



HAL
open science

Validation d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée sur blé tendre d'hiver

Antoine Rabier

► **To cite this version:**

Antoine Rabier. Validation d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée sur blé tendre d'hiver. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-03038628

HAL Id: dumas-03038628

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03038628>

Submitted on 3 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Année universitaire : 2019-2020

Spécialité :

Sciences et Ingénierie du Végétal

Spécialisation :

Ingénierie des agrosystèmes : Conception et Evaluation

Mémoire de fin d'études

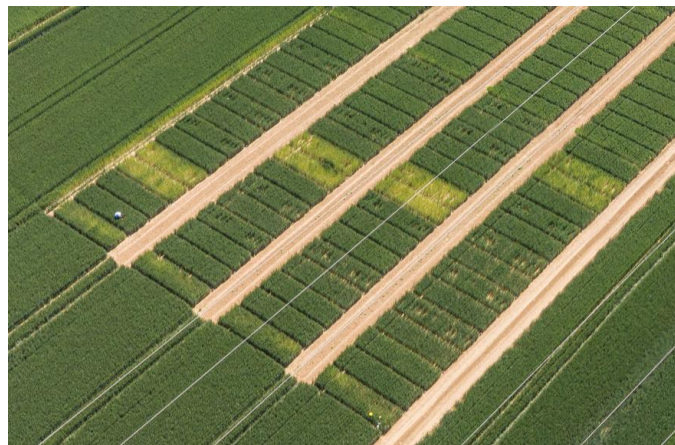
d'ingénieur de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

de master de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Validation d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée sur blé tendre d'hiver

Par : Antoine RABIER



Soutenu à RENNES le 16 septembre 2020

Devant le jury composé de :

Président : Matthieu CAROF

Rapporteur : Virginie PARNAUDEAU

Maître de stage : Ricardo BIDEGAIN

Enseignant référent : Christine BISSUEL

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

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport. Je remercie la coopérative Axérial et son service Agronomie et Innovations pour m'avoir permis de réaliser ce stage et pour m'avoir accueilli au sein de leur structure.

Je remercie particulièrement mon maître de stage, Ricardo Bidegain, qui a tout mis en œuvre pour que mon stage se déroule dans les meilleures conditions possibles. Toujours disponible malgré ses responsabilités, il m'a accompagné tout au long de ce stage et m'a beaucoup aidé dans le cadre particulier du confinement lié à la crise sanitaire de la COVID-19. Grâce à son assistance, ses conseils judicieux, sa patience, ses réflexions et ses critiques, il m'a permis de beaucoup apprendre pendant ce stage.

Je remercie également Philippe Corcelles, responsable de l'essai du Chaumoy, qui m'a beaucoup aidé dans la réalisation des mesures et des prélèvements de cet essai. Sa franchise et ses conseils m'ont beaucoup aidé dans ma réflexion sur cet essai. Son aide pendant le confinement s'est révélée très précieuse.

Je les remercie tous les deux d'avoir insisté pour préserver mon essai restant malgré le contexte du confinement. Sans eux, ce stage n'aurait pas pu se poursuivre.

Je tiens à remercier Pierre Lebreton, de l'INRAE, pour sa présentation des nouvelles méthodes et pour le temps qu'il m'a consacré à commenter les données du projet. Merci également à Michel Bonnefoy, d'Arvalis, pour ses explications du modèle CHN et à Mathilde Lejars, d'Arvalis, pour son aide concernant la maîtrise du logiciel de modélisation.

Merci à tous les membres du service Agronomie et Innovation pour leur support pendant ce stage. Je remercie particulièrement Séverine Baptiste pour son aide dans le traitement des données de la récolte. Ce stage m'aura beaucoup appris et j'en garderai de très bons souvenirs

Merci à ma famille pour leurs relectures de ce rapport.

A mon père

TABLE DES MATIERES

Introduction.....	1
1) Le blé tendre	1
a) Importance mondiale du blé tendre d'hiver	1
b) Production en France et dans la région Centre-Val de Loire	1
2) L'importance de l'azote en céréaliculture	2
a) Le cycle de l'azote	2
b) Les besoins azotés du blé tendre.....	3
c) Impacts environnementaux de la fertilisation	4
3) Les différents raisonnements du pilotage de la fertilisation azotée	4
a) La méthode du bilan prévisionnel.....	4
b) Les limites de la méthode du bilan	5
c) Développement d'un nouveau raisonnement : le pilotage intégral	6
d) Présentation de la méthode APPI-N	7
e) Présentation de la méthode CHN.....	8
4) Le projet SOLINAZO.....	9
a) Présentation du projet	9
b) Problématiques et hypothèses.....	9
Matériels et méthodes	10
1) Site d'étude	10
a) Site expérimental du domaine du Chaumoy (18)	10
b) Site expérimental de Pontlevoy (41).....	10
2) Organisation des parcelles au sein des sites et itinéraires techniques	11
a) Structure des essais	11
b) Itinéraire technique de préparation	12
3) Mesures et suivi des essais.....	12
a) Suivi de l'INN	12
b) Modélisation CHN et prise de décision	13
c) Mesure de biomasse et reliquats	13
d) Mesure à la récolte.....	13
Résultats.....	14
1) Comparaison des résultats SOLINAZO disponibles.....	14
2) Comparaison des INN selon les différentes stratégies et fiabilité.....	14
a) Des INN indiquant un stress azoté.....	14

b)	Les analyses de biomasse relativisent la fiabilité du suivi.....	15
3)	Des doses plus faibles et des dates plus tardives pour les nouvelles méthodes	16
4)	Analyse des performances à la récolte	17
a)	Un meilleur rendement pour le bilan malgré un remplissage plus faible	17
b)	Une tendance commune parmi les essais du projet	17
c)	Des conséquences sur les performances économiques des modalités	18
5)	Une bonne valorisation de l’engrais pour les nouvelles méthodes	19
Discussion.....		20
1)	Performances globales de différentes méthodes	20
2)	Synthèse régionale.....	21
3)	Adaptation à la diversité des situations	21
4)	Limites et perspectives d’application	22
Conclusion		23
Bibliographie et sitographie.....		24
Annexe 1 : Fonctionnement du modèle CHN.....		26
Annexe 2 : Sorties finales pour la modalité CHN pour Le Chaumoy (18).....		28
Annexe 3 : Construction des abaques INRAE basées sur le modèle Azodyn		30
Annexe 4 : Analyse de sol du site du Chaumoy (18)		31
Annexe 5 : Protocole de mesure de la teneur en chlorophylle avec l’outil N-Tester.....		32
Annexe 6 : Protocole pour la récolte		33
Annexe 7 : Récapitulatif des opérations effectuées sur le site du Chaumoy		36
Annexe 8 : Synthèse des mesures réalisées sur le site du Chaumoy(18)		37
Annexe 9 : Essais en bande 2020 chez les agriculteurs.....		38
Annexe 10 : Projet CHN filière blé dur		39
Annexe 11 : Base de résultats régionaux disponibles sur le projet SOLINAZO pour les modalités bilan et APPI-N		43

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Abaque utilisé pour le site du Chaumoy (18) pour l'année 2020

Tableau 2 : Présentation des modalités et notations associées

Tableau 3 : Plan de l'essai du Chaumoy (18)

Tableau 4 : Tableau de correspondances utilisé entre le ratio modalité/étalon et INN

Tableau 5 : Récapitulatif des mesures de biomasses et des reliquats effectués selon les modalités

Tableau 6 : Fractionnement des doses apportées selon les modalités sur le site du Chaumoy sur les trois années d'essai

Tableau 7 : Compilation des résultats de récolte au Chaumoy sur les trois années d'essai

Tableau 8 : Synthèse des résultats d'essai à l'échelle régionale sur les trois années

Tableau 9 : Comparaison économique des différentes modalités en 2020

Tableau 10 : Comparaison des Coefficients d'Utilisation Apparents (CAU) de l'engrais

Liste des figures

Figure 1 : Evolution des rendements en blé tendre d'hiver en France et en région Centre-Val de Loire

Figure 2 : Evolution du taux de protéines moyen du blé tendre d'hiver en France

Figure 3 : Cycle de l'azote simplifié

Figure 4 : Coefficient d'Utilisation Réel (CRU) selon les stades du blé tendre

Figure 5 : Teneur moyenne en nitrate (NO_3^-) dans les eaux distribuées en région Centre-Val de Loire

Figure 6 : Equation de la méthode du bilan

Figure 7 : Reliquat de Sortie d'Hiver pour la parcelle expérimentale utilisée en 2020 au Chaumoy (18) pour l'essai SOLINAZO

Figure 8 : Préconisation d'apport prodiguée par Farmstar © pour la parcelle du Chaumoy (18) utilisée pour l'essai 2020 du projet SOLINAZO

Figure 9 : Comparaison des doses de la méthode du bilan, de Farmstar © et de Jubil © par rapport à la dose optimale calculée

Figure 10 : Courbe de dilution d'azote critique ($\text{N}\%$ opt) pour le blé tendre d'hiver

Figure 11 : Exemple de fiche de résultats issue de CHN après calcul pour le site du Chaumoy (18) le 22 mars après un premier apport le 5 mars

Figure 12 : Carte des essais

Figure 13 : Texture du sol de la parcelle expérimentale du Chaumoy (18)

Figure 14 : Photographie du Hydro N-Tester® utilisé

Figure 15 : Prise de vue en drone de l'essai du Chaumoy le 18/05/2020

Figure 16 : Courbe d'évolution de l'INN de la modalité APPI-N mesuré au N-Tester au Chaumoy (18) en 2020

Figure 17 : Evolution comparée des valeurs mesurées au N-Tester entre l'étalon et la modalité APPI-N pour l'année 2020

Figure 18 : Evolution de l'INN mesuré en laboratoire sur les prélèvements de biomasse en 2020 au Chaumoy (18)

Figure 19 : Comparaison du nombre d'épis par m^2 au Chaumoy en trois années d'essai

Figure 20 : Positionnement des modalités APPI-N et CHN par rapport à la courbe de réponse à l'azote (modalités X-40, Bilan et X+40)

Figure 21 : Evolution des précipitations et de la température moyenne sur le site du Chaumoy en 2020

Figure 22 : Comparaison des précipitations sur les essais d'Axéreal

Glossaire

ADN : Acide DésoxyriboNucléique

APPI-N : Apprendre à Piloter l'Azote

ARS : Agence Régionale de Santé

CAU : Coefficient Apparent d'Utilisation

CHN : Carbone Hydrogène Azote

CRU : Coefficient Réel d'Utilisation

DFE : Dernière Feuille Etalée

E1C : Epi 1 cm

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

FLO : Floraison

ha : Hectare

HNT: Hydro N-Tester®

INN : Indice de Nutrition Azotée

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

ITCF : Institut Technique des Céréales et des Fourrages (actuellement Arvalis)

N : Azote

Nabs : Teneur en azote absorbé par la plante

Nc : Teneur en azote critique

PEI : Projet Européen de l'Innovation

q : Quintal

SCAEL : Société Coopérative Agricole d'Eure-et-Loir

SOLINAZO : SOLutions INnovantes pour une gestion optimisée de l'AZOte dans les systèmes de culture, le cas du blé

uN : unité équivalent à 1 kg d'azote

uP : unité équivalent à 1 kg de phosphore

uK : unité équivalent à 1 kg de potassium

1N : Un nœud

2N : Deux nœuds

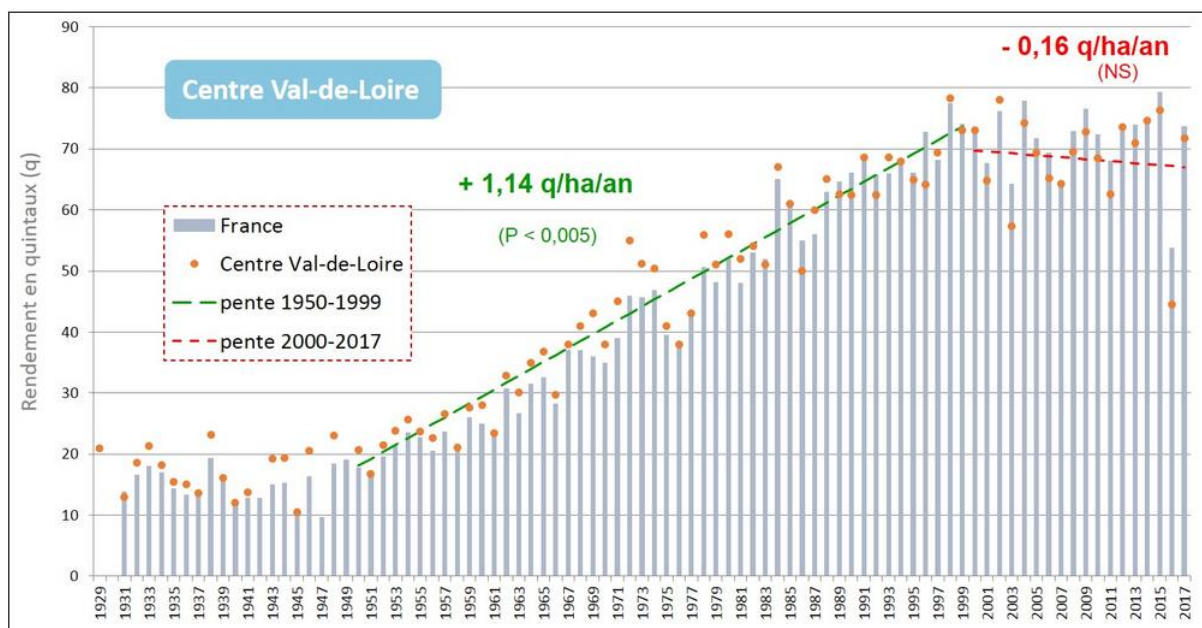


Figure 1 : Evolution des rendements en blé tendre d'hiver en France et en région Centre-Val de Loire (Chambre d'agriculture du Centre-Val de Loire, 2018)

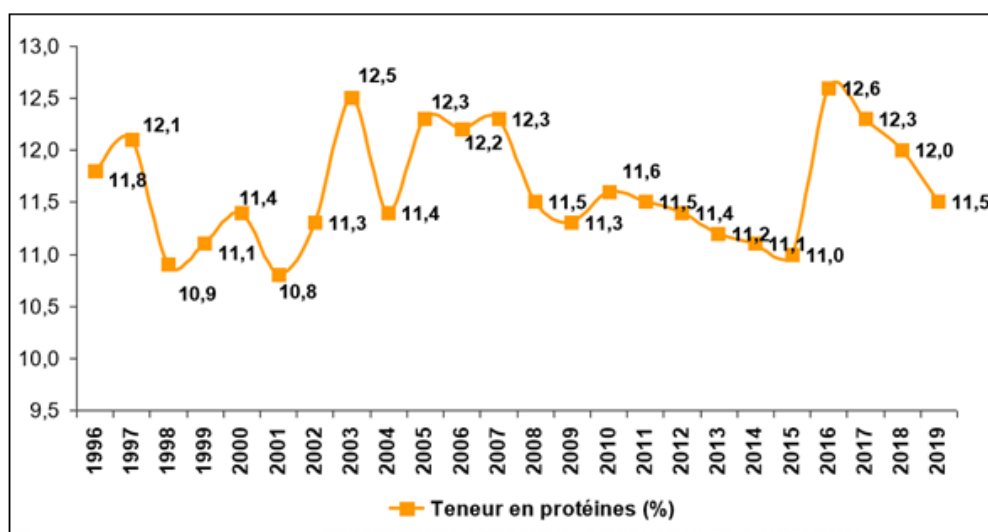


Figure 2 : Evolution du taux de protéines moyen du blé tendre d'hiver en France (FranceAgriMer, 2019)

Introduction

1) Le blé tendre

a) Importance mondiale du blé tendre d'hiver

Le blé tendre (*Triticum aestivum*) est une plante hexaploïde annuelle monocotylédone de la famille des *Poaceae* issue de croisements entre diverses graminées sauvages comme des égilopes (Richard et al., 2009). Les premières traces de domestication de cette céréale sont attestées il y a plus de 10 000 ans dans le Croissant fertile, une région s'étendant de la Syrie à l'Irak. Au cours de l'Antiquité et du Moyen Âge, la culture du blé se perfectionne jusqu'à devenir incontournable dans l'agriculture européenne. Au cours du XIXe siècle, de grands programmes de sélection et d'amélioration génétique du blé ont lieu dans toute l'Europe avec les progrès de l'agronomie. Ces travaux d'amélioration et de recherche s'intensifient ensuite dans le monde entier au XXe siècle à la faveur des révolutions agricoles.

Aujourd'hui, le blé tendre est la céréale la plus produite et la plus consommée dans le monde. La superficie dédiée à la culture de cette céréale au niveau mondial a été de près de 705 millions d'hectares en 2017 et le volume de la production a augmenté d'environ 300 millions de tonnes durant les dix dernières années dépassant ainsi un volume de 2,7 milliards de tonnes en 2018 selon la FAO. Les principaux pays exportateurs de blé sont les Etats-Unis, le Canada, la Russie, la France, l'Australie et l'Ukraine.

b) Production en France et dans la région Centre-Val de Loire

La France est le premier producteur de céréales de l'Union Européenne. Avec 13 % des exportations dans le domaine de l'agroalimentaire, la vente de céréales représente un élément important dans la balance commerciale française, avec un montant total de 7,5 milliards d'euros de recette en 2018. Concernant le blé tendre, la France reste également première productrice européenne avec 29 % de la production européenne de blé tendre (Agreste, 2017).

En France, la culture du blé tendre se pratique sur l'ensemble du territoire métropolitain mais se concentre dans des régions fortement spécialisées, à l'image des régions attenantes au bassin parisien, comme la région Centre-Val de Loire. Ainsi, environ 4 millions d'hectares sont consacrés à la culture du blé tendre dans la région, soit 40 % de la surface consacrée aux grandes cultures. 9 millions de tonnes sont ainsi produites dans la région en 2015. Sa prépondérance dans les assolements de la région a ainsi valu au blé le surnom de « pétrole doré » et son importance culturelle reste importante, comme en témoigne la « Route du blé en Beauce ». Le rendement moyen obtenu dans la région en 2015 était de 76 q/ha (Agreste, 2019). La région est toutefois hétérogène, avec des zones très productives comme la Beauce ou le Berry et des régions très peu propices aux cultures comme la Sologne.

Cette forte production est associée à une grande variété de débouchés notamment concernant l'alimentation humaine (biscuiterie, amidonnerie, panification ...) et donc une grande variété d'exigences selon le débouché visé (taux de protéines, d'humidité, poids spécifique ...). Quel que soit le débouché envisagé, le taux protéique reste particulièrement important. En effet, c'est un critère de valeur nutritionnelle et technologique qui influence grandement les processus industriels de transformation du blé tendre (Arvalis Institut du végétal, 2014b). Depuis quelques dizaines d'années, le rendement et le taux protéique semblent stagner ou décroître comme en témoignent les figures 1 et 2, ce qui ne permet plus de satisfaire tous les opérateurs. La gestion de l'azote est donc l'un des facteurs les plus surveillés et étudiés du fait de son importance industrielle.

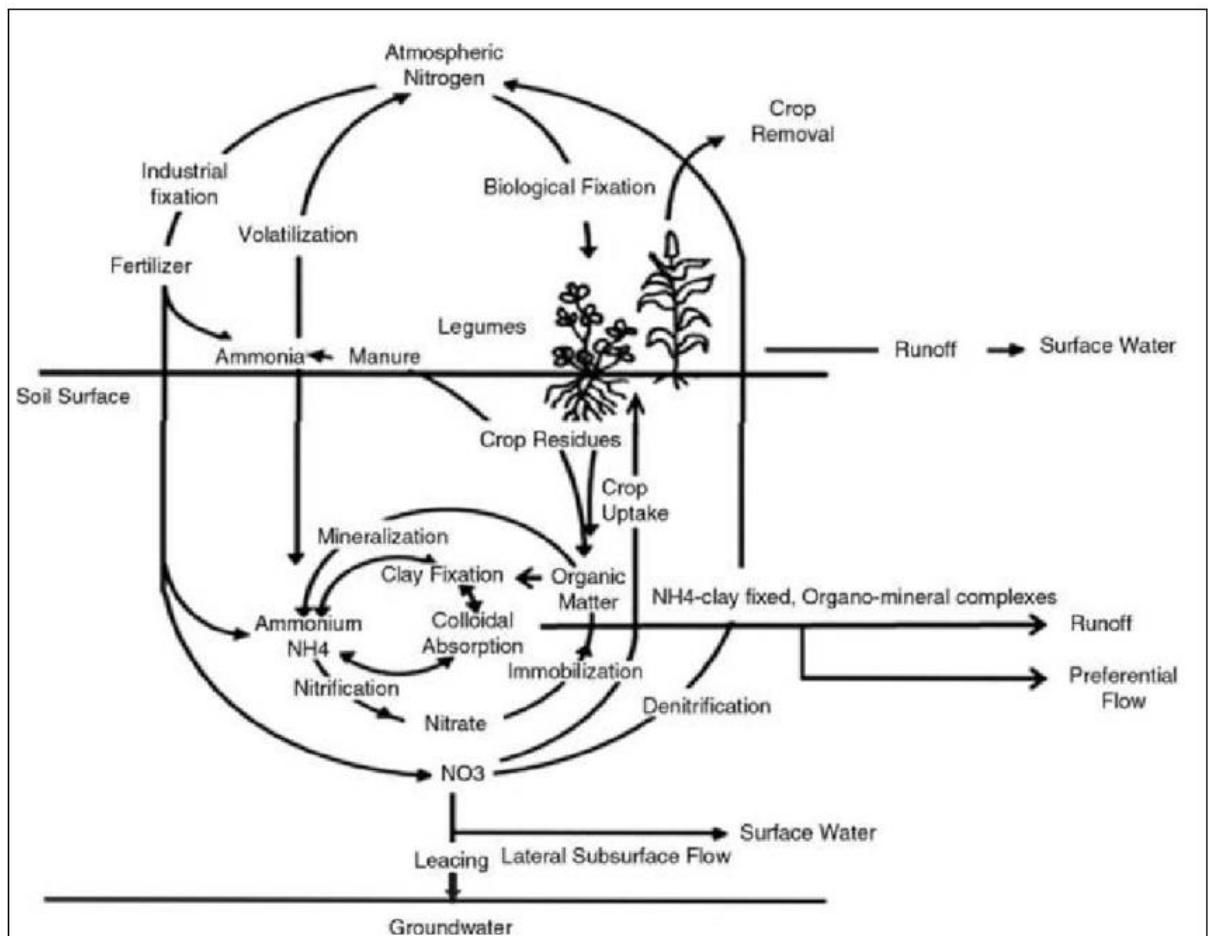


Figure 3 : Cycle de l'azote simplifié (Rasouli et al., 2014)

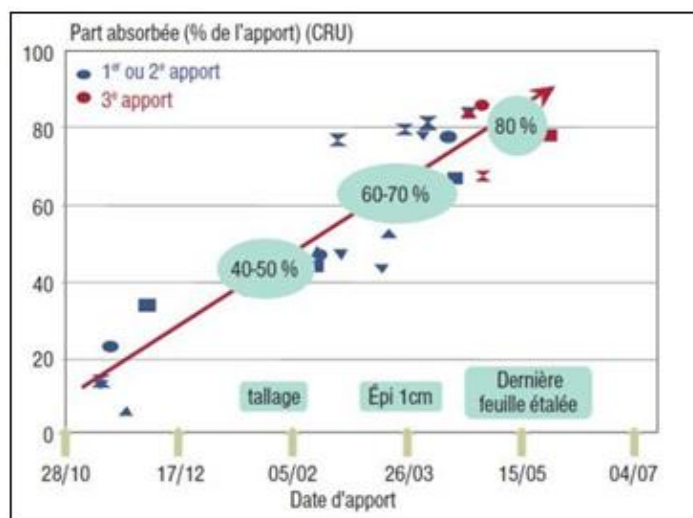


Figure 4 : Coefficient d'Utilisation Réel (CRU) selon les stades du blé tendre (Arvalis Institut du végétal, 2014)

2) L'importance de l'azote en céréaliculture

a) Le cycle de l'azote

L'azote est un élément chimique important pour les êtres vivants et très présent à la surface de la Terre et dans l'atmosphère. Son cycle biogéochimique se définit par diverses réactions, faisant passer l'azote par différentes formes moléculaires dont certaines sont assimilables par les plantes. Ce cycle est donc très actif dans les agrosystèmes comme le montre la figure 3. En effet, les plantes vont, par le biais de leur système racinaire, être capables d'absorber certaines molécules azotées telles que le nitrate (NO_3^-), une large gamme de molécules organiques azotées ou l'ammonium (NH_4^+). Certaines plantes comme les légumineuses sont également capables, dans certaines conditions, de fixer le diazote de l'air (N_2). Les réactions comme la nitrification ou la minéralisation de la matière organique vont ainsi favoriser le stock d'azote disponible pour les plantes. A l'inverse, les réactions amenant vers d'autres formes inorganiques comme le nitrite (NO_2^-), l'ammoniac (NH_3) ou favorisant l'évacuation des molécules azotées en dehors du système étudié comme la lixiviation ou la volatilisation vont dégrader le sol des molécules absorbables. Les formes inorganiques demeurent malgré tout assez stables et ce sont les formes organiques qui constituent le gros du stock azoté du sol (Hawkesford, 2012).

A ce titre la matière organique joue un rôle important dans ce cycle, car associée aux divers microorganismes du sol, celle-ci va permettre de stocker ou de mettre en disponibilité de grandes quantités d'azote. On estime par exemple qu'un sol contient par hectare entre 3 et 12 tonnes d'azote. Les formes organiques constituent le plus gros de cette masse. Il existe trois principaux moyens d'apporter de l'azote dans un agrosystème : apporter de l'engrais de l'extérieur (organique ou minéral), planter une légumineuse pour la fixation symbiotique ou maximiser le stock de matière organique pour la minéralisation (COMIFER, 2013).

A l'inverse, d'autres processus font baisser le stock d'azote disponible. La plante va notamment puiser dans cet azote, faisant ainsi diminuer le stock global. Les pertes gazeuses comme la volatilisation, qui ne touche que les fractions minérales des engrais, ou la dénitrification mais aussi les pertes par lessivage, liées aux précipitations, ou encore l'immobilisation liée aux microorganismes vont venir puiser dans le stock d'azote disponible. Dans le cadre d'un agrosystème, il convient de favoriser le plus possible l'utilisation de l'azote par la plante et d'éviter les pertes qui détournent l'azote de la parcelle concernée.

La fertilisation reste le levier le plus utilisé pour réenrichir une parcelle en azote. L'efficacité d'une fertilisation va dépendre d'un certain nombre de variables, notamment liées à la météorologie, au moment de l'année, au terrain, à son état structural ... Pour quantifier l'efficacité d'utilisation par la culture d'une fertilisation, on utilise couramment le Coefficient Apparent d'Utilisation (CAU). Celui-ci détermine le pourcentage de l'azote apporté par fertilisation qui sera effectivement absorbé par la plante (Schvartz et al., 2005). La fertilisation étant limitée en termes de quantité d'azote maximale apportée par apport en France, celle-ci est fractionnée en plusieurs apports. Il apparaît que les apports de fin de cycle sont le moins affectés par les pertes (Carlotti, 1992), notamment lorsqu'ils sont réalisés dans de bonnes conditions d'humidité (Holcomb et al., 2011). Le CAU est à différencier du CRU, Coefficient Réel d'Utilisation, qui est mesuré directement par le biais d'un isotope radioactif ^{15}N et qui est plus précis que le CAU mais beaucoup plus complexe à mettre en place. La figure 4 illustre ainsi grâce au CRU la meilleure captation de l'azote par la plante lors de leurs stades tardifs.

LES TENEURS MOYENNES EN NITRATES DANS LES EAUX DISTRIBUÉES

en région Centre-Val de Loire en 2018

La représentation cartographique est basée sur les unités de distribution (UDI). Une UDI correspond à un secteur où l'eau est de qualité homogène, géré par un même exploitant et appartenant à une même entité administrative, ce qui peut amener à partager une commune en plusieurs UDI.

