dispositif expérimental en bloc ou en alpha-plan. Dans l'étude menée par la FDGEDA du Cher, le détournement effectué crée un dispositif en 4 blocs. Ce type de dispositif est plus souple quant à la disposition des modalités les unes par rapport aux autres et permet notamment de faciliter le travail à la récolte.

Au sein de chaque bloc, les modalités testées sont les suivantes :

- Témoin non fertilisé : modalité S0
- Méthode du bilan : modalité S1
- Méthode APPI-N : modalité S2
- Méthode CHN : modalité S3
- Méthode du bilan + pilotage du dernier apport : modalité S4
- X-40 (dose d'azote X conseillée par la méthode du bilan – 40 unités) : modalité S5

Bloc 2		Bloc 3	
BN		BN	
S3	P	S2	P
S3		S2	
S5		SURFERTI	
S0	P	S3	P
S0		S3	
S6		S7	
SURFERTI		S4	
S4		S1	
S2	P	S1	P
S2		S5	
S7		S6	
S1	P	S0	P
S1		S0	
S7		SURFERTI	
S6		S5	
S5		S7	
S4		S6	
S3	P	S0	P
S3		S0	
S2		S1	P
S2		S1	
SURFERTI		S4	
S1		S3	
S1	P	S3	P
S0	P	S2	P
S0		S2	
	BN		BN
Bloc 1		Bloc 4	

Taille micro-parcelle essai de Senneçay : $3 \times 15 = 45 \text{ m}^2$

Taille micro-parcelle essai de Laverdines : $3 \times 14 = 42 \text{ m}^2$

Figure 6 : Plan du dispositif expérimental des essais

- X+40 : modalité S6
- X+80 : modalité S7

Les modalités S0, S1, S2 et S3 correspondent aux stratégies de fertilisation azotée à tester obligatoirement tandis que les stratégies S4, S5, S6 et S7 sont des variantes au choix de l'expérimentateur. Les modalités S5, S6 et S7 sont testées pour obtenir des courbes de réponse à l'azote. Ces courbes de réponses ont pour objectif de valider ou invalider, a posteriori, la dose d'azote prévisionnelle X et d'apprécier, s'il y a, l'écart à la dose la plus proche des besoins de la culture. Les modalités S0, S1, S2 et S3 sont chacune représentées par deux micro-parcelles pour que l'une soit dédiée aux prélèvements destructifs en cours de culture et l'autre, à la récolte en fin de cycle. Le dispositif en bloc facilite le placement, pour une même modalité, de ces deux micro-parcelles côte à côte. De plus, dans un objectif de faciliter et de gagner du temps lors de la moisson, il est possible de placer, dans la largeur, deux micro-parcelles dédiées à la récolte. Dans chaque bloc se trouve également une micro-parcelle sur-fertilisée (« SURFERTI » sur la Figure 6) servant d'étalon dont l'intérêt sera présenté par la suite. Des micro-parcelles qualifiées de « bandes neutres » (« BN » sur la Figure 6) sont placées à certains abords des blocs afin de limiter les contaminations par la parcelle en périphérie. Le plan du dispositif expérimental des deux essais est présenté Figure 6.

Les essais sont basés sur les communes de Senneçay (18340) et Laverdines (18800). Les parcelles, choisies par la FDGEDA du Cher pour mettre en place les essais, sont des parcelles pour lesquelles les réponses historiques de la fertilisation azotée par la méthode du bilan posent question. En procédant ainsi, il sera possible d'apprécier les potentielles performances des méthodes APPI-N et CHN dans des situations dans lesquelles la méthode du bilan est en défaut. L'essai de Laverdines est sur une texture de sol de type argileux lourd. Sur ce sol, les RSH sont importants et dans certains cas l'intégralité de cet azote disponible n'est pas utilisée par les plantes. En effet, un excès d'eau au moment de l'implantation de la culture, peut entraîner une asphyxie racinaire et par conséquent un mauvais enracinement de la culture. La profondeur des racines étant limitée, elles ne sont pas en mesure d'absorber la totalité de l'azote disponible (ARVALIS-Institut du végétal, 2020b). L'essai sur la commune de Senneçay est quant à lui sur un sol argilo-calcaire superficiel. Sur ce sol, la profondeur de profil réalisable n'excède pas 45cm à cause de la présence de cailloux ce qui est inférieur à la profondeur potentielle d'enracinement (45cm contre 75cm). Ainsi, la profondeur du reliquat d'azote utilisable est limitée à la profondeur du profil et est, par conséquent, sous-estimée (Limaux, 1999). Dans ces situations, le résultat des calculs par la méthode du bilan est alors partiellement erroné.

1.2. Protocoles expérimentaux des stratégies de fertilisation testées

Pour chaque essai, une analyse physico-chimique du sol est réalisée avant l'hiver pour détecter d'éventuelles carences en phosphore, potassium ou autres éléments. Dans le cas où une carence est confirmée, elle est à corriger au printemps avec la méthode Comifer P-K. Sur les essais, les analyses ne montrent pas de carences.

A la sortie de l'hiver, des prélèvements de biomasse sur la modalité S0 sont effectués pour connaître l'état du blé à l'ouverture du bilan. Les prélèvements proviennent de la modalité S0 bien que les autres modalités auraient pu être utilisées car, à cette date, la fertilisation azotée n'a pas débuté. A noter que les apports d'azote sont faits à la main sous forme d'Ammonitrate 33.5. Le choix de cette forme s'explique par les moindres pertes lors d'une application en climat sec. En effet, les essais du Magneraud d'ARVALIS-Institut du végétal (1997) montrent que, dans le cas d'un délai de 23 jours entre un apport et une pluie, la perte d'efficacité de l'apport d'Ammonitrate (-12%) est moins importante que celle de l'apport de solution azotée (S390 ; -29%).

a. Gestion de la fertilisation azotée par la méthode du bilan / méthode Comifer

Pour gérer la fertilisation azotée des modalités S1, S4, S5, S6 et S7, un reliquat sortie hiver est réalisé, pour les 2 essais, sur la modalité S0 (car fertilisation pas encore débutée). Des prélèvements de terre sur deux et trois horizons (respectivement à Senneçay et Laverdines) sont échantillonnés puis transmis au laboratoire d'analyse de la Chambre d'Agriculture du Loiret.

Le résultat du RSH est utilisé dans les calculs de la méthode du bilan et un plan de fumure dont le fractionnement repose sur des stades de développement du blé, est proposé (Annexe 1 et Annexe 2). Les calculs reposent également sur un objectif de rendement de 67 q/ha pour l'essai à Senneçay et sur un objectif de 68 q/ha à Laverdines. Le fractionnement du plan de fumure est basé sur des stades de développement du blé à savoir le tallage pour le 1^{er} apport, le stade Epi 1 cm pour le 2^{ème} apport et le stade sortie dernière feuille pour le dernier apport. Les dates des apports sont ensuite choisies par la FDGEDA du Cher au cours du cycle cultural à la suite d'observation des stades sur le terrain et d'une prise en compte des conditions climatiques. Les périodes pluvieuses sont privilégiées car l'efficacité de l'apport est d'autant plus élevée qu'une pluie est proche. Les essais du Magneraud d'ARVALIS-Institut du végétal (1996-1997) montrent une valorisation complète de l'apport lors d'un cumul de 15 mm de pluie dans les 15 jours suivants l'apport. Pour la modalité S4, le pilotage du dernier apport est effectué avec une mesure N-Tester®. La valeur affichée par le N-Tester®, après le pincement de 30 feuilles, est à saisir sur l'interface Yara. En complément, sont à renseigner : l'espèce cultivée, la variété, la densité de semis, le stade de la culture lors de la mesure, l'objectif de rendement et la dose d'azote apportée jusqu'alors.

b. Gestion de la fertilisation azotée par la méthode APPI-N

Principe de la méthode APPI-N

La méthode APPI-N repose sur l'utilisation d'abaques, définis par zone et par année, fournissant la dose d'engrais à apporter pour une date de mesure et un INN donnés. Les abaques étaient, au départ du projet, définis par site puis ont été rassemblés par zones (rassemblement de départements) pour lesquelles les résultats étaient similaires. Les données fréquentielles, sur les 20 dernières années, des stations météorologiques les plus proches des sites sont utilisées pour identifier les potentiels jours favorables entre le 15 février et le 31 mai (période d'absorption de l'azote). Une journée est considérée comme favorable à un apport d'engrais si la pluviométrie annoncée, dans les 3 jours suivant l'apport, est supérieure à 10 mm et/ou si le sol est suffisamment humide c'est-à-dire, si la pluviométrie dans les 5 jours avant l'apport a été supérieure à l'évapotranspiration de la culture. La période du 15 février au 31 mai est ensuite fractionnée en période de 2 semaines (durée minimale obligatoire entre deux apports). Des simulations de fertilisation azotée durant les jours favorables sont testées dans le modèle AZODYN (0,40,60,80,100 kgN/ha) qui renvoie la valeur du CAU, la trajectoire de l'INN et la quantité d'azote lixivié. Le principe de ce modèle est la simulation du fonctionnement d'une culture, y compris en cas de stress biotiques, en vue d'être utilisé comme outil de raisonnement de techniques culturales (ici, pour la fertilisation azotée) (Jeuffroy et Recous, 1999). Les stratégies de fertilisation simulées sont considérées comme viables lorsqu'elles répondent aux critères suivants :

- La trajectoire de l'INN estimé ne passe pas sous la trajectoire de l'INN seuil
- La quantité d'azote perdu est inférieure à 20kg/ha

Chaque stratégie est décomposée en un vecteur {dose, date, INN} et la robustesse des stratégies viables est évaluée. L'évaluation de la robustesse passe par le calcul du ratio (R) :

$$R = \frac{\text{nb années pour lesquelles } \{dose, date, INN\} \text{ viable}}{\text{nb années pour lesquelles } \{dose, date, INN\} \text{ simulé}}$$

Abaque pour Indre, Cher, Indre-et-Loire							
	15 - 28 février	1 - 15 mars	15 - 30 mars	1 - 15 avril	15 - 30 avril	1 - 15 mai	15 - 31 mai
INN							
< 0.6	40	60	80	80			
0.6 - 0.7	0	40	80	60	80	60	
0.7 - 0.8	0	0	60	60	60	40	60
0.8 - 0.9	0	0	60	40	40	40	40*
0.9 - 1.0	0	0	40	0	0	0	0
1.0 - 1.1	0	0	0	0	0	0	0
1.1 - 1.2	0	0	0	0	0	0	0

*= apport d'N à réaliser uniquement si la date de floraison est prévue dans plus d'une semaine

Figure 7 : Abaque support pour l'application de la méthode APPI-N dans les départements du Cher, de l'Indre et de l'Indre-et-Loire

L'assemblage des vecteurs les plus robustes aboutie à l'élaboration d'abaques spécifiques comme celui présenté Figure 7, valable pour les départements du Cher, de l'Indre et de l'Indre-et-Loire. La dose d'azote conseillée fournie par l'abaque permet de garder l'INN au-dessus de l'INN seuil et ce, jusqu'au prochain jour favorable (Ravier, 2017). L'INN est estimé grâce à l'outil N-Tester®. Si la mesure indique la nécessité d'un apport mais que le jour n'est pas favorable, l'apport ne doit pas être déclenché.

Application de la méthode APPI-N

L'estimation de l'INN nécessite la mise en place d'une micro-parcelle sur-fertilisée servant d'étalon. Pour ce faire, la micro-parcelle sur-fertilisée doit recevoir un 1^{er} apport de 50 unités d'azote au 15 février puis 50 unités toutes les 3 semaines lorsque les conditions météorologiques sont favorables. Les opérations à réaliser pour obtenir une estimation chiffrée de l'INN sont les suivantes :

- A l'aide de l'outil N-Tester®, pour chaque bloc, pincer la dernière feuille étalée de 30 plantes (nombre défini par Yara France) choisies aléatoirement sur la micro-parcelle S2. L'outil affiche la valeur moyenne des 30 pincements. Si la moyenne obtenue pour un bloc est aberrante, ne pas la prendre en compte. Calculer ensuite la moyenne des blocs
- Faire de même pour les micro-parcelles sur-fertilisées.
- Calculer le ratio HNT (Hydro-N-Tester) = $\frac{\text{moyenne N-Tester S2}}{\text{moyenne N-Tester surferti}}$
- Utiliser la table de conversion des ratios HNT en INN présentée Annexe 3

Le report sur l'abaque de l'INN obtenu à la date de mesure, fournit la dose d'azote dont la culture a besoin. La prévision des précipitations les trois prochains jours est ensuite renseignée grâce au site internet de Météo-France (pour les précipitations) et Météociel (pour la pluviométrie) pour décider de l'apport ou non d'azote. Une extraction des données fournies par ces sites est présentée Annexes 4 et 5.

c. Gestion de la fertilisation azotée par la méthode CHN

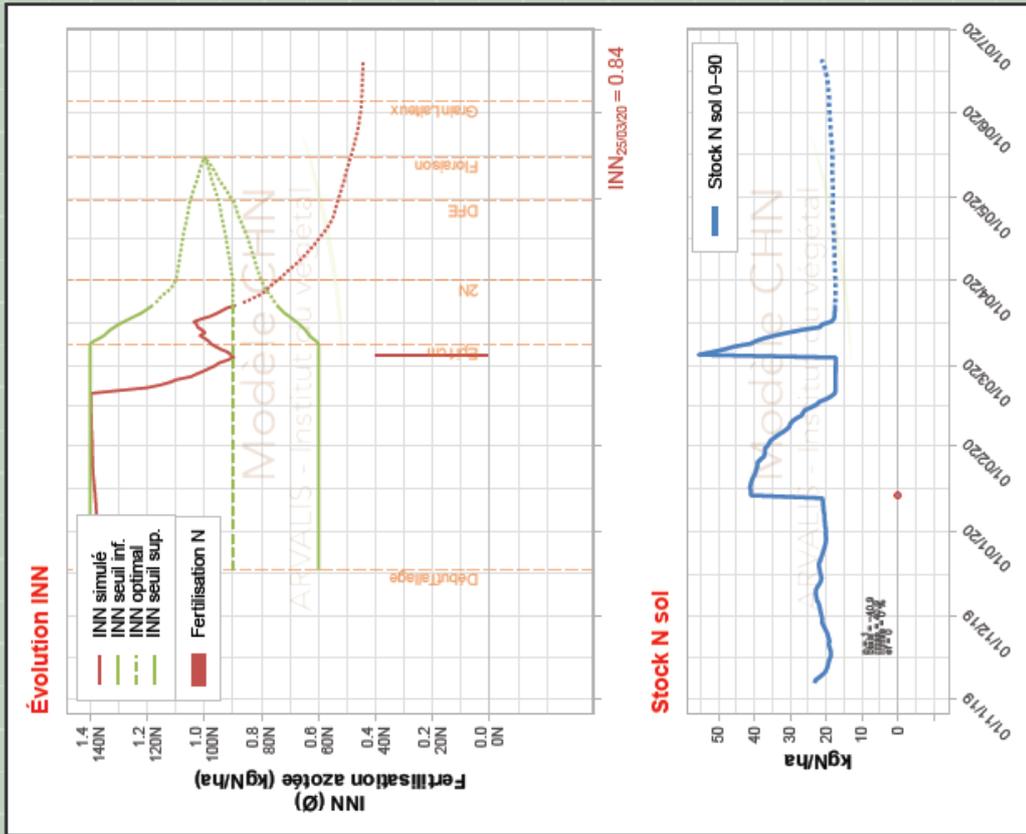
Principe de la méthode CHN

La méthode CHN (pour Carbon, H₂O, Nitrogen) repose sur l'utilisation du modèle CHN développé par ARVALIS-Institut du végétal. Ce modèle de culture dynamique modélise les flux de carbone, d'eau et d'azote au sein du système de cultures, à savoir dans les compartiments Sol-Plante-Atmosphère (Soenen et al., s. d.). Pour effectuer ces simulations, le compartiment Sol est connecté à la base Sol ARVALIS (plus de 400 sols référencés), le compartiment Atmosphère est connecté à la base Météo ARVALIS (plus de 700 stations météorologiques et 25 années de données) et le compartiment Plante est, quant à lui, basé sur le principe de Monteith (Monteith, 1977). Le schéma représentant le modèle de culture CHN est présenté en Annexe 6 (Soenen, 2015).

Application de la méthode CHN

Dans le cadre de la méthode de pilotage de la fertilisation azotée CHN, la 1^{ère} étape repose sur la contextualisation des parcelles où sont implantés les essais. Plusieurs informations sont alors à renseigner tels que la station météorologique la plus proche de l'essai, le précédent cultural, la variété implantée, la date et la densité de semis. Au cours de la campagne, des données tels que les interventions culturales, les stades de la culture associés à leurs dates d'apparition sont à saisir dans un fichier Excel de paramétrage. Le fichier doit ensuite être déposé sur le serveur SITAR, interface créant le lien entre l'utilisateur et le modèle CHN. Durant les deux premières années du projet, ARVALIS-Institut du végétal souhaitait que le modèle tourne au moins une fois par semaine. Il est

GRAPHIQUES POUR PRISE DE DECISION



CALCULS D'INDICATEURS

Moyenne d'azote absorbé par jour dans les 10 jours à venir : 0.1 kgN/ha/jour
 Date de franchissement du déficit azoté maximal tolérable : 29/03/2020
 Date d'épuisement du stock d'azote disponible dans le sol : 25/03/2020
 Prochaine période favorable pour apport N : 13/04/2020 - 26/05/2020
 Déficit prochaine période favorable : 46.8 kgN/ha
 Déficit tolérable prochaine période favorable : 10.4 kgN/ha
 Dose préconisée à apporter dès que possible (CAU = 80%) : 60 kgN/ha

Figure 8 : Sortie du modèle CHN, support de l'application de la méthode CHN

désormais demandé une fréquence d'activation du modèle plus importante, surtout lors de périodes pluvieuses.

Les sorties du modèle pour la prise de décision d'un apport sont mises sous forme de graphiques (Figure 8). Les graphiques présentent l'évolution de l'INN simulé en temps réel au cours du cycle de la plante ainsi que l'évolution du stock de carbone dans le sol, le déficit azoté de la plante et le déficit maximal tolérable. Il est alors possible de simuler un apport pour apprécier l'évolution future de ces données. A la suite de la prise en compte de ces informations, une préconisation de la dose d'azote à apporter est fournie ainsi que la prochaine période favorable à un apport. La dose conseillée est le résultat de plusieurs simulations effectuées par le modèle et correspond à la dose permettant de maintenir l'INN simulé proche de l'INN optimal et de maintenir un déficit azoté de la plante inférieur à son déficit maximal tolérable. Les conditions météorologiques maximisant le CAU de l'engrais sont à prendre en compte mais peuvent être omises si la valeur de l'INN est proche de l'INN seuil inférieur. Les règles de décision de déclenchement d'un apport sont donc moins strictes que celles de la méthode APPI-N. Cependant, à l'inverse de la méthode APPI-N, l'utilisateur a très peu la main sur l'outil. Ceci est d'autant plus vrai depuis qu'il a été demandé aux expérimentateurs d'appliquer les consignes de sortie du modèle quelles que soient les conditions météorologiques. Cette volonté d'ARVALIS-Institut du végétal a été évoquée lors d'un comité technique entre partenaires du projet auquel la FDGEDA du Cher n'a pu assister.

1.3. Données nécessaires à l'analyse des résultats

Les indicateurs permettant de comparer les méthodes testées sont différenciés en plusieurs catégories : des indicateurs relatifs à la production et à sa qualité (rendement aux normes, taux de protéines des grains), un indicatif relatif à l'efficacité d'utilisation de l'engrais (CAU), un indicateur économique (marge brute dégagée) et enfin, l'appropriation d'une nouvelle méthode de travail.

a. Indicateur de performance de production

A l'issue de la récolte, les agriculteurs sont rémunérés en fonction de la quantité produite et dans certains cas en fonction également de la qualité de leur production. Ainsi, les indicateurs utilisés pour évaluer la performance de production associée à chaque modalité sont le rendement aux normes (15% d'humidité) et la teneur en protéines des grains.

Pour ce faire, les micro-parcelles non dédiées aux prélèvements au cours du cycle cultural sont récoltées à la machine. La récolte dite « machine » se fait avec la moissonneuse du service expérimentation de la FDGEDA du Cher dont la coupe mesure 1m50 de large. La largeur des miro-parcelles étant de 3 m, l'effet bordure est écarté. Une mesure de l'humidité avec un humidimètre (Aquaneo 20, Chopin technologies) permet la conversion du rendement (rdt) brut (en q/ha) en rendement aux normes par le calcul suivant :

$$\text{Rdt aux normes (q/ha)} = \frac{\text{Rdt brut} * (100 - \% \text{humidité}_{\text{grains mesurée}})}{100 - \% \text{humidité}_{\text{grains normes}}}$$

Le pourcentage d'humidité aux normes est 15.