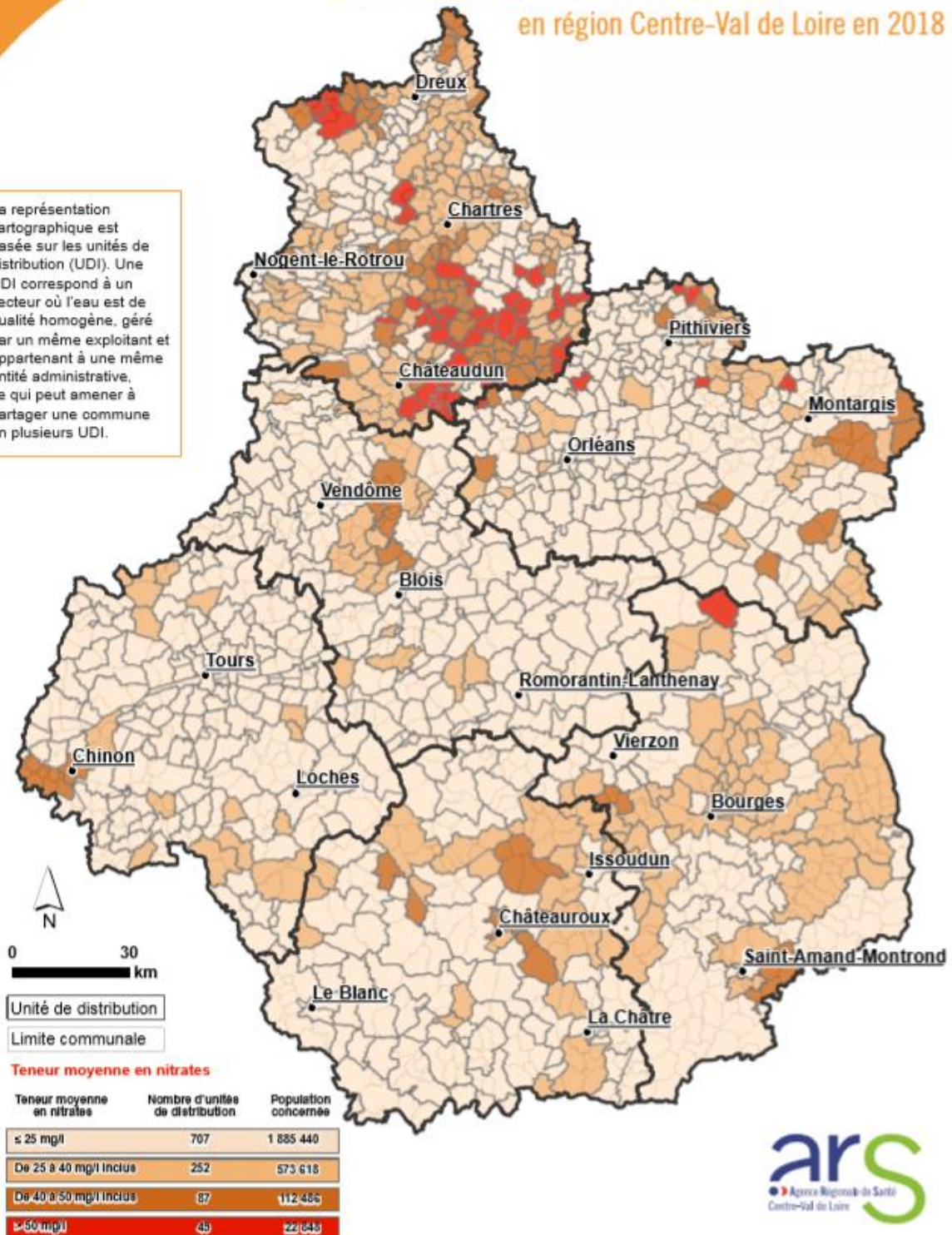


Figure 5 : Teneur moyenne en nitrates (NO_3^-) dans les eaux distribuées en région Centre-Val de Loire (Agence régionale de la santé, 2019)

La date d'apport est donc un levier primordial concernant la fertilisation. L'idéal étant d'obtenir un CAU s'approchant de 100 % tout en apportant suffisamment d'azote pour maximiser le rendement de la plante. L'état du sol est également à prendre en compte pour que le système racinaire puisse puiser correctement l'azote (Meynard et al., 1981). En effet, les plantes reposent sur ce système racinaire pour satisfaire leurs besoins azotés. Ces besoins azotés varient selon les variétés et les densités semées.

b) Les besoins azotés du blé tendre

L'azote est un élément très important chez les plantes. En effet, il entre dans la composition des protéines et des acides aminés, qui jouent des rôles majeurs dans le bon fonctionnement des cellules et des organes. Ces molécules azotées interviennent partout, que ce soit en tant que molécules de réserve, enzymes, molécules de support de l'information génétique avec l'ADN, molécules essentielles à la photosynthèse avec la chlorophylle, molécules de structure des cellules ... Les protéines constituent l'outillage de la cellule et sont donc particulièrement concentrées dans les zones les plus actives de la plante, comme les feuilles les plus jeunes ou les bourgeons (Carlotti, 1992). On estime qu'une plante contient entre 1 et 4 % d'azote en masse. On note toutefois un phénomène de dilution de l'azote dans la plante à mesure que sa biomasse s'accroît, accumulant alors plus de carbone que d'azote et diminuant ainsi la proportion azotée globale de la plante à mesure que son cycle de vie avance (Lemaire & Gastal, 1997).

Concernant l'élaboration du rendement, l'azote est un facteur influençant diverses composantes (Carlotti, 1992), notamment au niveau de la densité d'épis au m² (Meynard et al., 1981) ou du nombre de grains et de leur masse (Coïc, 1956). De plus, l'azote constitue un facteur important de qualité pour les acteurs de la filière blé tendre et le taux de protéines des grains est systématiquement mesuré à la récolte. En effet, le remplissage du grain notamment par l'azote, qui peut représenter jusqu'à 17 % de la masse du grain, débute dès la fin de la floraison en remobilisant l'azote stocké dans le reste de la plante, ce qui constitue entre 65 et 95 % de l'azote d'un grain de blé (Austin et al., 1977) mais aussi en continuant d'absorber de l'azote dans le sol, entre 5 et 35 % (Van Sandford & Mackdown, 1987). En plus de molécules azotées, le grain se remplit en parallèle d'amidon après la floraison.

Le blé tendre va consommer au cours de sa vie entre 200 et 300 kg d'azote par hectare selon le rendement final. On estime qu'un blé tendre a besoin d'entre 2,8 et 3,2 kg d'azote par quintal de rendement (Jeuffroy et al., 2013) selon les variétés, la précocité du semis ou la densité de semis à l'hectare (Meynard, 1985). La quantité absorbée est proportionnelle à la biomasse totale du blé dans des conditions non limitantes (Lemaire & Gastal, 1997). Ces besoins varient selon les stades de développement. A la levée du blé, les besoins sont minimes du fait de la faible biomasse. Les besoins jusqu'au stade épi 1 cm sont souvent estimés à environ 50 kg d'azote par hectare. A mesure que les températures augmentent après l'hiver, le blé va entrer dans une période de croissance végétative plus intense, passant alors à environ 4 kg N/ha chaque jour. A ce stade, le stock du sol ne suffit souvent plus à fournir tous les besoins du blé et peut limiter le développement. C'est à ce moment-là, au printemps, que la fertilisation par l'agriculteur entre en jeu. Lorsque le blé entre en floraison, les besoins diminuent, la plante entrant alors dans une phase d'élaboration du grain (Carlotti, 1992) et mobilisant principalement ses réserves.

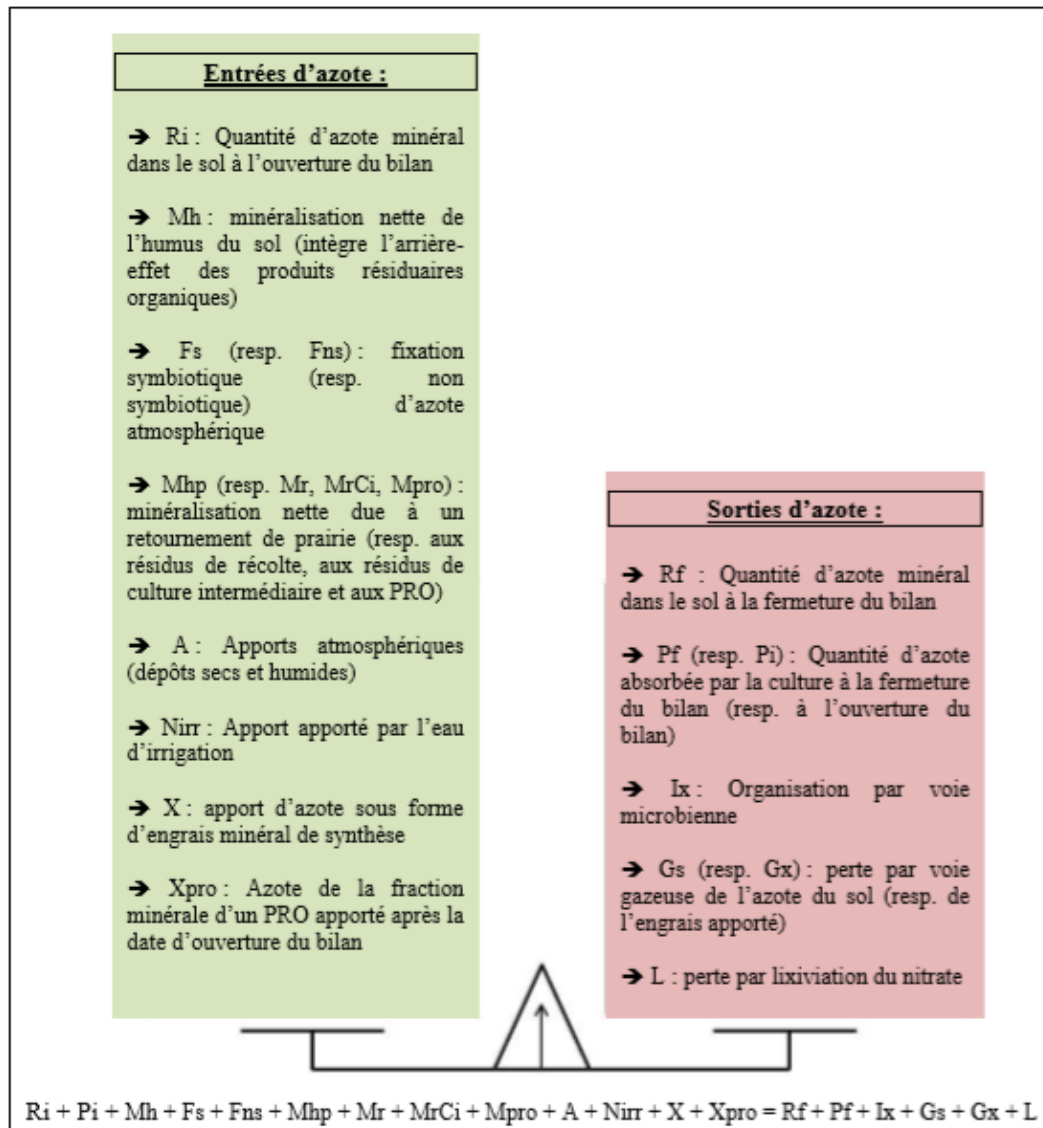


Figure 6 : Equation de la méthode du bilan (COMIFER, 2013)

c) Impacts environnementaux de la fertilisation

Pour éviter toute carence en azote du blé tendre, les agriculteurs ont massivement recours à la fertilisation, notamment minérale. En effet, la demande mondiale en fertilisants azotés a largement progressé ces dernières décennies (Sharma & Bali, 2017), et les formes minérales comme l'urée ou l'ammonitrate restent ultra majoritaires dans les zones dépourvues d'élevage. Les engrais azotés représentent environ 60 % du tonnage d'engrais consommé, devant les engrais phosphatés, avec 25 %, et les engrais potassiques, avec 15%, à l'échelle mondiale (FAO, 2018). Les plus gros producteurs sont les entreprises YARA, le groupe Roullier ou l'entreprise GPN (Agreste 2010). La consommation des engrais azotés est donc prépondérante dans les exploitations agricoles.

Mais cette importante consommation peut présenter des risques pour l'environnement. En effet, la qualité des eaux est principalement affectée par des problèmes d'engrais azotés (Holland & Shepers, 2010), ces derniers étant assez solubles sous forme minérale. Les effets des engrais azotés sur les cours d'eau incluent l'eutrophisation des surfaces, des blooms d'algues ou des risques pour la santé humaine en cas de dépassement des normes de qualité des eaux en nitrates notamment. Cet excès d'azote dans les eaux, notamment souterraines est surtout lié au phénomène de lixiviation (Sharma & Bali, 2017), soit la solubilisation du nitrate dans l'eau s'écoulant hors des parcelles. La protection de la qualité des eaux est donc nécessaire et c'est pour cela qu'un programme de surveillance des nitrates dans les eaux a été mis en place depuis 1991 avec la Directive Nitrates. En France, d'après la Directive Nitrates, l'agriculture serait responsable des deux tiers des écoulements de nitrates dans les cours d'eau, notamment dans le bassin parisien et en Bretagne. De nombreuses actions ont été menées dans ce cadre pour tenter de résoudre ce problème et des mesures ont été prises en se basant sur de multiples campagnes d'observation (LégiFrance, 2013). La teneur maximale en nitrate de l'eau potable a ainsi été fixée à 50 mg/L (Agence régionale de la santé, 2019). La figure 5 illustre le problème de la concentration en nitrates dans l'eau potable dans la région Centre-Val de Loire.

Avec une utilisation en augmentation, et des efficacités d'utilisation parfois très faibles, l'azote utilisé en excès peut devenir un problème pour l'environnement. De plus, on observe également des pertes gazeuses sous forme de protoxyde d'azote (N_2O) engendrant une émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'aspect environnemental de la fertilisation azotée est donc de plus en plus prise en compte par les agriculteurs et les organismes attendant avec pour objectif de limiter les pertes par lixiviation des nitrates. De nombreuses pistes sont explorées, allant des nouvelles méthodes de planification des apports, à la limitation des moyens d'application, ou en ayant recours à des formes protégées d'engrais.

3) Les différents raisonnements du pilotage de la fertilisation azotée

a) La méthode du bilan prévisionnel

En France, la méthode officielle de gestion de la fertilisation est la méthode du bilan prévisionnel. Cette méthode date de 1970 et se base sur les recherches menées par M. Hébert. Elle a depuis été largement améliorée et a été très bien intégrée par les agriculteurs pour calculer la dose totale d'azote à apporter (Van der Mijnsbrugge et al., 2017). Avec la Directive Nitrates, la méthode du bilan prévisionnel, abrégée en méthode du bilan, a été recommandée et est même devenue obligatoire dans les Zones d'Actions Renforcées (ZAR) contre les pertes en nitrates. La méthode consiste à quantifier la répartition des flux d'azote selon une équation présentée dans la figure 6 et à déduire la quantité d'azote manquante pour atteindre l'équilibre.



Caractéristiques de la parcelle et de la culture

VOTRE SOL (Données de la feuille de renseignement)

Argile (g/kg) : **239** Profondeur de labour (cm) :
 Sable (g/kg) : **347** Sous-sol : Nature : **Craie**
 Calcaire (g/kg) : **10** Prof. Apparition (cm) : **> 90**
 MO (g/kg) : **17** Charge cailloux visible surface (%) : **0**

CULTURE A FERTILISER

Culture : **Blé d'hiver** Objectif de rendement : **85 q/ha**
 Variété : **RGT Sacramento** Stade végétatif : **4 talles**
 Prof. potentielle d'enracinement (cm) : **>90** Date d'implantation : **13/10/2019** Date de récolte : **15/07/2020**

HISTORIQUE CULTURAL

Précédent : **Tournesol**
 Habitudes d'apports organiques :
 - Nature : **Pas d'apport**
 - Fréquence : **Pas d'apport organique**

CONTRIBUTIONS ORGANIQUES

Résidus de la récolte : **Toujours enfouis**
 Apports organiques : **Non**
 1 - Date : Qté :
 2 - Date : Qté :
 3 - Date : Qté :

En cas d'absence de l'une de ces données sur la feuille de renseignement accompagnant votre échantillon, le conseil est effectué sur la base de valeurs moyennes



Bilan détaillé des entrées et sorties

Outil labellisé **comifer**

Besoin de la culture Blé d'hiver - RGT Sacramento - 85 q/ha	272
Azote restant dans le sol après la récolte	30
BESOINS TO TAUX	302
Reliquat d'azote minéral utilisable sur 3 horizons de 30 cm en sortie d'hiver (mesure laboratoire)	31
Minéralisation nette de l'humus du sol	15
Minéralisation nette due à un retournement de prairie : pas de prairie	0
Azote déjà absorbé par la plante selon le stade de la culture : 4 talles	30
AZOTE FOURNI PAR LE SOL	76
Minéralisation nette des résidus de culture intermédiaire :	0
Minéralisation nette des résidus du précédent : Tournesol	-10
Effet direct des produits résiduels organiques (PRO) : Aucun apport	0
Apports atmosphériques	0
Azote apporté par l'eau d'irrigation :	0
Fournitures en apport minéral :	0
AUTRES FOURNITURES	-10
FOURNITURES TOTALES	66

DOSE PREVISIONNELLE CONSEILLÉE EN ENGRAIS AZOTÉ 235u



Fractionnement

Apport conseillé	1er Apport	2ème Apport	3ème Apport	4ème Apport	5ème Apport
Stade	Tallage	Stade épi 1cm	1 à 2 noeuds	Dernière feuille	
Quantité (en kg N/ha)	50	100	45	40	

Ce fractionnement est à adapter en fonction de vos contraintes agronomiques et de vos objectifs de qualité de la culture. Votre technicien est à votre disposition afin de vous conseiller sur cette démarche.



Commentaires

- ✓ Calcul du Poste "Reliquat utilisable" : La profondeur de prélèvement du profil (90 cm) est inférieure à la profondeur d'exploration des racines (>90 cm).
- ✓ Dans le cas d'utilisation d'azote liquide en couverture, tenez compte des pertes par volatilisation (qui peuvent approcher les 10 % en sols non-calcaires et 15% en sols calcaires). Limitez les apports sur sols secs ou par temps chaud et venteux. Une grille d'évaluation du risque de volatilisation ammoniacale pour chaque apport est disponible sur le site : <http://www.comifer.asso.fr>.

LESSIVAGE PROBABLE SUR RELIQUAT UTILISABLE D'ICI L'APPORT D'ENGRAIS						
Ces valeurs de lessivage sont données à titre indicatif						
Précipitations efficaces (mm) = précipitations - ETP	25	50	75	100	125	150
kg N/ha	1	4	8	11	13	15

Figure 7 : Reliquat de Sortie d'Hiver pour la parcelle expérimentale utilisée en 2020 au Chaumoy (18) pour l'essai SOLINAZO

Cette méthode repose donc sur un objectif de rendement. Le but est d'assurer une certaine production sans que celle-ci soit affectée par un manque d'azote lors de son cycle. Pour assurer cette sécurité en azote, il faut prendre en compte la fourniture en azote du sol à la sortie de l'hiver, grâce à un reliquat de sortie d'hiver (RSH) et les besoins de la plante pour atteindre cet objectif selon sa variété (Rémy & Hébert, 1977). La figure 7 présente un exemple de RSH, avec les conseils associés. Les variétés de blé tendre sont souvent classées en trois catégories selon leurs besoins par quintal de rendement espéré, avec les catégories à 2,8 à 3 et à 3,2 kg N/ha/jour (Arvalis Institut du végétal, 2020). Une fois la dose totale à apporter calculée pour sécuriser le rendement, il faut la fractionner, le plus souvent en trois apports pour optimiser son efficacité et ne pas apporter trop d'unités azotées d'un coup, ce qui engendrerait trop de pertes. Les dates classiques ont été choisies selon les périodes les plus sensibles pour le blé et sont adaptées par l'agriculteur selon les conditions d'application. Le premier apport est souvent réalisé au stade tallage, avec environ 50 uN/ha. Cet apport permet au blé de bien démarrer son développement après avoir tallé. Un second apport, d'une dose variable déduite du premier et du dernier apport, a souvent lieu au moment de la montaison, autour du stade épi 1 cm, pour maximiser la production de biomasse et le nombre d'épis par surface. Enfin, le dernier apport est souvent réservé pour la période allant du stade deux nœuds au stade gonflement, avec une dose d'environ 50-70 uN/ha. Cet apport va jouer sur le nombre de grains par épi et sur le taux de protéines (Demotes-Meinard et al., 1999).

b) Les limites de la méthode du bilan

Cette méthode s'est beaucoup répandue jusqu'à devenir la norme aujourd'hui, car présentant une bonne efficacité sur le rendement et une relative simplicité d'utilisation., les doses se planifiant à l'avance, dès la sortie d'hiver. La méthode était donc considérée comme suffisamment fiable pour la rendre officielle pour gérer la fertilisation et les doses à apporter. Néanmoins les hypothèses faites sur l'objectif de rendement de la parcelle ainsi que sur la cinétique d'absorption conditionnent fortement la dose totale. En effet, l'objectif de rendement est défini légalement comme la moyenne des rendements des 5 dernières années sur une parcelle, en enlevant la valeur maximale et la valeur minimale. Le but de cette standardisation est de mieux garantir le taux de protéines selon le potentiel des variétés et de ne pas chercher à atteindre des rendements exagérément élevés (Ravier, 2017). Mais les agriculteurs préfèrent parfois utiliser le rendement maximal déjà atteint, plus avantageux en cas de succès, même s'il engendre de la surfertilisation (Sebillotte & Meynard, 1990). On estime d'ailleurs que cette surestimation concernait un quart des agriculteurs en 1988 (Cerf & Meynard, 1988). Cette confusion peut ainsi amener à un usage plus important d'engrais. Il a été montré également que le coefficient utilisé pour classer les variétés selon leur besoin varie selon l'objectif de rendement demandé (Lacroix, 1995), faussant ainsi les besoins de la plante pris en compte par la méthode. Le reliquat de sortie d'hiver, fondamental avec cette méthode, se fait de façon manuelle, à la tarière, et est ensuite envoyé pour analyse au laboratoire. Cependant, les prélèvements ne sont pas toujours représentatifs de la parcelle, les échantillons mettent parfois trop de temps à arriver, ne sont pas stockés au froid ... Le reliquat effectué par l'agriculteur n'est donc pas toujours fidèle à la situation réelle (Goos & Prunty, 1990). De plus, la diversité des situations d'une région ne colle pas toujours avec les standards régionaux imposés par la législation (Ravier et al., 2016). Les apports sont de plus calculés pour des parcelles considérées comme homogènes.

- SOC DEVELPT AGRICOLE DU

Parcelle : LIGNE 1

N-005293-0 / 271680030

CARTE DE PRÉCONISATION AZOTE INTRA-PARCELLAIRE

SEMIS | 13/10/2019

SOL | Limon argileux profond

ILOT | 1 SURFACE (ha) | 9.0

PRÉCÉDENT | TOURNESOL

DENSITÉ (grains/m²) | 250

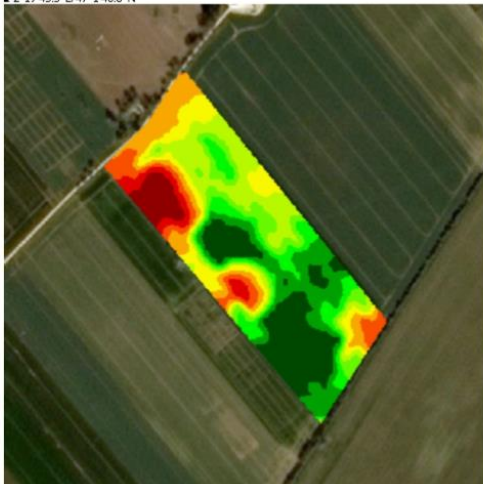
VARIÉTÉ | RGT SACRAMENTO

DÉBOUCHÉ | BT Protéine

15/04/2020

Date du calcul : 23/04/2020

2°19'45.5"E/47°1'40.8"N



Produit soumis à licence d'utilisation - reproduction interdite sans autorisation

Projection : France Lambert 93
Données climatiques : Météo France



0 | 100 m

Farmstar vous est proposé par Arvalis, Terres Inovia et Airbus

Dose (en unités)	% Surface	% Surface cumulée
0	18	18
10	14	32
20	9	41
30	9	50
40	15	66
50	10	76
60	10	86
70	6	92
80	3	96
90	4	100
< 100	0	100

Dose applicable unités

Dose recommandée pour satisfaire les besoins de la parcelle sous réserve d'au moins 15mm de pluie depuis le dernier apport d'azote, devant dater d'au moins 20 jours.

La dose recommandée prend en compte la qualité.

- Au delà de 60 U : fractionnement possible en 2 passages.

- 0 U : apport inutile.

Votre parcelle est hétérogène. La modulation est fortement conseillée.

Ce conseil prend en compte l'état de nutrition azotée actuel de votre parcelle et sa biomasse estimée à floraison.



PROCHAINS STADES :

- Eplaison vers le 29/04/2020,
- Floraison vers le 06/05/2020.

Distribué par **AXERIAL**

Figure 8 : Préconisation d'apport produiguée par Farmstar © pour la parcelle du Chaumoy (18) utilisée pour l'essai 2020 du projet SOLINAZO

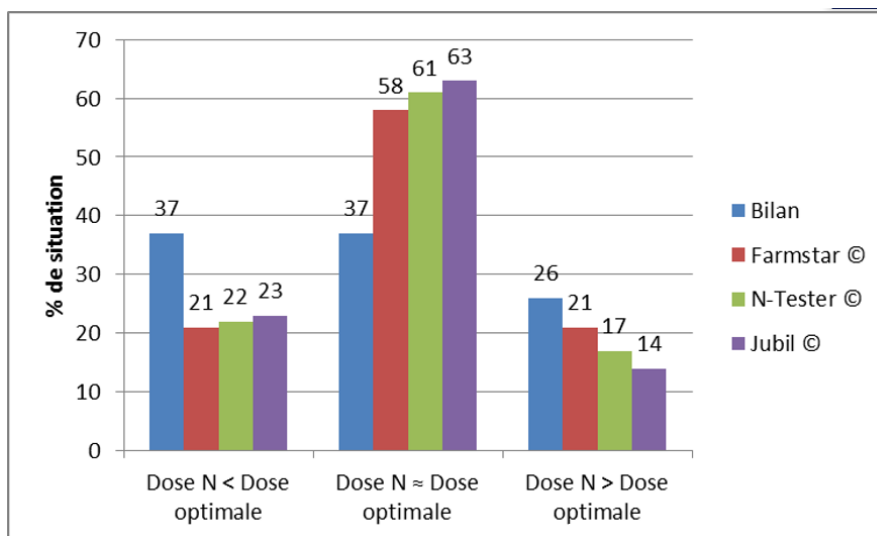


Figure 9 : Comparaison des doses de la méthode du bilan, de Farmstar © et de Jubil © par rapport à la dose optimale calculée (Barranger, 2015)

En plus de ces limites intrinsèques de méthode, la méthode du bilan ne s'adapte pas aux événements de l'année. Les doses sont déterminées en début de campagne et une quelconque modification de la fourniture en azote du sol ou des besoins de la plante ne sera pas prise en compte, ou du moins pas suffisamment pour adapter la dose totale. Les facteurs climatiques ou biologiques font en effet grandement varier les quantités d'azote dans l'année, ce qui, lié à une tendance à la surfertilisation, peut représenter de potentielles pertes d'azotes (Jeuffroy et al., 2013). La fixation traditionnelle des trois apports est de plus assez figée et peu adaptative. En effet, le pilotage du dernier apport n'est pas toujours suffisant dans certains contextes pour s'adapter aux conditions de l'année, notamment dans les cas d'absorption tardive ou de potentiel de rendement très différent de ceux visés. Les engrais sont donc principalement apportés tôt dans l'année, alors que l'azote appliqué tardivement a par exemple tendance à être mieux absorbé et à donner des CAU plus élevés (Limaux, 1999).

Devant ces limites, de nouveaux outils ont été créés dans un premier temps pour perfectionner la fiabilité de la méthode. C'est ainsi qu'en 1990, la méthode JUBIL© a été développée par l'INRA et l'ITCF (précurseur d'Arvalis). Cette méthode devait se baser sur la mesure du taux de nitrates dans le jus de base d'une tige, notamment entre le stade un nœud et dernière feuille étalée pour estimer les besoins réels de la plante (Justes et al., 1997). Les apports étaient ensuite adaptés, avec un système de mise en réserve comparable à la méthode du bilan. Mais cette méthode n'a pas su s'implanter du fait de sa complexité de mise en œuvre.

En 2002, une autre méthode, la méthode Farmstar ©, est développée en collaboration avec Airbus et Arvalis. En reprenant un calcul de dose totale en sortie d'hiver, avec un calcul de mise en réserve pour le dernier apport comme avec la méthode du bilan. En revanche, un suivi de la culture est réalisé par satellite en mesurant la réflectance du couvert végétal lors de la montaison. Un logiciel convertit ensuite cette mesure en teneur en chlorophylle dans les feuilles et en déduit l'état azoté de la culture. Les cartes obtenues permettent d'ajuster le dernier apport mis en réserve selon l'état du couvert (Coquil et al., 2005). La figure 8 donne un exemple de conseil d'apport prodigué par Farmstar ©. Cette méthode peut aussi être liée à l'agriculture de précision et est de plus en plus utilisée actuellement. Les méthodes JUBIL © et Farmstar © sont comparées avec la méthode du bilan dans la figure 9 en termes de dosage le plus juste. Il apparaît que ces méthodes sont plus fréquemment optimales que la méthode du bilan.

La méthode du bilan, certes efficace et très utilisée depuis les années 1980, ne permet pas un suivi des besoins de la culture de façon fine et ne prend pas assez en compte les aspects récents d'économie d'intrants à des fins environnementales. De nouvelles méthodes continuent donc d'être développées pour pallier ces problèmes et améliorer la précision du dosage.

c) Développement d'un nouveau raisonnement : le pilotage intégral

Une réponse possible aux limites identifiées est d'élaborer de nouveaux raisonnements s'émancipant de celui de la méthode du bilan. Ces dernières années ont vu se développer l'idée d'un raisonnement entièrement basé sur l'estimation dynamique de l'état de croissance de la plante et sur son absorption de l'azote. Un nouveau cadre de raisonnement a ainsi été développé par Arvalis et l'INRAE, avec le pilotage intégral de l'azote. Le principe est de piloter tous les apports d'azote, sans imposer d'objectifs de rendement mais en intégrant le diagnostic de nutrition azotée en continu tout au long de la campagne (Ravier, 2017).

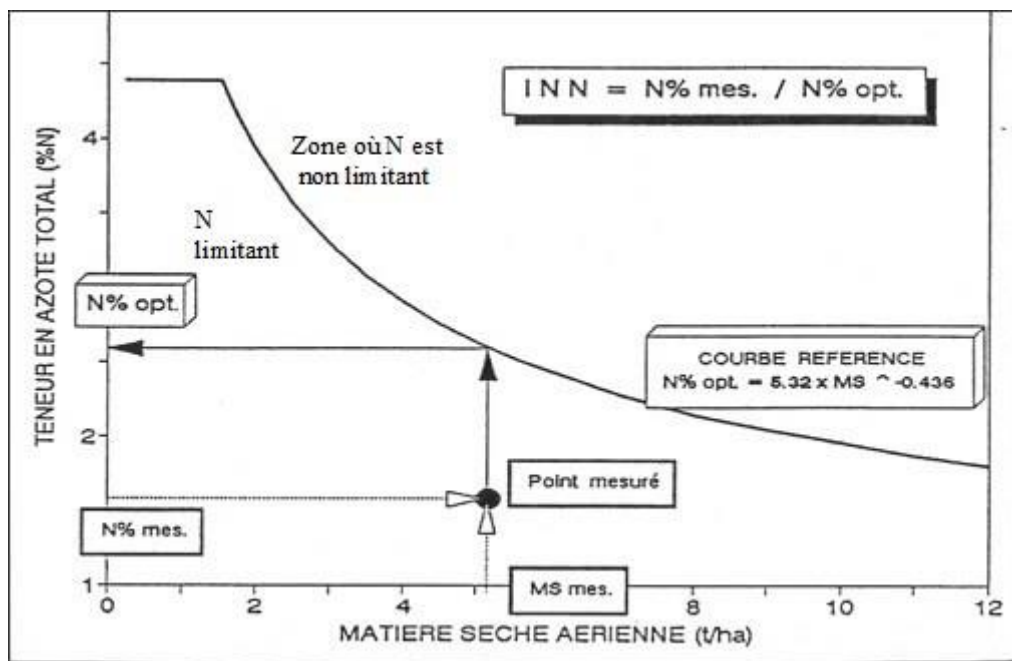


Figure 10 : Courbe de dilution d'azote critique (N% opt) pour le blé tendre d'hiver (Lemaire et al., 1989)

Abaque pour le site du Chaumoy (18)							
	15-28 février	1-15 mars	16-30 mars	1-15 avril	16-30 avril	1-15 mai	16-31 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

Tableau 1 : Abaque utilisé pour le site du Chaumoy (18) pour l'année 2020

Les notions d'indice de nutrition azotée et de trajectoire d'absorption sont à la base de ce pilotage intégral du blé. L'indice de nutrition azotée est le rapport entre la concentration azotée dans les parties aériennes de la plante et la concentration d'azote critique. Cette concentration critique représente la concentration minimale qui maximise la production de matière sèche ($N_c = 5,32MS^{-0,438}$) (Justes et al., 1994). En traçant la courbe des différentes concentrations critiques selon la biomasse, on obtient alors une courbe de dilution permettant de situer les INN calculés. Cette courbe est représentée dans la figure 10. L'INN étant le rapport entre la mesure et l'azote optimal, des valeurs d'INN inférieures à 1 indiquent une carence azotée, et inversement avec une valeur supérieure à 1, cela signifie que le couvert est surfertilisé. L'INN varie dans le temps selon les stades de la culture. Des INN inférieurs à 1 en début de campagne ne sont ainsi pas délétères pour l'élaboration du rendement, contrairement à la période précédant la floraison (Jeuffroy et al., 2013). Des seuils d'INN dynamiques ont ainsi été élaborés (Ravier et al., 2016) pour déterminer les trajectoires optimales d'INN afin éviter les pertes de rendement. Les seuils mis en évidence dépendent du contexte de culture, des pratiques agricoles, de l'état et de la nature du sol, du climat ...

Cependant, la mesure des INN par la biomasse nécessite du temps et des moyens. C'est pourquoi d'autres outils ont été utilisés pour déterminer plus facilement l'INN d'une culture à un moment donné. La lecture de l'INN à travers la teneur en chlorophylle (Confalonieri et al., 2015) permet ainsi d'utiliser des outils utilisant la télédétection pour déterminer indirectement l'INN (Ata Ul Karim et al., 2014).

En utilisant l'INN, il est alors possible de justifier un apport d'engrais par la quantité d'azote présent dans la plante. Ce raisonnement par l'INN repose sur la thèse de Clémence Ravier, qui a élaboré les trajectoires d'INN tolérables à partir du stade épi 1cm à la floraison pour le blé tendre sur un réseau national d'essai. Les résultats de ces essais montrent que certaines carences précoces ne pénalisent pas le blé tendre et que le suivi régulier de cet INN permet de minimiser les apports, avec environ 20-30 uN/ha de moins que la méthode du bilan, tout en optimisant le rendement et en améliorant légèrement le taux protéique (Jeuffroy et al., 2013). La diminution de la quantité d'azote a bien souvent décalé les apports avec la suppression de l'apport précoce. À la suite de cette thèse, Arvalis et l'INRAE se sont servis de ces résultats pour développer de nouveaux outils de pilotage, basés à différents degrés sur de la modélisation, avec le modèle Azodyn pour l'INRAE et le modèle CHN pour Arvalis. Ces outils sont pour le moment seulement destinés à la fertilisation minérale.

Le raisonnement du pilotage intégral passe par quatre étapes : la prévision des périodes favorables pour réaliser les apports, le suivi continu de la nutrition azotée grâce à des mesures ou de la modélisation, la comparaison du statut azoté observé aux trajectoires seuils et enfin le calcul de la dose à apporter.

d) Présentation de la méthode APPI-N

La mise en œuvre du pilotage intégral (Ravier, 2017) se décline en deux méthodes opérationnelles en cours de construction. La première, la méthode APPI-N, est portée par l'INRAE. L'acronyme signifie : APprendre à PIloter la fertilisation Azotée. Cette méthode se base sur des mesures de l'INN en utilisant un HydroN-Tester® (HNT) développé par Yara. La méthode APPI-N consiste donc à suivre le plus souvent possible l'INN de la plante afin de déterminer la meilleure dose et de déclencher l'apport au meilleur moment. La méthode pour suivre cet INN est construite en trois parties. Cette méthode s'appuie sur des abaques, dont un exemple se trouve dans le tableau 1.

Modèle CHN

ARVALIS - Institut du végétal

PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTÉE A L'AIDE DU MODELE DE CULTURE CHN

Contact : b.soenen@arvalis.fr ; f.taulemesse@arvalis.fr

Informations concernant les outils ARVALIS :

- AgroBox : version 02.61.00 (17/03/2020)
- SoilBox : version 01.14.00 (10/02/2020)
- ClimBox : version 04.01.09 (10/02/2020)
- (Météo validée jusqu'au 18/03/2020 + 9 jours de prévision)

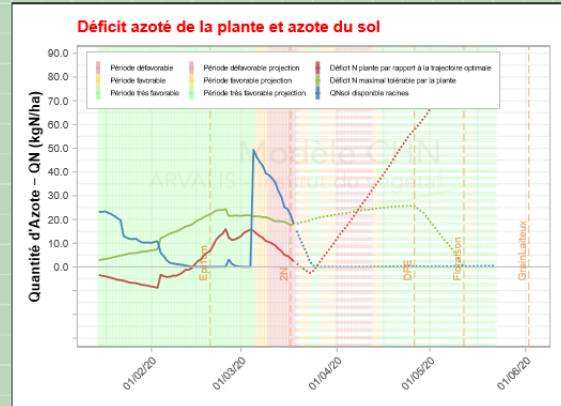
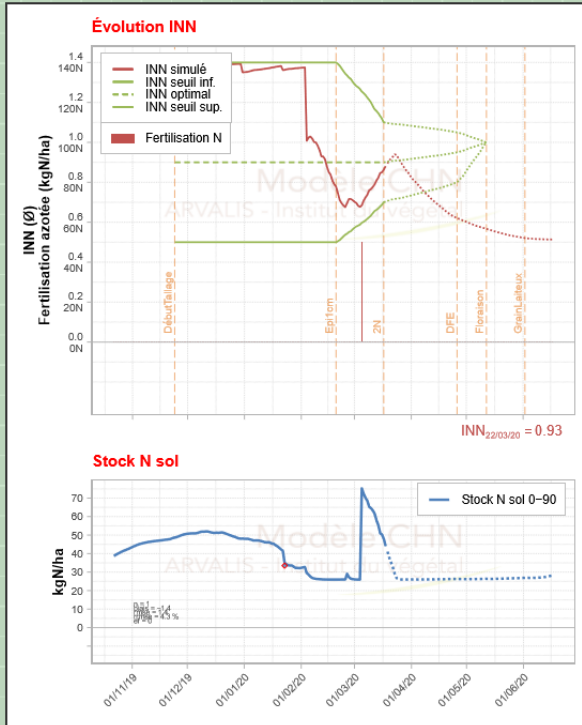
Date de calcul : 22/03/2020 à 18h05

Détails et contrôle du calcul CHN : Fiche Ok

- Équipe régionale : AXEREAAL
- Site de l'essai : LE CHAUMOY
- Modalité pilotée : M7 (INN E1C = 0.5 Flo = 0.9) (n°SILENA=20BTHN418)
- Fertilisation azotée : 50 unités en 1 apport | Irrigation : Ø

Pilotage CHN : Contextualisation : milieu_limite // Trajectoire INN : e1c_0_5
bc variétal : 0.2 // parcelle irriguée : Non

GRAPHIQUES POUR PRISE DE DECISION



CALCULS D'INDICATEURS

- Moyenne d'azote absorbé par jour dans les 10 jours à venir : 0.7 kgN/ha/jour
- Date de franchissement du déficit azoté maximal tolérable : 08/04/2020
- Date d'épuisement du stock d'azote disponible dans le sol : 24/03/2020
- Prochaine période favorable pour apport N : 13/04/2020 - 22/05/2020
- Déficit prochaine période favorable : 41 kgN/ha
- Déficit tolérable prochaine période favorable : 25.1 kgN/ha
- Dose préconisée à apporter dès que possible (CAU = 80%) : 60 kgN/ha

GRAPHIQUES POUR CONTRÔLE DES SORTIES CHN

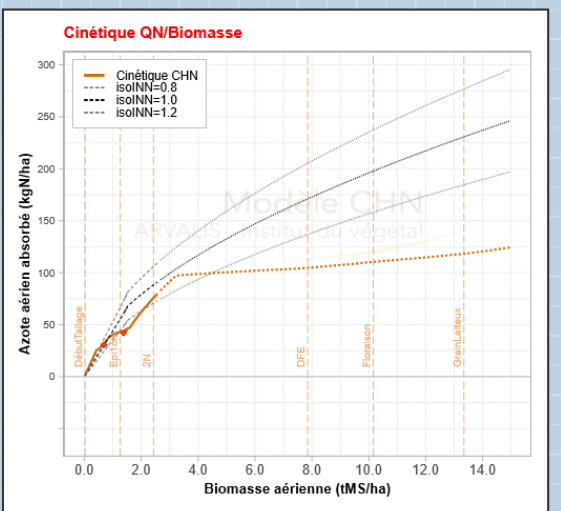
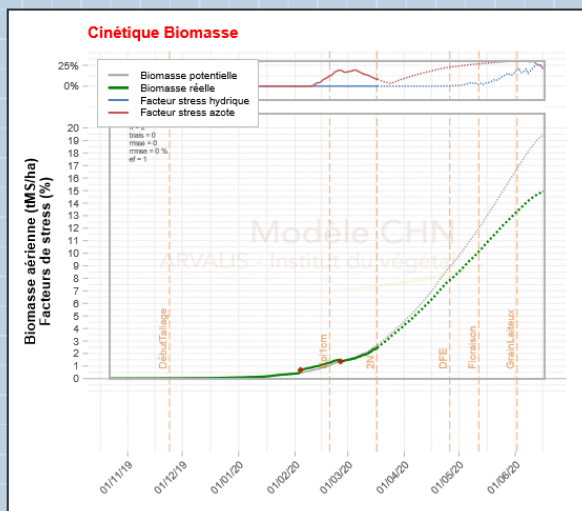


Figure 11 : Exemple de fiche de résultats issue de CHN pour le site du Chaumoy (18) produite le 22 mars après un premier apport le 5 mars

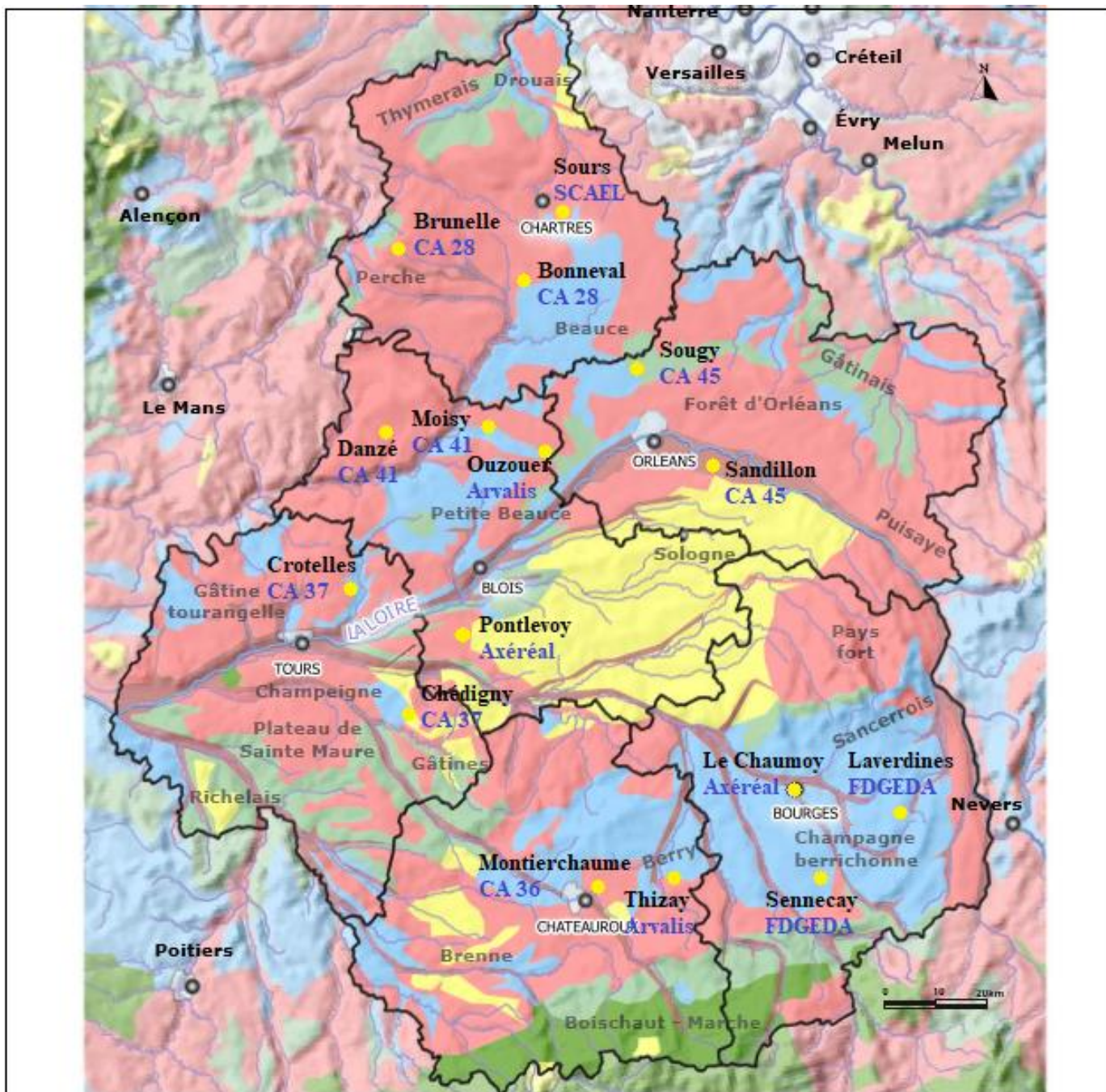
La première consiste à déterminer si la journée est favorable à un apport d'azote. Pour cela, différents critères sont à respecter. Il faut en effet que le sol soit assez humide pour recevoir de l'engrais en évitant les pertes (Campbell et al., 1995). Le critère retenu par l'INRAE est donc que le sol doit avoir reçu au moins 10 mm d'eau sur les trois jours suivants l'apport (Powlson et al., 1992). Ensuite, il faut s'assurer que le précédent apport ait eu lieu au moins 15 jours avant pour éviter de saturer le sol en azote que la plante n'aura pas le temps d'absorber. Une fois la date de contrôle validée, une estimation de l'INN peut avoir lieu grâce au HN-tester®. Enfin, une fois l'INN estimé, il reste à prendre la décision de l'apport. Cette décision est prise en se basant sur des abaques relatifs à chaque parcelle. Le tableau 1 présente l'abaque utilisé cette année. Ces abaques, fournis par l'INRAE, donnent en fonction de l'INN mesuré et de la date de mesure, la quantité d'azote à apporter ou non pour éviter toute carence préjudiciable. Ces abaques sont réalisés pour un lieu et une année en se basant sur le modèle Azodyn, qui donne l'INN, l'azote lixivié et le CAU. Les doses retenues sont celles qui maintiennent l'INN jusqu'à la prochaine date en minimisant les pertes. Si l'apport est réalisé, la mesure peut être à nouveau réalisée 15 jours après. L'objectif est de maximiser le CAU en apportant le minimum d'azote au meilleur moment et dans les meilleures conditions pour éviter toute carence dommageable au rendement.

e) Présentation de la méthode CHN

La seconde méthode, la méthode CHN-Conduite, est portée par Arvalis. Cette méthode repose entièrement sur la modélisation, très utilisée en recherche agronomique et en agriculture (Leenhardt et al., 2006). L'acronyme signifie : Carbone Hydrogène et Azote. Ici, le modèle est utilisé comme un outil pour piloter la fertilisation en temps réel. Ce modèle détermine l'INN de la culture en se basant sur un certain nombre de paramètres et d'informations. Certaines informations comme la densité de semis, la variété, la nature du sol ou du précédent sont renseignées au début de la campagne.

Le modèle procède ensuite en quatre étapes. La première est de déterminer les périodes favorables en reprenant le critère de 10 mm dans les trois jours après l'apport (Powlson et al., 1992). Ces périodes favorables sont déterminées cette fois en renseignant la station météorologique la plus proche qui fournira ses prévisions au logiciel. Puis le modèle va réaliser une simulation à proprement parler de l'évolution de l'INN.

Le modèle étant basé sur trois compartiments (plante, sol et atmosphère), paramétré à l'avance pour le blé dur ou tendre et le maïs pour une grande gamme de variétés et basé sur de grandes bases de données pédologiques d'Arvalis, il va modéliser l'évolution la plus probable de l'INN selon l'état du statut azoté. Des mesures de biomasses peuvent être rentrées dans le modèle pour le forcer dans ses prédictions. La troisième étape va être de confronter cet INN calculé à des trajectoires d'INN minimum. Il existe trois niveaux d'INN seuil, selon la richesse en azote du sol et la nature de celui-ci. L'INN seuil peut également être exprimé selon l'INN visé à la floraison. Le modèle détermine alors la trajectoire minimale atteignant ce point à la floraison. Enfin, après avoir confronté l'INN calculé avec l'INN seuil, le modèle CHN va calculer la dose à apporter pour maintenir l'INN au-dessus du seuil jusqu'à la prochaine période météorologique prédite comme favorable. La figure 11 montre le type de résultat issu du modèle CHN. On y voit le graphique d'INN représentant les courbes seuils et l'INN modélisé, ainsi que l'évolution supposée de l'azote stocké dans le sol. Les simulations relatives à la biomasse peuvent en outre être corrigées par des mesures réelles.



Pour des raisons de lisibilité, la carte ci-dessus ne peut restituer toute la variabilité de la nature des sols



© DREAL Centre-Val de Loire
 Source : Gis Sol - SOeS
 Réalisation /SEEVAC - DVDEC - Mai 2015

Figure 12 : Carte des essais pour l'année 2020

4) Le projet SOLINAZO

a) Présentation du projet

Le projet SOLINAZO vise à répondre aux problématiques de qualité des céréales et de gestion de l'azote dans les systèmes de cultures, notamment en blé tendre. Issu d'une coopération entre l'INRAE et Arvalis et en association avec un consortium de partenaires, ce projet s'inscrit dans le cadre européen de la recherche en tant que PEI (Projet Européen pour l'Innovation). L'objectif du projet est de tester, adapter et diffuser de nouvelles méthodes de pilotage chez les partenaires avant de les diffuser auprès des agriculteurs. Ces méthodes doivent permettre d'optimiser les apports de fertilisants azotés et contribuer ainsi à répondre non seulement aux besoins des agriculteurs mais aussi aux objectifs environnementaux de réduction des rejets d'azote. La comparaison des différentes méthodes permet de les évaluer par rapport au raisonnement plus traditionnel de la méthode du bilan et de les tester dans toutes les conditions pédoclimatiques de la région Centre-Val de Loire. Les différents partenaires associés au projet sont donc la chambre d'agriculture régionale du Centre-Val de Loire, les chambres d'agriculture du Cher (18), de l'Eure-et-Loir (28), de l'Indre (36), de l'Indre-et-Loire (37), du Loir-et-Cher (41) et du Loiret (45), la FGEDA, les coopératives SCAEL et Axéreal et enfin Arvalis et l'INRAE. Chacun des partenaires a ainsi mis en place deux essais en microparcelle et a suivi deux ou trois agriculteurs avec des essais en plein champ. Les essais sur blé tendre liés à ce projet entrent en 2020 dans leur troisième et dernière année et les résultats 2018 ont déjà été traités dans un précédent rapport (Deshayes, 2018). Ce travail s'inscrit donc dans une démarche similaire en reprenant les mêmes méthodes. La figure 12 présente la carte des essais pour l'année 2020.

b) Problématiques et hypothèses

Les objectifs de ce projet sont donc de comparer expérimentalement les performances des différentes stratégies de fertilisation azotée sur divers critères comme la teneur en protéine, le rendement, les pertes azotées ... de tester les nouvelles stratégies dans des situations agricoles représentatives de la région ou des situations extrêmes pouvant les mettre en défaut afin d'étudier leurs limites potentielles et enfin de tester et diffuser ces nouvelles méthodes aux agriculteurs du territoire. Grâce aux différents partenaires bien répartis sur la région, l'idée est d'évaluer les règles de décision choisies dans un panel de conditions aussi large que possible et cela sur trois années. La coopérative Axéreal est ainsi en charge de deux essais, situés sur les communes du Chaumoy (18) et de Pontlevoy (41) et nous nous concentrerons sur l'étude de ces deux essais en microparcelle. Ma mission est donc de suivre ces essais, de piloter la fertilisation azotée selon les conditions climatiques, les modalités ou l'état du couvert. Les résultats sont ensuite analysés et comparés avec les résultats des années précédentes, avant de déterminer les avantages et les limites de chaque modalité. En parallèle, j'ai également pu suivre un essai sur blé dur situé à Bessay (28) lié à un autre projet mais testant sensiblement les mêmes modalités dans des conditions proches du projet SOLINAZO.

Les problématiques liées à ce stage sont les suivantes :

- Quels sont les aspects sur lesquels se différencient ces stratégies de fertilisation ?
- Quel niveau de performance économique, agronomique et environnemental est atteint par les nouvelles méthodes en comparaison avec la méthode du bilan en se fiant aux résultats des essais Axéreal ?
- Ces nouvelles méthodes s'adaptent-elles correctement aux différentes situations pédoclimatiques ? Quelle est leur fiabilité après trois années d'essai ?
- Quelles sont les tendances et les limites de ces méthodes révélées par nos essais ?
- Comment mettre en pratique dans le futur ces méthodes auprès des agriculteurs ?

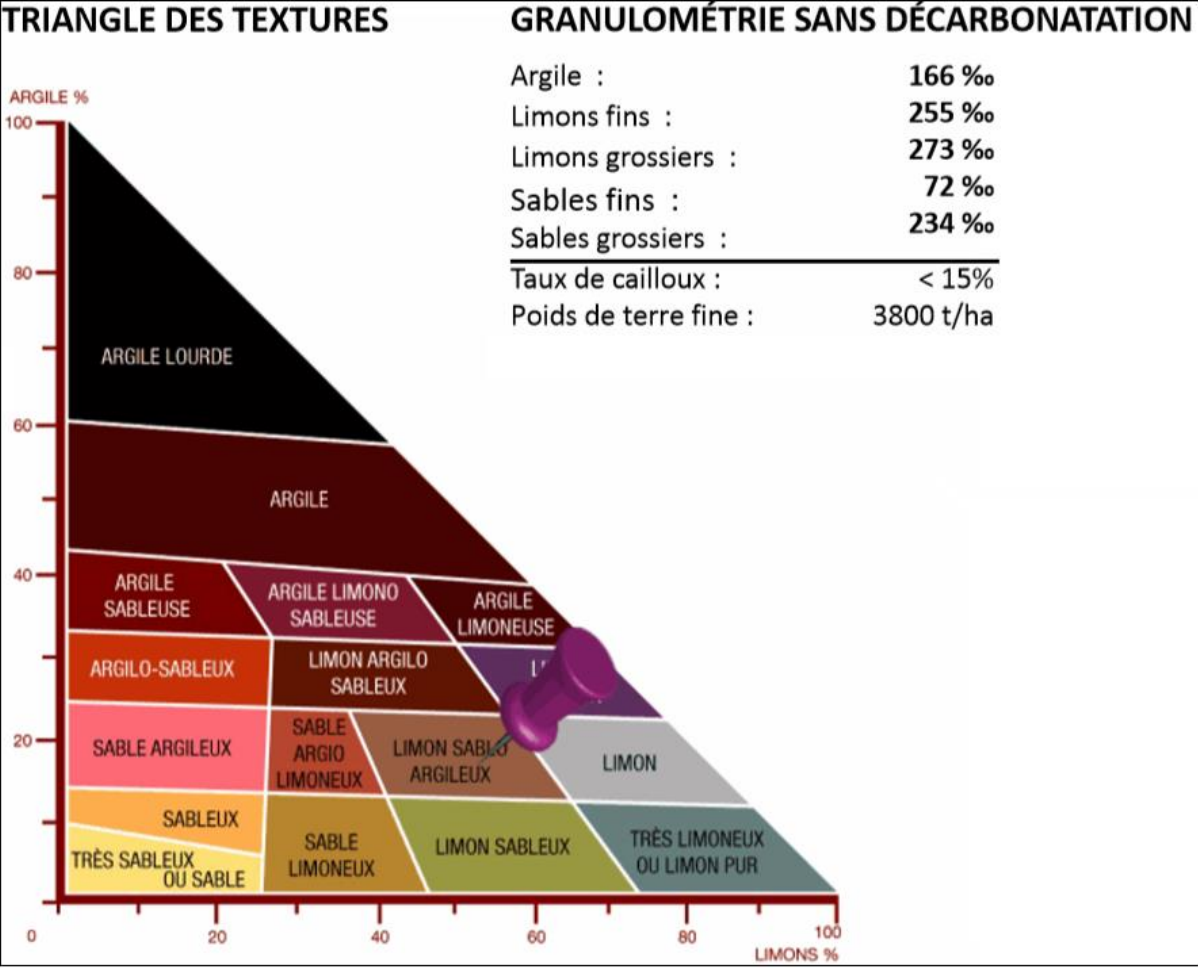


Figure 13 : Texture du sol de la parcelle expérimentale du Chaumoy (18)

Matériels et méthodes

L'un des objectifs du projet est de tester de nouvelles méthodes de gestion de la fertilisation azotée sur un panel de contexte pédoclimatique le plus représentatif possible de la région Centre Val de Loire. En trois ans, les différents partenaires du projet ont ainsi implanté une cinquantaine d'essais, quadrillant ainsi efficacement la région mis à part la Sologne, zone forestière peu propice à la céréaliculture.