Les rendements obtenus peuvent être détaillés par des composantes de l'élaboration du rendement. C'est pourquoi, avant la récolte, un comptage du nombre d'épis par mètre carré (m²) est effectué pour chaque modalité. Pour ce faire, un cadre d'une superficie d'un quart de m² est utilisé. Pour chaque modalité, le cadre est posé aléatoirement dans les 4 micro-parcelles correspondantes en évitant cependant les zones non représentatives de la micro-parcelle (bordures, zones ayant subi une attaque d'insectes, une maladie...). La somme des 4 mesures donne le nombre d'épis/m² pour chacune des modalités. De plus, pour chaque modalité, les échantillons de grains des 4 blocs, récupérés à la récolte,

sont mélangés puis, à l'aide d'un compteur de grains (Numigral, Chopin technologies), le PMG est mesuré. Le nombre de grains par m² peut ensuite être déterminé :

$$\text{Nbre grains/m}^2 = \frac{\text{Rdt aux normes } \left(\frac{g}{ha}\right)}{\text{PMG (g)}} * 10000$$

Enfin, la teneur en protéines des grains est mesurée avec un analyseur de céréales InfratecTM 1241.

Une analyse statistique des résultats détermine ensuite si des différences significatives existent entre les méthodes testées. L'analyse est réalisée avec l'outil Expé-R conçu par ARVALIS-Institut du végétal et spécialisé dans l'analyse et le traitement statistique des essais en agriculture. Chaque analyse est précédée d'une vérification des hypothèses utilisées pour la création du modèle telles que la normalité et l'indépendance des résidus ou encore la présence de résidus suspects. Le test utilisé pour conclure ou non de la significativité des résultats est le test de *Tukey* qui réalise des comparaisons de moyennes. Pour un critère donné, le test de *Tukey* crée des groupes en fonction des différences significatives entre les modalités. Les modalités qui appartiennent à un même groupe sont statistiquement identiques.

b. Indicateur de l'impact environnemental

Pour rappel, le raisonnement de la fertilisation azotée proposé par Ravier (2017) a pour objectif d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote et par conséquent de limiter les pertes d'azote dans l'environnement. L'efficacité des apports, et par conséquent la capacité du couvert à absorber l'azote apporté, peut être évaluée à travers le Coefficient Apparent d'Utilisation (CAU) de l'engrais. Seul le CAU final est calculé afin d'apprécier la valorisation de la dose totale d'azote apporté et par conséquent d'émettre des hypothèses quant aux pertes vers l'environnement. Pour cela, la formule suivante est utilisée (Comifer, 2013a) :

$$\text{CAU} = \frac{\text{QN}_x - \text{QN}_0}{X}$$

Avec,

CAU : Coefficient Apparent d'Utilisation

QN_x : quantité d'azote absorbé par le couvert à la suite de l'apport de la dose X (kgN/ha)

QN₀ : quantité d'azote absorbé par le couvert témoin n'ayant pas reçu d'azote (kgN/ha)

X : dose d'azote apporté (kgN/ha)

L'azote total absorbé par le couvert est réparti entre les parties aériennes (grains + pailles) et la partie racinaire (Allard et al, 2013). Ainsi, pour les modalités S0, S1, S2 et S3, un prélèvement dit « bottillon » de 50 tiges est effectué sur les micro-parcelles dédiées aux prélèvements destructifs de chaque bloc. Seules les parties aériennes sont prélevées (prélèvements au ras du sol) car il est impossible d'extraire l'intégralité des racines. L'azote absorbé par les racines est alors estimé. Une fois séparés, pailles et épis sont placés 48h dans une étuve à 80°C, les épis sont ensuite battus puis les pailles et les grains sont envoyés au laboratoire de la Chambre d'Agriculture du Loiret pour une analyse de l'azote par la méthode Dumas. Dans cette méthode, la teneur en azote des parties aériennes est estimée à la suite d'une combustion des tissus végétaux déshydratés et broyés, une réduction des oxydes d'azote par le cuivre et d'une analyse du N₂ obtenu à l'aide d'un catharomètre (Jeuffroy et Recous, 1999).

La quantité d'azote exporté par quintal de grains aux normes (Nexp_grains) s'obtient par la formule suivante (Comifer, 2013c) :

$$\text{Nexp_grains} = \%MS\text{grains} * \%N\text{grains}$$

Tableau 1 : Valeurs utilisées pour le calcul des marges brutes dégagées par chacune des trois modalités

Prix de vente du blé tendre rendu Rouen juillet 2020 (184 €/t) - Coût de transport (20€/t)	164 €/t
Pénalités	- 2 €/t pour 1 point de protéines en deçà de la valeur de référence
Prix d'achat de l'engrais (ici, Ammonitrate 33.5)	275 €/t
Coût d'épandage	3.7 €/ha

Le rendement aux normes est exprimé pour des grains à 85% de matières sèches, d'où %MSgrains égal à 0.85.

La formule utilisée pour calculer la quantité d'azote exporté par les pailles (par quintal de grains aux normes) est celle proposée par le Comifer (2013c). Est également pris en compte le fait que la paille récoltée correspond à la totalité de la paille produite (prélèvements coupés au ras du sol) :

$$N_{exp_pailles} = \frac{(1-IR)}{IR} * \%MSgrains * \%Npailles$$

Avec IR l'indice de récolte défini par le ratio :

$$IR = \frac{Biomasse_grains_secs}{Biomasse_grains_secs + Biomasse_pailles_sèches}$$

La valeur de référence de l'IR du blé tendre est 0.49 (Comifer, 2013c). Alors le ratio $\frac{(1-IR)}{IR} = 1.04$.

La quantité d'azote absorbé par hectare s'obtient en multipliant ces deux formules par le rendement aux normes (Rdt_normes) en q/ha.

En ce qui concerne la partie racinaire, les travaux d'Andersson et Johansson (2006) montrent qu'à maturité, les racines de blé contiennent entre 10 et 20% de l'azote total de la plante. La valeur de 15% est retenue pour les calculs.

Ainsi, la quantité totale d'azote absorbé (QN) en kgN/ha se calcule comme suit :

$QN = 1.15 * Rdt_normes * 0.85 * (\%Ngrains + 1.04 * \%Npailles)$
--

Etant donné le faible nombre de données, une analyse statistique est impossible. Ainsi, seule une analyse descriptive des CAU sera présentée.

c. Indicateur de performance économique

Un bilan économique simplifié est dressé pour les modalités S1, S2 et S3 afin de comparer les marges brutes relatives au pilotage de fertilisation testé. Ces bilans prennent en considération le prix de vente du blé tendre, le prix d'achat de l'engrais ainsi que le coût d'épandage. Pour un même essai, les autres charges sont considérées comme égales d'une modalité à l'autre, ainsi, les intégrer ne présente pas de réel intérêt dans cette analyse comparative. Pour apprécier, du point de vue économique, la performance quantitative et qualitative des modalités, l'exemple d'une production de blé meunier est utilisé. En effet, des pénalités sont prises en compte lorsque le taux de référence de protéines n'est pas atteint (soit, <11.5%). Les données utilisées pour les calculs sont les valeurs pratiquées par la coopérative Axérial (Tableau 1). Le prix de l'Ammonitrate 33.5 est celui en vigueur en juin 2019, période à laquelle, en général, les agriculteurs effectuent leur achat d'engrais pour la campagne suivante. Le coût d'épandage utilisé est la valeur de référence fournie par le barème d'entraide des Chambres d'Agriculture de France dans le cas d'un distributeur centrifuge (Chambres d'Agriculture de France, 2020).

2. Tester la mise en œuvre de la méthode APPI-N par les agriculteurs.

Pour que les méthodes APPI-N et CHN puissent prétendre constituer des alternatives à la méthode du bilan, les agriculteurs, comme les conseillers, doivent être en mesure de se les approprier. L'appropriation d'une méthode passe tout d'abord par des apprentissages générés par celle-ci et ensuite, par la capacité à adapter la méthode à son propre contexte. La mise en place de bandes pilotées par la méthode APPI-N chez des agriculteurs a donc pour objectif d'évaluer l'appropriation de cette méthode en conditions réelles. Par cette évaluation, des points d'attention pourront être

Tableau 2 : Notations à réaliser par les agriculteurs au sujet de la bande APPI-N

Date	Raisons pour lesquelles la date est jugée favorable à la réalisation d'un apport	Valeur N-tester mesurée sur :		Conseil abaque	Apport réalisé	Observation du couvert
		Parcelle	Étalon sur-fertilisé			
Exemple : 15/02	(conditions météo, prévision météo, stade, état d'humidité du sol)				<i>Apport : OUI – NON Quantité ; Si la décision ne correspond pas au conseil de l'abaque, pourquoi ? Forme de l'engrais</i>	Par comparaison avec le reste de la parcelle (couleur, densité, maladie, feuilles grillées par herbicide, gel, azote, ...)

soulignés par les développeurs de la méthode, de sorte que les conseillers soient, par la suite, plus à même d’appréhender les réactions des agriculteurs. Pour l’année d’étude 2019/2020, cette démarche ne concerne pas la méthode CHN. Une mise en place chez des agriculteurs est néanmoins envisagée pour la campagne 2020/2021.

2.1. Support utilisé pour la mise en œuvre de la méthode APPI-N en conditions réelles

Seuls deux agriculteurs adhérents de la FDGEDA du Cher ont été sollicités pour tester la méthode APPI-N, les pinces N-Tester® étant limitées car coûteuses. Les agriculteurs ont accepté la proposition de la FDGEDA du Cher car l’idée de tester une nouvelle manière de piloter la fertilisation azotée a suscité, chez eux, de la curiosité. La campagne 2019-2020 correspond à la seconde année de mise en pratique par ces agriculteurs. Pour faciliter l’application de la méthode et limiter la prise de risque, les surfaces en pilotage par APPI-N (bandes APPI-N) correspondent au passage du pulvérisateur sur un aller-retour soit de 2 à 4 hectares. Ainsi, au sein d’une parcelle en blé tendre d’hiver choisie par l’agriculteur, deux pilotages de la fertilisation azotée sont effectués : APPI-N (+ petite surface sur-fertilisée) et le pilotage habituel de l’agriculteur (méthode du bilan – « modalité agriculteur »). Chez l’agriculteur basé sur la commune d’Etréchy (18800 – agriculteur A), le blé en pilotage APPI-N est sur un sol argilo-calcaire. Pour la bande APPI-N chez l’agriculteur basé à St-Martin-des-Champs (18140 – agriculteur B), il s’agit d’un sol limoneux profond.

Une présentation du principe de la méthode et des points clés de son application a été faite aux agriculteurs par leur conseiller, personne en charge du projet SOLINAZO à la FDGEDA du Cher (Vincent Moulin). Par la suite, les agriculteurs réalisent le pilotage de manière autonome bien qu’ils soient régulièrement en contact avec Vincent Moulin. Lors de la récolte, ils sont en charge de conserver des échantillons de la zone APPI-N et du reste de la parcelle ainsi que fournir le rendement « machine ».

2.2. Méthode d’évaluation de l’appropriation de la méthode APPI-N par les agriculteurs

Pour apprécier les ressentis des agriculteurs au plus près de la réalité, la méthode d’extraction d’informations utilisée est un point clé (Chantre, 2011). Le phénomène étudié repose ici sur un changement de pratique. Parmi les familles d’analyses, celles visant à étudier un changement au cours du temps sont les analyses longitudinales (Forgues et al, 2007). Dans cette étude il s’agit une analyse longitudinale qualitative. Les méthodes de conduite de ce type d’étude s’appuient sur plusieurs approches et c’est l’approche processuelle (Forgues et al, 2007) qui a inspiré la démarche mise en place dans le cadre de cette étude. En effet, cette approche se focalise sur la compréhension du « comment » les choses évoluent au cours du temps (Van de Ven et Huber, 1990).

La crise sanitaire du Covid-19 ayant entraîné un début de stage en juin 2020, le suivi de l’évolution des agriculteurs en cours de campagne a été réalisé à travers leurs échanges avec Vincent Moulin. En effet, comme précisé précédemment, les agriculteurs étaient régulièrement en contact avec Vincent Moulin. Ainsi, les thèmes/questionnements abordés par les agriculteurs lors de ces échanges pourront être mobilisés.

De plus, les agriculteurs sont tenus de remplir un tableau élaboré et fourni par l’INRAE servant de traces aux décisions prises pendant la campagne (Tableau 2). Quelques temps avant la moisson, une rencontre, durant laquelle ces tableaux font l’objet d’une « décomposition et reconstruction temporelle », est organisée avec chaque agriculteur. Le processus de décomposition et reconstruction temporelle fait en effet partie des outils possibles à mettre en place dans le cadre d’une approche processuelle (Forgues et al, 2007). En utilisant les tableaux comme support, ce processus a pour objectif de retracer le vécu des agriculteurs en décomposant la campagne selon les phases de décision auxquelles ils ont été confrontés. Revenir sur ces points amène l’agriculteur à évoquer ses

Tableau 3 : Fractionnement et doses des apports d'azote réalisés sur l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel

	Dates et doses des apports en uN/ha							Azote total apporté (uN/ha)
	12 février Fin tallage	26 février Epi 0.3 cm	5 mars Epi 0.7 cm	9 mars Epi 1 cm	16 avril Sortie dernière feuille	23 avril DFE/Gonflement	5 mai Floraison	
S1 Méthode du bilan	40			74	40			154
S2 Méthode APPI-N		40		40	80			160
S3 Méthode CHN			40		90		60	190
S4 Méthode du bilan + pilotage	40			74		50		164
S5 X-40		30		54	30			114
S6 X+40		50		94	50			194
S7 X+80		70		100	64			234

questionnements, qui peuvent être liés à ses apprentissages, ses appréhensions, les difficultés de pilotage rencontrées et les moyens mis en œuvre pour les surmonter, ainsi que les choix qu'il a fait et les justifications. L'analyse de l'appropriation de la méthode par les agriculteurs sera alors construite à travers leurs actions et leur discours.

Après les moissons, un second temps d'échange est organisé avec les agriculteurs afin de présenter et discuter les résultats de l'année. Il s'est avéré l'année précédente que les impressions des agriculteurs n'étaient pas représentatives de la réalité (par exemple : nombre d'épis/m² jugé plus faible dans les bandes APPI-N). Ainsi, face aux résultats, les réactions des agriculteurs peuvent apporter des compléments à l'analyse réalisée antérieurement. La rencontre s'est effectuée dans le cadre d'une réunion « groupes d'agriculteurs – conseiller » organisée régulièrement (les deux agriculteurs appartiennent au même groupe). Durant la réunion, un temps est dédié au projet SOLINAZO, l'occasion que les agriculteurs du groupe non impliqués dans le projet prennent connaissance de cette étude. Cette partie a été conduite de la manière suivante :

- Présentation du contexte de l'étude, du nouveau raisonnement et des méthodes développées
- Présentation des résultats obtenus sur les trois ans d'expérimentation sur micro-parcelles
- Présentation du travail réalisé par les deux agriculteurs
- Temps de parole donné aux deux agriculteurs : retours d'expérience fait au groupe
- Présentation des résultats obtenus chez les agriculteurs sur les deux ans
- Temps d'échange et de questions avec le groupe

Les résultats ont également été présentés à d'autres groupes d'agriculteurs non impliqués dans le projet.

III. Résultats et interprétations

Les résultats des deux essais sont analysés séparément du fait des différences de texture de sol et des doses d'azote appliquées. Les résultats présentés et analysés apportent des éléments de réponse quant à la possibilité que les méthodes APPI-N et CHN constituent des alternatives à la méthode du bilan pour la fertilisation azotée du blé tendre d'hiver. Ainsi, les indicateurs de comparaison choisis permettent de qualifier la performance de production et la performance économique apportées par ces méthodes, leur impact environnemental et leur appropriation.

Tout d'abord, les doses d'azote et fractionnements résultants des règles de décision de chacune des méthodes seront présentés, suivis ensuite d'une présentation et interprétation des résultats obtenus sur les indicateurs choisis.

1. Résultats et analyses de la performance de production

1.1. Essai sur sol argilo-calcaire superficiel

a. Présentation des plans de fumure azotée

Pour chacune des modalités testées, les doses et fractionnements d'azote sont présentés Tableau 3.

Modalité S1 : méthode du bilan

Pour la **modalité S1**, la dose totale de 154 uN/ha a été appliquée aux stades conseillés par le plan de fumure et en tenant compte des prévisions de précipitations. Pour rappel, d'après ARVALIS-Institut du végétal (1996-1997), 15 mm de pluie dans les 15 jours qui suivent l'apport sont nécessaires pour prétendre la valorisation complète de l'engrais.

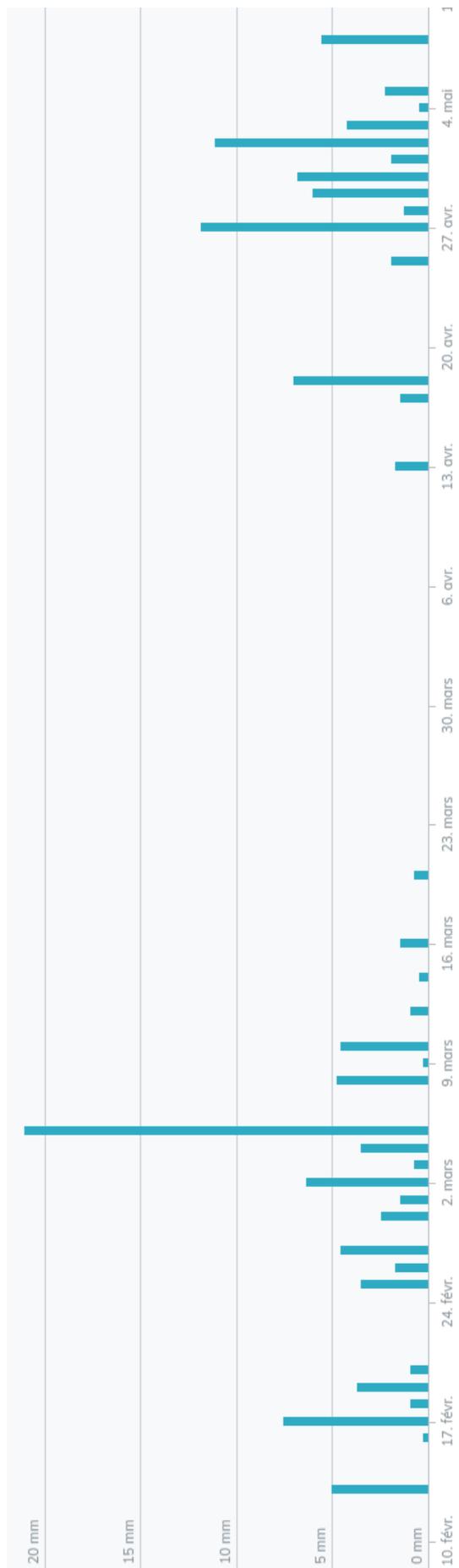


Figure 9 : Relevés pluviométriques de la station à proximité de l'essai de Senneçay (Sencrop – station de Louy)

Alors, après chacun des trois apports, la pluviométrie des 15 jours suivants est relevée : 24 mm pour le 1^{er} apport, 8.6 mm pour le 2^{ème} et 39 mm pour le dernier apport (Figure 9). Une grande partie de l'azote apporté devrait donc être valorisée.

Modalité S2 – méthode APPI-N

La dose totale d'azote apporté avec le pilotage par la **modalité S2** est proche de celle engendrée par la modalité S1 (+6 uN/ha).

Une première mesure avec la pince N-Tester® a été faite le 26 février et a indiqué un besoin de 40 uN/ha. Les prévisions pluviométriques n'ont pas été sauvegardées mais les données de la station météorologique placée proche de l'essai montrent une pluviométrie de 9 mm entre le 26 et le 29 février (Figure 9).

Un besoin de 40 uN/ha le 9 mars couplé à une prévision de 9 mm les 3 jours suivants sont à l'origine du 2^{ème} apport. La pluviométrie réelle affiche 5.8 mm (Figure 9), ce qui est inférieur à la valeur référence de 10 mm revendiquée par la méthode. La valorisation de l'apport peut être dégradée.

Entre les 20 et 24 mars, les mesures n'indiquaient pas de besoin en azote. Un besoin de 60 uN/ha est affiché les 30 mars et 8 avril or, aucune précipitation étant prévue (Figure 9) l'apport n'a pas été fait. Ce report de l'apport d'azote pourrait être à l'origine d'une carence azotée et donc d'une perte de rendement.

Les pluies annoncées à partir du 15 avril ont permis un apport de 80 uN/ha, suivi en effet de 8.5 mm. Le passage des besoins de 60 à 80 uN/ha s'explique par la carence azotée créée lors de la période sèche. Deux dernières mesures ont été réalisées les 23 et 30 avril et n'ont pas montré de besoin en azote de la part du blé.

Ainsi, dans le contexte climatique de l'année, la modalité S2 se distingue de la modalité S1 par un 1^{er} apport légèrement plus tardif (26/02 contre le 12/02). Les deuxième et troisième apports sont faits aux mêmes dates mais diffèrent dans la quantité : pour S1 l'apport le plus conséquent (74 uN/ha) est le 2^{ème} tandis qu'il s'agit du 3^{ème} pour S2 (80 uN/ha). Les apports tardifs étant générateurs de meilleurs taux de protéines, celui obtenu avec S2 pourrait être supérieur à celui de S1 (ARVALIS-Institut du végétal, 2013). De plus, les trois apports ont été suivis de précipitations mais la pluviométrie n'est pas tout à fait respectée (10 mm souhaités). La valorisation des engrais pourrait être dégradée.