1) Sites d'étude

a) Site expérimental du domaine du Chaumoy (18)

Cet essai est implanté à proximité de Bourges, dans le département du Cher, sur le plateau calcaire du Berry. Le sol, dont la texture est détaillée dans la figure 13, est constitué de limons argilo-sableux et est assez profond (>90 cm). Il dispose d'une bonne réserve utile (175 mm). Du fait des limons (53 % de la phase solide), ce sol est assez sensible à la battance et au tassement. Le taux de matière organique est moyen (2,0 %) et le pHeau de 6,9 convient très bien à la culture du blé. D'un point de vue climatique, les conditions correspondent à un climat océanique dégradé, avec des étés secs et chauds et des hivers pluvieux et frais. Les normales de précipitations sont de 747 mm sur Bourges, avec une somme de degrés jours égale à 4500. Semée avec une densité de 250 grains/m² le 13 octobre 2019 après un tournesol, la variété de blé tendre Sacramento a comme caractéristiques un rendement relativement élevé et un taux de protéines important. Ce site est également implanté directement sur la ferme expérimentale d'Axéreal pour le Sud de la région Centre-Val de Loire. Cette exploitation dispose donc de sa propre structure de production et d'une équipe technique à deux pas de l'essai.

b) Site expérimental de Pontlevoy (41)

Cet essai se situe à 25 km au sud de Blois, dans le département du Loir-et-Cher, sur le plateau bocager de Touraine. Le sol est assez superficiel (50 cm de profondeur) et est constitué de limons argileux reposant sur des argiles à silex. Avec 64 % de limons, ce sol est assez fragile et battant et le travail du sol doit être effectué avec précaution. La réserve utile est moyenne (64 mm) du fait de la superficialité du sol. Avec un taux de matière organique assez faible (1,5 %) et un sol alcalin (pHeau = 7.6), ces caractéristiques font de ce sol un sol à capital plus limité. Toutefois cet essai est assez représentatif des types de sols rencontrés en périphérie de la Sologne, zone assez peu explorée lors des deux années précédentes.

Le climat correspond lui aussi à des conditions océaniques dégradées. Les normales de précipitations sont de 702 mm et la somme des degrés jours est de 4450. Le semis est réalisé le 14 octobre 2019, dans d'assez bonnes conditions avec une densité de 300 g/m² derrière colza, la variété de blé tendre Chevignon implantée est très productive et présente de bonnes capacités de panification.

Malheureusement, la crise de la COVID-19 est venu perturber le bon déroulement des opérations sur cet essai. En effet, contrairement à l'essai du Chaumoy, implanté directement sur une station expérimentale de la coopérative, l'essai de Pontlevoy est implanté chez un agriculteur et doit être piloté par une équipe expérimentale située à Chateaudun, à 90 km de là. A l'annonce du confinement, il est donc décidé d'abandonner l'essai, situé trop loin des équipes techniques. D'autres essais ont ainsi dûs être abandonnés dans la région. Le confinement intervenant mi-mars, la campagne de fertilisation n'a pas pu être menée correctement. L'année 2020 ne sera donc basée que sur l'essai du Chaumoy pour les essais en microparcelles d'Axéreal.

Notation INRAE	Notation Axérial	Modalité	Fonction	Méthode
S0	1	Témoin	Rendement	Pas d'azote apporté
S0*	2	Témoin	Prélèvements	Pas d'azote apporté
S1	3	Bilan	Rendement	Suivi méthode du bilan en 4 apports
S1*	4	Bilan	Prélèvements	Suivi méthode du bilan en 4 apports
S2	5	APPI-N	Rendement	Suivi de la méthode APPI-N
S2*	6	APPI-N	Prélèvements	Suivi de la méthode APPI-N
S3	7	CHN	Rendement	Suivi de la méthode CHN
S3*	8	CHN	Prélèvements	Suivi de la méthode CHN
S4	9	Farmstar	Rendement	Suivi des recommandations Farmstar®
S5	10	X-40	Rendement	Bilan avec 40 uN de moins au 3 ^e apport
S6	11	X+40	Rendement	Bilan avec 40 uN de plus au 3 ^e apport
S7	12	Alternative	Rendement	CHN avec un objectif d'INN plus élevé
S7*	13	Alternative	Prélèvements	CHN avec un objectif d'INN plus élevé

Tableau 2 : Présentation des modalités et notations associées

Garde sur fertilisée	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	Garde
	S4	S0	S0*	S1	S1*	S2	S2*	S3	S3*	S7	S7*	S5	S6	

Garde sur fertilisée	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	Garde
	S1	S1*	S2	S2*	S4	S0	S0*	S7	S7*	S6	S5	S3	S3*	

Garde sur fertilisée	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	Garde
	S6	S3	S3*	S5	S1	S1*	S0	S0*	S4	S7	S7*	S2	S2*	

Garde sur fertilisée	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	Garde
	S5	S3	S3*	S7	S7*	S2	S2*	S1	S1*	S6	S0	S0*	S4	

Tableau 3 : Plan de l'essai du Chaumoy (18)

2) Organisation des parcelles au sein des sites et itinéraires techniques

a) Structure des essais

Sur les deux sites expérimentaux sont testées 8 modalités, correspondant aux différentes méthodes de raisonnement à comparer. L'INRAE et Axereal ayant développé leurs propres systèmes de notations, nous emploierons celui de l'INRAE par souci pratique dans le rapport.

Nous obtenons ainsi les modalités S0 pour le témoin, S1 pour la méthode du bilan, S2 pour la méthode APPI-N, S3 pour la méthode CHN, S4 pour la modalité Farmstar, S5 pour la modalité méthode du bilan moins 40 uN, S6 pour la méthode du bilan plus 40 uN et enfin S7 pour une variante de la modalité CHN.

Toutes les microparcelles liées aux modalités S0, S1, S2, S3 et S7 sont dédoublées pour permettre le prélèvement destructif d'échantillons et donc ne pas pénaliser outre mesure les microparcelles destinées à la récolte. Ces microparcelles destinées aux mesures destructives seront nommées S0*, S1*, S2*, S3* et S7* et les microparcelles liées à la récolte S0, S1, S2, S3 et S7. Ces paires de parcelles sont toujours côte à côte dans la disposition de l'essai pour limiter le risque d'hétérogénéité entre les mesures et la récolte.

Les modalités sont récapitulées dans le tableau 2. La modalité S0 est un témoin qui ne reçoit aucune dose d'azote. Les modalités S1 et S2 suivent les recommandations liées respectivement à la méthode du bilan et à la méthode APPI-N. Les modalités S5 et S6 encadrent la modalité S1 avec 40 uN en plus ou en moins pour permettre de situer les autres mesures autour de la méthode du bilan. Les modalités S3 et S7 correspondent aux simulations et aux conseils d'apport liés au modèle CHN. La différence entre les deux modalités réside dans les objectifs fixés à la culture. La modalité S3 doit atteindre un INN de 0,9 à la fin de la campagne là où la modalité S7 doit atteindre un INN de 1,0. Si tous les partenaires sont tenus de tester la modalité S3, Axéreal a mis en place une modalité supplémentaire alternative S7 chaque année. Cette année, la modalité S7 traduit un objectif plus important que l'objectif d'INN par défaut. En 2018 et 2019, la modalité S7 traduisait des modalités mixtes entre CHN et APPI-N. La modalité S4 est liée à la méthode Farmstar, qui détermine par le biais de photographies satellites issues du logiciel Farmstar® la dose d'azote à apporter. Du fait de la résolution satellitaire trop limitée pour une microparcelle, le conseil d'apport correspond à celui de la parcelle globale entourant l'essai.

Les microparcelles mesurent 9,5 m de long ce qui correspond à la largeur du pulvérisateur employé au Chaumoy. La largeur de 3 m est dimensionnée pour la moissonneuse batteuse expérimentale de la station qui ne récolte qu'1,5 m au centre de la microparcelle pour éviter les effets de bordure et les éventuelles contaminations interparcellaires lors de l'application de l'azote. L'agencement des parcelles est indiqué dans le tableau 3. Une bande d'un mètre de large est laissée entre chaque microparcelle. L'essai se structure ainsi en quatre blocs de 13 microparcelles. Autour de cet ensemble se trouvent des microparcelles de garde pour isoler l'essai du reste du champs. Parmi celles-ci, quatre sont surfertilisées (50 uN toutes les trois semaines à partir de février) pour servir de témoins pour la méthode APPI-N.

Ratio HNT® modalité/bande surfertilisée	INN
0,66 à 0,74	0,4 à 0,5
0,74 à 0,82	0,5 à 0,6
0,82 à 0,87	0,6 à 0,7
0,87 à 0,92	0,7 à 0,8
0,92 à 0,94	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

Tableau 4 : Tableau de correspondances utilisé entre le ratio modalité/étalon et INN



Figure 14 : photographie de l'une des pinces Hydro N-Tester® utilisée

b) Itinéraire technique de préparation

Nous détaillerons uniquement la situation au domaine du Chaumoy dans la suite de ce rapport, l'essai de Pontlevoy n'ayant pas pu être exploité.

Au Chaumoy, le blé tendre est donc implanté derrière une culture de tournesol et qui a été récoltée le 2 septembre 2019. Un déchaumage aux disques a ensuite été effectué le 10 septembre. Le blé tendre Sacramento a ensuite été semé le 13 octobre, avec une densité de 250 grain/m². Le blé a commencé à lever dès le 22 octobre 2019. Un traitement herbicide et insecticide a été appliqué ensuite le 25 novembre, avec 0,075 L de Karaté Zéon en insecticide et 0,5 L de Fosburi et 1,5 L de Flight en herbicides. Le premier produit est un pyréthrianoïde employé face aux pucerons, qui se sont révélés particulièrement délétères sur l'ensemble de la région en 2020. Les deux herbicides sont des antigraminées et antidicotylédones à utiliser en post-levée. Les IFT de traitement sont donc de 1 pour l'insecticide, de 0,38 pour le Flight et de 0,83 pour le Fosburi. Enfin, un reliquat de sortie d'hiver a été réalisé le 8 janvier 2020. De plus, en suivant les préconisations accompagnant le reliquat de sortie d'hiver, 70 unités de Phosphore et 40 unités de Potassium ont été apportées en début de campagne. Ces apports permettent de s'assurer que la culture ne souffre pas d'autres carences que la carence azotée et ainsi que l'étude porte bien sur les effets de la fertilisation azotée. L'azote est apporté sous forme uréique, avec le Nexen® titrant à 46% d'azote.

La campagne de fertilisation sur le site du Chaumoy débute à la sortie de l'hiver, avec les premiers apports d'azote début février. A partir de ce moment de l'année, diverses mesures peuvent être réalisées.

3) Mesures et suivi des essais

a) Suivi de l'INN

La modalité S2 correspond à la méthode APPI-N, reposant sur des mesures au HN-tester® (Yara©) qu'il faut réaliser tous les 15 jours du tallage à la floraison. On suit ainsi l'évolution de l'INN dans la plante, ce qui permet de déterminer une dose éventuelle à apporter par le biais d'abaques.

La pince N-Tester fonctionne par mesure de transmittance à travers la feuille de blé, grâce à une longueur d'onde infrarouge et une longueur d'onde rouge. Ces longueurs d'onde sont reliées à la teneur en chlorophylle de la feuille, qui est liée à la teneur en azote (Padilla et al., 2014). La mesure est non destructrice, sauf en cas de pluie récente auquel cas il faut détacher la feuille et la sécher à l'abri avant de faire la mesure (l'eau superficielle fausse la mesure de transmittance). La pince est calibrée avant utilisation sur un témoin de transmittance connue. La mesure peut ensuite être réalisée sur 30 feuilles d'une même microparcelle pour obtenir la valeur moyenne de ces 30 feuilles. La mesure est réalisée pour chaque bloc pour obtenir une moyenne. La mesure est également réalisée sur les quatre microparcelles surfertilisées qui sert d'étalon. En calculant le ratio de la teneur moyenne en chlorophylle de la modalité sur la teneur de l'étalon, on obtient un rapport qui est converti grâce à une abaque de l'INRAE en INN, présentée dans le tableau 4, et est associé suivant la date à une dose d'azote à apporter. La figure 14 montre l'une des pinces utilisée chez Axérial.

Stade	Témoin (S0*)	Bilan (S1*)	APPI-N (S2*)	CHN (S3*)	Alternative (S7*)
Sortie d'hiver	Reliquat de sortie d'hiver				
Tallage	Analyse biomasse				
Epi 1 cm		Analyse biomasse	Analyse biomasse	Analyse biomasse	Analyse biomasse
2 Nœuds		Analyse biomasse	Analyse biomasse	Analyse biomasse + profil d'azote minéral	Analyse biomasse
Dernière Feuille Etalée		Analyse biomasse	Analyse biomasse	Analyse biomasse	Analyse biomasse
Floraison	Analyse biomasse	Analyse biomasse	Analyse biomasse	Analyse biomasse + profil d'azote minéral	Analyse biomasse + profil d'azote minéral
Récolte	Reliquat post récolte + analyse grain et paille	Reliquat post récolte + analyse grain et paille	Reliquat post récolte + analyse grain et paille	Reliquat post récolte + analyse grain et paille	Reliquat post récolte + analyse grain et paille

Tableau 5 : Récapitulatif des mesures de biomasses et des reliquats effectués selon les modalités



Figure 15 : Prise de vue en drone de l'essai du Chaumoy le 18/05/2020 (Axérial)

b) Modélisation CHN et prise de décision

Les modalités S3 et S7 sont basées sur le modèle CHN. Les conseils d'apport sont basés sur des simulations issues de ce modèle. Pour réaliser ces simulations, il faut remplir un fichier contenant des informations fixes comme le précédent, le semis, le sol, le climat, le reliquat de sortie d'hiver ... et des informations modifiables concernant les dates d'apport, les stades et les mesures de correction. Une fois le fichier rempli, le modèle CHN détermine l'INN de la culture, la quantité d'azote présente dans le sol, la période favorable d'application selon la pluviométrie, la dose d'azote à apporter pour ne pas dépasser les seuils fixés ...

La différence entre les modalités S3 et S7 réside dans le scénario appliqué. Pour la modalité S3, le scénario correspond à un milieu aux capacités intermédiaires, avec un objectif d'INN de 0,5 au stade épi 1 cm et de 0,9 au stade floraison. Pour la modalité S7, le scénario correspond à un milieu avec de bonnes capacités de fourniture d'azote, avec des objectifs de 0,6 au stade épi 1 cm et de 1,0 à la floraison. De plus, des mesures de biomasse et de teneur en azote sont réalisées régulièrement pour recalibrer le modèle.

c) Mesure de biomasse et reliquats

Des prélèvements de biomasse sont également réalisés à différents stades clé indiqués dans le tableau 5, que sont les stades tallage, épi 1 cm, 2 nœuds, dernière feuille étalée et floraison. Pour chaque modalité testée et dans chaque bloc, on prélève deux rangs sur un mètre linéaire. Une fois pesés, les prélèvements sont séchés à l'étuve (deux jours à 80 °C) puis repesés. Une partie est alors envoyée au laboratoire d'analyse pour déterminer l'azote par la méthode Dumas. Cette méthode repose sur un protocole qui consiste en une combustion de la plante, suivie d'une réduction cuprique et d'une analyse de l'azote obtenue par chromatographie en phase gazeuse. Cela permet ainsi de mesurer la quantité totale d'azote contenue dans la plante dans sa globalité (Jeuffroy & Recous, 1999). Les mesures obtenues pour la modalité S2 sont comparées aux valeurs obtenues par le HN-Tester. Pour les modalités S3 et S7, les analyses servent à corriger la courbe issue du modèle CHN. Les reliquats sont mesurés en entrée puis en sortie d'hiver et enfin après la récolte afin de réaliser un bilan azoté. Ils sont réalisés sur trois horizons de 0 à 90 cm, à la tarière soit à main soit grâce à un quad. Les reliquats nous donnent la teneur en NH₃ et N₄H⁺ pour chaque horizon. La figure 15 montre une vue aérienne de l'essai sur laquelle on peut clairement remarquer les parcelles témoins, plus pâles du fait du stress azoté, mais aussi les parcelles de prélèvement de biomasse, dans lesquelles on aperçoit le sol à l'endroit des prélèvements.

d) Mesures à la récolte

La récolte concentre un certain nombre de mesures. Avant la récolte, la densité d'épis est mesurée grâce à des cerceaux de 0,25 m² avec quatre répétitions par microparcelle. Lors de la récolte, différents aspects sont abordés. La quantité passe par une mesure du rendement, du PMG et du nombre d'épis, ce qui donne ensuite le nombre de grains par m² et le nombre de grains par épi. La qualité passe par le taux d'humidité et le taux de protéines, via un analyseur de céréales. Enfin le bilan azoté est lié aux mesures de matière sèche des pailles, des épis et des grains et par leur teneur azotée respective par analyse en laboratoire, ainsi qu'un reliquat post-récolte.

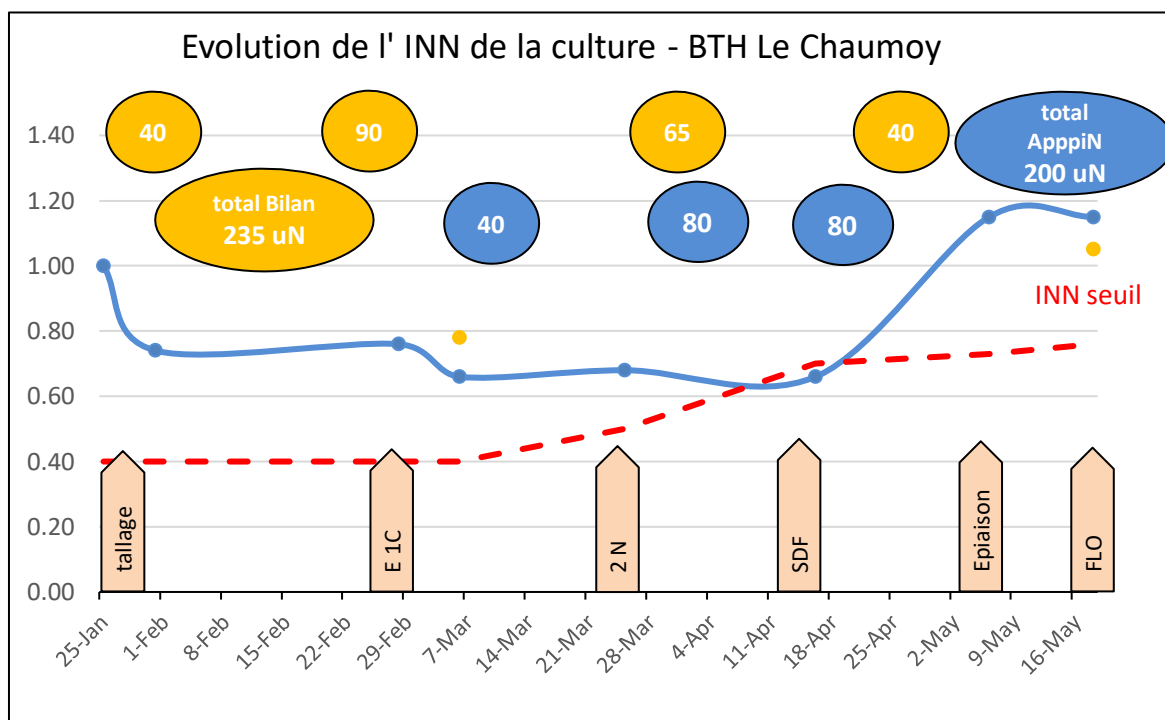


Figure 16 : Courbe d'évolution de l'INN de la modalité APPI-N mesuré au N-Tester au Chaumoy (18) en 2020

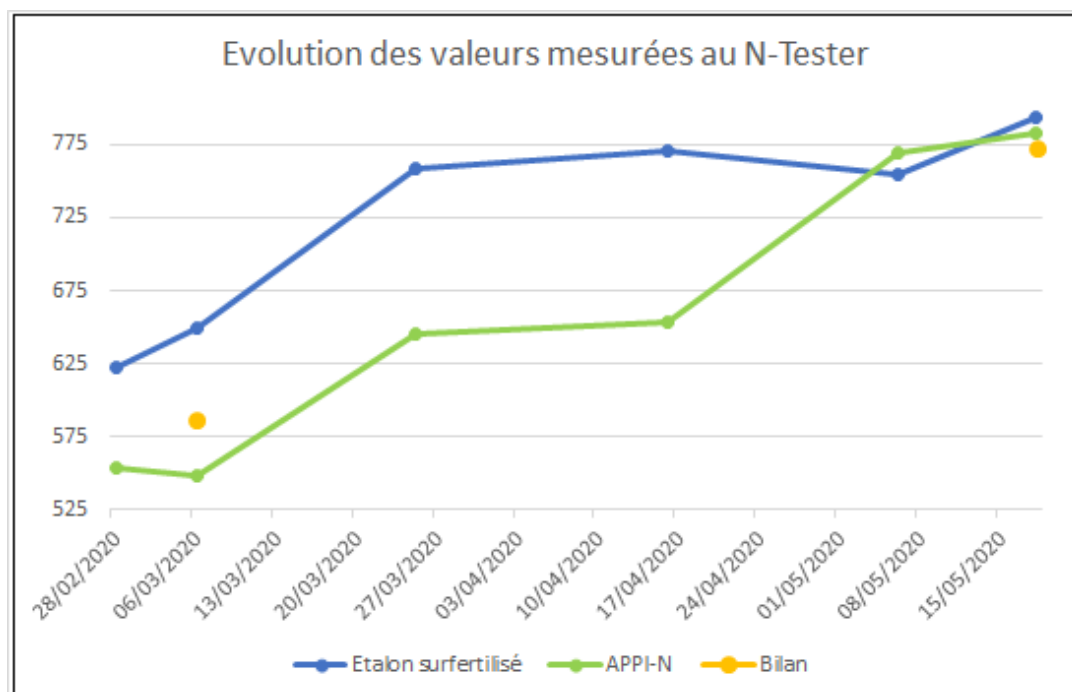


Figure 17 : Evolution comparée des valeurs mesurées au N-Tester entre l'étalon et la modalité APPI-N pour l'année 2020

Résultats

1) Comparaison des résultats SOLINAZO disponibles

A l'issue de ces trois années d'expérimentation, il est possible de compiler les données disponibles concernant la méthode APPI-N et la méthode CHN du projet SOLINAZO. Certaines données sont disponibles en annexe. Chaque année, une quinzaine d'essais en microparcelles ont été mis en place par les partenaires du projet. Pour Axéreal, un essai a été mené chaque année sur le site du Chaumoy. Nous nous appuyerons donc sur les données issues de ce site pour comparer l'essai de 2020. En effet, les essais sur ce site permettent de travailler sur le même type de sol, avec la même équipe technique, permettant ainsi de mieux travailler sur l'effet de l'année. Néanmoins, certaines données générales issues de tous les sites nous permettront de comparer les résultats à l'échelle régionale. Tous les essais reprennent donc les mêmes modalités, avec un protocole commun. Axéreal est la seule à tester chaque année une modalité supplémentaire alternative. En 2020, cette alternative correspond à la modalité CHN avec un objectif d'INN plus élevé à floraison. En 2018 cette modalité correspondait à une observation visuelle du couvert pour les deux premiers apports et une mesure au N-Tester pour le dernier apport. En 2019, la modalité Alternative S7 correspondait à la méthode APPI-N pilotée par les modélisations d'INN de CHN.

2) Comparaison des INN selon les différentes stratégies et fiabilité

Le suivi de l'INN est nécessaire pour déterminer l'état azoté du blé pour certaines modalités. L'INN étant corrélé à la biomasse, des coupes sont organisées à intervalle régulier, environ à chaque stade de développement de la plante. Ces prélèvements sont ensuite envoyés en laboratoire pour analyser la teneur en azote des plantes par la méthode Dumas.

a) Des INN indiquant un stress azoté

Pour la modalité APPI-N, des mesures au N-Tester permettent de mesurer l'INN de la plante et donc la quantité d'azote à apporter pour ne pas dépasser un certain seuil d'INN, seuil au-delà duquel la plante ne pouvait plus atteindre son potentiel. La courbe d'évolution de l'INN mesuré est présentée dans la figure 16. Pour 2020, la courbe d'INN de la modalité APPI-N n'a pas atteint la courbe seuil, hormis temporairement autour du 20 avril. Cette période correspond à une période sèche du printemps 2020, ce qui ne laissait pas énormément de créneaux pour réaliser les apports dans de bonnes conditions. La fertilisation de l'étalon, essentielle pour le calcul de la dose avec le N-tester a pu être réalisée dans de bonnes conditions et l'écart entre cet étalon et les autres modalités s'est maintenu tout au long de l'expérimentation (figure 17). En 2019, l'essai du Chaumoy était également resté au-dessus de la courbe seuil, au contraire de l'essai mené à Bonneval (28), qui avait plongé dans la première moitié du mois d'avril. En 2018, les essais du Chaumoy et de Tigy présentaient des INN supérieurs au seuil. Le suivi de l'INN a donc assez bien fonctionné sur les trois années. Les moments où l'INN est redescendu sous le seuil étaient dus à des situations de sécheresse trop forte pour pouvoir réaliser un apport efficace. Cela pose la question de la faisabilité de réaliser des apports plus tardifs, dans des mois souvent plus secs pour la région.

En revanche, et ce pour les cinq essais d'Axéreal, les essais étaient à partir de la sortie de l'hiver jusqu'à la fin avril en dessous de la barre $INN=0,95$, ce qui indique que la culture est en état de carence azotée. Toutefois, restant au-dessus du seuil défini par Clémence Ravier, cet état n'est en théorie pas préjudiciable au rendement. A cause de la COVID-19, les mesures se sont limitées au minimum pour l'essai d'Axéreal, ne permettant pas de suivre l'INN du bilan.

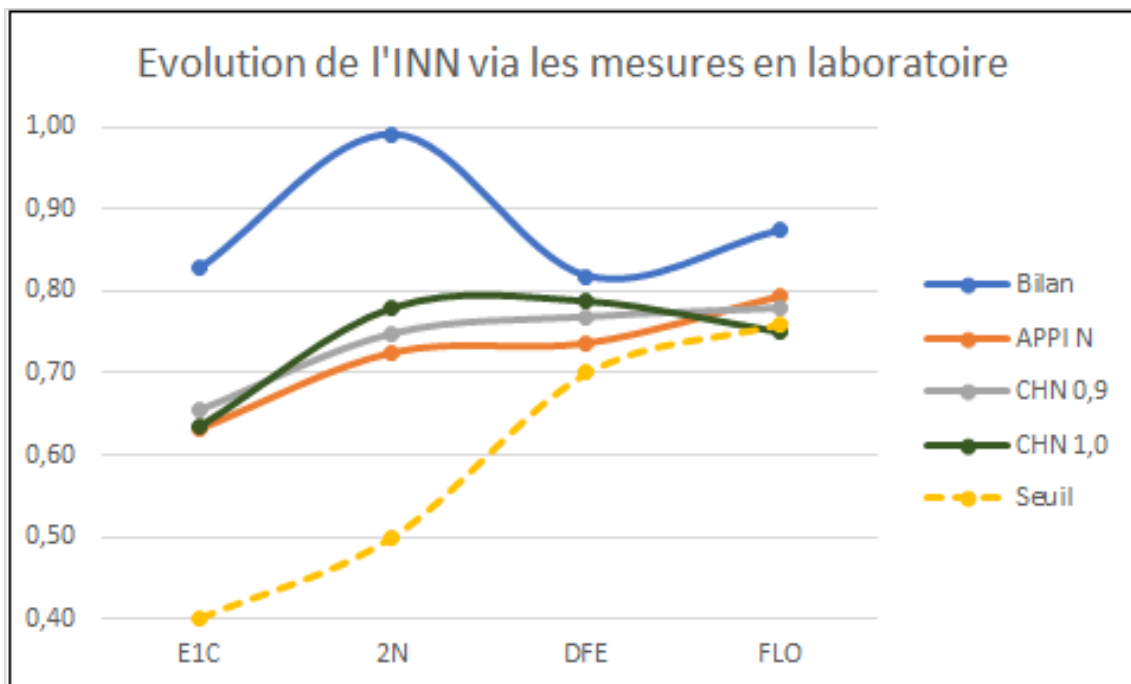


Figure 18 : Evolution de l'INN mesuré en laboratoire sur les prélèvements de biomasse en 2020 au Chaumoy (18)

A l'échelle du projet, en se basant sur une dizaine d'essais dont les résultats sont disponibles pour l'année 2020, il apparaît que la modalité bilan est systématiquement au-dessus des modalités APPI-N et CHN en termes d'INN. Ces dernières restent même en situation de stress azoté tout le long de la campagne. La modalité APPI-N présente quant à elle des résultats plus variables, avec des franchissements de courbe seuils plus fréquents. La modalité CHN, commune à tous les membres du projet parvient quand même à atteindre son objectif d'INN en moyenne.

La méthode CHN (S3) et son alternative (S7) devait se différencier par des objectifs d'INN différents. L'alternative était supposée avoir une trajectoire d'INN supérieure de 10 % par rapport à la modalité CHN. Le modèle CHN a pris en compte cette exigence, mais n'a jamais dissocié les apports. On obtient ainsi des doses totales identiques avec 180 uN. De même, les nombres d'apports et les dates d'apports sont les mêmes. Les modalités S3 et S7 sont donc devenues jumelles du fait de leur traitement identique. Toutefois, les comptes-rendus de simulation affichaient des valeurs d'INN cohérentes pour la modalité CHN, avec un INN final de 0,93, mais pas pour la modalité alternative, censée finir à 1,0 mais dont la valeur affichée était de 0,91. L'option de différenciation des objectifs d'INN à floraison, nouveauté du logiciel CHN de 2020, n'a donc pas réellement fonctionné.

b) Les analyses de biomasse relativisent la fiabilité du suivi

En détaillant l'évolution pour l'année 2020 avec les mesures d'INN issues des analyses laboratoire des prélèvements de biomasse, il apparaît que pour le premier prélèvement réalisé fin février au stade épi 1 cm, la méthode du bilan démarre la campagne avec un INN de 0,83, tandis que les modalités CHN et APPI-N étaient en moyenne à 0,64. La distinction perdue entre le bilan et les autres modalités jusqu'au stade DFE, où toutes les modalités présentent un INN autour de 0,77. La modalité bilan atteint son maximum d'INN au stade 2 nœuds avec un INN de 0,99. Les INN atteints pour le stade floraison sont de 0,87 pour le bilan et de 0,79 pour APPI-N. Concernant la modalité CHN, l'INN final est de 0,78 et de 0,75 pour l'alternative. Ces INN issus d'analyses sont donc inférieurs aux INN visés pour les méthodes CHN. La figure 18 compare ainsi les INN obtenus. Les INN obtenus par mesure en laboratoire sont cependant toujours inférieurs aux mesures issues du N-Tester, et ce pour la troisième année.

Les différences entre l'INN mesuré en laboratoire et l'INN mesuré à la pince montrent que celui-ci a tendance à surestimer l'INN réel de la plante. La question de la fiabilité des instruments de mesure utilisés avait déjà été soulevée en 2018 (Deshayes, 2018) et allait également dans ce sens. Faute de mesures assez nombreuses, cette analyse n'a pas pu être réalisée pour la campagne 2020. Cette étude avait démontré la surestimation de l'INN par la pince d'environ 20 %, notamment pour les derniers stades. Cet outil n'était parfaitement en accord avec les mesures en laboratoire que dans 10 % des cas. Si cet outil n'est pas parfaitement fiable, sa simplicité d'utilisation et son coût lui ont toutefois valu de continuer à être l'outil par défaut de toutes les expérimentations SOLINAZO. La piste d'un autre outil de Yara©, le Greenseeker®, a également été testée par la chambre d'agriculture de l'Indre-et-Loire mais celui-ci s'est révélé encore moins précis. Le Greenseeker fonctionne par mesure de réflectance sur la totalité du couvert grâce au NDVI. Il faut donc balayer la surface du couvert avec l'instrument pour obtenir une estimation de la teneur en azote. Mais cet outil s'est révélé très imprécis pour les stades précoces où le couvert laisse entrevoir le sol de l'inter rang, faussant la mesure.

Chaumoy 2018	Témoin (S0)	Bilan (S1)	APPI-N (S2)	CHN (S3)	Farmstar (S4)	X-40 (S5)	X+40 (S6)	Alternative (S7)
Tallage		40	80	70	40	40	40	40
E1C		90			110	50	130	
DFE		40	60	60	60	40	40	80
Total	0	170	140	130	210	130	210	120

Chaumoy 2019	Témoin (S0)	Bilan (S1)	APPI-N (S2)	CHN (S3)	Farmstar (S4)	X-40 (S5)	X+40 (S6)	Alternative (S7)
Tallage		40			40	40	40	
E1C		70			80	30	110	
1N			60	40				40
2N				40				40
DFE		40	60	20	70	40	40	
FLO								20
Total	0	150	120	100	180	110	190	110

Chaumoy 2020	Témoin (S0)	Bilan (S1)	APPI-N (S2)	CHN (S3)	Farmstar (S4)	X-40 (S5)	X+40 (S6)	Alternative (S7)
Tallage		40			40	40	40	
E1C		90	40	50	90	90	100	50
1N			80	60				60
2N		65	80	60	40	25	95	60
DFE		40		10	50	40	40	10
Total	0	235	200	180	220	195	275	180

Tableau 6 : Fractionnement des doses apportées selon les modalités sur le site du Chaumoy sur les trois années d'essai

3) Des doses plus faibles et des dates plus tardives pour les nouvelles méthodes

En 2020, les apports sont plus tardifs pour la méthode APPI-N et CHN que pour la méthode du bilan ou Farmstar. De plus, les doses appliquées sont bien moindres, comme le montre le tableau 6. Du fait d'un reliquat de sortie d'hiver plus faible qu'habituellement avec 31 unités d'azote, la dose Bilan a été déterminée à 235 U pour un objectif de 85 q/ha, objectif que l'on retrouve en 2019 et en 2018 pour le site du Chaumoy. Cette dose, relativement importante tranche avec les doses APPI-N et CHN, qui sont déterminées au fur et à mesure des mesures ou des simulations. Ainsi, on atteint 200 unités pour APPI-N et seulement 180 pour CHN. Farmstar atteint les 220 unités, du fait de la zone plus faiblement pourvue en azote cartographiée par le logiciel. L'essai a en effet été implanté sur la partie la plus déficitaire en azote de la parcelle, afin de pouvoir observer un effet de la fertilisation azotée.

On observe ainsi que les nouvelles méthodes mobilisent beaucoup moins d'engrais que la méthode du bilan, jusqu'à 55 unités de moins pour la modalité CHN. En 2018, l'écart entre APPI-N et Bilan était de 30 unités, et de 40 unités entre CHN et Bilan. En 2019, l'écart avec APPI-N est de 30 unités également mais de 50 unités avec CHN. L'économie d'intrant est donc avérée sur les essais d'Axéreal.

Mais en plus de la quantité d'azote apportée, les méthodes diffèrent par les dates d'apport. En 2018, 10 jours séparaient le premier apport du Bilan de celui d'APPI-N ou de CHN. En 2019, cet écart monte à 50 jours, avec un apport mi-février pour le Bilan et début avril pour les deux autres. En 2020, cet écart atteint 40 jours. Les apports sont donc plus tardifs pour APPI-N et CHN, avec de gros apports entre les stades 2N et DFE, la modalité CHN étant en retard de 10 jours environ avec la modalité APPI-N. La modalité bilan a reçu sa dose en quatre apports, deux apports au tallage et au stade épi 1 cm et deux apports tardifs aux stades 2 nœuds et DFE. En revanche, la méthode du bilan et la méthode CHN ont reçus leurs doses au stade Epi 1 cm et deux apports au stade 2 N. La méthode CHN a aussi reçu un apport mineur de 10 uN au stade DFE.

A l'échelle de la région, entre 2018 et 2020, la valeur moyenne de la dose totale appliquée pour la méthode du bilan vaut 173,4 uN/ha. Concernant la méthode APPI-N, la dose est inférieure de 30,5 uN et pour CHN de 30,7 uN. Cela représente, pour les deux modalités, une baisse de 18% par rapport au bilan. Ces résultats varient grandement selon le site et l'année d'expérimentation. Ainsi, les valeurs d'écart-type valent 32,2 pour le bilan, 30,7 pour APPI-N et 27,4 pour CHN. Les doses sont cependant significativement différentes au niveau régional. Ainsi, la dose bilan est bien différente de la dose APPI-N (p value= 4,437E-06), de même avec CHN (p value=2,516E-06). Sur les 50 essais disponibles, 11 présentent une dose APPI-N supérieure à la dose bilan, contre 9 pour CHN. A l'inverse, 14 essais présentent des doses bilan très supérieures à la dose APPI-N, avec une différence supérieure à 50 uN. Deux essais sont à égalité entre bilan et APPI-N. Ainsi, 23 essais présentent des doses bilan légèrement supérieures, entre 5 et 50 uN. On observe donc que la tendance régionale est également à une diminution des doses, de 30 uN en moyenne pour CHN et APPI-N.

Au niveau des dates, elles sont en majorité plus précoces pour le bilan. Le premier apport est en moyenne plus tardif de 12 jours pour APPI-N et de 16 jours pour CHN. Les dates du second apport sont assez similaires (4 et 7 jours de différences avec APPI-N et CHN). Entre CHN et APPI-N, APPI-N est plus précoce dans 74 % des essais. En moyenne, la majorité de la dose (plus de 50% de la dose) est déjà épanchée au stade épi 1 cm pour le bilan, alors qu'il faut attendre le stade 2 nœuds pour APPI-N et CHN.

Ces nouvelles méthodes présentent donc une approche différente du fractionnement, des quantités et des dates d'apport par rapport à la méthode du bilan.

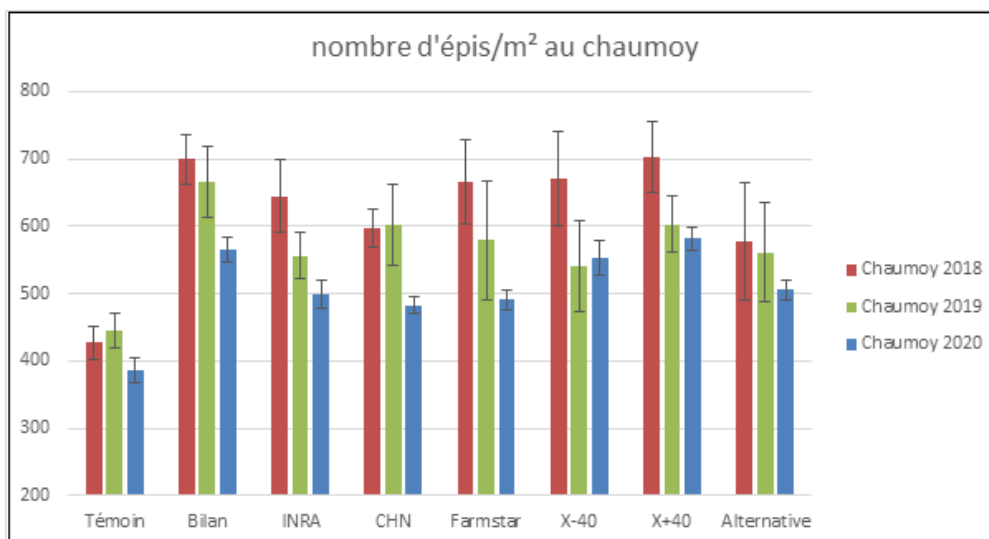


Figure 19 : Comparaison du nombre d'épis par m² au Chaumoy en trois années d'essai

Chaumoy 2020	rendement normalisé (q/ha)	PMG	nombre grain/m ²	nombre épi/m ²	nombre grain/épi	% prot	% hum	p.s.
Témoin (S0)	50.0	D	10433 C	386 B	27.0 B	8.9 D	13.5 D	72.1 B
Bilan (S1)	101.2	AB	20991 A	566 A	37.1 A	12.9 B	13.7 BC	75.4 A
APPIN (S2)	90.8	C	17874 B	499 AB	35.8 A	13.8 A	13.8 A	76.2 A
CHN 0.9 (S3)	93.2	BC	18836 B	483 AB	39.0 A	13.3 B	13.8 AB	76.1 A
Farmstar (S4)	100.3	AB	21397 A	491 AB	43.6 A	12.8 B	13.7 BC	75.2 A
X-40 (S5)	102.2	AB	20884 A	554 A	37.7 A	11.7 C	13.6 C	75.2 A
X+40 (S6)	104.0	A	22356 A	582 A	38.4 A	13.1 B	13.7 BC	75.6 A
Alternative (S7)	92.4	BC	17735 B	505 AB	35.1 A	12.9 B	13.8 AB	75.9 A
moyenne	91.8	48.9	18813	508	36.7	12.4	13.7	75.2
moyenne sans témoin	97.7	49.0	20011	526	38.1	12.9	13.7	75.6
pvalue	3.75E-12	6.02E-06	1.89E-11	0.006282	0.009379	1.78E-15	8.07E-06	1.91E-10

Chaumoy 2019	rendement normalisé (q/ha)	PMG	nombre grain/m ²	nombre épi/m ²	nombre grain/épi	% prot	% hum	p.s.
Témoin (S0)	64.6	C	14698 D	444 B	33.1 D	8.5 D	14.0 A	77.0 C
Bilan (S1)	97.8	A	23286 A	667 A	35.1 A	11.1 BC	14.3 A	81.0 AB
APPIN (S2)	94.7	AB	21185 B	557 A	38.2 B	11.4 B	14.2 A	81.1 AB
CHN 0.9 (S3)	91.3	B	20276 BC	603 A	33.9 BC	11.0 BC	14.3 A	80.9 B
Farmstar (S4)	99.3	A	23750 A	579 A	41.8 A	12.5 A	14.2 A	81.6 AB
X-40 (S5)	89.6	B	20579 BC	541 A	38.4 BC	10.6 C	14.2 A	80.7 B
X+40 (S6)	96.7	A	23674 A	603 A	39.4 A	12.3 A	14.1 A	81.1 AB
Alternative (S7)	90.2	B	19916 C	562 A	35.9 C	11.2 BC	14.2 A	81.1 AB
moyenne	90.5	43.0	20920	569	37.0	11.1	14.2	80.6
moyenne sans témoin	94.3	42.9	21809	587	37.5	11.5	14.2	81.1
pvalue	2.548E-13	3.603E-10	1.19E-14	0.001793	0.06727	3.06E-13	0.672	2.74E-09

Chaumoy 2018	rendement normalisé (q/ha)	PMG	nombre grain/m ²	nombre épi/m ²	nombre grain/épi	% prot	% hum	p.s.
Témoin (S0)	45.6	F	11008 E	428 C	25.8 C	8.5 D	11.5 B	73.6 D
Bilan (S1)	95.3	B	23827 A	700 AB	34.1 AB	11.2 B	11.7 AB	76.8 AB
APPIN (S2)	93.1	BC	22404 AB	645 AB	34.9 AB	11.1 BC	11.6 AB	77.0 AB
CHN 0.9 (S3)	90.2	CD	21618 BC	598 AB	36.3 AB	10.7 BC	11.7 AB	76.4 BC
Farmstar (S4)	100.0	A	23151 AB	666 AB	35.0 AB	12.3 A	11.8 AB	77.3 AB
X-40 (S5)	88.9	D	20617 CD	671 AB	31.0 AB	10.5 C	11.5 B	75.7 AB
X+40 (S6)	99.6	A	23587 A	703 A	33.7 A	12.2 A	11.7 AB	76.8 C
Alternative (S7)	85.1	E	19787 D	578 B	34.9 B	10.6 BC	11.7 AB	77.1 AB
moyenne	87.2	40.4	20750	623	33.2	10.9	11.6	76.3
moyenne sans témoin	93.2	40.5	22142	651	34.3	11.2	11.7	76.7
pvalue	<2E-16	2.86E-07	<2E-16	2.03E-08	0.00199	1.98E-13	0.0104	3.67E-12

Tableau 7 : Compilation des résultats de récolte au Chaumoy sur les trois années d'essai

4) Analyse des performances à la récolte

a) Un meilleur rendement pour le bilan malgré un remplissage plus faible

Après comptage des épis début juin, on obtient une moyenne globale de 508 épis par mètre carré toutes modalités confondues sur le site du Chaumoy. En comparant les modalités, on observe que la modalité bilan se démarque avec 67 épis de plus que la modalité APPI-N et 83 de plus que la modalité CHN. Cette tendance est cohérente par rapport aux années 2019 et 2018, comme le montre la figure 19. La méthode du bilan, grâce à un meilleur tallage et une croissance précoce, semble favoriser le nombre d'épis au mètre carré.

Les données enregistrées par la moissonneuse concernent le rendement brut, qui sera converti en rendement normalisé à 15% d'humidité, l'humidité et le poids spécifique de chaque microparcelle. De plus, un dernier prélèvement de cinquante épis et tiges permet d'estimer le PMG, les masses de paille et de grains ainsi que le taux de protéines. Ces modalités ont été testées au seuil de 5% par analyse de la variance. Un test post-hoc, le test de Newman-Keuls, au seuil de 5%, a de plus permis de séparer les modalités en groupes de modalités homogènes. Les résultats issus de la récolte ainsi que les résultats statistiques associés sont présentés dans le tableau 7 de l'année 2018 à 2020.

En analysant les résultats issus de la récolte, on observe que la méthode du bilan a un rendement normalisé plus important, avec 101 q/ha, de même que la méthode Farmstar, avec un nombre de grains supérieur à 20 000 grains/m². Il est à noter que pour l'année 2020, les modalités X-40, Bilan et X+40 donnent significativement les mêmes rendements alors que les quantités d'azote apportées varient grandement. Avec ces modalités, la plante a donc puisé suffisamment d'azote pour atteindre ce qui semble être un plafond, lié à une autre carence.

A l'inverse, les méthodes CHN et APPI-N présentent respectivement 8 (écart-type de 2,8) et 10 (écart-type de 6,3) quintaux de moins que la méthode du bilan (écart-type de 3,0). Cet écart significatif avait déjà été observée les années précédentes sur les essais du Chaumoy, mais avec des écarts variants entre 2 et 6 quintaux. En revanche, les méthodes APPI-N et CHN présentent un poids spécifique et un PMG supérieur, indiquant un meilleur remplissage des grains. Cette tendance se retrouve également au niveau du taux de protéines, où la modalité APPI-N atteint 13,8 %, soit 1 % de plus que la modalité bilan, même si cet effet sur le taux de protéines ne s'observait pas les deux années précédentes.

On peut donc déduire de ces données que la modalité bilan a favorisé le nombre d'épis et de grains, donnant ainsi un rendement assez haut, tandis que les modalités APPI-N et CHN ont favorisé un meilleur remplissage des grains, même si dans toutes les modalités fertilisées, le rendement objectif de 85 q/ha a été dépassé. Cette différence de comportement peut s'expliquer par la précocité des apports, favorisant la densité de tallage et la disponibilité de l'azote en fin de cycle favorisant le taux de protéines. Pour comparaison, cette tendance vers un meilleur remplissage pour les modalités CHN et APPI-N essayant de contrebalancer la plus forte densité de grains de la modalité bilan se retrouve pour les années précédentes, mais n'avait pas été aussi exacerbée qu'en 2020.

b) Une tendance commune parmi les essais du projet

Au niveau régional, les données de tous les essais ne sont pas encore disponibles pour l'année 2020. Au regard des années 2018 et 2019 en se basant sur 35 essais, le rendement moyen de la méthode APPI-N est de 83 q/ha (écart-type de 16), de 81 q/ha pour la méthode CHN (écart-type de 15) et de 86 q/ha pour le bilan (écart-type de 16).

	Dose (uN/ha)	Écart-type	Rendement (15 %) (q/ha)	Écart-type	Taux protéique (%)	Écart-type
Bilan	173	32	86	16	11,9	1,1
CHN	143	27	81	15	11,7	1,1
APPI-N	143	31	83	16	11,4	1,1

Tableau 8 : Synthèse des résultats d'essai à l'échelle régionale sur les trois années

	Rendement (15 %) q/ha	Taux de Protéines (%)	Dose engrais (uN/ha)	Chiffre d'affaire (€/ha)	Coût engrais (€/ha)	Marge partielle (€/ha)
Témoin	50,0	8,9	0	780 €	0 €	780 €
Bilan	101,2	12,9	235	1 832 €	195 €	1 637 €
APPI-N	90,8	13,8	200	1 643 €	166 €	1 477 €
CHN	93,2	13,3	180	1 687 €	149 €	1 538 €
Farmstar	100,3	12,8	220	1 815 €	183 €	1 623 €
X-40	102,2	11,7	195	1 850 €	162 €	1 688 €
X+40	104,0	13,1	275	1 882 €	228 €	1 654 €
Alternative	92,4	12,9	180	1 672 €	149 €	1 523 €

Tableau 9 : Comparaison économique des différentes modalités en 2020

Sur les 35 essais, 11 présentent un rendement APPI-N légèrement supérieur au bilan, avec une moyenne de 3 q/ha de plus. A l'inverse 14 essais présentent un rendement bilan supérieur à APPI-N d'au moins 5 q/ha. Ces informations indiquent donc des rendements proches, avec des différences non significatives, mais avec une tendance favorable pour la méthode du bilan sur les méthodes APPI-N et CHN. Au niveau des protéines, le taux moyen est de 11,4 pour APPI-N, 11,7 pour CHN et 11,9 pour le bilan. L'écart-type est similaire pour les trois modalités, et il vaut 1,1 (voir tableau 8). Les données régionales ne permettent pas de conclure statistiquement sur une différence significative concernant le rendement ou le taux protéique. On peut néanmoins remarquer une tendance à un plus fort rendement pour le bilan.

En résumé, pour Axéreal, les modalités CHN et APPI-N présentent un rendement inférieur à celui de la méthode du bilan, compensé en partie par un PMG plus élevé et un taux de protéines plus important pour l'année 2020, effet qui pourraient venir compenser économiquement la perte de rendement. Au niveau régional, les nouvelles méthodes ne présentent pas un rendement plus élevé que la méthode du bilan.

c) Des conséquences sur les performances économiques des modalités

Du fait de leur rendement, les nouvelles méthodes engendrent une baisse des revenus par hectare. La modalité bilan reste la plus avantageuse d'un point de vue économique chez Axéreal. Les prix du blé et des engrais correspondent aux prix payés aux agriculteurs en août 2020 pour le prix du blé et au prix vendu en décembre 2019 pour l'engrais uréique. La modalité Farmstar doit aussi prendre en compte le coût de l'abonnement qui est d'environ 10 €/ha. Le prix de l'engrais vaut ainsi 0,83 €/uN tandis que le prix du blé tendre non améliorant vaut 181 €/t. Du fait des différences de protéine pour l'année 2020, le prix du blé fourrager, 156 €/t, servira pour la modalité témoin. La modalité APPI-N, qui présentait un taux de protéines de 13,8 %, n'atteint pas le seuil de 14,5 % pour prétendre au prix des blés améliorants, dont les prix contractualisés sont plus importants.

Les résultats de l'année 2020 sont présentés dans le tableau 9. Il apparaît que la méthode du bilan présente une différence entre le revenu tiré de la récolte et le coût de l'engrais 1 637 €/ha. La modalité APPI-N atteint 1 477 €/ha, la modalité CHN 1 538 €/ha, la modalité Farmstar 1 623 €/ha et la modalité témoin 780 €/ha. La modalité X-40, présente une différence 1 688 €/ha du fait d'une production similaire à la méthode du bilan mais avec 40 unités de moins.

La méthode du bilan présente donc le meilleur bilan économique actuellement. En revanche, la modalité CHN dépasse pour la première fois la modalité APPI-N avec 61 €/ha de plus, ce qui était l'inverse les années précédentes. Cela s'explique par 2 q/ha de plus pour 20 uN/ha de moins. Les nouvelles méthodes engendrent donc une baisse de production, répercutée négativement sur le bilan économique de l'agriculteur par rapport à la méthode classique. Il est toutefois à noter que la méthode Farmstar parvient à faire jeu égal en la matière avec la méthode du bilan pour 15 uN/ha de moins.

Au niveau régional, il est possible de calculer une marge partielle similaire à celle d'Axéreal pour les récoltes 2018 et 2019 pour les modalités bilan, APPI-N et CHN. La marge partielle associée à la modalité APPI-N est alors de 1472 €/ha, contre 1523 €/ha pour le bilan. 13 essais présentent des marges plus élevées pour APPI-N, dans de faibles proportions, notamment en 2019. La marge partielle suit très fortement le rendement obtenu. La variabilité des résultats déjà abordée précédemment empêche là encore de déterminer une différence significative au seuil de 5%. Mais la méthode du bilan apparaît encore supérieure en termes de moyenne.

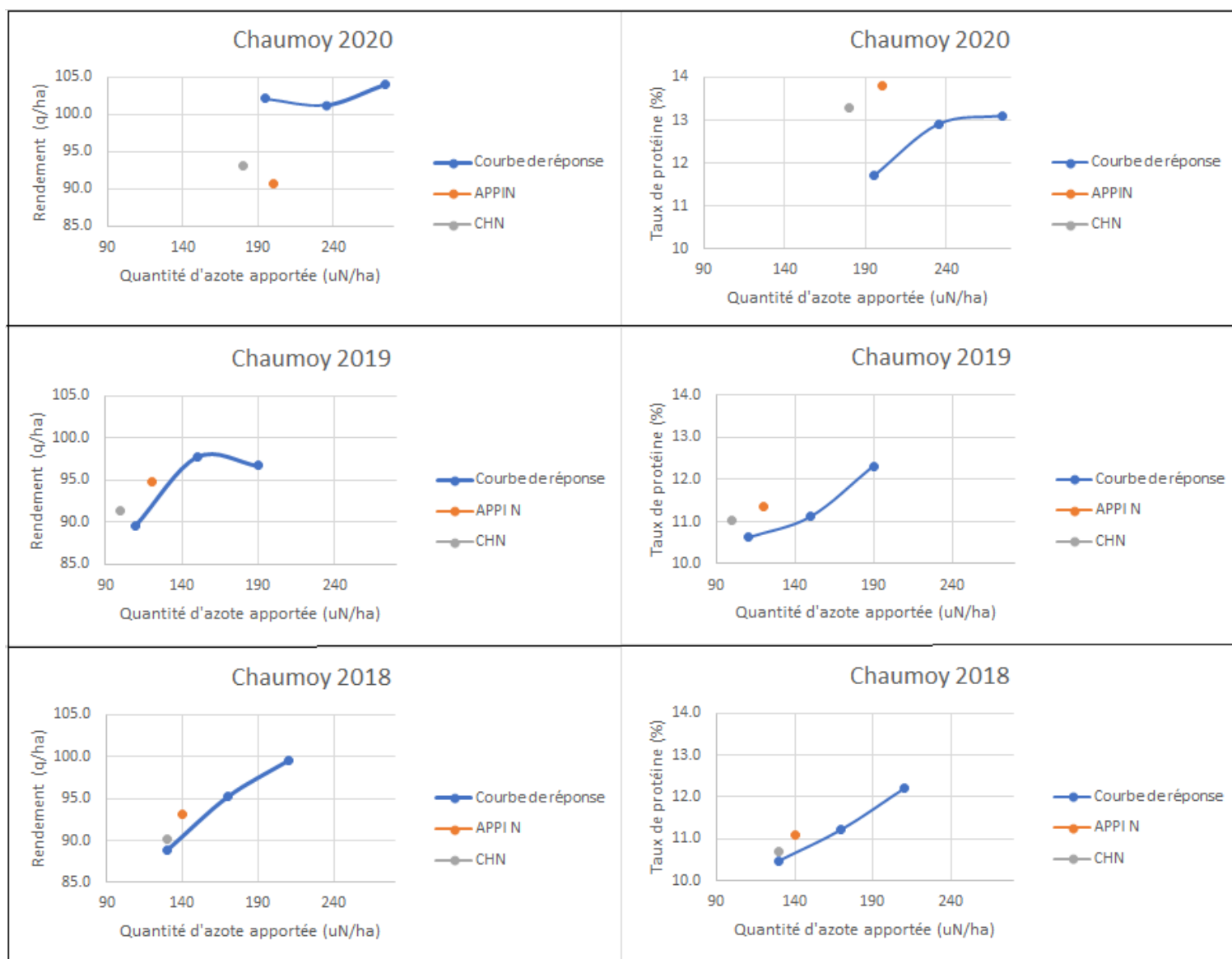


Figure 20 : Positionnement des modalités APPI-N et CHN par rapport à la courbe de réponse à l'azote (modalités X-40, Bilan et X+40)

	Chaumoy 2018	Tigy 2018	Chaumoy 2019	Bonneval 2019	Chaumoy 2020
Bilan	0,72	0,66	0,62	0,63	0,66
APPI-N	0,81	0,77	0,77	0,79	0,72
CHN	0,76	0,71	0,79	0,78	0,79
Farmstar	0,72	0,70	0,70	0,73	0,68
X-40	0,76	0,82	0,68	0,74	0,69
X+40	0,71	0,63	0,62	0,63	0,60
Alternative	0,77	0,85	0,84	0,76	0,74

Tableau 10 : Comparaison des Coefficients d'Utilisation Apparents (CAU) de l'engrais

5) Une bonne valorisation de l'engrais pour les nouvelles méthodes

En comparant dans la figure 20 les rendements et les taux protéiques des méthodes APPI-N et CHN avec les modalités Bilan, X-40 et X+40, qui constituent la courbe de réponse de référence, il apparaît que pour une même quantité d'azote, la modalité Bilan correspondante donne un meilleur résultat, particulièrement élevé cette année. La méthode du bilan a donc mieux valorisé l'engrais en 2020. Les années précédentes, les nouvelles méthodes parvenaient cependant à mieux répondre que la modalité bilan à dose d'azote égale. Des quantités relativement importantes ayant été apportées cette année, à des périodes assez sèches pour la saison, les coefficients apparents d'utilisation de l'engrais sont relativement faibles, autour de 70 %. En revanche, les modalités CHN et APPI-N ont toujours mieux valorisé l'azote vis-à-vis des protéines.