Modalité S3 – méthode CHN

Le pilotage par la **modalité S3** entraîne un 1^{er} apport au stade Epi 0.7 cm, apport tardif en comparaison de celui fait fin tallage pour la modalité S1. Dans les 15 jours succédants l'apport, des précipitations à hauteur de 34 mm ont eu lieu, dont 21 mm le jour même.

Fin mars (23 et 25 mars), le modèle CHN préconisait l'apport de 60 uN/ha or, l'absence totale de précipitations (du 23 mars au 12 avril,) et la non-connaissance de la position d'ARVALIS-Institut du végétal dans ce cas de figure, ont conduit à la décision de ne pas effectuer d'apport. Sur cette période, la culture a probablement subi une carence azotée pouvant dégrader le rendement.

Le retour des précipitations à partir de mi-avril (37 mm du 16 au 30 avril) a permis un apport de 90 uN/ha. Le décalage des dates d'apports par rapport à la modalité S1 est d'autant plus visible que ce 2^{ème} apport pour S3 est réalisé à la date du dernier de S1.

Un dernier apport de 60 uN/ha est fait au stade floraison (début mai) et est suivi de 4 mm. La tardivité de cet apport et la faible pluviométrie y faisant suite posent question quant à la valorisation de l'engrais.

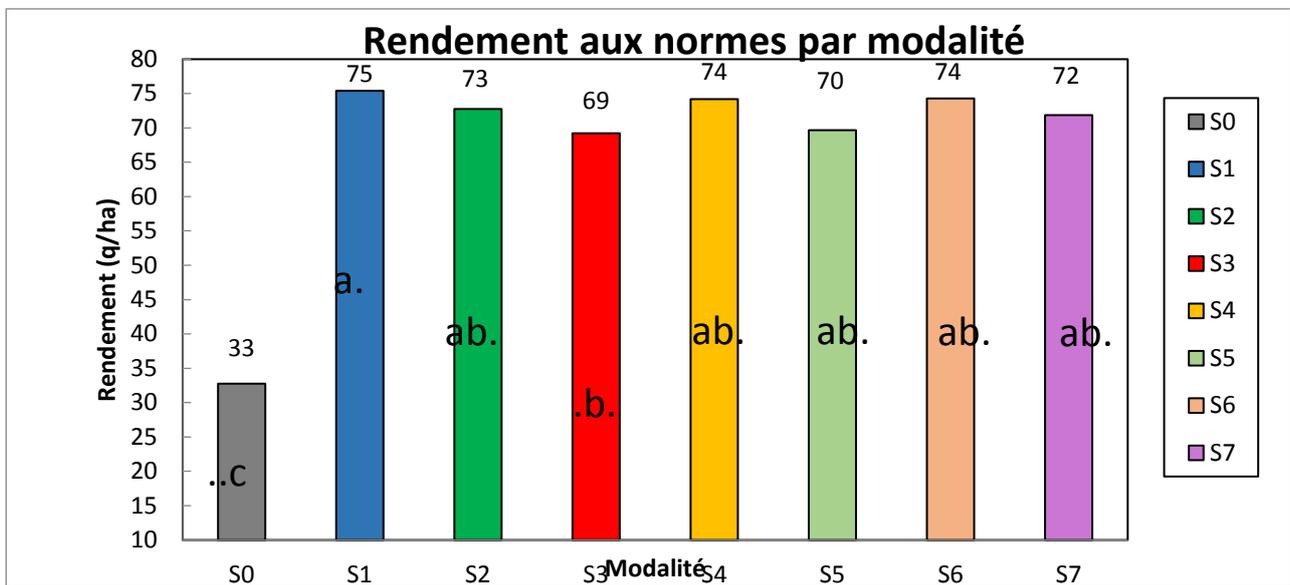


Figure 10 : Rendement aux normes en fonction des modalités pour l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel

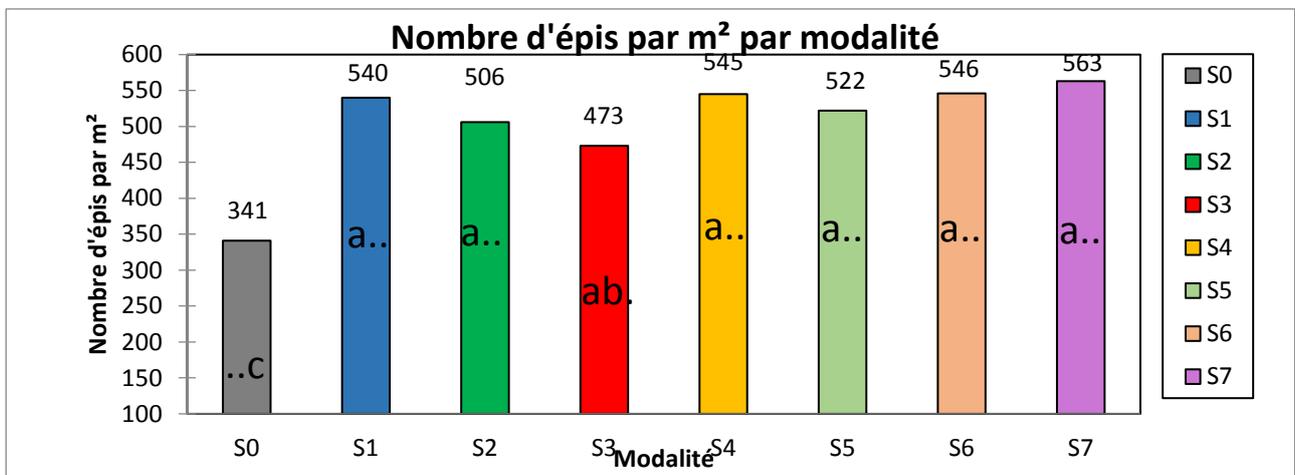


Figure 11 : Nombre d'épis par m² en fonction des modalités pour l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel

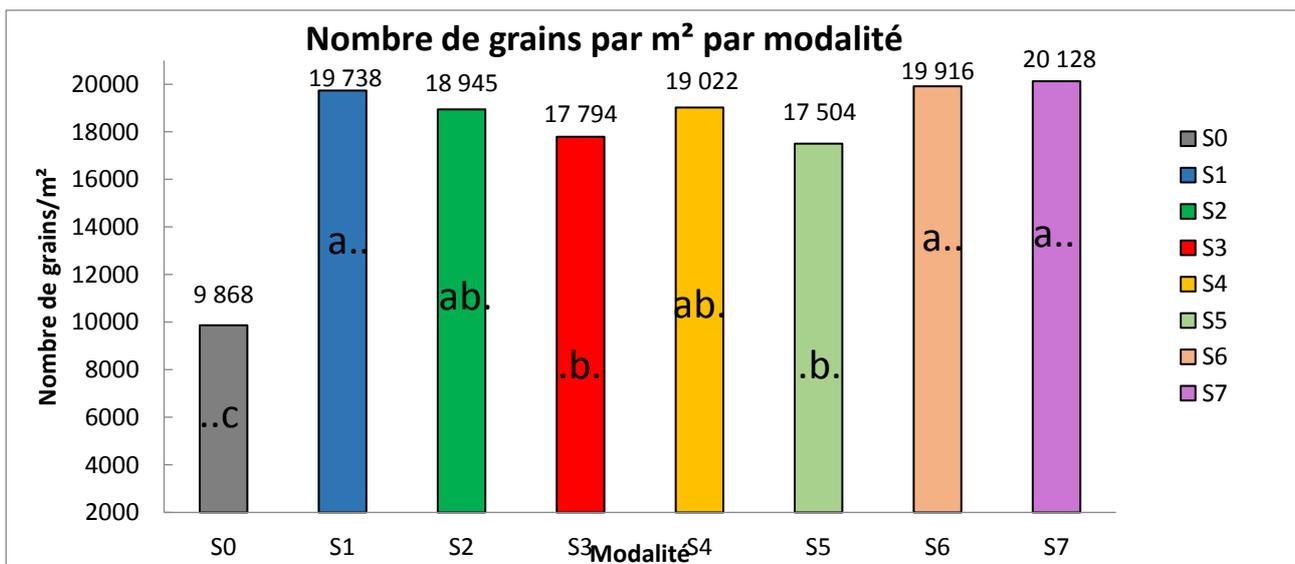


Figure 12 : Nombre de grains par m² en fonction des modalités pour l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel

L'azote total apporté et les dates d'apports engendrées par la méthode APPI-N (S2) sont proches de ce qui se fait avec la méthode du bilan (S1). La différence de fractionnement et plus précisément l'importante dose apportée en fin de cycle avec S2 pourrait conduire à une amélioration du taux de protéines. La méthode CHN (S3) se démarque de la méthode du bilan (S1) par une dose totale d'azote plus importante (+36 uN/ha), ainsi que des apports plus tardifs. La teneur en protéines pourrait donc être meilleure, au détriment du rendement probablement impacté du fait que peu d'azote ait été perçu par la culture avant la période de sécheresse.

b. Présentation des résultats de récolte

Des indicateurs sont utilisés pour évaluer le critère de performance de production. Il s'agit du rendement de la culture (à 15% d'humidité) ainsi que la teneur en protéines des grains, indicateurs pris en compte pour la rémunération des agriculteurs. Chacun des deux indicateurs est soumis à une analyse statistique afin de savoir s'il existe des différences significatives entre les stratégies de fertilisation testées.

Résultats des rendements

Pour cet essai sur sol argilo-calcaire superficiel, seuls les **rendements** aux normes (15% d'humidité) obtenus par la méthode du bilan (S1) et la méthode CHN (S3) sont significativement différents l'un de l'autre (Figure 10). Cette différence ne s'explique pas par la dose totale d'azote apportée car elle est supérieure de 36 unités pour la modalité S3 alors que le rendement est moindre.

L'analyse statistique des composantes de rendements montre que le nombre d'épis par m² n'est pas à l'origine de cette différence (Figure 11). En effet, seul un groupe (hormis pour S0) a été créé par le test de *Tukey*, considérant alors que le nombre d'épis par m² n'est pas significativement différent entre les modalités. La statistique descriptive permet néanmoins de souligner un moindre nombre d'épis par m² pour la modalité S2.

C'est la faible fertilité des épis de S3 qui semble expliquer la différence de rendement avec S1. La Figure 12 montre, en effet, un nombre de grains par m² pour S3 inférieur de 10% par rapport à la modalité S1. Cette mauvaise fertilité des épis de S3 en comparaison à celle de S1 et S2 s'explique par la carence azotée subie pendant la période sèche. Pour rappel l'absence de précipitations du 23 mars au 12 avril a entraîné le report de l'apport nécessité par S3 et la bibliographie montre qu'un stress azoté limite la biomasse produite et induit un indice de nutrition azotée inférieur aux niveaux optimaux (Perspectives agricoles, 2012). Ce fait est confirmé par la valeur de l'INN obtenue au stade floraison égale à 0.8 alors que l'INN visé est de 0.9.

La moindre quantité de grains pour S3 ne semble pas avoir été compensée par un meilleur remplissage des grains (PMG=39 g pour S3 et PMG=38 pour S1). Cependant, ce point reste de l'ordre de la description et ne peut constituer une affirmation car l'analyse statistique n'a pas pu être réalisée (un seul PMG par modalité).

Pour les autres modalités, les rendements ne présentent pas de différences significatives. Entre ces modalités seule la dose totale appliquée diffère car le fractionnement des apports est identique (sauf pour le 1^{er} apport de S2). Le fait que les rendements soient proches montre que, dans cette situation, l'azote n'était pas limitant pour le rendement. De plus, l'absence de différence significative entre les modalités destinées à obtenir des courbes de réponse à l'azote, prouve que la dose d'azote prévisionnelle X (154 uN/ha) était trop élevée. La surestimation de la dose X pourrait provenir d'une mauvaise estimation du RSH à cause de la présence non négligeable de cailloux (ici 15%) (Meynard et Jeuffroy, 2019).

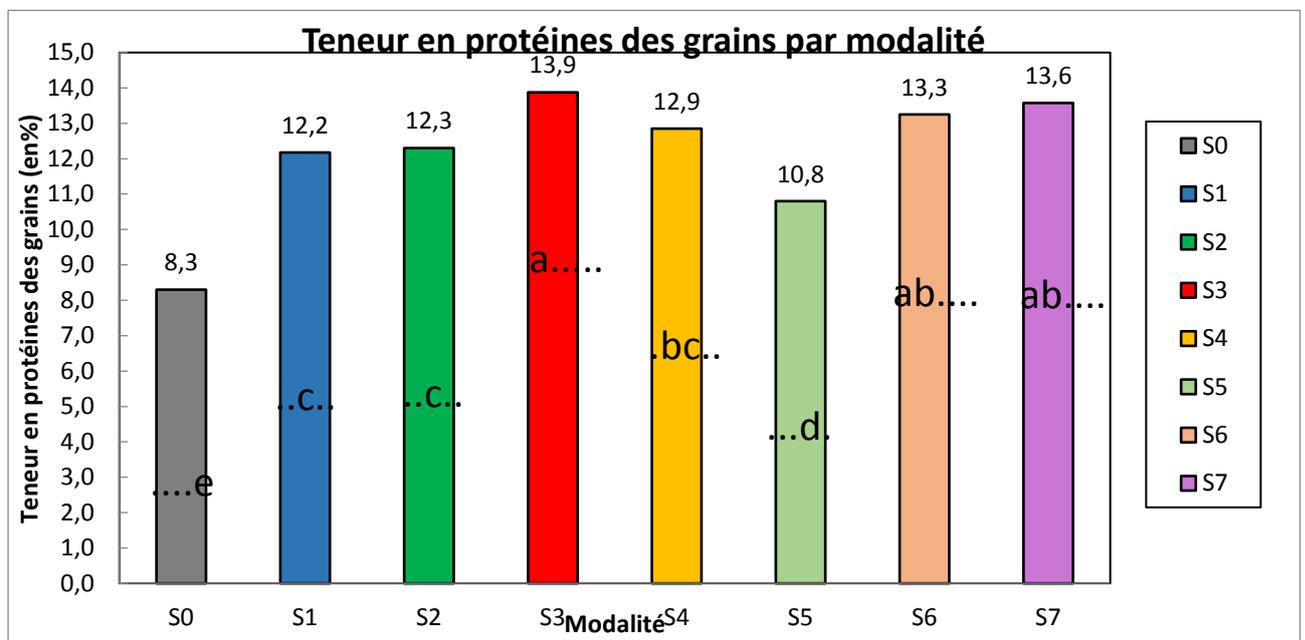


Figure 13 : Teneur en protéines en fonction des modalités pour l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel

Tableau 4 : Fractionnement et doses des apports d'azote réalisés sur l'essai sur sol argileux lourd

	Dates et doses des apports en uN/ha						Azote total apporté (uN/ha)
	12 février Fin tallage	25 février Epi 0.5 cm	4 mars Epi 1 cm	11 mars Début 1 nœud	16 avril Sortie dernière feuille	5 mai Floraison	
S1 Méthode du bilan	40		55		40		135
S2 Méthode APPI-N			60		80		140
S3 Méthode CHN			40		100	50	190
S4 Méthode du bilan + pilotage	40		55		80		175
S5 X-40				55	40		95
S6 X+40		50		85	40		175
S7 X+80		60		100	55		215

→ Dans cet essai, les pilotages par la méthode du bilan (S1) et par la méthode APPI-N (S2) permettent l'obtention de rendements similaires. Ainsi, la carence précoce en azote volontairement créée par la méthode APPI-N n'impacte pas le rendement du blé. En revanche, la méthode CHN (S3) est à l'origine d'un rendement plus faible : en moyenne 6 q/ha par rapport à la méthode du bilan et 4 q/ha par rapport à la méthode APPI-N. Cette différence de rendement est la conséquence d'un problème dans le fractionnement des apports. En effet, à cause de l'absence de précipitations évoquée précédemment, le blé piloté par S3 n'a pas pu bénéficier d'azote lorsqu'il en avait besoin. Le 1^{er} apport réalisé sur la modalité S2, moins tardif que celui de S3, a permis d'effectuer le 2^{ème} apport avant la période sèche et donc de limiter la carence azotée (avant floraison 160 uN/ha apportées sur S2 contre 130 sur S3).

Résultats des taux de protéines

La qualité de la production s'évalue par la **teneur en protéines** des grains, pour laquelle la moyenne de l'essai est de 12.7%. La valeur obtenue pour la modalité S5 (dose d'azote X conseillée par la méthode du bilan – 40 unités : X-40) est significativement différente des valeurs des autres modalités (Figure 13). En excluant le témoin S0, la modalité S5 entraîne l'obtention de la plus basse teneur en protéines dans les grains (10.8%). Les dates d'apports étant identiques à celles des autres modalités (à l'exception de S3), ce résultat s'explique par la faible dose totale d'azote apportée. En effet, les autres doses sont supérieures, au minimum, de 40 unités. Ainsi, dans ce contexte et dans un objectif de production de blé panifiable, la norme pour la teneur en protéines étant de 11.5%, l'azote est un facteur limitant.

La méthode CHN (S3) se distingue significativement de la méthode du bilan (avec et sans pilotage du dernier apport – S1 et S4) ainsi que de la méthode APPI-N (S2) car le dernier apport est bien plus tardif : au stade floraison début mai pour S3 contre un dernier apport au stade dernière feuille étalée autour du 20 avril pour S1, S2 et S4. La haute teneur en protéines obtenue avec S3 s'explique également par la relation inversement proportionnelle entre teneur en protéines des grains et rendement (effet de dilution des protéines), le rendement obtenu avec S3 étant le plus faible (Perspectives agricoles, 2014).

Il est également important de noter que les teneurs en protéines pour S1 et S2 sont statistiquement identiques alors qu'il existe un écart de 40 unités d'azote apportées lors du dernier apport, effectué à la même date. En plus de la contribution au taux de protéines des grains, le dernier apport sur S2 a donc davantage contribué au rendement que celui sur S1.

→ Les teneurs en protéines des grains obtenues avec la méthode du bilan (S1) et la méthode APPI-N (S2) ne présentent pas de différences significatives et sont légèrement supérieures à 12%. La méthode CHN (S3) se distingue avec une teneur en protéines proche de 14%, expliquée par un dernier apport davantage tardif ainsi qu'un rendement plus faible. Dans un objectif de blé panifiable, les trois méthodes testées répondent positivement à ce critère qualitatif.

1.2. Essai sur sol argileux lourd

a. Présentation des plans de fumure azotée

Pour chacune des modalités testées, les doses et fractionnements d'azote sont présentés Tableau

4.

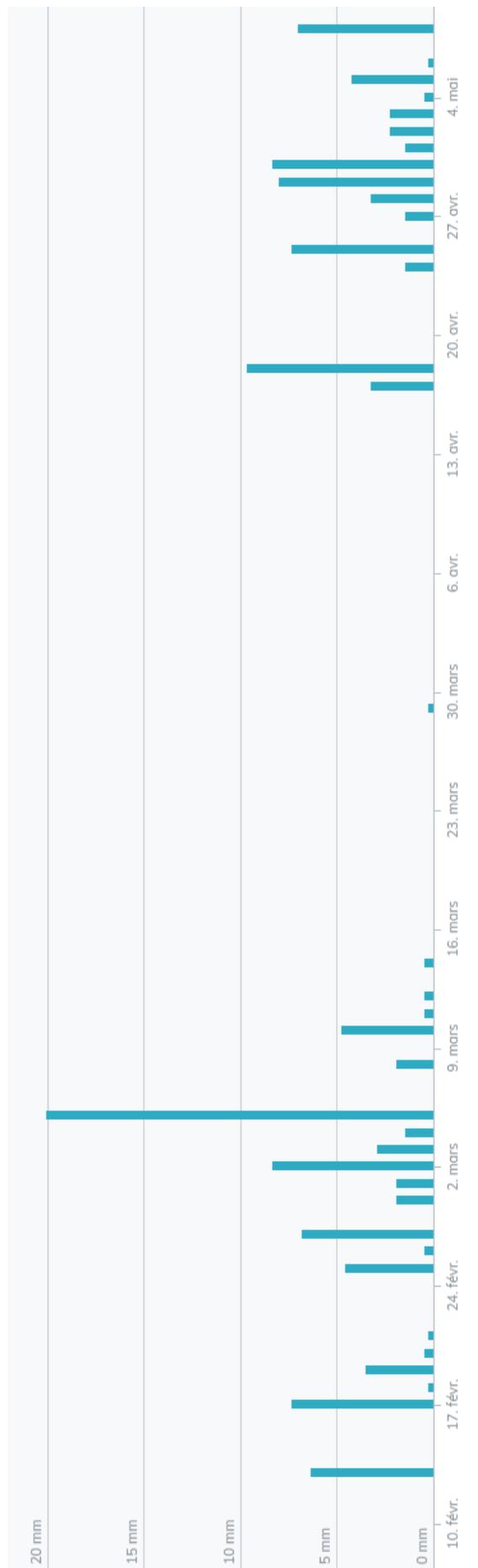


Figure 14 : Relevés pluviométriques de la station à proximité de l’essai de Laverdines (Sencrop – station de Villequiers)

Modalité S1 – méthode du bilan

Pour la **modalité S1**, la dose totale de 135 uN/ha a été appliquée aux stades conseillés par le plan de fumure et en tenant compte des prévisions de précipitations (conditions optimales : 15 mm dans les 15 jours suivants l'apport ; ARVALIS-Institut du végétal 1996-1997). Les trois apports d'azote ont été suivis de précipitations les 15 jours suivants : 23.4 mm pour le 1^{er} apport, 30 mm pour le 2^{ème} et 43.2 mm pour le dernier apport (Figure 14). La majorité de l'azote apporté devrait donc être valorisée. La modalité S4 est conduite comme la méthode du bilan (S1) mais avec un pilotage du dernier apport à la pince N-Tester®. Le diagnostic du N-Tester®, effectué le 16 avril, préconisait un apport immédiat de 80 uN/ha soit le double de ce qui a été apporté sur S1. Sachant que le dernier apport contribue en grande partie à augmenter la teneur en protéines, celle pour S1 pourrait être limitée (ARVALIS-Institut du végétal, 2013).