On peut également calculer le CAU de l'engrais pour toutes les modalités grâce à la formule suivante (Limaux, 1999):

$$CAU = \frac{QNi - QN_{\text{témoin}}}{Di}$$

Avec :

- QN : Tot. N exporté = $Rdt * 0.85 * \left(\frac{T.Prot.}{5.7} + \frac{(1-IR) * \%N_{\text{pailles}}}{IR} \right)$
- Di : Dose totale d'N apportée sur la modalité i

De plus, la modalité CHN se démarque par une meilleure utilisation de cet engrais. La modalité Bilan présente un CAU parmi les moins bons, et ce pour la troisième année de suite, de même que les modalités Farmstar et X+40. Les valeurs de CAU sont récapitulées dans le tableau 10. La modalité APPI-N a même un CAU plus élevé que la modalité X-40, alors que les deux modalités ont reçu sensiblement les mêmes quantités d'azote.

Pour les années 2018 et 2019, en se basant sur 35 essais, on obtient une moyenne de CAU à 83 % pour la modalité APPI-N, 80 % pour le bilan. Les pertes en azote s'élèvent à 23 uN pour APPI-N contre 32 pour le bilan. La méthode du bilan est donc légèrement moins efficace en termes d'utilisation de l'engrais, mais ce facteur dépend fortement du site d'expérimentation. Le reliquat post-récolte, effectué une semaine après la moisson, confirme cette meilleure utilisation par des teneurs en azote inférieures au reliquat de sortie d'hiver pour les modalités

APPI-N et CHN, au contraire de la modalité bilan, avec 57 uN contre 31 en sortie d'hiver. Avec des dates d'apport mieux positionnées dans la saison et mieux adaptées aux besoins de la plante, les nouvelles méthodes valorisent mieux l'azote apporté.

Les conditions climatiques imposées pour la modalité CHN et APPI-N, à savoir au moins 10 mm de précipitation dans les trois jours précédant l'apport, a permis de favoriser encore l'utilisation de l'azote et d'éviter les pertes.

Discussion

1) Performances globales des différentes méthodes

Même si toutes les nouvelles méthodes ont dépassé l'objectif de rendement de la méthode du bilan, qui était de 85 q/ha, elles n'ont pas permis de dépasser cette dernière, qui a particulièrement bien répondu aux apports d'engrais cette année. Concernant la protéine, les résultats sont plus encourageants du fait du moindre rendement et du meilleur remplissage. Cet état de fait peut s'expliquer par la réalisation d'apports plus tardifs et moins importants qui vont se révéler favorables en fin de campagne mais qui n'ont pas pu favoriser le nombre de grains.

D'un point de vue économique, la moindre consommation d'engrais et la progression du taux de protéines ne permet pas de compenser le manque à gagner en comparaison avec le bilan ou Farmstar. Les méthodes APPI-N et CHN ne sont donc pas encore à la hauteur économiquement pour les agriculteurs du fait d'un rendement inférieur. Ce facteur est malgré tout très dépendant de l'année et du contexte économique lié. L'étude économique devrait donc être conduite sur une plus longue durée ou sur d'autres espèces de plantes pour être plus fiable.

D'un point de vue environnemental, les méthodes APPI-N et CHN présentent des CAU plus performants et des reliquats très faibles, ainsi que des doses d'engrais plus faibles. La consommation globale est ainsi fortement réduite, avec 30 uN de moins en moyenne. Avec un meilleur CAU, un faible reliquat post-récolte et une plus faible consommation, les pertes d'azote sont ainsi minimisées ce qui permet de répondre aux objectifs initiaux. Les pertes liées à la lixiviation sont limitées, de même que la volatilisation ammoniacale, ce qui n'est pas négligeable. En effet, la fertilisation azotée représente jusqu'à 47 % des gaz à effet de serre émis par l'activité agricole, deuxième émetteur de gaz à effet de serre derrière les activités de transport (Vandaele et al., 2010).

Il est à noter que la modalité CHN, si elle atteint en théorie son objectif d'INN à floraison, reste en dessous de celui-ci après analyse de la biomasse et ce pour la troisième année consécutive. Cette méthode est peut-être trop minorée par rapport aux objectifs réels mais cela peut s'expliquer par la difficulté de modéliser précisément un INN en se basant sur des données forcément partielles ou sur des données météorologiques éloignées. Pour APPI-N, l'usage du N-Tester a tendance à surestimer l'INN également. Si ces erreurs d'INN ne sont pas dommageables pour la culture, vu que le seuil est rarement dépassé, elles peuvent induire une sous-performance de ces modalités.

Pour comparer les modalités APPI-N et CHN, leurs résultats sont comparables en termes de rendement et de marge économique pour Axérial. En revanche, la méthode APPI-N présente un meilleur résultat en termes de protéine.

Enfin, il est à noter qu'après 3 ans de maniement de ces nouvelles méthodes, ces techniques sont assez bien maîtrisées par les équipes techniques ce qui a permis de limiter les erreurs pouvant fausser certains résultats comme cela a pu avoir lieu à l'échelle régionale lors de la première année.

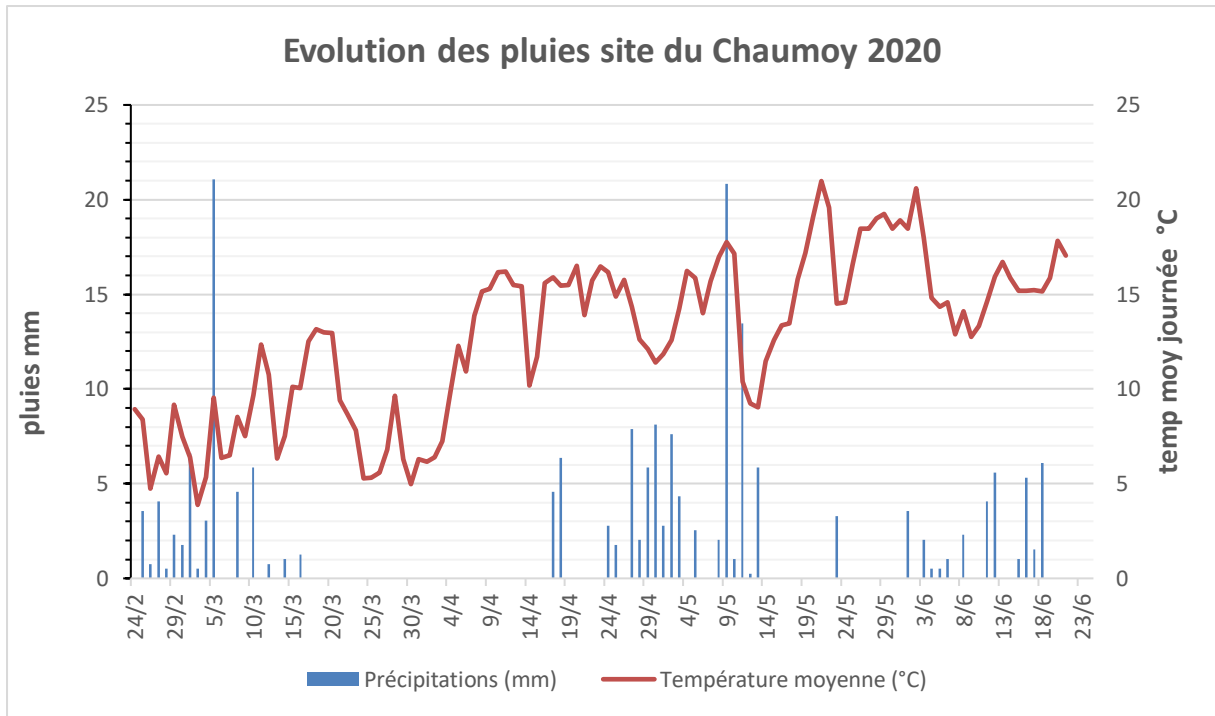


Figure 21 : Evolution des précipitations et de la température moyenne sur le site du Chaumoy en 2020

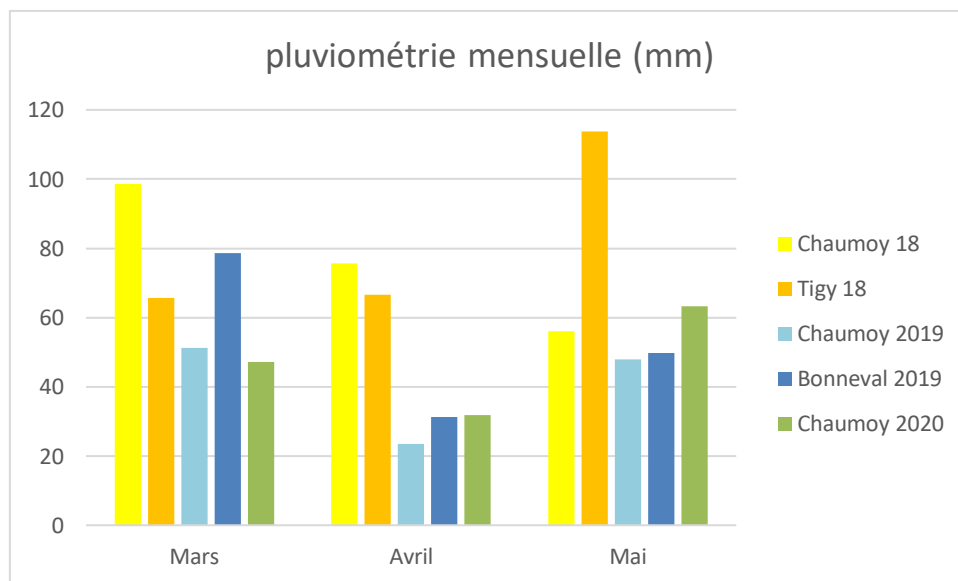


Figure 22 : Comparaison des précipitations sur les essais d’Axérial

2) Synthèse régionale

Sur trois ans, le projet SOLINAZO a permis de réaliser 50 essais en microparcelles dans toute la région Centre-Val de Loire. Toutefois les résultats des 15 essais de la campagne 2020 ne sont pas encore centralisés et donc pas encore pleinement exploitables. Les essais chez les agriculteurs ne sont pas non plus traités à l'échelle régionale pour le moment.

Un premier bilan a toutefois pu être réalisé au niveau des données de base comme le rendement ou la protéine des modalités bilan, APPI-N et CHN. Concernant le rendement, la modalité bilan est également en moyenne en avance d'environ 3 quintaux par rapport aux modalités APPI-N et CHN. Mais les résultats obtenus étant très disparates, il ne m'est pas possible de conclure sur d'éventuelles différences statistiquement fiables. De même, au niveau des protéines, les modalités ont atteint les mêmes taux, entre 11,5 et 12. Au niveau économique, la modalité bilan paraît aussi au-dessus grâce à son rendement légèrement supérieur, comme dans les essais Axéreal. De même, les gains environnementaux des nouvelles méthodes sont aussi observés à l'échelle régionale, avec un avantage tendanciel pour les méthodes APPI-N et CHN. Une analyse plus précise des données du projet, en prenant en compte la totalité des données, est nécessaire afin de pouvoir tirer un bilan définitif des essais. L'ensemble des partenaires du projet confirme également le problème de la surestimation de l'INN avec le N-tester. Il reste toutefois l'outil le plus précis testé jusque-là, devant la méthode CHN ou des appareils fonctionnant avec le NDVI.

3) Adaptation à la diversité des situations

Au cours des trois années d'expérimentation chez Axéreal, trois sites expérimentaux ont été utilisés. Ces sites sont Le Chaumoy, dans le Cher (18), Bonneval dans l'Eure et Loir (28) et Tigy dans le Loiret (45). Un quatrième était prévu pour 2020, à Pontlevoy dans le Loir-et-Cher (41) mais celui-ci a été abandonné à cause de la COVID 19. La nature du sol sur ces 3 sites était différente, avec un sol de type limon argilo-sableux au Chaumoy, un sol sableux à Tigy et un limon argileux à Bonneval. Le Chaumoy étant la station expérimentale du Sud de la région pour Axéreal et disposant d'une exploitation agricole en son sein, ce site a accueilli des essais SOLINAZO les trois années.

Les méthodes APPI-N et CHN se basent sur des bases de données pédologiques pour déterminer les doses à apporter. Ainsi, APPI-N a favorisé de plus gros apports en deux ou trois fractions au Chaumoy ou à Bonneval tandis qu'à Tigy, quatre apports de 40 uN ont été réalisés, au vu de la moindre capacité de rétention des sols sableux. La méthode CHN favorise quant à elle des apports plus nombreux et de plus faible quantité.

La météorologie a également été un facteur important dans ces essais. Le premier point est la nécessité de disposer d'informations météorologiques au plus proche des parcelles pour la modalité CHN, qui s'en sert pour prévoir les périodes favorables. Mais le point le plus important est le risque de manque d'eau. En effet, la modalité bilan réalise une bonne partie de ses apports au début du printemps, à une période où les précipitations sont plus importantes (figure 21). En revanche, on observe une période plus sèche d'avril à mai, comme le montre la figure 22. Cette sécheresse qui risque de s'accroître avec le réchauffement climatique pose de sérieux problèmes pour réaliser les apports tardivement et limiter la volatilisation.

L'année 2020 a été problématique sur ce point, avec des précipitations nulles pour la deuxième moitié du mois d'avril et la première moitié de mai. Les modalités tardives comme CHN ou APPI-N sont les principales affectées par ce manque de précipitations, n'ayant réalisé qu'un apport au début de printemps.

Les CAU auraient pu être plus élevés pour ces modalités si les précipitations avaient été plus régulières. Au niveau régional, certains organismes n'ont pas pu réaliser certains apports ou ont dû arroser pour pouvoir fertiliser.

Quelques cas de fusariose et de carie se sont déclarés sur les essais mais cela est resté maîtrisé, ne montrant pas de sensibilité particulière entre les modalités. La question des maladies foliaires, pouvant affecter la détection d'INN pourrait être étudiée, notamment pour les modalités se basant sur la réflectance comme les méthodes APPI-N ou Farmstar®.

4) Limites et perspectives d'application

La synthèse présentée ici se base principalement sur les essais menés en microparcelles par la coopérative Axéreal. La synthèse complète de tous les essais en microparcelles comme chez les agriculteurs menés par les différents acteurs du projet, sur les trois années serait nécessaire pour dresser un bilan plus précis des performances des méthodes sélectionnées. Les données compilées de tous les acteurs du projet n'étant pas encore disponible pour la troisième année, il ne m'a pas été possible de dresser moi-même ce bilan pluriannuel. Les essais chez les agriculteurs ont aussi été menés à partir de la deuxième année, afin de tester la faisabilité des nouvelles méthodes et de recueillir leurs avis sur la conduite de celles-ci. Il s'est avéré que les agriculteurs percevaient assez positivement ces méthodes et étaient sensibles aux démarches liées. En se basant sur les essais en microparcelles et les essais en bandes larges chez les agriculteurs, il a été possible de déterminer certaines limites aux nouvelles méthodes.

En matière de conduite, le suivi de l'INN devait se faire en continu grâce à des mesures au HN-Tester® ou par analyse laboratoire de prélèvements de biomasse. Ce mode de suivi, s'il convient bien à l'expérimentation, ne peut être adapté efficacement chez les agriculteurs car trop chronophage et coûteux. Le suivi météorologique est également important que ce soit pour APPI-N pour réaliser les apports dans de bonnes conditions ou pour CHN qui se base sur le réseau de stations de météo France. La précision des prévisions est donc primordiale pour le déclenchement des apports et doit donc dépendre d'informations météorologiques mesurées au plus proche de la parcelle, comme avec le réseau Sencrop® utilisé par Axéreal.

Concernant les effets de ces méthodes, un léger manque de productivité en termes de rendement est visible pour les méthodes CHN et APPI-N. On peut donc s'interroger sur le niveau d'exigence des objectifs d'INN ou de perte azotée afin d'assouplir les règles de décision et rendre ces méthodes un peu plus rentables économiquement pour les agriculteurs, sans quoi elles ne pourront remplacer la méthode du bilan. De plus, par leurs apports bien plus faibles, ces méthodes tendent à déstocker l'azote du sol et à favoriser la minéralisation de la matière organique. Si l'objectif est de réduire les impacts environnementaux, la question du maintien des niveaux de matière organique sur le long terme mérite d'être examinée dans le futur.

Une fois ces principaux problèmes résolus, ces méthodes pourraient être adaptées à un usage plus pratique pour les agriculteurs, par le biais de mesures satellitaires ou par drones en lieu et place des mesures destructives ou manuelles comme c'est déjà le cas de la méthode Farmstar. De plus, des essais sont déjà en cours pour évaluer ces méthodes sur d'autres cultures comme le blé dur ou le seront prochainement comme sur l'orge ou le colza.

Conclusion

Les exigences du marché, la qualité protéique du blé tendre et l'impact sur l'environnement constituent des contraintes majeures pour les agriculteurs qui doivent prendre certaines mesures lors de l'application d'engrais azoté. Jusqu'ici, la méthode du bilan prévisionnel permettait de répondre aux enjeux liés au rendement, via un rendement objectif. Mais cette méthode s'avère aujourd'hui limitée pour gérer les problèmes environnementaux ou pour répondre de façon dynamique aux besoins azotés du blé. Les méthodes CHN et APPI-N ont alors été conçues pour répondre aux problèmes soulevés par la méthode du bilan. Ces nouvelles approches de la fertilisation azotée se basent sur les récentes recherches dans le domaine, notamment sur les travaux de Clémence Ravier, l'objectif est de mieux valoriser les engrais azotés tout en limitant les pertes et l'empreinte écologique sur l'environnement sans pour autant sacrifier la marge économique de la culture.

A l'issue de ces trois années d'expérimentation, il apparaît que ces nouvelles méthodes ne sont pas parvenues à égaler la méthode classique du bilan en termes de rendement sur les essais menés par Axérial. Le bilan définitif régional du projet Solinazo reste toutefois à paraître avant de pouvoir se prononcer sur le résultat de ces méthodes sur l'ensemble de la région Centre Val de Loire. Ces essais ont néanmoins permis de révéler le potentiel des nouvelles méthodes en termes de gestion efficace de l'azote. Si leur rendement est légèrement inférieur à celui de la méthode du bilan, des apports plus tardifs permettent d'assurer un meilleur remplissage du grain. Il en résulte une dose totale d'azote diminuée et un coefficient d'utilisation plus élevé.

Néanmoins, les méthodes APPI-N et CHN bénéficieraient grandement d'une amélioration des outils de mesures, que ce soit pour la fiabilité ou la maniabilité, pour atteindre l'objectif de les introduire auprès des agriculteurs. Les changements vis-à-vis de la méthode du bilan nécessiteront également un accompagnement efficace des agriculteurs par les organismes de conseil afin de passer le cap de l'adaptation. De plus, ces méthodes devraient être testées sur d'autres cultures afin d'évaluer leur pertinence dans d'autres contextes. En révélant leur plus forte efficacité de gestion de l'azote vis-à-vis de l'environnement, ces méthodes pourraient être combinées à d'autres pratiques pour réduire la consommation d'engrais azotés et répondre aux enjeux environnementaux agricoles, notamment dans les zones soumises à de forts risques de lessivage.

Le développement des nouvelles méthodes de gestion de la fertilisation azotée, basées sur une approche de pilotage intégral de la fertilisation tout au long de l'année, parvient donc à intégrer qualité des grains et protection de l'environnement, même s'il reste des améliorations à faire pour égaler la rentabilité économique de la méthode du bilan.

Bibliographie et sitographie

Agence régionale de la santé. (2019). *Les teneurs moyennes en nitrate dans les eaux distribuées*. https://www.centre-val-de-loire.ars.sante.fr/system/files/2019-10/Carte_region_CVDL_nitrate_2018.pdf

Agreste. (2017). *Produit agroalimentaire*. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/>

Agreste. (2019). *Mémento de la statistique agricole*. http://draaf.centre-val-de-loire.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Memento_2019_PUB_19_12_10_cle0f73e6.pdf

Arvalis Institut du végétal. (2014a). *Optimiser l'alimentation de la plante en fractionnant l'azote*. <https://www.arvalis-infos.fr/fertilisation-du-ble-tendre-optimiser-l-alimentation-de-la-plante-en-fracionnant-l-azote-@/view-14759-arvarticle.html>

Arvalis Institut du végétal. (2014b). *Teneur en protéines des blés : Relever le double défi agronomique et économique*. https://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/_plugins/WMS_BO_Gallery/page/getElementStream.html?id=23905&prop=file

Arvalis Institut du végétal. (2020). *Blé tendre : Les besoins unitaires en azote des variétés réactualisés pour 2020*. <https://www.arvalis-infos.fr/les-besoins-unitaires-en-azote-des-varietes-reactualises-pour-2020-@/view-14925-arvarticle.html>

Ata Ul Karim, S., Yao, X., Liu, X., Cao, W., & Zhu, Y. (2014). Determination of Critical Nitrogen Dilution Curve based on Stem Dry Matter in Rice. *Field Crops Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.010>

Austin, R., Ford, M., Edrich, J., & Blackwell, R. (1977). The Nitrogen economy of winter wheat. *The Journal of agricultural Science, Cambridge*. <https://doi.org/10.1017/S002185960003389X>

Barranger, E. (2015). Protéines des céréales à paille Trouver des marges de manoeuvre. *Arvalis Institut du végétal*. <http://docplayer.fr/68371742-Proteines-des-cereales-a-paille-trouver-desmarges-de-manoevre.html>

Campbell, C., Myers, R., & Curtin, D. (1995). Managing nitrogen for sustainable crop production. *Springer Link*. <https://doi.org/10.1007/BF00750521>

Carlotti, B. (1992). *Recueil de bases de préconisations de la fertilisation azotée des cultures*.

Cerf, M., & Meynard, J. (1988). Enquête sur la mise en oeuvre des méthodes de fertilisation raisonnée. *3ème Forum de la « Fertilisation raisonnée »*.

Chambre d'agriculture Centre-Val de Loire. (2018). *Evolution du rendement blé tendre*. <https://centre-valde Loire.chambres-agriculture.fr/agroenvironnement/le-changement-climatique/en-grandes-cultures/rendement-ble-tendre/>

Coïc, Y. (1956). *La nutrition et la fertilisation azotée du blé d'hiver. I. Les besoins en azote du blé d'hiver, conséquences agronomiques.*

COMIFER. (2013). *Calcul de la fertilisation azotée.*

https://comifer.asso.fr/images/publications/brochures/BROCHURE_AZOTE_20130705web.pdf

Confalonieri, R., Paleari, L., Movedi, E., Pagani, V., Orlando, F., Foi, M., & Besana, R. (2015). Improving in vivo plant nitrogen content estimates from digital images : Trueness and precision of a new approach as compared to other methods and commercial devices.

Biosystems Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.04.013>

Coquil, B., Bordes, J., & Stafford, J. (2005). *FARMSTAR: an efficient decision support tool for near real time crop management from satellite images* (Wageningen Academic Publishers).

Demotes-Meinard, S., Jeuffroy, M., & Robin, S. (1999). No Spike dry matter and nitrogen accumulation before anthesis in wheat as affected by nitrogen fertilizer : Relationship to kernels per spike. *Science Direct*. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00046-5)

Deshayes, G. (2018). *Développement d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée sur blé tendre d'hiver comme alternative à la méthode du bilan.*

FAO. (2018). *Situation mondiale concernant les céréales.* <http://www.fao.org/3/a-BT086f.pdf>

FranceAgriMer. (2019). *Evolution du taux de protéine.*

https://www.franceagrimer.fr/content/download/62206/document/Bilan_qualit%C3%A9%20b1%C3%A9_11_09_2019.pdf

Goos, R., & Prunty, L. (1990). *Yield variability and the yield goal decision* (Havlin).

Hawkesford, M. (2012). The diversity of nitrogen use efficiency for wheat varieties and the potential for crop improvement. *Better crops plant food*.

Holcomb, J., Sullivan, D., & Horneck, D. (2011). Effect of Irrigation Rate on Ammonia Volatilization. *Science direct*. <https://doi.org/doi:10.2136/sssai2010.0446>

Holland, K., & Shepers, J. (2010). Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. *Agronomy Journal*. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0015>

Jeuffroy, M., Gate, P., Machet, J., & Recous, S. (2013). Gestion de l'azote en grandes cultures : Les connaissances et outils disponibles permettent-ils de concilier exigences agronomiques et environnementales. *Cahiers Agricultures*.

<https://doi.org/10.1684/agr.2013.0639>

Jeuffroy, M., & Recous, S. (1999). Azodyn : A simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European Journal of Agronomy*.

[https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00059-8)

Justes, E., Mary, B., Meynard, J., Machet, J., & Thelier-Huche, L. (1994). Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany*. <https://doi.org/10.1006/anbo.1994.1133>

Justes, E., Meynard, J., Mary, B., & Plénet, D. (1997). *Diagnosis using stem base extract : JUBIL method*.

Lacroix, A. (1995). *Les solutions agronomiques à la pollution azotée*.

Leenhardt, D., Wallach, D., Le Moigne, P., Guerif, M., Bruand, A., & Casterad, M. (2006). *Using crop models for multiple fields* (Elsevier).

LégiFrance. (2013). *Arrêté du 23 octobre 2013 modifiant l'arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution*. <https://www.legifrance.gouv.fr/>

Lemaire, G., & Gastal, F. (1997). N Uptake and Distribution in Plant Canopies. *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60684-7_1

Lemaire, G., Gastal, F., & Salette, J. (1989). Analysis of the effect on N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. *International grassland congress*.

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*. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749917/document>

Meynard, J. (1985). *Les besoins en azote du blé d'hiver jusqu'au début de la montaison. Institut National Agronomique Paris Grignon*.

Meynard, J., Boiffin, J., Caneill, J., & Sebillotte, M. (1981). Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse. II. Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie*. <https://doi.org/10.1051/agro:19810912>

Padilla, F., Pena-Fleitas, M., Gallardo, M., & Thompson, R. (2014). Threshold values of canopy reflectance indices and chlorophyll meter readings for optimal nitrogen nutrition of tomato. *Annals of Applied Biology*. <https://doi.org/10.1111/aab.12181>

Powlson, D., Hart, P., Poulton, P., Johnston, A., & Jenkinson, A. (1992). Influence of soil type, crop management and weather on the recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to winter wheat in spring. *Journal of Agricultural Science*. <https://doi.org/10.1017/S0021859600068040>.

Rasouli, S., Whalen, J., & Madramootoo, C. (2014). Reducing residual soil nitrogen losses from agroecosystems for surface water protection in Quebec and Ontario, Canada : Best management practices, policies and perspectives. *Canadian Journal of Soil Science*. <https://doi.org/doi:10.4141/CJSS2013-015>

Ravier, C. (2017). Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée : Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation. *Paris Saclay*.

Ravier, C., Jeuffroy, M., & Meynard, J. (2016). Mismatch between a science-based decision tool and its use : The case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France. *Science Direct*. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.10.001>

Rémy, J., & Hébert, J. (1977). *Le devenir des engrais dans le sol*.

Richard, M., Trethowan, C., & Maarten, V. (2009). *Synthetic Wheat—An Emerging Genetic Resource*.

Sebillotte, M., & Meynard, J. (1990). *Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées* (Paris).

Sharma, L., & Bali, S. (2017). A Review of Methods to Improve Nitrogen Use Efficiency in Agriculture. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su10010051>

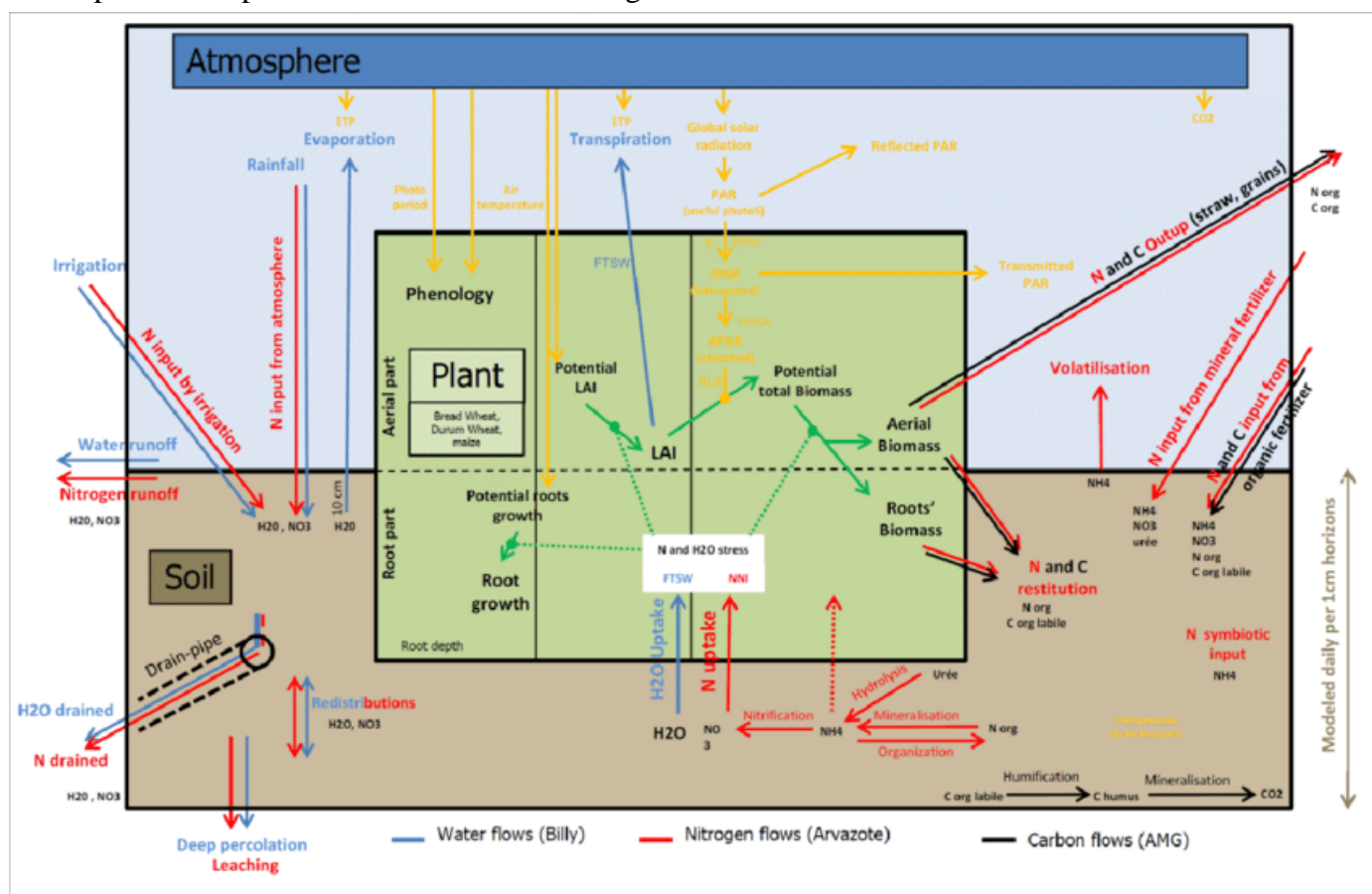
Van der Mijnsbrugge, A., Tordeur, A., Méléard, B., & Le Souder, C. (2017). *Fertilisation azotée du blé : Raisonner sans objectif de rendement*.

Van Sandford, D., & Mackdown, C. (1987). Cultivar Differences in Nitrogen Remobilization during Grain Filling in Soft Red Winter Wheat. *Crop Science*. <https://doi.org/10.2135/cropsci1987.0011183X002700020035x>

Vandaele, D., Lebreton, A., & Farasco, B. (2010). *Agriculture et gaz à effet de serre : État des lieux et perspectives*.

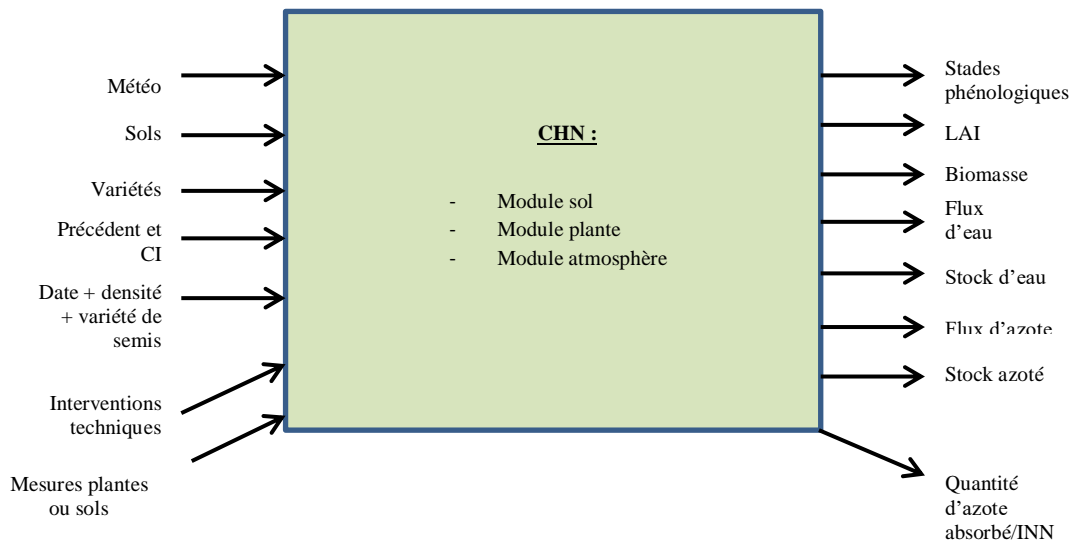
Annexe 1 : Fonctionnement du modèle CHN

En 2014, Arvalis-Institut du Végétal a finalisé le développement d'un modèle dynamique, le modèle CHN. Ce modèle, fonctionnant à la fois sur blé tendre, blé dur ou maïs, est destiné à répondre aux besoins de modélisation des différents flux d'eau, de carbone et d'azote dans un système de culture. Ce modèle fonctionne grâce à une approche modulaire, chacun des trois modules ayant été précédemment développé indépendamment par Arvalis avant d'être regroupé au sein d'un même modèle. Ces trois modules sont ainsi un module modélisant les flux de Carbone, les flux Hydriques et les flux d'Azote (N), donnant son nom au modèle. Ce modèle fonctionne sur trois compartiments que sont l'atmosphère, le sol et la plante et les modules modélisent les flux reliant ces trois compartiments. Les différents flux pris en compte sont schématisés dans la figure suivante.



Le module hydrique, basé sur le module de bilan hydrique Billy, fonctionne en déterminant distinctement la quantité d'eau transpirée par la plante et l'évaporation du sol. Le module des flux d'azote, basé sur le module de bilan azoté Arvazote, prend en compte 4 formes d'azote, à savoir l'urée, l'ammoniac, le nitrate et l'azote organique. Ce module fonctionne en calculant l'INN présumé de la plante et repose sur les références du COMIFER pour déterminer les conseils de fertilisation. Enfin le module des flux carbonés est lié au module de bilan humique AMG partagé avec l'INRAE pour le paramétrage et le formalisme du carbone organique.

La figure suivante représente les principales données prises en compte pour faire fonctionner le modèle et les sorties de ce modèle.



Le modèle actualise ses calculs pour chaque centimètre de sol avec un pas de temps journalier. Pour se faire, il repose sur des bases de données importantes concernant le type de sol (environ 600 types différents pris en compte), les variétés employées (400 variétés enregistrées pour le blé tendre, le blé dur et le maïs), les formes d'engrais utilisées ou la météorologie, avec plus de 750 stations enregistrées. En s'appuyant sur cette base de données importante, le modèle CHN permet de modéliser l'évolution des cultures en recouvrant un grand nombre de situations possibles. Grâce au couplage des données mesurées, fréquentielles et prévisionnelles, ce modèle peut servir pour le pilotage de la fertilisation ou de l'irrigation des cultures paramétrées en dressant un diagnostic agronomique. Cet outil est donc intégré dans des outils d'aide à la décision d'Arvalis comme Fertiweb®. Concernant le projet Solinazo, le modèle était paramétré en début de campagne concernant les données pédologiques et météorologiques. Les autres données étaient ensuite renseignées au fur et à mesure de l'année dans un fichier Excel déposé sur un site SITAR, qui renvoyait les résultats du modèle concernant la fertilisation comme le stock d'azote du sol, la biomasse estimée, l'azote absorbé, la dose à apporter

Le paramétrage des modules a été réalisé sur une quinzaine d'années, entre 2000 et 2015. Pour le blé tendre, celui-ci a été réalisé sur 34 sites répartis dans toutes les régions céréalières de France. Les premières valorisations agronomiques ont déjà pu être observées, notamment en fertilisation azotée avec son bilan dynamique de l'azote. Le modèle a ainsi montré de bonnes qualités de prédictions concernant les biomasses ou les surfaces foliaires (LAI).

Toutefois, le modèle CHN a encore besoin d'affiner ses résultats et d'améliorer sa fiabilité. Pour le projet SOLINAZO, le modèle était modifié chaque année pour tenir compte des difficultés ou des faiblesses identifiées l'année précédente. Un premier moyen a donc été de forcer le modèle à pouvoir prendre en compte certaines mesures de terrain comme la biomasse. La précision des données météorologiques est aussi en voie d'amélioration, en intégrant les stations locales connectées de type Sencrop®.

Annexe 2 : Sorties finales pour la modalité CHN pour Le Chaumoy (18)

Modèle CHN ARVALIS - Institut du végétal

PILOTAGE DE LA FERTILISATION AZOTÉE A L'AIDE DU MODELE DE CULTURE CHN

Contact : b.soenen@arvalis.fr ; f.faulemesse@arvalis.fr

Informations concernant les outils ARVALIS :

- AgroBox : version 02.02.01 (04/05/2020)
- SoilBox : version 01.14.00 (10/02/2020)
- ClimBox : version 04.01.09 (10/02/2020)

(Météo validée jusqu'au 07/06/2020 + 9 jours de prévision)

Date de calcul : 10/06/2020 à 09h16

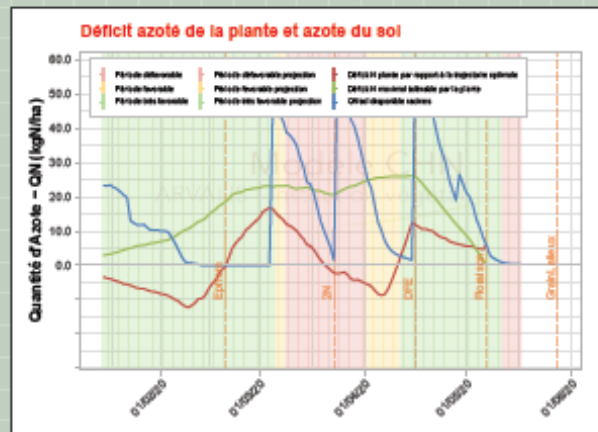
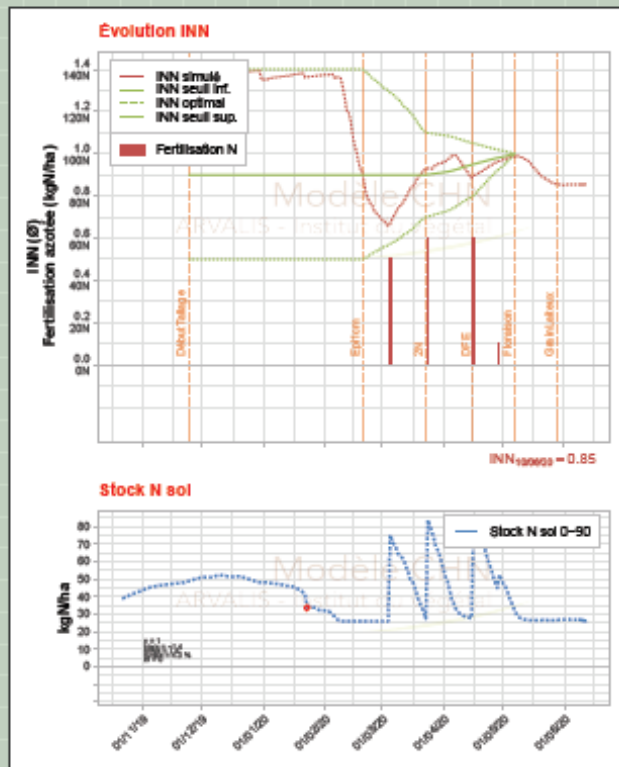
Détails et contrôle du calcul CHN : [Fiche Ok](#)

- Équipe régionale : AXEREAL
- Site de l'essai : LE CHAUMOY
- Modalité pilotée : M7 (INN E1C = 0.5 Flo = 0.9) (n°SILENA=20BTHN418)
- Fertilisation azotée : 180 unités en 4 apports | Irrigation : Ø

Pilotage CHN : Contextualisation : milieu_limite // Trajectoire INN : e1c_0_5
bc variétal : 0.2 // parcelle irriguée : Non

(1)

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 : Ø

Date d'épuisement du stock d'azote disponible dans le sol : 10/05/2020

Prochaine période favorable pour apport N : Post-floraison - (fin du pilotage)

Déficit prochaine période favorable : 6.2 kgN/ha

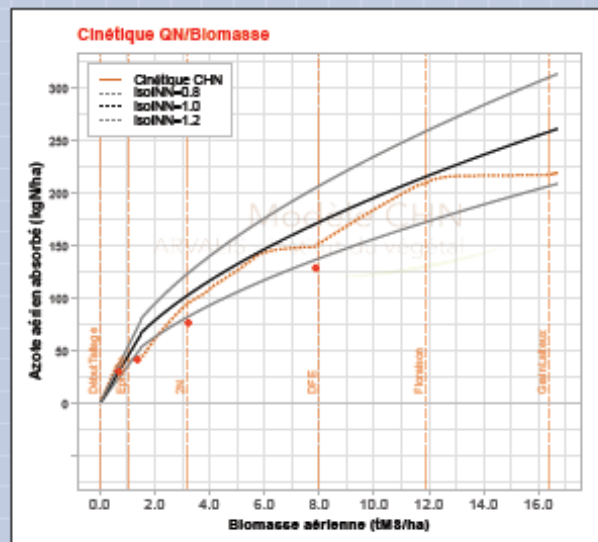
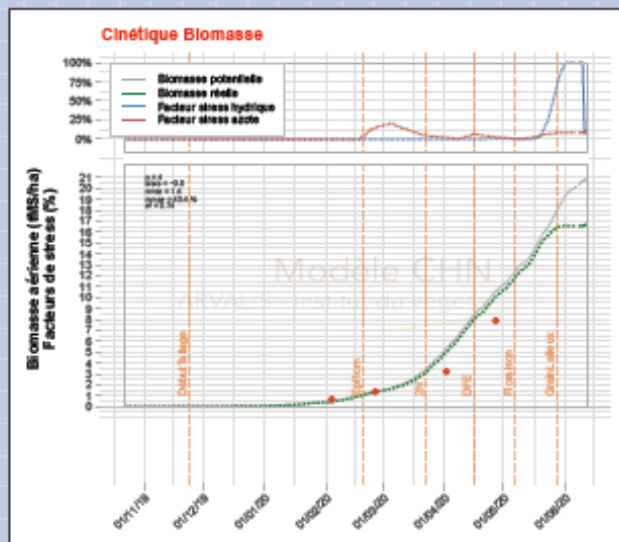
Déficit tolérable prochaine période favorable : 0 kgN/ha

Dose préconisée à apporter dès que possible (CAU = 80%) : Apport non conseillé

(3)

(4)

GRAPHIQUES POUR CONTRÔLE DES SORTIES CHN



(6)

La modalité CHN du projet SOLINAZO fonctionne grâce aux simulations du modèle CHN. Pour faire fonctionner ce modèle, un fichier Excel est rempli avec les informations fixes liées au contexte de mise en culture (précédent, travail du sol, type de sol, reliquat de sortie d'hiver, date et densité de semis, variété, critère d'INN objectif, station météorologique la plus proche ...) et est rempli au fur et à mesure avec des informations sur l'état d'avancement de la culture (dates des stades, dose et date des apports azotés, mesures de biomasse ...). Une fois ce fichier prêt, il est déposé sur un site Sitar lié à Arvalis. La simulation est alors réalisée et les résultats sont renvoyés selon le modèle de la page précédente.

La partie brune (1) regroupe les informations de contexte de la simulation comme l'organisme et l'essai associé à la simulation ou la dose totale d'azote apportée jusque-là. Cette partie contextuelle est suivie par les graphiques liés à la prise de décision. Un graphique important est celui de l'évolution de l'INN (2). Ce graphique représente la simulation de l'indice de nutrition azotée selon le stade de la plante. Il présente également les courbes seuils d'INN qui forment un cône dans lequel la courbe simulée doit rester. Une valeur d'INN correspondant à la date de simulation est affichée en dessous de ce graphique. Une évolution du stock azoté dans le sol évoluant selon les apports vient compléter le premier graphique. Un autre graphique primordial est celui du déficit azoté de la plante. Il combine le stock d'azote dans le sol en bleu avec le déficit azoté maximal tolérable par la plante et le déficit calculé par rapport à la trajectoire optimale en rouge. En arrière-plan, le code couleur a aussi son importance. Un fond rouge indique une période défavorable au regard des précipitations et un fond vert indique des conditions météorologiques favorables à un apport, l'orange constituant l'intermédiaire. Ce graphique montre donc l'urgence qu'il y a ou non à réaliser un apport selon la pluviométrie annoncée et l'état du déficit azoté de la plante. Enfin, un tableau (4) récapitule les informations liées au déficit et les périodes favorables imminentes. Il conclue avec un conseil d'apport. Ici, l'objectif d'INN est atteint, et le conseil d'apport est donc nul.

Enfin, deux graphiques viennent renforcer le contrôle des sorties du modèle. Le premier indique la cinétique de la biomasse (5). Il prédit l'évolution de la biomasse du couvert en prenant en compte un éventuel stress hydrique ou azoté. Les points rouges représentent les mesures de biomasse réalisée venant forcer le modèle à s'adapter aux conditions réelles. Le second graphique (6) représente l'azote absorbé et stocké dans les parties aériennes du couvert selon la biomasse produite. La courbe cinétique qui en résulte doit être comprise entre les courbes d'INN seuils. Les points rouges représentent également les mesures de biomasse. Ces deux graphiques permettent de comparer les simulations du modèle par rapport aux mesures effectuées en laboratoire. Il est ainsi possible de savoir si le modèle effectue des simulations cohérentes et donc si les doses conseillées peuvent être considérées comme fiables.

Tous les comptes-rendus sont ainsi analysés. A l'issue de la campagne, la sortie finale permet de visualiser la courbe d'INN complète de la culture et de savoir si les seuils ont été franchis à un moment donné. Pour l'année 2020, on constate que la courbe seuil minimale n'a pas été franchie et que l'INN parvient bien à environ 0,9 à la floraison, d'après la simulation. On constate également la période de sécheresse du mois d'avril qui a compliqué les apports. Tous ces graphiques sont donc très utiles pour vérifier les simulations du modèle CHN.

Annexe 3 : Construction des abaques INRAE basée sur le modèle Azodyn

Dans le projet SOLINAZO, la modalité APPI-N est pilotée grâce à des abaques pour déterminer la quantité d'azote à apporter selon l'INN mesuré. Toutefois, ces abaques sont différents selon les sites et les années et nécessitent d'être construits au préalable. Cette construction est faite par l'INRAE grâce au modèle Azodyn.

A la fin des années 1990, le modèle Azodyn a été développé par l'INRAE sur une base dynamique. Ce modèle base ses calculs sur deux compartiments, la plante et le sol, et est paramétré sur blé tendre, le pois fourrager, le colza et également pour l'association blé-pois. Le principe de ce modèle est de simuler la croissance de la culture au cours de l'année en déterminant la quantité d'azote disponible dans le sol ainsi que les besoins dynamiques de la plante. Ce modèle prend en compte des données météorologiques et climatiques, pédologiques, d'itinéraire technique, des stades de développement de la culture ... Un reliquat de sortie d'hiver doit également être réalisé. Une fois la modélisation effectuée, le modèle fournit des mesures productives comme le rendement prévu, la densité de grain par surface, la teneur en protéine, et la quantité d'azote dans le sol.

Ce modèle fonctionne sur un rythme journalier et fait ses calculs pour chaque mètre carré. Chacun des compartiments se voit attribuer un module. Le module du sol correspond aux calculs de la méthode du bilan, en prenant en compte le type de sol, le travail du sol, les apports, la météo ... Le modèle attribue ainsi une valeur aux différents éléments de l'équation du bilan. En parallèle, un module plante fonctionne en modélisant la production de biomasse quotidienne en se basant sur l'équation de Monteith. En comparant cette production de biomasse avec la courbe de dilution de l'azote, il est possible de calculer le besoin journalier de la plante en azote pour assurer cette production de biomasse. En reliant les deux modules, le modèle permet ainsi de prédire les dates auxquelles la culture sera en état de carence azotée. Ce modèle ne prend malgré tout pas en compte la dimension hydrique du sol, avec un éventuel stress hydrique, ou les pertes par lixiviation ou volatilisation, qui peuvent jouer sur le stock d'azote disponible.

Le modèle est donc utilisé pour construire les abaques du modèle SOLINAZO. Ces abaques correspondent à un site particulier et une année précise. Le principe de construction est le suivant. Chaque site doit fournir une base de données météorologique la plus étoffée possible dans le temps, sur une vingtaine d'année si possible, pour déterminer les jours d'apport de fertilisant possibles dans l'année sur ce site. Les semaines favorables sont celles où une somme de précipitation supérieure à 10 mm en trois jours est atteinte ou lorsque la quantité d'eau évapotranspirée est inférieure aux précipitations sur cinq jours. La période de fertilisation, entre février et mai, est alors divisée en quinzaine, période nécessaire entre deux apports d'azote. De plus, une gamme de quantité d'azote est déterminée, avec un pas de 20 uN entre 0 et 100uN par apport. Toutes les combinaisons de doses et de périodes favorables d'apport deviennent donc des stratégies de fertilisation. Une fois ce travail fait, chaque stratégie est rentrée dans le modèle Azodyn. Le modèle renvoie alors le CAU, la quantité d'azote perdue hors du système de culture et la courbe d'INN simulée. Un travail de sélection est ensuite réalisé. La courbe d'INN ne doit pas franchir la courbe seuil de Clémence Ravier, et la quantité d'azote perdue doit rester inférieure à 25 uN par hectare pour limiter les pertes. Les stratégies restantes sont alors viables. Ces stratégies sont alors vectorisées selon la date, la dose et l'INN. Chaque vecteur est analysé selon sa solidité sur toutes les stratégies initiales. On obtient ainsi un ratio entre les stratégies viables comprenant ce vecteur et l'ensemble des stratégies comprenant ce vecteur. Les stratégies viables retenues sont celles qui concentrent le plus les vecteurs les plus solides. L'ensemble de ces stratégies sont alors rassemblées dans un abaque utilisable par l'expérimentateur.

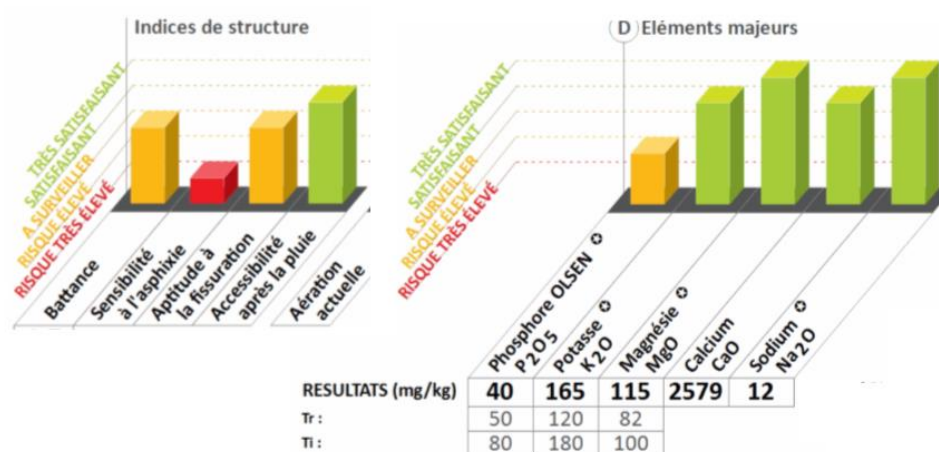
Annexe 4 : Analyse de sol du site du Chaumoy (18)

Axéreal dispose d'une station expérimentale sur le site du Chaumoy, dans le Cher, près de Bourges. Cette station est donc située au cœur de la Champagne berrichonne, région céréalière au Sud de la Sologne. Ce plateau est incliné en direction du Nord-Ouest et repose sur des calcaires du Jurassique supérieur à une profondeur comprise entre 300 et 500 m. Les parcelles sur lesquelles ont eu lieu les essais SOLINAZO sont de type limono argilo-sableux. Le sol est ici le résultat d'une érosion du plateau calcaire. En effet, les limons sont issus de dépôts éoliens datant de la période glaciaire würmienne. L'argile quant à elle provient d'une décalcification des calcaires du plateau. Le sable résulte de l'érosion en arène du Massif central, dont les marches se situent au Sud du Cher.

On observe dans ce sol trois horizons principaux :

- De 0 à 30 cm : horizon limono-argileux avec plus de 50 % de limons
- De 30 à 90 cm : horizon qui devient très calcaire à partir de 60 cm, et constitué d'argiles franches
- Plus de 90 cm : on trouve le plateau calcaire à proprement dit. Le calcaire est érodé et sa profondeur varie fortement entre 90cm et 5m

La parcelle de 2020 est assez hétérogène. L'essai a toutefois été implanté dans une zone de la parcelle présentant un déficit en azote. Cet endroit de la parcelle est donc assez homogène. La profondeur du calcaire varie autour de 60 cm. Toutefois, la fissuration des calcaires du plateau permet un enracinement efficace allant au-delà de cette profondeur même s'il subsiste quand même un problème d'aération qui nuit à l'activité biologique du sol et peut provoquer un risque d'asphyxie. Les limons du sol imposent de suivre régulièrement l'état d'humidité du sol avant tout passage d'outil pour limiter les problèmes de battance. Le pH_{eau} est de 6,9, ce qui est très bien pour une céréale comme le blé, et le taux de matière organique est de 1,9 %. Ce taux est correct mais doit être surveillé pour les cultures suivantes. De plus, le bilan humique annuel est déficitaire, avec une perte de 241 kg d'humus par hectare en 2020. Ceci impose de développer des pratiques favorisant la restitution de la matière organique au sol comme l'enfouissement des résidus, les cultures intermédiaires... afin de ne pas appauvrir l'état organique du sol suffisamment actuellement.



La CEC est moyenne avec 103 meq/kg. Du fait des teneurs en potassium et en phosphore disponible, un apport de 70 uP et de 40 uK a donc été réalisé en début de campagne pour regarnir le sol et éviter de placer la culture en carence. En ce qui concerne les oligo-éléments, il y a un fort risque de carence en zinc pour le maïs et dans une moindre mesure en bore pour le colza et le tournesol. Ceci limite le potentiel de rendement de la parcelle.

Annexe 5 : Protocole de mesure de la teneur en chlorophylle avec l'outil N-Tester

Source : Mode d'emploi (2020) Yara N-Tester

Les mesures effectuées ne sont valables que dans certaines conditions :

- La variété cultivée doit être la même sur les microparcelles étudiées du fait d'un fort effet variétal sur les valeurs obtenues par l'appareil.
- Le seul facteur limitant doit être l'azote. Les autres carences comme le phosphore ou le soufre faussent le résultat. Nous estimons que la conduite technique menée par l'agriculteur suffit à les éviter, sous réserve des analyses de sol.
- Les mesures doivent être réalisées sur végétation sèche. Il est important d'éviter d'intervenir après pluie ou le matin après la rosée. En effet, une couche d'eau sur la feuille va modifier la réflexion des longueurs d'ondes utilisées par la machine et fausser le résultat.
- Les mesures doivent être réalisées au centre du limbe d'une feuille saine à un stade précis de la plante. La présence de maladie peut venir fausser le résultat.

De plus, le choix de la feuille sur laquelle doit être réalisée la mesure dépend du stade de la plante. Elle correspond en général à la dernière feuille ligulée.