Modalité S2 – méthode APPI-N

La dose totale d'azote apportée avec le pilotage par la **modalité S2** est proche de celle engendrée par la modalité S1 (+5 uN/ha).

Une première mesure avec la pince N-Tester® a été faite le 25 février et n'a pas indiqué de besoin en azote.

La mesure du 4 mars a mis en évidence un besoin du blé de 60 uN/ha et la pluviométrie de 20 mm le jour suivant a permis la réalisation de l'apport (Figure 14).

L'absence de précipitations du 16 mars au 15 avril a rendu impossible l'apport de 40 uN/ha nécessités par la culture entre le 20 et le 25 mars. La non-réalisation de l'apport a entraîné une augmentation des besoins à 80 uN/ha entre fin mars et mi-avril. Or, il faudra attendre le 16 avril pour apporter 80 uN/ha juste avant les 13 mm de pluie des 2 jours suivants (Figure 14). Durant le mois de sécheresse, la culture pourrait avoir subi une carence en azote à l'origine d'une perte de rendement.

Les mesures effectuées jusqu'au stade floraison n'ont démontré aucun besoin azoté. La modalité S2 ne compte donc que deux apports, apports que l'on peut qualifier de tardifs car effectués aux dates pour lesquelles S1 reçoit ses deuxième et troisième apports. Ainsi, lorsque S2 reçoit ses 60 premières uN/ha, S1 en a déjà reçu 95. Le décalage temporel du 1^{er} apport pour S2 devrait être à l'origine d'une valorisation globale des engrais meilleure pour S2 que pour S1 (Limaux, 1994 ; Ravier 2017).

Pour le dernier apport, la dose apportée sur S2 est deux fois plus importante que celle apportée sur S1, ce qui pourrait maximiser le taux de protéines (ARVALIS-Institut du végétal, 2013).

Modalité S3 – méthode CHN

Dans cet essai le fractionnement induit par la **modalité S3** est similaire à celui dans l'essai de Senneçay. En effet, l'apport de 40 uN/ha au stade Epi 1 cm est tardif en comparaison à la modalité S1 pour laquelle le 1^{er} apport est positionné fin tallage. Pour la pluviométrie, 30 mm dans les 15 jours font suite à l'apport dont 20 mm le lendemain.

Cinquante unités d'azote par hectare étaient préconisées par le modèle CHN fin mars mais n'ont pas été apportées faute de précipitation (Figure 14). Alors, seul un apport a pu être fait avant la période sèche, période durant laquelle la culture a probablement subi une carence azotée. Cette dernière pourrait être la cause d'une perte de rendement.

Le retour des précipitations à partir de mi-avril (43.2 mm du 16 au 30 avril) a permis un apport de 100 uN/ha. Comme pour l'autre essai, le décalage des dates d'apports par rapport à la modalité S1 est tel que ce 2^{ème} apport pour S3 est réalisé lors du dernier de S1.

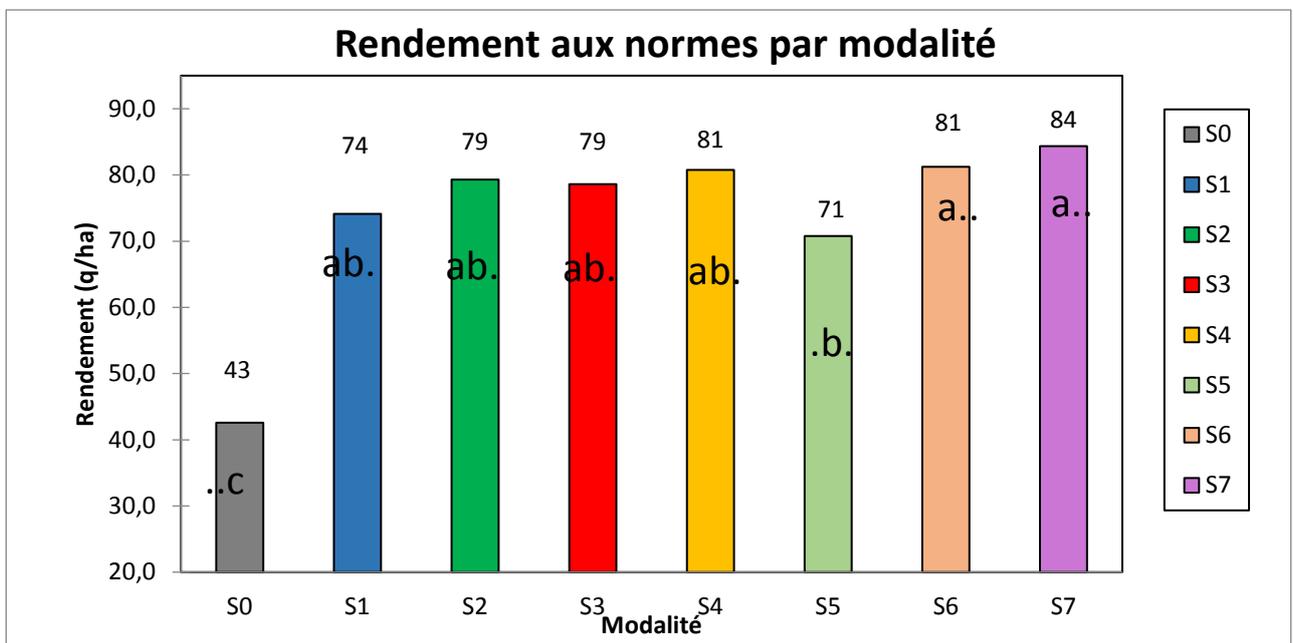


Figure 15 : Rendement aux normes en fonction des modalités pour l'essai sur sol argileux lourd

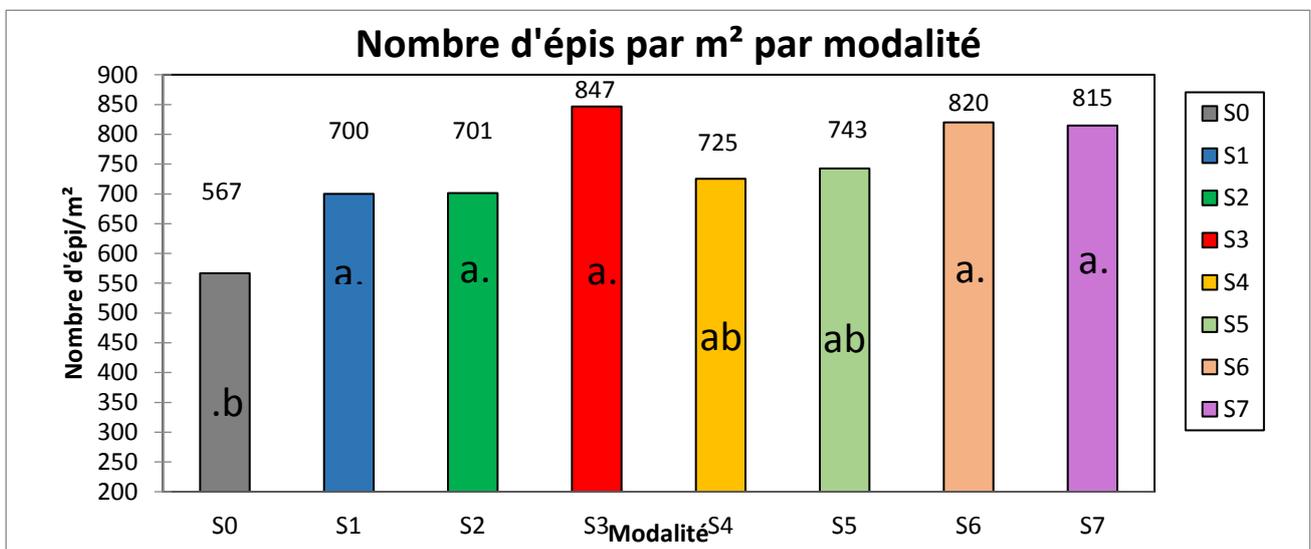


Figure 16 : Nombre d'épis par m² en fonction des modalités pour l'essai sur sol argileux lourd

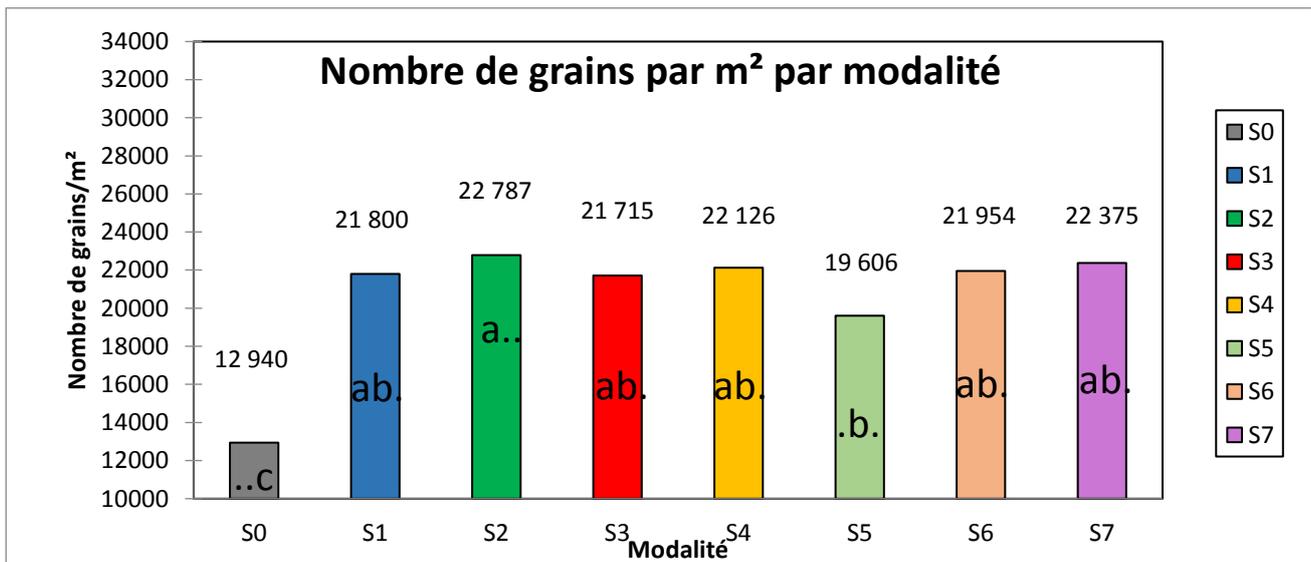


Figure 17 : Nombre de grains par m² en fonction des modalités pour l'essai sur sol argileux lourd

Un dernier apport de 50 uN/ha est fait au stade floraison (début mai) et est suivi de 45 mm dans les 10 jours.

→ L'azote total apporté et les dates d'apports engendrées par la méthode APPI-N (S2) sont proches de ce qui se fait avec la méthode du bilan. La différence de fractionnement et plus précisément l'importante dose apportée en fin de cycle avec S2 pourrait conduire à une amélioration du taux de protéines. La méthode CHN (S3) se démarque de la méthode du bilan (S1) par une dose totale d'azote plus importante (+55 uN/ha), ainsi que des apports plus tardifs. La teneur en protéines pourrait donc être meilleure, au détriment du rendement probablement impacté du fait que peu d'azote ait été soumis à la culture avant la période de sécheresse.

b. Présentation des résultats de récolte

Tout d'abord, il est important de préciser que cet essai a subi des attaques de pucerons vecteurs de la jaunisse nanisante de l'orge. Les symptômes de ce virus (décoloration des dernières feuilles, diminution de la végétation voire perte de pieds) sont visibles à la reprise de végétation sous forme de foyers. Une mauvaise nutrition des épis peut également être occasionnée et tout cela induit des pertes de rendement et de qualité du blé (BASF, sd). Le bloc 1 ayant fortement été touché par cette virose, les données de celui-ci sont écartées des analyses statistiques.

Résultats des rendements

Sur cet essai l'azote semble davantage limitant que dans l'essai de Senneçay. En effet, le **rendement** de la modalité S5 (X-40) est significativement inférieur aux rendements de S6 et S7 (respectivement X+40 et X+80). Cela montre qu'une dose totale d'azote égale à X-40 est insuffisante, bien qu'elle permette un résultat supérieur à l'objectif de rendement (71 q/ha contre un objectif de 68 q/ha) (Figure 15). Le rendement de la modalité S1 étant égal à celui des modalités S6 et S7, la dose X (135 uN/ha) préconisée était suffisante.

Le nombre d'épis par m² n'est pas à l'origine du moindre rendement obtenu par la modalité S5 puisque le test de *Tukey* conclut à l'absence de différences significatives entre les modalités (Figure 16).

Bien que les résultats ne soient pas statistiquement significatifs, une tendance est observable entre la modalité S5 et les modalités S6 et S7 : plus la dose d'azote apportée est grande, plus le nombre de grains par m² est grand et plus le rendement est important (Figure 17). Le rendement le plus faible obtenu pour la modalité S5 semble donc provenir du nombre limité de grains par m², lui-même causé par un manque d'azote. L'analyse statistique ne permet cependant pas de l'affirmer au seuil de confiance de 95%. En revanche, elle démontre une différence du nombre de grains par m² entre la modalité S2 et S5 (Figure 17). Les rendements étant égaux, un meilleur remplissage des grains a probablement compensé le faible nombre de grains pour S5. Ainsi, la donnée manquante pour terminer l'analyse est le PMG or, son analyse statistique est impossible pour les raisons évoquées précédemment (une seule valeur de PMG par modalité).

Néanmoins, il n'existe pas de différence significative de rendement entre les modalités S1, S2 et S3. A noter également que l'objectif d'INN au stade floraison fixé à 0.9 est atteint pour les 3 modalités.

→ A doses d'azote apportées quasiment identiques pour la conduite de la fertilisation par la méthode du bilan (S1) et par la méthode APPI-N (S2), les rendements sont similaires. Ainsi, il est possible de valider une nouvelle fois qu'un 1^{er} apport tardif n'est pas préjudiciable pour le rendement. Le pilotage par la méthode CHN (S3) augmente l'azote fourni à la culture (+50-55 uN/ha), azote cependant non valorisé dans le rendement.

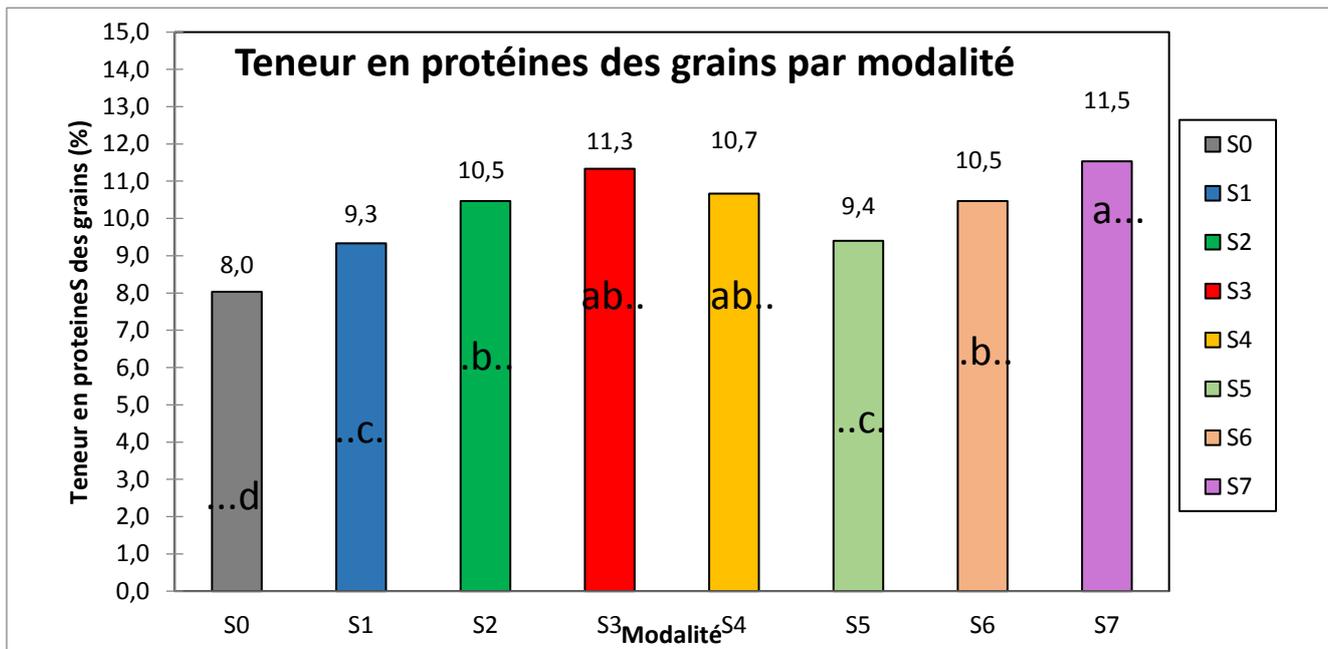


Figure 18 : Teneur en protéines en fonction des modalités pour l'essai sur sol argileux lourd

Résultats des taux de protéines

Concernant la **teneur en protéines** des grains, la moyenne de l'essai se trouve à 10.5%. La modalité S1 se distingue des modalités S2 et S3 par un faible taux de protéines (Figure 18). Les doses totales d'azote appliquées sur les modalités S1 et S2 sont quasiment identiques alors, la différence soulevée s'explique par le fractionnement. Pour rappel, seuls deux apports ont été effectués avec S2 et les dates correspondent aux 2^{ème} et 3^{ème} apports de la conduite avec S1. Pour le dernier apport la dose apportée sur S2 est deux fois plus importante que celle apportée sur S1. Ainsi, pour le taux de protéines, l'azote apporté en fin de cycle a été limitant.

Le pilotage par la modalité S3 a lui-aussi permis de se démarquer de S1 grâce à un décalage des apports en faveur des apports tardifs. La teneur en protéines obtenue pour la modalité S4 (méthode du bilan avec pilotage du dernier apport), égale à celles des modalités S2 et S3, prouve que dans ce contexte, un pilotage en fin de cycle était nécessaire pour détecter un besoin réel en azote supérieur au besoin prévisionnel et donc, maximiser la qualité protéique des grains.

Les décalages observés dans les dates d'apports associés à l'augmentation des taux de protéines des grains permettent d'envisager une valorisation du blé produit en meunerie. Dans le contexte de l'essai, aucune des trois modalités n'atteint le taux de référence fixé à 11.5% bien que la modalité S3 en soit proche.

- Le suivi de la nutrition azotée de la culture réalisé dans le cadre des pilotages APPI-N et CHN (S2 et S3) a permis de maximiser le taux de protéines des grains par rapport à la méthode du bilan (S1). Dans le contexte de l'essai, cela passe par des apports en fin de cycle plus élevés que la dose prévue par la méthode du bilan sans pilotage du dernier apport (S1).

Dans les contextes pédoclimatiques des deux essais menés sur la campagne 2019-2020, le pilotage de la fertilisation azotée par la méthode APPI-N (S2) engendre des doses totales d'azote similaires à celles issues d'une conduite par la méthode du bilan (S1). La méthode CHN (S3) maximise quant à elle les doses d'azote à apporter. Cependant, cet azote supplémentaire n'est pas valorisé puisque les rendements CHN sont soit identiques à ceux des deux autres modalités (essai à Laverdines) soit inférieurs (essai à Senneçay).

Le pilotage par la méthode CHN (S3) tend, tout de même, à obtenir des taux de protéines des grains supérieurs à ceux obtenus avec la méthode du bilan (S1). Cela s'explique par le dernier apport toujours plus tardif pour le pilotage par CHN.

Les résultats de rendements entre la méthode du bilan (S1) et la méthode APPI-N (S2) ne présentent pas de différence bien que les dates d'apports soient, de manière générale, plus tardives pour la méthode APPI-N. Les apports tardifs n'étant pas préjudiciables pour le rendement, l'étude montre qu'en cas, par exemple, de problème d'organisation, les agriculteurs peuvent déprioriser l'apport au stade tallage du blé tendre d'hiver.

Le pilotage par la méthode APPI-N (S2) assure un taux de protéines des grains a minima égal à celui permis par la méthode du bilan (S1) et a maxima égal à celui de la méthode CHN (S3).

Dans les conditions des essais, l'hypothèse selon laquelle le pilotage de la fertilisation azotée par S3 améliore la teneur en protéines des grains peut donc être validée, bien que ce soit au détriment du rendement. La même hypothèse au sujet du pilotage par S2 n'est pas validée dans les deux essais mais il est tout de même possible d'affirmer qu'avec cette méthode, le taux de protéines obtenu est « au pire » égal à celui obtenu avec la méthode du bilan (S1).

Tableau 5 : Coefficient Apparent d'Utilisation (CAU) des engrais, calculé dans chaque essai pour les modalités S1, S2 et S3

CAU	S1	S2	S3
Sol argilo-calcaire superficiel (Senneçay)	98 %	91 %	71 %
Sol argileux lourd (Laverdines)	64 %	77 %	69 %

2. Résultats et analyses de l'impact environnemental

Le Tableau 5 présente les valeurs de CAU mesurées pour les modalités S1, S2 et S3 dans les deux essais.

Dans l'essai de Senneçay sur sol argilo-calcaire superficiel, les apports d'engrais ont été les mieux valorisés lors d'une gestion de la fertilisation azotée par la méthode du bilan (S1 – CAU = 0.98). Celui-ci est suivi de près par le CAU obtenu par un pilotage avec la méthode APPI-N (S2 – CAU = 0.91). En revanche, la valorisation des apports a été moindre dans le cas du pilotage par la méthode CHN (S3 – CAU = 0.71). Les pertes d'azote sont alors susceptibles d'être plus importantes. Le rendement en blé obtenu à la suite du pilotage par S3 est statistiquement inférieur aux rendements de S1 et S2. Rappelons que la statistique descriptive montre un nombre d'épis par m² plus faible pour S3, bien que non confirmé par le test statistique (Test de *Tukey*). Le nombre d'épis s'établit en 2 phases : une phase hivernale où des talles sont émises (période de tallage) et une phase printanière où les talles les plus jeunes régressent (montaison) (ARVALIS-Institut du végétal, sd). Ainsi, il est possible d'émettre l'hypothèse selon laquelle le nombre d'épis pour la modalité S3 a été impacté au moment du tallage à cause d'un manque d'azote. En effet, le premier apport de S3 a été réalisé le 5 mars au stade Epi 0.7 cm contre les 12 et 26 février pour les modalités S1 et S2 (respectivement au stade tallage et au stade Epi 0.3 cm). L'efficacité de ces apports en février pourrait donc être à l'origine de la maximisation des CAU totaux par rapport à celui obtenu pour S3. Ajouté à cela, le dernier apport réalisé sur S3 le 5 mai n'a été suivi que de 4 mm de pluie, ce qui a pu limiter l'efficacité d'utilisation de l'engrais.

Dans l'essai de Laverdines sur sol argileux lourd, c'est le pilotage par S2 qui a le mieux valorisé les engrais apportés (CAU = 0.77). Le CAU obtenu par la modalité S3 est inférieur (CAU = 0.69), ce qui peut s'expliquer par le dernier apport (trop ?) tardif du 5 mai, pourtant suivi de 45 mm de pluie dans les 10 jours. Cette moindre valeur peut également s'expliquer par la dose totale d'azote apportée supérieure de 50 uN/ha. Quant au pilotage par S1, il entraîne l'obtention du CAU le plus faible en comparaison aux deux autres méthodes testées (CAU = 0.64). La dose totale d'azote apportée étant inférieure (135 uN/ha pour S1, 140 pour S2 et 190 pour S3) et les dates des deuxième et troisième apports, identiques aux apports de S2 et S3, l'origine du faible CAU peut résider dans le premier apport. En effet, le reliquat sortie hiver était de 60 kgN/ha ce qui a permis de décaler dans le temps le premier apport sans impacter le rendement. Le moindre CAU obtenu pour S1 pourrait donc être causé par une faible valorisation du premier apport réalisé le 12 février.

Dans les contextes pédoclimatiques des deux essais menés sur la campagne 2019-2020, le pilotage de la fertilisation azotée par la méthode APPI-N (S2) permet de bonnes valorisations des apports d'engrais. En effet, soit celui-ci est amélioré par rapport à la méthode du bilan (S1) et la méthode CHN (S3), soit il est proche du CAU maximal obtenu. Dans le type de sol argilo-calcaire superficiel pour lequel la disponibilité en azote est limitée à la sortie de l'hiver (RSH=33 kgN/ha), la méthode CHN (S3) ne semble pas avoir anticipé le soutien azoté dont la culture a besoin en début de cycle comme cela a été fait par la méthode APPI-N (S2). En effet, le premier apport sur S2 est temporellement proche de celui réalisé sur S1, modalité obtenant le meilleur CAU. Les pertes azotées susceptibles d'être plus importantes pour S3 peuvent également être causées par une dose totale d'azote apportée bien plus importante. En revanche, sur sol à texture argileuse lourde pour lequel davantage d'azote est disponible pour la culture à la sortie de l'hiver, effectuer un premier apport tardif par rapport à la méthode du bilan (S1) semble maximiser le CAU.

Tableau 6 : Calculs des marges brutes dégagées par les modalités S1, S2 et S3 pour l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel

	Rendement (q/ha)	Chiffre d'affaires (€/ha)	Dose d'azote apporté (uN/ha)	Coût d'achat de l'azote	Nombre de passage pour apporter l'azote	Coût des apports d'azote	Charges de fertilisation	Marges brutes (€/ha)
S1	75	1230	154	42.35	3	11.1	53.45	1177
S2	73	1197.2	160	44	3	11.1	55.1	1142
S3	69	1131.6	190	52.25	3	11.1	63.35	1068

Tableau 7 : Calculs des marges brutes dégagées par les modalités S1, S2 et S3 pour l'essai sur sol argileux lourd

	Rendement (q/ha)	Chiffre d'affaires (€/ha)	Dose d'azote apporté (uN/ha)	Coût d'achat de l'azote	Nombre de passage pour apporter l'azote	Coût des apports d'azote	Charges de fertilisation	Marges brutes (€/ha)
S1	71	1133.2	135	37.12	3	11.1	53.45	1085
S2	76	1231.2	140	38.5	2	7.4	55.1	1185
S3	75	1230	190	52.25	3	11.1	57.85	1167

L'hypothèse selon laquelle les pilotages de la fertilisation azotée par S2 et S3 améliorent la valorisation des apports d'azote peut donc être validée dans l'essai sur sol argileux lourd. Pour l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel, l'hypothèse n'est pas validée bien que la valorisation des engrais dans le cas du pilotage par la méthode APPI-N (S2) soit proche de celle avec un pilotage par la méthode du bilan (S1).

3. Résultats et analyses de la performance économique

Dans l'essai de Senneçay, la conduite par la méthode du bilan (S1) présente la marge brute la plus intéressante (1180€/ha) suivie de près par la marge brute correspondant à un pilotage par la méthode APPI-N (S2 - 1140€/ha) (Tableau 6). La différence s'explique par un rendement légèrement inférieur et une dose totale d'azote supérieure pour le pilotage par S2. Dans les conditions de l'essai, la méthode CHN (S3) est à l'origine d'une marge brute inférieure d'environ 100€/ha par rapport aux deux autres méthodes. Cet écart de marge s'explique par le moindre rendement obtenu couplé à une dose d'engrais plus importante.

Sur l'essai de Laverdines, les faibles taux de protéines obtenus engendrent des pénalités sur le prix de vente du blé pour deux des modalités testées. La pénalité appliquée par la coopérative Axéreal est de diminuer le prix de vente du blé de 2 €/t pour 1 point de protéines en deçà de la valeur de référence. Le taux de protéines des grains de la modalité S2 étant de 10.5%, le prix de vente passe de 164 à 162 €/t de blé produit (Tableau 7). Pour la modalité S1, le prix de vente utilisé est de 160€/t car le taux de protéines est de 9.3%. Cependant, le représentant d'Axéreal rencontré a précisé qu'en réalité lorsque le taux de protéines est inférieur à 10%, il est nécessaire de trouver des marchés spécifiques. Malgré les pénalités appliquées sur les prix de vente à cause des taux de protéines, les marges brutes dégagées par hectare sont, pour les trois modalités, proches les unes des autres. La plus faible marge brute est celle dégagée par le pilotage par S1 (1085 €/ha). Le faible écart avec les autres marges brutes s'explique par la dose totale d'azote apportée inférieure aux deux autres. Le pilotage par S2 assure une meilleure performance économique (1185€/ha) que S1 grâce à un meilleur rendement pour une dose totale d'azote similaire ainsi qu'un nombre réduit de passage d'épandeur. La marge brute dégagée par le pilotage par S3 (1167€/ha) est légèrement inférieure à S2, dû à une dose d'azote supérieure et un passage d'épandeur supplémentaire. Bien que la dose d'azote appliquée pour S3 soit de 50 uN/ha supérieure à celle dans le cas du pilotage par S1, la marge brute est meilleure grâce à un rendement et un prix de vente plus importants.

En termes de performance économique, les marges brutes dégagées par les trois modalités sont proches. Dans les contextes pédoclimatiques des deux essais menés sur la campagne 2019-2020, le pilotage par la méthode APPI-N (S2) est à l'origine d'une marge brute par hectare soit meilleure que celles des deux autres pilotages soit proche de la meilleure obtenue. Le pilotage par la méthode CHN (S3) assure un prix de vente sans pénalité grâce aux bons taux de protéines obtenus. La marge brute dégagée peut cependant être pénalisée à cause d'importants apports en azote qui ne sont pas valorisés dans le rendement.

L'hypothèse selon laquelle les pilotages de la fertilisation azotée par S2 et S3 améliorent la rentabilité économique peut donc être validée dans l'essai sur sol argileux lourd. Pour l'essai sur sol argilo-calcaire superficiel, l'hypothèse n'est pas validée bien que la marge brute dégagée dans le cas du pilotage par la méthode APPI-N (S2) soit proche de celle avec un pilotage par la méthode du bilan (S1).

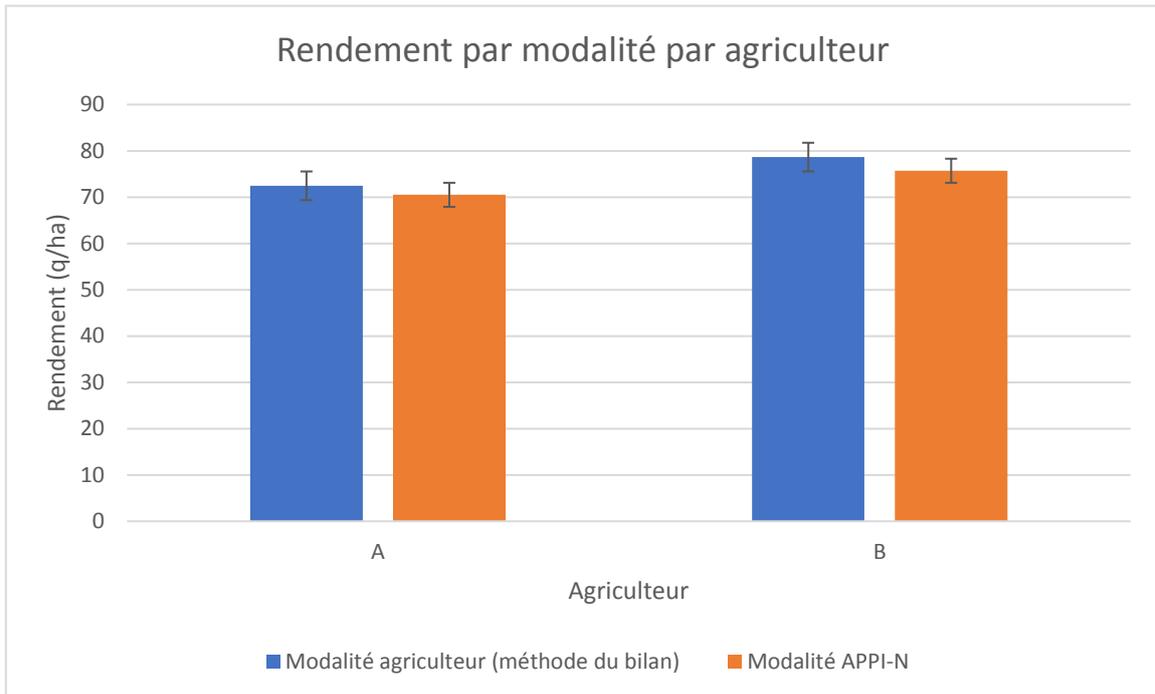


Figure 19 : Rendements moyens obtenus sur les deux années d'essais pour les modalités « agriculteurs » et « APPI-N »

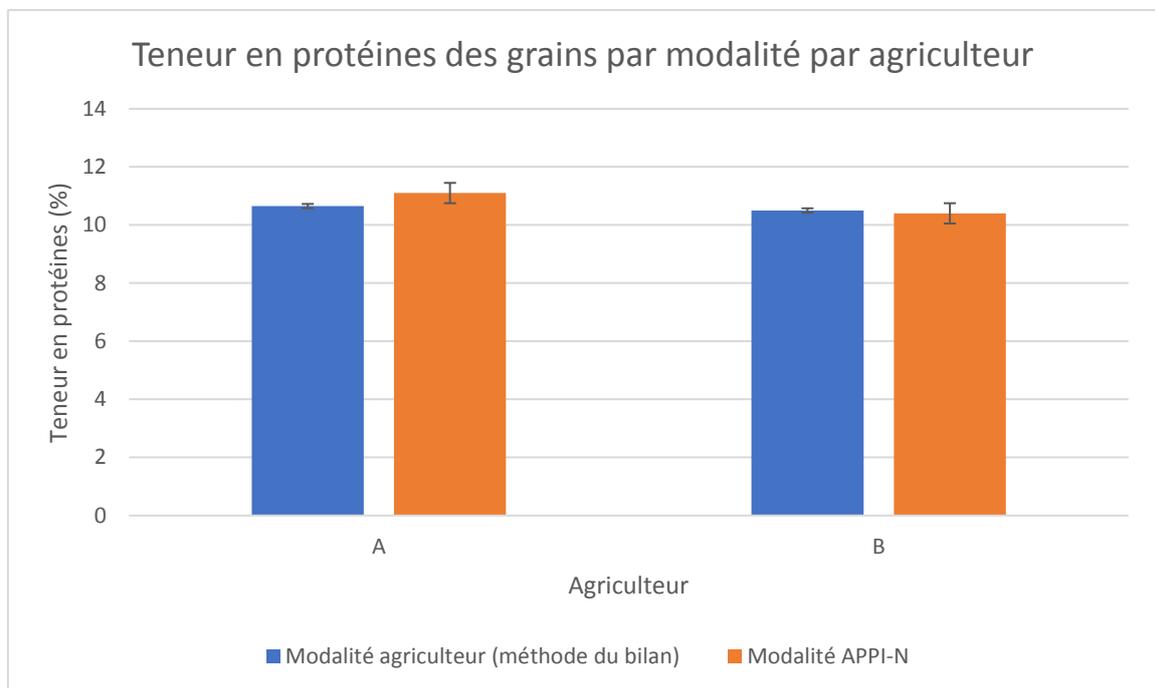


Figure 20 : Teneurs en protéines obtenues sur les deux années d'essais pour les modalités « agriculteur » et « APPI-N »

4. Appropriation de la méthode APPI-N par les agriculteurs

Pour rappel, seule la méthode APPI-N est aujourd'hui testée par des agriculteurs pour évaluer leur appropriation.

La mise en pratique de la méthode APPI-N a été réalisée de manière totalement autonome par les agriculteurs. Les deux agriculteurs sollicités par la FDGEDA du Cher n'ont pas hésité à prendre contact avec Vincent Moulin lorsque des interrogations se présentaient.

4.1. Réactions engendrées par l'application de la méthode APPI-N sur l'agriculteur A

L'application de la méthode a fait émerger trois principaux questionnements pour l'agriculteur A. Voyant le blé conduit par la méthode du bilan plus vert que celui de la surface sur-fertilisée, il s'est questionné sur la pertinence de cette dernière. Par curiosité il a utilisé la pince N-Tester®, dont le résultat a confirmé ses observations. Après discussion avec Vincent Moulin, il a été accordé d'utiliser le blé conduit par la méthode du bilan au lieu du blé sur-fertilisé pour les calculs des ratios HNT (Hydro-N-Tester). Une autre interrogation est survenue lorsque pour une même valeur d'INN à une date donnée, deux valeurs différentes sont préconisées par l'abaque. Par exemple, pour un INN de 0.9 entre le 15 et le 30 avril, les doses possibles d'appliquer sont 40 et 60 uN/ha. Dans ce cas, une réflexion avec Vincent Moulin a permis de trancher en fonction de l'avancement du stade de la culture et de la valeur exacte de l'INN. Le dernier point concerne la décision d'effectuer un apport ou non dans la situation suivante : après une période sèche durant laquelle aucun apport n'a été effectué, les abaques démontrent un besoin en azote, des précipitations sont prévues mais n'atteignent pas 10 mm, que fait-on ?

Lors du premier entretien, ces aspects ont de nouveau été évoqués mais le principal point mis en évidence concerne la règle, jugée trop stricte, des 10 mm de pluie dans les 3 jours suivants l'apport. L'agriculteur a conscience de l'intérêt de la pluviométrie au moment d'un apport puisqu'il prend cela en considération dans sa conduite par la méthode du bilan. Cependant, dans la situation décrite précédemment (« longue » période sans apporter, besoins en azote, pluies mais inférieures à 10 mm), l'adaptation mise en place par l'agriculteur est d'apporter si une pluie est prévue mais sans prendre en compte la pluviométrie « Je n'aurais jamais apporté si j'avais respecté la règle des 10 mm ». Il a souligné avoir eu, dès le départ, des appréhensions concernant cette règle de décision, appréhensions qu'il considère confirmées. L'application de la méthode l'a également fait se questionner quant à la fiabilité de l'outil utilisé pour estimer l'INN, considérant que la moyenne affichée par la pince N-Tester® n'est pas toujours représentative de la parcelle. Ce point est intéressant car il montre que l'application d'une nouvelle méthode amène l'agriculteur à non seulement porter un regard critique sur l'application en tant que telle mais également sur l'outil mobilisé, existant pourtant depuis plusieurs années. Une remise en question élargie semble s'opérer. Le dernier élément mis en avant par l'agriculteur concerne l'organisation du travail. En effet, les périodes favorables à un apport étant relativement courtes, lorsque la mesure d'INN démontre un besoin en azote, elle doit être rapidement suivie du déclenchement de l'apport. Sinon, il y a un risque que les conditions météorologiques ne soient plus favorables.

Lors de la 2^{nde} rencontre avec les agriculteurs, la présentation de la synthèse de leurs résultats sur les deux années de test a amené de nouvelles réflexions. La Figure 19 montre les rendements moyens obtenus sur les deux ans chez les agriculteurs A et B. Bien que le nombre de répétitions soit faible, la statistique ne démontre pas de différence significative, qu'il s'agisse des rendements (Figure 19) ou des taux de protéines (Figure 20). Face à des performances de productions similaires entre la méthode APPI-N et la méthode du bilan pratiquée par les agriculteurs, l'agriculteur A souligne le fait que l'anxiété ressentie durant la campagne n'était finalement pas justifiée.

4.2. Réactions engendrées par l'application de la méthode APPI-N sur l'agriculteur B

L'agriculteur B a été désorienté par ce changement de méthode car habitué à convenir lui-même du fractionnement et des doses d'azote en s'appuyant sur le plan de fumure prévisionnel fourni par la méthode du bilan et ses observations au champ. Bien qu'averti de la carence forcée par la méthode APPI-N en début de cycle, il s'est questionné lorsque le blé commençait à décolorer. Pourtant, pour les valeurs d'INN obtenues, l'abaque ne démontrait pas de besoins azotés de la part de la culture. La décoloration du blé étant, pour l'agriculteur, synonyme de déficit azoté, les abaques lui ont posé question « Voir le blé tout jaune ça fait peur quand même ! ». De plus, la précocité des stades observée cette année l'a amené à adapter l'abaque : plus précisément, la précocité étant d'environ 2 semaines par rapport aux autres années, les valeurs d'INN mesurées étaient reportées sur l'abaque à la date de mesure +15 jours. Comme l'agriculteur A, l'agriculteur B s'est interrogé lorsque pour une même valeur d'INN il était possible d'appliquer deux doses (différentes de 20 uN/ha). Dans ce cas, il apportait une dose par hectare égale à la moyenne entre les deux valeurs préconisées par l'abaque. Enfin, de la frustration s'est laissé sentir lorsque l'agriculteur a évoqué la période de sécheresse durant laquelle le blé avait besoin d'azote. Une fois le retour des précipitations, les valeurs d'INN ne montraient plus de besoin en azote mais un apport de 40 uN/ha a été réalisé en fin de cycle car la crainte de ne pas avoir apporté assez d'azote était trop importante.

Lors de ce premier entretien, le discours de l'agriculteur était très axé sur les conditions pluviométriques l'ayant empêché, avec cette méthode, de réaliser les apports d'azote dont le blé nécessitait. Il considère les conséquences de cette règle de décision comme une prise de risque trop importante.

Malgré la similitude des résultats présentés lors du 2nd échange, l'agriculteur B ne sous-estime, quant à lui, pas la légitimité de l'anxiété ressentie lors des périodes sèches.

L'application de la méthode APPI-N a suscité des réactions de la part des agriculteurs au sujet notamment de l'utilisation des abaques et de la règle de décision concernant les conditions pluviométriques nécessaires. C'est donc sur ces deux points que les agriculteurs ont fait des adaptations. L'INRAE est demandeur de ces adaptations mais l'utilisation qu'il souhaite en faire n'est pas connue. Le point similaire aux deux agriculteurs est l'anxiété ressentie face à l'impossibilité d'apporter de l'azote à la culture sur certaines périodes. Pour l'un des deux, la présentation des résultats fut l'occasion de prendre du recul sur cette réaction, qui sera donc possiblement mieux gérée la campagne prochaine. Les deux agriculteurs ont également mis en avant le fait que ce pilotage est réalisable sur la surface mise en test mais inconcevable sur toute l'exploitation car le suivi de l'INN par la pince N-Tester® est chronophage.

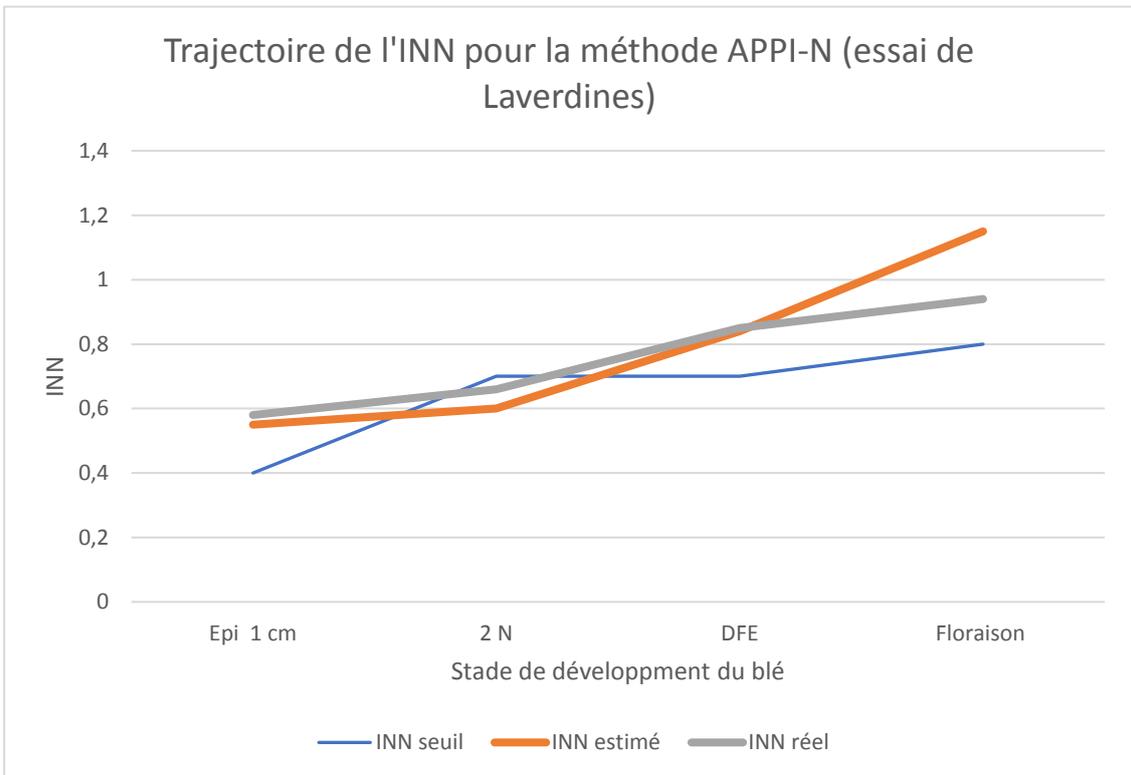
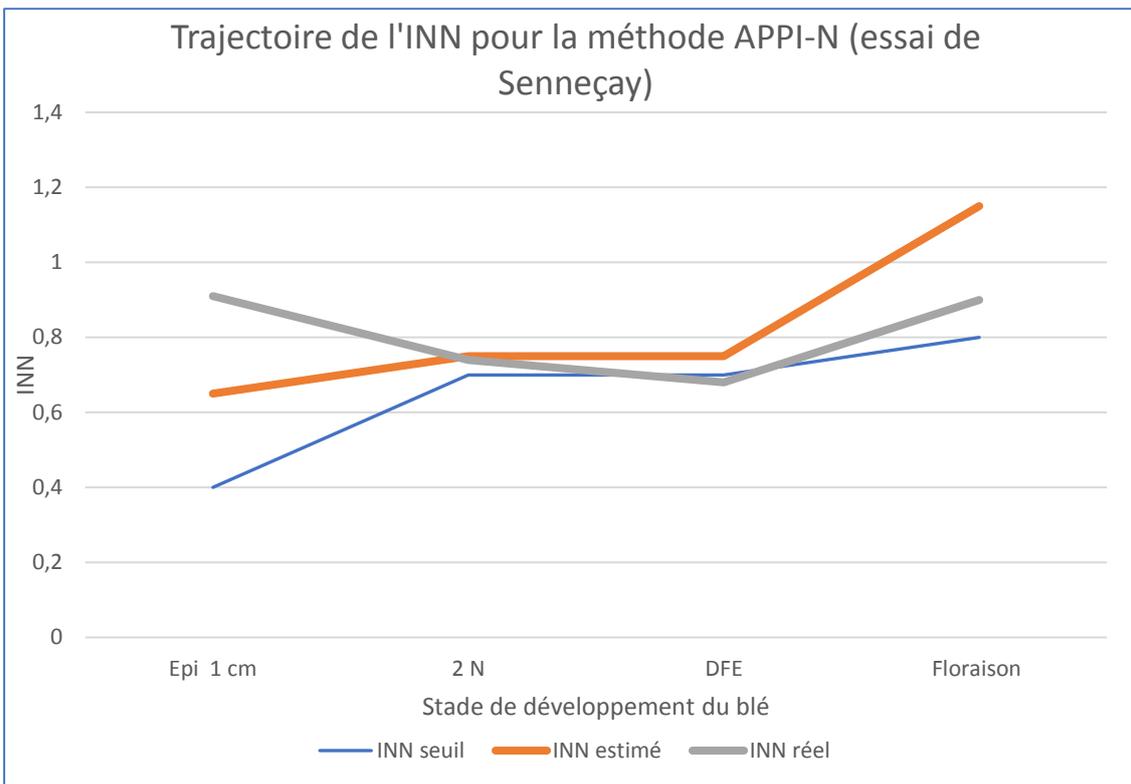


Figure 21 : Trajectoires d'INN réels et d'INN estimés par l'outil N-Tester® au cours du cycle cultural

IV. Limites de l'étude et réflexions sur le travail réalisé

Le travail réalisé sur le projet SOLINAZO a permis de déceler plusieurs limites dans l'application des méthodes. Cette partie du rapport est également l'occasion d'une prise de recul sur la démarche de travail mise en place pendant le stage. Enfin, une réflexion sur les perspectives envisageables sera présentée.

1. Limites et réflexions sur le travail expérimental

L'application des méthodes APPI-N (S2) et CHN (S3) au cours du travail expérimental a permis de mettre en lumière certaines limites.

1.1. Limites de la méthode APPI-N

L'application de la méthode APPI-N avec la pince N-Tester® comme outils d'estimation de l'INN, nécessite la mise en place d'une bande sur-fertilisée. La sur-fertilisation s'obtient, d'après le protocole fourni par l'INRAE, en effectuant un premier apport de 50 uN/ha au 15 février puis en répétant cela toutes les 3 semaines. Les apports doivent être réalisés en conditions d'humidité du sol favorables. C'est pourquoi l'INRAE précise dans le protocole la nécessité d'utiliser un moyen d'irrigation en absence de précipitations. Or, ce point étant contraignant et chronophage, il n'a pas été appliqué dans les essais. Alors, en cas de conditions défavorables, les apports n'ont pas été effectués. Face à cela, la modalité S7 (X+80) a servi de bande sur-fertilisée pour calculer les ratios HNT. Malgré cette initiative, un biais a été introduit dans les valeurs HNT et donc dans les valeurs d'INN estimées et utilisées dans les abaques.

Les abaques ont également posé question car ils sont construits pour un cycle normal du blé. Les besoins en azote renseignés par les abaques pour un INN et une date donnés correspond aux besoins du blé au stade normalement atteint à la date de mesure. Or, la culture de blé ayant connu une précocité de deux à trois semaines sur la campagne 2019-2020, pour une même date les besoins diffèrent par rapport à une année durant laquelle le développement est « normal ». Il serait alors intéressant que les abaques soient construits selon des stades et non des dates.

1.2. Limites de la méthode CHN

Au cours de la campagne, le modèle CHN a montré un dysfonctionnement concernant l'estimation des périodes favorables. En effet, de mi-mars à mi-avril, le modèle considérait les conditions comme étant favorables à un apport alors que la période était complètement sèche. Cela sera transmis à ARVALIS-Institut du végétal et pourra être à l'origine d'une révision du modèle sur le plan « météo ».

1.3. Limites autour des outils d'estimation de l'INN

La fiabilité des outils d'estimation constitue une limite non négligeable dans l'application des méthodes APPI-N et CHN. Cette fiabilité a été évaluée en comparant, à plusieurs stades de développement du blé, l'INN estimé par l'outil à l'INN réel. Le protocole mis en œuvre pour obtenir les valeurs d'INN réels est fourni en Annexe 7. La Figure 21 présente la trajectoire d'INN estimé par l'outil N-Tester® et la trajectoire de l'INN réel pour le blé conduit par la méthode APPI-N et ce, dans les deux essais. La pince N-Tester® semble surtout surestimer la valeur de l'INN entre les stades dernière feuille étalée et floraison. Cette surestimation peut empêcher de déceler un besoin en azote qu'il serait possible de combler avant floraison pour éviter la perte de rendement. Dans l'essai de Senneçay, le manque de justesse de la pince N-Tester® n'a pas permis d'appréhender le passage de l'INN sous l'INN seuil et par conséquent, d'appréhender une perte de rendement.

Avec un outil fiable, les rendements auraient peut-être été meilleurs.

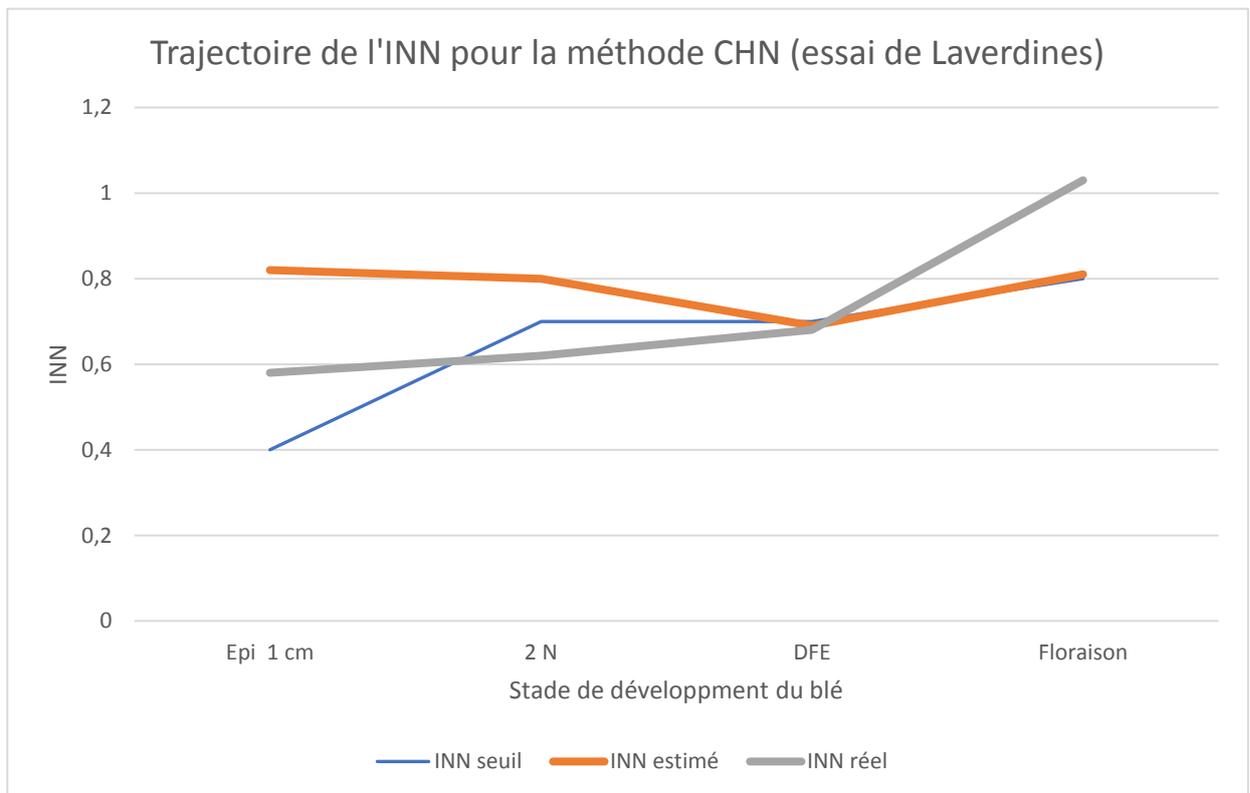
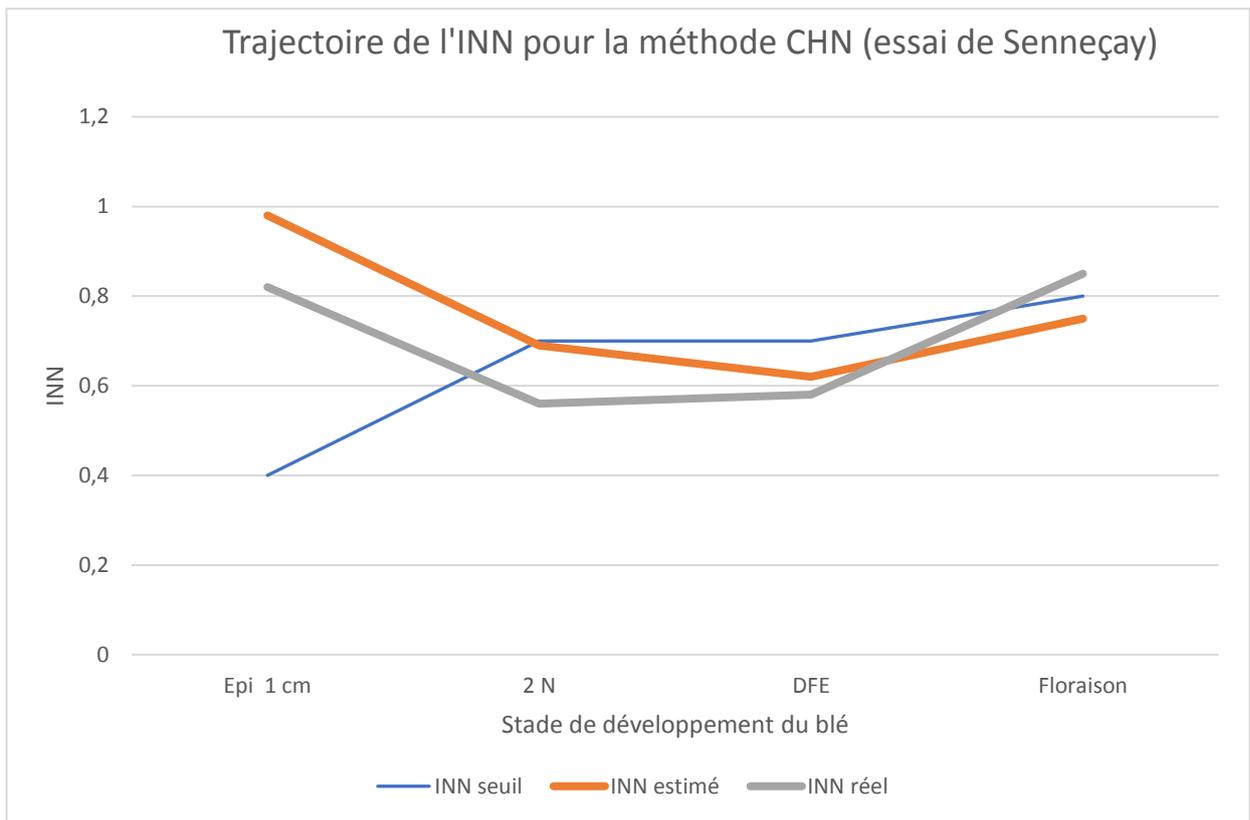


Figure 22 : Trajectoires d'INN réels et d'INN estimés par le modèle CHN au cours du cycle cultural

L'estimation de l'INN par le modèle CHN semble à l'origine de disparités plus importantes car une seule valeur d'INN estimé correspond à l'INN réel (Figure 22). Dans les deux essais, le passage de l'INN sous l'INN seuil a été décelé tardivement empêchant de corriger rapidement l'INN et de limiter l'impact sur le rendement. Les mauvaises estimations de l'INN entraînent un biais dans l'application des méthodes et donc dans les résultats obtenus.

En résumé, pour la méthode CHN, le modèle estimant l'INN est à corriger mais le suivi, par informatique, de l'état de nutrition azotée de la culture est applicable par les agriculteurs. Tandis que pour la méthode APPI-N, l'enjeu est tel que : d'une part, l'outil aujourd'hui à disposition ne permet pas d'estimer correctement l'INN et d'autre part, le temps nécessaire à l'utilisation de la pince N-Tester® rend difficilement concevable l'application par les agriculteurs sur l'ensemble de leur exploitation. L'avenir de la méthode APPI-N pourrait alors être dépendant de la Recherche et Développement car il y a une nécessité d'outils performants et faciles d'usage par les agriculteurs.

1.4. Réflexions sur la démarche de travail

L'analyse du travail expérimental trouve sa limite dans la diversité des angles de vue. En effet, les indicateurs de comparaison des trois méthodes, relatifs à la production, l'environnement et l'économie, ont été choisis arbitrairement. L'objectif des développeurs étant d'étendre ces méthodes aux agriculteurs, il aurait été intéressant d'orienter les analyses en fonction des attentes de ceux-ci vis-à-vis d'une méthode de fertilisation azotée. Alors, réaliser une enquête auprès des agriculteurs adhérents à la FDGEDA du Cher aurait peut-être permis d'extraire et d'interpréter davantage d'informations des deux essais.

2. Limites et réflexions sur le travail avec les agriculteurs

Pour les raisons évoquées antérieurement dans le rapport, seuls deux agriculteurs ont testé la méthode APPI-N sur leur exploitation. Pour enrichir, étayer, constituer ou non des généralités concernant les réactions suscitées par l'application de la méthode, il aurait été intéressant que l'échantillon d'agriculteurs soit plus important. Pour ce faire, un partage des retours avec les autres partenaires du projet était envisagé. Or, il s'est, finalement, avéré que très peu d'agriculteurs sollicités par les partenaires du projet ont été autonomes sur la gestion du pilotage (manque de pinces N-Tester® donc, pincements réalisés par les partenaires expérimentateurs).

Une autre limite de la démarche de travail réside dans le fait de ne pas avoir intégré les conseillers dans la partie dédiée aux réactions et apprentissages engendrées par un changement de méthode. En effet, la diffusion des méthodes passera en partie par les conseillers, qui devront également être à même d'appréhender et de gérer les réactions des agriculteurs. La faculté d'un conseiller à apprendre et transmettre une nouvelle méthode constitue le point de départ du processus d'apprentissage de l'agriculteur. C'est pourquoi, une étude sur les couples agriculteur-conseiller aurait pu être envisagée.

3. Perspectives de travail

Les limites et réflexions évoquées dans le début de la partie ont mis en avant certaines perspectives de travail comme la nécessité de trouver un outil performant et facile d'usage pour l'estimation de l'INN.

De plus, l'utilisation des méthodes APPI-N et CHN à l'échelle de l'exploitation demande également un travail sur les aspects réglementaires. Comme annoncé au début du rapport, la méthode du bilan sert d'outil réglementaire dans le cadre de la Directives Nitrates. La dose totale d'azote à apporter étant définie au préalable, le contrôle de correspondance avec la dose réellement apportée est facilité. Or, dans le cas des méthodes APPI-N et CHN, la dose à apporter est connue instantanément à la suite

d'une mesure, ce qui amène à se poser la question « Comment vérifier qu'il n'y a pas eu sur-fertilisation ? ». Des sauvegardes automatiques par les outils pourraient être envisagées à chaque mesure.

Le fait de ne plus connaître à l'avance la dose d'azote à apporter pourra aussi modifier la manière dont les agriculteurs gèrent leurs approvisionnements et leurs stocks d'intrants. Avant la diffusion des méthodes APPI-N et CHN, une réflexion sur ce point semble importante.

Enfin, lors d'un comité technique réunissant les partenaires du projet SOLINAZO, une réflexion a été amorcée à propos des intérêts que pourraient avoir les agriculteurs à changer leur méthode de fertilisation azotée. La mise en place de certification type « diminution des GES » a été évoquée et pourrait en effet, constituer une piste de recherche pour susciter l'attrait des agriculteurs pour ces nouvelles méthodes.

Conclusion

L'étude réalisée apporte des éléments de réponses quant à la possibilité de développer les méthodes APPI-N (S2) et CHN (S3) et de les diffuser aux acteurs concernés. A noter que les résultats sont propres aux contextes pédoclimatiques des deux essais menés sur la campagne 2019/2020.

Les résultats expérimentaux confirment que du point de vue de la production, un pilotage de la fertilisation azotée du blé tendre d'hiver par la méthode APPI-N ne constitue pas une prise de risque par rapport à une conduite par la méthode du bilan (S1). En effet, les rendements et taux de protéines obtenus avec la méthode APPI-N sont similaires voire meilleurs. Les doses d'azote apportées étant proches, la rentabilité économique permise par un pilotage APPI-N s'apparente donc à celle acquise par la méthode du bilan. Enfin, les pertes d'azote et par conséquent les pollutions engendrées, sont égales voire réduites dans le cas d'un pilotage par APPI-N.

En ce qui concerne la méthode CHN, la performance de production par rapport à la méthode du bilan n'est pas atteinte dans l'un des essais, des suites d'un laps de temps trop important entre les deux premiers apports. Ceci, couplé à une utilisation d'azote plus importante qu'avec la méthode du bilan, fait que la rentabilité économique n'est pas toujours améliorée. Au cours de la campagne, le modèle CHN a également rencontré des difficultés à notifier certaines périodes très sèches. Les taux de protéines obtenus sont cependant toujours supérieurs à ceux issus d'une conduite de la fertilisation par la méthode du bilan. La méthode CHN semble à l'origine d'un impact environnemental du même ordre que la méthode du bilan.

Ainsi, en termes de production, d'impact environnemental et de rentabilité économique, les résultats des méthodes APPI-N et CHN sont plutôt encourageants. Néanmoins, des ajustements et de nouveaux outils sont nécessaires pour envisager leur développement et une diffusion aux agriculteurs. En effet, le principal frein réside dans le fait qu'il n'existe pas d'outils fiables et possibles d'usage à l'échelle d'une exploitation agricole pour estimer l'état de nutrition azotée d'une culture.

Au-delà de la performance de ces méthodes, leur développement dépend en grande partie de la faculté et volonté des agriculteurs et des conseillers à changer leur façon de travailler et de raisonner la fertilisation azotée. Cette acceptation de nouveauté est d'autant plus difficile que la fertilisation azotée est basée depuis de nombreuses années sur une unique méthode qu'est la méthode du bilan prévisionnel. Le travail avec les deux agriculteurs a permis de déceler la prise de risque qu'ils ont ressentie en appliquant la méthode APPI-N. La présentation des similitudes de performances entre les méthodes APPI-N et du bilan, a permis à un des agriculteurs de prendre du recul sur l'anxiété ressentie au cours de la campagne. La réflexion de cet agriculteur amène à penser que les premières mises en

place seront certainement sujettes à de l'anxiété mais que celle-ci diminuera au fil des campagnes si les résultats répondent aux objectifs des agriculteurs.

Désormais, l'INRAE doit procéder à la synthèse des résultats obtenus sur l'ensemble de la région Centre-Val-de-Loire pendant les trois années d'expérimentation. Ainsi, des éléments de réponses quant à la performance des méthodes APPI-N et CHN seront disponibles et ce, sur une importante diversité de contextes agronomiques et pédoclimatiques. Cette synthèse sera, par la suite, retournée aux partenaires du projet SOLINAZO. La quatrième et dernière année du projet sera consacrée à la mise en pratique des méthodes par les agriculteurs : 3^{ème} année consécutive pour APPI-N et première année pour CHN. La richesse de ce travail sera d'autant plus grande que le nombre d'agriculteurs testant les méthodes sera important. La prospection a débuté par des présentations du projet et des résultats expérimentaux à plusieurs groupes d'agriculteurs. Ce travail sera poursuivi par des échanges individuels avec les agriculteurs les plus intéressés afin de convenir ou non d'une mise en pratique pour la campagne 2020/2021. En ce qui concerne la méthode APPI-N, l'INRAE ne s'est cependant pas encore prononcé sur la prise en compte des retours et des adaptations réalisées par les agriculteurs.

Bibliographie

Affholder F., 2001, Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional : mise au point d'une méthode et application au cas du maïs chez les petits producteurs du Brésil Central. Thèse de Doctorat en sciences agronomiques, Institut national agronomique Paris-Grignon

Afssa, 2004, Evaluation des risques sanitaires liés au dépassement des limites de qualité des nitrates et des nitrites dans les eaux destinées à la consommation humaine

Agreste, 2019, Bilans azote et phosphore en France, Graph'Agri, [4/05/2020]

Agreste, 2020, Semis d'hiver 2020 : Blé tendre et colza en baisse, stabilité pour le blé dur et l'orge N°2020-17, https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/IraGcu2017/2020_17inforapgdscultures.pdf, [25/05/2020]

ARVALIS-Institut du végétal, 2015, Nouvelles méthodes d'acquisition pour l'expérimentation et le pilotage des cultures, https://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/_plugins/WMS_BO_Gallery/page/getElementStream.html?id=33339&prop=file, [11/05/2020]

ARVALIS-Institut du végétal, 2020a, Fertilisation azotée : les besoins à prendre en compte pour le calcul de la dose totale, <https://www.arvalis-infos.fr/fertilisation-azotee-quels-besoins-prendre-en-compte-pour-le-calcul-de-la-dose-totale--@/view-28674-arvarticle.html>, [25/04/2020]

ARVALIS-Institut du végétal, 2020b, Quelles conséquences pour l'enracinement et l'alimentation des céréales, <https://www.arvalis-infos.fr/quelles-consequences-pour-l-enracinement-et-l-alimentation-des-cereales--@/view-32251-arvarticle.html>, [21/09/2020]

Austin R.B., Ford M.A., Edrich J.A., Blackwell R.D., 1977, The nitrogen economy of winter wheat, J.agric.Sci., Camb. 88 :159-167

Barroin G., 2003, Phosphore, azote et prolifération des végétaux aquatiques, INRAE Hydrobiologie et faune sauvage

BASF, sd, Le puceron vecteur de la jaunisse nanisante des céréales

Bénétrix F., Autran J.C., 1997, Synthèse protéique dans les grains et les graines, in : Morot-Gaudry J.F., Assimilation de l'azote chez les plantes : aspects physiologique, biochimique et moléculaire, INRA Editions, 308-325

Boiffin J., Caneill J., Meynard J.M., Sebillotte M., 1981, Élaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse I. - Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional, Agronomie, 1 (7) : 549-558

Brown, B., Westcott M., Christensen N., Pan B., Stark J., 2005, Nitrogen Management for Hard Wheat Protein Enhancement, Pacific Northwest Extension publication

Burt T.P., Haycock N.E., (1991), Farming And Nitrate Pollution, Geography. 76 :60-63

CEE 91/676, 1991, Directive concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles, Journal Officiel des Communautés Européennes

Cellier P., Rochette P., Hénault C., Générumont S., Laville P., Loubet B., 2013, Les émissions gazeuses dans le cycle de l'azote à différentes échelles du territoire : une revue, Cahier Agricultures, 22 : 258-271

- Cerf M., Meynard J.M., 1988, Enquêtes sur la mise en œuvre des méthodes de fertilisation raisonnée
Chambre d'Agriculture Ariège, sd, <https://ariego.chambre-agriculture.fr/productions-techniques/cultures/fertilisation/fertilisation-azotee/>, [27/04/2020]
- Chambres d'Agriculture de France, 2020, Barème d'entraide, Coûts 2020 des matériels agricoles
- Chantre E., 2011, Apprentissages des agriculteurs vers la réduction d'intrants en grandes cultures : Cas de la Champagne Berrichonne de l'Indre dans les années 1985-2010, Thèse de doctorat en sciences et industries du vivant et de l'environnement, AgroParisTech
- Coïc Y., 1956, La nutrition et la fertilisation azotée du blé d'hiver. I. Les besoins en azote du blé d'hiver, conséquences agronomiques, Annales Agronomiques, 5 :115-131
- Comifer, 2013a, Prise en compte de la volatilisation des engrais minéraux
- Comifer, 2013b, Calcul de la fertilisation azote. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies. http://www.comifer.asso.fr/images/stories/publications/brochures/BROCHURE_AZOTE_20130705web.pdf, [20/04/2020]
- Davezac H, Grandguillot G, Robin A, Saout C, 2008. L'eau potable en France. Paris : ministère de la Santé, https://www.oieau.fr/eaudoc/system/files/documents/44/224002/224002_doc.pdf, [15/09/2020]
- David C., Jeuffroy M.H., Recous S., Dorsainvil F., 2004, Adaptation and assessment of the Azodyn model for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. European Journal of Agronomy 21, 249–266. doi:10.1016/j.eja.2003.09.003
- Filion E., 2017, La problématique des nitrates dans l'eau souterraine en milieu agricole : du sol à l'aquifère. Cas de l'aide d'alimentation de l'eau souterraine de la municipalité de Sainte-Luce, Québec, Canada. Mémoire de maîtrise dans le cadre du programme de maîtrise en géographie, Université du Québec
- Forgues B., Vandangeon-Derumez I., Garreau L., 2007, Analyses longitudinales, 12 : 410-443
- Gate P., 1995. Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. Lavoisier Éditeur, Paris, France, 429 pages.
- GCL Développement Durable, 2010, Etat, perspectives et enjeux du marché des engrais
- Génermont S., Cellier P., 2016, L'azote, si cher à nos campagnes, Pollution atmosphérique : climat, santé, société, Le Kremlin Bicêtre : Revue Pollution atmosphérique
- Germon J.C., 2013. Gestion de la fertilisation azotée en agriculture : enjeux environnementaux et perspectives agronomiques au niveau du territoire français, Cahier Agricultures, 22 :241-248
- Hébert J.C., 1969, La fumure azotée du blé, Bulletin technique d'information, 244 :755-766
- Hébert J.C., 1976, Pour obtenir des hauts rendements, connaître la physiologie du blé, Fermes modernes, 83-88
- Hénin S., 1980, Rapport du groupe de travail "Activités agricoles et qualité des eaux"

- Holcomb J.C., Sullivan D.M., Horneck.D.A., Clough G.H., 2011, Effect of irrigation rate on ammonia volatilization, Soil Sci. Soc. Am J, 75 : 2341-2347.
- ITCF, 1978, La fertilisation azotée du blé, Institut Technique des Céréales et Fourrages, 28 pages
- Jeuffroy M.-H., Bouchard C., 1999, Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain Number, Crop Science, 39 : 1385-1393
- Jeuffroy M.-H., Recous S., 1999, Azodyn : a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization, European Journal of Agronomy, 10 : 129-44
- Jeuffroy M.H., Gate P., Machet J.M., Recous S., 2013, Gestion de l'azote en grandes cultures : les connaissances et outils disponibles permettent-ils de concilier exigences agronomiques et environnementales ?, Cahier Agricultures, 22 : 249-257
- Justes E., 1993, Diagnostic de la nutrition azotée du blé à partir de la teneur en nitrate de la base de la tige. Application au raisonnement de la fertilisation azotée
- Justes E., Mary B., Meynard J.M., Machet J.M., Thelier-Huche L., 1994, Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops, Annals of Botany, 74 : 397-407.
- Lacroix A., 1995, Les solutions à la pollution azotée
- Lemaire G., Salette J., 1984, Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I- Etude de l'effet du milieu, Agronomie 4 : 423-30.
- Lemaire G., Gastal F., 1997, N Uptake and Distribution in Plant Canopies, Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops, 53 : 3-43
- Lemaire G., Gastal F., 2009, Quantifying crop responses to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency, in: Sadras, V.O., Calderini, D.F. (Eds), Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy. Academic Press San Diego, 171-211
- Le Souder C., Bernicot M.H., 1992. Blé tendre et bilan azoté - Faut-il fertiliser de la même façon toutes les variétés ?, Perspectives Agricoles, 179 :67-73
- Limaux F., 1994, Facteurs de variation du coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais : conséquences pour la conduite de la fertilisation azotée du blé d'hiver en Lorraine, Sciences agricoles
- Limaux, F., 1999, Modélisation des besoins du blé en azote, de la fourniture du sol et de l'utilisation de l'engrais. Application au raisonnement de la fertilisation en Lorraine. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine
- Mary B., Beaudoin N., Justes E., Machet J.M., 1999, Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model, European Journal of Soil Science, 50(4) : 549-566
- Machet J.M, Dubrulle P., Damay N., Recous S., 2009, Raisonnement de la fertilisation azotée avec la nouvelle méthode Azofert
- Meynard J.M., 1985, Les besoins en azote du blé d'hiver jusqu'au début de la montaison, Agronomie, 5 (7), 576-589

- Meynard J.M., Justes E., Machet J.M., Recous S., 1997, Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champ, Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, INRA Editions, 184-199
- Meynard J.M., Jeuffroy M.H., 2019, 50 ans de méthode du Bilan : progrès passés et limites actuelles, *La revue de l'association française d'agronomie*, 9 : 45-54
- Ministère de l'Ecologie, Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole. NOR: DEVL1134069A. Version du 18 mai 2020.
- Nicolardot B., Recous S., Mary B., 2001, Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant Soil*, 228 : 83-103.
- Oenema O., Brenttrup F., Lammel J., Bascou P., Billen G., Dobermann A., Erisman J.W., Garnett T., Hammel M., Haniotis T., Hillier J., Hoxha A., Jensen L.S., Oleszek W., Pallière C., Powlson D., Quemada M., Schulman M., Sutton M.A., Van Grinsven H.J.M., Winiwarter W., 2015, Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems
- Office International de l'Eau, 2016, Bilan de la mise en œuvre de la directive nitrates en France (2012-2015)
- Orloff, S., Wright, S., Ottman, M., 2012, Nitrogen management impacts on wheat yield and protein, Proceedings, California Alfalfa & Grains Symposium, 11-12
- Pellerin, S., Bamiere, L., Angers D., Béline F., Benoit M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., 2014. Quels leviers techniques pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole ?, *Innovations Agronomiques*, 37 : 1-10.
- Perspectives agricoles, 2012, Bilan écophysiological 2010/2011 : la récolte sauvée par la capacité de compensation des blés tendres
- Perspectives agricoles, 2014, Exploiter le potentiel en protéines des variétés
- Peyraud J.L., Cellier P., Aarts F., Béline F., Bockstaller C., Bourblanc M., Delaby L., Donnars C., Dourmad J.Y., Dupraz P., Durand P., Faverdin P., Fiorelli J.L., Gaigné C., Girard A., Guillaume F., Kuikman P., Langlais A., Le Goffe P., Le Perchec S., Lescoat P., Morvan T., Nicourt C., Parnaudeau V., Réchauchère O., Rochette P., Vertes F., Veysset P., 2012 ? Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres, Expertise scientifique collective, rapport, Inra (France), 527 pages
- Raun W.R., Johnson G.V., 1999, Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production, *Agronomy Journal*, 91 :357-363
- Ravier C., 2017, Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée : Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation. Thèse de Doctorat en sciences agronomiques, Université de Paris-Saclay
- Recous S., Nicolardot B., Simon J.C., 1997, Le cycle de l'azote dans les sols et la qualité des eaux souterraines, in : Riou C., Bonhomme R., Neveu A., Papy F., L'eau dans l'espace rural : production végétale et qualité de l'eau, INRA, 193-215
- Reau R., Deytieux V., Guichard L., Mignolet C., Petit M.S., Schott C., 2017, Évolutions récentes des pratiques de grande culture en France métropoli-taine : techniques de raisonnement et usages des intrants, *Agronomie, environnement et sociétés*, 7 : 115-125

Réseau rural, sd, Brochure plaquette présentation PEI, https://www.reseaurural.fr/sites/default/files/documents/fichiers/2018-03/2017_pei_brochure_plaquette_presentation_pei_1.pdf, [28/09/2020]

Sadras V.O., Lemaire G., 2014, Quantifying crop nitrogen status for comparisons of agronomic practices and genotypes, Field Crops Research 164, 54–64. doi:10.1016/j.fcr.2014.05.006

Sharma L.K., Bali S.K., 2017, A Review of Methods to Improve Nitrogen Use Efficiency in Agriculture, Sustainability

Soenen B., Bessard-Duparc P., Laberdesque M., Piquemal B., Deswarte J.C., Bouthier A., Laurent F., Le Bris X., sd, Piloter conjointement la fertilisation azotée et l'irrigation par le couplage d'observations sol/plante avec le modèle de culture CHN

Soenen B., 2015, Premières valorisations agronomiques du modèle de culture CHN

Sogreah- MEEDDTL, 2011, Evaluation environnementale du programme d'action national relatif à l'application de la directive nitrates

Sutton M.A., Oenema O., Erisman W., Leip A., Van Grinsven H., Winiwarter W., 2011, Too much of a good thing, Working Group of Strategies and Review, 472 : 159-161

Valé, M., 2006. Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol in situ, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 209 p

Van de Ven A.H., Huber G.P., « Longitudinal Field Research Methods for Studying Processes of Organizational Change », *Organization Science*, vol. 1, n° 3, 1990, pp. 213–219.

Van Sanford D.A., Mackown C.T., 1987, Cultivar Differences in Nitrogen Remobilization during Grain Filling in Soft Red Winter Wheat, Crop Science, 27 :295-300

Annexes

Table des annexes

Annexe 1 : Reliquat sortie hiver et plan de fumure conseillé sur l'essai de Senneçay

Annexe 2 : Reliquat sortie hiver et plan de fumure conseillé sur l'essai de Laverdines

Annexe 3 : Table de conversion des ratios HNT (parcelle/étalon) en INN

Annexe 4 : Extraction des données météorologiques fournies par le site Météociel pour la station de Bourges – mois de mai 2020

Annexe 5 : Extraction des données météorologiques fournies par le site Météo-France pour la station de Bourges – mois de mai 2020

Annexe 6 : Schéma représentatif du modèle de culture CHN

Annexe 7 : Mode opératoire pour les prélèvements destructifs de MS et %N

Annexe 1 : Reliquat sortie hiver et plan de fumure conseillé sur l'essai de Senneçay



Reliquat d'azote minéral

Intermédiaire : **FDGEDA DU CHER**

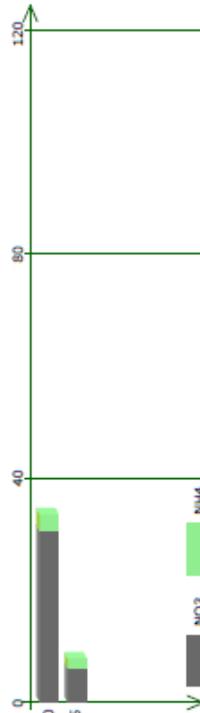
Références : 20_15492

La parcelle : **PEI HDLC SENNECAY**

N° lot PAC :
 Surface : 26 ha
 Imprimé le 10/02/2020
 Prélevé le: 14/01/2020
 Préleveur:

Résultats d'analyse et profil d'azote minéral du sol

Numéro d'analyse	Horizon cm	Humidité (%)	N-H4		N-NO3		N minéral (kg/ha)
			(kg/ha)	(kg/ha)	(kg/ha)	(kg/ha)	
1	0 - 30	24.2	2.9	30.7	33.6		
2	30 - 45	19.1	1.8	6.1	7.9		
Total kg N/ha			4.70	36.70	41.5		
Dont Reliquat utilisable sur 45 cm					33.4		



Culture : Blé tendre d'hiver

Fumure conseillée

Objectif de rendement	6.7 T/ha			
Doce totale à apporter	154 kg N/ha			
Fractionnement proposé : février-calage décollement 4pi 2 noeuds dernière feuille gonflement	50 64 Pilolage 40			
Apports prévus après l'ouverture du bilan				
Nature de l'effluent ou de l'engrais	Dose (t ou m³/ha)	Teneur N total (kg N/t ou m³)	N total (kg N/ha)	N emCaca (kg N/ha)
Total des apports d'azote prévus				

Commentaires

La profondeur du profil est plus faible que la profondeur potentielle d'enracinement. Le reliquat du reliquat utilisable est donc finalement limité à la profondeur du profil (45 cm). Le reliquat d'azote utilisable est de ce fait sous-estimé. La profondeur prise en compte pour le calcul de la minéralisation de l'azote organique humifié est de 26 cm

Renseignements culturaux

Nom de la parcelle : **PEI HDLC SENNECAY** Commune : **SENNECAY (18)** Références : 20_15492
 Les données ci-dessous représentent les indications fournies sur la fiche de renseignements ou extraites par le laboratoire. La qualité du conseil varie fortement selon l'exactitude de ces données.

Type de sol : Argile limoneuse mt. profonde/calcaire

Argile (%) :	Sable (%) :	Calcaire total (%) :	C. organique (%) :	N Total (%) :
pH :	Cailloux (%) :	Prof. Labour (cm) :	Profondeur d'enracinement (cm) :	75

Historique cultural
 Labour occasionnel ou permanent : Oui
 Habitude d'apports organiques : Non
 Habitude de cultures intermédiaires : Non
 Durée de la prairie :
 Rebutée depuis :

Précédent cultural : Tournesol
 Rendement (T/ha) : 1.5 Fertilisation azotée (kg N/ha) : 0 Date de récolte : 25/10/2019 Date de labour :
 Devient des résidus : Embouls Date d'incorporation : 01/10/2019 Travail ou sol : Technique Culturelle Simplifiée

Apport organique

Produit	Quantité	Date d'apport	C. total (%)	N total (%)	N minéral (%)

Culture intermédiaire :
 Rendement (T/MG/ha) :
 Date d'implantation :
Culture à fertiliser : Blé tendre d'hiver
 Date d'implantation :
 Date probable de récolte : 15/07/2020
 Stade végétatif : Maître brin + 1 talle
 Azote absorbé entrée hiver (kg N/ha):
 Azote absorbé sortie hiver (kg N/ha):
 Teneur en nitrates (mg/l) :

Détail du bilan azoté

Besoins unitaires de la culture : 30 Kg N/T

Objectif de rendement (T/ha) :	6.7
1. Besoins de la culture (rendement x Besoins unitaires)	201
2. Azote restant dans le sol après récolte	18
A. Besoins totaux de la culture	219
3. Azote déjà absorbé pendant l'automne-hiver	18
4. Reliquat d'azote sortie hiver utilisable	33
5. Minéralisation de l'humus	31
6. Aérielle effet Prairie	
B. Azote fourni par le sol	82
7. Effet culture intermédiaire	
8. Minéralisation des résidus du précédent	0
9. Effet direct des apports organiques	6
10. Apports pluviométriques	0
11. Apport par irrigation	0
12. Fixation symbiotique	0
C. Autres fournitures d'azote	6
13. Lessivage de l'azote du sol	6
14. Organisation microbienne de l'azote de l'engrais	6
D. Azote non utilisable	12
Total (I) = B + C - D	76
Apport prévisionnel hors volatilisation (II) = A - (I)	143
15. Volatilisation de l'azote de l'engrais	11
Apport prévisionnel en engrais minéral (III) = (II) + (15)	154



• Label de reconnaissance des outils de calcul de dose prévisionnelle d'azote (méthode COMIFER).

Annexe 2 : Reliquat sortie hiver et plan de fumure conseillé sur l'essai de Laverdines



Intermédiaire

Reliquat d'azote minéral

FOGEDA DU CHER

Résultats d'analyse et profil d'azote minéral du sol

Références : 20_03385

Profondeur d'analyse (cm)	Horizon	Humidité (%)	N-NO3 (kg/ha)	N-NO2 (kg/ha)	N minéral (kg/ha)
1	0 - 30	25,1	5,7	21,5	27,2
2	30 - 60	26,6	5,9	14,7	20,6
3	60 - 90	21,1	1,7	18,9	20,6

Total par horizon	13,30	55,10	68,4
Dans Reliquat utilisable sur 90 cm			59,8

La parcelle : ESSAI PEI FERRAND LAVERDINES

N° fol PAC : 6
Surface : 28,48 ha
Système N 32/07/2026
Prélevé le: 16/01/2020
Préleveur:



Culture : Blé tendre d'hiver - objectif protéines

Fumure conseillée

Apports prévus après l'ouverture du bilan

Objectif de rendement	6,8 T/ha	N total	N efficace
Dose totale à apporter	135 kg N/ha		
Fractionnement proposé :			
Fertilisant-collage	40		
2 doses	55		
2 doses	19		
doses de base	40		
par parcelle			

Commentaires

La profondeur prise en compte pour le calcul de la minéralisation de l'azote organique humifié est de 25 cm

Renseignements culturels

Nom de la parcelle : ESSAI PEI FERRAND LAVERDINES

Conteneur : LAVERDINES (18)

Références : 20_03385

Type de sol :	Argile lourde calcicole profunde				
Argile (%) :	Sable (%) :	Calcaire (%) :	C. organique (%) :	N total (%) :	N minéral (%) :
pH :	Colonne (°C) :	Pour Labor (°C) :	Prélevé d'échantillon (°C) :	98	

Travaux culturels :	Labour occasionnel ou permanent : Oui	Diversif. (autres cultures) :	Restitué une fois par deux
Matériau d'apport organique :	Non	Matériau de culture (semences) :	Type granuléés tous les 3 ans de plus
Chaleur de la parcelle :	Retourne de terre		

Produit agricole : Maïs Fourrage

Prélevement (T/ha) :	5,6	Prélevement sec (kg N/ha) :	113	Date de récolte :	24/09/2019	Date de souche :	10/10/2019
Diversif. (autres cultures) :	Enfouir	Date d'exportation :	10/10/2019	Tiré(e) du sol :	Labor		

Asport organique	Quantité	Date d'apport	C. Use (%)	N total (%)	N minéral (%)

Culture précédente :	Reliquat d'azote	Date d'exportation :		Calé de destruction :	
----------------------	------------------	----------------------	--	-----------------------	--

Culture à récolter : Blé tendre d'hiver - objectif protéines

Date d'exportation :	10/10/2019	Date de récolte de souche :	15/07/2020
Variété :	UNIK	Sol ou relief :	Maître bris + 2 talles Azote absorbé avant le 09/08/20
Type d'engrais minéraux :	Urée	Apport total :	Non
Engrais :	Non	Quantité (t/ha) :	

Détail du bilan azoté

Besoins urbains de la culture : 28 kg N/T

Objectif de rendement (T/ha) :	6,8
1. Besoins de la culture (Pensées + Azote minéral)	204
2. Azote restant dans le sol après récolte	28
A. Besoins totaux de la culture	232
3. Azote déjà absorbé pendant l'autarcie-hiver	15
4. Reliquat d'azote sortie hiver utilisable	60
5. Minéralisation de l'humus	27
6. Azote effectif Nurex	
B. Azote fourni par le sol	103
7. Effet culture intermédiaire	
8. Minéralisation des résidus de précédent	1
9. Effet direct des apports organiques	6
10. Apports diversifiés (autres)	0
11. Apport par engrais	0
12. Fusion symbiotique	0
C. Autres fournitures d'azote	7
13. Lessivage de l'azote du sol	9
14. Organisme microbienne de l'azote de l'engrais	2
B. Azote non utilisable	3
Total B - A - C - D	167
Apport prévisionnel hors volatilisation (B) = A - (B)	128
15. Volatilisation de l'azote de l'engrais	9
Apport prévisionnel de engrais minéral (B) = (B) + (15)	135

Ces données sont issues de l'apport d'engrais azotés des Ferti-Service 11/17

* Label de reconnaissance des outils de calcul de bilan prévisionnel d'azote (méthode COURTES)



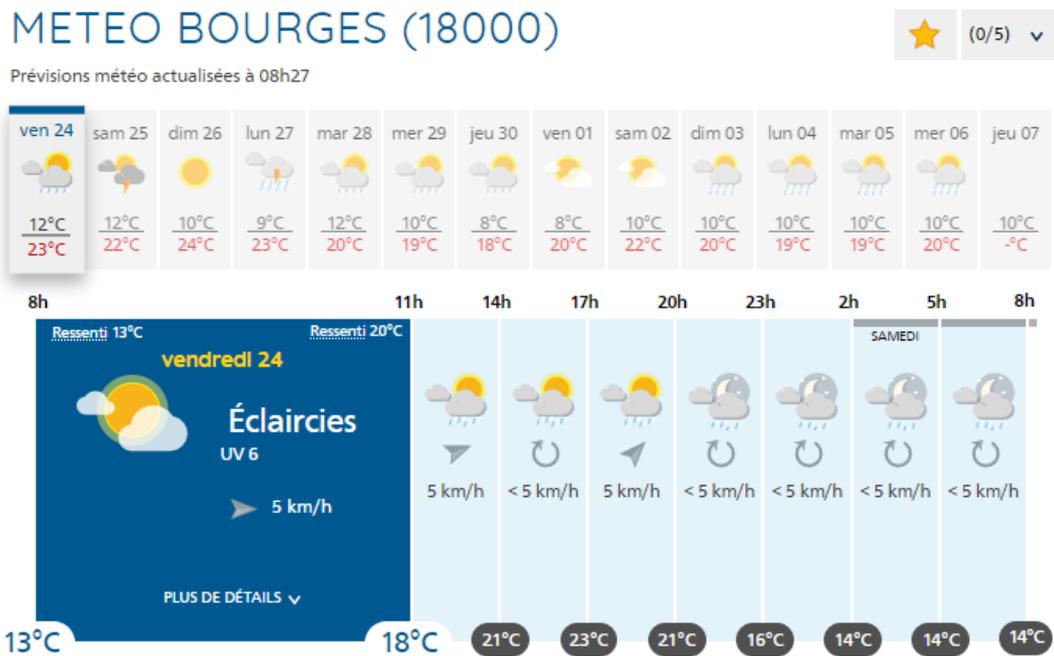
Annexe 3 : Table de conversion des ratios HNT (parcelle/étalon) en INN

Ratio HNT	INN
0,66 à 0,73	0,4 à 0,5
0,74 à 0,81	0,5 à 0,6
0,82 à 0,86	0,6 à 0,7
0,87 à 0,91	0,7 à 0,8
0,92 à 0,93	0,8 à 0,9
0,94 à 0,96	0,9 à 1,0
0,96 à 0,97	1,0 à 1,1
0,97 à 0,98	1,1 à 1,2

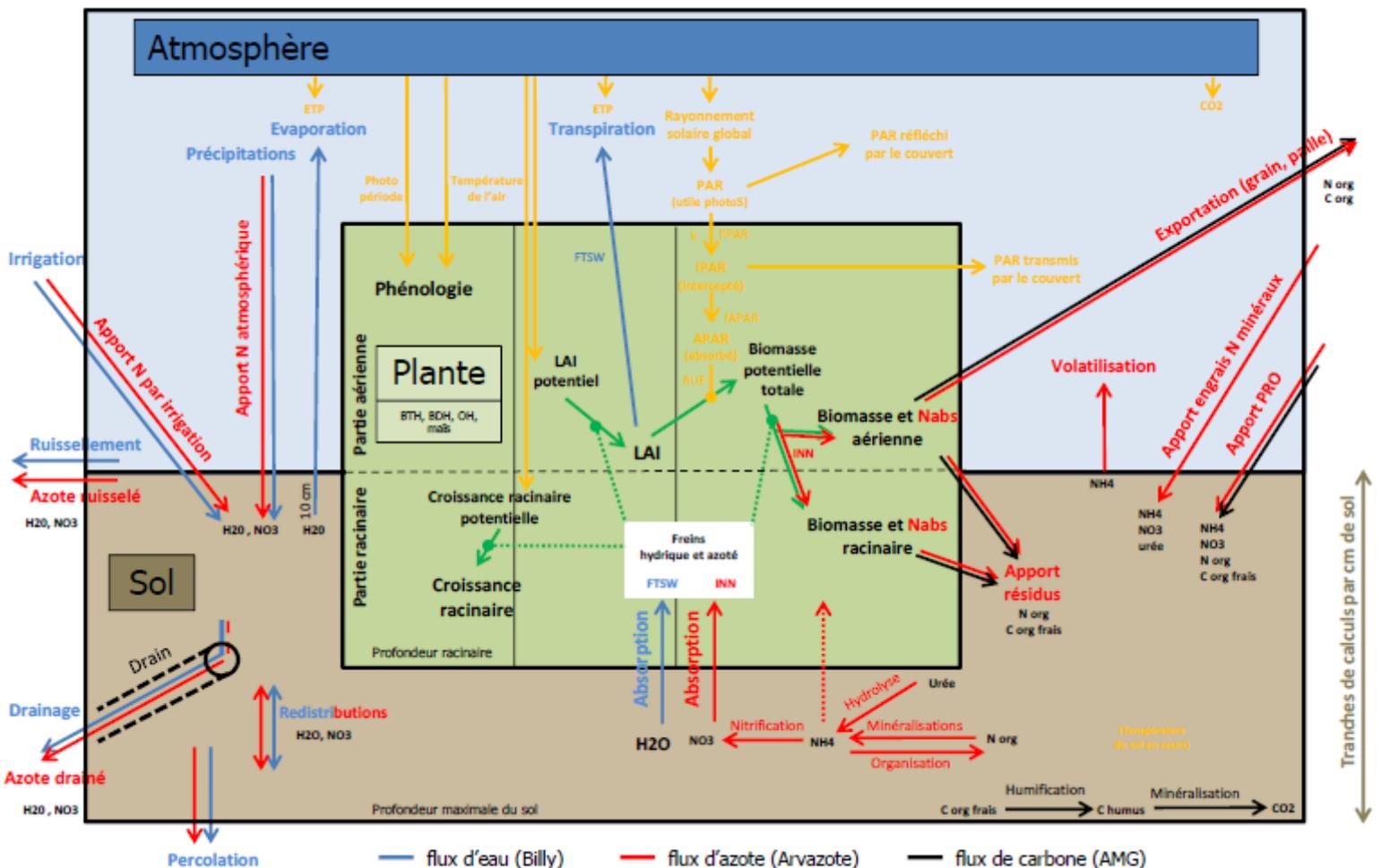
Annexe 4 : Extraction des données météorologiques fournies par le site Météociel pour la station de Bourges – mois de mai 2020

Jour	Heure	Temp.	Vent km/h		Pluie sur 3h	Humidité	Pression	Temps
			dir.	moy. raf.				
Ven 24	05:00	11 °C	→	5 10	--	96 %	1017 hPa	
	08:00	12 °C	→	5 5	--	97 %	1017 hPa	
	11:00	18 °C	→	5 5	--	80 %	1016 hPa	
	14:00	21 °C	→	10 10	0.6 mm	67 %	1015 hPa	
	17:00	22 °C	↘	5 10	0.4 mm	65 %	1012 hPa	
	20:00	19 °C	↙	5 5	0.8 mm	80 %	1011 hPa	
	23:00	15 °C	↙	5 5	0.4 mm	86 %	1012 hPa	
Sam 25	02:00	13 °C	←	5 5	--	90 %	1012 hPa	
	05:00	12 °C	←	5 5	--	92 %	1011 hPa	
	08:00	13 °C	↖	5 5	--	94 %	1011 hPa	
	11:00	18 °C	←	5 5	--	81 %	1010 hPa	
	14:00	21 °C	↙	10 10	3.7 mm	73 %	1009 hPa	
	17:00	20 °C	↙	15 20	4.2 mm	77 %	1007 hPa	
	20:00	17 °C	↙	15 30	1 mm	88 %	1007 hPa	
23:00	14 °C	↙	15 35	--	92 %	1008 hPa		
Dim 26	02:00	11 °C	↙	15 25	--	91 %	1008 hPa	
	05:00	10 °C	↙	10 20	--	89 %	1008 hPa	
	08:00	11 °C	←	5 15	--	89 %	1009 hPa	
	11:00	16 °C	←	10 10	--	70 %	1009 hPa	
	14:00	19 °C	↙	10 10	--	60 %	1009 hPa	
	17:00	20 °C	↙	10 10	--	62 %	1007 hPa	
	20:00	17 °C	↙	10 15	--	78 %	1007 hPa	
	23:00	12 °C	↙	10 10	--	86 %	1009 hPa	
Lun 27	02:00	11 °C	←	5 5	--	88 %	1009 hPa	
	05:00	10 °C	←	5 10	--	89 %	1008 hPa	
	08:00	12 °C	↖	5 10	--	91 %	1007 hPa	
	11:00	16 °C	↖	10 15	--	82 %	1008 hPa	
	14:00	15 °C	↖	10 15	3.3 mm	93 %	1008 hPa	

Annexe 5 : Extraction des données météorologiques fournies par le site Météo-France pour la station de Bourges – mois de mai 2020



Annexe 6 : Schéma représentatif du modèle de culture CHN



Annexe 7 : Mode opératoire pour les prélèvements destructifs de MS et %N

Pour chaque modalité de chaque bloc

- Prélever 2 placettes, chacune de 1m*2 rangs adjacents, à la base du plateau de tallage

Aux stades Epis 1 cm et 2N (2 nœuds)

- Arracher les plantes
- Couper les racines
- Laver les plantes
- Sécher l'échantillon entier (étuve 48h à 80°C ou 72h à 60°C)
- Peser à la sortie de l'étuve (après 15 minutes de repos)

Aux stades DFE (Dernière Feuille Etalée) et floraison

- Couper les plantes au ras du sol
- Nettoyer les plantes
- Peser en frais la totalité de l'échantillon
- Prélever un sous-échantillon de 10-15 tiges par petites poignées au hasard
- Peser le sous-échantillon en frais
- Sécher le sous-échantillon (étuve 48h à 80°C ou 72h à 60°C)
- Peser à la sortie de l'étuve (après 15 minutes de repos)

Puis,

- Mélanger les 4 sous-échantillons de chaque modalité
- Mettre en sac chaque échantillon et les envoyer au laboratoire pour la mesure de l'azote (analyse Dumas)



VetAgro Sup

ALFROIT Margot, 2020, Evaluation de nouvelles méthodes pour raisonner la fertilisation azotée du blé tendre d'hiver, 35 pages, mémoire de fin d'études, soutenu à VetAgro Sup - campus agronomique, Lempdes (63) le 15 octobre 2020.

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES :

- ◆ Fédération Départementale des Groupes d'Etudes et Développement Agricole (FDGEDA) du Cher

ENCADRANTS :

- ◆ Maître de stage : MOULIN Vincent (FDGEDA du Cher)
- ◆ Tuteur pédagogique : VASSAL-COURTAILLAC Nathalie (VetAgro Sup)

OPTION : Concevoir et accompagner l'innovation en agronomie (Calice)

RESUMÉ

La fertilisation azotée est gérée depuis de nombreuses années par une seule et unique méthode : la méthode du bilan prévisionnel. Entre 2015 et 2017, un raisonnement innovant de la fertilisation azotée a été étudié et les méthodes APPI-N et CHN qui en découlent, sont en cours de test. L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans le projet SOLINAZO et s'intéresse à la potentielle validation de ces méthodes en tant qu'alternatives à la méthode du bilan. Sur la campagne 2019/2020, la FDGEDA du Cher a mis en place et suivi deux essais. Les résultats montrent que, dans le contexte de l'étude, la méthode APPI-N assure une performance de production égale à celle de la méthode du bilan voire meilleure sur le plan qualitatif. La méthode CHN se démarque quant à elle par une production de qualité malgré la moindre quantité produite dans une des situations. Il a également été montré que les outils à disposition pour estimer l'état de nutrition azotée d'une culture n'étaient pas toujours fiables. L'étude a aussi consisté à suivre deux agriculteurs ayant mis en place la méthode APPI-N dans une de leurs parcelles en blé tendre d'hiver. Les agriculteurs appréhendaient de ne pas pouvoir apporter d'azote dans les périodes que la méthode considère non-favorables. La crainte d'une perte de rendement s'est faite ressentir. Ils pointent également l'impossibilité de piloter l'ensemble de la fertilisation azotée d'une exploitation faute d'outils utilisables à grande échelle. C'est pourquoi, le développement des méthodes passe alors au préalable par un travail de R&D.

Mots clés : fertilisation azotée, méthode du bilan, méthode APPI-N, méthode CHN, performance, état de nutrition azotée, blé tendre d'hiver

Nitrogen fertilization has been managed for many years by a single method: the balance method. Between 2015 and 2017, an innovative reasoning of nitrogen fertilization has been studied and the APPI-N and CHN methods derived from it are being tested. The study presented in this paper is part of the SOLINAZO project and focuses on the potential validation of these methods as alternatives to the balance method. For the 2019/2020 campaign, the FDGEDA of Cher has set up and monitored two trials. The results show that, in the context of the study, the APPI-N method ensures a production performance equal to that of the balance method or even better in terms of quality. The CHN method stands out for its quality production despite the lower quantity produced in one of the situations. It has also been shown that the tools available to estimate the nitrogen nutrition status of a crop are not always reliable. The study also consisted in following two farmers who had implemented the APPI-N method in one of their soft winter wheat plots. The farmers were concerned that they would not be able to apply nitrogen during periods that the method considered unfavourable. There was a fear of yield loss. They also pointed out the impossibility of controlling all the nitrogen fertilization on a farm due to the lack of tools that could be used on a large scale. Therefore, the development of methods requires prior R&D work.

Keywords : nitrogen fertilization, balance method, APPI-N method, CHN method, performance, nitrogen nutrition status, winter wheat