Il est à noter que Yara ne conseille d'utiliser le N-Tester sur blé tendre d'hiver que du stade deux noeuds au stade dernière feuille ligulée. Sur ce projet, nous avons toutefois étendu son domaine d'utilisation au tallage et à la floraison., les mesures à ces stades étant peu nombreuses.



Etat du couvert au 06 mars, pour la première mesure. A ce stade, le HN-Tester® entre dans son domaine de validité.

Annexe 6 : Protocole pour la récolte

Prélèvement de biomasse en bottillon sur les parcelles prélèvements

- Découper au niveau du sol avec un sécateur 50 tiges par microparcelle. Cette coupe doit être réalisée pour toutes les répétitions par bloc des modalités S0, S1, S2, S3 et S7. Pour chaque couple de blocs et de modalités, placer le bottillon dans un sac étiqueté
- Une fois à la station, enlever les bottillons des sacs en récupérant tous les épis et les feuilles au fond du sac. Couper les épis à leur base, et les sécher à l'étuve à 80°C pendant 48 h, puis les compter par bloc et modalité et les peser. De même, il faut peser et compter les tiges seules après passage à l'étuve.
- Battre les épis à la batteuse électrique et récupérer les grains



Battage du grain

- Pour déterminer le PMG, il faut peser les grains et les compter par bloc et modalité
- Broyer les tiges avant de les envoyer pour analyse de la teneur en azote en laboratoire de la paille par modalité en notant son poids
- Envoyer les grains pour analyse de la teneur en azote en laboratoire par modalité

Reliquats azotés post-récolte

- Les modalités sur lesquelles sont réalisés ces reliquats sont S0, S1, S2, S3 et S7. Les horizons concernés sont 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm. Les conditions météorologiques doivent permettre d'utiliser la tarière. La mesure doit être réalisée le plus proche possible de la moisson
- Pour chaque modalité, prélever les trois horizons et les placer dans le bac correspondant à la bonne profondeur, répétitions groupées
- Les différents échantillons obtenus sont transvasés dans des sacs spécifiques avant d'être envoyés rapidement au laboratoire pour effectuer l'analyse



Tarière hydraulique utilisée pour le reliquat post-récolte

Récolte à la machine sur toutes les parcelles dédiées à la récolte

Pour toutes les modalités de chaque bloc, la machine mesure :

- Le rendement brut
- Le poids spécifique des grains
- L'humidité des grains
- Le taux de protéines des grains par infralyseur à la station
- Le poids de mille grains, après comptage des grains à la station



Moissonneuse batteuse expérimentale utilisée au Chaumoy (18)



Ecran de contrôle connecté de la moissonneuse batteuse expérimentale en cours d'utilisation

Annexe 7 : Récapitulatif des opérations effectuées sur le site du Chaumoy

Date	Stade	Mesures et simulations	Prélèvements	Apports
23/01			Reliquat Sortie Hiver	
01/02	Tallage			40 uN sur Bilan, X-40, X+40 et Farmstar, 80 uN sur étalon
04/02			Coupe biomasse S0*	
26/02	E 1.2C	1ere simulation CHN	Coupe biomasse S1*, S2*, S3* et S7*	
28/02		1ere mesure HNT		90 uN sur Bilan, X-40 et Farmstar, 100 uN sur X+40, 50 uN sur étalon
03/03	E1.5C			50 uN sur CHN et Alternative
06/03	E1.7C	2 ^e mesure HNT		
09/03	E2C			40 uN sur APPI-N
16/03	1 Nœud	2 ^e simulation CHN		50 uN sur étalon
17/03	Confinement			
23/03		3 ^e simulation CHN		
25/03		3 ^e mesure HNT		60 uN sur CHN et Alternative, 80 uN sur APPI-N
30/03		4 ^e simulation CHN		
02/04	2 Nœuds		Coupe biomasse S1*, S2*, S3* et S7*	65 uN sur Bilan, 40 sur Farmstar, 25 sur X-40, 95 sur X+40, 50 sur étalon
06/04		5 ^e simulation CHN		
13/04		6 ^e simulation CHN		
16/04	DFE	4 ^e mesure HNT		60 uN sur CHN et Alternative, 80 uN sur APPI-N
27/04		7 ^e simulation CHN	Coupe biomasse S1*, S2*, S3* et S7*	
28/04				40 uN sur Bilan, X-40 et X+40, 50 sur Farmstar, 50 sur étalon
04/05		8 ^e simulation CHN		10 uN sur CHN et Alternative
11/05	FLO	9 ^e simulation CHN		
12/05			Coupe biomasse S0*, S1*, S2*, S3* et S7*	
15/05	Déconfinement			
18/05		5 ^e mesure HNT	Comptage des épis	
25/05		10 ^e simulation CHN		
01/07	Récolte			
03/07			Reliquat post-récolte	

Annexe 8 : Synthèse des mesures réalisées sur le site du Chaumoy (18)

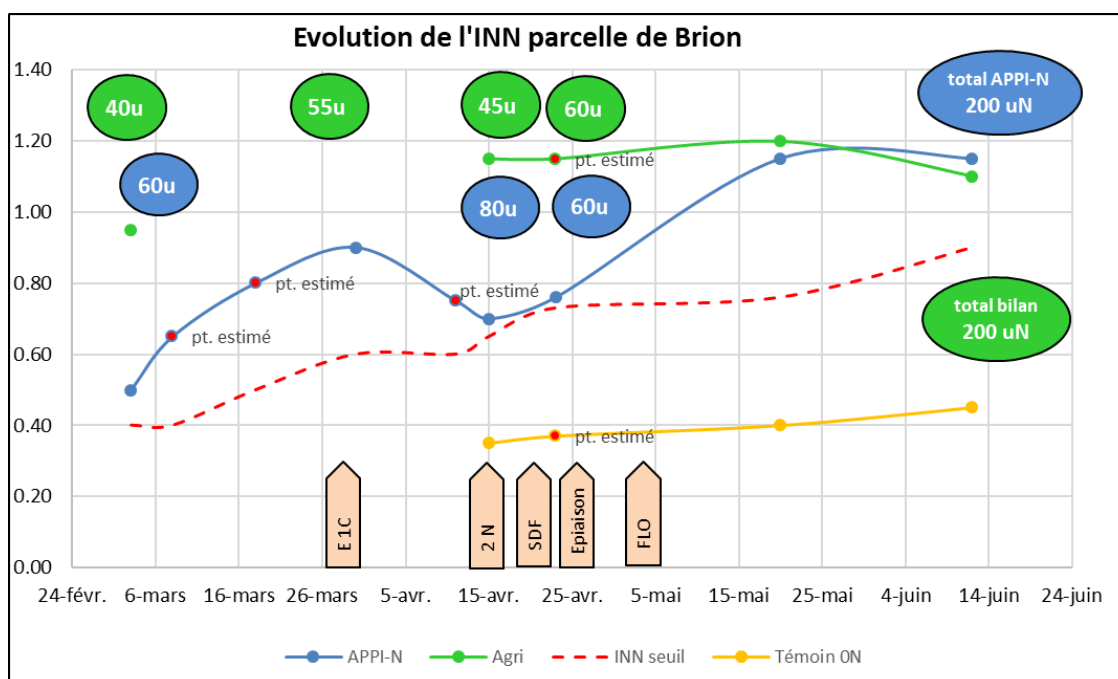
Mesure Pince N-tester sur parcelle du Chaumoy, Le Subdray (18)											Conseil Abaque
Date	Stade	Modalité	Bloc I	Bloc II	Bloc III	Bloc IV	Moyenne Surfertilisée	Moyenne Bloc	Ratio	INN	
28/02/2020	E1.5C	APPI-N	537	561	540	547	612	546	0.89	0,7 - 0,8	pas d'apport
	E1.5C	APPI-N	538	571	550	565	629	556	0.88	0,7 - 0,8	pas d'apport
	E1.5C	APPI-N	544	556	549	573	617	556	0.90	0,7 - 0,8	pas d'apport
	E1.5C	APPI-N	548	570	556	562	632	559	0.88	0,7 - 0,8	pas d'apport
06/03/2020	1N	APPI-N	554	561	527	549	650	548	0.84	0,6 - 0,7	40 uN
	1N	Bilan	590	590	600	566	650	587	0.90	0,7 - 0,8	
25/03/2020	2N	APPI-N	675	639	654	616	759	646	0.85	0,6 - 0,7	80 uN
16/04/2020	DFE	APPI-N	676	651	658	630	771	654	0.85	0,6 - 0,7	80 uN
06/05/2020	EPI	APPI-N	745	763	776	793	754	769	1.02	1,1 - 1,2	pas d'apport
18/05/2020	FLO	APPI-N	790	776	776	787	794	782	0.99	1,1 - 1,2	pas d'apport
	FLO	Bilan	768	759	774	787	794	772	0.97	1,0 - 1,1	
	FLO	Témoin	516	459	480	528	794	496	0.62	<0,6	
	FLO	CHN		779		780	794	780	0.98	1,1 - 1,2	
	FLO	Alternative		784		788	794	786	0.99	1,1 - 1,2	



Etat d'une microparcelle de garde surfertilisée servant d'étalon au 18 mai

Annexe 9 : Essais en bande 2020 chez les agriculteurs

En 2020, Axérial a implanté 3 essais en lien avec le projet SOLINAZO chez des agriculteurs. L'objectif est de comparer avec les agriculteurs les modalités APPI-N et bilan et de recueillir leur avis sur ces méthodes. Ces essais sont conduits en bandes, adaptées au matériel de chaque agriculteur. On a ainsi une bande pilotée grâce aux mesures de HN-Tester®, une bande non fertilisée et un carré surfertilisé qui servira d'étalon. Le reste du champ est piloté en suivant les recommandations de la méthode du bilan. L'année 2020 a toutefois été particulière du fait de la COVID-19. Les mesures n'ont pas pu être aussi rapprochées que d'habitude du fait du nombre limité de pinces et les déplacements limités des opérateurs n'ont pas facilité la régularité des visites de parcelle. Toutefois, l'un des trois essais a pu être piloté convenablement. Cet essai est situé à Brion, dans l'Indre (36). Les deux autres essais, situés dans l'Indre également et dans le Loir-et-Cher n'ont pas pu être suivi de la même manière, notamment au niveau des mesures au N-Tester. Le pilotage a donc été moins précis et donc plus difficilement exploitable.



La figure ci-dessus donne un exemple de pilotage réalisé pour l'année 2020. En termes de rendement, l'objectif de cet agriculteur était de 75 q/ha. Cet objectif n'a pas été atteint du fait des conditions de culture difficiles. Sur cet essai, l'agriculteur a atteint 71 q/ha avec la méthode du bilan contre 66 avec la méthode APPI-N. Cet écart d'environ 5 quintaux correspond aux observations issues des essais en microparcelle. Les données concernant la protéine ne sont pas encore disponibles. Malgré tout, les agriculteurs se sont révélés intéressés par la méthode APPI-N, notamment par son adaptabilité. Toutefois, les rendements inférieurs et le manque de précipitations fréquent lors des apports tardifs constituent les principaux freins identifiés. Les années précédentes, les résultats étaient du même genre, avec un rendement normalisé inférieur de 3 à 9 quintaux pour la méthode APPI-N selon les exploitations. Les agriculteurs restent néanmoins intéressés par la méthode APPI-N. En effet, cette méthode apparaît comme plus adaptable et mobilise moins d'engrais que la méthode du bilan. Toutefois, les mesures au HN-Tester® ne sont pas adaptées à un usage par les agriculteurs. Il convient donc de développer des formes d'utilisations plus ergonomiques.

Annexe 10 : Projet CHN filière blé dur

Durant ce stage, j'ai également eu l'opportunité de suivre un essai implanté dans le cadre d'un autre projet, le projet CHN-blé dur lié à Arvalis et débuté en 2016. Ce projet a pour but d'évaluer les capacités du modèle CHN en matière d'aide à la décision sur le pilotage de la fertilisation azotée du blé dur. Ainsi, les différents acteurs du projet ont mis en place chaque année 6 essais au total dans la région. Axérial a implanté son essai à Bessay (28). L'essai est localisé sur la carte ci-dessous. Cet essai se situe à proximité de Chartres et de Châteaudun chez un agriculteur. Le sol y est limono-argileux avec un sous-sol calcaire. La culture précédente était constituée de betterave sucrière et le semis du blé dur a été effectué le 22 novembre 2019 avec 370 grains/m². La variété sélectionnée est la variété Voilur. Il s'agit d'un blé dur précoce, à fort rendement et à fort taux de protéines. Elle est de plus résistante à la rouille, l'oïdium, la septoriose et évite la verse grâce à sa courte hauteur de paille.



L'essai mis en place permet de tester 10 modalités résumées ci-dessous. Les modalités de X-80 à X+80 sont destinées à fournir la courbe de réponse du blé dur à l'azote.

Modalité	Numérotation	Description
Témoin	1	Pas de fertilisation
X-80	2	Méthode du bilan avec 80 unités de moins au 2 ^e apport
X-40	3	Méthode du bilan avec 40 unités de moins au 2 ^e apport
X	4	Méthode du bilan
X+40	5	Méthode du bilan avec 40 unités de plus au 2 ^e apport
X+80	6	Méthode du bilan avec 80 unités de plus au 2 ^e apport
CHN 0,9	7	Simulation CHN avec objectif d'INN de 0,9 à floraison
CHN 1,0	8	Simulation CHN avec objectif d'INN de 1,0 à floraison
APPI-N	9	Mesure d'INN au HN-Tester et utilisation d'un abaque blé dur INRAE
Mixte	10	Calcul d'INN par CHN et utilisation d'un abaque blé dur INRAE

Les modalités 7 et 8 fonctionnent grâce au même système que la modalité CHN du projet SOLINAZO. Les données d'entrées sont saisies régulièrement et intégrées à un site internet Sitar pour que le modèle CHN tourne. Les sorties sont du même type que sur le projet SOLINAZO sur blé tendre. Les dates et les doses sont indiquées par ces sorties selon l'INN prédit. Comme sur le projet sur blé tendre, l'apport est calculé pour éviter d'atteindre la courbe d'INN seuil déterminée grâce à la thèse de Clémence Ravier et pour atteindre l'objectif d'INN fixé en début de campagne. Comme pour le projet précédent, deux objectifs d'INN ont été choisis, avec un objectif à floraison de 0,9 pour la modalité 7 et un objectif de 1,0 pour la modalité 8.

Le plan de l'essai est le suivant :

Garde surf	7*	9	5	10*	2	8*	4	10	6	1	9*	8	3	7	4*	Garde
Garde surf	6	10	4*	8*	3	8	9*	2	10*	7	4	7*	5	1	9	Garde
Garde surf	7	8	10*	9*	7*	10	1	9	4*	3	5	2	8*	6	4	Garde
Garde surf	1	2	3	4	4*	5	6	7	7*	8	8*	9	9*	10	10*	Garde

Cet essai est un essai en bloc complet, avec 4 répétitions. Les modalités sont réparties selon une randomisation totale sauf pour le 1^{er} bloc. Les parcelles prélèvements ne sont pas à côté des parcelles destinées à la récolte, au contraire du projet SOLINAZO. Cela concerne les modalités 4, 7,8,9 et 10.

Ces parcelles de prélèvements sont destinées aux prélèvements de biomasse et aux reliquats pour éviter de réaliser des mesures destructives dans la parcelle rendement.

L'essai est encadré par des parcelles de garde dont certaines sont surfertilisées à hauteur de 50 uN/ha toutes les 3 semaines. Elles servent d'étalon pour les mesures au N-Tester de la modalité 9.

L'ensemble des acteurs ont en commun les modalités 1, 2, 3,4,5,6,7 et 9. Les modalités 8 et 10 sont testées à l'initiative d'Axéreal. Toutefois, du fait de résultats décevants les années précédentes, la modalité 10 a été abandonnée rapidement après l'implantation du blé dur. Cette modalité n'a donc pas reçu d'azote comme le témoin. De plus, avec le problème de COVID-19, la modalité 9 a également dû être abandonnée du fait de la difficulté du suivi de l'INN du couvert.

Un reliquat de sortie d'hiver a été réalisé sur trois horizons de 0 à 90 cm de profondeur, nécessaire pour le calcul du bilan. La modalité 4 doit ainsi recevoir 250 uN selon cette méthode. Les prélèvements de biomasse, les dates de stade ou les reliquats permettent de forcer les courbes du modèle CHN pour qu'il prenne en compte l'état réel du couvert.

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux apports réalisés pour les différentes modalités. Ils sont résumés dans le tableau ci-dessous.

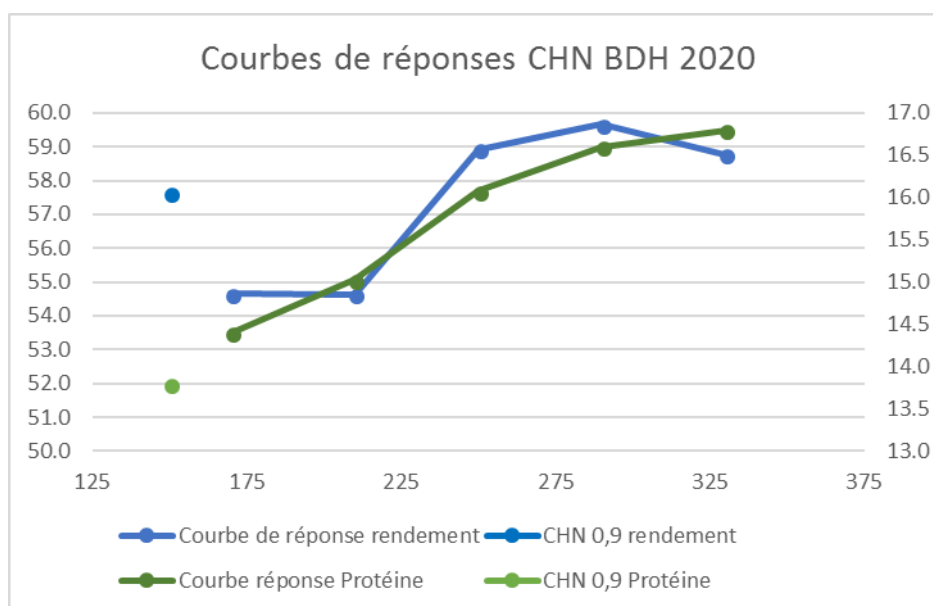
Stades	Témoin	X-80	X-40	X	X+40	X+80	CHN 0,9	CHN 1,0
Tallage (15/03)		40	40	40	40	40	30	30
Tallage (30/03)							30	30
E1C (10/04)		90	90	90	90	90		
2N (20/04)			40	80	80	80	70	70
2N (01/05)					40	80		
DFE (10/05)		40	40	40	40	40	20	20
Dose totale	0	170	210	250	290	330	150	150

La nouvelle méthode testée permet donc bien de limiter la quantité d'azote apportée, avec 100 uN de moins que la dose bilan. Les apports ont été assez répartis, avec 60 uN en début de campagne entre le 17 et le 25 mars. Le nombre de passage reste cependant le même que pour le bilan.

On rencontre néanmoins les mêmes problèmes que dans le projet SOLINAZO pour comparer les modalités 7 et 8, puisque le modèle fournissait les mêmes conseils d'apport aux mêmes dates. Ces deux modalités sont devenues identiques. Les apports du bilan sont importants au mois d'avril, avec 170 uN, soit l'équivalent de toute la dose CHN.

Modalité	Rendement (15%)	Protéine	PMG	Poids spécifique	Grain/m ²	CAU
Témoin	28,1	10,3	43,7	82,1	6 430	
X-80	54,6	14,4	48,1	82,4	11 351	0,52
X-40	54,6	15,0	47,5	82,7	11 500	0,45
X	58,9	16,1	45,9	82,8	12 846	0,47
X+40	59,7	16,6	50,1	82,0	11 911	0,43
X+80	58,8	16,8	49,5	81,9	11 885	0,38
CHN 0,9	57,6	13,8	48,6	82,8	11 862	0,60



Les résultats de l'essai 2020 pour l'essai d'Axérial sont présentés dans le tableau ci-dessus. On constate des rendements similaires entre la modalité CHN 0,9 et la modalité bilan, avec 1,3 q/ha de différence, différence non significative. Toutefois, en comparant à la dose d'azote apportée, on peut construire la courbe de réponse à l'azote pour la modalité bilan. Il apparaît que la méthode CHN ait un bien meilleur résultat à dose comparable que la méthode du bilan comme le montre le graphique ci-dessous. Cela se remarque aussi au niveau des CAU, faible cette année du fait de la forte sécheresse du printemps ne permettant pas de valoriser au mieux les apports réalisés entre avril et mai. Les conditions de mise en culture ayant été particulièrement difficiles cette année, l'objectif de rendement de 78 q/ha n'a pas pu être atteint sur l'essai. La culture a en effet souffert d'un semis en condition très humide, d'attaques de pucerons dues à un hiver très doux suivi d'un printemps très sec. La méthode CHN a toutefois obtenu de plutôt bons résultats dans ces conditions comparativement à la méthode du bilan en termes de rendement. Concernant la protéine, le résultat est toutefois inférieur, avec près de 2 % d'écart entre la modalité X et la modalité CHN.



La synthèse des essais de 2016 à 2020 ne m'étant pas disponible, la comparaison à l'échelle régionale n'est pas possible pour le moment. Toutefois, en comparant avec les résultats des années précédentes sur les essais Axérial, on constatait des écarts de rendements plus importants en faveur du bilan, mais des taux de protéines comparables. Les doses apportées étaient en revanche du même ordre de grandeur, avec des écarts allant jusqu'à 120 uN entre bilan et CHN.

Annexe 11 : Base de résultats régionaux disponibles sur le projet SOLINAZO pour les modalités bilan et APPI-N

		Bilan				APPI-N			
		Dose (uN/ha)	Rendement normalisé (15%) (q/ha)	Teneur en protéine (%)	CAU (%)	Dose (uN/ha)	Rendement normalisé (15%) (q/ha)	Teneur en protéine (%)	CAU (%)
Arvalis	Binas	200	96,1	12,3	69	120	88,3	10,55	80
	Thiz	205	97,5	12,1	102	160	98,9	10,15	99
Axereal	Le Chaumoy	170	95	11,2	99	140	92,6	11,1	116
	Tigy	190	93,5	12,5	88	160	89,4	12,9	103
CA 28	Laons	230	97,4	12,5	88	160	90,3	12,75	105
	Mondonville	150	80,5	11,8	88	180	88,3	12,45	119
CA 36	Diors	170	80,5	12,0	79	200	80,3	12,9	62
	Rivarenes	130	51,7	12,4	46	120	47,5	12,3	35
CA 37	Fondettes	185	74,2	13,2	118	160	76	12,2	99
	Marigny	200	83,5	11,8	80	160	76,6	11,675	92
CA 41	Fosse	130	75,9	12,0		120	70,9	11,6	
	Mazange	140	76,7	11,8		120	77,6	12,5	
CA 45	Chatillon	173	69,2	12,6	71	80	59	10,35	93
	Pithiviers	260	75	15,7	97	80	59,3	11,4	99
FDGEDA	Laverdies	160	67,8	10,9	70	180	73,6	12,1	88
	Senecay	186	78	12,0	87	140	68,2	9,63	76
SCAEL	Sours	195	100,5	11,0	76	140	91,8	9,7	71
Arvalis	Ouzouer sud	160	103,9	13,0	81	140	104,5	12,7	81
	Ouzouer est	160	113,7	10,7	97	180	113,4	11,2	96
	thyzays	190	77	11,7	63	180	79,6	11,4	67
Axereal	Le Chaumoy	150	97,2	11,1	77	120	94,2	11,4	79
	Bonneval	220	102,8	13,0	88	150	91,8	12,3	111
CA 41	Authon	130	65	10,4	78	140	65,5	10,7	75
	Morée	135	75,6	11,2	74	140	66,4	9,9	62
CA 28	Illier combray	207	98,3			120	82,7		
	Fontaine les ribouts	167	82,2	9,5	64	200	90,8	9,6	65
CA 45	Rouvre st jean	154	107,9	11,9	92	120	101,9	10,3	53
	Varenes	220	101,8	11,9	89	120	85,9	9,7	91
CA 36	Fesceaux	140	86,1	12,8	83	140	86,3	12,8	80
	Jeaneau	180	99,4	12,9	102	120	93,8	11,7	120
FDGEDA	Laverdines	146	84,5	10,7	96	140	83,8	12,4	99
	Senecay	191	51,1	10,6	40	140	51,6	10,9	59
SCAEL	Sours	160	102,8	11,2		180	101	12,1	
CA 37	Crotelles	100	105	12,1	104	93	105	12	117
	Loche sur indrois	195	69,6	10,9	76	140	62,9	9,9	73
SCAEL	Sours	165				80			
Arvalis	Ouzouer	160				140			
CA 41	Danzé	135				160			
	Moisy	200				200			
CA 45	Sougy	201				100			
	Sandillon	159				140			
CA 28	Bonneval	180				140			
	Brunelles	170				180			
FDGEDA	Laverdines	145				140			
	Senecay	154				160			
	Thizay	200				160			
Axéreal	Le Chaumoy	235				200			
	Nouzilly	150				120			
CA 37	Chedigny	136				120			
	Fesneau	200				120			

 	Diplôme : Ingénieur de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement Spécialité : Sciences et Ingénierie du Végétal Spécialisation : Ingénierie des agrosystèmes : Conception et Evaluation Enseignant référent : Matthieu CAROF
Auteur : Antoine RABIER Date de naissance* : 28/06/1997	Organisme d'accueil : AXEREAL Adresse : 36 rue de la manufacture CS 40639, 45166 OLIVET Maître de stage : Ricardo BIDEAIN
Nb pages : 25 pages ; Annexe(s) : 18 pages	
Année de soutenance : 2020	
Titre français : Validation d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée sur blé tendre d'hiver Titre anglais: Validation of a new method of nitrogen fertilization thinking on winter wheat	
Résumé (1600 caractères maximum) : <p>A la suite des travaux de Clémence Ravier en 2017, un nouveau raisonnement de la fertilisation azotée sur blé tendre est apparu pour pallier les limites de la méthode du bilan prévisionnel. Ce nouveau raisonnement, le pilotage intégral, repose sur une adaptation des apports aux besoins de la plante grâce à un suivi de l'état azoté des plantes tout au long de l'année. Le but de ce pilotage est de limiter l'impact de la fertilisation sur l'environnement tout en gardant le même niveau de rendement. Grâce à ces travaux, l'INRAE et Arvalis ont développé deux nouvelles méthodes : APPI-N et CHN. APPI-N est basé sur des mesures d'INN via un N-Tester tandis que CHN fonctionne grâce à une modélisation.</p> <p>Ce rapport présente donc le suivi de l'essai mené par la coopérative Axéreal en 2020 ainsi que les résultats des essais menés au cours des deux années précédentes. Il apparaît que les méthodes APPI-N et CHN se caractérisent par une moindre quantité d'azote utilisée ainsi que par des apports plus tardifs. Après trois années d'essais, ces méthodes ont pu être testées 5 fois par la coopérative dans des conditions pédoclimatiques différentes. Les résultats de ces essais montrent que des progrès restent à faire en termes de productivité et de performance économique. En revanche, elles sont plus respectueuses de l'environnement grâce à leur meilleure utilisation de l'engrais et une quantité totale moindre. Des ajustements doivent donc être réalisés et l'étude devrait se poursuivre sur d'autres cultures. Ces méthodes devront alors être adaptées en vue de leur utilisation par les agriculteurs.</p>	
Abstract (1600 caractères maximum) : <p>Following the work of Clémence Ravier in 2017, a new reasoning for fertilization of winter wheat appeared to overcome the limits of the balance sheet method. This new way, the integral management, is based on the adaptation of the inputs to the needs of the plant by monitoring the nitrogen status of plants throughout the year. The purpose of this management is to limit the impact of fertilization on the environment while preserving the same level of yield. Thanks to this work, INRAE and Arvalis developed two new methods: APPI-N and CHN. APPI-N is based on INN measures thanks to a N-Tester while CHN works through modelisation.</p> <p>This report presents the follow-up of the trial carried out by the Axéreal cooperative in 2020 as well as the results of the trials carried out over the previous two years. It appears that the APPI-N and CHN methods are characterized by a lower quantity of nitrogen used as well as by later inputs. After three years of trials, these methods could be tested 5 times by the cooperative under different pedoclimatic conditions. The results of these trials show that progress remains to be made in terms of productivity and economic performance. But they are more respectful of the environment thanks to their better use of fertilizer and a lower total quantity. Adjustments must therefore be made, and the study should continue with other crops. These methods will then have to be adapted for use by farmers.</p>	
Mots-clés : fertilisation azotée, blé tendre d'hiver, méthode du bilan, APPI-N, CHN, Indice de Nutrition Azotée, innovation, N-Tester Key Words: nitrogen fertilization, winter wheat, balance sheet method, APPI-N, CHN, Nitrogen Nutrition Index, innovation, N-Tester	

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires